

# A utilização de resíduos de pneus inservíveis em argamassa de revestimento

José Aparecido Canova<sup>1\*</sup>, Rosangela Bergamasco<sup>2</sup> e Generoso De Angelis Neto<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil. <sup>2</sup>Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná, Brasil. <sup>3</sup>Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná, Brasil. \*Autor para correspondência. E-mail: jacanova@uem.br

**RESUMO.** Este trabalho avalia uma argamassa de revestimento com resíduos de pneus inservíveis, produzida com cimento, cal virgem e areia, no traço 1: 1,5: 9 (em volume) e adição de pó de borracha moída, nas proporções 0, 6, 8, 10 e 12% do volume de agregado. Avaliou-se a massa específica, o teor de ar incorporado e a retenção de água no estado plástico e em corpos de prova cilíndricos, a resistência à compressão axial, a resistência à tração por compressão diametral, o módulo de deformação estática e a absorção de água por imersão no estado endurecido; e a resistência de aderência à tração e a fissuração em corpos de prova aplicados sobre substrato. A argamassa com resíduo apresentou menores incidências de fissuras no revestimento, redução no módulo e na resistência e aumento no teor de ar incorporado. O produto estudado é uma alternativa que contribui para a redução de fissuras em revestimentos argamassados.

**Palavras-chave:** resíduo de pneus, argamassa de revestimento, fissuração, módulo de deformação.

**ABSTRACT. The use of scrap rubber tire residues in finishing mortar for construction.** This work evaluates a finishing mortar containing residues of discarded rubber tires, produced with cement, lime and sand, in a ratio of 1:1.5: 9, mixed by volume, with the addition of crushed rubber powder in the proportions of 0, 6, 8, 10 and 12% of aggregate volume. Specific mass, the level of air content and water retention were evaluated in the plastic state. In cylindrical specimens, the axial compressive strength, traction resistance by diametral compression, static deformation module and water absorption by immersion were evaluated in the dry state; and the tensile bond strength and the fissuration in the specimens applied on substratum. The mortar with tire residues presented lower incidences of visible fissures in the finishing, reduction in the deformation module and resistance, and an increase in the level of air content. The studied product is an alternative that can contribute to the reduction of fissures in cemented coverings.

**Key words:** tire residue, finishing mortar, fissuration, deformation module.

## Introdução

A Resolução Conama nº 301/02 considera como pneu ou pneumático inservível aquele que não é mais útil ao processo de reforma que permite a condição de rodagem adicional. O pneu é um produto não-biodegradável e encontra-se em estado sólido. A NBR 10.004:2004 considera o rejeito de borracha de pneus como resíduo não-perigoso – Classe II.

A grande quantidade de pneus descartados, no Brasil e no mundo, fez com que este se constituísse num problema de impacto ambiental, em função da sua durabilidade bem como da sua forma. Os pneus descartados, quando deixados em locais inadequados, causam riscos à saúde pública com a proliferação de mosquitos e à qualidade de vidas humanas quando queimados, ocasionando poluição

do ar pela fumaça e do lençol freático que pode ser contaminado pelo óleo (Oda, 2000; Cimino, 2004).

Como as fibras de borracha são muito resistentes à degradação do meio, a disposição dos pneus inservíveis inteiros torna-se incompatível com os aterros sanitários, pois os pneus dificultam a compactação pela sua baixa compressibilidade, reduzindo a vida útil dos aterros e podendo provocar o escorregamento do lixo, além de acúmulo de gases no seu interior (D'Almeida e Sena, 2000).

A recuperação de pneus é um processo que, por meio de recursos mecânicos e químicos, converte a borracha vulcanizada num material leve capaz de ser facilmente incorporada, com vantagens específicas tanto físicas quanto mecânicas. Consiste na simples trituração dos pneus descartados os quais são reduzidos a pó fino (Cheater, 1975). Para o processamento dos

pneumáticos inservíveis, o Brasil dispõe de tecnologia em escala industrial para produzir borracha regenerada por processo a frio. Possui, também, tecnologias que empregam solventes capazes de separar o tecido e o aço dos pneus, permitindo o seu reaproveitamento (Cempre, 2004).

Na Engenharia, a utilização de pneumáticos inservíveis triturados vem destacando-se na utilização em pavimentação asfáltica como ligante, por ser benéfico aos pavimentos, melhorando as propriedades de resistência ao acúmulo de deformação (maior rigidez à elevadas temperaturas) e de resistência à formação de trincas por fadiga (maior elasticidade) (Oda, 2000).

As argamassas estão sujeitas a variações dimensionais quando aplicadas como revestimento de fachadas, exposto ao intemperismo. Uma das manifestações de desempenho inadequado à fissuração ocorre em consequência dessas variações dimensionais.

A ocorrência de fissuras decorre da elasticidade e resistência à tração inadequada diante das tensões de tração resultantes da retração de secagem, retração térmica ou ações externas ao revestimento. A adequação da elasticidade e resistência à tração não significa a total inexistência de fissuras, mas, a ocorrência de fissuras microscópicas (Cincotto et al., 1995).

A borracha, por ser um material altamente elástico, tem a tendência de contribuir para melhor adequação da elasticidade e com isso melhorar o desempenho com relação à fissuração.

São recentes os estudos realizados com resíduos de borracha de pneus inservíveis em materiais à base de cimento. No concreto, as pesquisas foram iniciadas por Eldin e Senouci (1993) e Ali et al. (1993). Estes pesquisadores verificaram quedas nas propriedades mecânicas do concreto. Por outro lado, Topçu (1995) e Toutanji (1996) observaram que o concreto com adição de agregado borracha apresentou comportamento elástico. Outros autores Hernandez-Oliveira e Barluenga (2004) e Güneyisi et al. (2004) trabalharam com adições de borracha juntamente com sílica ativa e verificaram também quedas acentuadas nas propriedades mecânicas do concreto.

Os estudos com pó de borracha apenas com a pasta de cimento foram iniciados por Lee et al. (1993). Estes autores observaram que a resistência à tração do material em que se utilizou 5% de pó de borracha diminuiu 18% e decresceu com o aumento da percentagem de borracha de pneus. A incorporação de resíduos de borracha em argamassa resistente, com cimento e areia, foi iniciada por Raghavan e Huynh (1998). Outros trabalhos foram realizados com incorporação de agregados borracha em argamassa resistente, entre eles, o de Turatsinze

et al. (2005). Todos estes autores verificaram queda nas propriedades mecânicas da argamassa, sendo que, no último trabalho, foi dada maior ênfase à redução no módulo de deformação.

No Brasil, pode ser citado o trabalho de Segre (1999) com pó de borracha em pasta de cimento e os trabalhos de Meneguini (2003) e o de Segre (2004) com argamassa de cimento e areia. Estes pesquisadores trataram a borracha para criar aderência com a matriz de cimento, obtendo resultados satisfatórios. Canova et al. (2005) iniciaram estudos com adição de pó de borracha em argamassa de revestimento. Os resultados obtidos pelos autores foram favoráveis quanto ao desempenho do produto.

A argamassa de revestimento, que tem a composição de cimento, cal e areia, não possui características de suportar elevadas cargas, como é o caso do concreto e das argamassas de cimento e areia, mas, de absorver deformações e apresentar baixo módulo de deformação, entre outras.

A partir de tais colocações, o objetivo deste trabalho é avaliar propriedades dessa argamassa de revestimento com a incorporação de pó de borracha de pneus inservíveis, principalmente quanto à redução na fissuração, além de envolver a questão ambiental.

## Material e métodos

Para a composição básica da argamassa de revestimento, empregam-se o cimento *Portland*, a cal virgem comum e a areia fina lavada de rio (agregado miúdo). Estes componentes são utilizados na argamassa de referência (controle) e têm como adição o pó de borracha moída de pneus inservíveis.

A descrição dos materiais e suas respectivas caracterizações são apresentadas separadamente.

### Agglomerantes e agregados

- Cimento *Portland* composto Classe 32 (CP II Z – 32): este cimento adotado é encontrado com facilidade no mercado da construção civil e é utilizado em casos correntes, nas quais não se exige nenhuma propriedade especial do concreto ou argamassa.

- Cal virgem em pó tipo CV – C (Cal virgem comum): a cal utilizada é a dolomítica, produzida no Sul do Estado do Paraná, com composição quantitativa, de dolomito puro, constituído de 55,2% de carbonato de cálcio e 44,8% de carbonato de magnésio.

- Areia fina lavada de rio: com uso largamente difundido em obras para a produção de argamassas.

### Resíduo sólido

- Pó de borracha de pneus inservíveis, diâmetro

inferior a 0,5 mm, fornecido pela empresa Relastomer Tecnologia e Participações S.A., cujo processo de reciclagem tem como característica básica recuperar borrachas vulcanizadas a baixas temperaturas (máximo de -80°C). Com a utilização de um catalisador heterogêneo, a separação da borracha e do aço é feita por magnetismo.

#### Caracterização do agregado e dos aglomerantes

Nas Tabelas 1, 2 e 3 são apresentadas as caracterizações dos constituintes da argamassa.

**Tabela 1.** Características físicas e mecânicas do cimento *Portland* (CP II Z - 32).

| Tipos de ensaio                             | Resultados                  | Limites<br>CP II Z - 32 | Norma                  |
|---------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------|
| Tempo de pega                               | início<br>fim               | 2h50min<br>7h18 min     | ≥ 1 hora<br>≤ 10 horas |
| Consistência normal                         | relação a/c = 0,30          | -                       | NBR 7215/96            |
| Finura # n° 200 (% retida)                  | 1,62                        | ≤ 12                    | MB 3432/94             |
| Massa unitária (g cm <sup>-3</sup> ) sem ar | 1,45                        | -                       | NBR 6474/84            |
| Massa específica (g cm <sup>-3</sup> )      | 3,09                        | -                       | NM 23/98               |
| Resistência à compressão (MPa)              | 3 dias<br>7 dias<br>28 dias | 19,6<br>23,8<br>34,7    | 10<br>20<br>32         |

**Tabela 2.** Características físicas e químicas da cal virgem em pó dolomítica.

| Tipos de ensaios                            | Resultados | Limites CV-C | Norma       |
|---------------------------------------------|------------|--------------|-------------|
| Massa unitária (g cm <sup>-3</sup> )        | 0,96       | -            | NBR 6476/84 |
| Massa específica real (g cm <sup>-3</sup> ) | 3,10       | -            | NM 23/98    |
| Finura # (% retida)                         | -          | -            | NBR 9289/98 |
| Peneira n° 30                               | 0,7        | ≤ 5,0        | NBR 9289/98 |
| Peneira n° 200                              | 0,22       | ≤ 30         | NBR 9289/98 |
| Perda ao fogo (%)                           | 5,6        | -            | NBR 6453/88 |
| Resíduos insolúveis (%)                     | 9,6        | ≤ 10         | NBR 9289/98 |
| CaO (%)                                     | 49,6       | -            | NBR 9289/98 |
| MgO (%)                                     | 35,20      | -            | NBR 9289/98 |
| CaO + MgO não-voláteis (%)                  | 89,8       | ≥ 88         | NBR 9289/98 |
| Água combinada                              | 3,6        | ≤ 4,0        | NBR 9289/98 |
| CO <sub>2</sub> (%)                         | 2,0        | ≤ 12         | NBR 9289/98 |
| CO <sub>2</sub> residual (%)                | 2,5        | -            | NBR 9289/98 |

**Tabela 3.** Características físicas do agregado miúdo – areia fina lavada de rio.

| Tipos de ensaio                             | Resultados            | Norma                |
|---------------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Massa unitária (g cm <sup>-3</sup> )        | 1,55                  | NBR 6476/84          |
| Massa específica real (g cm <sup>-3</sup> ) | 2,63                  | Método picnometro    |
| Composição granulométrica                   | Peneiras (mm)         | % Retidas acumuladas |
|                                             | 6,3                   | 0                    |
|                                             | 4,8                   | 0                    |
|                                             | 2,4                   | 0                    |
|                                             | 1,2                   | 1                    |
|                                             | 0,6                   | 7                    |
|                                             | 0,3                   | 67                   |
|                                             | 0,15                  | 99                   |
|                                             | D <sub>máx</sub> (mm) | 1,2                  |
|                                             | Módulo de finura      | 1,74                 |
| Volume de vazios da areia                   | 411 l m <sup>-3</sup> | NBR 7217/87          |

#### Caracterização do resíduo sólido (pneus inservíveis)

Os resultados dos ensaios realizados para o resíduo sólido são apresentados nas Tabelas 4, 5, 6 e 7 e Figura 1.

**Tabela 4.** Análise química do pó de borracha por espectrometria – massa (%).

| Amostra        | Valores obtidos |       |      |      |                  |      |                               |
|----------------|-----------------|-------|------|------|------------------|------|-------------------------------|
|                | Massa (%)       |       |      |      |                  |      |                               |
| Pó de borracha | C               | MO    | CaO  | MgO  | K <sub>2</sub> O | Al   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |
|                | 53,18           | 96,79 | 3,34 | 1,96 | 0,26             | 0,06 | 0,003                         |

**Tabela 5.** Análise química do pó de borracha por espectrometria – massa (mg kg<sup>-1</sup>).

| Amostra        | Valores obtidos              |       |    |        |        |    |           |      |
|----------------|------------------------------|-------|----|--------|--------|----|-----------|------|
|                | Massa em mg kg <sup>-1</sup> |       |    |        |        |    |           |      |
| Pó de borracha | Fe                           | Cu    | Mn | Zn     | Pb     | Cd | Cr(total) | Ni   |
|                | 710,00                       | 52,60 | Nd | 646,00 | 108,00 | Nd | 32,00     | 4,00 |

Ao analisar os resultados da análise química (Tabela 5) verifica-se a existência de metais pesados no resíduo de borracha, como o chumbo e o cromo total, embora estes não apresentem valores muito expressivos, salienta-se que seriam recomendados estudos referentes à incorporação destes à argamassa de revestimento como, por exemplo, o ensaio de lixiviação que não foi realizado neste trabalho.

Os resultados do ensaio de termogravimetria do pó de borracha submetido à variação de temperatura de zero a 1.000°C, refletem as perdas de massa ocorridas nas inflexões da curva termogravimétrica (TG) necessárias para que acontecessem as dissociações dos compostos da borracha. A taxa de aquecimento para o ensaio de termogravimetria foi de 10°C min<sup>-1</sup>, e o volume de gás de arraste (Nitrogênio) de 20 mL min<sup>-1</sup>.

A perda de massa do pó de borracha em função do aumento da temperatura na análise termogravimétrica iniciou-se a partir de 195,94°C.

A Tabela 6 apresenta os resultados do conteúdo extraível e o total de enxofre na forma de sulfato S – SO<sub>4</sub>, extraído pelo método Fosfato Monocálcico no espectrofotômetro.

**Tabela 6.** Conteúdo extraível e total de enxofre do pó de borracha.

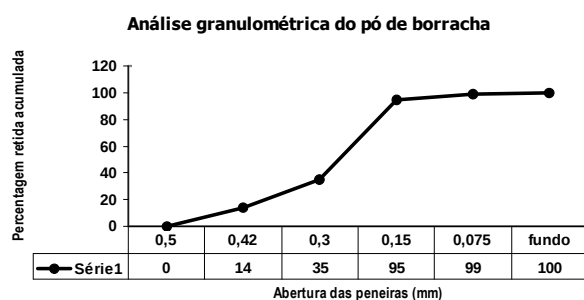
| S- SO <sub>4</sub> – Extraído pelo método Fosfato Monocálcico |                                   |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Tipo de determinação                                          | Quantidade (mg dm <sup>-3</sup> ) |
| Extraível na forma de sulfato                                 | 20,17                             |
| Total de enxofre na forma de sulfato                          | 40.117                            |

De acordo com a NBR 10004: 2004, o limite máximo no extrato em mg dm<sup>-3</sup> para o sulfato (expresso em SO<sub>4</sub>) é de 250 mg dm<sup>-3</sup>.

O resultado de 40.117 mg dm<sup>-3</sup> corresponde a

0,5% de enxofre na composição da amostra do pó de borracha a ser utilizado na pesquisa.

A análise granulométrica do pó de borracha foi determinada pelo ensaio manual, utilizando-se da série normal de peneiras com a amostra seca ao ar, conforme NBR 7.217: 1987. O resultado é apresentado na Figura 1 e da Tabela 7 que complementa outras características físicas.



**Figura 1.** Análise granulométrica do pó de borracha.

**Tabela 7.** Características físicas do pó de borracha.

| Tipos de ensaio                             | Resultados                 | Norma             |
|---------------------------------------------|----------------------------|-------------------|
| Massa unitária (g cm <sup>-3</sup> )        | 0,44                       | NBR 6476/84       |
| Massa específica real (g cm <sup>-3</sup> ) | 0,79                       | Método picnômetro |
| Composição granulométrica                   | Peneiras (mm) % R.A.       | NBR 7217/87       |
|                                             | 6,3 0                      |                   |
|                                             | 4,8 0                      |                   |
|                                             | 2,4 0                      |                   |
|                                             | 1,2 0                      |                   |
|                                             | 0,6 0                      |                   |
|                                             | 0,3 35                     |                   |
|                                             | 0,15 95                    |                   |
|                                             | D <sub>máx</sub> (mm) 0,42 |                   |
|                                             | Módulo de finura 1,33      |                   |
| Volume de vazios da borracha                | 443 l m <sup>-3</sup>      | NBR 7217/87       |

### Argamassa

Os experimentos foram desenvolvidos partindo-se de uma argamassa simples de cal virgem e areia fina lavada de rio no traço 1:6 (em volume). Segundo Guimarães (1997), na falta de indicações específicas, esta proporção é uma das mais usadas e aceitas por instituições técnicas respeitáveis.

O traço utilizado para argamassa composta foi 1:1,5:9 de cimento, cal virgem e areia (em volume) equivalente ao traço em massa 1:0,993:9,623. Como foi utilizada a cal virgem que apresenta uma maior concentração de óxido de cálcio (CaO) e de óxido de magnésio (MgO) – em torno de 27% – em relação à cal hidratada (Cincotto, 1977), a utilização da proporção 1:2,5 (aglomerante:agregado miúdo) em volume com cal virgem chega próximo da proporção 1:3 encontrada por Selmo (1989).

A argamassa simples de cal virgem e areia lavada fina com 2,46 dm<sup>3</sup> de água por kg de cal foi produzida, previamente, numa betoneira de eixo

inclinado com capacidade de 320 litros. Após ser misturada por 5 minutos e determinada a sua massa, ficou em maturação por sete dias em embalagens plásticas para hidratação da cal, tempo especificado pela NBR 7.200:1998.

Completada a maturação, determinou-se a massa da argamassa e procederam-se os ensaios com o acréscimo de cimento, sem a adição de pó de borracha e com os teores de 6, 8, 10 e 12% de pó de borracha, recebendo as denominações Am0 (Argamassa de controle), (Am6), (Am8), (Am10) e (Am12), respectivamente. Para a argamassa que engloba todos os teores, denominou-se (Amx).

A quantidade de água que foi acrescida à mistura, após adição de cimento e o pó de borracha, foi dimensionada a partir do índice de consistência padrão para argamassa no intervalo de (255 ± 10) mm, conforme especificação da NBR 13.276:1995.

### Propriedades medidas

As propriedades selecionadas e investigadas, neste estudo, foram avaliadas por ensaios de laboratório, normalizados pela ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Foram avaliadas a consistência, a massa específica e o teor de ar incorporado, além da retenção de água no estado plástico; a resistência à compressão axial, a resistência à tração por compressão diametral, o módulo de deformação estática e a absorção de água por imersão no estado endurecido; e a resistência de aderência à tração ao substrato.

### No estado plástico

- Consistência segundo a NBR 13.276:1995.
- Massa específica e teor de ar incorporado, conforme procedimento recomendado pela NBR 13.278:1995.
- Retenção de água, segundo a NBR 13.277:1995.

### No estado endurecido

Para os ensaios da argamassa no estado endurecido, foram moldadas séries de 6 (seis) corpos-de-prova (CPs) cilíndricos, com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura e ensaiados com 28 dias de idade.

- Resistência à compressão axial, de acordo com o procedimento da NBR 13.279:1995 e NBR 7.215:1982.
- Resistência por compressão diametral de corpos-de-prova à tração, conforme NBR 7.222:1994.
- Módulo de deformação estática, segundo a NBR 8.522:1984, plano de carga tipo I - tangente inicial.

- Absorção de água por imersão, de acordo com a NBR 9.778:1987.

- Resistência de aderência à tração em corpos-de-prova sobre substrato, segundo a NBR 13.528:1995. O substrato utilizado foi confeccionado com bloco cerâmico de seis furos, medindo 9 x 14 x 19 cm e chapisco no traço 1:3 de cimento e areia (em volume); o revestimento foi executado em painéis de 1,0 m<sup>2</sup>, para cada um dos teores de pó de borracha adicionado, executados em revestimento de camada única de 1,5 cm de espessura. A determinação foi realizada com idade de 91 dias.

- Fissuração – foram realizadas medidas dos comprimentos e quantidades de fissuras para cada teor de pó de borracha adicionado na argamassa.

## Resultados e discussão

Os resultados obtidos tanto no estado plástico (fresco) como no estado endurecido são apresentados e comentados a seguir, bem como os parâmetros de proporcionamento da argamassa.

### Resultados no estado plástico

O índice de consistência pré-estabelecido entre, 245 a 265 mm de espalhamento especificado pela NBR 13.276:1995, ensaiado na mesa de fluidez (*Flow table*) e com resultados apresentados na Tabela 8, permitiram caracterizar a trabalhabilidade conferida a cada mistura e identificar como adequada para trabalhos em revestimentos de argamassa.

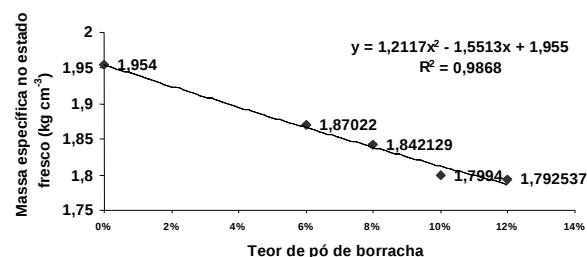
**Tabela 8.** Parâmetros de proporcionamento das argamassas.

| Argamassa | Índice de consistência (mm) | Relação água/ materiais secos (massa) | Relação água/ cimento (massa) | Relação água/ aglomerante (massa) | Relação agregado/ aglomerante (massa) |
|-----------|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Am0       | 257                         | 0,250                                 | 2,89                          | 1.435                             | 4,79                                  |
| Am6       | 255                         | 0,235                                 | 2,77                          | 1,370                             | 4,87                                  |
| Am8       | 254                         | 0,234                                 | 2,77                          | 1,370                             | 4,90                                  |
| Am10      | 260                         | 0,233                                 | 2,77                          | 1,370                             | 4,93                                  |
| Am12      | 250                         | 0,232                                 | 2,77                          | 1,370                             | 4,95                                  |

Na Tabela 8 é apresentada a variação do teor total de água em relação ao cimento, ao teor total de aglomerantes e ao teor total de materiais secos, em massa das argamassas com e sem os teores de pó de borracha. Observa-se que a argamassa de referência (Am0) foi a que necessitou de maior quantidade de água para atingir o índice de consistência dentro do parâmetro estabelecido. Isto parece identificar o pó de borracha como um lubrificador dos componentes da argamassa e não como um fino que aumenta a exigência de água para a mistura.

### Massa específica

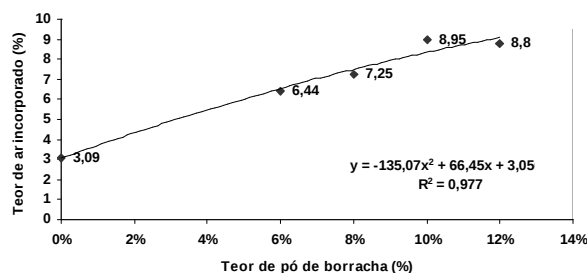
No gráfico da Figura 2 estão ilustrados os valores médios de três determinações da massa específica no estado plástico para os teores de pó de borracha utilizados na argamassa. Verifica-se que, com o aumento no teor de pó de borracha ocorre redução da massa específica, resultado a princípio esperado pela baixa massa unitária do pó de borracha.



**Figura 2.** Gráfico da massa específica da argamassa Am0 e Amx.

### Teor de ar incorporado

O gráfico da Figura 3 mostra os valores do teor de ar incorporado na argamassa. Observa-se que houve um aumento no teor de ar incorporado com o aumento da adição do pó de borracha, o que pode ter contribuído também para a queda na massa específica e para a redução na quantidade de água de amassamento da argamassa que recebeu os teores de pó de borracha. O aumento no teor de ar incorporado contribui para a trabalhabilidade da argamassa. Segundo Boynton e Gutschick (1964), o teor de ar incorporado acima de 16% causa excessiva redução na resistência de aderência à tração.



**Figura 3.** Gráfico do teor de ar incorporado da argamassa Am0 e Amx.

### Retenção de água

No gráfico da Figura 4 está ilustrada a capacidade de retenção de água da argamassa com os respectivos teores de adição de pó de borracha, resultados obtidos pela média de quatro determinações. Observa-se que os valores são ligeiramente superiores para argamassa que recebeu os teores de pó de borracha em relação à argamassa de controle. O pó de borracha, da mesma forma que ajudou na redução da quantidade de água de amassamento, demonstrou-se eficaz na capacidade de

retenção de água da argamassa, possivelmente por contribuir com o aumento no teor de ar incorporado.

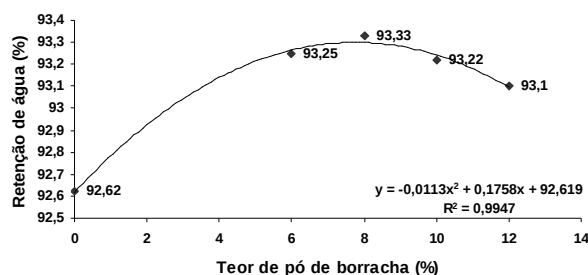


Figura 4. Gráfico da retenção de água da argamassa Am0 e Amx.

## Resultados no estado endurecido

### Resistência à compressão axial

A Figura 5 ilustra, graficamente, os resultados obtidos (referem-se à média de seis corpos-de-prova) para a resistência à compressão axial, aos 28 dias, em função das adições utilizadas para o traço estudado 1:1,5:9 (em volume).

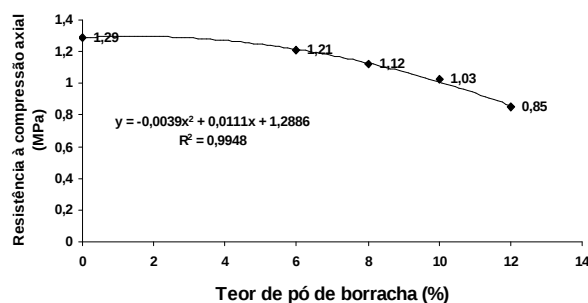


Figura 5. Gráfico da resistência à compressão axial da Am0 e Amx.

Observa-se no gráfico da Figura 5, que a resistência à compressão axial diminui com o aumento de adição dos teores do pó de borracha na argamassa. Esta redução pode estar ligada ao aumento no teor de ar incorporado no estado fresco, pelo fato de a borracha ser um material altamente elástico e por sua baixa massa específica.

O pó de borracha foi utilizado na argamassa como uma adição em relação ao volume de agregado e não como substituição deste, entrando como um acréscimo na mistura, o que acabou por gerar um aumento no volume da argamassa no estado fresco em relação à argamassa de controle e conseqüente redução na resistência à compressão axial.

Ao medir o volume da argamassa no estado fresco observou-se a diferença da argamassa sem o pó de borracha em relação à argamassa com 8% de adição. Ensaçada, novamente, a argamassa com a proporção do aumento de cimento em relação ao aumento de volume medido, o valor obtido passou de 1,12 para

1,14 MPa. A percentagem que era de 13,2% de redução da Am0 para a Am8 caiu para 11,6%, uma diferença de apenas 1,6%, o que indica que a maior redução está relacionada ao pó de borracha.

### Resistência à tração por compressão diametral

Observa-se, pelo gráfico da Figura 6, que a curva de redução da resistência à tração por compressão diametral apresentou-se de forma semelhante a da resistência à compressão axial e os valores, em média, correspondem a 8,3 vezes menores que os valores da resistência à compressão, índice semelhante ao encontrado por Tristão (1995) para uma argamassa no traço 1:2:9 com cal hidratada. Como já foi observado, o traço de argamassa 1:2:9 com cal hidratada está próximo do traço de argamassa 1:1,5:9 com cal virgem.

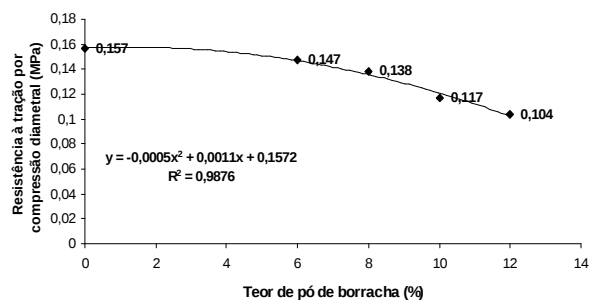


Figura 6. Resistência à tração por compressão diametral da argamassa Am0 e Amx.

### Módulo de deformação estática

No gráfico da Figura 7 estão apresentados os valores médios de seis determinações do módulo de deformação estática.

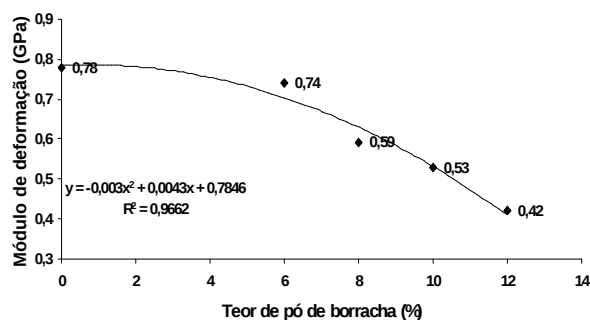


Figura 7. Gráfica do módulo de deformação estática da argamassa Am0 e Amx.

Os valores obtidos indicam maiores reduções a partir da adição de 8% de pó de borracha na argamassa. Mesmo com o módulo de deformação apresentando uma queda maior com aumento nos teores de adição, a correlação com a resistência à compressão axial é muito alta ( $R^2 = 0,9517$ ). Esta

redução do módulo contribuirá com a capacidade de absorver deformações na argamassa de revestimento, permitindo a extensibilidade do material e possibilitando a diminuição das tensões de tração.

### Absorção de água por imersão

Observa-se, pelo gráfico da Figura 8, que os valores médios obtidos para seis determinações indicam aumento na absorção de água por imersão com o aumento da adição do pó de borracha na argamassa, sendo mais significativo para argamassa com adição de 12% de pó de borracha.

Os resultados obtidos para esta propriedade não foram os esperados. Acreditava-se que com a adição dos teores de borracha houvesse diminuição na absorção de água. Talvez este aumento possa ter ocorrido em função da temperatura utilizada no ensaio, que foi de  $(105 \pm 10^\circ\text{C})$  para secar os corpos-de-prova na estufa por 72 horas. Isto pode ter provocado mudanças no comportamento das partículas da borracha, provavelmente pelo fato de estas estarem sendo incorporadas a uma argamassa porosa. Porém, isto poderá ser analisado em trabalhos futuros ao serem utilizadas temperaturas menores para o ensaio. Pode-se afirmar que não houve perda de massa do pó de borracha, pois esta se iniciou a partir de  $195,94^\circ\text{C}$ , como comprova o resultado da análise termogravimétrica.

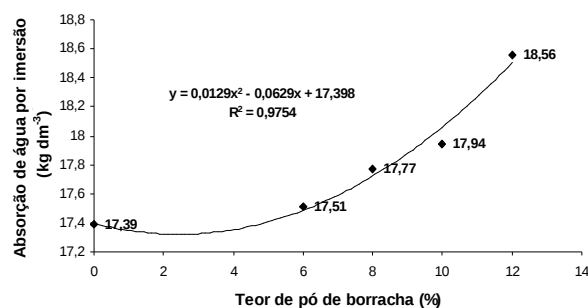


Figura 8. Gráfico de absorção de água por imersão da Am0 e Amx.

### Resistência de aderência à tração

Na Tabela 9 e na Figura 9 apresentam-se os resultados obtidos com idade de 91 dias, no ensaio de aderência à tração, nos seis pontos utilizados para a argamassa de controle e para argamassa com os demais teores de adição. Observa-se que os valores obtidos estão abaixo do limite especificado pela NBR 13749:1996 de 0,2 MPa, entretanto não houve redução na média da argamassa que recebeu os teores de pó de borracha em relação à argamassa de controle.

Tabela 9. Ensaio de resistência de aderência à tração.

| Pontos/<br>Rupturas | Tensão da resistência de aderência à tração em (MPa) |       |       |       |       |
|---------------------|------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                     | Am0                                                  | Am6   | Am8   | Am10  | Am12  |
| 1                   | >0,23                                                | >0,19 | >0,17 | >0,27 | >0,23 |
| Ruptura             | d                                                    | d     | d     | d     | d     |
| 2                   | >0,17                                                | 0,21  | >0,21 | >0,13 | 0,21  |
| Ruptura             | d                                                    | A     | d     | d     | a     |
| 3                   | >0,13                                                | 0,17  | >0,13 | >0,17 | >0,21 |
| Ruptura             | d                                                    | a     | d     | d     | b     |
| 4                   | >0,21                                                | >0,21 | >0,21 | >0,19 | >0,17 |
| Ruptura             | d                                                    | d     | d     | d     | d     |
| 5                   | >0,21                                                | >0,19 | >0,17 | >0,19 | >0,19 |
| Ruptura             | d                                                    | d     | d     | d     | d     |
| 6                   | >0,19                                                | >0,19 | >0,17 | >0,19 | >0,21 |
| Ruptura             | d                                                    | d     | d     | d     | d     |
| Média               | 0,19                                                 | 0,19  | 0,18  | 0,19  | 0,20  |

d - corresponde ruptura na interface revestimento/cola, b - corresponde ruptura da argamassa de revestimento e a - corresponde ruptura na interface revestimento/substrato. O sinal de maior (>) indica que o valor é maior que o obtido no ensaio.

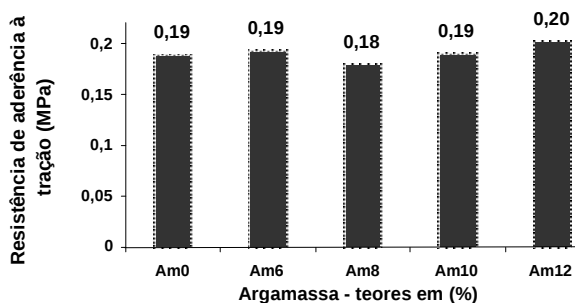


Figura 9. Gráfico da resistência de aderência à tração da Am0 e Amx.

### Fissuração

Os comprimentos das fissuras visíveis, observadas no revestimento pela retração durante a secagem e pela execução ao fazer o sarrafeamento da argamassa, são apresentados no gráfico da Figura 10.

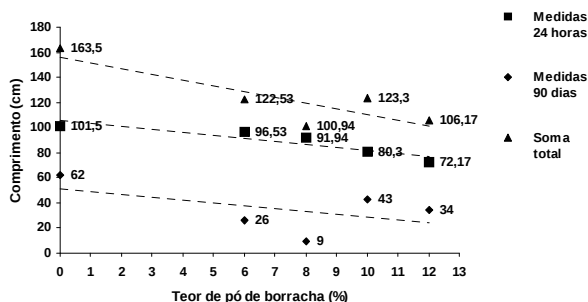


Figura 10. Gráfico do comprimento das fissuras da Am0 e Amx.

A primeira medida do comprimento das fissuras foi realizada com 24 horas, contadas a partir do sarrafeamento e desempenho do revestimento; e a segunda, com 90 dias de idade. O painel de alvenaria de bloco cerâmico foi construído fora do ambiente de laboratório e o lançamento da argamassa foi

realizado no período da tarde, com temperatura variando entre 28 e 32°C. O painel recebeu sombra até aproximadamente 09h30 e depois das 16h00, com incidência solar neste intervalo. Na Tabela 10 é apresentada a quantidade de fissuras que ocorreram nos painéis com 24h00 e com 90 dias de idade.

**Tabela 10.** Quantidades de fissuras que ocorreram com 24h00 e com 90 dias.

| Argamassa | 24 horas | 90 dias | total |
|-----------|----------|---------|-------|
| Am0       | 11       | 8       | 19    |
| Am6       | 8        | 5       | 13    |
| Am8       | 9        | 2       | 11    |
| Am10      | 9        | 5       | 14    |
| Am12      | 8        | 7       | 15    |

Ao analisar o gráfico da Figura 10 e da Tabela 10, verifica-se que a argamassa que apresentou menor índice de fissuras visíveis no total e aos 90 dias foi a composta com 8% de pó de borracha. Tem-se, também, que a argamassa composta com 6% de pó de borracha e a composta com 12% apresentaram a menor quantidade de fissuras, medidas às 24h00, e a argamassa que teve o menor comprimento de fissuras, medidas com 24h00, foi a composta com 12% de adição de pó de borracha.

## Conclusão

A adição do pó de borracha, na argamassa, contribuiu para o aumento no teor de ar incorporado; proporcionou uma ligeira redução na quantidade de água de amassamento, trazendo melhora na trabalhabilidade da argamassa; diminuiu a massa específica; e ocasionou um pequeno aumento na retenção de água no estado fresco.

Por estar sendo efetuada uma adição e não uma substituição do pó de borracha na argamassa, ocorreu aumento de volume no estado fresco para a argamassa que recebeu os teores de pó de borracha; a relação obtida do aumento de volume/aumento de cimento não igualou a resistência à compressão axial, que caiu com a adição de pó de borracha.

A resistência à tração por compressão diametral caiu de forma semelhante à resistência à compressão axial com a adição dos teores de pó de borracha.

O módulo de deformação estática reduziu-se com a adição de pó de borracha como era esperado, porém não se pode afirmar que uma argamassa com adição de pó de borracha, que apresente o mesmo valor de resistência à compressão comparada a uma argamassa sem adição, tenha o módulo reduzido.

Na absorção de água por imersão, houve aumento na absorção de água, sendo significativo para argamassa com 12% de adição de pó de borracha.

O limite de aderência à tração ficou abaixo do especificado pela NBR 13.749:1996, porém não houve redução na média da argamassa que recebeu os teores de pó de borracha em relação à argamassa de controle.

A argamassa que recebeu os teores de pó de borracha apresentou menores índices de fissuras visíveis em relação à argamassa de controle, com destaque para a argamassa que recebeu 8% de adição, a qual apresentou o menor índice de fissuras.

## Referências

- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7.217: Agregados - determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 13.276: Argamassa para assentamento de paredes e revestimentos de paredes e teto - determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência-padrão*. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.
- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 13.749: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - especificação*. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.
- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7.200: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.
- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 10.004: Resíduos sólidos - classificação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ALI, N.A. et al. Use of ground rubber tyres in Portland cement concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE: CONCRETE 2000, 1993, Dundee. *Proceedings...* Dundee: University of Dundee, 1993. v. 2, p. 379-390.
- BOYNTON, R.S.; GUTSCHICK, K.A. *Bond of mortar to masonry units*. Washington, D.C.: National Lime Association, 1964.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conama. Resolução Conama, n. 301, de 21 de março de 2002. In: BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conama. *Resoluções*. 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 27 dez. 2005.
- CANOVA, J.A. et al. Influência da adição de pó de borracha em argamassa mista. In: ENCONTRO TECNOLÓGICO DA ENGENHARIA CIVIL E ARQUITETURA, 5., 2005, Maringá. *Anais eletrônicos...* Maringá: Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Civil, 2005. p. 1808-3625. CD-ROM.
- CEMPRE-Compromisso Empresarial para Reciclagem. *O mercado para reciclagem: ficha técnica - pneus*. 2004. Disponível em: <[www.cempre.org/fichapneus](http://www.cempre.org/fichapneus)>. Acesso em: 27 dez. 2005.
- CHEATER, G. Recycling and reclaiming of rubber. *Progr. Rubber Tech.*, San Francisco, v. 38, p. 99-104, 1975.

- CIMINO, M.A. *Gerenciamento de pneumáticos inservíveis: análise crítica de procedimentos operacionais e tecnologia para minimização, adotados no território nacional*. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana)–Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.
- CINCOTTO, M.A. *Estudo da composição química da cal hidratada produzida no Estado de São Paulo*. 1977. Dissertação (Mestrado em Ciências)–Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1977.
- CINCOTTO, M.A. *et al.* Argamassa de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio. São Paulo: IPT, 1995.
- D'ALMEIDA, M.L.O.; SENA, L.B.R. *Reciclagem de outros materiais: manual de gerenciamento integrado*. São Paulo: IPT, 2000.
- ELDIN, N.N.; SENOUCI, A.B. Rubber tire particles as concrete aggregate. *J. Mater. Civil Eng.*, New York, v. 5, n. 4, p. 478-496, 1993.
- GUIMARÃES, J.E.P. *A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil*. São Paulo: Pini, 1997.
- GÜNEYISI, E. *et al.* Properties of rubberized concretes containing silica fume. *Cement Concrete Res.*, Washington, D.C., v. 34, p. 2309-2317, 2004.
- HERNANDES-OLIVARES, F.; BARLUENGA, G. Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete. *Cement Concrete Res.*, Washington, D.C., v. 34, p. 109-117, 2004.
- LEE, B.I. *et al.* Tyre rubber/cement matrix composites. *J. Mater. Sci. Lett.*, Dordrecht, v. 13, p. 967-968, 1993.
- MENEGUINI, E.C.A. *Comportamento de argamassas com emprego de pó de borracha*. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- ODA, S. *Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação*. 2000. Tese (Doutorado em Transportes)–Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- RAGHAVAN, D.; HUYNH, H. Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite. *J. Mater. Sci.*, Dordrecht, v. 33, p. 1745-1752, 1998.
- SEGRE, N.C. *Reutilização de borracha de pneus usados como adição em pasta de cimento*. 1999. Tese (Doutorado em Química)–Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.
- SEGRE, N.C. *et al.* Rubber-mortar composites: effect of composition on properties. *J. Mater. Sci.*, Dordrecht, v. 39, p. 3319-3327, 2004.
- SELMO, S.M.S. *Dosagem de argamassas de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachada de edifícios*. 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil)–Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.
- TOPÇU, B.I. The properties of rubberized concretes. *Cement Concrete Res.*, Washington, D.C., v. 25, p. 304-310, 1995.
- TOUTANJI, H.A. The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates. *Cement Concrete Comp.*, Amsterdam, v. 18, 135-139, 1996.
- TRISTÃO, F.A. *Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento*. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.
- TURATSINZE, A. *et al.* Mechanical characterisation of cement-based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres. *Build. Environ.*, New York, v. 40, p. 221-226, 2005.

Received on May 15, 2006.

Accepted on July 12, 2007.