



### III-044 - AVALIAÇÃO DE PERSPECTIVAS E SOLUÇÕES PARA A REINCORPORAÇÃO DOS RESÍDUOS DE PNEU NA CADEIA PRODUTIVA

**Regina Mambeli Barros**<sup>(1)</sup>

Engenheira Civil pela Unitau. Doutora e Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP). Professora Adjunta II da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

**Bruno de Abreu Moraes**

Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

**Luiz Felipe Silva**

Engenheiro Mecânico pela UMC. Doutor e Mestre em Saúde Pública pela Universidade de São Paulo (EESC/USP). Professor Adjunto I da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

**Endereço**<sup>(1)</sup>: Av. BPS, 1303 - Bairro Pinheirinho - Itajubá-MG - CEP: 37500-903, tel.: (35) 36291224 - fax: (35) 36291265 - e-mail: [mambeli@unifei.edu.br](mailto:mambeli@unifei.edu.br).

#### RESUMO

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) representam hoje em dia, um grande desafio à humanidade, no que concerne ao seu gerenciamento integrado. Geralmente, a alternativa mais utilizada pelos municípios para tratamento e disposição final dos RSUs recai sobre a escolha pelos aterros sanitários (AS). Contudo, a implementação de um AS necessita grandes áreas, e ainda assim, um AS possui vida útil limitada, e poucas possibilidades de aproveitamento de áreas cuja operação já foi encerrada. A disposição de pneus em AS contribui expressivamente para ocupação de volume em suas células sanitárias, ocasionando a redução de vida útil do AS, bem como na possibilidade de formação de cavidades na massa de resíduos e na instabilidade dos taludes. Quando dispostos inadequadamente, os pneus representam um risco à saúde pública, em relação à reprodução de vetores de doenças e incineração efetuada incorretamente com a geração de gases tóxicos. No presente estudo, são apresentadas as alternativas tecnológicas de reincorporação de fragmentos de pneus na cadeia produtiva. Também são expostos e comparados resultados de ensaios de algumas propriedades de concreto em estado fresco e endurecido, para concreto com fragmentos de pneus (CFP) como agregados, e concreto convencional (CC) com brita. Finalmente, foi desenvolvido um estudo teórico de um material – CFP - considerado homogêneo para fins de análise das propriedades acústicas. Portanto, constitui-se o CFP em uma atraente alternativa de uso em aplicações que necessitem de atenuação de energia e impacto, como em pisos industriais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Reincorporação de Pneus, Resíduos Sólidos Urbanos, Propriedades Acústicas, Agregado de Fragmento de Pneu.

#### INTRODUÇÃO

A partir do estabelecimento, no século XVII, da Revolução Industrial, houve um grande aumento da renda *per capita*, assim como da própria população, de modo nunca observado antes na história da humanidade. Houve um grande deslocamento da população rural em sentido às cidades, que representavam maior oportunidade de trabalho, isto é, um incremento no processo da urbanização. Consequentemente, também foi majorada a geração de resíduos, decorrente das atividades antrópicas, em volume maior do que os ecossistemas poderiam absorver, - com relação aos ciclos biogeoquímicos.

Com o aprimoramento dos processos industriais, a saber: vulcanização da borracha (aplicação de calor e pressão à uma composição de borracha), indústria petroquímica (produção de derivados de petróleo, sobretudo através da destilação) e automobilística, paralelamente ao conforto inegável proporcionado pelos automóveis, iniciou-se um processo de geração e disposição de pneus. Portanto, os resíduos sólidos (RS) - em especial a parcela de pneus -, representam um grande problema ambiental, no que tange à disposição e tratamento final dos resíduos sólidos urbanos (RSU).

Atualmente, ainda pode ser observada a disposição inadequada de pneus em leitos de rios e lançamento a céu aberto, prejudicando os ecossistemas aquáticos e terrestres. Entretanto, muitas pesquisas são desenvolvidas,



no sentido de buscar soluções para essa problemática. Diferentes são as alternativas propostas para a reincorporação de pneus inservíveis na cadeia produtiva, tais como: misturas de concreto, produção de energia, utilização de fragmentos da borracha em composições asfálticas, diques, camada drenante em aterros sanitários, entre outros.

Nesse sentido, o presente estudo visa ao aproveitamento de características de isolamento térmico e acústico, durabilidade e elasticidade dos pneus, dentre diversas alternativas de incorporação de pneus em vários materiais. Para tal, um estudo de caso é analisado, no qual propriedades do concreto fresco e endurecido são comparadas entre a utilização de concreto com agregados de fragmentos de pneus (CFP) e concreto convencional (CC), esse último feito com brita como agregado. Também é realizado um estudo teórico de avaliação das propriedades de isolamento acústico do material borracha de pneu, por meio de estimativa por cálculo de um painel homogêneo.

## OBJETIVOS

Constituíram objetivos do presente trabalho:

- Realizar um estudo experimental a respeito da potencialidade de utilização de pneus inservíveis como agregado de concreto com cimento portland (CP).
- Efetuar uma análise teórica com relação às propriedades acústicas conferidas a um material homogêneo, composto de agregado de concreto com CP.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada fundamentou-se nas normas correlatas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), conforme descrito a seguir.

## ELABORAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

A ABNT NBR 5738 (ABNT, 2003) foi usada para confecção dos corpos-de-prova de concreto cilíndricos rompidos no ensaio de resistência à compressão. Para execução dos experimentos, foram utilizados: o cimento CP-V ARI, uma mistura de agregados (grosso e médio), areia, farelo de pneu, água e fibras de pneus.

Foram aferidos os valores das densidades, a partir da avaliação da massa em uma balança. O concreto foi dosado visando ao atendimento de uma resistência característica à compressão de  $f_{ck} = 16$  MPa e foi adotada - para o cálculo da resistência média do concreto aos 7 dias -, um desvio padrão de dosagem  $S = 4$  MPa, conforme metodologia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Por meio da equação 1, anteriormente mencionada e novamente apresentada, foi calculada a resistência característica à compressão do concreto.

$$f_{ck} = f_{cm} \cdot 1,65 \cdot S \quad \text{equação (1)}$$

Onde:

$f_{cm}$  - resistência média de dosagem aos 7 dias de idade (nesse estudo adotado como 16 MPa);

$f_{ck}$  - resistência característica do concreto à compressão, (em MPa), obtido no ensaio de resistência à compressão.

A relação de consumo que foi estabelecida no presente estudo é de  $350 \text{ kg/m}^3$ . O traço do concreto unitário adotado foi de 1: 2,5 : 2,5 : 1,5. Com base no valor adotado para o traço, foi possível calcular a quantidade necessária de cimento, agregados e água necessária para a produção de 9 corpos de prova assim distribuídos:

- 3 (três) corpos de prova compostos por concreto feito com agregado de fragmento de pneu e brita (CBP), conforme figura 1: 1 para cimento; 2,5 para areia; 2,5 para agregado graúdo (50% de brita convencional e 50% de fragmentos de pneus, em volume); e 1,5 para relação água/cimento;



- 3 (três) corpos de prova compostos por concreto feito com agregado de farelo de pneu (CFP), conforme figuras 2a e 2b: 1 para cimento; 2,5 para farelo de pneu; 2,5 para agregado graúdo (100% de brita convencional), em volume; e 1,5 para relação água/cimento;
- 3 (três) corpos de prova compostos por concreto convencional (CC): 1 para cimento; 2,5 para areia; 2,5 para agregado graúdo (100% de brita convencional, em volume); e 1,5 para relação água/cimento.



Figura 1: agregados de fragmento de pneu, brita e areia.



Figura 2: agregados de a) farelo de pneu (esquerda) b) farelo de pneu, brita e areia (direita)

Considerando o consumo previamente estabelecido e o volume do corpo-de-prova de dimensões  $D = 100 \text{ mm}$  (diâmetro do molde) e  $h = 200 \text{ mm}$  (altura do molde), para cada corpo de prova, com volume calculado de  $1,57 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ . Desse modo, o volume total produzido por tipo de material foi igual a  $4,71 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  (figura 3).

Com relação ao cálculo da quantidade de material para a execução dos corpos de prova de concreto, considerando o traço de concreto unitário adotado de 1: 2,5 : 2,5 : 2,5 e o consumo estabelecido de  $350 \text{ kg/m}^3$ , foi possível estabelecer a quantidade de cimento utilizada no traço unitário de concreto. Relativamente à produção do concreto e a partir dos valores calculados, foi possível elaborar os concretos desejados. Todo material foi pesado em uma balança. Desse modo, foram aferidos os valores das densidades, a partir da avaliação da massa contida em um recipiente de volume conhecido ( $200 \text{ cm}^3$  ou  $200 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ ) em uma balança.





**Figura 3: Corpos-de-prova com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura**

Em seguida, procedeu-se à moldagem e cura dos corpos-de-prova dos concretos, conforme a ABNT NBR 5738/03 (ABNT, 2003): CBF, CFP e CC. Após a preparação do concreto, o material foi colocado nos moldes e permaneceram 24h, para permitir a desforma a partir de condições de endurecimento adequadas do concreto, sem causar danos ao corpo-de-prova conforme a NBR 5739/94 (ABNT, 1994). Em seguida à desforma, os corpos-de-prova foram mantidos imersos em água saturada de cal até o início do ensaio (cura úmida).

Ainda conforme a padronização estabelecida pela NBR 5739/94 (ABNT, 1994), os corpos-de-prova foram rompidos em sete dias, com uma tolerância de tempo para o ensaio de  $\pm 6$  h, sendo a idade contada a partir do momento em que o cimento foi colocado em contato com a água de mistura. Neste experimento, o horário foi 13:30h do dia 28 de setembro de 2007, e o ensaio foi realizado no dia 5 de outubro de 2007 às 16:20 h, atendendo ao preconizado pela referida norma.

O ensaio de resistência à compressão foi executado de acordo com a NBR 5739: “Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos” (ABNT, 1994).

A determinação dos módulos de elasticidade,  $E_{ci}$  (em  $N/m^2$ ), dos corpos de prova foram obtidos em conformidade com a equação (2).

$$E_{ci} = 5600 \cdot f_{ck}^{1/2} \quad \text{equação (2)}$$

O cálculo da resistência à compressão, em MPa, foi obtido por meio da equação 3.

$$P = [(F/A)/10] \quad \text{equação (3)}$$

Onde:

P - Resistência à compressão (em MPa );

F - Valor obtido nos ensaios realizados na máquina de compressão com os corpos-de-prova; e

A - Área da seção transversal do corpo-de-prova.



## AVALIAÇÃO TEÓRICA DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS

Para avaliação da estimativa da perda de transmissão de painel homogêneo, procedeu-se ao cálculo da frequência crítica conforme a equação (4).

$$f_c = [c^2 / (1,8 \cdot t)] [(\rho_m / E)^{1/2}] \quad \text{equação (4)}$$

Onde:

E - módulo de Young, N/m<sup>2</sup>;

t - espessura da placa ou do painel;

$\rho_m$  = Densidade do material, kg/m<sup>3</sup>; e

B = rigidez ao cisalhamento por unidade de largura, dado pela equação 5.

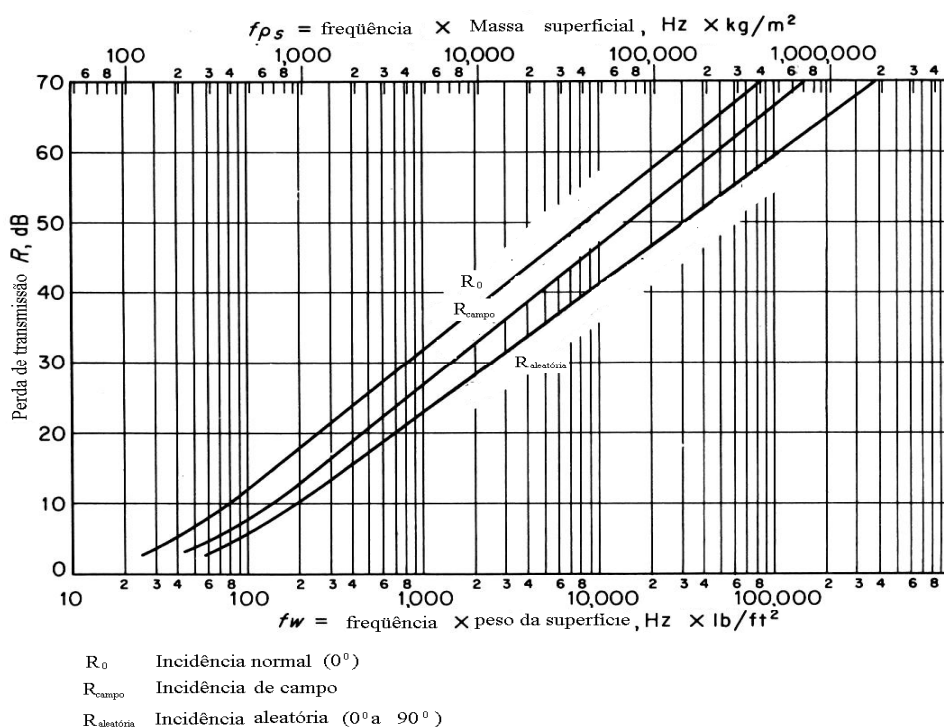
$$B = E \cdot t^3 / 12 \quad \text{equação (5)}$$

A densidade do material foi calculada, pesando-se os corpos de prova, e a densidade foi calculada a partir da divisão dos pesos pelos volumes dos corpos-de-prova. O valor para a densidade do CC foi retirado da literatura (2300 kg/m<sup>3</sup>), resultando na tabela 1.

**Tabela 1: Densidade de CC, CBF e CFP.**

Tipo do corpo-de-prova	Peso (kg)	$\rho_m$ , kg/m <sup>3</sup>
CC		2300
CBP	3,14	2000
CFP	2,86	1822

Foi realizado o cálculo da frequência crítica por meio da equação 3. Para tal, foi adotada, uma espessura de placa de concreto de 10 cm. Adotando-se o valor de  $C_L$  (m/seg) de 340 m/seg, foi calculado  $f_c$  (Hz). Com o valor de  $f_c$  (Hz) e  $\rho_m$  (kg/m<sup>3</sup>), foi calculado  $M_s f_c$  (Hz·kg/ft<sup>2</sup>), pelo produto dos dois primeiros. Com o valor desse produto, observa-se o gráfico da figura 4, os valores desses produtos foram encontrados no respectivo eixo e descobriu-se o valor de  $R_0$  ( $f_c$ ), dB (onde  $R_0$  representa a perda de transmissão teórica).



**Figura 4: Curvas de perdas de transmissão teórica para painéis limpos com massa controlada. O campo de incidência assume um campo de som que permite todos os ângulos de incidência acima de  $78^\circ$  da normal. Fonte: BERANEK (1971, tradução nossa).**

## RESULTADOS

A tabela 2 apresenta o resumo dos resultados obtidos com os valores de resistência à compressão dos corpos de prova, assim como dos cálculos da resistência característica à compressão, módulo de elasticidade e perda de transmissão dos mesmos.

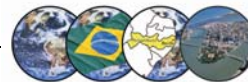
**Tabela 2: Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e valores decorrentes de cálculos**

Material	Corpo-de-prova	$f_{cd}$ (kgf x 1000)	$f_{cd}$ (MPa)	$f_{ck}$ (MPa)	$E_{ci}=5600.f_{ck}^{1/2}$	$f_c$ (Hz)	$M_s f_c$ (Hz-kg/ft <sup>2</sup> )	$R^1$ (dB)
CBP	1	<10	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	2	5,44	6,79	0,19	2456,23	2.01E+09	4.02E+12	INS <sup>2</sup>
	3	6,92	8,64	2,04	7999,00	1.11E+09	2.22E+12	INS
Média aritmética		6,18	7,72	1,12	5227,62	1.56E+09	3.12E+12	INS
CFP	1	2,18	2,72	NA	NA	NA	NA	NA
	2	2,57	3,21	NA	NA	NA	NA	NA
	3	0,90	1,12	NA	NA	NA	NA	NA
Média aritmética		2,18	2,72		NA	NA	NA	NA
CC	1	13,13	16,40	9,80	17530,77	8.06E+08	1.85E+12	INS
	2	12,89	16,10	9,50	17260,36	8.12E+08	1.87E+12	INS
	3	13,37	16,70	10,10	17797,08	8.00E+08	1.84E+12	INS
Média aritmética		13,13	16,40	9,80	17530,77	8.06E+08	1.85E+12	INS

Nota: NA – não aplicável.

<sup>1</sup> Perda de transmissão.

<sup>2</sup> Insonorização



Como esperado, os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão com CBP e CFP produziram valores menores em relação aos oriundos de ensaios com CC. Isto em razão de existir a expectativa de que os fragmentos de pneus ajam como vazios na matriz, bem como ao fato de pneu ser mais elasticamente deformável que a matriz. Entretanto, com relação ao módulo de elasticidade, como esperado, os valores foram ligeiramente diferentes de CBP e CFP relativamente ao CC, através do uso de agregados de fragmentos de pneu sem o arame. Isto também acaba por acarretar em alteração de valores de tensão de ruptura. Há também a expectativa de que não haja alteração dos valores de rigidez para concreto CBP e CFP e CC, não alterando a capacidade de propagação de trincas, falhas catastróficas e absorção de carregamentos dinâmicos, com relação ao controle CC.

## **CONCLUSÕES**

Com relação aos objetivos propostos, foi possível concluir que:

- conforme esperado, os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão com CBP e CFP produziram valores inferiores em relação aos provenientes de ensaios com CC. Talvez isso possa ser em decorrência da expectativa de que os fragmentos de pneus atuem como vazios na matriz, e ao fato de pneu ser mais elasticamente deformável que a matriz. Não obstante, no que tange ao módulo de elasticidade, os valores foram ligeiramente distintos de CBP e CFP relativamente ao CC, por meio do uso de agregados de fragmentos de pneu sem arame. Isto também acaba por originar modificação nos valores de tensão de ruptura. Existe também a expectativa de que não haja modificação dos valores de rigidez para concreto CBP e CFP e CC, não alterando a capacidade de propagação de trincas, falhas catastróficas e absorção de carregamentos dinâmicos;
- os valores de perda de transmissão (dB) foram maiores para CC e menores para CBF e CFP. Portanto, conclui-se que o CBP e o CFP em uma alternativa atraente de uso em aplicações que necessitem de isolamento acústico e atenuação de energia e impacto.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (1994). NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. 4 p.
2. \_\_\_\_\_. (1994). NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. 4 p.
3. \_\_\_\_\_. (2003). NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.
4. BERANEK, L. L. (1971). Noise and vibration control. New York: MacGraw-Hill Book Company.