Cesar Fabiano Fioriti

**PAVIMENTOS INTERTRAVADOS DE CONCRETO
UTILIZANDO RESÍDUOS DE PNEUS COMO MATERIAL
ALTERNATIVO**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do
Título de Doutor em Ciências da Engenharia
Ambiental.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Akemi Ino

São Carlos
2007

*Dedico este trabalho a duas pessoas
fundamentais na minha trajetória de vida:
meu pai Maurício e minha mãe Neide.*

AGRADECIMENTOS

À Prof^a. Dr^a. Akemi Ino, pela paciência, compreensão, orientação e dedicação. Somente com confiança, competência, profissionalismo e entusiasmo, pudemos juntos desenvolver este trabalho e superar todos os tipos de problemas encontrados.

Ao Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki, agradeço pela ajuda, sugestões, dedicação, paciência, orientação e muito empenho demonstrado durante a elaboração deste trabalho. E acima de tudo, pela grande amizade.

Aos Professores João Adriano, Eduvaldo e Márcio, pela ajuda, sugestões e profissionalismo.

À Mara, que me permito chamar de uma grande amiga. Foi responsável direta por minha entrada na EESC-USP, me proporcionando esta oportunidade ímpar de realizar este trabalho. Agradeço por seus exemplos de determinação, competência, fraternidade, incentivo e todo tipo de apoio.

À fábrica de pré-moldados Eletra Indústria e Comércio de Blocos, que concedeu a utilização de seus maquinários, operadores e materiais.

À Companhia Energética de São Paulo (CESP), que proporcionou a utilização de seus laboratórios. Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil.

Ao Centro de Inovação Tecnológica em Cerâmica (CITEC), na pessoa da Ana Paula, pela ajuda na realização dos ensaios de abrasão profunda e expansão por umidade.

Ao Departamento de Engenharia Civil da UNESP de Ilha Solteira, que permitiu a utilização de seus laboratórios.

Ao amigo Adriano, pelo apoio e agradável convivência em minha estadia na cidade de Ilha Solteira.

À minha esposa Geórgia, a quem peço desculpas pela ausência durante o tempo em que dediquei a este trabalho, e que dedico à minha vida profissional objetivando proporcionar-lhe as condições para que seja feliz.

*“Os dias prósperos não vêm por acaso;
nascem de muita fadiga e persistência.”*

Henry Ford

RESUMO

FIORITI, C. F. (2007). *Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo*. São Carlos. 202p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

A utilização de resíduos tem se mostrado como uma boa alternativa na redução do impacto causado pelo consumo desordenado de matéria-prima e pela redução das áreas de disposição, em virtude do grande volume de resíduos descartados a cada ano em todo mundo. Neste contexto se inserem os resíduos de pneus provenientes da recauchutagem. Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar algumas propriedades de pavers de concreto, com substituição parcial do agregado por resíduos de pneus. Para a produção dos pavers foram consideradas as faixas de consumo de cimento Portland de 292,84 kg/m³, 323,06 kg/m³ e 347,00 kg/m³, e os níveis de incorporação dos resíduos estudados foram de 8%, 10%, 12%, 15% e 20%, em volume. As propriedades foram: resistência à compressão, absorção de água, resistência ao impacto, resistência à abrasão profunda e expansão por umidade. Os resultados mostram que ocorre queda na resistência à compressão. Na absorção de água, não podemos afirmar que essa propriedade é afetada de maneira negativa. Os pavers demonstraram grande capacidade de absorção de energia (tenacidade). Os resultados de resistência à abrasão mostram-se interessantes para a aplicação em ambientes com baixas solicitações. A expansão por umidade não afetará o intertravamento dos pavers. Dessa forma, os resultados mostraram viabilidade na utilização dos pavers com resíduos de pneus em pavimentação intertravada com solicitações leves.

Palavras-chave: resíduos de pneus, pavers, pavimentação intertravada, concreto, material alternativo, proteção ambiental.

ABSTRACT

FIORITI, C. F. (2007). *Concrete paving interspersed with tire residues as alternative material*. São Carlos. 202p. Thesis (Doctorate) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

Concerns regarding the environment and shortage of natural resources have led the way for sustainable alternatives. The recycling process seems to be a suitable alternative to minimize the use of natural resources as well as the lack of proper disposal sites caused by the large amounts of discarded waste worldwide. Within this context, rubber residues from recapped tires are used for insertion. This work was developed with the objective of studying some of the properties of concrete paving, with partial substitution of the aggregate for tire residues. For the production of pavers the bands of Portland cement consumption was considered at 292,84 kg/m³; 323,06 kg/m³ and 347,00 kg/m³, and the levels of residues incorporation at 8%, 10%, 12%, 15% and 20%, in volume. The studied properties were: compressive strength, water absorption, impact resistance, deep abrasion and expansion resistance to humidity. The results show decrease in the compressive strength. The water absorption does not undergo negative influence. Pavers demonstrated substantial capacity for energy absorption (tenacity). The results of abrasion resistance reveal interesting applications for locales with low degree of demands. Expansion by humidity will not affect the interspersing of pavers. However, the results have shown viability in the use of pavers interspersed with tire residues in asphalt with light load demands.

Keywords: tire residues, pavers, interspersed paving, concrete, alternative material, environmental protection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Biscayne Boulevard, Miami – Estados Unidos	1
Figura 1.2	Modelos de pavers de concreto para pavimentação intertravada	2
Figura 2.1	Caminho Romano	9
Figura 2.2	Via Ápia: pavimento de pedras, precursor do intertravado	10
Figura 2.3	Intertravado de pedras talhadas em forma de prisma retangular	11
Figura 2.4	Pavimentos intertravados: a) pátio de shopping center; b) calçada	14
Figura 2.5	Elementos que compõem o pavimento intertravado	18
Figura 2.6	Efeito de solicitação dos pavers no desempenho do pavimento sob solicitação de tráfego	20
Figura 2.7	Assentamento manual de pavers	23
Figura 2.8	Assentamento mecanizado de pavers – Alemanha	23
Figura 2.9	Assentamentos típicos: a) espinha-de-peixe ou ângulo reto; b) fileira ou corredor; c) trama	24
Figura 2.10	Formatos típicos dos pavers com intertravamento horizontal	26
Figura 2.11	Exemplos de pavers com intertravamento vertical	27
Figura 2.12	Intertravamento rotacional	28
Figura 2.13	Movimento de rotação dos pavers	28
Figura 2.14	Fluxo de dados do sistema de dosagem utilizado por Cruz (2003)	36
Figura 2.16	Esquema do ensaio de tração por compressão	44
Figura 3.1	Pneus abandonados	50
Figura 3.2	Pneu preparado para receber nova camada de borracha	60
Figura 3.3	Inspeção da carcaça	62
Figura 3.4	Raspagem da carcaça	62
Figura 3.5	Reparação da carcaça	63
Figura 3.6	Aplicação do anel na carcaça	63

Figura 3.7	Vulcanização	63
Figura 3.8	Inspeção final	64
Figura 3.9	Resumo dos principais termos relativos à trabalhabilidade e dos ensaios empregados na sua caracterização	67
Figura 3.10	Microscopia eletrônica no concreto com adição de resíduos de pneus	74
Figura 3.11	Microscopia eletrônica da borracha de pneu envolvida pelo polímero	79
Figura 3.12	Borracha de pneus parcialmente encoberta pela matriz de cimento Portland	79
Figura 4.1	Paver na prensa durante ensaio de compressão	87
Figura 4.2	Ensaio de absorção de água: a) paver na balança digital; b) pavers em processo de secagem na estufa; c) tanque de água com pavers submersos	89
Figura 4.3	Aparato utilizado no ensaio de resistência ao impacto	90
Figura 4.4	Detalhe do ajuste do paver na caixa de areia	91
Figura 4.5	Abrasímetro Cap	94
Figura 4.6	Resíduos de pneus no estado natural	96
Figura 4.7	Agitador de peneiras utilizado na separação dos resíduos de pneus	97
Figura 4.8	Resíduos de pneus após peneiramento	98
Figura 4.9	Paver segmentado	118
Figura 4.10	Assentamento dos pavers segmentados: a) amarrado; b) espinha-de-peixe; c) prumo	119
Figura 4.11	Misturador de eixo vertical	120
Figura 4.12	Vibro-prensa semi-automática utilizada	121
Figura 4.13	Detalhe da caixa de prensagem da vibro-prensa utilizada	121
Figura 4.14	Fôrma utilizada na moldagem dos corpos-de-prova	125
Figura 4.15	Corpos-de-prova: a) moldados na fôrma de madeira; b) detalhe das peças com e sem resíduos de pneus	126
Figura 5.1	Resistência à compressão em função do efeito isolado do teor de resíduos de pneus	130
Figura 5.2	Comparativo entre as resistências dos pavers em função do aumento do consumo de cimento Portland	134
Figura 5.3	Comparativo da massa específica dos pavers	139
Figura 5.4	Última fissura observada (2 mm) em paver de controle	143
Figura 5.5	Primeira fissura (0,1 mm) em paver com resíduos de pneus	144
Figura 5.6	Paver com resíduos de pneus seccionado	144
Figura 5.7	Última fissura observada (2 mm) em paver de controle	137
Figura 5.8	Primeira fissura (0,1 mm) em paver com resíduos de pneus	138

Figura 5.9	Paver com resíduos de pneus seccionado	138
Figura 5.10	Comparativo entre as perdas de massa nos corpos-de-prova	141
Figura 5.11	Comparativo entre os percentuais médios de expansão dos corpos-de-prova	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Faixa granulométrica recomendada para a camada de assentamento	20
Tabela 2.2	Recomendações técnicas da granulometria da areia a ser utilizada na camada de assentamento	21
Tabela 2.3	Especificações granulométricas para os materiais a serem utilizados no rejuntamento dos pavers	21
Tabela 2.4	Influência da compactação na resistência à compressão	30
Tabela 2.5	Consumo aproximado de cimento em função da relação agregado/cimento, para umidades da mistura de 6%	32
Tabela 2.6	Ensaaios dos materiais constituintes que compõem a dosagem dos pavers	35
Tabela 2.7	Controle visual de umidade ótima durante a fabricação dos pavers produzidos por Cruz (2003)	37
Tabela 2.8	Requisitos físicos para a produção de pavers	40
Tabela 2.9	Fator multiplicativo “p” de correção da resistência à compressão estabelecida na NBR-9781 (1987)	41
Tabela 2.10	Requisitos da norma BS EN-1338 (2003)	45
Tabela 2.11	Requisitos para pavers, normas: ASTM-C936 (1996) e CSA A231.2-95 (1995)	46
Tabela 3.1	Geração de pneus inservíveis	60
Tabela 4.1	Esquema de variáveis analisadas no programa experimental e quantidade de pavers que foram ensaiados	85
Tabela 4.2	Esquema de variáveis analisadas no programa experimental e relação dos corpos-de-prova que foram ensaiados	86
Tabela 4.3	Parâmetros das dosagens	99
Tabela 4.4	Resultados dos ensaios de resistência	99
Tabela 4.5	Resultados de resistência à compressão e absorção de água com blocos de concreto utilizando duas diferentes granulometrias	100
Tabela 4.6	Especificações do cimento CP V ARI, segundo a NBR-5733	102
Tabela 4.7	Resultados de índices físicos do cimento Portland utilizado	102
Tabela 4.8	Caracterização da areia natural com a curva granulométrica	107
Tabela 4.9	Caracterização do pedrisco de basalto com a curva	109

	granulométrica	
Tabela 4.10	Caracterização dos resíduos de pneus com a curva granulométrica	110
Tabela 4.11	Elaboração do consumo mínimo de cimento Portland utilizado na fabricação dos pavers	115
Tabela 4.12	Dosagens de controle utilizadas na produção dos pavers	115
Tabela 4.13	Dosagens com resíduos de pneus utilizados na produção dos pavers	118
Tabela 4.14	Dimensões dos pavers utilizados	119
Tabela 4.15	Características do modelo da vibro-prensa utilizada	122
Tabela 4.16	Dosagens utilizadas na moldagem dos corpos-de-prova	124
Tabela 5.1	Percentuais de resíduos de pneus, consumos de cimento e as resistências à compressão obtidas com a ruptura dos pavers	129
Tabela 5.2	Composição de materiais utilizados e resultados de compressão na faixa de consumo de cimento Portland de 292,84 kg/m ³	133
Tabela 5.3	Relação dos materiais utilizados e resultados de compressão na faixa de consumo de cimento Portland de 323,06 kg/m ³	133
Tabela 5.4	Relação dos materiais utilizados e resultados de compressão na faixa de consumo de cimento Portland de 347,00 kg/m ³	134
Tabela 5.5	Massa específica dos paver produzidos	138
Tabela 5.6	Absorção de água dos pavers	140
Tabela 5.7	Resultados dos ensaios de resistência ao impacto nos pavers	143
Tabela 5.8	Dosagem de controle dos corpos-de-prova	146
Tabela 5.9	Dosagens dos corpos-de-prova com resíduos de granulometria fina	146
Tabela 5.10	Dosagens dos corpos-de-prova com resíduos de granulometria grossa	147
Tabela 5.11	Resultados de resistência à abrasão profunda	147
Tabela 5.12	Resultados dos ensaios de EPU	150
Tabela 5.13	Síntese das propriedades estudadas nos pavers	152

SUMÁRIO

RESUMO	VI
ABSTRACT.....	VII
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS	XI
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA.....	4
1.2 HIPÓTESE PRINCIPAL E HIPÓTESES INTERMEDIÁRIAS DE PESQUISA.....	5
1.3 OBJETIVOS.....	7
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	7
2 PAVIMENTOS INTERTRAVADOS.....	8
2.1 BREVE RELATO DA PAVIMENTAÇÃO	8
2.2 BREVE HISTÓRICO DO PAVIMENTO INTERTRAVADO	14
2.3 ESTRUTURA DO PAVIMENTO INTERTRAVADO	17
2.4 CARACTERÍSTICAS DO INTERTRAVAMENTO DOS PAVERS	24
2.5 EQUIPAMENTO PARA PRODUÇÃO DE PAVERS.....	28
2.6 DOSAGEM DO CONCRETO DOS PAVERS	30
2.6.1 RECOMENDAÇÕES PARA DOSAGENS DE PAVERS DA ABCP.....	31
2.6.2 MÉTODO UTILIZADO POR CRUZ	34
2.7 NORMAS TÉCNICAS SOBRE PAVERS	37
2.7.1 VISÃO GERAL	37
2.7.2 NORMAS TÉCNICAS BRASILEIRAS	39
2.7.2.1 COMENTÁRIOS SOBRE AS NORMAS BRASILEIRAS	41
2.7.3 NORMAS INTERNACIONAIS PARA PAVERS	43
3 RESÍDUOS DE PNEUS	48
3.1 ASPECTO GERAL SOBRE PNEUS.....	48

3.1.1 BREVE HISTÓRICO DA BORRACHA EMPREGADA EM PNEUS	48
3.1.2 DEFINIÇÕES DE PNEUS	49
3.1.3 IMPACTOS AMBIENTAIS DECORRENTES DA DISPOSIÇÃO INADEQUADA DOS PNEUS.....	50
3.2 GERENCIAMENTO DE PNEUS INSERVÍVEIS: POLÍTICAS PÚBLICAS, PROGRAMAS INSTITUCIONAIS E LEGISLAÇÕES	51
3.3 REDUÇÃO DE PNEUS INSERVÍVEIS	57
3.3.1 RECAUCHUTAGEM DE PNEUS	60
3.4 RESÍDUOS DE PNEUS ADICIONADOS AO CONCRETO	64
3.4.1 TRABALHABILIDADE	65
3.4.2 MASSA ESPECÍFICA	68
3.4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	69
3.4.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	72
3.4.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE	73
3.4.6 RESISTÊNCIA AO IMPACTO	75
3.4.7 ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	77
3.4.8 TRATAMENTO DOS RESÍDUOS DE PNEUS	78
3.4.9 DURABILIDADE.....	80
4 MATERIAIS E MÉTODOS	82
4.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS	82
4.2 PROPRIEDADES AVALIADAS – MÉTODOS DE ENSAIOS	86
4.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PAVERS.....	86
4.2.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS PAVERS	88
4.2.3 RESISTÊNCIA AO IMPACTO DOS PAVERS	89
4.2.4 RESISTÊNCIA À ABRASÃO PROFUNDA DOS CORPOS-DE-PROVA	92
4.2.5 EXPANSÃO POR UMIDADE (EPU) NOS CORPOS-DE-PROVA	95
4.3 DEFINIÇÃO E COLETA DA AMOSTRA DE RESÍDUOS DE PNEUS.....	96
4.4 BENEFICIAMENTO DOS RESÍDUOS DE PNEUS	97
4.5 DEFINIÇÃO DA FAIXA GRANULOMÉTRICA PARA OS RESÍDUOS DE PNEUS.....	98
4.6 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	101
4.6.1 CIMENTO	101
4.6.2 RESÍDUOS DE PNEUS	102
4.6.3 AGREGADOS	103
4.6.4 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	103
4.6.4.1 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	103

4.6.4.2 MASSA ESPECÍFICA E MASSA UNITÁRIA	104
4.6.4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA	105
4.6.4.4 PULVERULENTO	106
4.6.4.5 MATÉRIA ORGÂNICA	106
4.6.4.6 RESULTADOS DAS PROPRIEDADES DA AREIA, PEDRISCO E RESÍDUOS DE PNEUS.....	106
4.6.4.7 ADITIVO.....	111
4.6.4.8 ÁGUA.....	111
4.7 DOSAGEM EXPERIMENTAL DOS PAVERS.....	112
4.7.1 DEFINIÇÃO DAS DOSAGENS DE CONTROLE E COM RESÍDUOS DE PNEUS DOS PAVERS.....	113
4.8 PRODUÇÃO DOS PAVERS.....	118
4.8.1 ESCOLHA DO FORMATO E DIMENSÕES DOS PAVERS.....	118
4.8.2 MISTURA DOS MATERIAIS	120
4.8.3 VIBRO=Prensa UTILIZADA	120
4.9 DOSAGEM EXPERIMENTAL DOS CORPOS-DE-PROVA.....	123
4.10 MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA.....	124
5 RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO	127
5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PAVERS.....	127
5.1.1 EFEITO ISOLADO DO TEOR DE RESÍDUOS DE PNEUS SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PAVERS.....	128
5.1.2 EFEITO ISOLADO DO CONSUMO DE CIMENTO PORTLAND SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PAVERS.....	132
5.1.3 MASSA ESPECÍFICA DOS PAVERS	137
5.2. ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS PAVERS	140
5.3 RESISTÊNCIA AO IMPACTO DOS PAVERS	142
5.4 RESISTÊNCIA À ABRASÃO PROFUNDA DOS CORPOS-DE-PROVA..	146
5.5 EXPANSÃO POR UMIDADE DOS CORPOS-DE-PROVA.....	150
5.6 SÍNTESE DAS ANÁLISES DAS PROPRIEDADES VERIFICADAS NOS PAVERS.....	152
5.7 CENÁRIOS DA REDUÇÃO DE DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS DE PNEUS.....	153
6 CONCLUSÕES.....	155
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	158
BIBLIOGRAFIA	160

APÊNDICE A176
APÊNDICE B194