



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

“Aproveitamento de Resíduos de Concreto na Confecção de Peças para Pavimento Intertravado de Concreto”

Daniel Simiele

Orientador: Prof. Dr. Antonio Anderson da Silva Segantini

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Estruturas

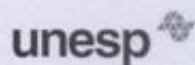
Ilha Solteira – SP

Fevereiro/2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

Si455a	Simiele, Daniel. Aproveitamento de resíduos de concreto na confecção de peças para pavimento intertravado de concreto / Daniel Simiele. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2010. 119 f. : il. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2010 Orientador: Antonio Anderson da Silva Segantini Bibliografia: p. 113-119 1. Concreto. 2. Resíduos de concreto. 3. Pavimento intertravado. 4. Agregados reciclados.
--------	---



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

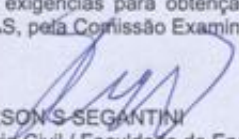
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

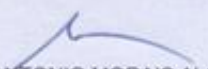
TÍTULO: Aproveitamento de resíduos de concreto na confecção de peças para pavimento intertravado de concreto

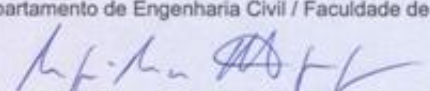
AUTOR: DANIEL SIMIELE

ORIENTADOR: Prof. Dr. ANTONIO ANDERSON S SEGANTINI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA CIVIL, Área: ESTRUTURAS, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. ANTONIO ANDERSON S SEGANTINI
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. MARCO ANTONIO MORAIS ALCANTARA
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. PAULO JOSE ROCHA DE ALBUQUERQUE
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Estadual de Campinas

Data da realização: 22 de fevereiro de 2010.

” Só existem dois dias no ano que nada pode ser feito. Um se chama ontem e o outro se chama amanhã, portanto hoje é o dia certo para amar, acreditar, fazer e principalmente viver”.

Dalai Lama

Com todo meu amor e gratidão dedico este trabalho aos meus pais José Francisco e Edna, às minhas irmãs Daiane e Denise e a minha namorada Jucilene. Obrigado por serem tanto do meu “tudo”.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sua constante e pródiga presença em minha vida.

Ao professor Dr. Antonio Anderson da Silva Segantini por seu precioso trabalho de orientação e pela sua dedicação, competência e sabedoria imprescindíveis para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Eng. Flávio Moreira Salles, profissional responsável pela área de tecnologia do concreto do laboratório de Engenharia Civil da CESP, que nos colocou a disposição as instalações, apoio técnico e seus profundos conhecimentos, fatores estes essenciais no andamento e êxito na conclusão da pesquisa em questão.

Aos professores Jefferson Sidney Camacho e José Antonio Matthiesen, pela compreensão e apoio, enquanto coordenador e vice-coordenador, respectivamente, do programa de pós-graduação em engenharia civil.

Aos técnicos do laboratório de engenharia civil da CESP, Francisco, Michelin, Lana, Iverson, Gilmar, Joaquim, Euclides, Anderson, Bertoluci, Sumie, Jorge, Sérgio, Branco, Pascoalini, Vicente e Lorival e a todos os funcionários, que contribuíram direta ou indiretamente na realização dos ensaios.

Aos técnicos: Gilson, Mário e Ronaldo, do laboratório de engenharia civil da UNESP Ilha Solteira.

Aos professores Marco Antonio de Moraes Alcântara e Haroldo de Mayo Bernardes, pela relevante contribuição quando da realização do exame geral de qualificação do presente trabalho.

A todos os professores e funcionários do departamento de engenharia civil da UNESP campus de ilha solteira.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudos fornecida.

À empresa Sika S.A., pela doação do aditivo superplastificante utilizado na produção do concreto.

Aos meus pais José Francisco e Edna, de quem recebi valiosos ensinamentos de honestidade, humildade e dignidade, que serviram de modelo para definir minha personalidade, e através do vosso amor, esforço e dedicação proporcionaram minha formação acadêmica.

À minha namorada Jucilene Vieira por seu amor, carinho, confiança, respeito e principalmente por abrir mão de momentos tão apazíveis em detrimento da distância proporcionada pela realização desta pesquisa.

Às minhas irmãs Daiane e Denise, por sempre me incentivarem e estarem dispostas a ajudarem no que fosse preciso, demonstrando muito amor e carinho.

Aos meus avós: José e Dolores, Francisco (*In memoriam*) e Luiza (*In memoriam*), pelo amor, sabedoria e todo apoio prestado ao longo de minha vida.

Aos verdadeiros amigos, que torcem por nosso sucesso e que direta ou indiretamente colaboram e muito nas nossas conquistas.

RESUMO

Neste trabalho, objetiva-se o estudo do aproveitamento de resíduos de concreto na confecção de novos concretos destinados à fabricação de peças pré-moldadas utilizadas na pavimentação intertravada. Inicialmente, por meio de realização do estudo de dosagem, a partir dos materiais, utilizados na composição do concreto, previamente caracterizados definiu-se o traço de referência, de modo a se otimizar o consumo de cimento para a resistência requerida de 35 MPa. Com base no traço de referência, procedeu-se a confecção de traços com emprego de teores crescentes de substituição do agregado miúdo natural, por agregado reciclado de concreto, com incremento de 20% até se atingir 100% de substituição, de modo a se definir o traço que apresentasse o teor ótimo de substituição. Tendo-se definido o traço com adição de agregado reciclado de concreto em substituição ao agregado miúdo natural, efetuou-se a confecção de peças pré-moldadas de concreto variando-se a geometria e espessura das mesmas, além de corpos-de-prova destinados aos ensaios de desgaste por abrasão e absorção de água por imersão, tanto para o traço de referência como para o traço com teor ótimo de substituição, a fim de se observar as interferências advindas da adição do agregado reciclado de concreto, quanto às propriedades físico-mecânicas dos novos concretos com estes produzidos, e ainda as influências das variações geométricas nas peças pré-moldadas de concreto.

Palavras-chave: *Concreto. Resíduos de concreto. Pavimento intertravado. Agregados reciclados.*

ABSTRACT

This work, objective is to study the use of concrete wastes in new concretes manufacture destined to precast blocks production used in interlocking paving. In the beginning, through the mix-proportioning study accomplishment, from materials used in concrete composition, previously characterized, it was defined the reference trace, so much that to optimize the cement consume to the request strength of 35 MPa. Base in the reference, occurred the trace manufacture with employment of growing contents of natural small aggregated replacement for concrete recycled aggregated, with increase of 20% until reach 100% of replacement, so much that to define the trace that had presented the great content of replacement. It's having defined the trace if addition of recycled aggregated of concrete in replacement of natural small aggregated, effected the precast blocks manufacture of concrete varying the geometry and thickness from the same, beyond bodies-of-test designated the tests of wear for abrasion and absolved of water for immersion, as much to the reference trace as to the trace with great content of replacement, in order to observe the interference came from the addition of concrete recycled aggregated, as the physical mechanical properties from the new concrete with this produced, and still the influences from the geometric variations in the precast blocks of concrete.

Key words: *Concrete. Concrete wastes. Interlocking pavement. Recycled aggregates.*

LISTA DE FIGURAS

1: Deposição ilegal de resíduos no bairro de Santo Amaro, zona sul da cidade de São Paulo.....	24
2: Política pública para gestão dos resíduos em Belo Horizonte – MG.....	30
3: ECOPONTO (Ponto de Entrega), para recebimento de pequenos volumes de resíduos, situado na cidade do Rio de Janeiro – RJ.....	31
4: Ponto de entrega para pequenos volumes de resíduos na cidade de São Paulo – SP	31
5: Vias Romanas.....	39
6: Pavimento de blocos de argila na cidade de Rio Branco – AC.....	40
7: Rua Tirandentes, da cidade de Araras – SP, com o pavimento de paralelepípedos..	41
8: Rua de pavimento pé-de-moleque localizada na cidade de Paraty – RJ.....	42
9: Praça dos Paiaguás, Ilha Solteira – SP.....	44
10: Calçada da Praia de Boa Viagem, Recife – Pernambuco.....	44
11: Estrutura típica do pavimento intertravado.....	45
12: Formatos típicos das PPC.....	47
13: Efeito da espessura das PPC no desempenho do pavimento.....	48
14: Modelo de assentamento das PPC tipo espinha de peixe.....	49
15: Modelo de assentamento das PPC tipo fileiras.....	49
16: Modelo de assentamento das PPC tipo trama.....	50
17: Efeito da espessura da camada da areia de assentamento no desempenho do pavimento.....	51
18: Distribuição granulométrica do agregado miúdo natural.....	61
19: Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural.....	62
20: Aspecto do agregado reciclado de concreto.....	64
21: Britador de facas utilizado na preparação do agregado miúdo artificial.....	64
22: Distribuição granulométrica do agregado miúdo reciclado de concreto.....	65
23: Consistência do concreto no estado fresco para o traço 1:6.....	71
24: Aparência dos corpos-de-prova referentes aos traços 1:8, 1:6 e 1:4 posicionados nesta ordem da esquerda para a direita.....	73
25: Diagrama de Dosagem confeccionado segundo modelo proposto por Helene e Terzian (1992).....	74
26: Esquema para obtenção das características de dosagem do traço padrão.....	75

27: Ensaio de compressão axial.....	82
28: Resultados dos ensaios de compressão axial, agrupados em relação à idade de ruptura.....	86
29: Módulos de elasticidade estáticos médios.....	88
30: Resistência à compressão axial em peças retangulares.....	90
31: Resistência à compressão axial em peças retangulares.....	98
32: Resistência à compressão axial em peças hexagonais.....	98
33: Peças retangulares de 6 cm de espessura logo após a ruptura.....	99
34: Peças retangulares de 3 cm de espessura logo após a ruptura.....	100
35: Peças hexagonais de 6 cm de espessura logo após a ruptura.....	101
36: Peças hexagonais de 3 cm de espessura logo após a ruptura.....	102
37: Equipamentos utilizados para realização dos ensaios de desgaste por abrasão.....	103
38: Curvas de desgaste por abrasão para os traços de referência e 60% de agregado reciclado.....	105
39: Corpo-de-Prova para o traço de referência logo após o ensaio de desgaste por abrasão.....	105
40: Corpo-de-Prova para o traço com 60% de agregado reciclado logo após o ensaio de desgaste por abrasão.....	106

LISTA DE TABELAS

1: Redução do impacto ambiental (em %) da reciclagem de resíduos na produção de alguns materiais de construção civil (JOHN, 2000).....	21
2: Informações gerais sobre a gestão dos RCD em alguns municípios brasileiros (SNSA, 2006).....	29
3: Volume de resíduos de construção coletados em alguns municípios brasileiros (LEVY, 2001).....	32
4: Recomendações para o uso de agregados reciclados de RCD em novos concretos (ÂNGULO, 2005).....	35
5: Recomendações técnicas da granulometria da areia a ser utilizada na camada de areia de assentamento (CRUZ, 2003).....	52
6: Recomendações técnicas da granulometria dos materiais a serem utilizados no rejuntamento das peças do revestimento (CRUZ, 2003).....	53
7: Faixa granulométrica da areia a ser utilizada na camada de assentamento (CARVALHO, 1998).....	53
8: Requisitos físicos para aceitação de PPC no Brasil - NBR 9781 (ABNT, 1987d)...	57
9: Características físicas e químicas do cimento CP II-Z-32.....	59
10: Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo natural.....	60
11: Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo natural.....	62
12: Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo artificial.....	65
13: Dados referentes aos traços moldados no estudo de dosagem e as respectivas propriedades do concreto no estado fresco.....	72
14: Valores médios obtidos de resistências à compressão axial.....	73
15: Dados referentes à dosagem do traço padrão e as respectivas propriedades do concreto no estado fresco.....	76
16: Dados referentes à confecção dos traços com teores crescentes de substituição do agregado miúdo e as respectivas propriedades do concreto no estado fresco.....	78
17: PPC e corpos-de-prova moldados e os respectivos ensaios a que foram submetidos.....	80
18: Resultados dos ensaios de compressão axial para o traço de referência.....	83
19: Resultados dos ensaios de compressão axial para o traço com adição de 20% de agregado reciclado de concreto.....	83

20: Resultados dos ensaios de compressão axial para o traço com adição de 40% de agregado reciclado de concreto.....	84
21: Resultados dos ensaios de compressão axial para o traço com adição de 60% de agregado reciclado de concreto.....	84
22: Resultados dos ensaios de compressão axial para o traço com adição de 80% de agregado reciclado de concreto.....	85
23: Resultados dos ensaios de compressão axial para o traço com adição de 100% de agregado reciclado de concreto.....	85
24: Resultados dos ensaios de compressão axial para obtenção do nível de carregamento esperado nos ensaios de determinação do módulo de elasticidade....	87
25: Resultados dos ensaios para determinação do módulo de elasticidade estático.....	88
26: Resultados dos ensaios de compressão axial em peças retangulares.....	90
27: Resultados dos ensaios de compressão axial em Peças Retangulares de 6 cm de espessura para o traço de referência.....	94
28: Resultados dos ensaios de compressão axial em Peças Retangulares de 6 cm de espessura para o traço com 60% de agregado miúdo reciclado.....	94
29: Resultados dos ensaios de compressão axial em Peças Retangulares de 3 cm de espessura para o traço de referência.....	95
30: Resultados dos ensaios de compressão axial em Peças Retangulares de 3 cm de espessura para o traço com 60% de agregado miúdo reciclado.....	95
31: Resultados dos ensaios de compressão axial em Peças Hexagonais de 6 cm de espessura para o traço de referência.....	96
32: Resultados dos ensaios de compressão axial em Peças Hexagonais de 6 cm de espessura para o traço com 60% de agregado miúdo reciclado.....	96
33: Resultados dos ensaios de compressão axial em Peças Hexagonais de 3 cm de espessura para o traço de referência.....	97
34: Resultados dos ensaios de compressão axial em Peças Hexagonais de 3 cm de espessura para o traço com 60% de agregado miúdo reciclado.....	97
35: Resultados dos ensaios de desgaste por abrasão para o traço de referência.....	104
36: Resultados dos ensaios de desgaste por abrasão para o traço com adição de 60% de agregado reciclado.....	104
37: Resultados dos ensaios de absorção de água por imersão.....	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP:	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM:	American Society for Testing and Materials
B.S.C.J.:	Building Contractors Society of Japan
CBR:	California Bearing Ratio
CIB:	International Council for Research and Innovation in Building and Construction
CESP:	Companhia Energética de São Paulo
CNUMAD:	Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento
CONAMA:	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DIN:	Deutsche Institut für Normung
ECOPONTO:	Ponto de Entrega para Recebimento de Pequenos Volumes de Resíduos
FAA:	Federal Aviation Administration
FUNTAC:	Fundação de Tecnologia do Estado do Acre
IBGE:	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICPI:	Interlocking Concrete Pavement Institute
INT:	Instituto Nacional de Tecnologia
IPT/EPUSP:	Instituto de Pesquisas tecnológicas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
ISC:	Índice de Suporte Califórnia
NBR:	Norma Técnica Brasileira
NEN:	Nederlands Normalisatie – Instituut
NM:	Norma Mercosul
ONU:	Organização das Nações Unidas
PIB:	Produto Interno Bruto
PPC:	Pecas Pré-moldadas de Concreto
PVC:	Poli Cloreto de Vinila
P&D:	Programa de Pesquisa e Desenvolvimento
RCD:	Resíduos de Construção e Demolição
RILEM:	International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
RSU:	Resíduos Sólidos Urbanos
SNSA:	Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental
UNESP:	Universidade Estadual Paulista
URPV:	Unidades para o Recebimento de Pequenos Volumes

LISTA DE SÍMBOLOS

f_{pk}	=	resistência característica à compressão
f_p	=	resistência média das peças ensaiadas
f_{pi}	=	resistência individual das peças ensaiadas
s	=	desvio padrão da amostra
n	=	número de peças ensaiadas da amostra
t	=	Coefficiente de Student
MPa	=	Mega Pascal
SiO_2	=	Óxido de silício
Fe_2O_3	=	Óxido férrico
Al_2O_3	=	Óxido de alumínio
CaO	=	Óxido de cálcio
SO_3	=	Óxido de enxofre VI
MgO	=	Óxido de magnésio
K_2O	=	Óxido de potássio
Na_2O	=	Óxido de sódio
l:m	=	Cimento:agregados secos totais (em massa)
a/c	=	Relação água cimento
ρ	=	Coefficiente multiplicador em função da altura da peça pré-moldada

SUMÁRIO

Capítulo 1	INTRODUÇÃO	17
Capítulo 2	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	19
2.1	Considerações iniciais	19
2.2	Considerações sobre desenvolvimento e meio ambiente	20
2.2.1	<i>Desenvolvimento sustentável</i>	22
2.3	Impacto dos resíduos de construção e demolição	23
2.4	Caracterização de agregados reciclados	25
2.4.1	<i>Quanto à origem</i>	26
2.4.2	<i>Quanto à forma</i>	27
2.4.3	<i>Quanto à textura</i>	27
2.4.4	<i>Quanto à granulometria</i>	27
2.5	Potencial para a produção de agregados reciclados	28
2.6	Utilização de agregados reciclados de RCD em concretos	33
2.6.1	<i>Motivações da substituição de agregados naturais por reciclados</i>	33
2.6.2	<i>Normalização internacional e do país para agregados reciclados</i>	33
2.6.3	<i>Recomendações para o uso de agregados reciclados em novos concretos</i>	34
Capítulo 3	PAVIMENTO INTERTRAVADO	36
3.1	Considerações iniciais	36
3.2	Breve histórico da pavimentação	37
3.2.1	<i>Blocos de argila</i>	39
3.2.2	<i>Pedras talhadas e aparelhadas manualmente</i>	40
3.2.3	<i>Blocos de madeira</i>	42
3.2.4	<i>Peças pré-moldadas de concreto</i>	42

3.3	Estruturas do pavimento intertravado	44
3.3.1	<i>Camada de revestimento do pavimento intertravado</i>	46
3.3.2	<i>Areia de assentamento</i>	50
3.3.3	<i>Demais camadas do pavimento intertravado</i>	54
3.4	Processos de fabricação da PPC	54
3.4.1	<i>Processo de moldagem manual</i>	55
3.4.2	<i>Processo de moldagem mecânico</i>	55
3.5	CrITÉRIOS de aceitação das peças de concreto para pavimentação	55
Capítulo 4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	58
4.1	Caracterização dos materiais	58
4.1.1	<i>Cimento</i>	58
4.1.2	<i>Areia</i>	60
4.1.3	<i>Brita</i>	61
4.1.4	<i>Água</i>	62
4.1.5	<i>Aditivo superplastificante</i>	63
4.1.6	<i>Resíduo de concreto</i>	63
4.2	Estudo de dosagem	65
4.2.1	<i>Metodologias de dosagem</i>	66
4.2.2	<i>Realização do estudo de dosagem</i>	70
4.3	Confecção dos traços com teores de substituição do agregado miúdo	76
4.4	Moldagem dos corpos-de-prova PPC a serem ensaiados	79
Capítulo 5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	81
5.1	Resultados dos ensaios para os traços com teores de substituição do agregado miúdo	81
5.1.1	<i>Ensaio de compressão axial em corpos-de-prova cilíndricos</i>	81
5.1.2	<i>Ensaio de determinação do módulo de elasticidade estático</i>	86
5.1.3	<i>Ensaio de compressão axial em peças retangulares</i>	89
5.1.4	<i>Análise dos resultados dos ensaios para os traços com teores de substituição do agregado miúdo</i>	91

5.2	Resultados dos ensaios para os traços de referências e teor ótimo	93
5.2.1	<i>Ensaio de compressão axial em PPC de diferentes geometrias e espessuras</i>	93
5.2.2	<i>Ensaio de desgaste por abrasão</i>	102
5.2.3	<i>Ensaio de absorção de água por imersão</i>	106
5.2.4	<i>Análise dos resultados dos ensaios comparativos entre os traços de referência e teor ótimo</i>	107
Capítulo 6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	110
6.1	Conclusões	110
6.2	Propostas para trabalhos futuros	112
	REFERÊNCIAS	113

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Nos últimos cinco anos, diversas prefeituras brasileiras, desde pequenas localidades do interior até as grandes capitais, iniciaram programas visando à restauração dos passeios públicos, utilizando diversas técnicas e inúmeros materiais, dentre estes, podendo ser citado como grande destaque o bloco de concreto para pavimento intertravado, porém na maioria das cidades brasileiras a situação dos passeios públicos ainda é tida como precária.

Nos grandes centros urbanos, devido ao crescimento da quantidade de veículos em circulação, os passeios têm sido reduzidos para dar lugar a ruas e avenidas mais largas, além do que não há um padrão de execução definido, o que resulta em diferentes tipos de pavimento, inclinações inadequadas, degraus, buracos e tantos outros obstáculos. Isto acontece porque em geral as prefeituras deixam a construção e a manutenção dos passeios por conta dos proprietários dos imóveis. Tem-se como resultado, passeios abandonados, esburacados e cheios de obstáculos, sem qualquer padronização na execução. Assim, pode-se afirmar que as condições são precárias, prejudicando a fluidez, o conforto e a segurança dos pedestres e praticamente impossibilitando a locomoção dos cidadãos portadores de deficiência física.

O projeto ou a padronização dos passeios públicos é de responsabilidade do poder público. Em diversos países, considerados de primeiro mundo, onde existe a preocupação com o pedestre, nos projetos urbanísticos são especificadas faixas que separam os passeios das ruas e avenidas. Nessa zona de separação são plantadas árvores e instalados equipamentos como telefones, bancos, lixeiras entre outros. Assim, o espaço destinado à circulação de pedestres, portanto, é bem definido e livre de qualquer obstrução.

Em Ilha Solteira, SP, por exemplo, a Praça dos Paiaguás no centro da cidade foi totalmente remodelada. O projeto urbanístico também contempla a substituição dos passeios de concreto desempenado, existentes ao longo da Avenida Brasil, que corta a cidade de norte a sul, numa extensão de mais de 5 km, por pavimento intertravado. Em várias outras cidades da região também se observa movimentos semelhantes.

Inserido neste contexto, visando propor uma alternativa ambientalmente correta na busca do desenvolvimento sustentável, que possibilite uma destinação adequada para os resíduos de concreto resultantes da demolição de edificações cuja alvenaria fora construída

utilizando-se blocos de concreto, objetiva-se neste trabalho estudar o aproveitamento de tais resíduos, incorporando-os no concreto destinado a confecção de peças para pavimento intertravado.

Atualmente no Brasil, o gerenciamento da deposição final dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) está previsto na resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307 do ano de 2002, que entrou em vigor em janeiro de 2005, vindo a estabelecer aos municípios e geradores que estes elaborem planos de gerenciamento integrado dos RCD.

Citando o exemplo de São José do Rio Preto, SP, o Plano Integrado de Gerenciamento dos Resíduos da Construção está instituído e regulamentado (Lei 9393/2004 e Decreto 12751/2005), sendo que este conta com instalações públicas para o recebimento dos resíduos (pontos de entrega) e uma central de processamento que opera a triagem dos resíduos gerados no município, reciclando os resíduos de concreto, alvenaria, madeira e outros.

Diante da importância do tema em questão, foram realizados estudos visando definir, para o concreto a ser utilizado, uma composição que propicie condições favoráveis de trabalhabilidade, resistência, durabilidade, absorção, redução de custos e que possibilite aproveitamento máximo dos resíduos a serem gerados na britagem dos blocos de concreto provenientes da demolição de edificações na cidade de Ilha Solteira, SP.

Com isso, nos capítulos 2 e 3 apresenta-se respectivamente um levantamento bibliográfico referente ao panorama atual dos resíduos de construção e demolição no Brasil e no Exterior e aspectos relevantes referentes à pavimentação por blocos intertravados, já a metodologia experimental e os materiais empregados estão apresentados no capítulo 4.. O capítulo 5 compreende a apresentação e análise dos resultados experimentais obtidos e por fim o capítulo 6 refere-se às conclusões e considerações finais.

Capítulo 2

RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

2.1 Considerações iniciais

Angulo (2005) relata que os resíduos de construção e demolição (RCD) representam cerca de 50%, em massa, dos resíduos sólidos urbanos (RSU). No intuito de reduzir a deposição ilegal e sistemática dos RCD, que causa assoreamento dos rios, entupimento de bueiros, degradação de áreas e esgotamento de áreas de aterro, além de altos custos sócio-econômicos, grande parte dos países no mundo investem num sistema formal de gerenciamento. Esse gerenciamento, no Brasil, está previsto na resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307 do ano de 2002, cabendo aos municípios uma política municipal para os RCD, sendo de fundamental importância a reciclagem da fração de origem mineral, pois representa cerca de 90%, em massa, desse resíduo.

No Brasil, a reciclagem da fração mineral dos RCD, usualmente, gera material de enchimento para aterros e agregados para a pavimentação, sendo menor seu emprego na fabricação de produtos à base de cimento (concreto, blocos, argamassa, etc.).

A maior parte do mercado dos agregados, tanto no Brasil como em outros países, é voltada para o emprego em concretos e em argamassas, sendo que no Brasil, a reciclagem de toda fração mineral dos RCD como agregados ocupa apenas cerca de 20% do mercado de produtos à base de cimento. Assim, a utilização dos agregados reciclados provenientes da fração mineral dos RCD em concretos é importante para o aumento dos índices de reciclagem, gerando assim produtos de maior rentabilidade.

Segundo Angulo (2005) o emprego dos agregados de RCD reciclados em concretos constitui uma alternativa altamente viável, no entanto as normas para uso de agregados provenientes dos RCD em concretos não são facilmente aplicáveis em usinas de reciclagem, pois pode resultar em agregados reciclados com propriedades físicas variáveis, tal fato se deve principalmente à:

- Heterogeneidade da composição dos RCD e variabilidade das propriedades dos agregados reciclados;
- Falta de controle das operações de processamento;

- Quantificação de fases do material por meio de análise visual, que é subjetiva e não garante homogeneidade do produto final, não apresentando uma relação clara com o desempenho dos concretos.

2.2 Considerações sobre desenvolvimento e meio ambiente

As atividades produtivas industriais, uma das bases de sustentação do progresso, consomem, além de energia, recursos naturais renováveis e não renováveis. As sociedades contemporâneas buscam incansavelmente o desenvolvimento, demandando grande crescimento no consumo de energia e insumos naturais, que utilizados em atividades produtivas, supostamente, se traduziriam na melhoria da qualidade de vida, porém, essa busca pelo desenvolvimento reflete diversos problemas, como, poluição urbana do ar, chuva ácida, diminuição da camada de ozônio, aquecimento por efeito estufa e mudança de clima, disponibilidade de água doce, desmatamento e desertificação, onde estes se tornaram objeto de muito estudo e grande preocupação no campo ambiental.

O modelo de produção hoje em vigor no mundo segue uma tendência linear, onde os produtos são projetados, construídos, utilizados e finalmente sucateados no lixo, tal modelo é válido tanto para bens de consumo não duráveis, quanto para bens de consumo duráveis. O processo de produção é alimentado, em grande parte, por recursos naturais não renováveis, e a reciclagem de resíduos permite a redução do impacto ambiental para a produção de um determinado bem, conforme exemplos citados na tabela 1 (JOHN, 2000).

Entretanto Goldemberg (2001) alerta que, apesar de seus atrativos, o “salto tecnológico” não deve ser considerado como uma estratégia universal, por diversas razões. Exemplifica dizendo que países em desenvolvimento necessitam de inovações mais adequadas a seus recursos naturais próprios do que aquelas que eles podem obter dos países mais desenvolvidos. Nesta linha de pensamento, no caso do Brasil, muitas vezes as soluções para problemas locais podem diferir das ações mais gerais.

Tabela 1: Redução do impacto ambiental (em %) da reciclagem de resíduos na produção de alguns materiais de construção civil (JOHN, 2000).

Impacto Ambiental	Aço	Vidro	Cimento ¹
Consumo de energia	74	6	71
Consumo de matéria prima	90	54	50
Consumo de água	40	50	-
Poluentes atmosféricos	86	22	<50 ²
Resíduos em geral	95	54	-
Resíduos minerais	97	79	-

¹ Adição de 50% de escória ao cimento.

² Considera-se apenas a redução de poluentes no processo de clinquerização, como CO_2 .

A cadeia produtiva do setor da construção, o chamado “*construbusiness*”, é um dos mais importantes setores da atividade econômica brasileira. Este setor tem um importante efeito multiplicador na economia, com uma participação de aproximadamente 18% no PIB nacional e investimentos superiores a R\$ 110 bilhões por ano. No entanto, se do lado econômico o *construbusiness* potencializa a retomada do desenvolvimento e a superação das desigualdades econômicas e sociais do país, gerando receitas e empregos e diminuindo o déficit de infra-estrutura e habitacional, por outro lado, não se podem ignorar as implicações negativas que a atividade promove no meio ambiente.

John (apud CARNEIRO et al., 2001) afirma que, ao longo da história da humanidade, a visão de progresso se confunde com um crescente domínio e transformação da natureza, sendo os recursos naturais vistos como ilimitados. Segundo este autor, a visão de desenvolvimento sustentável surge como decorrência da percepção sobre a incapacidade desse modelo de desenvolvimento e preservação ambiental se perpetuar e até mesmo por em risco a sobrevivência da espécie humana, vindo a acarretar uma completa reformulação da visão de impacto ambiental das atividades humanas, incorporando todos os impactos das atividades de produção e de consumo, desde a extração da matéria prima até o destino do produto após sua utilização.

2.2.1 Desenvolvimento sustentável

O conceito de desenvolvimento sustentável surgiu pela primeira vez, com o nome de ecodesenvolvimento, no início da década de 1970, sendo uma resposta a polarização exacerbada, que opunha partidários de visões opostas sobre as relações entre crescimento econômico e meio ambiente. De um lado, aqueles que julgavam o crescimento econômico uma força capaz de eliminar os limites ambientais, e do outro lado, aqueles para os quais o meio ambiente apresenta limites absolutos ao crescimento econômico.

A Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), também conhecida como ECO-92 ou Cúpula da Terra, realizada entre os dias 3 e 14 de junho de 1992, no Brasil na cidade do Rio de Janeiro, contou com a participação de 170 países membros da ONU, e tinha como principal objetivo buscar meios de conciliar o desenvolvimento sócio-econômico com a conservação e proteção dos ecossistemas terrestres. A Conferência do Rio consagrou o conceito de desenvolvimento sustentável, tendo como resultado a criação da Agenda 21, que tratava de um acordo entre os países presentes ao encontro de colocar em prática um amplo programa na busca do desenvolvimento sustentável do planeta.

Os recursos minerais são tidos como a principal matéria-prima na produção dos materiais utilizados na construção civil e a Agenda 21 não foi explícita quanto a estes recursos, porém dedicou na Seção II, um Capítulo aos recursos terrestres. Após cinco anos da Conferência do Rio, a implementação da Agenda 21 foi avaliada em evento promovido pela ONU, realizado em Nova York no ano de 1997, conhecido como Conferência Rio+5. O documento apresentado pelo governo brasileiro na Conferência, contemplando as ações executadas nas esferas federal, estaduais e municipais, desde 1992, reconhece que os avanços em relação ao planejado para a gestão dos recursos terrestres estão aquém das necessidades no País, tendo sido avaliados como precários.

Em outubro do ano de 2000, realizou-se na Holanda a Conferência *Sustainable Building 2000*, marcada pelo início da integração dos países em desenvolvimento a pesquisas de interesses globais, até então exclusivamente conduzidas por países desenvolvidos, movidos por uma pressão ambiental muito elevada, tendo como resultado a conclamação de um acompanhamento pró-ativo do *International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB)* no intuito de estimular iniciativas e intervenções para a construção sustentável nos países em desenvolvimento. Cerca de um mês depois, no *CIB Symposium on*

Construction and the Environment, realizado em São Paulo, o CIB anunciou oficialmente o apoio ao desenvolvimento de uma agenda 21 para a construção sustentável nos países em desenvolvimento, onde os objetivos deste documento podem ser sumarizados em: (a) identificar os desafios-chave em países em desenvolvimento; (b) identificar as maiores barreiras; (c) orientar investimentos internacionais em (P&D) em países em desenvolvimento; e (d) estimular discussões sobre desenvolvimento sustentável em países em desenvolvimento.

Agopyam (apud: CIB, 2000) afirma que os impactos ambientais da construção civil ocorrem em toda a cadeia produtiva e que os insumos empregados, por si só, são grandes consumidores de recursos naturais e de energia, mas também podem absorver e servir de reciclagem de resíduos.

Oliveira et al. (2001) relata que, a adoção de uma política de incentivo ao reaproveitamento dos resíduos minerais descartados pelas obras pode reduzir a quantidade de minerais extraídos das jazidas e, conseqüentemente, diminuir o impacto ambiental por meio da reutilização e da reciclagem dos rejeitos minerais.

A Resolução CONAMA nº 307, aprovada em 05/07/2002, que entrou em vigor no ano de 2005, criou instrumentos para a superação dos problemas gerados pelos resíduos de construção e demolição, definindo responsabilidades e deveres, e abrindo caminho para o preparo de normas técnicas tanto para o correto manejo dos resíduos como para seu uso pós-reciclagem. A resolução impõe aos geradores a obrigatoriedade da redução, reutilização e reciclagem dos resíduos. Mas, diante das características diversas destes geradores, foi definida, para os municípios e Distrito Federal, a necessidade de desenvolverem e programarem Planos Integrados de Gerenciamento que possibilitem a expressão das responsabilidades dos geradores, correspondentes à sua diversidade.

2.3 Impacto dos resíduos de construção e demolição

No Brasil, a geração de RCD *per capita*, foi estimada em 500 kg/hab.ano, mediana para algumas cidades brasileiras (PINTO, 1999). Segundo a pesquisa “Estimativas Populacionais 2008”, divulgada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população brasileira atual é de aproximadamente 189,6 milhões de habitantes, sendo que cerca de 152 milhões vivem no meio urbano, com isso, teríamos um montante de resíduos, por estimativa, da ordem de 76×10^6 t/ano.

Os RCD, quando ignorados, são responsáveis por deposições ilegais tanto no Brasil como no exterior. Na cidade de São Paulo, por exemplo, mais de 20% dos RCD são depositados de maneira ilegal dentro da cidade, gerando um custo estimado da ordem de R\$45.000.000,00/ano para sua coleta, transporte-transbordo e deposição final no aterro (SCHNEIDER, 2003).

Os efeitos da deposição irregular na malha urbana são: (a) assoreamento de rios e córregos; (b) entupimento de bueiros e galerias da rede pluvial; (c) degradação das áreas urbanas; (d) proliferação de escorpiões, aranhas e roedores que afetam a saúde pública. Desta forma, o gerenciamento dos RCD tradicionalmente praticado pelo poder público é caracterizado pela limpeza repetitiva das áreas de deposição ilegal dentro da malha urbana, como exemplificada na figura 1.



(a) (b)
Figura 1: Deposição ilegal de resíduos no bairro de Santo Amaro, zona sul da cidade de São Paulo.
(a): Rua utilizada como depósito clandestino.
(b): Rua após limpeza do depósito clandestino.
Fonte: (Câmara Municipal de Estarreja).

A grande massa de RCD existente nas cidades contribui significativamente para o esgotamento de aterros, principalmente em cidades de grande porte, pois o resíduo é tradicionalmente aterrado nos mesmos locais que os RSU (ZORDAN, 1997). Embora os RCD sejam considerados inertes pela NBR 10.004 (ABNT, 1987a), Ângulo (2002) mostra, a partir de um levantamento bibliográfico internacional, que componentes orgânicos como tintas, plásticos, óleos, asfaltos, madeiras e amianto, bem como algumas substâncias inorgânicas como o manganês podem contaminar aterros ou colocar em risco a saúde das pessoas. Desta forma se torna evidente a necessidade de uma política voltada especificamente para a gestão dos resíduos perigosos presentes nos RCD como, por exemplo, a já realizada com o amianto na União Européia.

No intuito de minimizar os impactos causados pelos RCD nas cidades, se torna necessário a adoção de estratégias de gerenciamento, que podem ser resumidas nos seguintes itens:

- Evitar deposições ilegais, sendo necessário o posicionamento estratégico das áreas de coleta dentro da malha urbana, de forma a minimizar a distância e o custo de transporte;
- Segregar os tipos de materiais dos RCD na fonte, promovendo a redução dos custos de deposição, além de facilitar a reciclagem, uma vez que determinados tipos de materiais presentes nos RCD podem ser reciclados por processos distintos;
- Estimular a reciclagem, sendo que a reciclagem das frações não minerais dos RCD, como madeira, plástico, metais entre outros é facilmente praticada, visto a existência de catadores e empresas especializadas na coleta e reciclagem destes materiais, no entanto o mesmo não ocorre com a fração mineral dos RCD, que representa grande parte do resíduo em massa.

2.4 Caracterização de agregados reciclados

A qualidade do processo de reciclagem não é suficientemente garantida pela produção de agregados reciclados bem graduados e limpos, o material deverá ser adequado à finalidade específica para a qual se destina, ou seja, fisicamente, sua granulometria deverá enquadrar-se dentro de determinados limites e, quimicamente deverá conter níveis mínimos toleráveis de contaminação, garantindo assim, que o concreto produzido seja durável proporcionando estabilidade às estruturas construídas.

Levy (2001) afirma que a qualidade dos agregados é de vital importância na durabilidade dos concretos, justificando-se assim a necessidade em apresentar uma forma de classificação para os mesmos, com isso são apresentados, a seguir, critérios de classificação, baseados na origem, na forma, na textura e na granulometria.

2.4.1 Quanto à origem

Os resíduos de construção e demolição destinados à produção de agregados reciclados, dependendo da sua origem, ao passarem por determinado britador estes resíduos darão origem a agregados com formas totalmente diferentes, tornando-se assim, sua procedência fator relevante a ser considerado na produção de agregados reciclados, pois em determinados casos podem levar a um consumo de cimento muito elevado para a produção de concretos com resistências superiores a 30 MPa, tornando-se técnica e economicamente inviável.

A seguir, são apresentadas as definições de agregados reciclados provenientes de resíduos de alvenaria e de resíduos de concreto.

- Agregados provenientes de resíduos de alvenaria.

São agregados obtidos da britagem de fragmentos de materiais minerais, provenientes de demolição, ou resíduos de construção, são materiais que podem ou não estar contaminados com resíduos de tinta, gipsita e outras substâncias em menores ou maiores teores. Normalmente sua resistência à compressão é inferior a resistência à compressão de agregados naturais e poderão, ou não, conforme sua qualidade e sua granulometria, desenvolver reação pozolânica (LEVY, 2001).

- Agregados reciclados provenientes de resíduos de concreto.

São agregados obtidos da britagem de fragmentos de materiais minerais, provenientes da demolição de estruturas de concreto, assim como concretos frescos, endurecidos e rejeitados, conforme o caso, estes materiais poderão estar contaminados por agentes agressivos como cloretos e ou sulfatos, dependendo única e exclusivamente da origem destes fragmentos. São materiais que podem ou não estar contaminados com resíduos de tinta. Normalmente sua resistência à compressão dependerá da resistência à compressão dos agregados naturais utilizados na produção do concreto original (LEVY, 2001).

2.4.2 Quanto à forma

A forma das partículas dos agregados reciclados é mais angular que a dos agregados naturais, exercendo influência direta no volume total de pasta necessário para garantir a plasticidade especificada de determinado concreto. Contudo conclui-se que os agregados miúdos reciclados provenientes de processo de britagem, apresentam formas maiores e mais angulosas do que seria desejável para a produção de boas misturas, pois concretos elaborados exclusivamente com estes agregados, apresentam maior consistência e conseqüentemente menor trabalhabilidade do que os concretos preparados com agregados naturais utilizando-se o mesmo traço.

2.4.3 Quanto à textura

Metha (1994) define a textura superficial pelo grau de quanto à superfície do agregado é lisa, áspera ou celular, e a forma indicada para determinação é baseada em avaliação visual. Areia e pedregulho são lisos no seu estado natural. Pedras britadas de granito, basalto e calcário apresentam uma textura áspera. Agregados com superfície celular e áspera apresentaram maior absorção de água que agregados de superfície lisa.

2.4.4 Quanto à granulometria

Em cada concreto a ser preparado, ou seja, em cada mistura, incorporam-se partículas com diversos tamanhos, a distribuição desses tamanhos se denomina granulometria. Quando os concretos são preparados com menor exigência de qualidade, são utilizados, às vezes, uma variedade completa de tamanhos dos agregados, sendo estes denominados bica corrida ou brita graduada. No preparo de concretos de boa qualidade a alternativa sempre utilizada consiste em obter o agregado em pelo menos dois grupos de tamanhos, sendo as principais divisões entre agregado miúdo, compreendendo material não maior do que 4,8 mm, e agregado gráudo, que compreende material maior do que 4,8 mm.

2.5 Potencial para a produção de agregados reciclados

Analisar a influência do aproveitamento de resíduos de concreto em peças para pavimentação intertravada, não faria o menor sentido se não houver matéria prima em quantidade suficiente e qualidade técnica compatível para tal, logo se faz necessário uma análise da potencialidade de produção de agregados reciclados no país, pois havendo matéria prima em quantidade suficiente, a iniciativa privada em conjunto com o meio técnico, acabam por fornecer condições para sua utilização.

A partir de 2002 destaca-se, no Brasil, o estabelecimento de políticas públicas, normas, especificações técnicas e instrumentos econômicos, voltados ao equacionamento dos problemas resultantes do manejo inadequado dos resíduos da construção civil. Este conjunto de políticas, normas e instrumentos econômicos colocam o país em destaque entre os situados no Hemisfério Sul. E, por outro lado, possibilita que os agentes envolvidos na cadeia dos resíduos desenvolvam iniciativas no rumo da sustentabilidade dos processos de gestão.

Existe hoje um grande número de construtoras que, capitaneadas por seus órgãos setoriais em diversas unidades da Federação, instituem sistemas de gerenciamento em seus canteiros de obra. Há, ainda, um interesse expressivo de empreendedores privados para a abertura de novos e rentáveis negócios nas atividades de triagem e reciclagem. São ações que vem de encontro ao esforço crescente dos municípios, principalmente os que se posicionam como pólos regionais, de dar cumprimento às diretrizes do Conselho Nacional do Meio Ambiente.

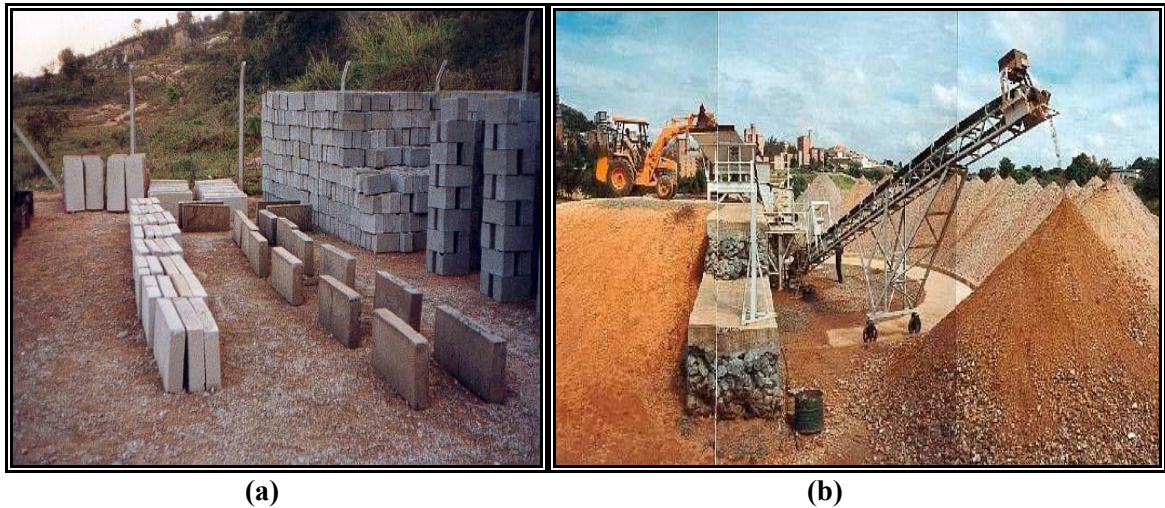
A tabela 2 apresenta informações gerais sobre as iniciativas, de alguns municípios brasileiros, no que diz respeito à gestão adequada dos resíduos de construção e demolição.

Tabela 2: Informações gerais sobre a gestão dos RCD em alguns municípios brasileiros (SNSA, 2006).

Município	Plano de Gestão Desenvolvido	Legislação Específica Aprovada	Pontos de Entrega para Pequenos Volumes	Áreas Privadas para Manejo de Grandes Volumes	Áreas Públicas para Manejo de Grandes Volumes
Araraquara/SP	Sim	-	Sim	-	-
Belo Horizonte/MG	Sim	-	Sim	Sim	Sim
Brasília/DF	-	-	-	-	Sim
Campinas/SP	-	-	-	-	Sim
Curitiba/PR	-	Sim	-	-	-
Diadema/SP	Sim	Sim	Sim	-	-
Fortaleza/CE	-	-	-	Sim	-
Guarulhos/SP	Sim	-	Sim	Sim	Sim
Joinville/SC	Sim	Sim	-	Sim	-
Londrina/PR	-	-	-	-	Sim
Maceió/AL	-	-	Sim	-	-
Piracicaba/SP	Sim	-	Sim	-	Sim
Ribeirão Pires/SP	Sim	-	Sim	-	Sim
Ribeirão Preto/SP	-	-	-	-	Sim
Rio de Janeiro/RJ	-	Sim	Sim	-	-
Salvador/BA	Sim	-	Sim	-	-
São Carlos/SP	-	-	Sim	-	Sim
São José R. Preto/SP	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
São Paulo/SP	Sim	Sim	Sim	Sim	-
Uberlândia/MG	-	-	Sim	Sim	-

Dentre os municípios citados na tabela anterior, alguns demonstram ações mais expressivas na gestão dos RCD, podendo-se citar entre estes:

- **Belo Horizonte/MG:** Município pioneiro na implantação de política pública para gestão dos resíduos, em processo iniciado em 1993. Existem 23 pontos de entrega (URPV – Unidades para o Recebimento de Pequenos Volumes), duas áreas de reciclagem, uma área para produção de artefatos para a construção, ilustrada na figura 2(a), e uma área de transbordo e triagem privada, ilustrada na figura 2(b). Neste município o processo de educação ambiental é constante.



(a) (b)
Figura 2: Política pública para gestão dos resíduos em Belo Horizonte - MG.

(a): Área para produção de artefatos para a construção.

(b): Área privada de transbordo e triagem.

Fonte: Sistema Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA, 2006).

- **Diadema/SP:** Existem 4 instalações públicas para o recebimento de pequenos volumes (Pontos de Entrega) e uma instalação para reciclagem de madeira proveniente dos RCD e dos móveis coletados.
- **Guarulhos/SP:** O Plano Integrado de Gerenciamento dos Resíduos da Construção está em implantação. Existem 11 instalações públicas para o recebimento de pequenos volumes (Pontos de Entrega), uma Área de Triagem pública, três Áreas de Transbordo e Triagem privadas, uma Área de Reciclagem privada e outra pública, e dois Aterros de resíduos.
- **Rio de Janeiro:** O município opera com uma rede de ECOPONTOS (Pontos de Entrega), como o apresentado na figura 3, para recebimento de pequenos volumes e já instituiu, por Resolução Municipal, os procedimentos para apresentação dos Projetos de Gerenciamento de Resíduos, pelos geradores.



Figura 3: ECOPONTO (Ponto de Entrega), para recebimento de pequenos volumes de resíduos, situado na cidade do Rio de Janeiro – RJ.

Fonte: Sistema Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA, 2006).

- **São Paulo/SP:** O Plano Integrado de Gerenciamento dos Resíduos da Construção está em fase de implantação. Existe um bom numero de instalações públicas para o recebimento de pequenos volumes (Pontos de Entrega), como ilustrado na figura 4, uma Área de Reciclagem pública e diversas Áreas de Reciclagem privadas, aterros e ainda varias áreas de transbordo e triagem privadas. As planilhas de compra municipais permitem a aquisição de agregados reciclados em obras públicas.



Figura 4: Ponto de entrega para pequenos volumes de resíduos na cidade de São Paulo – SP.

Fonte: Sistema Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA, 2006).

Levy (2001) relata que, um dos maiores problemas de grande parte dos municípios brasileiros é o fato de que: o procedimento usual dos munícipes, ao efetuarem uma construção nova, uma reforma ou demolição é, ao final de uma determinada etapa ou ao fim da obra, dependendo do tamanho da mesma, chamar uma caçamba e depositar todos os rejeitos. Observa-se, no entanto, que as caçambas recebem toda sorte de rejeitos, desde resíduos de construção, propriamente dito, até rejeitos de podas e objetos indesejados como sofás e armários quebrados. A tabela 3 apresenta um panorama sobre a geração de resíduos sólidos que ocorrem em alguns dos principais municípios brasileiros.

Tabela 3: Volume de resíduos de construção coletados em alguns municípios brasileiros (LEVY, 2001).

Município	Média Mensal dos Resíduos de Construção Coletados (ton./dia)	Ano Base
Belo Horizonte/MG	1500	1993
Diadema/SP	458	2001
Guarulhos/SP	1308	2005
Ribeirão Preto/SP	1043	1995
Salvador/BA	2746	2001
Santo André/SP	1013	1997
São José dos Campos/SP	733	1995
São Paulo/SP	2050	2001
Uberlândia/SP	958	2000
Vinhedo/SP	28	2001

Na cidade de São Paulo, em especial, a diversidade de materiais recebida pelas caçambas além das exigências na recepção no aterro motivou a organização dos transportadores a formarem associações, com o objetivo de criar estações de classificação e transbordo, sendo que, atualmente, a cidade conta com duas associações de transportadores de entulho.

2.6 Utilização de agregados reciclados de RCD em concretos

2.6.1 *Motivações da substituição de agregados naturais por reciclados*

Com uma produção bruta da ordem de 200 milhões de toneladas anuais a produção de agregados ocupa, em quantidade, o primeiro lugar entre as substâncias minerais produzidas, superando, inclusive, o minério de ferro. Os agregados minerais – areia e pedra britada – constituem hoje o segmento do setor mineral mais explorado e comercializado no país. Porém, a importância dos agregados no cenário nacional não é definida somente pela quantidade produzida. Areia e brita, exploradas praticamente em todo território brasileiro são absolutamente indispensáveis para a indústria da construção civil.

O custo do transporte, por caminhão, de pedra britada por 50 km é considerado equivalente ao preço na origem, isto é, ao custo total da extração, beneficiamento e comercialização, acrescido do lucro. O transporte ferroviário, teoricamente mais barato, demanda altos investimentos em linha férrea, em terminais de carga e descarga e exige produção concentrada em poucos grandes produtores. Tais fatores mostram a razão da maioria das pedreiras e portos de areia estarem localizados próximos às grandes aglomerações urbanas. Esta proximidade acaba se tornando um problema tanto para as mineradoras como para os habitantes das cidades.

Diante do exposto, torna-se evidente que a opção pela implantação de usinas recicladoras locadas junto aos centros consumidores desponta como solução política e ecologicamente correta. Todavia, não deve esquecer-se de levar em consideração certos cuidados, como: integrar totalmente a usina à paisagem local para não causar qualquer tipo de poluição visual, controlar eventual poluição química, dentre outros cuidados específicos para cada caso.

2.6.2 *Normalização internacional e do país para agregados reciclados*

Em termos de normalização Internacional, para agregados reciclados despontam com destaque: a proposta japonesa de normalização B.C.S.J.44 de (1977), a norma britânica 6543,

a norma holandesa CUR45 (1986), o adendo à norma dinamarquesa DIF 46 (1989), as diretrizes da RILEM TC 121 DRG (Conjunto de Pesquisas Realizadas nos Estados Unidos, Europa e Japão) apresentadas no 3º Simpósio Internacional sobre Demolição e Reutilização de Concreto e Alvenaria (1993), a norma alemã DIN 4226-100 e no âmbito nacional a NBR 15116 (ABNT, 2004).

A norma brasileira se demonstra mais conservadora e só recomenda o emprego dos agregados reciclados de RCD em concretos com resistências de até 15 MPa. As demais normas admitem o uso em concretos com resistências acima de 25 MPa.

Todas as normas citadas exigem a classificação da fração mineral dos RCD em resíduos de concreto, de alvenaria ou mistos, além de controlar os teores das fases presentes na fração gráuda dos agregados de RCD reciclados. A norma brasileira não separa concreto e argamassa em duas fases pela dificuldade de distinção visual através da catação, sendo uma única fase chamada cimentícia.

A norma brasileira, diferentemente das especificações estrangeiras, é menos restritiva quanto ao teor de finos presentes nos agregados de RCD reciclados, por considerar interessante na fabricação de determinados produtos cimentícios pré-fabricados que geralmente empregam a fração fina dos resíduos de pedreiras. Entretanto, para limitar os teores de argilominerais presentes nos solos que eventualmente se misturam no processo de reciclagem, os torrões de argila presentes nestes agregados são limitados em 2% em massa.

Quanto às propriedades físicas dos agregados, a especificação alemã limita os valores de massa específica aparente bem como os valores de absorção, já a especificação brasileira, como as propriedades massa específica aparente e absorção são variáveis dependentes, selecionou-se a propriedade no qual o método de caracterização era mais simples, no caso a massa específica aparente.

2.6.3 Recomendações para o uso de agregados reciclados em novos concretos

As recomendações de Lima (1999), no Brasil e da B.S.C.J. (HANSEN, 1992), no Japão, são mais conservadoras por limitarem a resistência mecânica dos concretos em 18 MPa, quando estes forem confeccionados utilizando-se agregados reciclados de concreto. Estas também restringem as aplicações dos concretos a situações nas quais a influência da porosidade na durabilidade dos concretos é reduzida, assim como os concretos produzidos a

partir de resíduos de alvenaria, no entanto, a recomendação brasileira considera o uso da fração miúda desses agregados diferente da RILEN que admite essa fração muito porosa e contaminada, sendo esta última a única recomendação que prevê a produção de concretos com resistência mecânica acima de 20 MPa.

Diferentemente das demais normas, a norma holandesa especifica valores de abrasão independente das aplicações requeridas aos novos concretos produzidos a partir de agregados reciclados.

Todas as normas anteriormente citadas exigem a classificação da fração mineral do RCD em resíduos de concreto, alvenaria ou mistos, além de requerer o controle dos teores de tais fases presentes na fração graúda dos agregados de RCD reciclados. Também são estabelecidos valores limites para massa específica aparente e absorção de água dos agregados re RCD reciclados.

Na tabela 4 estão apresentadas as principais recomendações internacionais (HANSEN, 1992; RILEM RECOMMENDATION, 1994; HENDRIKS, 2000) e a primeira proposta nacional (LIMA, 1999).

Tabela 4: Recomendações para o uso de agregados reciclados de RCD em novos concretos (ÂNGULO, 2005).

Exigências	BSJ	Holanda		RILEM		LIMA (1999)	
Max fck (MPa)	18	nd	nd	50 a 60	16 a 20	16	12
Natureza do Agregado	Concreto	Concreto	Alvenaria ³	Concreto	Alvenaria	Concreto	Alvenaria
Aplicação	Fundações Edifícios Térreos	Sem Restrição		Sem Restrição		Contrapisos, Bases, Vergas, Blocos	
Massa Específica (kg/m ³) >	2200	2100	nd	2000	1500	nd	nd
Absorção (% em massa) <	7	nd	nd	10	20	7	12
Teores em Fase ² (em massa) <	A (10 kg/m ³)	5% de outras	A (25%) CE (20%)	10% (d<2,2 kg/dm ³)	10% (d<1,8 kg/dm ³)	A (105%) CE (5%)	A (50%) CE (50%)
Máx. de Contaminantes ¹ (em massa)	2 kg/m ³ ou 1%	1% de betume 0,5% de outros	1%	1%	5%	Solo (5%)	Solo (5%)

¹ Contaminantes são materiais betuminosos, madeira, vidro e outros que não fases, como concretos, argamassas, cerâmicas.

² A significa fase argamassa e CE fase cerâmica.

³ É possível que se trate de alvenaria com blocos de concreto.

Capítulo 3

PAVIMENTO INTERTRAVADO

3.1 Considerações iniciais

A pavimentação intertravada por peças pré-moldadas de concreto constitui, tanto por sua versatilidade quanto por sua facilidade de execução, uma excelente alternativa técnica e apresentando-se, sobretudo economicamente viável. Este tipo de pavimentação é aplicado com os mais variados tipos de peças, as quais se diferenciam tanto pelo formato, material empregado e ainda pela coloração aplicada. A determinação do material a empregar é função das grandes diferenças regionais existentes no Brasil. No que diz respeito à disponibilidade de materiais, as peças mais comuns são constituídas por pré-moldados em concreto ou cerâmico e as de pedra talhada.

Recentemente esta técnica tem sido bastante utilizada na construção e reconstituição de pavimentos urbanos. A edição n. 7 da Revista Prisma, de março de 2002 (O EXEMPLO..., 2002), veiculou matérias sobre a utilização deste tipo de pavimentação em Piracicaba-SP, nas quais é dado destaque ao projeto de requalificação da Rua do Porto, às margens do Rio Piracicaba. A intervenção inicial abrangeu cerca de 800 metros da orla, mas ao todo o projeto prevê a reurbanização de mais de 6 km. Nessa mesma edição também se destaca a remodelação da Praça Central na cidade de Formiga / MG, com área de 2.012 m²; a execução do piso permeável no porto de Itajaí-SC, onde foram utilizadas juntas abertas e sistema de drenagem na sub-base; a reconstrução, também em Itajaí-SC, de mais de 16 mil m² de piso intertravado.

Os pavimentos intertravados destacam-se por suas características funcionais que propiciam simplicidade tanto no processo construtivo quanto no processo de manutenção. Suas qualidades estéticas, fruto da versatilidade do material, a facilidade de estocagem e a homogeneidade são qualidades reconhecidas. A seguir são mencionadas algumas das propriedades dos pavimentos intertravados.

- Apresenta menor absorção da luz solar, evitando o desconforto da elevação demasiada da temperatura ambiente;
- Permite fácil reparação na ocorrência de recalque do subleito;

- Facilidade de acesso e reparo às instalações de serviços subterrâneos;
- As peças podem ser re-utilizadas;
- Os materiais utilizados na execução do pavimento chegam à obra pronto para serem utilizados;
- Permite incorporar sinalização horizontal com a utilização de peças coloridas;
- O controle de qualidade dos materiais empregados pode ser realizado nas centrais produtivas;
- Permite a liberação do tráfego logo após o término das obras.

3.2 Breve histórico da pavimentação

No intuito de salientar a importância dos blocos pré-moldados de concreto utilizados em pavimentos como camada de revestimento, se faz necessário recorrer à história da pavimentação ao longo dos anos, quando os povos necessitavam vencer as distâncias entre os povoados, criando assim caminhos que facilitassem a locomoção conseqüentemente a interação entre os mesmos.

De acordo com a descrição feita por Muller (2005), o desenvolvimento desta moderna técnica de pavimentação intertravada resulta da evolução de procedimentos, os quais se encontram relatos datados do século V antes de Cristo, com a colocação de pedras justapostas em seu estado natural.

A seguir é apresentada a evolução desta técnica de pavimentação, tendo-se como base, estudos apresentados por Cruz (2003), Knapton (1996) e Prego (2001).

Na Mesopotâmia, há mais de 5000 anos, ocorreu a invenção da roda, ocasionando um aumento no volume de cargas transportadas e conseqüentemente gerando a necessidade de utilização de materiais mais resistentes na construção das estradas. Uma das estradas mais antigas, revestida com pedra foi construída à cerca de 1500 anos antes de Cristo, que ainda se encontram vestígios e está localizada na Grécia.

O pioneirismo na construção de caminhos específicos com fins de transporte de pessoas e cargas entre as vilas e colônias é creditado aos povos Etruscos que dominaram a Itália no período de 800 a 350 a.C. Tais povos visavam ligar grandes distâncias a fim de garantir conforto e resistência ao longo de uma superfície mais plana possível. No revestimento destes caminhos utilizava-se pedra de mão, combinada a um material mais fino,

objetivando o preenchimento das juntas entre as pedras, gerando assim uma maior segurança às pessoas quanto ao escorregamento.

Os Romanos herdaram grande parte dos conhecimentos Etruscos sobre a construção de caminhos, contribuindo de maneira significativa para a expansão de seu império. Com a conquista de novas regiões os Romanos tinham a necessidade de construir ligações entre todo o império, principalmente para permitir um rápido deslocamento das tropas militares, se necessário fosse.

Os materiais utilizados no revestimento dos caminhos Romanos de longa distância, geralmente eram constituídos por solos arenosos misturados a pedras naturais do tipo seixo rolado, já os caminhos mais utilizados, onde se exigia grande resistência ao desgaste, eram revestidos por pedras talhadas manualmente nas formas retangulares e poligonais.

Consoante Cruz (2003), os Romanos já conheciam a importância do tipo de areia a ser utilizada na construção dos caminhos, sendo que estas eram classificadas como de rio, extraídas de canais e provenientes do solo natural. Havia uma proposta de mistura entre elas juntamente com cal ou calcário, formando assim uma argamassa na qual posteriormente era adicionado seixo rolado ou pedras de mão espalhadas sobre o caminho, evidenciando assim, a preocupação com a capacidade estrutural das camadas.

As técnicas de pavimentação utilizadas pelos Romanos ficaram demonstradas em escavações arqueológicas realizadas na famosa Via Ápia. Esta foi uma importante via que ligava a cidade de Roma ao sul da Itália, da qual ainda se encontra vestígios em algumas partes da Europa. Iniciada pelo censor romano Appius Cláudio, apresentava uma extensão de 584 km, com o objetivo de transportar provisões, tropas e armamentos da costa do Mediterrâneo à costa Ádria. A figura 5(a) mostra um modelo de construção das vias romanas utilizando quatro camadas de material, e a figura 5(b) mostra a Via Ápia romana.

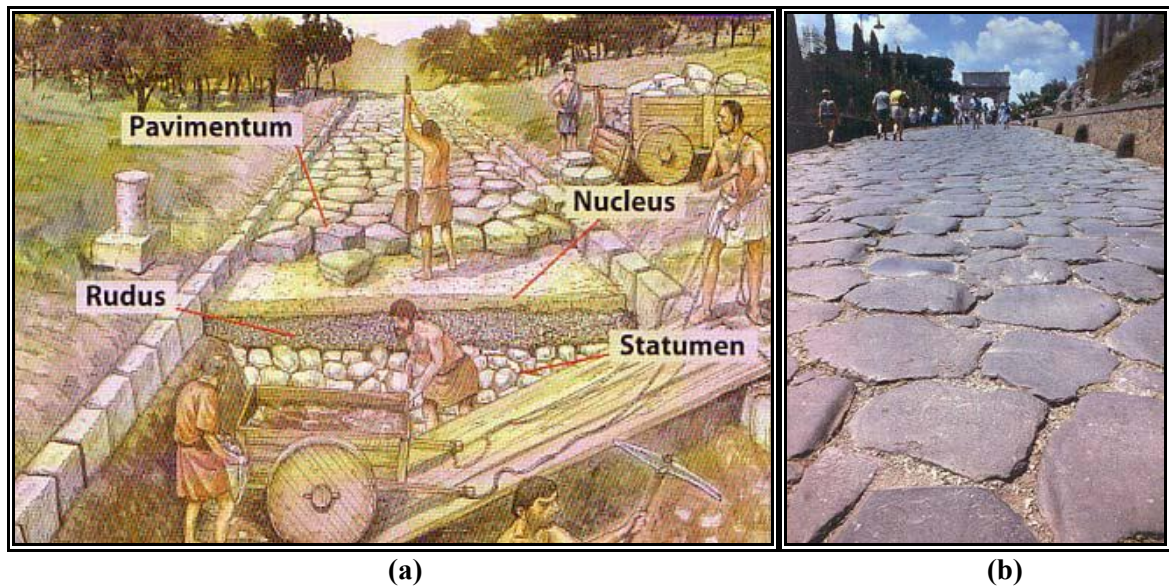


Figura 5: Vias Romanas.
(a): Modelo de construção das vias romanas. **Fonte:** (ARY JÚNIOR, 2007).
(b): Via Ápia em Roma. **Fonte:** (MADRI, 2004).

Após o declínio do império Romano as estradas da Europa passaram por um processo de deterioração e, somente no século XVII, foram retomadas as atividades de reconstrução das estradas, sendo a França o país precursor neste processo, com a construção de estradas revestidas com pedra britada, demonstrando preocupação com a aderência e drenagem das mesmas.

Cada vez mais, com o passar dos séculos, se utilizavam os caminhos para fins comerciais, dando-se grande importância à velocidade nas estradas com a conseqüente redução no tempo de viagem, que em conjunto com o aumento das cargas transportadas, acarretaram uma maior exigência das camadas de revestimento, portanto uma maior durabilidade dos materiais a serem empregados nas mesmas. A evolução dos blocos usados no pavimento intertravado é representada basicamente por quatro tipos de materiais: blocos de argila; de pedras talhadas e aparelhadas manualmente; de madeira; e pré-moldados de concreto.

3.2.1 Blocos de argila

Existem evidências de uso de tijolos de argila em revestimentos na Mesopotâmia há 5000 anos. Nesta época os tijolos eram aplicados sobre uma camada de betume objetivando garantir a aderência destes ao leito do terreno, porém a durabilidade dos blocos era pequena

devido ao excessivo desgaste gerado pela ação do tráfego. Sua utilização ficava restrita a regiões que dispunham de materiais de maior resistência.

No final do século XIX, aparecem os primeiros fornos que queimavam tijolos a elevadas temperaturas, resultando assim no aumento da resistência mecânica dos tijolos, logo esta técnica passou a ser muito utilizada na Europa e América.

Segundo Muller (2005), a cidade brasileira de Rio Branco, capital do Acre, vem utilizando a técnica de pavimentação com blocos de argila em suas ruas desde 1940. A inexistência de pedra naquela região do país, aliada à grande disponibilidade de material para a produção de tijolo cerâmico contribuiu de forma decisiva para este fato. A matéria prima para a fabricação dos blocos de argila deve apresentar alto índice de resistência à compressão, para que, quando convenientemente preparada e queimada, dê origem a blocos que apresentem boa resistência à compressão e ao desgaste (FUNTAC, 1999). A figura 6 apresenta um trecho de pavimento, na cidade de Rio Branco – Acre, revestido com blocos de argila.



Figura 6: Pavimento de blocos de argila na cidade de Rio Branco – AC.

Fonte: (NASCIMENTO, 2005).

3.2.2 Pedras talhadas e aparelhadas manualmente

No século XVIII, surgiram os primeiros modelos de assentamento de pedras talhadas em fileiras ou tipo espinha de peixe. Naquela época já existia grande preocupação em manter estreitas as juntas entre as peças, exigindo esforços para homogeneizar as dimensões das peças. No século XX, foi instituída a técnica de selar as juntas com uma argamassa de

cimento ou com uma mistura de asfalto e areia, visando principalmente atenuar o barulho sob a ação do tráfego.

No Brasil, a técnica desenvolvida ficou conhecida como pavimento de paralelepípedos. No pavimento de paralelepípedos, as peças possuem dimensões aproximadas de 12 cm de largura, 20 cm de comprimento e 20 cm de altura. Este tipo de pavimento é muito utilizado nos dias de hoje nas cidades do interior do país e áreas como baias de ônibus das grandes cidades. O seu assentamento é realizado sobre uma espessa camada de areia e as juntas entre peças possuem dimensões de até 20 mm. O revestimento com pedras tipo pé-de-moleque é mais antigo que o paralelepípedo, e foi trazido pelos Portugueses para o Brasil a partir de 1600. As pedras têm formatos irregulares e dimensões de até 50 cm e são arrumadas sobre o terreno natural. Exemplos de aplicação do pavimento pé-de-moleque podem se vistos em cidades históricas do Rio de Janeiro, como Paraty, e de Minas Gerais, como Tiradentes. Os portugueses construíram este pavimento para facilitar o transporte do ouro que era explorado nas cidades mineiras de Tiradentes, São João Del Rei e Ouro Preto e trazido até a cidade de Paraty no Rio de Janeiro para embarque nos navios que o levavam a Portugal (CRUZ, 2003).

Na figura 7 está representado o pavimento de paralelepípedo, situado na cidade de Araras – SP, tombado como patrimônio histórico (Decreto 5452/2007), já a figura 8 ilustra uma das ruas do centro histórico da cidade de Paraty – RJ, revestida com pavimento pé-de-moleque.

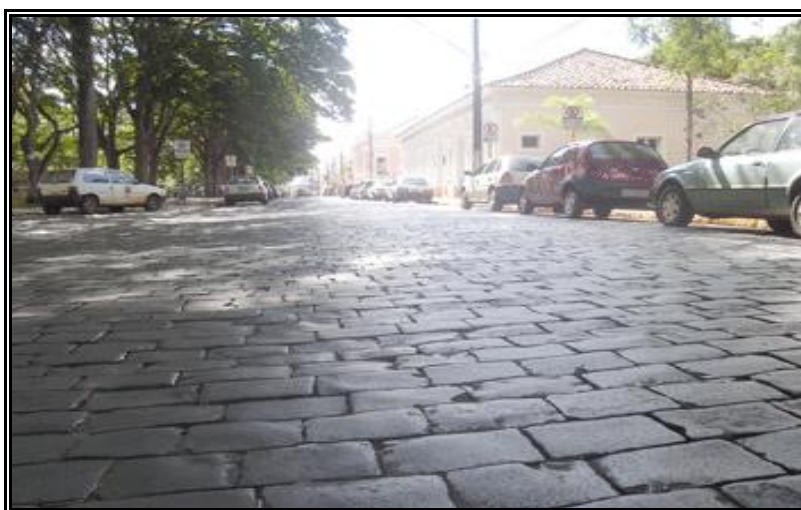


Figura 7: Rua Tiradentes, da cidade de Araras – SP, com o pavimento de paralelepípedos.

Fonte: (Prefeitura Municipal de Araras/SP).



Figura 8: Rua de pavimento pé-de-moleque localizada na cidade de Paraty – RJ.

Fonte: (ARY JÚNIOR, 2007).

3.2.3 Blocos de madeira

No início do século XIX, os revestimentos de peças de madeira eram utilizados com o intuito de diminuir o nível de ruído, principalmente onde o tráfego era composto por carruagens equipadas com rodas de ferro. Os blocos de madeira tinham, em média, dimensões entre 12,5 e 25 cm de comprimento e 7,5 e 10 cm de largura. As peças eram envolvidas por uma camada de mastique betuminoso recoberto por pequenos grãos de pedra para auxiliar sua ancoragem à base do pavimento.

Embora os pisos de madeira reduzissem o barulho durante a passagem do tráfego, tornavam-se escorregadios quando molhados. Com o surgimento do automóvel dotado de pneus de borracha, este tipo de revestimento foi totalmente abandonado (CRUZ, 2003).

3.2.4 Peças pré-moldadas de concreto

Passar das soluções de revestimentos, descritas anteriormente, para o revestimento com peças pré-moldadas de concreto (PPC) parece ser uma evolução natural, porém as primeiras PPC foram fabricadas no final do século XIX e algumas patentes foram registradas

antes da primeira guerra mundial. Rapidamente reconheceu-se que as PPC forneciam melhor uniformidade que as pedras naturais aparelhadas.

Os primeiros avanços no desenvolvimento da utilização do pavimento de PPC ocorreram na Holanda e Alemanha no período de reconstrução destes países após a Segunda Guerra Mundial. A partir de 1950, houve uma evolução dos modelos de fôrmas existentes para a fabricação das PPC, primeiramente as peças imitavam os tijolos e pedras aparelhadas utilizadas na época, objetivando obter sua substituição gradual. Nesta fase, as únicas vantagens de utilização eram os custos mais baixos e a homogeneidade dimensional.

Passado este período, foi incorporado um refinamento maior nas formas das peças, disponibilizando outros modelos de peças com formatos dentados, principalmente. O conceito de intertravamento e um melhor controle de espessuras das juntas começavam a ser implantado. Benefícios práticos para o assentamento das peças eram facilmente detectados permitindo a utilização correta de mão de obra pouco especializada. Por fim, o desenvolvimento da pavimentação de PPC permitiu relacionar a escolha da forma geométrica com o desempenho do pavimento, em função do tipo de tráfego.

Além de grande parte dos países europeus, em meados dos anos 1960, o pavimento de PPC já estava consolidado comercialmente nas Américas Central e do Sul e África do Sul. Na década de 1970 cresceu o uso nos Estados Unidos, Austrália, Nova Zelândia e Japão.

No final da década de 1970, proliferaram os sistemas de fabricação de PPC em todo o mundo e pelo menos 200 tipos de formas, e diversos tipos de equipamentos de fabricação eram comercializados (CRUZ, 2003).

No início da década de 1980, a produção anual já ultrapassava 45 milhões de metros quadrados, sendo 66% deste total aplicados em vias de tráfego urbano. A indústria mundial de fabricação de PPC no final da década de 90 chegou à impressionante marca de produção de 100 m² por segundo durante os dias úteis de trabalho (SMITH, 2003).

No Brasil, a aplicação deste pavimento cresceu em escala exponencial, principalmente na pavimentação de vias urbanas, portos, pátios industriais e estacionamentos. A figura 9 mostra a aplicação deste tipo de pavimentação na Praça dos Paiaguás, em Ilha Solteira - São Paulo, onde esta passou por completa remodelagem, substituindo a pavimentação de concreto desempenado, já a figura 10 ilustra a maior extensão de pavimento intertravado do País, com 8 km de extensão e uma área de aproximadamente 74 mil m², aplicado no calçadão da Praia de Boa Viagem, Recife - Pernambuco.



(a) (b)

Figura 9: Praça dos Paiaguás, Ilha Solteira – SP.

(a): Processo de remodelagem.

(b): Remodelagem concluída.

Fonte: (Prefeitura Municipal de Ilha Solteira/SP).

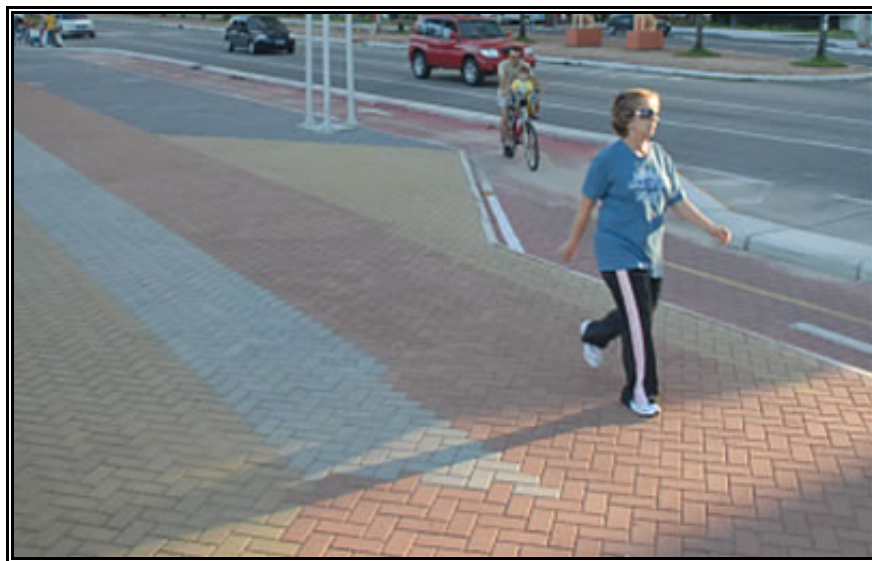


Figura 10: Calçada da Praia de Boa Viagem, Recife – Pernambuco.

Fonte: (ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland).

3.3 Estruturas do pavimento intertravado

A estrutura típica do pavimento intertravado caracteriza-se pelo revestimento em PPC assentadas sobre uma camada de areia, conhecida por areia de assentamento ou colchão de areia, a base, a sub-base e o subleito. O revestimento e a areia de assentamento são contidos lateralmente, em geral, por sarjetas ou guias de concreto. A figura 11 apresenta esta condição.

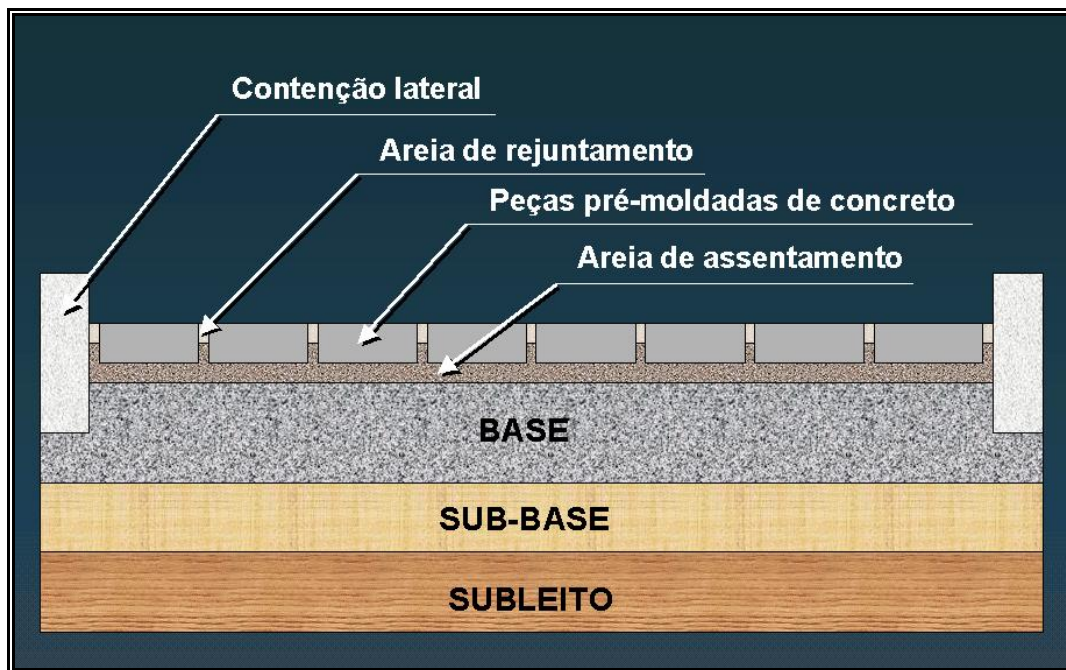


Figura 11: Estrutura típica do pavimento intertravado.

Fonte: (HALLACK, 1998).

Hallack (1998) ressalta que o revestimento do pavimento intertravado é constituído por blocos de grande resistência e durabilidade, assentados sobre uma delgada camada de areia. Tal revestimento deve ser capaz de suportar as cargas e as tensões provocadas pelo tráfego protegendo a camada de base do desgaste por abrasão e a mantendo com baixos níveis de umidade, permitindo melhor estabilidade do material constituinte.

A camada de base recebe as tensões distribuídas pela camada de revestimento, sendo sua principal função proteger estruturalmente o subleito da ação das cargas externas, redistribuindo-as de maneira uniforme, evitando assim as deformações permanentes e a conseqüente deterioração do pavimento.

Shackel (1990) admite que o dimensionamento possa requerer, ainda, uma camada de sub-base, suplementar à base, executada diretamente sobre o leito regularizado ou sobre o reforço de subleito dependendo da magnitude das cargas geradas pelo tráfego e das características mecânicas e dos módulos de elasticidade da base e do leito.

Outros materiais começam a serem utilizados no projeto e na execução dos pavimentos intertravados, como os geotêxteis. Estas membranas constituídas por material sintético possuem a função de proteger as camadas inferiores da infiltração de água, evitar o bombeamento de partículas finas entre camadas e conter a fuga de materiais em áreas próximas às contenções laterais, tais com: meio-fios, drenos, caixas de serventia, entre outras (CRUZ, 2003).

As espessuras das camadas do pavimento intertravado, como nos pavimentos asfálticos, irão depender das seguintes características (ABCP, 1999):

- Intensidade do tráfego que circulará sobre o pavimento;
- Características do terreno de fundação;
- Qualidade dos materiais constituintes das camadas.

O intertravamento das PPC é definido por KnaptonN (1996) como sendo a capacidade que a associação destas peças, em um único sistema, adquire de resistir aos deslocamentos individuais. A resistência aos deslocamentos que cada peça adquire nas direções horizontais, verticais e rotacionais em relação a cada peça vizinha caracteriza o princípio do intertravamento do pavimento.

3.3.1 Camada de revestimento do pavimento intertravado

As PPC compõem a superfície de rolamento do pavimento, cumprindo assim uma importante função estrutural. Estabelecem as condições de conforto aos usuários, durabilidade do pavimento e contribuem decisivamente para a função estrutural do pavimento por meio das características de intertravamento das peças, além de suportar as tensões cisalhantes superficiais de contato das rodas dos veículos.

- Formato das PPC

Entre os pesquisadores não existe consenso sobre qual o melhor formato de PPC. Shackel (1990) aponta que as peças segmentadas apresentam melhor distribuição dos esforços devido ao melhor intertravamento proporcionado pelo desenho da peça, porém, Knapton e Cook (1992) afirmam que o formato das PPC não exerce significativa influência no desempenho e no mecanismo de funcionamento dos pavimentos. Assim, a única recomendação em relação aos formatos das peças é que estas sejam capazes de permitirem o assentamento em combinação bidirecional. A figura 12 apresenta os formatos típicos de PPC mais utilizados atualmente.

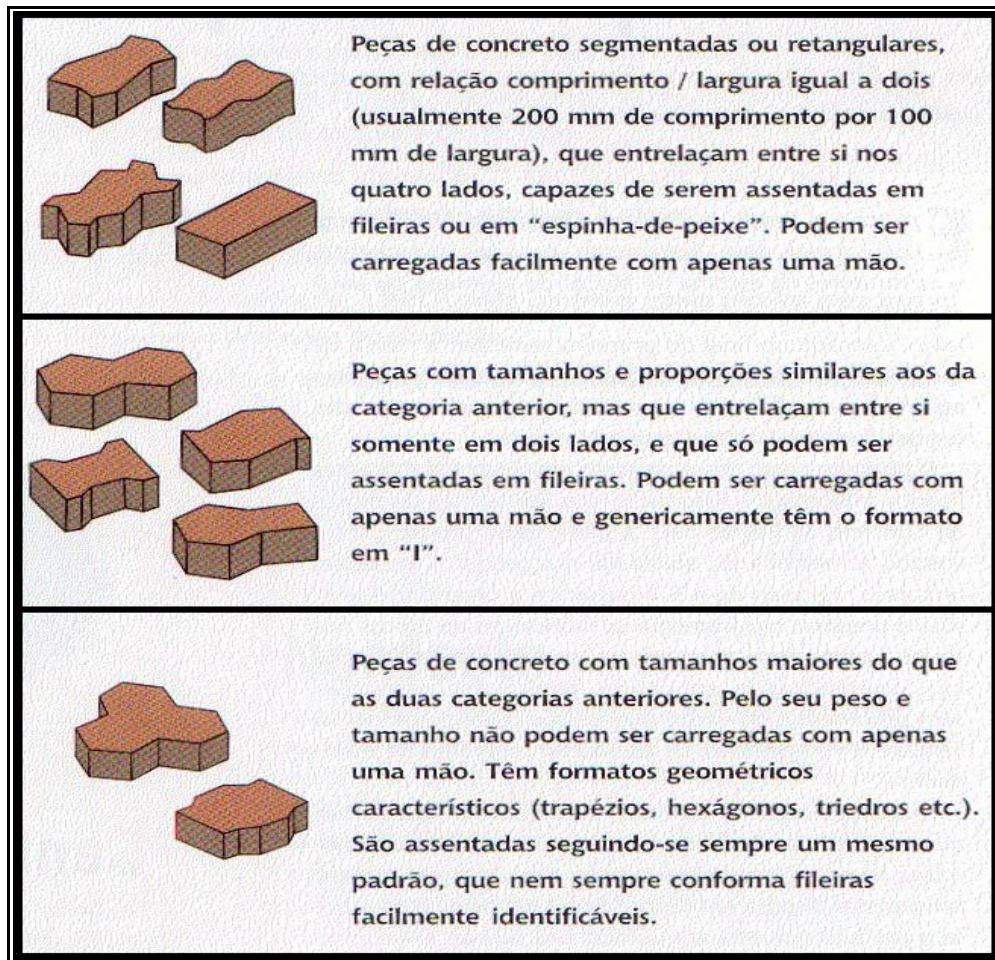


Figura 12: Formatos típicos das PPC.

Fonte: (HALLACK, 2001).

Os formatos típicos de PPC apresentados na figura 12 são utilizados no intertravamento denominado horizontal, que Knapton (1996) descreve como sendo a impossibilidade da peça se deslocar horizontalmente em relação às peças vizinhas e contribui na distribuição dos esforços de cisalhamento horizontal sob a ação do tráfego, principalmente nas áreas de aceleração e frenagem, sendo as juntas entre as peças, quando convenientemente cheias com areia e bem compactadas, responsáveis pelo bom desempenho do intertravamento do pavimento.

Knapton (1996) descreve também o intertravamento vertical como sendo a impossibilidade da peça se mover verticalmente em relação às peças vizinhas, e o intertravamento rotacional como a impossibilidade da peça girar em relação ao seu próprio eixo em qualquer direção, porém, tais possibilidades são utilizadas em menor escala, se comparadas ao intertravamento horizontal, pelo fato de apresentarem peças com geometrias complexas e maiores dificuldades de execução, portanto se tornando mais dispendiosas.

- Espessura das PPC

Knapton (1976) relata que as espessuras das peças não são significativas no comportamento estrutural e funcional dos pavimentos, no entanto, com a evolução dos estudos, Shackel (1990) demonstra que um aumento na espessura das peças, dentro de um intervalo de 60 mm a 100 mm, é benéfico ao desempenho do pavimento. Mostra que ensaios efetuados com o Simulador de Veículos Pesados, realizados na África do Sul, indicaram que as deformações permanentes no pavimento eram consideravelmente menores com peças pré-moldadas de concreto de 80 mm do que com as peças de 60 mm, num mesmo nível de solicitação. O teste com PPC de 100 mm mostrou deformações permanentes inferiores e uma variação muito acentuada em relação às peças de 80 mm, conforme ilustra a figura 13.

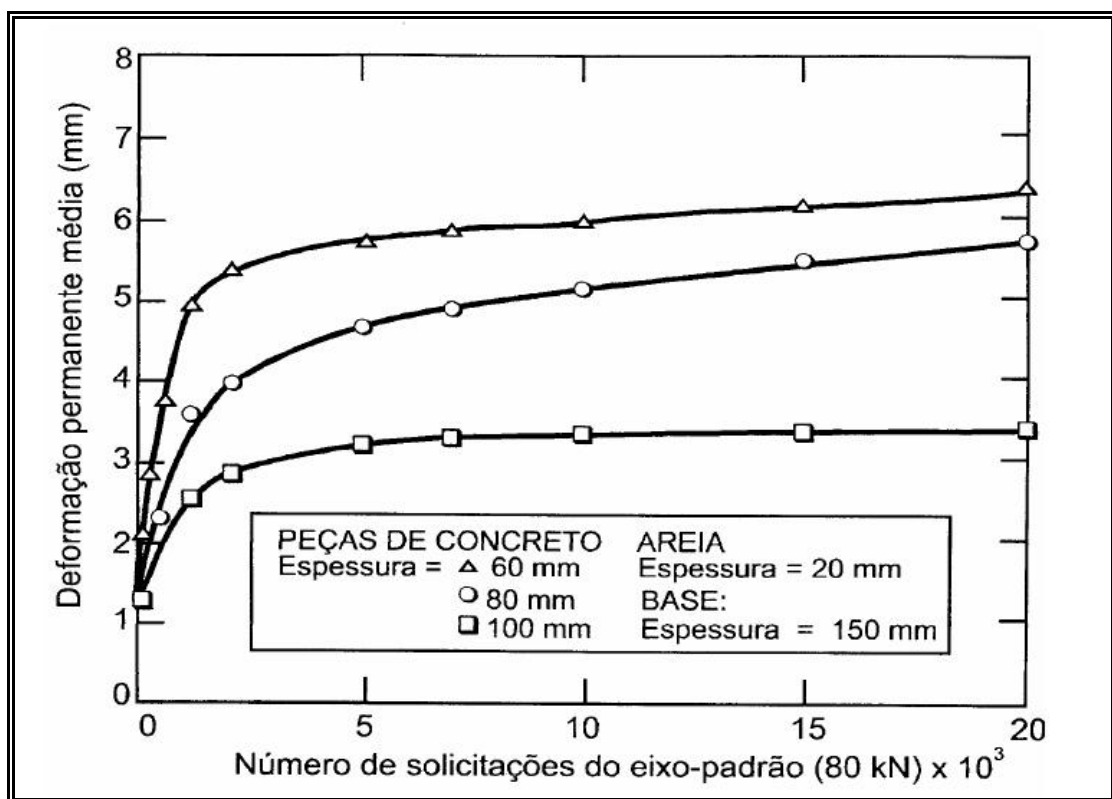


Figura 13: Efeito da espessura das PPC no desempenho do pavimento.

Fonte: (SHACKEL, 1990).

- Modelos de Assentamento das PPC

O tipo de arranjo escolhido para o assentamento terá influência direta tanto na aparência estética quanto no desempenho do pavimento. Não existe um consenso entre os pesquisadores sobre as interferências do tipo de assentamento na durabilidade do pavimento, mas há concordância de que a durabilidade é influenciada pelo tipo de assentamento.

O boletim técnico nº 4 do ICPI (ICPI, 2003) recomenda a utilização do assentamento tipo “espinha de peixe” em áreas de tráfego veicular, por apresentar maior nível de intertravamento e conseqüente melhor desempenho estrutural. As figuras 14, 15 e 16 apresentam os modelos de assentamento mais utilizados em pavimentos intertravados.

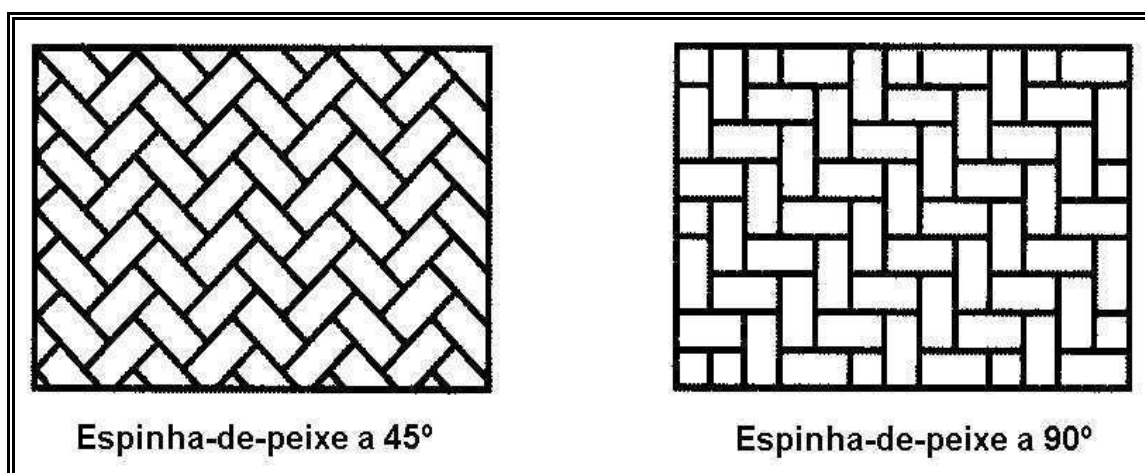


Figura 14: Modelo de assentamento das PPC tipo espinha de peixe.

Fonte: (HALLACK, 2001).

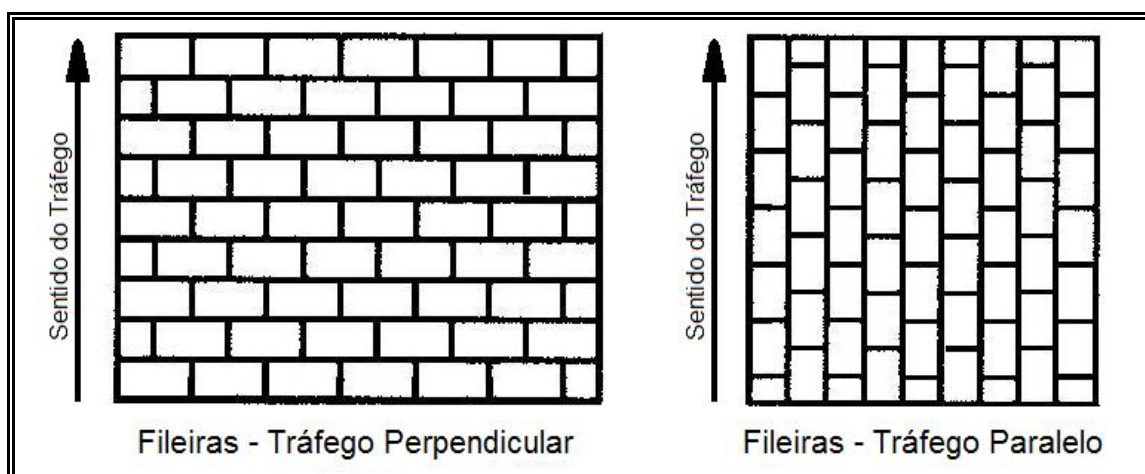


Figura 15: Modelo de assentamento das PPC tipo fileiras.

Fonte: (HALLACK, 2001).

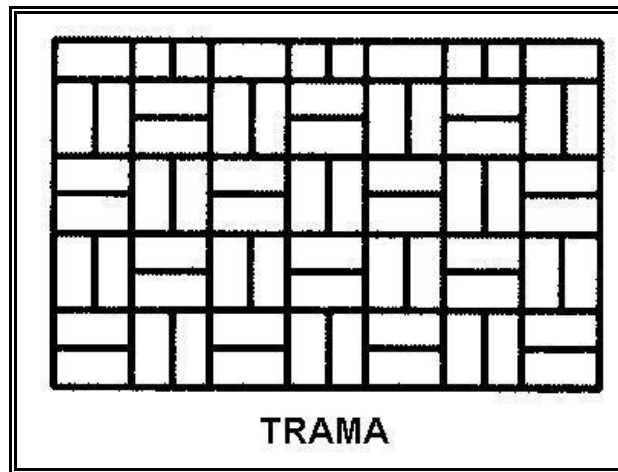


Figura 16: Modelo de assentamento das PPC tipo trama.
Fonte: (HALLACK, 2001).

3.3.2 Areia de assentamento

De acordo com Beaty (1992) as principais funções da areia de assentamento são:

- Iniciar o processo de intertravamento preenchendo as juntas na parte inferior das peças no momento da compactação;
- Fornecer suporte homogêneo para as peças assentadas evitando a concentração de tensões em uma determinada área, podendo causar deterioração ao pavimento;
- Fornecer uma superfície lisa onde as peças possam ser assentadas;
- Acomodar possíveis diferenças de espessuras das peças e desníveis da base permitindo a regularização final do pavimento;
- Barreira de proteção contra a propagação de fissuras às camadas inferiores do pavimento.

- Influência da Espessura da Camada de Areia de Assentamento

Apesar da espessura da camada de areia de assentamento corresponder a menos de 10% da espessura total do pavimento, sua função estrutural não é menos importante que a de qualquer outra camada, logo o desempenho final do pavimento depende diretamente da metodologia de execução desta camada, bem como da correta especificação do tipo de areia a ser utilizada (BURAK, 2002).

Beaty (1996) relata que na Austrália a recomendação de espessura varia de 20 a 40 mm, enquanto na Bélgica é de 30 a 50 mm, porém após a compactação o valor mínimo recomendado de espessura é de 15 mm. Acrescenta, ainda, que uma espessura excessiva no colchão gera grandes problemas de afundamento na camada de revestimento.

Na figura 17 Shackel (1990) mostra as deformações permanentes ocorridas em pavimentos de PPC com diferentes espessuras da camada de areia de assentamento. Nesta pode-se observar que, para a espessura da camada de areia de assentamento entre 40 e 70 mm, as deformações são pequenas e muito próximas, já para uma espessura de 100 mm, o valor da deformação permanente praticamente quadruplica em relação à espessura de 70 mm.

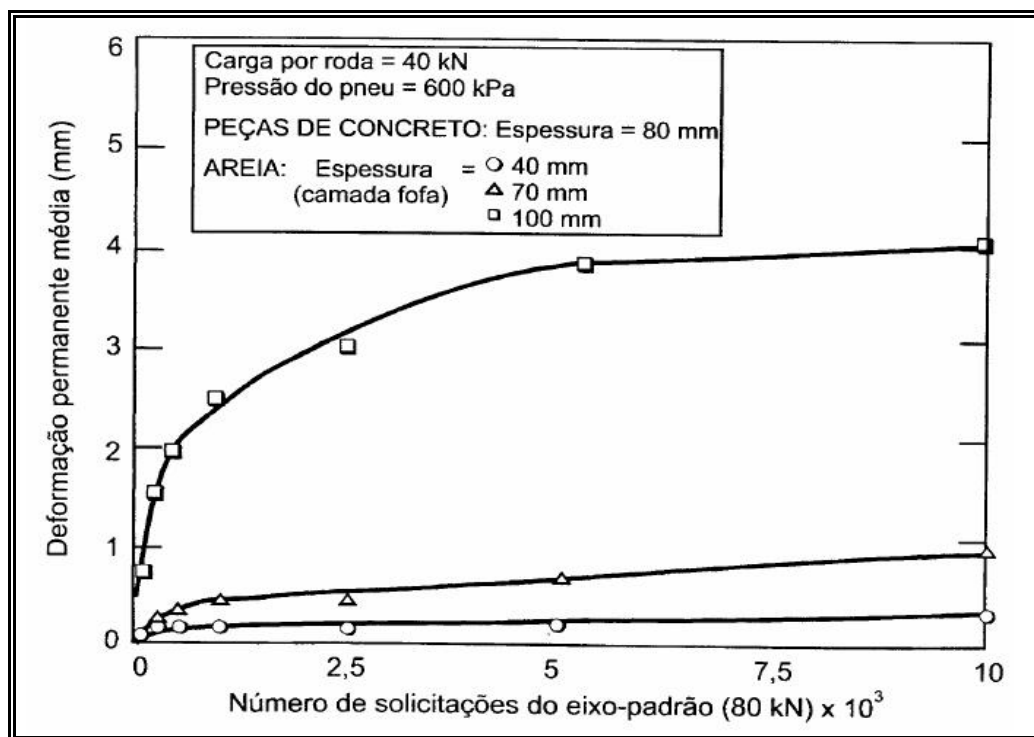


Figura 17: Efeito da espessura da camada de areia de assentamento no desempenho do pavimento.

Fonte: (SHACKEL, 1990).

- Influência da Granulometria da Areia de Assentamento

A areia que irá compor a camada de assentamento e o rejunte das peças deve ser selecionada levando-se em consideração a disponibilidade local de material, porém, tal seleção não deve comprometer a função estrutural do pavimento, logo é importante se realizar um estudo de viabilidade local com diversos tipos de areia.

Beaty (1996) relata que em países como Inglaterra, Austrália, Canadá e Estados Unidos é comum especificar agregados com diâmetro máximo de grão de 5 mm e material passante na peneira nº 200 ($75\mu\text{m}$) $\leq 3,0\%$, e em locais de tráfego pesado não admitir nenhum material passante na peneira de nº 200. No Brasil é recomendado o peneiramento com malhas de 9,52 mm de abertura com o objetivo de retirar os grãos de maior dimensão, tornando a camada de areia mais fofa (ABCP, 1999).

Na tabela 5 (CRUZ, 2003) apresenta as recomendações técnicas utilizadas na Austrália, Inglaterra, África do Sul, Estados Unidos e Canadá para a areia a ser utilizada na camada de assentamento das PPC. As especificações granulométricas para os materiais a serem utilizados no rejuntamento das peças são apresentadas pelo autor na tabela 6.

Tabela 5: Recomendações técnicas da granulometria da areia a ser utilizada na camada de areia de assentamento (CRUZ, 2003).

Propriedades	Colchão de areia				
Granulometria (Peneiras)	Austrália	Inglaterra	África do Sul	Estados Unidos (ASTM C 33)	Canadá (CSA A 23.1)
	% Passante				
9,52 mm	100	100	100	100	100
4,75 mm	95 - 100	90 - 100	90 - 100	95 - 100	95 - 100
2,36 mm	80 - 100	75 - 100	75 - 100	85 - 100	80 - 100
1,18 mm	50 - 85	55- 90	55 - 90	50 - 85	50 - 90
0,60 mm	25 - 60	35 - 59	35 - 70	25 - 60	25 - 65
0,30 mm	10 - 30	8 - 30	8 - 35	10 - 30	10 - 35
0,15 mm	5 - 15	0 - 10	1 - 10	2 - 10	2 - 10
0,075 mm	0	0 - 3	0 - 3	0	0
Forma dos grãos	Angular e/ou pontiagudos				

Tabela 6: Recomendações técnicas da granulometria dos materiais a serem utilizados no rejuntamento das peças do revestimento (CRUZ, 2003).

Peneira	Granulometria para rejuntamento das PPC			
	Norma Americana ASTM C144		Norma Canadense CSA A 179	Austrália e África do Sul
	Areia natural	Areia artificial		
	% passante			
4,75 mm	100	100	100	100
2,36 mm	95 - 100	95 - 100	95 - 100	100
1,18 mm	70 - 100	70 - 100	90 - 100	90 - 100
0,60 mm	40 - 75	40 - 100	35 - 80	60 - 90
0,30 mm	10 - 35	20 - 40	15 - 50	30 - 60
0,15 mm	2 - 15	10 - 15	2 - 15	15 - 30
0,075 mm	0 - 1	0 - 1	0	5 - 10

Segundo Carvalho (1998), no Brasil, a areia utilizada na camada de assentamento deve apresentar no máximo 5% de silte e argila (em massa) e no máximo 10% de material retido na peneira de 4,8 mm e deve se enquadrar na faixa granulométrica apresentada na tabela 7 (ABCP, 1999).

Tabela 7: Faixa granulométrica da areia a ser utilizada na camada de assentamento (CARVALHO, 1998).

Abertura da Peneira (mm)	% passante em massa
9,52	100
4,75	95 - 100
1,18	50 - 85
0,60	25 - 60
0,30	10 - 30
0,15	5 - 15
0,08	0 - 10

3.3.3 Demais camadas do pavimento intertravado

O tipo, qualidade e espessura do material utilizado na base e sub-base são os fatores que afetam diretamente o desempenho estrutural destas camadas do pavimento (SHACKEL, 1990).

Knapton (1996) relata que os procedimentos de dimensionamento da FAA (Federal Aviation Administration) utilizam a mesma metodologia para os pavimentos flexíveis como para os pavimentos intertravados, onde, no processo de dimensionamento as variáveis independentes ou de entrada são:

- Resistência do subleito (determinada através do ensaio ISC ou CBR);
- Tipo de material a ser utilizado na base (granular ou estabilizado quimicamente);
- Tráfego (no caso da FAA, seleção dos tipos de aeronaves e número de decolagens equivalentes anuais).

As variáveis dependentes ou de resposta são:

- Espessura total do pavimento;
- Espessura do revestimento = (PPC + camada de areia de assentamento) + camada de base;
- Espessura mínima da base.

3.4 Processos de fabricação das PPC

Os processos de moldagem das PPC são divididos em dois grandes grupos: manual e mecânico.

Porém este trabalho visa buscar um concreto de consistência suficientemente plástica, a fim de que possa ser aplicado em PPC num processo de moldagem manual, dispensando-se, inclusive, o uso de mesas vibratórias, no intuito de oferecer embasamento técnico àqueles que não disponham de equipamentos de adensamento, tais como: prefeituras de pequenas localidades, pequenas indústrias e até mesmos cidadãos que queiram produzir suas próprias PPC. Tal proposta será abordada com maiores detalhes no capítulo 4, que trata da metodologia de pesquisa empregada neste trabalho.

3.4.1 Processo de moldagem manual

No processo de moldagem manual, a capacidade produtiva da indústria é determinada a partir da quantidade de moldes disponíveis e da qualidade da mão de obra existente.

O preenchimento dos moldes é realizado manualmente, utilizando um concreto de consistência plástica, geralmente sobre uma mesa vibratória. Este processo de moldagem das PPC apresenta a vantagem de propiciar um excelente aspecto visual na superfície dos pisos, oriundo do tipo de molde utilizado (metal, PVC ou fibra de vidro) e da consistência plástica do concreto utilizado. Neste método não é possível fabricar as PPC com homogeneidade das resistências mecânicas.

3.4.2 Processo de moldagem mecânico

No processo mecânico, a resistência e a durabilidade das PPC são obtidas através de alta pressão e cuidadosa regulação de vibração dos equipamentos especificamente projetados para a produção em escala, que necessariamente utiliza concreto com consistência seca. Os benefícios da produção em escala são principalmente o controle de homogeneidade das resistências mecânicas, textura e dimensões que podem ser exercidos durante a fabricação das peças.

Os equipamentos no processo mecânico são as vibro prensas multifuncionais que podem ser utilizadas na produção de uma grande família de produtos de artefatos de cimento, tais como: blocos de concreto, tijolos, meio-fios, grelhas, peças pré-moldadas de concreto (PPC), placas e etc.

3.5 Critérios de aceitação das peças de concreto para pavimentação

As normas brasileiras para as peças de concreto destinadas à pavimentação são a NBR 9781 (ABNT, 1987d) – “**Peças de concreto para pavimentação: especificação**” e a NBR 9780 (ABNT, 1987c) – “**Peças de concreto para pavimentação: determinação da**

resistência à compressão". Apesar do mercado Brasileiro ter registrado um grande crescimento na pavimentação de PPC nos últimos anos, a aplicação deste material tem sido basicamente em áreas de reurbanização e revitalização das cidades. A própria norma brasileira NBR 9781 (ABNT, 1987d), que foi editada em 1987, estabelece como objetivo principal fixar as condições exigíveis para a aceitação das PPC, destinadas à pavimentação de vias urbanas, pátios de estacionamento ou similares, portanto, não contempla outras aplicações como portos, aeroportos e rodovias de tráfego médio, por exemplo.

De acordo com a norma NBR 9781 (ABNT, 1987d), PPC é definida como uma peça pré-moldada de formato geométrico regular, com comprimento máximo de 400 mm, largura mínima de 100 mm e altura mínima de 60 mm.

As variações nas peças, mesmo quando moldadas em um mesmo equipamento, com o mesmo processo de cura, estocagem e transporte podem ocorrer tanto nas dimensões quanto na superfície, nas arestas e em suas resistências, logo tais peças devem passar por alguns ensaios para o controle de qualidade das mesmas.

Primeiramente, realiza-se inspeção visual das PPC, que tem como objetivo identificar peças defeituosas que possam vir a prejudicar o assentamento, o desempenho estrutural ou a estética do pavimento.

Para a aceitação dos lotes, todas as peças devem ser separadas em lotes constituídos a critério do comprador e submetidos ao controle de aceitação, satisfazendo às seguintes condições conforme NBR 9781 (ABNT, 1987d):

- O lote deve ser formado por peças com as mesmas características, produzidas sob as mesmas condições e os mesmos materiais;
- O lote deve ser formado por no máximo 1600 m² de pavimento a ser executado;
- A amostra deve ter no mínimo 6 peças, para lotes de até 300 m², e uma peça adicional para cada 50 m² suplementar, até o máximo de 32 peças.

O ensaio de resistência deve ser executado de acordo com a NBR 9780 (ABNT, 1987c), sendo que, o valor característico estimado de resistência à compressão é calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$f_{pk} = f_p - t \cdot S, \text{ onde:}$$

$$f_{pk} = \text{resistência característica à compressão, em MPa;}$$

$$f_p = \text{resistência média das peças ensaiadas, em MPa;}$$

$s = \text{desvio padrão da amostra} \sqrt{\frac{\sum (f_p - f_{pi})^2}{n - 1}}$, em MPa;

f_{pi} = resistência individual das peças ensaiadas, em MPa;

n = número de peças ensaiadas da amostra;

t = Coeficiente de Student tabelado, fornecido na NBR 9780 (ABNT, 1987c).

Contudo, o resumo dos requisitos de aceitação das PPC constantes na NBR 9781 (ABNT, 1987d) é apresentado na tabela 8.

Tabela 8: Requisitos físicos para aceitação de PPC no Brasil - NBR 9781 (ABNT, 1987d).

Requisitos Físicos		Limites Admissíveis
Tolerância Dimensional (mm)	Comprimento	± 3,0 mm
	Largura	± 3,0 mm
	Altura	± 5,0 mm
Resistência à Compressão Axial (MPa)	1	≥ 35,0 Veículos comerciais de linha
	2	≥ 50,0 Veículos especiais ou cargas que produzem acentuados efeitos de abrasão

Capítulo 4

PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 Caracterização dos materiais

Neste trabalho experimental, estuda-se o emprego de resíduos de concreto na produção de novos concretos destinados à aplicação em peças para pavimentação intertravada. Portanto, para a realização destes estudos, foram utilizados os seguintes materiais de consumo:

- Cimento;
- Areia;
- Brita;
- Água;
- Aditivo superplastificante;
- Resíduo de concreto.

O cimento, a areia, a brita e o resíduo de concreto foram caracterizados no Laboratório de Engenharia Civil da Companhia Energética de São Paulo (CESP), e as características do aditivo superplastificante foram fornecidas pelo fabricante.

4.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o CP II–Z–32 (Cimento Portland Composto com teor de 6 a 14% de Pozolana). Este foi submetido a ensaios físicos e químicos, nos quais os respectivos resultados encontram-se expostos na tabela 9.

Obstante ao que poderia ser proposto, ou seja, a utilização do cimento CP V – ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial) por se tratar de uma proposta de aplicação em peças pré-moldadas de concreto, optou-se pela utilização do cimento CP II–Z–32, de tal

forma que determinada escolha se justificou à medida que este cimento é o mais comum na região noroeste do Estado de São Paulo, portanto facilmente encontrado no comércio local.

Tabela 9: Características físicas e químicas do cimento CP II-Z-32.

Ensaio Realizado			Valores Obtidos	NBR 11578 / NBR 5737	
				Mínimo	Máximo
Finura Peneira 200 (% retida)			0,53	-	12,0
Finura Peneira 325 (% retida)			4,60	-	-
Superfície específica Blaine (cm ² /g)			3755	2600	-
Densidade aparente (g/cm ³)			1,09	-	-
Densidade absoluta (g/cm ³)			3,11	-	-
Água de consistência da pasta	gramas		139	-	-
	(%)		27,80	-	-
Início de pega (h:min.)			02:58	01:00	-
Fim de pega (h:min.)			04:28	-	10:00
Expansão em autoclave (%)			3,695	-	0,8*
Resistência à Compressão Axial	Consistência da argamassa	gramas	150	-	-
		a/c	0,48	-	-
	Data de moldagem		04.08.2008	-	-
	Tensão (MPa)	03 dias	19,2	10,0	-
		07 dias	23,4	20,0	-
		28 dias	32,2	32,0	-
Análise Química (%)	Perda ao fogo		6,00	-	6,5
	Insolúveis		9,88	-	16,0
	SiO ₂		20,13	-	-
	Fe ₂ O ₃		2,75	-	-
	Al ₂ O ₃		4,18	-	-
	CaO		57,89	-	-
	MgO		5,97	-	6,5
	SO ₃		2,12	-	4,0
	Na ₂ O		0,15	-	-
	K ₂ O		0,88	-	-
	Equivalente Alcalino		0,72	-	-
	Cal livre em CaO		2,72	-	-

* Ensaio não especificado pela ABNT.

4.1.2 Areia

O agregado miúdo natural utilizado foi areia proveniente do Porto Brambila, localizado à margem do rio Tietê na cidade de Pereira Barreto – SP. A caracterização foi realizada de acordo com os ensaios preconizados nas normas técnicas brasileiras, estando estes discriminados a seguir:

- Análise granulométrica → NBR NM 248 (ABNT, 2003a);
- Massa específica na condição saturada superfície seca (SSS) e massa específica seca e aparente → NBR NM 52 (ABNT, 2003b);
- Massa específica unitária solta e com 4% de umidade → NBR NM 45 (ABNT, 2006);
- Absorção de água → NBR NM 30 (ABNT, 2001a);
- Materiais pulverulentos → NBR NM 46 (ABNT, 2003c);
- Matéria orgânica → NBR NM 49 (ABNT, 2001b).

A tabela 10 apresenta os valores obtidos nos ensaios descritos anteriormente, a fim de caracterizar o agregado miúdo natural. Já a figura 18 ilustra a distribuição granulométrica do mesmo, referenciada em relação à zona de utilização e zona ótima, ambas especificadas na NBR NM 248 (ABNT, 2003a).

Tabela 10: Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo natural.

Φ Max. (mm)	Módulo de Finura	Massa Específica			Massa Unitária		Absorção (%)	Pulveru- lento (%)	Matéria Orgânica	
		SSS* (g/cm³)	Seca (g/cm³)	Aparente (g/cm³)	Solta (g/cm³)	4% de Umidade (g/cm³)				
1,18	1,87	2,619	2,629	2,613	1,487	1,107	0,24	0,26	+ Clara	
Distribuição Granulométrica										
Abertura da Peneira (mm)		0,075	0,15	0,3	0,6	1,18	2,36	4,75	6,3	9,5
% Retida Acumulada		100,0	97,6	70,7	12,7	4,5	1,5	0,4	0,2	0,0

*SSS: Saturado Superfície Seca.

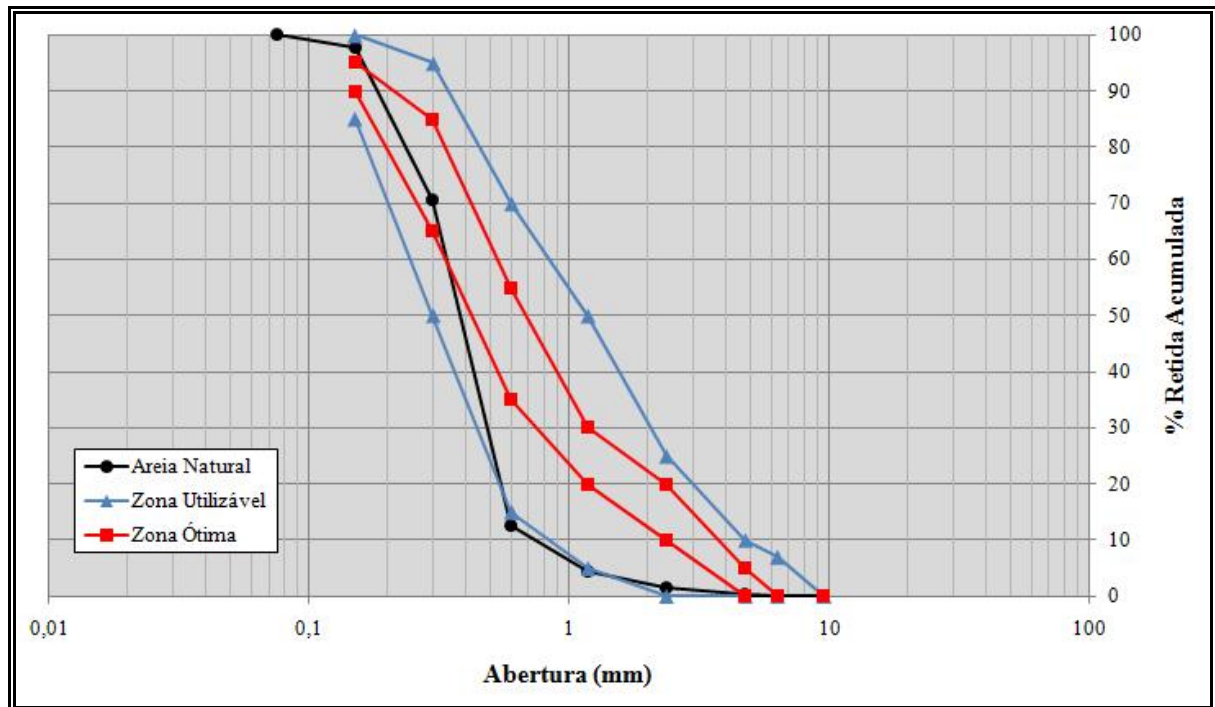


Figura 18: Distribuição granulométrica do agregado miúdo natural.

4.1.3 Brita

O agregado gráudo utilizado foi brita 1 proveniente da pedreira comercial de Três Fronteiras – SP. A caracterização foi realizada de acordo com os ensaios preconizados nas normas técnicas brasileiras, estando estes discriminados a seguir:

- Análise granulométrica → NBR NM 248 (ABNT, 2003a);
- Massa específica na condição saturada superfície seca (SSS), massa específica seca e aparente e absorção de água → NBR NM 53 (ABNT, 2003d);
- Massa específica unitária → NBR NM 45 (ABNT, 2006);
- Materiais pulverulentos → NBR NM 46 (ABNT, 2003c).

A tabela 11 apresenta os valores obtidos nos ensaios descritos anteriormente, a fim de caracterizar o agregado gráudo natural. Já a figura 19 ilustra a distribuição granulométrica do mesmo, referenciada em relação à zona de especificação 9,5/25 apresentada na NBR NM 248 (ABNT, 2003a).

Tabela 11: Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo natural.

Φ Max. (mm)	Módulo de Finura	Massa Específica			Massa Unitária (g/cm³)	Absorção (%)	Pulverulento (%)				
		SSS* (g/cm³)	Seca (g/cm³)	Aparente (g/cm³)							
25	7,15	2,929	2,888	3,011	1,616	1,42	0,55				
Distribuição Granulométrica											
Abertura da Peneira (mm)	0,15	0,30	0,60	1,18	2,36	4,75	6,30	9,50	12,50	19	25
% Retida Acumulada	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	99,7	99,4	96,4	15,4	0,5

*SSS: Saturado Superfície Seca.

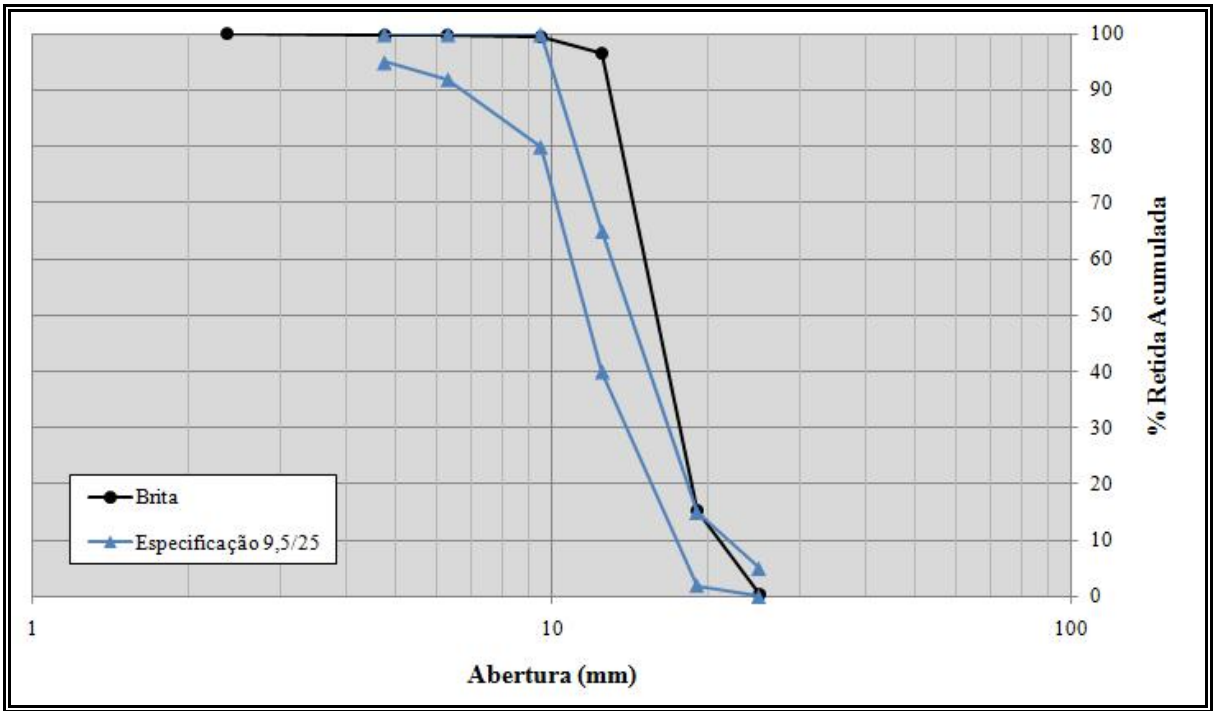


Figura 19: Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural.

4.1.4 Água

Para a composição dos traços de concreto, utilizou-se água potável proveniente da rede de abastecimento público do município de Ilha Solteira – SP.

4.1.5 Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante empregado nas misturas de concreto é uma composição à base de policarboxilato. Trata-se de um aditivo líquido compatível com os diversos tipos de cimento Portland, recomendado para diferentes aplicações, inclusive para o uso em manufaturas de concreto.

O aditivo em questão é um líquido de coloração castanho claro, que adicionado à mistura de concreto atua através dos efeitos de absorção superficial e separação estérica nas partículas de cimento, possui limite de aplicação, especificado pelo fabricante, de 1,0% sobre a massa de cimento, para concretos plásticos. Sendo este corretamente empregado, obtêm-se as seguintes vantagens:

- Concreto fluído com baixo fator A/C sem segregação e exsudação;
- Redução das retrações e fissuras no concreto;
- Melhoria na aderência e textura da superfície do concreto;
- Aumento da impermeabilidade e durabilidade do concreto;
- Aumento no módulo de elasticidade.

4.1.6 Resíduo de concreto

O resíduo de concreto utilizado neste trabalho foi proveniente da demolição de edificações em alvenaria de blocos de concreto, sendo que o mesmo encontrava-se estocado no pátio do Laboratório de Engenharia Civil da Companhia Energética de São Paulo (CESP).

Inicialmente os resíduos de blocos de concreto, que possuíam dimensões variadas, foram fragmentados em partes menores, de modo a propiciar uma maior facilidade no processo de britagem. Após tal fragmentação, estes foram lançados no britador de facas, no qual foi acoplada a peneira de abertura igual a 4,75mm, sendo o produto final, ilustrado na figura 20, devidamente ensacado e estocado. A figura 21 apresenta detalhes do britador de facas onde foram britados os resíduos de blocos de concreto para a produção do agregado reciclado de concreto.



Figura 20: Aspecto do agregado reciclado de concreto.



Figura 21: Britador de facas utilizado na preparação do agregado miúdo artificial.

(a): Detalhes externos do britador de facas.

(b): Detalhe do conjunto de facas no interior do britador.

Após o processo de beneficiamento, o agregado reciclado de concreto foi submetido aos mesmos ensaios de caracterização aplicados ao agregado miúdo natural, ensaios estes realizados em conformidade com as normas técnicas brasileiras. Na tabela 12 são apresentados os valores obtidos nos ensaios de caracterização do agregado miúdo artificial. Já a figura 22 ilustra a distribuição granulométrica do mesmo, referenciada em relação à zona de utilização e zona ótima para agregados miúdos, ambas especificadas na NBR NM 248 (ABNT, 2003a).

Tabela 12: Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo artificial.

Φ Max. (mm)	Módulo de Finura	Massa Específica			Massa Unitária		Absorção (%)	Pulveru- lento (%)	Matéria Orgânica
		SSS* (g/cm³)	Seca (g/cm³)	Aparente (g/cm³)	Solta (g/cm³)	4% de Umidade (g/cm³)			
4,75	2,60	2,611	2,762	2,525	1,472	1,321	3,39	8,70	-
Distribuição granulométrica									
Abertura (mm)	0,075	0,15	0,3	0,6	1,18	2,36	4,75	6,3	9,5
% Retida Acumulada	100,0	85,1	73,7	54,8	35,6	11,2	0,0	0,0	0,0

*SSS: Saturado Superfície Seca.

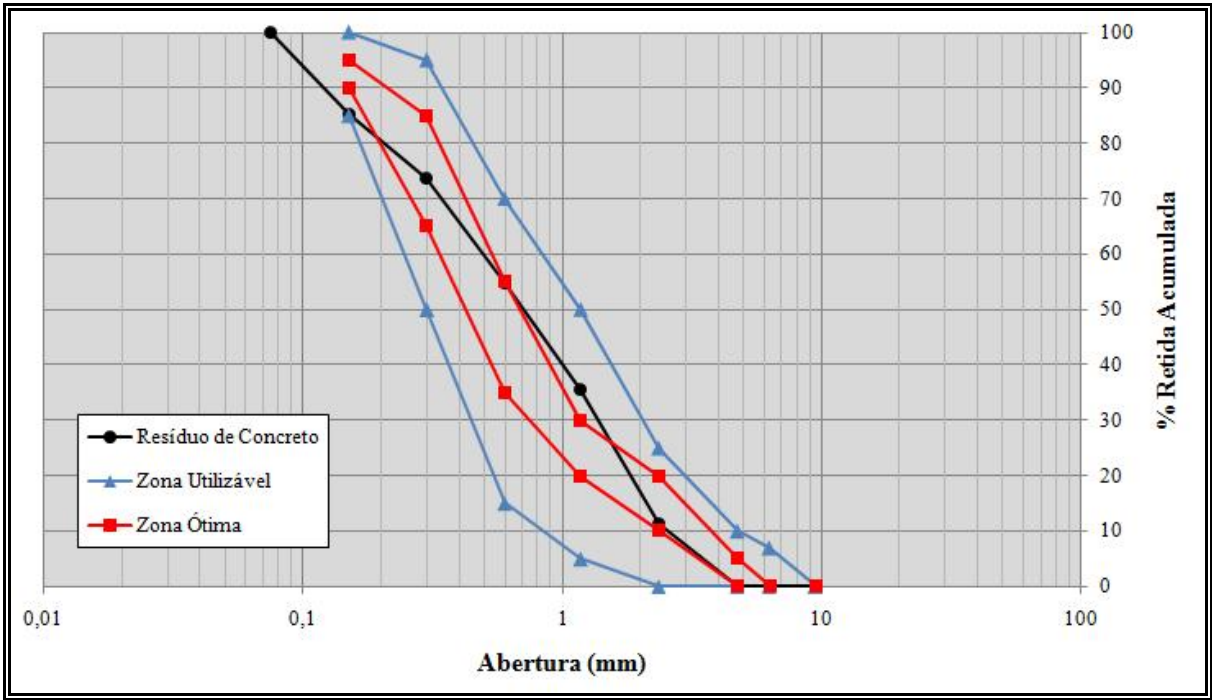


Figura 22: Distribuição granulométrica do agregado miúdo reciclado de concreto.

4.2 Estudo de dosagem

Segundo Helene e Terzian (1992), entende-se por estudo de dosagem dos concretos de cimento Portland os procedimentos necessários à obtenção da melhor proporção entre os materiais constitutivos do concreto, também conhecido por traço do concreto. Esta proporção ideal dos materiais constituintes do concreto pode ser expressa em massa ou em volume, sendo preferível e sempre mais rigorosa, a proporção expressa em massa seca de materiais.

A metodologia de dosagem utilizada para produção de PPC depende do tipo de técnica de produção adotada. A maioria das fábricas utilizam vibroprensas, requerendo concretos de consistência seca e coesão suficiente para se manterem íntegros até seu endurecimento, sem sofrer desmoronamentos ou quebra de arestas. Porém, o trabalho em questão visa obter um concreto de consistência suficientemente plástica, de modo a dispensar o uso de vibroprensas no processo de moldagem das peças de concreto para pavimentação intertravada e que atenda as especificações contidas na NBR 9781 (ABNT, 1987d) e na NBR 9780 (ABNT, 1987c).

Coutinho (1988) lista as principais características físicas que intervêm diretamente na trabalhabilidade do concreto, que são:

- Ângulo de atrito interno das partículas constituintes do traço;
- Coesão;
- Viscosidade;
- Massa específica;
- Segregação;
- Exsudação.

As três primeiras estão relacionadas com a maior ou menor mobilidade da massa, a quarta com o tipo de compactação utilizada e as duas últimas com a estabilidade da massa durante a mistura e compactação.

A metodologia de dosagem adotada neste projeto de pesquisa é baseada no método de dosagem do Instituto de Pesquisas Tecnológicas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992).

4.2.1 Metodologias de dosagem

A seguir são apresentados aspectos relevantes de alguns dos principais métodos de dosagem que tem apresentado grande difusão quanto ao seu conhecimento e intensa utilização nas principais regiões metropolitanas do país, contribuindo assim para incentivar as discussões e possíveis limitações dos mesmos.

- Método de dosagem IPT/EPUSP

O método de dosagem denominado IPT/EPUSP, constitui uma atualização feita pela Escola Politécnica da USP a partir do método desenvolvido inicialmente pelo IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, tal metodologia é apresentada no Manual de Dosagem e Controle de Concreto (HELENE; TERZIAN, 1992).

Por se tratar de um método predominantemente experimental, foi desenvolvido com o objetivo de possibilitar sua aplicação em qualquer região do país adaptando-se aos mais diversos materiais. Apresenta grande preocupação com a obtenção de misturas trabalháveis e uma quantidade mínima de argamassa que permita o preenchimento de vazios deixados pelo agregado graúdo e lubrificação dos grãos.

Tal método de dosagem, parte inicialmente de uma avaliação preliminar com mistura em betoneira do traço 1:m (cimento:agregados secos totais, em massa). A primeira etapa deste método de dosagem é a determinação do teor de argamassa para o traço inicial, sendo esta fase de grande importância, pois determina a adequabilidade do concreto no processo de moldagem, tanto dos corpos-de-prova cilíndricos quanto das peças de concreto. As quantidades de materiais necessárias para mistura na betoneira, correspondentes a cada teor de argamassa adotado, são fornecidas por meio de tabelas.

Com o teor de argamassa definido, realiza-se a moldagem do traço 1:m com o objetivo de determinar todas as características do concreto no estado fresco: relação a/c (necessária para se obter a consistência desejada), consumo de cimento por metro cúbico de concreto, consumo de água por metro cúbico de concreto, massa específica e abatimento do tronco de cone.

A nova etapa do estudo de dosagem consiste em moldar mais dois traços auxiliares (um mais rico e outro mais pobre em teores de cimento), possibilitando uma posterior análise do modelo de comportamento do concreto. Para a obtenção dos novos traços auxiliares mantém-se fixo o teor de argamassa e o abatimento do tronco de cone obtidos para a mistura 1:m inicial determinando-se a relação a/c necessária para se conseguir a consistência obtida para o traço intermediário. Posteriormente determina-se a massa específica do concreto fresco, para cada traço, e realizam-se as moldagens dos corpos-de-prova.

Com os dados obtidos (relação a/c, abatimento do tronco de cone, resistência à compressão axial aos 7, 14 e 28 dias, e consumo de cimento por metro cúbico de concreto) nas três misturas ensaiadas (traço intermediário, rico e pobre), obtêm-se o modelo de comportamento do concreto (diagrama de dosagem).

O método do IPT/EPUSP permite, com o mínimo de recursos laboratoriais, alcançar soluções ágeis e seguras na determinação do comportamento das famílias de concretos objetos de estudo.

- Método de Dosagem ABCP/ACI

Baseado no texto da Norma ACI 211.1-81 (*Revised 85*), o método da ABCP publicado em 1984 pela Associação Brasileira de Cimento Portland como um Estudo Técnico intitulado “Parâmetros de Dosagem do Concreto”, de autoria do Eng. Públio Penna Firme Rodrigues (revisado em 1995), constitui uma adaptação do método americano às condições brasileiras e permite a utilização de agregados graúdos britados e areia de rio (BOGGIO, 2000).

A metodologia da ABCP/ACI apresenta como base a trabalhabilidade da mistura, às condições de execução e adensamento, e às dimensões das peças a serem moldadas. Um princípio básico abordado pelo método é o que associa, para cada granulometria do agregado miúdo e para cada tamanho máximo de agregado graúdo, um volume máximo de agregado compactado seco por m^3 de concreto.

A primeira etapa consiste na fixação de uma consistência adequada para o concreto fresco de acordo com o tipo de peça estrutural a ser concretada e aos procedimentos de lançamento a serem empregados.

De acordo com as dimensões das peças estruturais e o espaçamento entre as barras de armaduras seleciona-se a dimensão máxima do agregado graúdo, compatível com as características dos materiais economicamente disponíveis.

Na próxima etapa por meio de tabelas são fornecidas as quantidades de água de amassamento das misturas em função das dimensões máximas características dos agregados e do abatimento requerido. Posteriormente em função das necessidades de resistência e das condições de exposição do concreto fixa-se a relação água/cimento (x), lançando-se mão das curvas de Abrams, construídas com o cimento e os materiais a serem utilizados. Com isso o consumo de cimento C do traço por m^3 fica determinado no consumo de água e na relação água/cimento.

De acordo com a filosofia do método realiza-se o proporcionamento entre o agregado graúdo e o agregado miúdo de modo a se obter o máximo volume de agregado seco compactado por m^3 de concreto e conseqüentemente o menor volume de vazios possível.

A quantidade de areia no traço (em kg) é obtida pelo método volumétrico, admitindo-se que o volume de concreto é composto pela soma dos volumes de cimento, água, ar aprisionado, agregados e eventuais aditivos empregados na mistura.

Por fim a apresentação do traço em massa é feita em função das relações dos diversos componentes relacionados à massa de cimento: 1:A/C:B/C//Q/C.

Onde:

A = Quantidade (kg) de agregado miúdo por m³ de concreto;

C = Quantidade (kg) de cimento por m³ de concreto;

B = Quantidade (kg) de brita por m³ de concreto;

Q = Quantidade (kg) de água por m³ de concreto;

- Método de Dosagem INT/LOBO CARNEIRO

Tomando como base as curvas granulométricas propostas por Otto Graf e Bolomey, o engenheiro Fernando Lobo Carneiro, integrante da equipe técnica do Instituto Nacional de Tecnologia - INT, iniciou o desenvolvimento de um método de dosagem de concretos plásticos. A metodologia desenvolvida levou à obtenção de curvas granulométricas adimensionais para diferentes tamanhos de agregados. Publicado em 1937, com o título “Dosagem de Concretos Plásticos” (CARNEIRO, 1937), foi considerado como um grande avanço para a época, por se fazer do estudo de dosagem de concretos um procedimento mais fácil de entender-se.

O trabalho publicado em 1937 serviu como base para que Lobo Carneiro executa-se trabalhos experimentais e levantamento de informações em campo, gerando um trabalho mais extenso e conseqüentemente levando-o à publicação em 1943, sendo este intitulado “Dosagem dos Concretos”.

Descrevendo em síntese, o primeiro passo do método, uma vez determinado o tipo de cimento, consiste em estimar a relação água/cimento necessária para atender os critérios de resistência e durabilidade impostos pela estrutura a qual o concreto será dosado.

Posteriormente procede-se a determinação aproximada da proporção cimento:agregado, partindo-se do princípio que a percentagem de água/materiais secos H(%) é praticamente independente da proporção cimento:agregado (1:m).

Na próxima fase, utilizando-se das curvas desenvolvidas pelo INT, onde são representadas distribuições granulométricas ótimas para misturas cimento-agregado com

diferentes dimensões máximas, determina-se as proporções entre os agregados componentes da mistura.

Uma vez determinadas as percentagens de cada tipo de agregado, procede-se o cálculo das proporções, em massa, de cada um dos materiais constituintes do traço, tomando-se como referência a unidade de massa de cimento. Com isso o total de materiais secos do traço estará dado pela expressão $(1+m)$.

$$a = \% \text{ de areia} \cdot (1+m)/100; b1 = \% \text{ de brita 1} \cdot (1+m)/100; b2 = \% \text{ de brita 2} \cdot (1+m)/100$$

4.2.2 Realização do estudo de dosagem

Seguindo o método de dosagem do IPT/EPUSP proposto por Helene e Terzian (1992), estabeleceu-se o teor ideal de argamassa seca igual a 53% para o traço intermediário 1:6, em seguida, tendo-se as quantidades de materiais necessárias para a mistura na betoneira referentes ao teor de argamassa estabelecido, realizou-se a moldagem do referido traço em betoneira de eixo vertical, obedecendo-se a seguinte ordem de adição e mistura dos materiais constituintes:

- 1º - Foram lançados inicialmente, na betoneira previamente umidificada, os agregados, tanto gráúdo quanto o miúdo, juntamente com metade da massa total de água;
- 2º - Foi aplicado o tempo de mistura dos materiais de 1 minuto;
- 3º - Posteriormente foram lançados o aglomerante e o restante da massa de água;
- 4º - Os materiais foram misturados por mais 3 minutos,
- 5º - Lançou-se o aditivo superplastificante;
- 6º - E por fim os materiais foram misturados por mais 5 minutos.

O controle da quantidade de água e do consumo de aditivo foi efetuado tendo como base a consistência desejada (170 ± 20 mm), determinada pelo ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*). Tal consistência, de valor relativamente elevado, é fruto da proposta de moldagem das peças para pavimentação sem o auxílio de processos mecânicos como a vibroprensa por exemplo. A figura 23 ilustra a consistência do concreto, em seu estado fresco, para o traço com proporção entre cimento e agregados secos totais, em massa, igual a 1:6, sendo possível observar um concreto homogêneo, composto de argamassa suficiente para envolver o agregado gráúdo e sem apresentar sinais de exsudação.



Figura 23: Consistência do concreto no estado fresco para o traço 1:6.

Depois de obtida a consistência requerida, segundo prescrições da NBR NM 67 (ABNT, 1998), foram moldados 9 corpos-de-prova cilíndricos (10 cm de diâmetro e 20 cm de altura), adensados com o auxílio de mesa vibratória, perfazendo 3 corpos-de-prova por idade de ruptura (7, 14 e 28 dias).

Decorrido 24 horas da moldagem dos corpos-de-prova, estes foram desmoldados e curados em câmara úmida com ciclos contínuos de aspersão de água. Antes da ruptura os corpos-de-prova receberam capeamento com argamassa de enxofre conforme recomendação da NBR 7215 (ABNT, 1996).

Em seguida mais dois traços foram confeccionados, 1:4 (traço rico) e 1:8 (traço pobre), sendo que, para tais traços, em comparação ao traço intermediário, manteve-se fixo o teor de argamassa seca igual a 53%, a consistência desejada de 170 ± 20 mm e o consumo de aditivo, variando-se o consumo de aglomerante e água por metro cúbico de concreto e conseqüentemente a relação a/c. Para a confecção dos traços rico e pobre e posterior moldagem e desforma dos corpos-de-prova cilíndricos foram adotados os mesmo procedimentos, descritos acima, do traço intermediário, perfazendo um total de 27 corpos-de-prova, sendo 3 corpos-de-prova por idade por traço.

A tabela 13 apresenta os dados referentes aos traços moldados durante a realização do estudo de dosagem, bem como as propriedades do concreto no estado fresco para os referidos traços.

Tabela 13: Dados referentes aos traços moldados no estudo de dosagem e as respectivas propriedades do concreto no estado fresco.

Traço 1:m		1:4	1:6	1:8
Dados da Dosagem	Teor de Argamassa (%)	53	53	53
	Consumo de Cimento (kg/m ³)	526,0	361,0	279,0
	Consumo de Água (kg/m ³)	165,2	170,0	175,0
	Consumo de Areia (kg/m ³)	868	978	1051
	Consumo de Brita (kg/m ³)	1236	1188	1181
	Relação a/c (kg/kg)	0,314	0,471	0,627
	Consumo de Superplastificante (% sobre a massa de cimento)	0,4	0,4	0,4
Propriedades do Concreto Fresco	Slump (cm)	18,2	18,6	17,3
	Temperatura (°C)	25,1	24,4	23,6
	Ar Incorporado (%)	1,7	6,8	-
	Densidade Aparente (t/m ³)	2,481	2,353	2,315

No intuito de se determinar a última variável para obtenção do modelo de comportamento do concreto (diagrama de dosagem), foram realizados ensaios de compressão axial, aos 7, 14 e 28 dias em 3 corpos-de-prova por idade para cada traço, conforme a NBR 5739 (ABNT, 1994), determinando-se assim, as resistências à compressão requeridas. Na tabela 14 são apresentados os valores médios de resistência à compressão axial, aos 7, 14 e 28 dias para cada traço estudado. Já a figura 24 ilustra a aparência dos corpos-de-prova referentes aos traços pobre, intermediário e rico logo após a desforma.

Tabela 14: Valores médios obtidos de resistências à compressão axial.

Resistência (MPa)	Traço 1:m		
	1:4	1:6	1:8
7 dias	31,1	18,1	12,6
14 dias	38,9	22,9	16,3
28 dias	40,3	23,9	16,5



Figura 24: Aparência dos corpos-de-prova referentes aos traços 1:8, 1:6 e 1:4 posicionados nesta ordem da esquerda para a direita.

Com os resultados obtidos, construiu-se o chamado “Diagrama de Dosagem”, que corresponde ao modelo de comportamento e que facilita sobremaneira o entendimento do comportamento dessa família de concretos de mesmo abatimento, mas de propriedades muito diferentes depois de endurecidos, conforme é apresentado na figura 25.

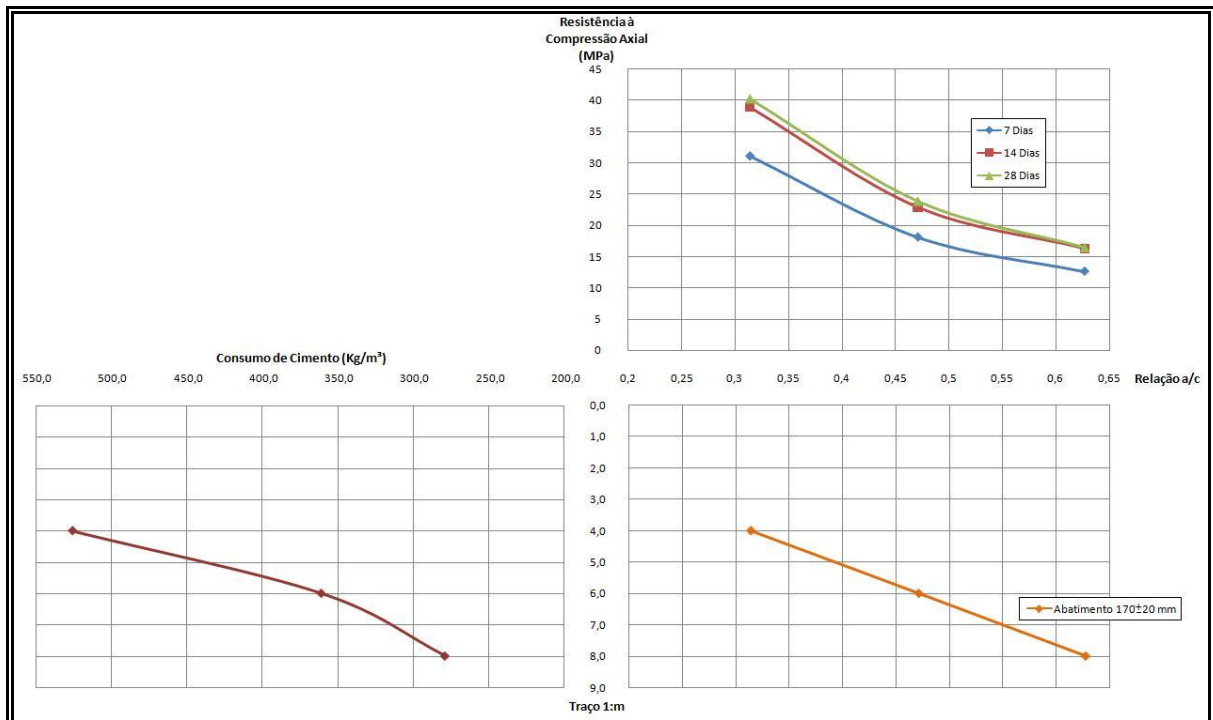


Figura 25: Diagrama de Dosagem confeccionado segundo modelo proposto por Helene e Terzian (1992).

Mediante ao estudo de dosagem realizado, tendo como base o diagrama de dosagem acima exposto, a partir da resistência característica à compressão de 35 MPa requerida na NBR 9781 (ABNT, 1987d) para tráfego de veículos comerciais de linha, é possível obter a relação a/c, a proporção 1:m e o consumo de cimento por metro cúbico de concreto para o traço padrão a ser confeccionado, objetivando-se alcançar a resistência à compressão requerida aos 28 dias.

A figura 26 apresenta o esquema para a obtenção das características citadas para o traço padrão.

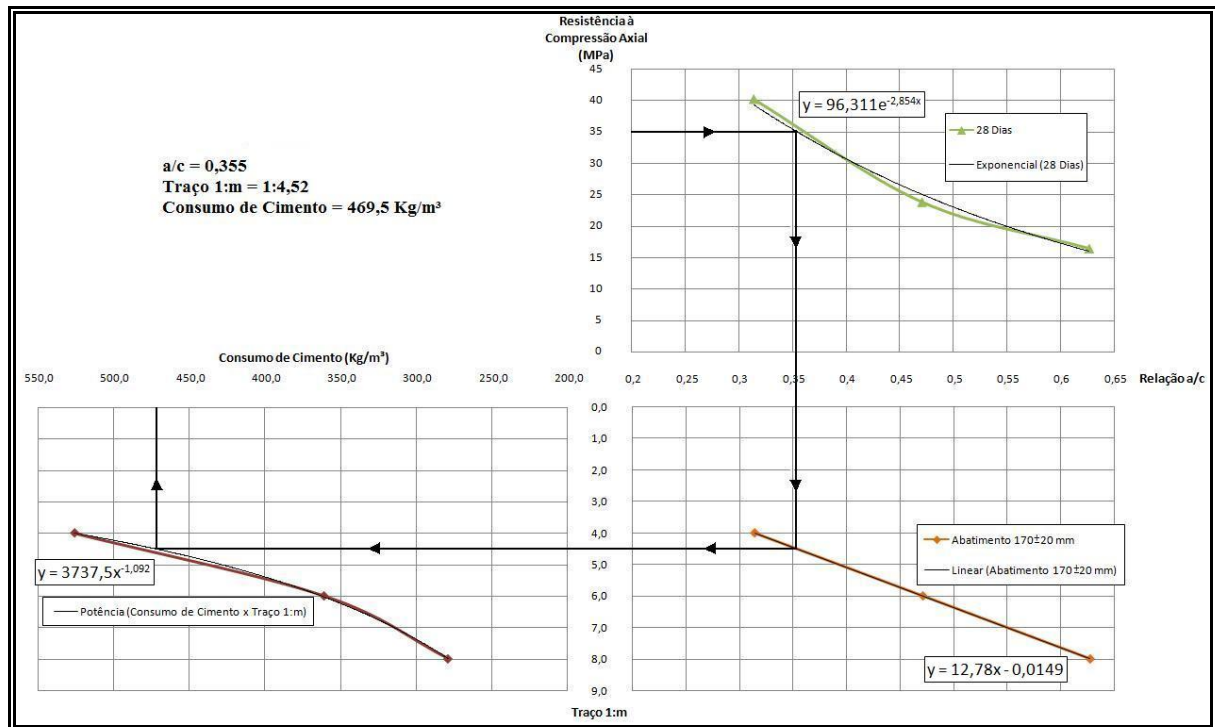


Figura 26: Esquema para obtenção das características de dosagem do traço padrão.

Com isso, a partir do esquema acima, utilizando-se as linhas de tendência e suas respectivas equações constitutivas tornou-se possível a obtenção das características necessárias para moldagem do traço padrão, no intuito de que este atinja a resistência de 35 MPa na idade de 28 dias.

De posse dos dados necessários, foi realizada a confecção do traço padrão, bem como a determinação de sua consistência, verificando assim que esta se enquadra nos valores limites propostos (170 ± 20 mm). Por fim, foram moldados 3 corpos-de-prova para cada uma das idades de 7, 28, 56 e 120, para posterior determinação da resistência à compressão axial e do módulo de elasticidade da mistura no estado endurecido.

Na tabela 15 estão apresentados os dados referentes ao traço padrão, moldado após a realização do estudo de dosagem, bem como as propriedades do concreto no estado fresco para o referido traço.

Tabela 15: Dados referentes à dosagem do traço padrão e as respectivas propriedades do concreto no estado fresco.

Traço 1:m		1:4,52
Dados da Dosagem	Teor de Argamassa (%)	53
	Consumo de Cimento (kg/m³)	469,5
	Consumo de Água (kg/m³)	166,7
	Consumo de Areia (kg/m³)	904
	Consumo de Brita (kg/m³)	1218
	Relação a/c (kg/kg)	0,355
	Consumo de Superplastificante (% sobre a massa de cimento)	0,4
Propriedades do Concreto Fresco	Slump (cm)	16,7
	Temperatura (°C)	25,8
	Ar Incorporado (%)	2,5
	Densidade Aparente (t/m³)	2,457

A partir do traço de referência, de características obtidas através do estudo de dosagem anteriormente apresentado, a próxima etapa experimental executada foi a substituição do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado de concreto, de tal maneira que a referida etapa será exposta em maiores detalhes a seguir.

4.3 Confecção dos traços com teores de substituição do agregado miúdo

A substituição gradativa do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado de concreto tem como principal objetivo a análise do comportamento destas famílias de concreto tanto em seu estado fresco como no estado endurecido, buscando-se assim uma relação entre as características a serem analisadas com a proporção dos materiais utilizados na confecção dos referidos traços e com isso embasar a determinação do teor de substituição tido como

ótimo, ou seja, teor de substituição que apresente as melhores correlações entre as propriedades do concreto tanto em seu estado fresco como no estado endurecido.

Inicialmente como descrito no item 4.1.6 o agregado miúdo reciclado de concreto foi preparado por meio da britagem e separação da faixa granulométrica de interesse utilizando-se a peneira de abertura 4,75 mm, sendo o produto final devidamente ensacado e estocado. Com isso, de posse das características do traço de referência pode-se então dar início à confecção dos traços com emprego de teores de substituição crescentes do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado de concreto.

O incremento utilizado para substituição do agregado miúdo natural foi de 20% até se atingir o limite de 100% de substituição do mesmo. Portanto, foram confeccionados 5 traços utilizando-se agregado miúdo reciclado de concreto em crescentes teores (20%, 40%, 60%, 80% e 100%), sendo que para tais traços mantiveram-se fixos os parâmetros de dosagem do traço de referência, variando-se apenas o consumo de superplastificante, tal variação se justifica à medida que tais traços deveriam apresentar uma consistência suficientemente plástica caracterizada no ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*) da ordem de 170 ± 20 mm, consistência esta fruto da proposta de moldagem das PPC sem a utilização da vibroprensa.

As confecções dos referidos traços de substituição foram realizadas em betoneira de eixo vertical, obedecendo-se a mesma ordem de adição e mistura dos materiais constituintes descrita no item 4.2.2 *Realização do estudo de dosagem*. Com a finalidade de se determinar a quantidade necessária de aditivo superplastificante para se atingir a consistência especificada, os traços a serem confeccionados para posterior moldagem dos corpos-de-prova foram previamente produzidos, obviamente em volumes menores, unicamente para realização do ensaio de abatimento do tronco de cone, garantindo assim a não ocorrência do descarte de maiores volumes de concreto por não atingirem a consistência requerida.

A tabela 16 apresenta os dados referentes à confecção dos traços com teores crescentes de substituição do agregado miúdo por agregado reciclado de concreto e as respectivas propriedades do concreto em seu estado fresco.

Tabela 16: Dados referentes à confecção dos traços com teores crescentes de substituição do agregado miúdo e as respectivas propriedades do concreto no estado fresco.

Traço 1:m = 1:4,52		20% de Resíduo	40% de Resíduo	60% de Resíduo	80% de Resíduo	100% de Resíduo
Dados da Dosagem	Teor de Argamassa (%)	53	53	53	53	53
	Consumo de Cimento (kg/m³)	469,5	469,5	469,5	469,5	469,5
	Consumo de Água (kg/m³)	166,7	166,7	166,7	166,7	166,7
	Consumo de Areia (kg/m³)	723,2	542,4	361,6	180,8	0,0
	Consumo de Resíduo (kg/m³)	180,8	361,6	542,4	723,2	904
	Consumo de Brita (kg/m³)	1218	1218	1218	1218	1218
	Relação a/c (kg/kg)	0,355	0,355	0,355	0,355	0,355
	Consumo de Superplastificante (% sobre a massa de cimento)	0,5	0,6	0,8	1,1	1,4
Propriedades do Concreto Fresco	Slump (cm)	18,1	16,2	18	17,8	17,5
	Temperatura (°C)	25,1	25,7	26,7	27	26,1
	Ar Incorporado (%)	4	3,9	3,7	4	2,5
	Densidade Aparente (t/m³)	2,486	2,496	2,503	2,484	2,514

Para todos os 5 traços confeccionados foram moldados 3 corpos-de-prova cilíndricos (10 cm de diâmetro por 20 cm de altura) para cada uma das idades de 7, 28, 56 e 120 e 3 peças de concreto retangulares (20 cm de comprimento por 10 cm de largura e 6 cm de altura) para a idade de 28 dia, sendo estes destinados aos ensaios de compressão axial e ainda 5 corpos-de-prova cilíndricos adicionais a serem ensaiados para determinação do módulo de elasticidade aos 28 dias. Os procedimentos para moldagem dos corpos-de-prova foram realizados seguindo-se as prescrições da NBR NM 67 (ABNT, 1998), sendo estes desmoldados após 24 horas e levados para cura em câmara úmida até atingirem a idade de ruptura, já as peças de concreto retangulares foram moldadas com o auxílio da mesa vibratória e utilizando-se moldes de PVC, sendo estas desmoldadas e curadas de maneira análoga aos corpos-de-prova cilíndricos.

4.4 Moldagem dos corpos-de-prova e PPC a serem ensaiados

Realizada a etapa anteriormente descrita de confecção dos traços com teores crescentes de substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado de concreto, e posterior moldagem dos corpos-de-prova, estes foram submetidos a ensaios de compressão axial e determinação do módulo de elasticidade, no intuito de se obter dados referentes a estas famílias de concreto, visando analisar suas características tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, de forma a embasar a determinação do teor ótimo de substituição do agregado miúdo por agregado reciclado de concreto a partir do traço de referência obtido através de estudo de dosagem previamente apresentado.

Os resultados dos ensaios a que foram submetidos os corpos-de-prova acima descritos serão apresentados em maiores detalhes no capítulo seguinte que aborda especificamente a apresentação e análise dos resultados obtidos na etapa experimental do presente projeto de pesquisa, bem como os argumentos embasados em tais resultados e dados referentes à dosagem dos traços de concreto com teores crescentes de substituição do agregado miúdo que justificaram a fixação do teor de 60% de substituição do agregado miúdo por agregado reciclado de concreto como sendo o teor ótimo de substituição para o traço de referência.

Com isso, objetivando-se analisar a influência que os agregados reciclados de concreto teriam nas propriedades do concreto endurecido com estes produzidos, e ainda avaliar as possíveis diferenças nas resistências à compressão axial em PPC de diferentes formas e espessuras, foram confeccionados sucessivos traços tanto de referência como para aquele com teor de 60% de substituição do agregado miúdo, finalizando com a moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura destinados a ensaios de absorção por imersão, corpos-de-prova de 30 cm de diâmetro por 10 cm de altura destinados a ensaios de desgaste por abrasão, peças retangulares de 3 e 6 cm de altura por 10 cm de largura e 20 cm de comprimento e peças hexagonais de 3 e 6 cm de altura por 15 cm de aresta, peças estas submetidas a ensaios de compressão axial, de modo que a tabela 17 apresenta um quadro resumo dos traços confeccionados e os respectivos ensaios a que foram submetidos os corpos-de-prova e PPC moldados a partir de tais traços.

Tabela 17: PPC e corpos-de-prova moldados e os respectivos ensaios a que foram submetidos.

Traço	Ensaio	nº de Corpos-de-prova / PPC	Idade a que foi ensaiado
Referência	Desgaste por Abrasão	2 corpos-de-prova	7 dias
		2 corpos-de-prova	28 dias
	Absorção por Imersão	3 corpos-de-prova	28 dias
	Compressão Axial em Peça Retangular de 6 cm de espessura	4 peças	7 dias
		4 peças	28 dias
	Compressão Axial em Peça Retangular de 3 cm de espessura	4 peças	7 dias
		4 peças	28 dias
	Compressão Axial em Peça Hexagonal de 6 cm de espessura	4 peças	7 dias
		4 peças	28 dias
	Compressão Axial em Peça Hexagonal de 3 cm de espessura	4 peças	7 dias
		4 peças	28 dias
60% de Resíduo	Desgaste por Abrasão	2 corpos-de-prova	7 dias
		2 corpos-de-prova	28 dias
	Absorção por Imersão	3 corpos-de-prova	28 dias
	Compressão Axial em Peça Retangular de 6 cm de espessura	4 peças	7 dias
		4 peças	28 dias
	Compressão Axial em Peça Retangular de 3 cm de espessura	4 peças	7 dias
		4 peças	28 dias
	Compressão Axial em Peça Hexagonal de 6 cm de espessura	4 peças	7 dias
		4 peças	28 dias
	Compressão Axial em Peça Hexagonal de 3 cm de espessura	4 peças	7 dias
		4 peças	28 dias

Capítulo 5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O presente capítulo tem por objetivo apresentar os resultados obtidos na fase experimental deste projeto de pesquisa, tanto para os corpos-de-prova referentes aos traços confeccionados com teores crescentes de substituição do agregado miúdo por agregado reciclado de concreto, bem como para os corpos-de-prova moldados a partir do traço de referência e do traço com adição de 60% de agregado reciclado de concreto.

5.1 Resultados dos ensaios para os traços com teores de substituição do agregado miúdo

Como já dito anteriormente, a partir do traço de referência realizou-se a substituição gradativa do agregado miúdo natural por agregado reciclado de concreto com incremento de 20% até se atingir 100% de substituição, com isso tanto para o traço de referência como para os 5 traços com adição de agregado reciclado de concreto foram realizados ensaios de compressão axial e módulo de elasticidade em corpos-de-prova cilíndricos e ainda ensaios de compressão axial em peças retangulares de 20 cm de comprimento, 10 cm de largura e 6 cm de altura, resultados estes apresentados a seguir.

5.1.1 Ensaios de compressão axial em corpos-de-prova cilíndricos

Na realização do ensaio de compressão axial em corpos-de-prova cilíndricos foram seguidas as especificações relatadas na norma NBR 5739 (ABNT, 1994), de modo que tais corpos-de-prova foram colocados com seu eixo na posição vertical entre os pratos da prensa aplicando-se uma carga paralela ao comprimento do mesmo (carga axial) até este atingir a ruptura.

Na figura 26(a) mostra-se o corpo-de-prova cilíndrico posicionado na prensa para realização do ensaio de compressão axial, já a figura 26(b) apresenta o mostrador analógico que fornece a leitura da carga aplicada à prensa.



(a)

(b)

Figura 27: Ensaio de compressão axial.

(a): Corpo-de-prova cilíndrico posicionado na prensa.

(b): Relógio analógico.

Nas tabelas 18 a 23 estão apresentados os resultados dos ensaios de compressão axial realizados nos corpos-de-prova cilíndricos provenientes do traço de referência e dos 5 traços com adição de agregado miúdo reciclado de concreto, com teores crescentes de substituição, de incremento igual a 20% até se atingir a substituição de 100%, do agregado miúdo natural.

A partir dos resultados dos ensaios de compressão axial expostos na sequência foi construído um gráfico na forma de colunas de modo a agrupar tais resultados de acordo com a idade de ruptura dos corpos-de-prova, facilitando-se assim a visualização de tais resultados e proporcionando maior facilidade na posterior análise comparativa entre estes. O referido gráfico encontra-se exposto na figura 28.

Tabela 18: Resultados dos ensaios de compressão axial para o traço de referência.

Traço De Referência	Idade de Ruptura	Corpo-de-Prova	Carga de Ruptura (ton.)	Resistência à Compressão Axial (MPa)	Valor Médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
	7 dias	1	28,3	36,1	35,9	1,4	3,8
		2	29,4	37,4			
		3	26,8	34,1			
	28 dias	1	35,3	44,9	45,8	0,8	1,8
		2	35,8	45,6			
		3	36,9	46,9			
	56 dias	1	37,3	47,5	49,2	1,4	2,8
		2	38,8	49,4			
		3	39,9	50,8			
	120 dias	1	41,5	52,8	53,1	0,9	1,7
		2	42,5	54,1			
		3	41,1	52,3			

Tabela 19: Resultados dos ensaios de compressão axial para o traço com adição de 20% de agregado reciclado de concreto.

Traço com Teor de 20% de Agregado Reciclado	Idade de Ruptura	Corpo-de-Prova	Carga de Ruptura (ton.)	Resistência à Compressão Axial (MPa)	Valor Médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
	7 dias	1	29,9	38,1	41,1	2,3	5,5
		2	32,7	41,6			
		3	34,2	43,5			
	28 dias	1	38,4	48,9	46,3	2,0	4,4
		2	34,5	43,9			
		3	36,1	46,0			
	56 dias	1	34,0	45,5	48,7	2,3	4,7
		2	38,0	49,8			
		3	38,0	50,7			
	120 dias	1	44,0	56,0	53,9	1,9	3,5
		2	41,1	52,3			
		3	41,9	53,3			

Tabela 20: Resultados dos ensaios de compressão axial para o traço com adição de 40% de agregado reciclado de concreto.

Traço com Teor de 40% de Agregado Reciclado	Idade de Ruptura	Corpo-de-Prova	Carga de Ruptura (ton.)	Resistência à Compressão Axial (MPa)	Valor Médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
	7 dias	1	33,5	42,7	45,4	2,2	4,9
		2	35,6	45,3			
		3	37,8	48,1			
	28 dias	1	34,2	43,5	47,7	3,0	6,4
		2	39,8	50,7			
		3	38,4	48,9			
	56 dias	1	38,6	49,1	49,3	3,4	6,9
		2	42,0	53,5			
		3	35,5	45,2			
	120 dias	1	41,5	52,8	54,2	1,9	3,4
		2	44,2	56,3			
		3	41,9	53,3			

Tabela 21: Resultados dos ensaios de compressão axial para o traço com adição de 60% de agregado reciclado de concreto.

Traço com Teor de 60% de Agregado Reciclado	Idade de Ruptura	Corpo-de-Prova	Carga de Ruptura (ton.)	Resistência à Compressão Axial (MPa)	Valor Médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
	7 dias	1	35,9	45,7	46,9	4,3	9,1
		2	33,2	42,3			
		3	41,3	52,6			
	28 dias	1	40,4	51,4	51,4	0,5	1,0
		2	39,8	50,7			
		3	40,8	51,9			
	56 dias	1	48,2	61,4	60,9	1,1	1,9
		2	46,6	59,3			
		3	48,7	62,0			
	120 dias	1	51,3	65,3	63,6	1,6	2,5
		2	49,7	63,3			
		3	48,8	62,1			

Tabela 22: Resultados dos ensaios de compressão axial para o traço com adição de 80% de agregado reciclado de concreto.

Traço com Teor de 80% de Agregado Reciclado	Idade de Ruptura	Corpo-de-Prova	Carga de Ruptura (ton.)	Resistência à Compressão Axial (MPa)	Valor Médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
	7 dias	1	40,0	50,9	50,8	0,9	1,9
		2	38,9	49,5			
		3	40,7	51,8			
	28 dias	1	48,7	62,0	57,4	3,9	6,8
		2	41,2	52,5			
		3	45,4	57,8			
	56 dias	1	45,0	57,3	59,6	1,9	3,2
		2	48,7	62,0			
		3	46,8	59,6			
	120 dias	1	49,2	62,6	63,0	0,9	1,5
		2	48,9	62,3			
		3	50,3	64,0			

Tabela 23: Resultados dos ensaios de compressão axial para o traço com adição de 100% de agregado reciclado de concreto.

Traço com Teor de 100% de Agregado Reciclado	Idade de Ruptura	Corpo-de-Prova	Carga de Ruptura (ton.)	Resistência à Compressão Axial (MPa)	Valor Médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
	7 dias	1	39,7	50,5	51,5	1,0	1,9
		2	40,2	51,2			
		3	41,5	52,8			
	28 dias	1	48,3	61,5	60,5	0,7	1,2
		2	47,3	60,2			
		3	46,9	59,7			
	56 dias	1	47,0	59,8	62,0	1,9	3,0
		2	48,5	61,8			
		3	50,6	64,4			
	120 dias	1	51,0	64,9	64,5	1,0	1,5
		2	49,8	63,4			
		3	51,2	65,2			

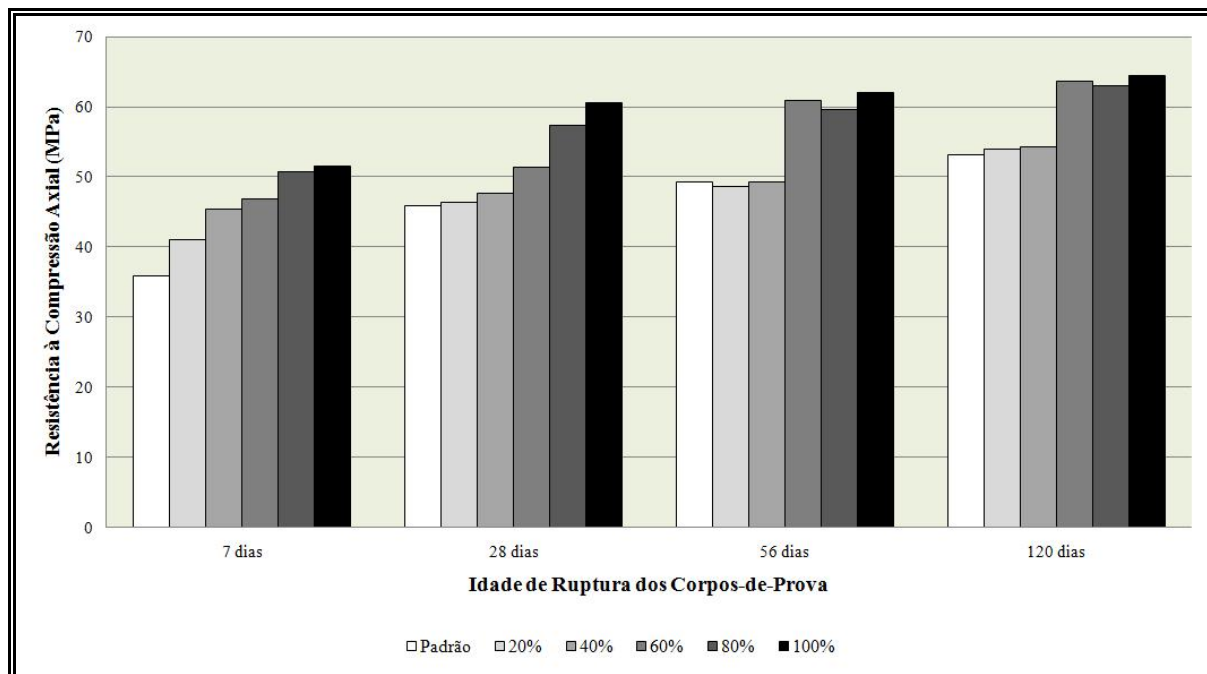


Figura 28: Resultados dos ensaios de compressão axial, agrupados em relação à idade de ruptura.

5.1.2 Ensaios de determinação do módulo de elasticidade estático

Os ensaios realizados com a finalidade de se determinar o módulo de elasticidade estático em corpos-de-prova cilíndricos, para os traços de referência e com teores crescentes de adição de agregado reciclado de concreto, seguiram os preceitos descritos na NBR 8522 (ABNT, 2003e), de tal maneira que foram ensaiados cinco corpos-de-prova para cada traço; os dois primeiros para se obter a resistência à compressão e o nível de carregamento e os três outros para se realizar os ensaios de determinação do módulo de elasticidade estático, tais ensaios se deram para a idade de 28 dias dos referidos corpos-de-prova.

Sendo assim, a tabela 24 apresenta os resultados dos ensaios de compressão axial nos corpos-de-prova destinados à obtenção do nível de carregamento esperado nos ensaios para a determinação do módulo de elasticidade estático.

Tabela 24: Resultados dos ensaios de compressão axial para obtenção do nível de carregamento esperado nos ensaios de determinação do módulo de elasticidade.

Traço	Corpo-de-Prova	Carga de Ruptura (ton.)	Resistência à Compressão Axial (MPa)	Valor Médio (MPa)
Referência	1	34,8	44,3	43,5
	2	33,5	42,7	
20% de Agregado Reciclado	1	35,5	45,2	45,6
	2	36,2	46,1	
40% de Agregado Reciclado	1	39,2	49,9	48,2
	2	36,5	46,5	
60% de Agregado Reciclado	1	42,2	53,7	53,0
	2	41,0	52,2	
80% de Agregado Reciclado	1	45,9	58,4	56,1
	2	42,3	53,9	
100% de Agregado Reciclado	1	46,5	59,2	60,7
	2	48,9	62,3	

O módulo de elasticidade estático foi determinado através da seguinte expressão:

$$E = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}} \cdot 10^{-3}, \text{ onde:}$$

E = Módulo de elasticidade estático em GPa;

$\sigma_{10\%}$ = 10% da tensão esperada de ruptura em MPa; $\sigma_{50\%}$ = 50% da tensão esperada de ruptura em MPa;

$\epsilon_{10\%}$ = Deformação relativa a 10% da tensão esperada de ruptura em mm/mm e

$\epsilon_{50\%}$ = Deformação relativa a 50% da tensão esperada de ruptura em mm/mm.

Portanto, a tabela 25 apresenta os valores de tensões referentes a 10% e 50% da tensão esperada de ruptura e suas respectivas deformações, tanto para o traço de referência quanto para os traços com teores de substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado de concreto e conseqüentemente os valores obtidos para os módulos de elasticidade dos corpos-de-prova dos referidos traços aos 28 dias decorridos da moldagem dos mesmos. Já a figura 29 apresenta graficamente os resultados obtidos para os ensaios de determinação do módulo de elasticidade para cada um dos traços ensaiados.

Tabela 25: Resultados dos ensaios para determinação do módulo de elasticidade estático.

Traço	Corpo-de-Prova	50% de σ (MPa)	ϵ 50% (mm/mm)	10% de σ (MPa)	ϵ 10% (mm/mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)	E médio (GPa)
Referência	1	21,75	0,000586	4,35	0,000112	36,74	36,89
	2	21,75	0,000610	4,35	0,000125	35,91	
	3	21,75	0,000601	4,35	0,000143	38,02	
20% de Agregado Reciclado	1	22,80	0,000555	4,56	0,000111	41,12	40,07
	2	22,80	0,000570	4,56	0,000108	39,48	
	3	22,80	0,000574	4,56	0,000114	39,61	
40% de Agregado Reciclado	1	24,10	0,000575	4,82	0,000103	40,88	41,15
	2	24,10	0,000561	4,82	0,000096	41,42	
	3	24,10	0,000567	4,82	0,000098	41,15	
60% de Agregado Reciclado	1	26,50	0,000593	5,30	0,000091	42,23	41,95
	2	26,50	0,000603	5,30	0,000092	41,51	
	3	26,50	0,000593	5,30	0,000090	42,11	
80% de Agregado Reciclado	1	28,05	0,000627	5,61	0,000093	42,04	42,38
	2	28,05	0,000612	5,61	0,000091	43,09	
	3	28,05	0,000621	5,61	0,000087	42,01	
100% de Agregado Reciclado	1	30,35	0,000652	6,07	0,000089	43,15	42,32
	2	30,35	0,000681	6,07	0,000092	41,23	
	3	30,35	0,000663	6,07	0,000093	42,58	

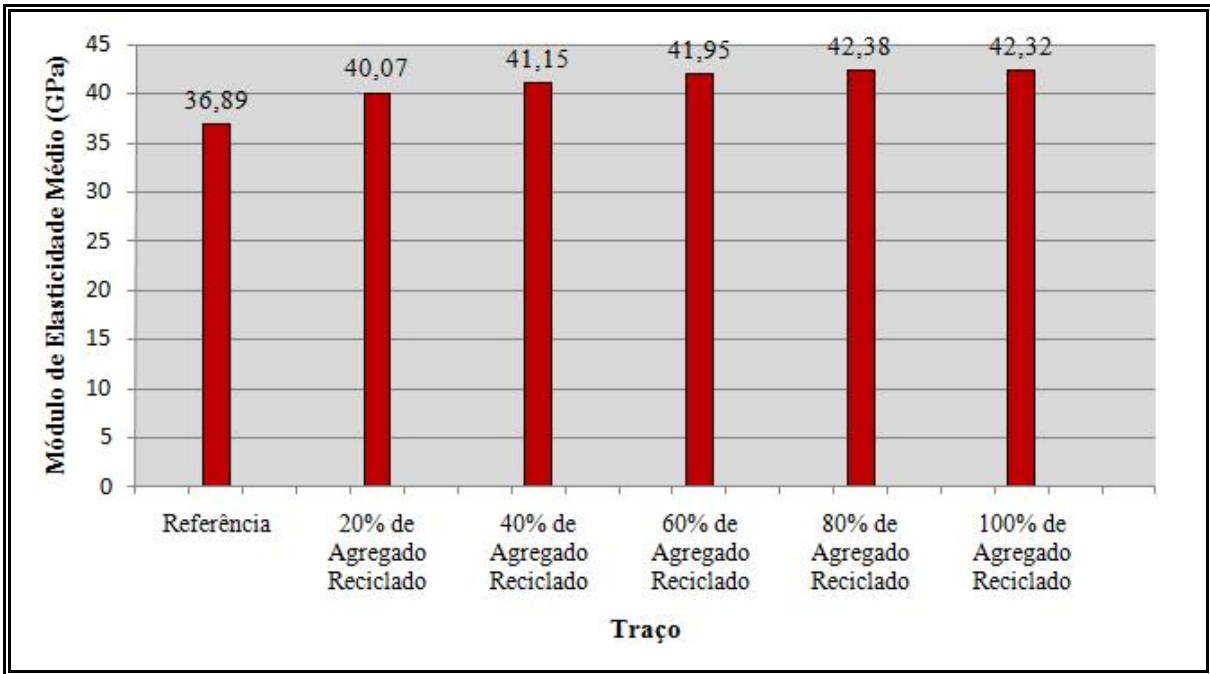


Figura 29: Módulos de elasticidade estáticos médios.

5.1.3 Ensaios de compressão axial em peças retangulares

Como relatado no capítulo anterior, foram moldados 3 peças de concreto retangulares (20 cm de comprimento por 10 cm de largura e 6 cm de altura) para cada um dos traços, tanto de referência como os com adição de agregado reciclado de concreto, peças estas a serem ensaiadas à compressão axial na idade de 28 dias.

A determinação da resistência à compressão nas peças de concreto retangulares seguiu os preceitos descritos na NBR 9780 (ABNT 1987c), de tal forma que as peças de concreto foram dispostas sobre placas auxiliares de ensaio, de maneira que a superfície de rolamento ficasse em contato com a placa superior da máquina de ensaio, e que o eixo vertical que passa pelo seu centro coincida com o eixo vertical passante pelo centro das placas. Ainda de acordo com a referida norma a resistência à compressão da peça é obtida dividindo-se a carga de ruptura pela área de carregamento, multiplicando o resultado pelo fator “ ρ ” função da altura da peça (fornecido por meio da tabela apresentada no item 5.4.1 da NBR 9780), que para este caso, ou seja, peças com altura 60 mm, possui valor igual a 0,95.

Sendo assim, a tabela 26 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de determinação da resistência à compressão axial aos 28 dias nas peças retangulares de concreto e suas respectivas correções utilizando-se o fator multiplicador “ ρ ” e a figura 30 apresenta graficamente tais resultados tanto para o traço de referência como para os traços com teores de substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado de concreto.

Tabela 26: Resultados dos ensaios de compressão axial em peças retangulares.

Traço	Corpo-de-Prova	Resistência à Compressão Axial (MPa)	Fator Multiplicador "ρ"	Resistência à Compressão Axial Corrigida (MPa)	Resistência Média (MPa)
Referência	1	37,30	0,95	35,44	36,96
	2	39,10	0,95	37,15	
	3	40,30	0,95	38,29	
20% de Agregado Reciclado	1	40,40	0,95	38,38	37,24
	2	41,10	0,95	39,05	
	3	36,10	0,95	34,30	
40% de Agregado Reciclado	1	45,20	0,95	42,94	42,09
	2	43,70	0,95	41,52	
	3	44,00	0,95	41,80	
60% de Agregado Reciclado	1	46,80	0,95	44,46	45,13
	2	49,20	0,95	46,74	
	3	46,50	0,95	44,18	
80% de Agregado Reciclado	1	51,80	0,95	49,21	49,59
	2	54,30	0,95	51,59	
	3	50,50	0,95	47,98	
100% de Agregado Reciclado	1	51,90	0,95	49,31	50,45
	2	53,80	0,95	51,11	
	3	53,60	0,95	50,92	

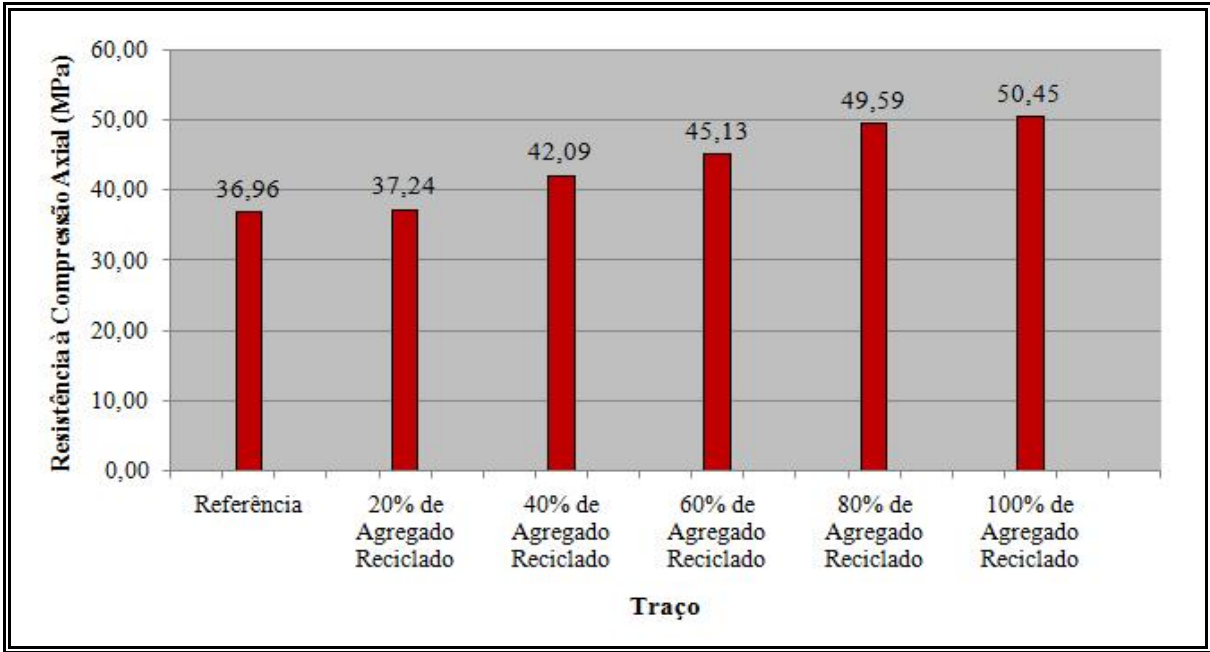


Figura 30: Resistência à compressão axial em peças retangulares.

5.1.4 *Análise dos resultados dos ensaios para os traços com teores de substituição do agregado miúdo*

O principal objetivo da confecção dos traços, e posterior moldagem dos corpos-de-prova a serem ensaiados, com teores crescentes de substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado de concreto é analisar o comportamento destas famílias de concreto, tanto para as características do concreto em seu estado fresco como para o desempenho do mesmo em seu estado endurecido, confrontando-se ainda tais informações com os dados referentes à dosagem para cada um dos traços, podendo-se assim embasar a determinação do teor ótimo de substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado de concreto.

Analizando-se inicialmente os resultados apresentados até então no presente capítulo referentes aos ensaios realizados no concreto em seu estado endurecido, em específico o ensaio de resistência à compressão axial em corpos-de-prova cilíndricos, observa-se que todos os traços com teores de adição de agregado reciclado obtiveram resultados de compressão axial superiores aos encontrados para o traço de referência, fato este observado em todas as idades a que foram ensaiados os corpos-de-prova. Também se pode visualizar com clareza na figura 28 uma tendência ao crescimento da resistência à compressão axial nos corpos-de-prova relacionada ao aumento da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado de concreto.

Nos ensaios destinados à determinação do módulo de elasticidade, ocorre fenômeno semelhante ao descrito anteriormente, ou seja, todos os traços com adição de agregado reciclado de concreto apresentaram resultados superiores ao traço de referência, apresentando também um crescimento nos valores obtidos para o módulo de elasticidade, relacionados ao crescente aumento da incorporação de agregado reciclado de concreto nos referidos traços, fato este bastante coerente, isto é, o crescimento nos valores de resistência à compressão axial foi acompanhado de conseqüente aumento nos valores referentes ao módulo de elasticidade.

Já nos ensaios de compressão axial em peças retangulares de concreto, não deixou de se observar valores mais elevados para os traços com adição de agregado reciclado de concreto, comportamento semelhante ao encontrado nos corpos-de-prova cilíndricos, porém deve-se destacar a relativa diferença de valores obtidos na idade de 28 dias entre os corpos-de-prova cilíndricos e as PPC retangulares, sendo que estas últimas apresentaram valores menores em comparação aos mesmos traços a que foram moldados os corpos-de-prova cilíndricos. Isto pode ser explicado pelo fato que os corpos-de-prova cilíndricos foram

moldados utilizando-se a mesa vibratória para melhor acomodação das camadas de concreto, já as peças retangulares de concreto, como já relatado anteriormente, apresenta proposta de moldagem manual sem o auxílio de processos de adensamento mecânicos, sendo assim, estas foram moldadas lançando-se o concreto e utilizando-se apenas uma espátula na acomodação das camadas de concreto.

Após as análises e observações relatadas poder-se-ia concluir que o teor ótimo de substituição do agregado miúdo natural seria o de 100%, ou seja, substituindo de maneira integral o agregado miúdo natural por agregado reciclado de concreto, porém para que esta conclusão não seja precipitada e provida de erros, ainda se faz necessário analisar as características do concreto em seu estado fresco para os traços estudados bem como os dados de dosagem referentes à confecção dos referidos traços.

Avaliando-se as propriedades do concreto em seu estado fresco, dados estes apresentados nas tabelas 15 e 16 do capítulo anterior, constatam-se pequenas variações nos valores obtidos tanto para o traço de referência como para os traços com teores de adição de agregado reciclado, podendo-se destacar os valores de consistência obtidos nos ensaios de abatimento do tronco de cone (*slump test*), estando estes dentro dos valores pré-estabelecidos de 170 ± 20 mm.

Já os dados referentes à dosagem dos traços objetos de estudo, como já dito anteriormente, foram fixados o consumo de cimento e a relação água cimento variando-se apenas o consumo de aditivo superplastificante visando manter os requisitos de consistência estabelecidos, visto que o aumento da incorporação do agregado reciclado de concreto demandaria um aumento na quantidade da água de amassamento por apresentar valor mais elevado de absorção se comparado com o encontrado para o agregado miúdo natural. Sendo assim, observa-se um crescimento no consumo de aditivo relacionado ao aumento da incorporação de agregado reciclado de concreto, enfatizando-se ainda, que tanto para o traço com substituição de 80% do agregado miúdo natural como para o traço com teor de substituição de 100% obteve-se um consumo de superplastificante da ordem de 1,1% e 1,4% sobre a massa de cimento respectivamente, consumo este superior ao estipulado pelo fabricante de 1,0% para concretos plásticos.

Portanto, a partir das análises apresentadas foram descartados os teores de 80% e 100% de substituição, visto que, apesar destes apresentarem melhores resultados nos ensaios tanto de compressão axial como o de módulo de elasticidade em comparação aos demais traços, demandaram um consumo de aditivo superplastificante acima do limite estabelecido pelo fabricante e relativamente alto em comparado aos demais traços, fato este que

ocasionaria custos mais elevados e possíveis problemas como retrações e fissuras no concreto em seu estado endurecido, para os referidos traços. Logo, o teor de substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado de concreto eleito como teor ótimo foi o de 60%, por apresentar melhores resultados nos ensaios de compressão axial e módulo de elasticidade em comparado aos traços com teores de substituição inferiores, demandando ainda um consumo de aditivo superplastificante dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante.

5.2 Resultados dos ensaios para os traços de referência e teor ótimo

Tendo-se definido o teor ótimo de substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado de concreto foram moldados corpos-de-prova tanto para o traço de referência como para o traço com teor ótimo de substituição, buscando-se avaliar a interferência que a adição de agregado reciclado de concreto provocaria nas propriedades do concreto endurecido e ainda avaliando as interferências entre diferentes geometrias e espessuras para as peças pré-moldadas de concreto, sendo assim, apresenta-se a seguir os resultados obtidos nos ensaios realizados em tais corpos-de-prova.

5.2.1 Ensaios de compressão axial em PPC de diferentes geometrias e espessuras

Nas tabelas 27 a 34 encontram-se expostos os resultados dos ensaios de compressão axial realizados nas peças de concreto retangulares e hexagonais, ambas as geometrias com espessuras de 3 cm e 6 cm, tanto para traço de referência bem como para o traço com teor ótimo de substituição de 60% do agregado miúdo natural por agregado reciclado de concreto.

Entretanto, com base nos resultados dos ensaios de compressão axial das peças de concreto expostos na sequência foram construídos dois gráfico na forma de colunas, de modo a agrupar tais resultados de acordo com a espessura das peças ensaiadas, facilitando sobremaneira a visualização dos resultados, sendo que o primeiro gráfico apresenta os resultados referentes às peças retangulares e o segundo refere-se às peças com geometria hexagonal, estando estes apresentados nas figuras 31 e 32 respectivamente.

Tabela 27: Resultados dos ensaios de compressão axial em Peças Retangulares de 6 cm de espessura para o traço de referência.

Traço De Referência - Peça Retangular de 6 cm de espessura	Idade de Ruptura	7 dias				28 dias			
	Corpo-de-prova	1	2	3	4	1	2	3	4
	Resistência à Compressão Axial (MPa)	38,20	38,50	39,30	39,60	43,00	40,90	40,30	39,30
	Fator Multiplicador "ρ"	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
	Resistência à Compressão Axial Corrigida (MPa)	36,29	36,58	37,34	37,62	40,85	38,86	38,29	37,34
	Resistência Média Corrigida (MPa)	36,96				38,83			
	Desvio Padrão (MPa)	0,54				1,29			
	Coefficiente de Variação	1,47				3,31			

Tabela 28: Resultados dos ensaios de compressão axial em Peças Retangulares de 6 cm de espessura para o traço com 60% de agregado miúdo reciclado.

Traço com 60% de Agregado Reciclado - Peça Retangular de 6 cm de espessura	Idade de Ruptura	7 dias				28 dias			
	Corpo-de-prova	1	2	3	4	1	2	3	4
	Resistência à Compressão Axial (MPa)	41,10	45,60	37,40	42,90	48,90	52,50	51,20	44,00
	Fator Multiplicador "ρ"	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
	Resistência à Compressão Axial Corrigida (MPa)	39,05	43,32	35,53	40,76	46,46	49,88	48,64	41,80
	Resistência Média Corrigida (MPa)	39,66				46,69			
	Desvio Padrão (MPa)	2,83				3,08			
	Coefficiente de Variação	7,13				6,59			

Tabela 29: Resultados dos ensaios de compressão axial em Peças Retangulares de 3 cm de espessura para o traço de referência.

Traço De Referência - Peça Retangular de 3 cm de espessura	Idade de Ruptura	7 dias				28 dias			
	Corpo-de-prova	1	2	3	4	1	2	3	4
	Resistência à Compressão Axial (MPa)	41,30	48,30	39,70	42,60	44,00	57,90	41,30	65,70
	Fator Multiplicador "ρ"	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875
	Resistência à Compressão Axial Corrigida (MPa)	36,14	42,26	34,74	37,28	38,50	50,66	36,14	57,49
	Resistência Média Corrigida (MPa)	37,60				45,70			
	Desvio Padrão (MPa)	2,84				8,76			
	Coefficiente de Variação	7,54				19,17			

Tabela 30: Resultados dos ensaios de compressão axial em Peças Retangulares de 3 cm de espessura para o traço com 60% de agregado miúdo reciclado.

Traço com 60% de Agregado Reciclado - Peça Retangular de 3 cm de espessura	Idade de Ruptura	7 dias				28 dias			
	Corpo-de-prova	1	2	3	4	1	2	3	4
	Resistência à Compressão Axial (MPa)	51,70	46,50	50,50	57,60	74,00	59,40	68,80	59,10
	Fator Multiplicador "ρ"	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875
	Resistência à Compressão Axial Corrigida (MPa)	45,24	40,69	44,19	50,40	64,75	51,98	60,20	51,71
	Resistência Média Corrigida (MPa)	45,13				57,16			
	Desvio Padrão (MPa)	3,48				5,55			
	Coefficiente de Variação	7,71				9,72			

Tabela 31: Resultados dos ensaios de compressão axial em Peças Hexagonais de 6 cm de espessura para o traço de referência.

Traço De Referência - Peça Hexagonal de 6 cm de espessura	Idade de Ruptura	7 dias				28 dias			
	Corpo-de-prova	1	2	3	4	1	2	3	4
	Resistência à Compressão Axial (MPa)	37,80	38,30	39,90	37,30	39,60	37,80	42,90	42,10
	Fator Multiplicador "ρ"	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
	Resistência à Compressão Axial Corrigida (MPa)	35,91	36,39	37,91	35,44	37,62	35,91	40,76	40,00
	Resistência Média Corrigida (MPa)	36,41				38,57			
	Desvio Padrão (MPa)	0,93				1,92			
	Coefficiente de Variação	2,55				4,98			

Tabela 32: Resultados dos ensaios de compressão axial em Peças Hexagonais de 6 cm de espessura para o traço com 60% de agregado miúdo reciclado.

Traço com 60% de Agregado Reciclado - Peça Hexagonal de 6 cm de espessura	Idade de Ruptura	7 dias				28 dias			
	Corpo-de-prova	1	2	3	4	1	2	3	4
	Resistência à Compressão Axial (MPa)	39,20	40,10	39,20	36,60	37,80	46,50	39,50	43,50
	Fator Multiplicador "ρ"	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
	Resistência à Compressão Axial Corrigida (MPa)	37,24	38,10	37,24	34,77	35,91	44,18	37,53	41,33
	Resistência Média Corrigida (MPa)	36,84				39,73			
	Desvio Padrão (MPa)	1,24				3,23			
	Coefficiente de Variação	3,37				8,13			

Tabela 33: Resultados dos ensaios de compressão axial em Peças Hexagonais de 3 cm de espessura para o traço de referência.

Traço De Referência - Peça hexagonal de 3 cm de espessura	Idade de Ruptura	7 dias				28 dias			
	Corpo-de-prova	1	2	3	4	1	2	3	4
	Resistência à Compressão Axial (MPa)	63,80	48,10	49,20	54,30	66,80	49,40	45,80	56,40
	Fator Multiplicador "ρ"	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875
	Resistência à Compressão Axial Corrigida (MPa)	55,83	42,09	43,05	47,51	58,45	43,23	40,08	49,35
	Resistência Média Corrigida (MPa)	47,12				47,78			
	Desvio Padrão (MPa)	5,43				7,01			
	Coeficiente de Variação	11,52				14,67			

Tabela 34: Resultados dos ensaios de compressão axial em Peças Hexagonais de 3 cm de espessura para o traço com 60% de agregado miúdo reciclado.

Traço com 60% de Agregado Reciclado - Peça Hexagonal de 3 cm de espessura	Idade de Ruptura	7 dias				28 dias			
	Corpo-de-prova	1	2	3	4	1	2	3	4
	Resistência à Compressão Axial (MPa)	54,00	58,20	54,80	53,60	65,10	54,60	59,60	57,20
	Fator Multiplicador "ρ"	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875
	Resistência à Compressão Axial Corrigida (MPa)	47,25	50,93	47,95	46,90	56,96	47,78	52,15	50,05
	Resistência Média Corrigida (MPa)	48,26				51,73			
	Desvio Padrão (MPa)	1,59				3,39			
	Coeficiente de Variação	3,29				6,56			

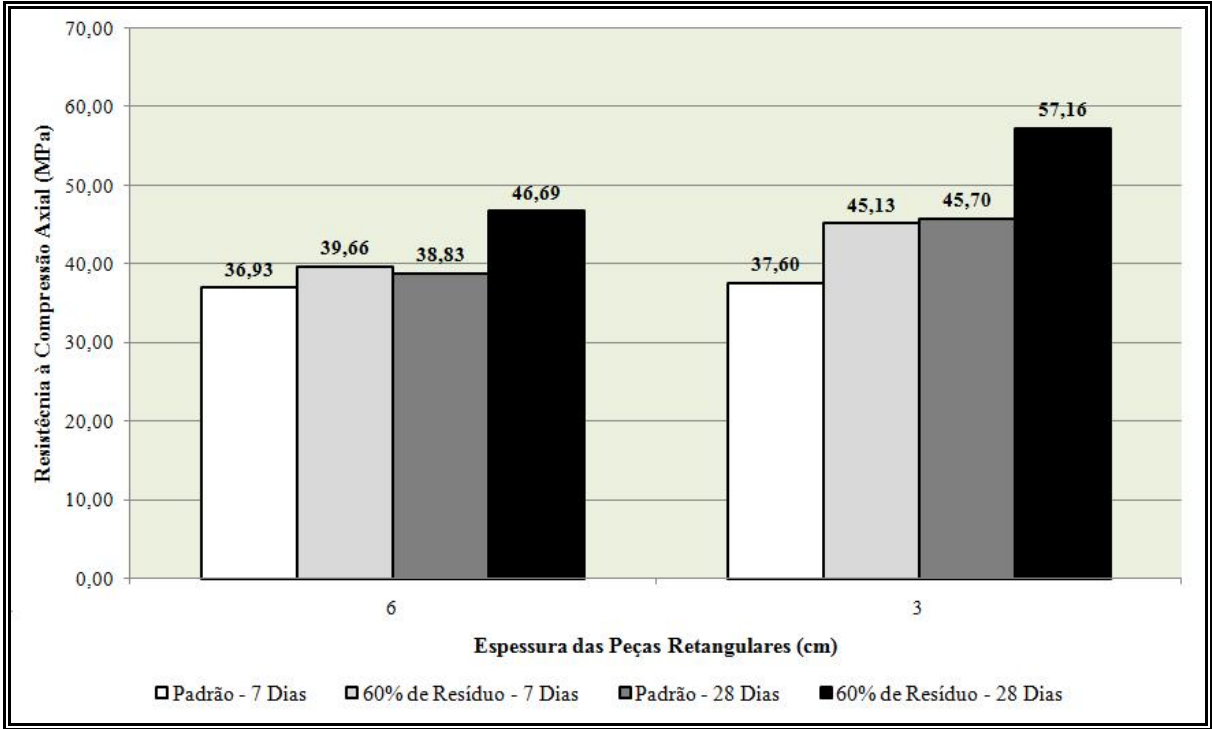


Figura 31: Resistência à compressão axial em peças retangulares.

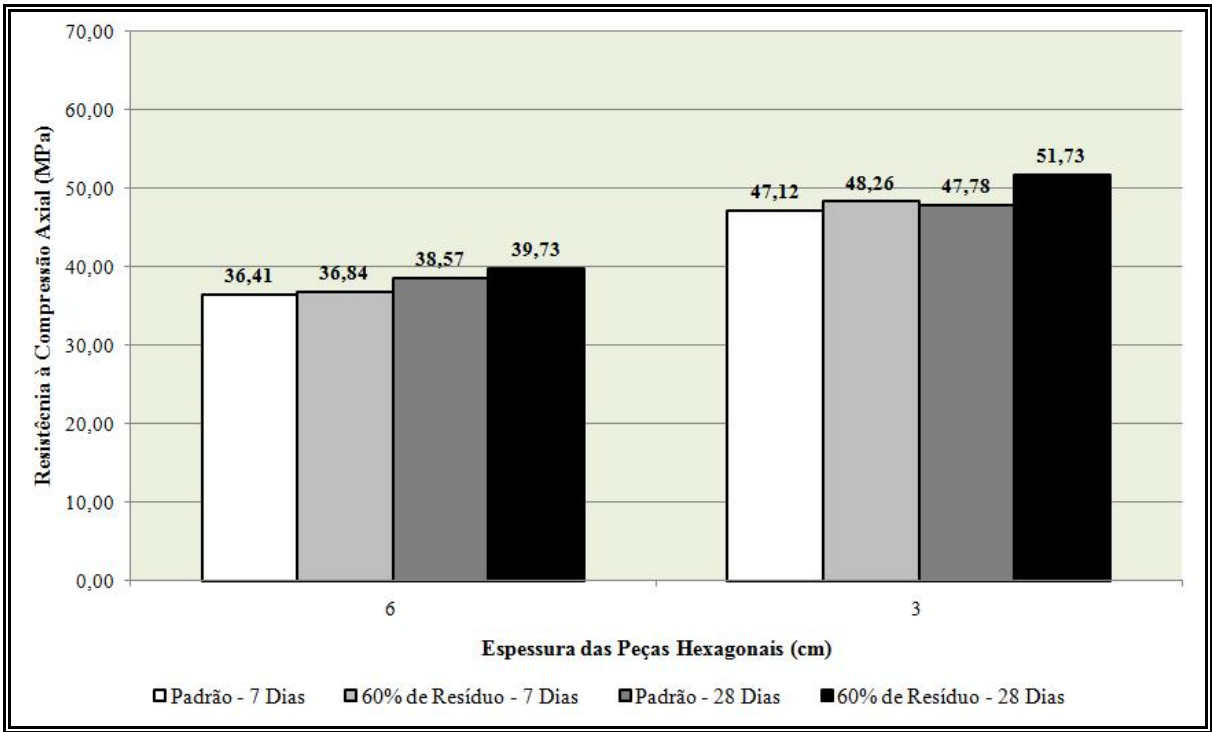
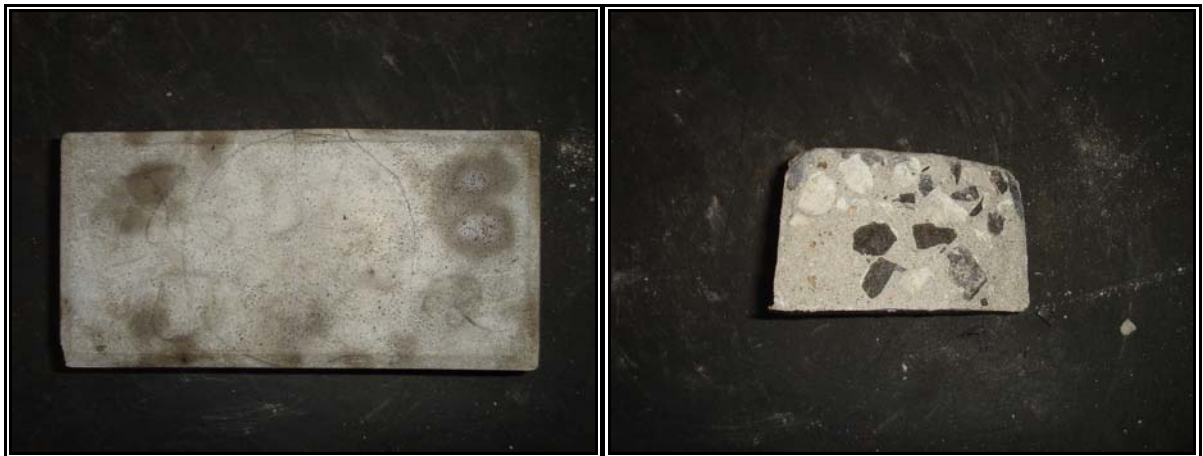


Figura 32: Resistência à compressão axial em peças hexagonais.

As figuras 33 e 34 apresentam as peças retangulares de 6 cm e 3 cm respectivamente logo após serem rompidos, tanto para o traço de referência como para o traço com a adição de 60% de agregado reciclado, já as figuras 35 e 36 demonstram as peças hexagonais de 6 cm e 3 cm após a ruptura, também para ambos os traços.



(a)



(b)

Figura 33: Peças retangulares de 6 cm de espessura logo após a ruptura.

(a) Peça retangular de 6 cm de espessura para o traço de referência.

(b) Peça retangular de 6 cm de espessura para o traço com 60% de agregado reciclado.



(a)



(b)

Figura 34: Peças retangulares de 3 cm de espessura logo após a ruptura.

(a) Peça retangular de 3 cm de espessura para o traço de referência.

(b) Peça retangular de 3 cm de espessura para o traço com 60% de agregado reciclado.



(a)



(b)

Figura 35: Peças hexagonais de 6 cm de espessura logo após a ruptura.

(a) Peça hexagonal de 6 cm de espessura para o traço de referência.

(b) Peça hexagonal de 6 cm de espessura para o traço com 60% de agregado reciclado.

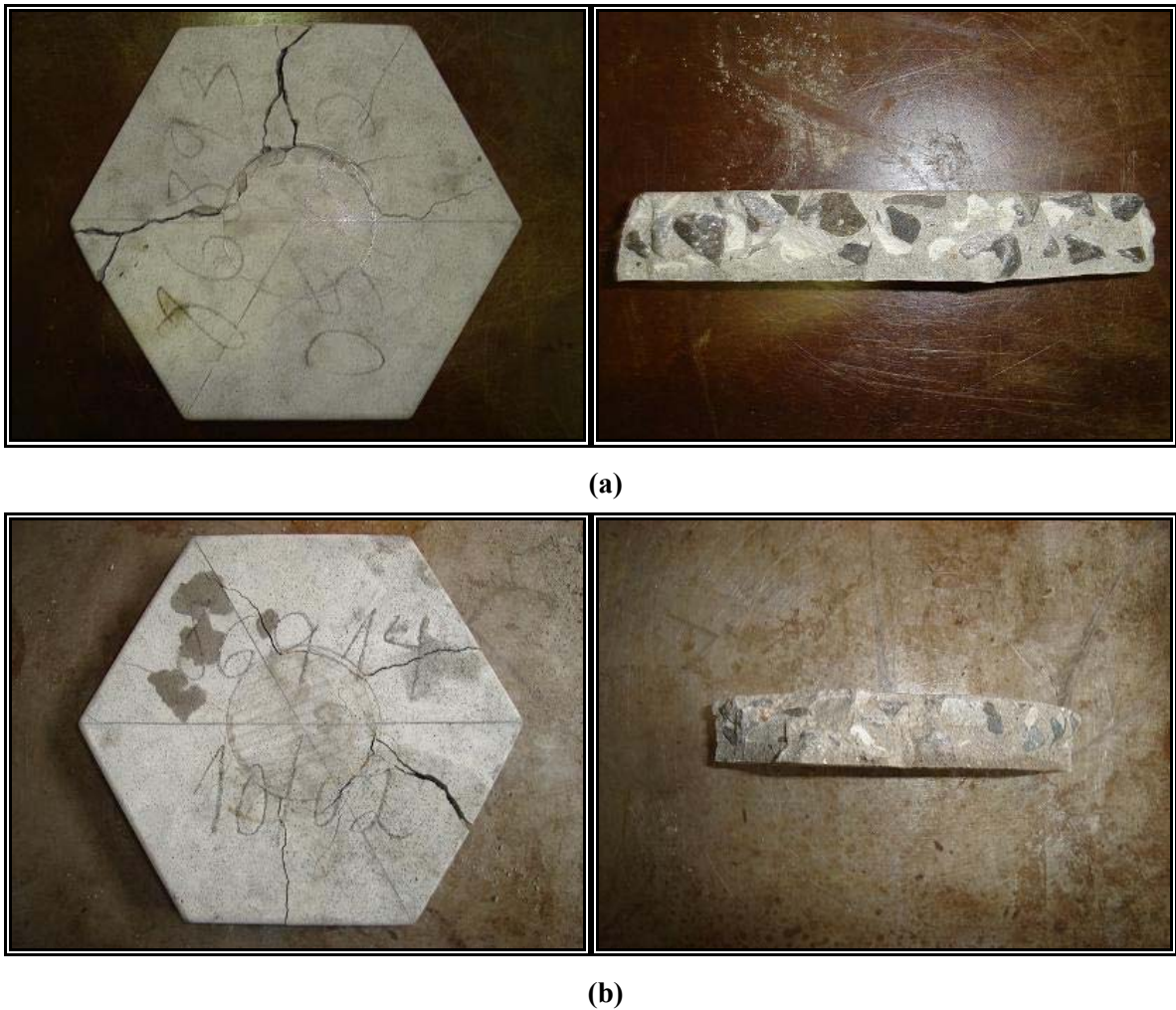


Figura 36: Peças hexagonais de 3 cm de espessura logo após a ruptura.

(a) Peça hexagonal de 3 cm de espessura para o traço de referência.

(b) Peça hexagonal de 3 cm de espessura para o traço com 60% de agregado reciclado.

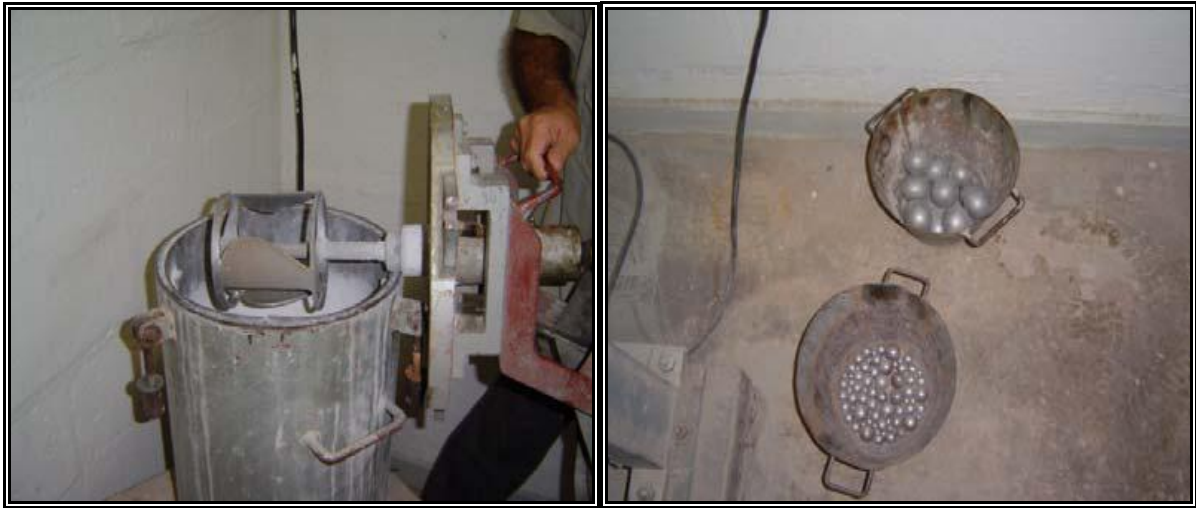
5.2.2 Ensaios de desgaste por abrasão

Os ensaios de desgaste por abrasão seguem procedimento adotado pela CESP baseado em um relatório do *U. S. Corps of Engineers* intitulado “*Abrasion – Erosion Resistance of Concrete*”, que consiste essencialmente de um motor elétrico, uma pá de agitação e um recipiente cilíndrico de aço para conter o corpo-de-prova a ser ensaiado.

O sistema motor, correia e roldanas é dimensionado para manter a pá de agitação a 1200rpm, durante todo o período de ensaio. A carga abrasiva é composta por bolas metálicas. Os corpos-de-prova são de formato cilíndrico, com 30 cm de diâmetro e 10 cm de altura. O desgaste é calculado pela perda de massa em termos do peso inicial, sendo o corpo-de-prova

pesado antes e após os ciclos de 10, 24, 48 e 72 horas. Na figura 37(a) pode ser visto detalhe da pá de agitação, já a figura 37(b) é possível visualizar as esferas metálicas utilizadas durante realização do ensaio.

Os resultados obtidos nos ensaios de desgaste por abrasão, realizados nos corpos-de-prova cilíndricos de 30 cm de diâmetro por 10 cm de altura, tanto para o traço de referência como para o traço com a adição de 60% de agregado reciclado, encontram-se expostos nas tabelas 35 e 36 respectivamente.



(a)

(b)

Figura 37: Equipamentos utilizados para realização dos ensaios de desgaste por abrasão.

(a) Detalhe da pá de agitação do equipamento.

(b) Esferas metálicas utilizadas durante realização do ensaio.

Tabela 35: Resultados dos ensaios de desgaste por abrasão para o traço de referência.

Traço De Referência		Idade de Ruptura		7 dias			28 dias		
		Corpo-de-Prova		1	2	Média	1	2	Média
		Massa (kg)	Inicial	16,590	15,720	16,155	16,350	15,970	16,160
			Após 10 horas	16,270	15,390	15,830	15,860	15,380	15,620
			Após 24 horas	15,780	14,940	15,360	15,520	14,860	15,190
			Após 48 horas	15,300	14,820	15,060	15,180	14,340	14,760
			Após 72 horas	14,870	14,080	14,475	14,960	14,090	14,525
			Δ m (kg)	1,720	1,640	1,680	1,390	1,880	1,635
Δ m (%)	10,37	10,43	10,40	8,50	11,77	10,14			

Tabela 36: Resultados dos ensaios de desgaste por abrasão para o traço com adição de 60% de agregado reciclado.

Traço com 60% de Agregado Reciclado		Idade de Ruptura		7 dias			28 dias		
		Corpo-de-Prova		1	2	Média	1	2	Média
		Massa (kg)	Inicial	16,310	16,110	16,210	16,220	15,990	16,105
			Após 10 horas	16,020	15,640	15,830	15,970	15,680	15,825
			Após 24 horas	15,810	15,420	15,615	15,810	15,380	15,595
			Após 48 horas	15,540	15,120	15,330	15,480	14,980	15,230
			Após 72 horas	15,080	14,830	14,955	15,110	14,740	14,925
Δ m (kg)	1,230		1,280	1,255	1,110	1,250	1,180		
		Δ m (%)	7,54	7,95	7,74	6,84	7,82	7,33	

A partir dos resultados acima apresentados para os ensaios de desgaste por abrasão, construiu-se um gráfico do tipo dispersão de modo a apresentar a variação da perda de massa, agrupando assim os valores obtidos tanto para o traço de referência como para o traço com adição de 60% de agregado reciclado, ambos para as idades de 7 e 28 dias, estando este exposto na figura 38.

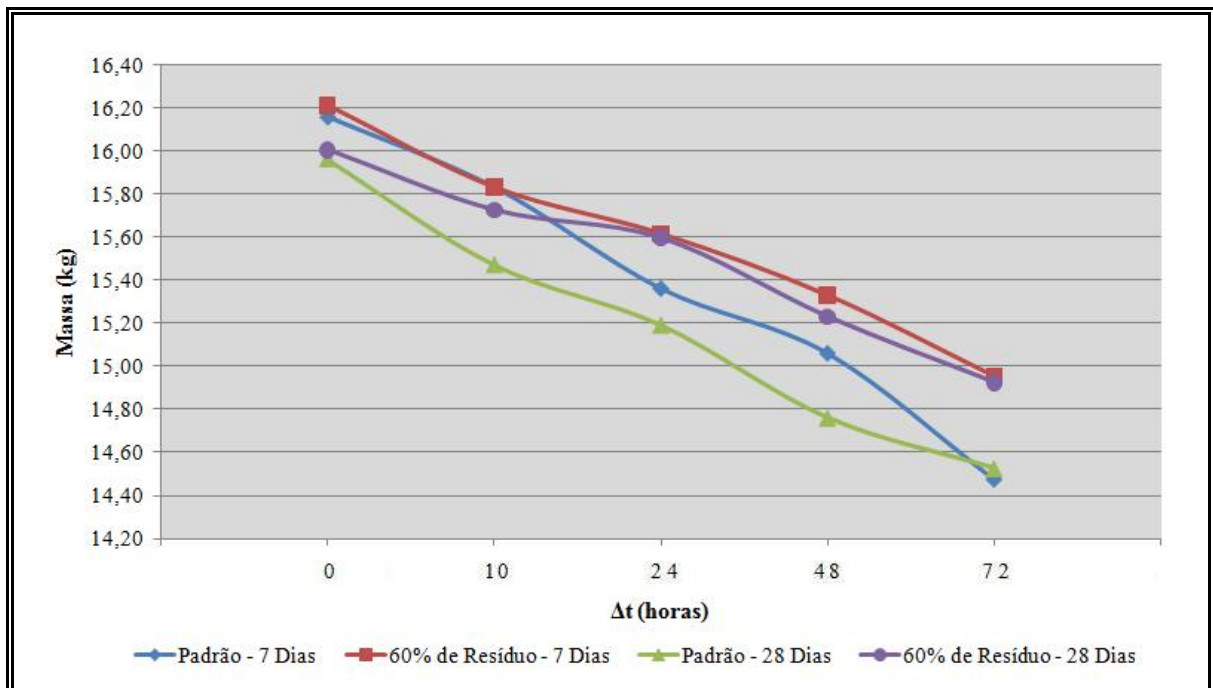


Figura 38: Curvas de desgaste por abrasão para os traços de referência e 60% de agregado reciclado.

As figuras 39 e 40 ilustram os corpos-de-prova cilíndricos de 30 cm de diâmetro por 10 cm de altura, tanto para o traço de referência como para o traço com adição de 60% de agregado reciclado, logo após serem submetidos ao ensaio de desgaste por abrasão, podendo-se assim visualizar as superfícies, para ambos os casos, após sofrerem o processo abrasivo.



Figura 39: Corpo-de-Prova para o traço de referência logo após o ensaio de desgaste por abrasão.



Figura 40: Corpo-de-Prova para o traço com 60% de agregado reciclado logo após o ensaio de desgaste por abrasão.

5.2.3 Ensaios de absorção de água por imersão

Os ensaios destinados à determinação da absorção de água por imersão para os corpos-de-prova moldados a partir do traço de referência e do traço com adição de 60% de agregado reciclado de concreto foram realizados seguindo-se os preceitos descritos na NBR 9778 (ABNT, 1987b), de tal forma, que os resultados objeto de tais ensaios encontram-se expostos na tabela 37 a seguir.

Tabela 37: Resultados dos ensaios de absorção de água por imersão.

Traço	Referência			60% de resíduo		
Corpo-de-prova	1	2	3	1	2	3
Mi (g)	3765,30	3750,70	3750,90	3730,10	3785,20	3720,60
Ms (g)	3584,90	3572,20	3574,20	3530,90	3587,40	3520,80
Msat (g)	3694,20	3679,30	3691,30	3675,80	3734,10	3661,00
Absorção (%)	3,05	3,00	3,28	4,10	4,09	3,98
Absorção Média (%)	3,11			4,06		

5.2.4 *Análise dos resultados dos ensaios comparativos entre os traços de referência e teor ótimo*

O presente tópico busca apresentar uma análise comparativa de desempenho entre os resultados dos ensaios realizados tanto para o traço de referência como para o traço com substituição de 60% do agregado miúdo natural por agregado reciclado de concreto, resultados estes expostos nos itens 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3.

- Ensaios de Compressão Axial em PPC de Diferentes Geometrias e Espessuras

A partir dos dados obtidos nos ensaios e analisando-se o tratamento estatístico efetuado, percebe-se que o coeficiente de variação dos resultados foi pequeno, sendo que em média este apresentou valor da ordem de 7,35%, porém é notado também que o coeficiente de variação apresentou valores mais elevados para as peças com 3 cm de espessura, em média 10,02%, já para as peças com 6 cm de espessura a média foi de 4,69%, podendo-se assim afirmar que as peças ensaiadas obtiveram pouca variância em seus resultados como esperado, já que as peças foram moldadas, curadas e ensaiadas da mesma maneira e tomando-se os mesmos cuidados de modo a garantir a coerência nos resultados.

Analisando os resultados obtidos nos ensaios de compressão axial, visualizados de forma sucinta nos gráficos apresentados nas figuras 31 e 32 nota-se que as peças ensaiadas referentes ao traço com adição de 60% de agregado reciclado obtiveram resultados superiores às peças moldadas a partir do traço de referência, fato este observado tanto para as diferentes espessuras como para as variações de geometria dos mesmos, resultados estes que mantiveram a coerência encontrada nos ensaios realizados em corpos-de-prova cilíndricos com teores de substituição crescente do agregado miúdo natural por agregado reciclado de concreto, onde se pode notar o aumento na resistência à compressão axial nos traços com adição de agregado reciclado em comparados ao traço de referência.

Quanto à variação de espessura das peças de concreto, se torna bastante nítido a consistente diferença entre os resultados obtidos para as peças de 6 cm de espessura e as peças de 3 cm de espessura, sendo que estas últimas apresentaram resistência à compressão axial em média 21,30% superior as peças de concreto de 6 cm de espessura, porém como dito anteriormente as peças de 3 cm de espessura obtiveram um coeficiente de variação dos

resultados mais elevado que as peças de 6 cm, tais resultados possivelmente estão relacionados ao fato do agregado graúdo estar enquadrado na faixa granulométrica de $\Phi_{\text{Max}} = 25$ mm, portanto para as peças com espessura igual a 3 cm apresentaria uma área menor de interface entre o agregado graúdo e a argamassa de cimento ocasionando um aumento na resistência à compressão axial e ainda uma maior variação nos resultados obtidos.

Na análise relativa à variação de geometria das peças de concreto, os valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial para as peças de geometria hexagonal e retangular, apresentaram variação que pode se considerar irrelevante, ou seja, as peças de formato retangular obtiveram resistências, em média 0,36% superiores as obtidas para as peças hexagonais. Observando as fotos apresentadas nas figuras 33 a 36 é notado que tanto para as peças retangulares como as hexagonais a ruptura se dá a partir do surgimento de trincas e fissuras que despontam do círculo central efetivamente comprimindo pelas chapas auxiliares de ensaio para as extremidades da peça, logo o que poderia se supor é um aumento da resistência à compressão nas peças hexagonais por apresentarem uma maior área envolvendo o círculo central conseqüentemente um maior volume de concreto em comparação as peças retangulares, o que de fato não ocorreu como já relatado anteriormente.

- Ensaios de Desgaste por abrasão

Nos resultados apresentados para os ensaios de desgaste por abrasão em corpos-de-prova cilíndricos de 30 cm de diâmetro por 10 cm de altura, analisando o gráfico da figura 37 é possível notar que os corpos-de-prova tanto para o traço de referência como para o traço com teor de substituição de 60% do agregado miúdo natural por agregado reciclado de concreto partem de massas iniciais bastante próximas, porém decorridas às 72 horas de ensaio os corpos-de-prova referentes ao traço de referência demonstram maiores perdas de massa, resultando um desgaste por abrasão médio da ordem de 10,27% contra 7,54% dos corpos-de-prova moldados a partir do traço com adição de 60% de agregado reciclado de concreto.

Observando as fotos expostas nas figuras 38 e 39 relativas aos corpos-de-prova logo após o término do ensaio de desgaste por abrasão, é de grande clareza as diferenças visuais entre o corpo-de-prova referente ao traço padrão e o moldado a partir do traço com adição de 60% de agregado reciclado de concreto, sendo que o CP referente ao traço padrão por apresentar um maior desgaste por abrasão culminou na notável exposição do agregado graúdo, já o CP referente ao traço com adição de 60% de agregado reciclado a camada de

argamassa resistiu de forma mais satisfatória ao ensaio abrasivo podendo-se observar a pouca exposição do agregado graúdo.

- Ensaio de Absorção de Água por Imersão

Com base nos resultados apresentados na tabela 37 é possível verificar que os corpos-de-prova relativos ao traço com adição de 60% de agregado reciclado obtiveram um índice de absorção média de 4,06%, absorção esta superior ao índice de 3,11% relativo ao traço de referência, logo se pode concluir que adição de agregado reciclado ao concreto aumentou a absorção de água por imersão, podendo este estar possivelmente relacionado ao fato do resíduo de concreto apresentar uma maior absorção em comparação aquela apresentada pela areia natural.

Capítulo 6

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

Os ensaios de caracterização realizados tanto para o agregado miúdo natural como para o agregado reciclado de concreto mostraram que para este último a distribuição granulométrica apresenta uma maior proporcionalidade entre as porcentagens retidas nas diferentes peneiras, podendo-se observar que a curva da distribuição granulométrica para este enquadra-se na faixa de especificação tido como zona ótima de utilização, já o agregado miúdo natural apresentou uma curva de distribuição granulométrica fora das especificações tidas como ótima, sendo delimitada pela zona utilizável.

A melhor distribuição granulométrica apresentada pelo agregado reciclado de concreto possui influência direta nos resultados obtidos, de tal forma pode-se observar que aumento crescente da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado de concreto culminou no proporcional crescimento da resistência à compressão axial e do módulo de elasticidade nos corpos-de-prova ensaiados, pois de acordo com a literatura quando a distribuição granulométrica do agregado miúdo se enquadra na zona ótima de utilização promove-se uma argamassa com menor índice de vazios, gerando conseqüentemente um concreto mais coeso, e claro, uma melhoria em suas propriedades mecânicas em seu estado endurecido.

Ainda observando-se os ensaios de caracterização dos materiais é possível verificar que o agregado miúdo reciclado de concreto apresentou uma absorção percentual cerca de 14 vezes maior em comparada ao valor obtido para o agregado miúdo natural, logo para os traços com teores crescentes de substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado de concreto crescia a demanda por água de amassamento da mistura, porém como se optou por manter fixa a quantidade de água tal demanda foi suprimida com o aumento na incorporação do aditivo superplastificante, a fim de manter as condições de trabalhabilidade do concreto fresco em valores previamente estabelecidos que dispensassem a utilização de processos mecânicos na fabricação das peças de concreto.

A pesquisa em questão versa como principal objetivo uma análise comparativa entre o comportamento mecânico das peças pré-moldadas de concreto fabricadas a partir do traço de referência e do traço com teor de substituição ótimo do agregado miúdo natural por agregado reciclado de concreto, sendo assim, após analisar os resultados obtidos observa-se que para ambos os traços as peças obtiveram resistências à compressão axial superiores aos 35 MPa estabelecido pela NBR 9781, sendo que o traço com adição de 60% de agregado reciclado de concreto apresentou resistências mais elevadas em comparado ao traço de referência e em média 39,50% superior aos 35 MPa estabelecidos pela norma, já os ensaios relativos ao desgaste por abrasão também demonstraram superioridade para os corpos-de-prova moldados a partir do traço com 60% de agregado reciclado, porém as normas brasileiras referentes às peças de concreto destinadas à pavimentação intertravada não estabelecem valores limites para os ensaios de desgaste por abrasão.

No que diz respeito aos estudos comparativos entre as diferentes geometrias e espessuras das peças de concreto se observa resistências mais elevadas para as peças de 3 cm de espessura em comparadas as de 6 cm de espessura e valores bem próximos quando se compara as peças de geometria retangular com as hexagonais, porém não se pode simplesmente concluir que a utilização das peças de 3 cm de espessura ou de determinada geometria é mais apropriada em todos os casos, pois esta pesquisa apresentou estudos comparativos entre as peças pré-moldadas de maneira isoladas, logo seria conveniente em estudos futuros avaliar o comportamento das mesmas de forma a compor o pavimento intertravado, de maneira a verificar a influência da espessura e da geometria no conjunto como um todo.

O emprego do agregado miúdo reciclado de concreto, proveniente de blocos de alvenaria, na produção de novos concretos destinados à confecção de peças pré-moldadas para a pavimentação intertravada, de acordo com os testes realizados, mostra-se uma alternativa bastante viável e muito promissora, visto que a adição do agregado miúdo reciclado de concreto acarretou melhorias no comportamento mecânico do concreto em seu estado endurecido e ainda demandando um consumo de aditivo superplastificante dentro de limites estabelecidos pelo fabricante. Porém é necessário destacar que os blocos de concreto para alvenaria certamente apresentam composições distintas, dependendo do método produtivo, da região em que estes foram confeccionados, ou seja, dos materiais utilizados na composição dos mesmos, fato este que pode acarretar mudanças significativas no comportamento do concreto confeccionado a partir de agregados reciclados provenientes de tais blocos.

6.2 Propostas para trabalhos futuros

Como proposta de continuidade dos estudos realizados e aqui expostos, com a finalidade de aprofundar o embasamento e viabilizar a utilização de resíduos de concreto na produção de novos concretos e conseqüente aplicação em peças pré-moldadas destinadas à pavimentação intertravada, novos estudos deverão ser realizados de modo a avaliar principalmente o comportamento estrutural das peças pré-moldadas de concreto confeccionadas a partir do traço com adição de agregado reciclado de concreto:

- Buscar novas alternativas na realização do estudo de dosagem visando aprimorá-lo, de modo a se obter um traço com o teor ótimo de substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado de concreto que acarrete em resistências à compressão axial mais próximas de 35 MPa, gerando um menor consumo de cimento e tornando a alternativa ainda mais atraente do ponto de vista econômico;

- Além dos ensaios de desgaste por abrasão, realizados neste trabalho, seria de grande interesse realizar ensaios de absorção de impacto pelo concreto com adição de agregado reciclado, por se tratar de uma proposta de aplicação em pavimentos, ou seja, estruturas continuamente submetidas aos esforços impactantes;

- Executar um trecho de pavimento intertravado experimental com peças pré-moldadas, confeccionadas a partir do traço que apresenta o teor ótimo de substituição, com a finalidade de realizar ensaios de resistência e durabilidade, podendo-se assim avaliar o desempenho real da estrutura, e ainda avaliar a micro-drenagem no trecho experimental e poder compará-la com valores obtidos em pavimentos intertravados com peças produzidas a partir de concretos sem adição de agregados reciclados;

- Diversificar as fontes de extração do resíduo de concreto proporcionando a obtenção de subsídios que justifiquem a busca pela crescente necessidade de se absorver a interminável quantidade de resíduos de construção e demolição continuamente gerados, culminando na minimização dos impactos ambientais tanto pelo reaproveitamento de tais materiais como na conseqüente redução da exploração de áreas destinadas a extração de agregados naturais.

REFERÊNCIAS

AGOPYAN, V. Prefácio da versão em língua portuguesa. In: **CIB – Agenda 21 para a construção sustentável**. São Paulo: [s.n.], 2000. p. 3-6.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 116 R-90 – Cement and concrete terminology**: ACI manual of concrete practice. Detroit, 1994b. Part 1: materials and general properties of concrete.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. 236 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ANGULO, S. C. et al. Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem maciça de RCD. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 5., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON/IPEN, 2002. p. 293-307.

ARY JÚNIOR, I. J. **Pavimento intertravado como ferramenta de moderação do tráfego nos centros comerciais de travessias urbanas**: estudo de caso Guaiúba. 2007. 221 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **ET-27 - Pavimentação com peças pré-moldadas de concreto**. 4. ed. São Paulo, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Manual técnico para implementação da habitação 1.0**. São Paulo, 2002. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/downloads/arquivos_pdf/Manual_Habitacao_10>. Acesso em: 12 fev. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Reunião do GLA-RILLEN**: práticas correntes de dosagem de concreto nos países latino-americanos. São Paulo, 1965.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7223 – Concreto**: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211 – Agregado para concreto.** Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.004 – Resíduos sólidos:** classificação. Rio de Janeiro, 1987a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos:** determinação da absorção de água por imersão: índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9780 – Peças de concreto para pavimentação:** método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9781 – Peças de concreto para pavimentação:** especificação. Rio de Janeiro, 1987d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9833 – Concreto fresco:** determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1987e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5737 – Cimento Portland resistente a sulfatos:** especificação. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11578 – Cimento Portland composto:** especificação. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto.** Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215 - Cimento Portland:** determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NM 65 – Cimento Portland:** determinação do Tempo de Pega. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 67 – Concreto fresco:** determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NM 76 – Cimento Portland:** determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 30 – Agregado miúdo:** determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 49 – Agregado miúdo:** determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 47 – Concreto:** determinação do teor de ar em concreto fresco: método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248 – Agregados:** determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52 – Agregado miúdo:** determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 46 – Agregado miúdo:** determinação do material fino que passa na peneira de 75 micrometros por lavagem. Rio de Janeiro, 2003c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 53 – Agregado graúdo:** determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8522 Concreto –** determinação dos módulos estáticos e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2003e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 45 – Agregados:** determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15.116 – Agregados de resíduos sólidos da construção civil:** utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

BEATY, A. N. S. Predicting the performance of bedding sands. INTERNATIONAL CONCRETE BLOCK PAVING CONFERENCE, 4., 1992, Auckland, New Zealand. **Proceedings...** Auckland: [s.n.], feb. 1992. vol. 2, p. 273-284.

BEATY, A. N. S. Laying coure materials: specification and performance. INTERNATIONAL CONCRETE BLOCK PAVING CONFERENCE, 5., 1996, Tel-Aviv, Israel. **Proceedings...** Tel-Aviv, Israel: [s.n.], june 1996. p. 129-139.

BOGGIO, A. J. **Estudo comparativo de dosagem de concreto de cimento Portland**. 2000. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA). **Panorama dos resíduos de construção e demolição (RCD) no Brasil**. Brasília, DF, 2008. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/secretarias-nacionais/secretaria-de-habitacao/SNSA>>. Acesso em: 17 jun. 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução n. 307, de 5 de julho de 2002. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 17 jul. 2002. Seção 1, p. 95-96.

BUILDING CONTRACTORS SOCIETY OF JAPAN (B.C.S.J.). Committee on Disposal and Reuse of Construction Waste. Study on recycled aggregate and recycled aggregate concrete: summary. **Concrete Journal**, Tokyo, v. 16, n. 7, p. 18-31, 1978.

BURAK, R. Bedding sand for segmental concrete pavements. **Interlocking Concrete Pavement Magazine**, Herndon, v. 9, n. 9, p. 12-16, aug. 2002.

CÂMARA MUNICIPAL DE ESTARREJA. **Higiene e limpeza urbana**. Estarreja, Portugal, [200-]. Disponível em: <<http://www.cm-estarreja.pt/main>>. Acesso em: 15 jun. 2008.

CARNEIRO, F. L. **Dosagem de concretos plásticos**. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Tecnologia, 1937.

CARVALHO, M. D. **Pavimentação com peças pré-moldadas de concreto**: ET-27, 1998. 4. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, 1998.

CRUZ, L. O. M. **Pavimento intertravado de concreto**: estudo dos elementos e métodos de dimensionamento. 2003. 281 f. Tese (Mestrado) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-

Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

O EXEMPLO vem do oeste: Santa Fé do Sul, em São Paulo, renova espaços públicos com piso intertravado. **Revista Prisma**, São Paulo, n. 7, 2002. Disponível em: <http://www.revistaprisma.com.br/urbanismo/urbanismo_07.html>. Acesso em: 12 mar. 2008.

FUNDAÇÃO DE TECNOLOGIA DO ESTADO DO ACRE (FUNTAC). **Relatório Técnico: setor cerâmico do Vale do Acre**. Rio Branco, 1999.

GOLDEMBERG, J. **Energia, meio Ambiente & desenvolvimento**. Tradução André Koch. São Paulo: EdUSP, 2001.

HALLACK, A. **Dimensionamento de pavimentos com revestimento de peças pré-moldadas de concreto para áreas portuárias e industriais**. 1998. 116 f. Tese (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

HALLACK, A. Pavimento intertravado: uma solução universal. **Revista Prisma**, São Paulo, p. 25-27, dez. 2001.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI; Brasília, DF: SENAI, 1992.

INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE (ICPI). **Structural design of interlocking concrete pavement for roads and parking lots**. Washington, 2002. (Tech Spec, n. 4)

INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE (ICPI). **Structural design of interlocking concrete pavement for roads and parking lots**. Washington, 2003. Disponível em: <<http://www.icpi.org>>. Acesso em: 23 jul. 2008. (Tech Spec, n. 4).

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 102 f. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JOHN, V. M. Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção. In: CARNEIRO, A. P. et al. (Org.). **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção**. Salvador: EDUFBA, 2001. (Projeto Entulho Bom). Cap. 1, p. 26-45.

KNAPTON, J. **The design of concrete block roads**. Londres: CCA, 1976.

KNAPTON, J. Romans and their roads: the original small element pavement technologists. INTERNATIONAL CONCRETE BLOCK PAVING CONFERENCE, 5., 1996, Tel-Aviv, Israel. **Proceedings...** Tel-Aviv, Israel: [s.n.], june 1996. p. 17-52.

KNAPTON, J.; COOK, I. D. **Design methods for clay and concrete block paving.** Auckland: [s.n.], 1992. vol. 2.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria.** 2001. 208 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MADRID, G. G. Acredite: rodovias com intertravados já são realidade. **Revista Prisma**, São Paulo, n. 10, 2004. Disponível em: <<http://www.revistaprisma.com.br/artigos>>. Acesso em: 21 jul. 2008.

MADRID, G. G. Pavimento intertravado: mais ou menos permeável? **Revista Prisma**, São Paulo, n. 14, 2005. Disponível em: <<http://www.revistaprisma.com.br/artigos>>. Acesso em: 21 jul. 2008.

METHA, K. P.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto estrutural, propriedades e materiais.** São Paulo: PINI, 1994. 574 p.

MULLER, R. M. **Avaliação de transmissão de esforços em pavimentos intertravados de blocos de concreto.** 2005. 256 f. Tese (Mestrado) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

NASCIMENTO, R. R. **Utilização de argila calcinada em pavimentação:** uma alternativa para o estado do Acre. 2005. Tese (Mestrado) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

OLIVERA, M. T. E. et al. Resíduos de concreto: classe III versus classe II. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON/IPEN, 2001. p. 87-96.

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

PREFEITURA MUNICIPAL DE ARARAS – SP. **Calçamento de paralelepípedos é tombado como patrimônio histórico.** Araras, 2008. Disponível em: <<http://www.araras.sp.gov.br/materias2007/1201>>. Acesso em: 18 jul. 2008.

PREFEITURA MUNICIPAL DE ILHA SOLTEIRA – SP. **Reformulação da Praça dos Paiaguás.** Ilha Solteira, 2008. Disponível em: <<http://www.ilhasolteira.sp.gov.br>>. Acesso em: 18 jul. 2008.

PREGO, A. S. S. **A memória da pavimentação no Brasil:** relatos históricos, recordações e depoimentos. Rio de Janeiro: ABPV, 2001.

SCHNEIDER, D. M. **Transporte de resíduos de construção e demolição na cidade de São Paulo.** 2003. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SHACKEL, B. **Design and construction of interlocking concrete block pavement.** 5. ed. New York: Elsevier, 1990.

SIMIELE, D. et al. Utilização de agregados reciclados em pavimentos intertravados. **Exacta**, São Paulo, v. 5, n. 2, p. 231-241, jul./dez. 2007.

SMITH, D. R. Grand entrances. **Interlocking Concrete Pavement Magazine**, Herndon, v. 10, n. 2, 2003.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** 1997. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Campinas, Campinas, 1997.