**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**
**MESTRADO EM TECNOLOGIA**

Sarah Ferreira Bittencourt

# Avaliação da resistência à compressão de *pavers* produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição e areia de fundição

Limeira, 2012.

15/12

Sarah Ferreira Bittencourt

# Avaliação da resistência à compressão de *pavers* produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição e areia de fundição.

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia.

Área de Concentração: Tecnologia e Inovação

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Castro Takeda
Co-orientadora: Profa. Dra. Rosa Cristina Cecche Lintz

Limeira, 2012.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA POR SILVANA MOREIRA DA SILVA SOARES – CRB-8/3965
BIBLIOTECA UNIFICADA FT/CTL
UNICAMP

Bittencourt, Sarah Ferreira, 1982-
B548a Avaliação da resistência à compressão de pavers produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição e areia de fundição / Sarah Ferreira Bittencourt. – Limeira, SP : [s.n.], 2012.

Orientador: Marcelo de Castro Takeda.
Coorientador: Rosa Cristina Cecche Lintz.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia.

1. Resíduos como material de construção. 2. Reciclagem. I. Takeda, Marcelo de Castro. II.Lintz, Rosa Cristina Cecche. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em inglês: Assessment of resistance to compression of pavers produced aggregates of construction and demolition waste foundry casting sand

Palavras-chave em inglês (Keywords):

1- Waste as construction material

2- Recycling

Área de concentração: Tecnologia e Inovação

Titulação: Mestre em Tecnologia

Banca examinadora: José da Costa Marques Neto, Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira, Marcelo de Castro Takeda

Data da Defesa: 27-02-2012

Programa de Pós-Graduação em Tecnologia

## DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Avaliação da resistência à compressão de p*avers* produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição e areia de fundição**

**Autor:** Sarah Ferreira Bittencourt

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Marcelo de Castro Takeda - Presidente
Unidade UFSCAR - Universidade Federal de São Carlos

Profª Drª Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira
Faculdade de Tecnologia – FT Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. José da Costa Marques Neto
Unidade UFSCAR - Universidade Federal de São Carlos

*Dedico este trabalho a minha filha Pietra, pois sem ela eu não teria forças para continuar.*

# Agradecimentos

*Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:*

*Aos meus orientadores Marcelo e Rosa por toda ajuda e apoio nesta longa caminhada, e por não terem medido esforços para me orientar.*

*A empresa CINPAL por ter cedido o material areia de fundição e incentivado minha pesquisa.*

*A minha filha Pietra por ser a luz na minha vida.*

*A todos os professores e colegas da FT, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho, em especial aos professores Emerson e ao Reginaldo do laboratório pela paciência comigo*

*Ao proprietário da Fábrica de blocos Pacaembu, Vando*.

*A minha mãe Ana Maria, minha irmã Izadora, meus padrinhos Lucinett e Kahn pelo apoio e incentivo, sem vocês eu não conseguiria.*

*A Pedreira Basalto por ter me fornecido todo o material necessário.*

*A Usina de Reciclagem CEMARA por ter fornecido o material necessário.*

*A UNICAMP e todos os professores pelo excelente curso.*

*A ABCP por todos os cursos que participei e por todo apoio para solucionar minhas dúvidas.*

*“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade”*

*Albert Einsten*

# Resumo

Neste trabalho procurou-se desenvolver um *paver* utilizando em sua composição agregados reciclados (brita e areia), provenientes de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), e também foi testado areia de fundição na sua composição. Foram elaborados diversos traços com diferentes porcentagens de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado. Com o intuito de diminuir o descarte de RCD no meio ambiente, neste trabalho procurou-se estudar a viabilidade desta incorporação aos *pavers* analisando-os mecanicamente e fisicamente.Os agregados reciclados podem apresentar composições diversas em função das características locais, obtendo assim valores, como os de resistência, diferenciados conforme sua composição. A areia de fundição pode apresentar composição distinta em função do processo de produção, pois sua composição química é diretamente modificada. Isso justifica o estudo da aplicação desses materiais em função de possíveis diferenças de comportamento. Visando a sua comercialização este estudo ensaiou *pavers* produzidos em fábricas de blocos e não corpos-de-prova, que poderiam apresentar valores que não correspondem a realidade do produto comercializado. Os estudos mostraram que, de maneira geral, o aumento na proporção de substituição produz uma redução na resistência à compressão dos *pavers*. A substituição por areia reciclada na proporção de 20% não alterou as significativamente as propriedades mecânicas dos *pavers*. Já a substituição por 40% de areia reciclada e 20 e 40% de brita reciclada e areia de fundição alteraram o comportamento mecânico dos *pavers* promovendo a redução da resistência à compressão.

*Palavras Chave: RCD;* Intertravado; Reciclagem.

## Abstract

In this study we sought to develop a paver in its composition using recycled aggregates (gravel and sand) from Construction and Demolition Waste (CDW), and was also tested foundry sand in its composition. Several traits have been developed with different percentages of replacement of natural aggregate by recycled aggregate. In order to reduce the disposal of CDW in the environment, this study sought to investigate the feasibility of incorporating the pavers analyzing them mechanically and physically. The aggregates may have different compositions depending on local characteristics, thus obtaining values such as strength, differentiated according to their composition. The foundry sand can have different compositions depending on the production process, because its composition is modified directly. This justifies consideration of the application of these materials due to possible differences in behavior. In order to be marketed this study tested pavers block manufactured in factories and not bodies-of-proof, which could have values that do not match the reality of the marketed product. Studies have shown that, in general, the increase in the proportion of substitution causes a reduction in the compressive strength of pavers. Substitution of recycled sand in proportions of 20% did not change significantly the mechanical properties of pavers. Since the replacement of 40% recycled sand and 20 and 40% of gravel and recycled sand casting alter the mechanical behavior of pavers promoting the reduction in compressive strength.



*Key Words:* CDW *;Interlocked; Recycling.*

# Lista de figuras

FIGURA 2.1: VIA ÁPIA (FONTE: CORBIS, 2011) ..... 7
FIGURA 2.2: CALÇAMENTO "PÉ-DE-MOLEQUE" (FONTE: CORBIS,2011) ..... 8
FIGURA 2.3: SEÇÃO TRANSVERSAL TÍPICA DO PAVIMENTO INTERTRAVADO ..... 10
FIGURA 2.4: PEÇA RETANGULAR RETA. ..... 12
FIGURA 2.5: PEÇA RETANGULAR ANGULAR OU ONDAS. ..... 12
FIGURA 2.6: PEÇA NO FORMATO RAQUETE. ..... 13
FIGURA 2.7: PEÇA NO FORMATO HEXAGONAL. ..... 13
FIGURA 2.8: ESQUEMA DOS TIPOS DE INTERTRAVAMENTO (FONTE: ADAPTADO DE ICPI, 2002) ..... 15
FIGURA 2.9: ASSENTAMENTO TIPO ESPINHA-DE-PEIXE $45^{O}$ ..... 16
FIGURA 2.10: ASSENTAMENTO TIPO ESPINHA-DE-PEIXE $90^{O}$ ..... 16
FIGURA 2.11: ASSENTAMENTO FILEIRA. ..... 16
FIGURA 2.12: ASSENTAMENTO TIPO TRAMA. ..... 17
FIGURA 2.13:MOLDAGEM DAS PEÇAS NA VIBROPRENSASEMI AUTOMÁTICA (FONTE: AKASAKI *ET AL.*, 2004) ..... 24
FIGURA 2.14:FLUXOGRAMA DA FABRICAÇÃO DAS PEÇAS (FONTE: COMPILADO ABCP,2009) ..... 24
FIGURA 2.15: EXECUÇÃO DA BASE (FONTE: ABCP,2009) ..... 25
FIGURA 2.16: REGULARIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO DA BASE (FONTE: ABCP,2009) ..... 25
FIGURA 2.17: COLOCAÇÃO DE TUBO RÉGUA GUIA (FONTE: ABCP, 2009) ..... 26
FIGURA 2.18: COLOCAÇÃO DE AREIA DE ASSENTAMENTO (FONTE: ABCP, 2009) ..... 26
FIGURA 2.19: NIVELAMENTO DA AREIA ASSENTAMENTO (FONTE: ABCP, 2009) ..... 26
FIGURA 2.20: REMOÇÃO DOS TUBOS GUIAS (FONTE: ABCP, 2009) ..... 26
FIGURA 2.21: PREENCHIMENTO DO ESPAÇO DO TUBO (FONTE: ABCP, 2009) ..... 26
FIGURA 2.22: COLOCAÇÃO DOS *PAVERS*(FONTE: ABCP, 2009) ..... 26
FIGURA 2.23: INÍCIO DO ASSENTAMENTO DAS PEÇAS (FONTE: ABCP, 2009) ..... 27
FIGURA 2.24: CONTINUAÇÃO DO ASSENTAMENTO, OBSERVANDO AS JUNTAS (FONTE: ABCP, 2009) ..... 27
FIGURA 2.25: EXECUÇÃO DE RECORTES E PAGINAÇÃO (FONTE: ABCP, 2009) ..... 27
FIGURA 2.26: COMPACTAÇÃO DOS *PAVERS* COM PLACA VIBRATÓRIA (FONTE: ABCP, 2009) ..... 27
FIGURA 2.27: RETIRADA DE PEÇAS QUEBRADAS (FONTE: ABCP, 2009) ..... 27
FIGURA 2.28: SELAMENTO DAS JUNTAS COM AREIA (FONTE: ABCP, 2009) ..... 27
FIGURA 2.29: RECOMPACTAÇÃO COM PLACA VIBRATÓRIA (FONTE: ABCP, 2009) ..... 28
FIGURA 2.30: VARRIÇÃO E INSPEÇÃO FINAL (FONTE: ABCP, 2009) ..... 28
FIGURA 2.31: CURVA GRANULOMÉTRICA DE AGREGADO RCD(FONTE: ADAPTADO DE ÂNGULO, 2002) ..... 39

FIGURA 2.32 – TEOR DE CONTAMINANTES ENCONTRADOS NO AGREGADO RCD (FONTE: ÂNGULO, 2002) ..... 40
FIGURA 2.33– RESULTADO ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (FONTE:MIZUMOTO *ET AL*, 2007) ..... 42
FIGURA 3.1: CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO AREIA RECICLADA- ZONA UTILIZÁVEL ..... 50
FIGURA 3.2: AMOSTRA DE AREIA RECICLADA ..... 50
FIGURA 3.3: CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO PÓ-DE-PEDRA- ZONA UTILIZÁVEL ..... 52
FIGURA 3.4: AMOSTRA DO AGREGADO MIÚDO PÓ-DE-PEDRA ..... 52
FIGURA 3.5: CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO BRITA RECICLADA- ZONA UTILIZÁVEL ..... 54
FIGURA 3.6: AMOSTRA DO AGREGADO GRAÚDO BRITA RECICLADA ..... 54
FIGURA 3.7: EXEMPLO DO *PAVER* MOLDADO COM DIMENSÕES 8X10X19 CM ..... 56
FIGURA 3.8. MÁQUINA VIBROPRENSA USADA NA PRODUÇÃO DOS *PAVERS* PELA FÁBRICA DE BLOCOS ..... 57
FIGURA 3.9: SEPARAÇÃO DOS MATERIAIS PARA COMPOSIÇÃO DOS TRAÇOS ..... 60
FIGURA 3.10: COLOCAÇÃO DOS MATERIAIS NO MISTURADOR ..... 60
FIGURA 3.11: RAMPA PARA ACESSO AO MISTURADOR ..... 61
FIGURA 3.12: ESTEIRA DE ALIMENTAÇÃO DA VIBROPRENSA ..... 61
FIGURA 3.13:PAVER MOLDADO: (A) VISTA FRONTAL; (B) VISTA SUPERIOR ..... 62
FIGURA 3.14:CAPELA ONDE SE REALIZA O CAPEAMENTO DOS *PAVERS* ..... 63
FIGURA 3.15:*PAVER* CAPEADO ..... 63
FIGURA 3.16:PRENSA USADA NOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES ..... 64
FIGURA 3.17:ROMPIMENTO *PAVER* DURANTE A EXECUÇÃO DO ENSAIO ..... 64
FIGURA 4.1: GRÁFICO DE WHISKER PARA IDENTIFICAÇÃO DE *OUTLIERS* NA AMOSTRA DO ESTUDO I PARA UM INTERVALO DE CONFIANÇA DE 80% E ENSAIOS REALIZADOS AOS 7 DIAS ..... 69
FIGURA 4.2: GRÁFICO DE WHISKER COM INDICAÇÃO DA MÉDIA E INTERVALO DE CONFIANÇA DE 80% PARA O ESTUDO I E ENSAIOS REALIZADOS AOS 7 DIAS ..... 70
FIGURA 4.3: VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS TRAÇOS AVALIADOS NO ESTUDO I E ENSAIADOS AOS 7 DIAS ..... 71
FIGURA 4.4: GRÁFICO DE WHISKER COM INDICAÇÃO DA MÉDIA E INTERVALO DE CONFIANÇA DE 80% PARA O ESTUDO II E ENSAIOS REALIZADOS AOS 7 DIAS ..... 75
FIGURA 4.5: VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS TRAÇOS AVALIADOS NO ESTUDO II E ENSAIADOS AOS 7 DIAS ..... 75
FIGURA 4.6: GRÁFICO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS TRAÇOS AVALIADOS NO ESTUDO II E ENSAIADOS AOS 28 DIAS ..... 78

FIGURA 4.7: GRÁFICO DE WHISKER COM INDICAÇÃO DA MÉDIA E INTERVALO DE CONFIANÇA DE 80% PARA O ESTUDO II E ENSAIOS REALIZADOS AOS 28 DIAS ..... 79
FIGURA 4.8: GRÁFICO COM VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA PERÍODOS DE CURA DE 7 E 28 DIAS ..... 81
FIGURA 4.9: VARIAÇÃO DE RESISTÊNCIA MÉDIA AOS 7 E 28 DIAS PARA OS TRAÇOS T I, T1 I E T2 I ..... 82
FIGURA 4.10: VARIAÇÃO DE RESISTÊNCIA MÉDIA AOS 7 E 28 DIAS PARA OS TRAÇOS T I, T3 I E T4 I ..... 82
FIGURA 4.11: VARIAÇÃO DE RESISTÊNCIA MÉDIA AOS 7 E 28 DIAS PARA OS TRAÇOS T I, T5 I E T6 I ..... 83
FIGURA 4.12: GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS RESISTÊNCIAS MÉDIAS AOS 7 DIAS DO ESTUDO I E DO ESTUDO II ..... 85
FIGURA 4.13: VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MÉDIA AOS 7 DIAS ENTRE O ESTUDO I E O ESTUDO II PARA OS TRAÇOS T, T1 E T2 ..... 86
FIGURA 4.14: VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MÉDIA AOS 7 DIAS ENTRE O ESTUDO I E O ESTUDO II PARA OS TRAÇOS T, T3 E T4 ..... 87
FIGURA 4.15: VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MÉDIA AOS 7 DIAS ENTRE O ESTUDO I E O ESTUDO II PARA OS TRAÇOS T, T5 E T6 ..... 87
FIGURA 4.16: GRÁFICO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS TRAÇOS AVALIADOS NO ESTUDO DEFINITIVO E ENSAIADOS AOS 28 DIAS ..... 89
FIGURA 4.17: GRÁFICO DE WHISKER COM INDICAÇÃO DA MÉDIA E INTERVALO DE CONFIANÇA DE 80% PARA O ESTUDO DEFINITIVO E ENSAIOS REALIZADOS AOS 28 DIAS ..... 90
FIGURA 4.18: GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS RESISTÊNCIAS MÉDIAS AOS 28 DIAS DO ESTUDO II E DO ESTUDO DEFINITIVO ..... 93
FIGURA 4.19: VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MÉDIA AOS 7 DIAS ENTRE O ESTUDO II E O DEFINITIVO PARA OS TRAÇOS T, T1 E T2 ..... 94
FIGURA 4.20: VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MÉDIA AOS 7 DIAS ENTRE O ESTUDO II E O DEFINITIVO PARA OS TRAÇOS T, T3 E T4 ..... 94
FIGURA 4.21: VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MÉDIA AOS 7 DIAS ENTRE O ESTUDO II E O DEFINITIVO PARA OS TRAÇOS T, T5 E T6 ..... 95

# Lista de Tabelas

TABELA 2.1: REQUISITOS DA NORMA BS EN 1338 (2003) ..... 18
TABELA 2.2: VALORES ACEITÁVEIS DAS NORMAS AMERICANA E CANADENSE PARA OS PAVERS . 19
TABELA 2.3: REQUISITOS FÍSICOS PARA A PRODUÇÃO DE PAVERS ..... 20
TABELA 2.4: GRANULOMETRIA PARA AREIA DE ASSENTAMENTO ..... 28
TABELA 2.5:FATOR DE EQUIVALÊNCIA PARA VEÍCULOS DE LINHA EM FUNÇÃO DO TIPO DE EIXO (GRUPO 1) ..... 31
TABELA 2.6:FATOR DE EQUIVALÊNCIA PARA VEÍCULOS SOBRE ESTEIRAS E EMPILHADEIRAS (GRUPO 1) ..... 32
TABELA 2.7: NÚMERO CAT2 ..... 32
TABELA 2.8 FATOR DE EQUIVALÊNCIA GRUPO 2 ..... 33
TABELA 2.9NÚMERO DE SOLICITAÇÕES TRÁFEGO MISTO ..... 33
TABELA 3.1: ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO. RELATÓRIO DE ENSAIO N$^{O}$ 87007 ..... 47
TABELA 3.2: ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO. RELATÓRIO DE ENSAIO N$^{O}$ 87007 ..... 48
TABELA 3.3: DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA- AGREGADO MIÚDO AREIA RECICLADA ..... 49
TABELA 3.4: CLASSIFICAÇÃO DA AREIA RECICLADA ..... 49
TABELA 3.5: DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA- AGREGADO MIÚDO PÓ-DE-PEDRA ..... 51
TABELA 3.6: CLASSIFICAÇÃO DO PÓ-DE-PEDRA ..... 51
TABELA 3.7: DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA- AGREGADO GRAÚDO BRITA RECICLADA ..... 53
TABELA 3.8: CLASSIFICAÇÃO DA BRITA RECICLADA ..... 53
TABELA 3.9: MASSA ESPECÍFICA, MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA AREIA RECICLADA, PÓ-DE-PEDRA E BRITA RECICLADA ..... 55
TABELA 3.10: MASSA UNITÁRIA DA AREIA RECICLADA, DA BRITA RECICLADA E DO PÓ-DE-PEDRA ..... 55
TABELA 3.11: TRAÇOS UTILIZADOS NO ESTUDO I ..... 59
TABELA 3.12: QUANTIDADES DE MATERIAL, EM LITROS, DE CADA TRAÇO ESTUDADO ..... 59
TABELA 3.13: TRAÇOS AVALIADOS NO ESTUDO II ..... 66
TABELA 3.14: QUANTIDADES, EM MASSA (KG), DOS MATERIAIS COMPONENTES DOS TRAÇOS DO ESTUDO II ..... 66
TABELA 3.15: QUANTIDADES, EM KG, DOS MATERIAIS COMPONENTES DOS TRAÇOS DO ESTUDO DEFINITIVO ..... 67
TABELA 4.1: VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES PARA OS SEIS MELHORES RESULTADOS DETERMINADOS NO ESTUDO I ..... 69

TABELA 4.2: VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES PARA OS MELHORES RESULTADOS DETERMINADOS NO ESTUDO I EXCLUÍDOS OS *OUTLIERS*.....71
TABELA 4.3: DIFERENÇAS ABSOLUTAS E RELATIVAS ENTRE OS TRAÇOS COM SUBSTITUIÇÃO E O TRAÇO PADRÃO PARA OS ENSAIOS DO ESTUDO I ENSAIADOS AOS 7 DIAS.....72
TABELA 4.4: RESUMO DOS TESTE DE COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DOS ENSAIOS DO ESTUDO I PARA UM NÍVEL DE CONFIANÇA DE 80% .....73
TABELA 4.5: VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES PARA OS SEIS MELHORES RESULTADOS DETERMINADOS NO ESTUDO II ENSAIADOS AOS 7 DIAS .....74
TABELA 4.6: DIFERENÇAS ABSOLUTAS E RELATIVAS ENTRE OS TRAÇOS COM SUBSTITUIÇÃO E O TRAÇO PADRÃO PARA OS ENSAIOS DO ESTUDO II ENSAIADOS AOS 7 DIAS .....75
TABELA 4.7: RESUMO DOS TESTE DE COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DOS ENSAIOS DO ESTUDO II PARA UM NÍVEL DE CONFIANÇA DE 80% E ENSAIO AOS 7 DIAS.....76
TABELA 4.8: VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES PARA OS SEIS MELHORES RESULTADOS DETERMINADOS NO ESTUDO II ENSAIADOS AOS 28 DIAS.....78
TABELA 4.9: RESUMO DOS TESTE DE COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DOS ENSAIOS DO ESTUDO II PARA UM NÍVEL DE CONFIANÇA DE 80% E ENSAIO AOS 28 DIAS.....79
TABELA 4.10: DIFERENÇAS ABSOLUTAS E RELATIVAS ENTRE OS TRAÇOS COM SUBSTITUIÇÃO E O TRAÇO PADRÃO PARA O ESTUDO II ENSAIADOS AOS 28 DIAS .....80
TABELA 4.11: VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA PERÍODOS DE CURA DE 7 E 28 DIAS E DIFERENÇAS DE RESISTÊNCIAS ABSOLUTAS E RELATIVAS .....81
TABELA 4.12: VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA PERÍODOS DE CURA DE 7 DO ESTUDO I E DO ESTUDO II E DIFERENÇAS DE RESISTÊNCIAS ABSOLUTAS E RELATIVAS...85
TABELA 4.13: VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES PARA OS SEIS MELHORES RESULTADOS DETERMINADOS NO ESTUDO DEFINITIVO ENSAIADOS AOS 28 DIAS.....89
TABELA 4.14: RESUMO DOS TESTES DE COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DOS ENSAIOS DO ESTUDO DEFINITIVO PARA UM NÍVEL DE CONFIANÇA DE 80% E ENSAIO AOS 28 DIAS .....91
TABELA 4.15: DIFERENÇAS ABSOLUTAS E RELATIVAS ENTRE OS TRAÇOS COM SUBSTITUIÇÃO E O TRAÇO PADRÃO PARA O ESTUDO DEFINITIVO ENSAIADOS AOS 28 DIAS .....92
TABELA 4.16: VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA PERÍODOS DE CURA DE 28 DIAS DO ESTUDO II E DO ESTUDO DEFINITIVO E DIFERENÇAS DE RESISTÊNCIAS ABSOLUTAS E RELATIVAS.....92
TABELA 4.17: ESPECIFICAÇÕES DE NORMA PARA AVALIAÇÃO MECÂNICA DE PAVERS.....96

**Sumário**


**1 INTRODUÇÃO ..... 1**

**1.1 OBJETIVO ..... 2**

**1.2 Justificativa ..... 2**

**1.3 Organização do trabalho ..... 3**

**2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..... 4**

**2.1 O PAVIMENTO ..... 4**

2.1.1 Definição de pavimentação ..... 5

2.1.2 Os tipos de pavimentos ..... 5

**2.2 HISTÓRICO DA PAVIMENTAÇÃO INTERTRAVADA ..... 6**

2.2.1 No exterior ..... 6

2.2.2 No Brasil ..... 8

**2.3 O PAVIMENTO INTERTRAVADO ..... 9**

2.3.1 Definição ..... 9

2.3.2 Formato das peças ..... 12

2.3.3 O intertravamento ..... 13

2.3.4 Tipos de assentamento ..... 15

2.3.5 Requisitos técnicos ..... 17

2.3.5.1 Norma Europeia ..... 17

2.3.5.2 Normas Americana e Canadense ..... 18

2.3.5.3 Norma Brasileira ..... 18

2.3.5.4 Norma Africana ..... 21

2.3.5.5 Norma Australiana ..... 21

2.3.6 Vantagens do pavimento intertravado ..... 21

2.3.7 Fabricação das peças ..... 22

**2.4 CONSTRUÇÃO DO PAVIMENTO ..... 25**

**2.5 DIMENSIONAMENTO DA VIA PARA TRÁFEGO ..... 29**

2.5.1 Método de dimensionamento PCA-1984 (*Portland Cement Association*- USA) ..... 30

Cálculo para veículos de linha (Grupo 1) ..... 31

2.5.2 Metodologia de dosagem....33
2.5.3 Composição....34

**2.6 O AGREGADO....34**
2.6.1 Agregado reciclado....35
2.6.2 Pó de pedra....36
2.6.3 Areia de Fundição....36
Tipos de Areia de Fundição....38

**2.7 ESTUDOS REALIZADOS PARA A PRODUçÃO DO *PAVER* COM RESíDUOS SÓLIDOS PROVENIENTES DA RECICLAGEM....39**

**3 MATERIAIS E MÉTODOS....45**

**3.1 Materiais....45**
3.1.1 Cimento....45
3.1.2 Agregados....46
3.1.2.1 Agregados naturais (brita e areia)....46
3.1.2.2 Agregado Reciclado....46
3.1.2.3 Areia de fundição....47
3.1.3 Ensaios de caracterização dos agregados reciclados....48
3.1.4 Peças de concreto pré-moldado (*Pavers*)....55
3.1.4.1 Dimensão dos pavers....56
3.1.4.2 Moldagem e cura dos pavers....56
3.1.4.3 Composições estudadas para produção dos pavers....57

**3.2 Métodos - Estudo realizados....58**
3.2.1 Estudo I....58
3.2.1.1 Preparação das peças....59
3.2.1.2 Ensaio de Resistência à Compressão Simples....62
3.2.2 Estudo II....65
3.2.3 Estudo definitivo....67

**4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS....68**

**4.1 Estudo preliminar- ESTUDO i....68**
4.1.1 Resultados ensaios de Compressão simples....68

**4.2 Estudo II....73**

4.2.1 Resultados ensaios de Compressão simples aos 7 dias .....73
4.2.2 Resultados de resistência à compressão simples aos 28 dias .....77
4.2.3 Comparação entre os resultados de compressão simples aos 7 e aos 28 dias - efeito do tempo de cura .....81

**4.3 Comparação entre os resultados de compressão simples aos 7 dias do estudo I e do estudo II 84**

**4.4 Estudo definitivo .....88**
4.4.1 Resultados ensaios de Compressão simples aos 28 dias .....88

**4.5 Comparação entre os resultados de compressão simples aos 28 dias do estudo II e do estudo definitivo .....92**

**4.6 Comparação dos resultados do estudo definitivo com especificações das normas 95**

**5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... 97**

**5.1 Conclusões .....97**

**5.2 Sugestões para trabalhos futuros..... 100**

**6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 101**

# 1 INTRODUÇÃO

Os blocos de concreto para pavimentação, conhecidos como "*paver*" ou como "ppc" (peças pré-moldadas de concreto), compõem os pisos intertravados formando um sistema prático tanto para sua construção como para sua manutenção. Segundo dados da Associação Brasileira das Indústrias de Blocos de Concreto Bloco Brasil, o consumo de *pavers* no país dobrou nos últimos três anos. Em função da variedade de cores e formas, o pavimento é amplamente usado por arquitetos no desenvolvimento de projetos paisagísticos, além de ser o preferencial na revitalização de centros urbanos e históricos, calçadas e praças. Por suportar cargas elevadas, o pavimento intertravado é indicado para áreas industriais, como terminais de carga (portos e aeroportos), além de ser frequentemente aplicado na pavimentação de áreas de armazenamento da indústria sucroalcooleira, de grãos e alimentos (ABCP, 2009).

O pavimento de concreto intertravado pode constituir-se em uma alternativa atraente para vias das cidades, onde se deseja reduzir os efeitos da urbanização e resolver problemas associados com escoamentos de águas superficiais (Zollinger *et al.* 1998).

A geração de resíduos da construção civil atualmente são superiores em quantidade por habitante ao lixo domiciliar produzido e esta preocupação ambiental é vista como de grande importância para o meio ambiente. Segundo Carneiro *et al.* (2001) a geração de RCD é de aproximadamente 0,4toneladas por habitante ano. A reciclagem é um excelente tratamento deste resíduo, Segundo Marques Neto (2009) em seu levantamento na cidade de São Carlos a média encontrada foi de 1,93 kg/hab/dia. A reciclagem é a reintrodução de resíduos ou rejeitos em um

processo produtivo. É uma forma de tratamento de resíduos, pois auxilia a minimizar os espaços em aterros sanitários, reduz o consumo de energia e contribui para a economia dos recursos naturais. A incorporação de resíduos em pavimentação atualmente já está sendo utilizada, pois a construção civil é um grande consumidor de matéria prima, em especial dos agregados como a brita e areia. Portanto os agregados reciclados são materiais provenientes do processo de reciclagem do entulho de construção civil, seja ele produto proveniente de demolições de construções antigas ou de resíduos classe A do processo construtivo de obras civis novas.

A areia de fundição é proveniente da areia utilizada nos moldes de algumas indústrias para a confecção de peças, como as siderúrgicas, automobilísticas e metálicas. Esta areia após o processo é descartada em aterros sanitários controlados, pois em sua composição apresenta diversos tipos de metais, isto quando a mesma for considerada resíduo de classe 2 não inerte e não perigoso. Inicialmente, o processo de reciclagem surgiu com outros tipos de resíduos, como por exemplo, os domésticos e os industriais (papel, plásticos, metais) e em um contexto de preservação ecológica, viabilizando um equilíbrio entre as atividades produtivas e os ecossistemas que as abrigam.

## 1.1 OBJETIVO

Estudar a incorporação de agregados reciclados provenientes do beneficiamento de RCD classe A, assim como a areia de fundição na produção de *pavers* e avaliar seu comportamento mecânico frente à incorporação destes materiais, em especial os agregados reciclados (areia e brita) e a areia de fundição, em proporções de 20 e 40% e ensaiados à compressão simples em períodos de cura de 7 e 28 dias.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Os *pavers* produzidos com RCD podem ser uma alternativa viável para a pavimentação e a incorporação destes resíduos e podem contribuir nos aspectos ambientais de descarte dos mesmos. Os RCD podem apresentar composições diversas em função das características locais, obtendo assim valores, como os de resistência, diferenciados conforme sua composição. A areia de fundição pode apresentar composição distinta em função do processo de produção, pois sua

composição química é diretamente modificada. Isso justifica o estudo da aplicação desses materiais em função de possíveis diferenças de comportamento.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema, incorporando assuntos que subsidiaram o desenvolvimento deste trabalho tais como: histórico do pavimento, o pavimento intertravado (definição, tipos, requisitos técnicos e ensaios), o agregado (o agregado reciclado e a areia de fundição): estudos realizados para a produção do *paver* com resíduos sólidos provenientes da reciclagem. Já o capítulo 3 apresenta os materiais e métodos que foram utilizados no desenvolvimento desta dissertação de mestrado. Enquanto o capítulo 4 relaciona e discute os resultados obtidos. O capítulo 5 mostra as conclusões deste trabalho e sugere temas para desenvolvimento de trabalhos futuros. Finalmente, o capítulo 6 apresenta as referências bibliográficas.

# 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1 O PAVIMENTO

Pavimento, segundo BERNUCCI et al.(2006) é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. Mais recentemente há uma tendência de usar-se a nomenclatura pavimentos de concreto de cimento Portland (ou simplesmente concreto-cimento) e pavimentos asfálticos, respectivamente, para indicar o tipo de revestimento do pavimento. Segundo SOUZA(1990) pode-se considerar pavimento qualquer estrutura construída sobre um leito por meio de camadas de diferentes materiais e características, onde a função é fornecer segurança e conforto ao usuário.

O histórico a seguir é baseado nos estudos apresentados por MULLER (2005), CRUZ (2003), PREGO (2001), KNAPTON (1996) e SHACKEL (1990). Estes autores apresentam, em seus respectivos trabalhos, uma abordagem histórica descrevendo a evolução desta técnica de pavimentação através dos séculos.

O desenvolvimento tecnológico dos meios de transporte com o consequente aumento da capacidade de carga dos veículos impôs a necessidade de construção de caminhos mais seguros, confortáveis, resistentes e duráveis, mantendo tais características com as variações climáticas. Historicamente, a roda foi inventada na Mesopotâmia há mais de 5.000 anos. O pioneirismo para a construção desses caminhos é creditado aos povos Etruscos que visavam ligar longas distâncias

através de uma superfície mais plana possível, sendo utilizadas pedras de mão juntamente com um material mais fino para o preenchimento das juntas entre as pedras (CRUZ, 2003).

Para garantir o deslocamento das tropas militares, os Romanos traçavam caminhos de acordo com a topografia, clima e disponibilidade de material. Eram bastante utilizadas pedras naturais do tipo seixo rolado misturadas em solo arenoso ou pedras talhadas manualmente em forma retangular.

### 2.1.1 Definição de pavimentação

O DNIT (2003) define pavimentação como: Camadas constituídas por solos, britas de rochas, de escória de alto forno, ou ainda, pela mistura desses materiais. Estas camadas, puramente granulares, são sempre flexíveis e são estabilizadas granulometricamente pela compactação de um material ou de mistura de materiais que apresentem uma granulometria apropriada e índices geotécnicos específicos.

### 2.1.2 Os tipos de pavimentos

Os pavimentos são classificados em três tipos:

- Rígidos: são pouco deformáveis e constituídos principalmente de concreto de cimento portland. Também é aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores absorvendo praticamente todas as tensões oriundas do carregamento aplicado (PINTO *et al.*, 2001);
- Semi-rígidos: revestido de camada asfáltica e com base estabilizada quimicamente (cal, cimento);
- Flexíveis: O pavimento flexível é aquele em que todas as camadas sofrem uma deformação elástica significativa sob carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas (PINTO *et al*. 2001).

As principais funções de um pavimento, segundo a NBR7207: 1982são:

- Resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais provenientes do tráfego;

- Melhorar as condições de rolamento quanto a comodidade e segurança;
- Resistir aos esforços horizontais tornando mais durável possível a superfície de rolamento.

Segundo SHACKEL (1990), os pavimentos intertravados constituídos de blocos de concreto podem ser considerados pavimentos flexíveis, devido às suas características, que se assemelham às dos pavimentos asfálticos, tais como de distribuição de cargas, de deflexão, entre outras.

De acordo com MEDINA e MOTTA (2005) o pavimento se divide em:

- Revestimento: camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe a ação do tráfego;
- Base: camada destinada a reduzir as deformações de tração no revestimento;
- Sub-base: camada complementar do subleito, utilizado quando não é aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o subleito;
- Subleito: é o terreno de fundação do pavimento.

## 2.2 HISTÓRICO DA PAVIMENTAÇÃO INTERTRAVADA

### 2.2.1 No exterior

A utilização de peças segmentadas para a execução de pavimentos é uma técnica empregada desde a idade média. O tipo da peça dependia do material encontrado no local onde se pretendia abrir a via. Como exemplo desses materiais pode-se citar os blocos de tijolo de argila, as pedras talhadas e aparelhadas manualmente, os blocos de tijolo de madeira e as peças pré-moldadas de concreto.

O uso dos blocos de tijolo de madeira foi abandonado após o aparecimento do automóvel, pois quando molhados se tornavam escorregadios, apesar de serem utilizados como uma técnica para a diminuição dos ruídos com o uso das carruagens (CRUZ, 2003).

O bloco de tijolo de argila juntamente com a utilização de betume em pavimentação teve seu início na Mesopotâmia há 5.000 anos, mas foi no final do século XIX que surgiram os fornos

para queimar os tijolos de argila, aumentando assim sua resistência mecânica e seu uso na Europa e na América (MULLER, 2005).

A técnica de assentamento destes blocos é feita diretamente sobre o aterro previamente preparado oferecendo uma superfície que confere segurança ao rolamento, além de oferecer resistência à infiltração de água. A matéria prima para a fabricação dos blocos de tijolos 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 (MULLER, 2005).

A partir do século XVII surgem os primeiros modelos de assentamento em fileiras ou tipo espinha-de-peixe, mas somente no século XX ocorre a preocupação em se diminuir as juntas para melhorar o nivelamento e diminuir o ruído sob a ação do tráfego na via (MULLER, 2005).

Os povos Romanos utilizavam às pedras talhadas e aparelhadas manualmente para a construção de suas vias. Pode-se citar como um exemplo de via feita com pedra talhada a Via Ápia na cidade de Roma, apresentada na Figura 2.1.

**Figura 2.1: Via Ápia (Fonte: CORBIS, 2011)**

As peças pré-moldadas de concreto apresentavam uma evolução às antigas aparelhadas, com vantagem em sua uniformidade. Os primeiros avanços deste tipo de pavimento ocorreram na Holanda e na Alemanha e serviu como alternativa na reconstrução destes países após a 2ª Guerra

Mundial. A partir de 1950 outros modelos apareceram para as peças pré-moldadas que, antes buscavam a semelhança com as aparelhadas e com os tijolos passando a receber novos formatos principalmente o denteado para garantir melhor o conceito de intertravamento das peças (CRUZ, 2003).

O formato das peças passa a ter outra preocupação, em função do tipo de tráfego, novos modelos surgem em meados dos anos 1960. Na década de 70 seu uso cresce nos Estados Unidos, Austrália, Nova Zelândia e Japão (CRUZ, 2003). Na década de 60 as peças pré-moldadas de concreto apareceram na América do Sul, mas foi a partir dos anos 70 que se proliferaram os sistemas de fabricação das peças (MULLER, 2005).

### 2.2.2 No Brasil

O paralelepípedo é uma técnica de pedra talhada e aparelhada manualmente utilizada no Brasil até os dias de hoje. Teve como origem o que é chamado de pé-de-moleque, que é mais antigo que o paralelepípedo, técnica trazida para o Brasil pelos portugueses. As pedras têm formatos irregulares e dimensões de até 50 cm e são arrumadas sobre o terreno natural. A aplicação dos pavimentos de pedras pé-de-moleque pode ser vista em cidades históricas do Rio de Janeiro, como Paraty, e de Minas Gerais, como Mariana. A Figura 2.2 apresenta um exemplo de via com a técnica pé-de-moleque.

**Figura 2.2: Calçamento "pé-de-moleque" (Fonte: CORBIS,2011)**

Classificado como um tipo composto, o pavimento intertravado com blocos pré-moldados de concreto é assentado sobre uma camada de areia grossa e depois compactado para garantir o intertravamento das peças. Segundo a ABCP (2009), ele oferece inúmeras vantagens, entre elas facilidade e rapidez de execução, uso imediato após a colocação e baixo custo. A superfície da pavimentação intertravada é antiderrapante e tem um grande poder de difusão da luz solar ou artificial (iluminação pública), apresentando menor temperatura superficial durante o dia e melhor condição de visibilidade à noite. Além disso, alguns fabricantes estão produzindo *pavers* como peças podotáteis para direcionar o deficiente visual.

Devido à alta resistência ao desgaste e a ação de agentes químicos (possui uma vida útil de 40 anos), as peças do pavimento intertravado são reutilizáveis e podem ser retiradas para eventuais intervenções subterrâneas. É por isso que este piso é indicado para regiões onde, posteriormente, serão instaladas redes de água, esgoto, telefone, entre outras. Além destas vantagens, o piso agrega uma característica exclusiva: de ser ecologicamente correto, pois tem um índice maior de permeabilidade do solo urbano se comparado com o tipo de pavimentação usual, como o asfalto (ABCP, 2009).

## 2.3 O PAVIMENTO INTERTRAVADO

### 2.3.1 Definição

Os pavimentos intertravados são compostos por peças pré-moldadas de concreto e constituem em uma eficaz solução para uso em ruas, calçadas, calçadões e praças, sendo largamente difundida no Brasil, tanto na construção como na reconstrução e reabilitação destes tipos de instalações urbanas.

As dimensões e a qualidade das peças pré-moldadas em concreto, os *pavers,* são uniformes, uma vez que sua fabricação obedece a controles rigorosos. Além disso, as formas, cores e texturas das peças e os padrões de assentamento são extraordinariamente variados, permitindo explorar harmonicamente estas características do ponto de vista arquitetônico e paisagístico.

A camada de rolamento é formada pelos *pavers* que compõem um revestimento de grande durabilidade e resistência, assentadas sobre uma camada delgada de areia. Este 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 (HALLACK, 1998; ABCP, 1999).

A Figura 2.3 apresenta uma seção típica de um pavimento intertravado, com indicação das diferentes camadas e elementos que o compõe.

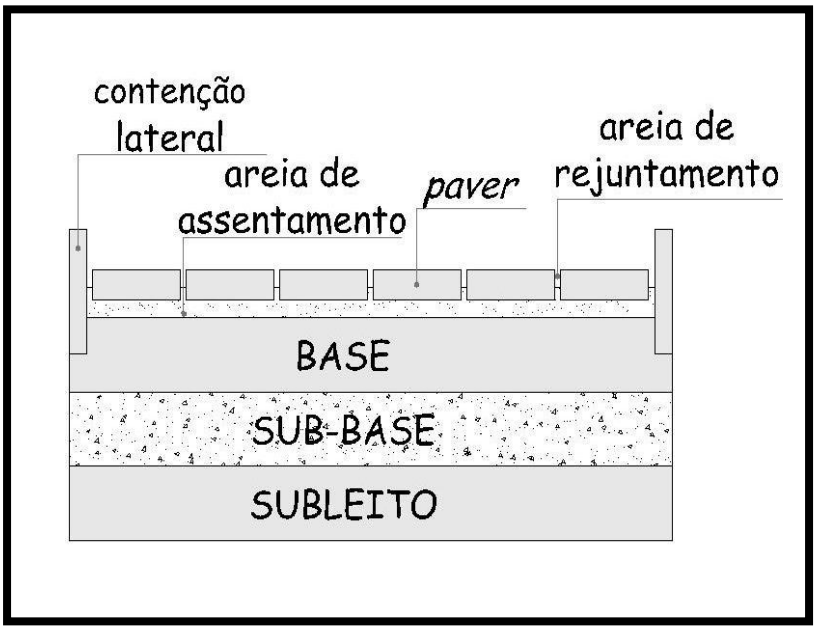


**Figura 2.3: Seção Transversal típica do pavimento intertravado**

Conforme Hallack (1998), o pavimento intertravado é composto de subleito, sub-base, base, contenção lateral, areia de assentamento, peças pré-moldadas de concreto, areia de rejuntamento (selagem), que são definidos em:

a) **Subleito:** é a fundação do pavimento que tem o objetivo de suportar as cargas provenientes do tráfego. Deve-se então dimensionar as camadas sobrejacentes de forma a proteger o subleito contra os carregamentos excessivos.

b) **Base e Sub-base**: são as camadas localizadas entre o subleito e a camada de rolamento, contribuindo para a capacidade estrutural do pavimento. As composições mais comuns dessas camadas são as granulares, estabilizadas com cimento e concreto compactado com rolo.

c) **Areia de assentamento**: é a superfície de apoio para o assentamento dos *pavers*. Ela deve proporcionar uma superfície regular onde se possam assentar as peças e acomodar suas tolerâncias dimensionais de fabricação e aquelas relativas à regularidade da superfície de rolamento do pavimento. A camada de areia funciona também como uma barreira à propagação de eventuais fissuras da base e como fonte de areia para preencher as partes mais baixas das juntas. Uma espessura excessiva torna-se uma fonte potencial de deficiências e assentamentos. Recomenda-se que a camada de areia tenha de 3 cm a 4 cm de espessura após a compactação das peças.

d) **Camada de rolamento**: responsável por suportar a abrasão provocada pelo tráfego e pelo intemperismo, também contribui com a capacidade estrutural do pavimento. Para se ter uma camada de rolamento adequada é necessário que se obedeça a alguns requisitos como peças com dimensões uniformes, compactação adequada de todo o conjunto e juntas pequenas seladas com areia.

e) **Areia de rejuntamento**: camada de areia média responsável pela selagem das juntas, pode variar de 3 mm até 10 mm dependendo do projeto. O preenchimento das juntas com areia promove diminuição das deflexões e aumento da capacidade de suporte do revestimento do pavimento.

f) **Contenção lateral**: é responsável pelo travamento da estrutura da camada de rolamento. Deve ser rígido e sempre apoiado na base. Em caso de caixas de inspeção, jardim, postes, deve ser feita uma base de contenção lateral circundando seu perímetro para não perder o travamento das peças, impedindo o deslocamento lateral das peças.

Segundo estudos realizados por MADRID (1992), em que foram analisados trechos construídos com *pavers* de idades de utilização diferentes, o autor pode verificar que com o passar do tempo, as juntas vão se selando devido a fenômenos físicos e a presença de finos, diminuindo a taxa de infiltração de água no pavimento. Portanto não é correto afirmar que o pavimento intertravado é permeável, pois o valor da infiltração inicial e após cinco anos de utilização tem um decréscimo em média de 50%, fazendo com que a largura das juntas tenha maior influência na resistência do pavimento que a inclinação do mesmo.

### 2.3.2 Formato das peças

Formatos típicos de peças pré-moldadas de concreto:

- Intertravado retangular reto e retangular angular: como ilustra a Figura 2.4 e a Figura 2.5, são peças de concreto segmentadas ou retangulares, com relação comprimento/largura igual a dois (usualmente 200 mm de comprimento por 100 mm de largura), que entrelaçam entre si nos quatro lados, capazes de serem assentadas em fileiras, em "espinha-de-peixe" ou em tramas. Podem ser manipuladas facilmente.

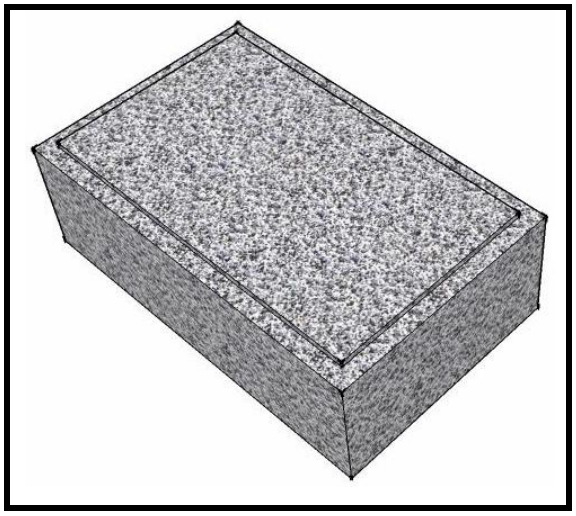

**Figura 2.4: Peça retangular reta.**

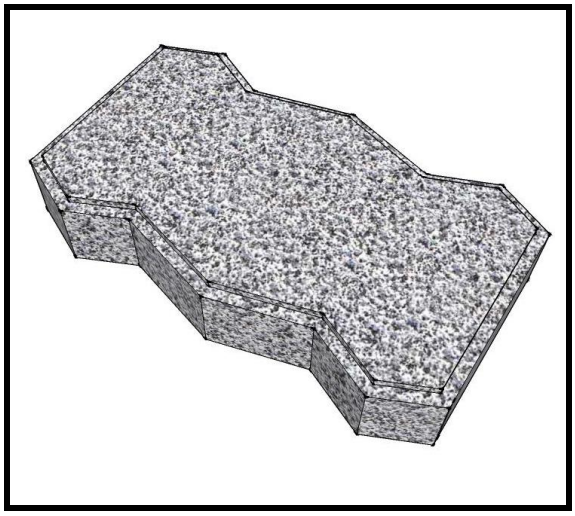

**Figura 2.5: Peça retangular angular ou ondas.**

- Intertravado formato “I”, em cruz ou raquete: como ilustra a Figura 2.6, são peças com tamanhos e proporções similares aos da categoria anterior, mas que entrelaçam entre si somente em dois lados, e que podem ser assentadas em fileiras ou em trama. Podem ser carregadas com apenas uma mão.
- Intertravado arquitetônico: como ilustra a Figura 2.7, são peças de concreto com tamanhos maiores do que as duas categorias anteriores. Pelo seu peso e tamanho não podem ser carregadas com apenas uma mão, por este motivo não são muito utilizadas. Têm formatos geométricos característicos (p. ex.: trapézios e hexágonos). São assentadas seguindo-se sempre um mesmo padrão, mas nem sempre conforme fileiras facilmente identificáveis.

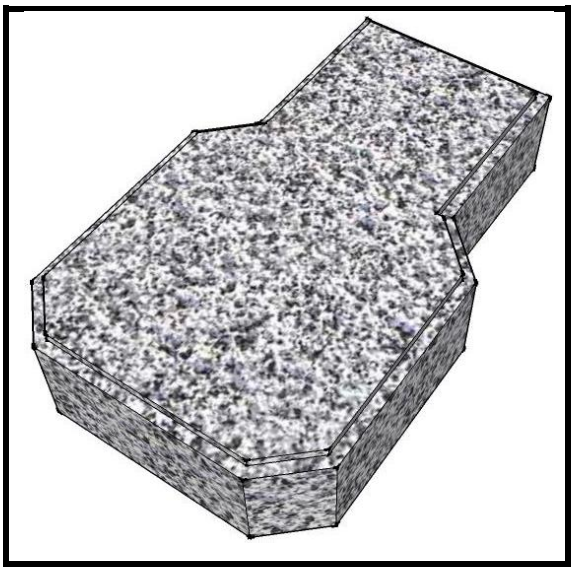

**Figura 2.6: Peça no formato raquete.**

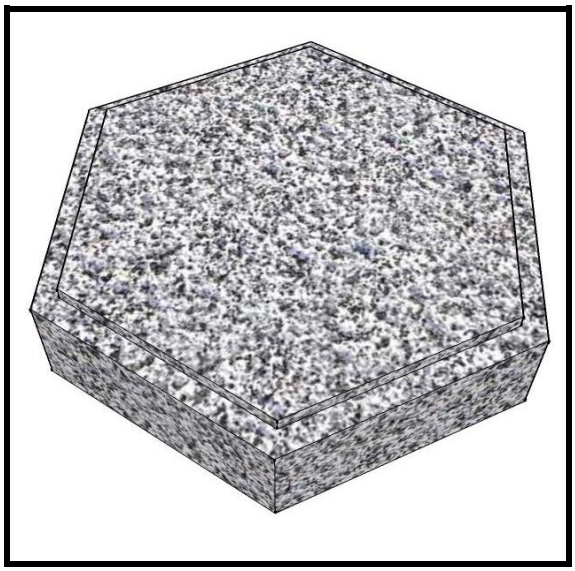

**Figura 2.7: Peça no formato hexagonal.**

### 2.3.3 O intertravamento

O intertravamento é a característica principal desse tipo de pavimento que recebe este nome pelo seu método construtivo onde as peças estão intertravadas resistindo a movimentos de deslocamento individual, em relação às peças vizinhas. Para se obter corretamente o intertravamento é indispensável que sejam feitas de acordo com o projeto as contenções laterais e o preenchimento das juntas com areia (HALLACK,1998).

Os movimentos de deslocamentos individuais podem ser:

- Vertical: é o afundamento da peça, conforme ilustra a figura 2.8a, ou seja, este intertravamento é a capacidade que as peças adquirem de não se moverem verticalmente em relação às vizinhas. Isso se dá pelos esforços de cisalhamento absorvidos pelo rejuntamento entre as peças e a capacidade estrutural das camadas inferiores do pavimento.
- Rotação: é o deslocamento da peça em torno do seu próprio eixo, conforme ilustra a figura 2.8b, ou seja, este travamento é a capacidade que as peças adquirem de não girar em torno de seu próprio eixo vertical. Pode ser melhorado aumentando a espessura das peças e o consequente confinamento oferecido pelas peças vizinhas. Esse movimento pode ser provocado pela frequência e o tipo do tráfego,

principalmente em áreas de frenagem, aceleração e em curvas onde exista um aumento da tensão radial provocada pelos pneus.

- Horizontal: é o deslocamento horizontal da peça, conforme ilustra a figura 2.8c, ou seja, este intertravamento é a capacidade que as peças adquirem de não se deslocarem horizontalmente em relação às vizinhas. Está diretamente relacionado com o formato e arranjo de assentamento dos *pavers* sobre a camada de areia. Contribui na distribuição dos esforços de cisalhamento horizontal principalmente em áreas de aceleração e frenagem. Pode-se dizer que as juntas são as principais responsáveis pelo intertravamento horizontal, quando convenientemente preenchidas com o material adequado.
- Giração:é o deslocamento da peça em torno do seu eixo horizontal, ou seja, este travamento é a capacidade que os blocos adquirem de não girarem em torno de seu próprio eixo horizontal, isto é, eventualmente, uma ou mais peças poderão girar, ainda que mantendo a planicidade da superfície do pavimento. Este fenômeno é de rara ocorrência e pode ser evitado com um bom confinamento lateral da camada e das peças pré-moldadas, construindo-se as juntas entre as peças com larguras adequadas (2,5mm a3mm) e mantendo-as preenchidas com material de rejuntamento.

A Figura 2.8 apresenta um esquema dos possíveis movimentos de deslocamento dos *pavers*.

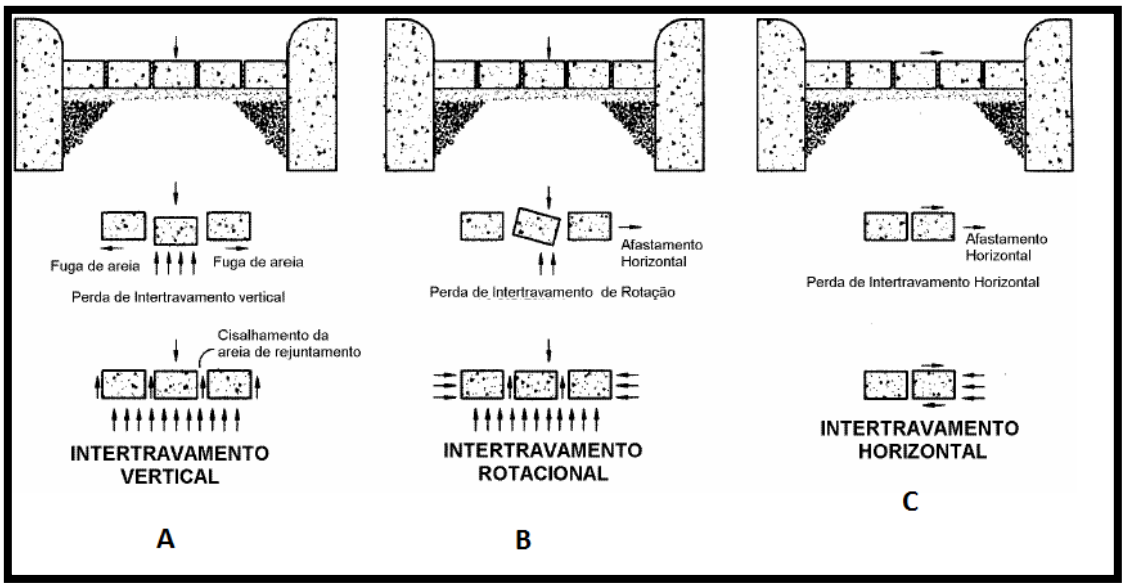


**Figura 2.8: Esquema dos tipos de intertravamento (Fonte: adaptado de ICPI, 2002)**

### 2.3.4 Tipos de assentamento

Segundo Hallack (1998,) a propriedade de distribuição de esforços das peças intertravadas depende essencialmente de seu formato, arranjo e espessura. A resistência à compressão das peças tem, neste aspecto, pouca influência. Não há um consenso entre os pesquisadores quanto à influência do formato das peças. No entanto, há concordância quanto ao comportamento do pavimento em função da espessura e do arranjo de assentamento das peças. Tanto a aparência estética como o desempenho dos pavimentos intertravados são afetados significativamente pelo arranjo de assentamento adotado. Há consenso entre os pesquisadores quanto à hierarquia dos melhores arranjos. Em condições de tráfego intenso, o arranjo "espinha-de-peixe" é considerado o mais adequado devido à sua boa resposta frente ao fenômeno de "escorregamento" analisado em relação ao travamento horizontal, pois os atritos entre as arestas das peças colaboram para este travamento.

As Figuras 2.9, 2.10, 2.11 e 2.12 apresentam os tipos de assentamento mais usuais para a colocação dos *pavers.*

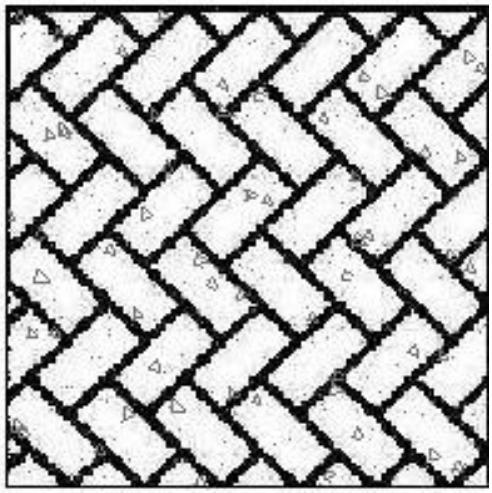

**Figura 2.9: Assentamento tipo espinha-de-peixe 45º**

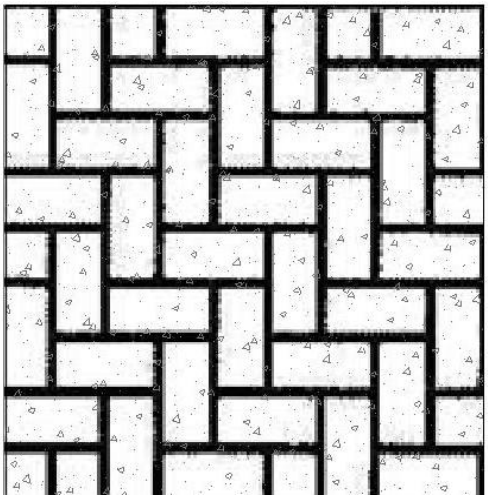

**Figura 2.10: Assentamento tipo espinha-de-peixe 90º**

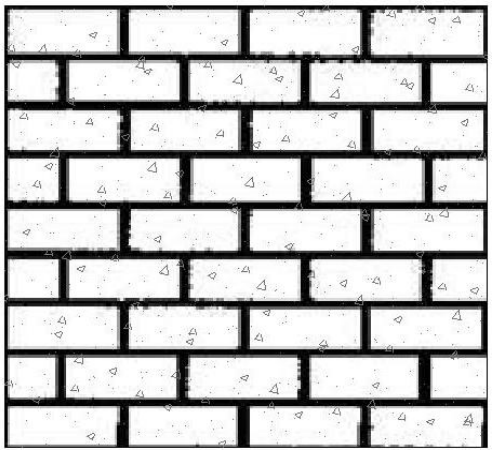

**Figura 2.11: Assentamento fileira.**

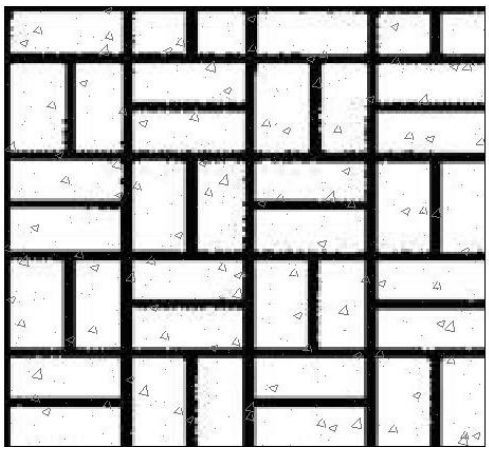

**Figura 2.12: Assentamento tipo trama.**

### 2.3.5 Requisitos técnicos

Na sequência são apresentados os requisitos técnicos necessários aos *pavers* para uso na pavimentação intertravada. São discutidas as recomendações indicadas pelas normas brasileiras, bem como internacionais.

As normas tanto nacionais quanto internacionais segundo FIORITI (2007) e SCHAKEL (1990) seguem cinco características básicas para controle do *paver*: materiais (tipos de cimento, agregados, aditivos e água), tolerâncias adimensionais (comprimento e largura variando de 2 a 3 mm e a altura de 2 a 5 mm), resistência (depende da norma do país), durabilidade (ensaio de abrasão) e aparência (uniformidade, textura e cor).

#### *2.3.5.1 Norma Europeia*

Elaborada pela *European Committee for Standardization* (CEN) a norma BS EM-1388 (2003): *concrete paving blocks requirements and test methods*, consta de três partes: definições gerais e requisitos de materiais e produtos fabricados, avaliação da conformidade dos produtos produzidos e oito anexos da metodologia dos ensaios requeridos.

O ensaio de resistência adotado pela norma é o de tração indireta feito para os corpos de prova cilíndricos o que diferencia da norma brasileira. Como se pode ver na tabela 2.1 uma relação dos ensaios requeridos na norma e seus respectivos limites aceitáveis.

**Tabela 2.1: Requisitos da norma BS EN 1338 (2003)**

| Requisito | | Limites aceitáveis | | |
|---|---|---|---|---|
| Resistência a ciclos de gelo-gelo | | Média de 3 resultados < 1,0 Kg/m² e nenhum resultado individual >1,5 Kg/m² | | |
| Absorção | | < 6% | | |
| Resistência à tração por compressão | | Nenhum resultado individual <3,6 MPa e a carga de ruptura < 250 N/mm | | |
| Resistência à abrasão | | <23mm | | |
| Resistência frenagem/escorregamento | | > 45 | | |
| Aspectos visuais: Textura e cor | | Nenhum *paver* deve apresentar fissuras | | |
| Tolerância dimensional (mm) | Altura da peça | Comprimento | Largura | Altura |
| | < 100 | ± 2 | ± 2 | ± 3 |
| | > 100 | ± 3 | ± 3 | ± 3 |

**Fonte: adaptado de FIORITI (2007)**

#### *2.3.5.2 Normas Americana e Canadense*

Os primeiros estudos sobre o *pavers* foram feitos pelo ICPI (Instituto de Pavimento de Peças Pré-Moldadas de Concreto), na década de 1990. A partir destes estudos foram criadas duas normas: a americana ASTMC936:1996: *Standard specification for solid concrete interlocking paving units*, e a canadense CSAA23.2-95:1995: *Precast concrete pavers*. Os valores específicos de cada norma podem ser comparados na Tabela 2.2.

#### *2.3.5.3 Norma Brasileira*

A norma brasileira NBR 9780:1987 especifica o método de determinação da resistência característica à compressão de *pavers* de concretos. Deve ser maior ou igual a 35 MPa para solicitação de veículos comerciais, ou de linha, e maior ou igual 50 MPa quando houver tráfego de veículos especiais ou solicitações capazes de produzir acentuados efeitos de abrasão.

Para a realização deste ensaio a amostragem deve ser de no mínimo 6 peças, para lotes de até 300m$^2$, e uma peça adicional para cada 50m$^2$ suplementar, até o máximo de 32 blocos.

O ensaio de resistência deve ser executado de acordo com a NBR 9780 (ABNT, 1987a). O valor característico da resistência à compressão pode ser estimado pela seguinte equação:

(Equação 1)

Em que:

• $f_{pk}$ = resistência característica à compressão;

• $f_p$ = resistência média das peças ensaiadas;

• s = desvio padrão da amostra

**Tabela 2.2: Valores Aceitáveis das normas americana e canadense para os pavers**

| **Requisitos** | | **Limites aceitáveis** | |
|---|---|---|---|
| | | **ASTM-C936** | **CSA A231.2-95** |
| Dimensões das peças | Área do paver | <0,065 m² | |
| | Comprimento/espessura | ≤4 | |
| Tolerância dimensional (mm) | Comprimento | ± 1,6 | -1,0/ +2,0 |
| | Largura | ± 1,6 | -1,0/+2,0 |
| | Altura | ± 3,2 | ± 3,0 |
| Resistência à compressão (MPa) | Média | ≥ 55,0 | ≥ 50,00 |
| | Individual | ≥ 55,0 | ≥ 45,0 |
| | Corpo-de-prova | Peça inteira | Cubo ou cilindro extraído da peça-diâmetro/altura= 1/1 |
| Área considerada no ensaio de resistência à compressão | | Área líquida | Área da seçãode aplicação da carga |
| Absorção | Média | ≤ 5% | - |
| | Individual | ≤ 7% | - |
| Resistência ciclos gelo-degelo | | Perda de massa <1%(após 50 ciclos) | Média 3 amostras após 25 ciclos ≤ 200g/m² após 50 ciclos ≤ 500g/cm² |
| Resistência à abrasão (perda de volume) | | ≤ 15cm³/ 50 cm² | - |

**(Fonte: adaptado de ASTMC936 e CSA A23.2-95)**

A Norma brasileira NBR9781: 1987fixa as condições exigíveis para a aceitação dos *pavers* destinados à pavimentação de vias urbanas, pátios de estacionamento e similares. Estabelece que as peças pré-moldadas de concreto devem ser fabricadas por processos que assegurem a obtenção de concreto suficientemente homogêneo, compacto e de textura lisa. Devem possuir as arestas da face superior bisotadas com um raio de 3 mm, não devendo possuir ângulos agudos e reentrâncias entre dois lados adjacentes. Quanto ao desempeno das faces, não são toleradas variações superiores a 3 mm, que devem ser medidas com o auxílio de régua apoiada sobre o bloco. Quanto às dimensões: largura ≥ 100 mm com tolerância de 3 mm, altura ≥

60 mm com tolerância de 5mm e comprimento ≤ 400mm, conforme Tabela 2.3: Requisitos físicos para a produção de *pavers*

Quanto à espessura, a IP-06 (PMSP, 1999) baseado nas normas brasileiras, recomenda que as peças tenham no mínimo 6 cm de espessura, para pavimentos com tráfego leve, 8 cm para aqueles submetidos ao tráfego de veículos comerciais e 10 cm para casos especiais.

Norma Brasileira NBR 12042:1992 estabelece que o valor de resistência a abrasão para um trecho de 1000 m deve ser:

- ✓ Grupo A: piso com grande solicitação de tráfego ≤ 0,8 mm
- ✓ Grupo B: tráfego intenso de pedestres entre 0,8 mm a 1,6 mm
- ✓ Grupo C: tráfego leve entre 1,6 mm a 2,4 mm

**Tabela 2.3: Requisitos físicos para a produção de pavers**

| **Requisitos físicos** | | **Limites admissíveis** |
|---|---|---|
| Tolerância dimensional( mm) | Comprimento | ± 3,0 |
| | Largura | ± 3,0 |
| | Altura | ± 5,0 |
| Resistência à compressão( MPa) | 1 | ≥ 35,0 para solicitações de veículos comerciais de linha |
| | 2 | ≥ 50,0 para solicitações de veículos especiais ou cargas que produzem acentuados efeitos de abrasão |

**(fonte: NBR 9781, 1987)**

Segundo FIORITI (2007) a norma brasileira NBR 9780 tem valores mínimos exigidos que fazem com que os *pavers* tenham que suportar resistências elevadas, não levando em consideração outros usos em que as sobrecargas são pequenas como é o caso de calçadas, praças e ciclovias. Comparadas as normas internacionais de países como Austrália e África do Sul, os quais se encontram em regiões de condições climáticas semelhantes ao Brasil, se comparado aos países de clima temperado e levando-se em conta a experiência desses países com a pavimentação intertravada seria exequível aceitar recomendações semelhantes às deles. Nas normas da Austrália e da África do Sul a resistência característica à compressão exigida é de 25 MPa para tráfego leve e 35 MPa para os demais tipos de tráfego. Para calçadas, praças e ciclovias os valores de 15 MPa já seriam valores suficientes para a solicitação. Portanto, a norma brasileira poderia ser revista. A ABNT criou o comitê CB18, para rever as normas brasileiras referentes ao pavimento intertravado.

#### *2.3.5.4 Norma Africana*

A norma da África do Sul SANS 1058:2009 define que os valores mínimos exigidos para a resistência a compressão dos *pavers* são de 25 Mpa para veículos leves e de 35 Mpa para veículos pesados. Esta norma foi revista em 2010 para acrescentar testes de tração, abrasão e absorção de água, em busca de um melhor padrão na produção dos *pavers*.

#### *2.3.5.5 Norma Australiana*

A norma Australiana AS/NZS 4456.4:2003define que os valores mínimos exigidos para a resistência a compressão dos *pavers* são de 25 Mpa para veículos leves e de 60 Mpa para veículos especiais e para ciclovias e estacionamento os valores dão de 15 Mpa.

### 2.3.6 Vantagens do pavimento intertravado

Diversas são as vantagens de utilização dos pavimentos intertravados se comparadas às demais técnicas de pavimentação, entre elas podem ser citadas:

- Na sua fabricação consomem menos energia se comparados ao pavimento asfáltico, apresentam maior uniformidade dimensional, pois são produzidas em máquinas vibro-compressoras adequadas e são produzidas com matéria prima local e não com derivados de petróleo;
- Na sua construção utiliza ferramentas simples de pedreiro, equipamento de corte e uma vibro-compactadora. Não necessita de mão-de-obra especializada, apenas uma equipe treinada executa o trabalho, podendo criar várias frentes de trabalho economizando tempo na construção;
- As peças são de fácil estocagem, com utilização imediata e permitem a liberação do tráfego logo após sua instalação;
- Podem ser construídos por etapas de acordo com o orçamento financeiro;
- Adaptam-se às ruas íngremes e curvas;
- Apresenta grande capacidade estrutural, excelente aparência, alta resistência a ataques de óleos e ao derramamento de combustíveis, ou seja, alta resistência a abrasão, por isso seu uso é indicado para áreas portuárias e industriais;

- Tem resistência à derrapagem igual ou maior que os demais pavimentos, principalmente em condições de chuva;
- Tem a capacidade de manter a continuidade do pavimento mesmo quando sujeitos a acomodação do subleito;
- Apresentam facilidades ao acesso às instalações de serviços subterrâneos, como redes de água, esgoto e elétrica;
- Sua cor clara permite maior conforto térmico e maior visibilidade; alguns estudos comentam também economia de energia elétrica para iluminar vias com este pavimento; (ABCP, 2009)
- Variedades de cores, formas e texturas;
- Pode ser incorporada a sinalização horizontal da via dispensando pinturas. Isso possibilita liberdade ao projeto das vias.

### 2.3.7 Fabricação das peças

A fabricação dos *pavers* é classificada em três tipos distintos:

- As peças viradas - Produção manual: São peças que em sua produção é usado o concreto plástico em formas conjuntas ou individuais, adensadas em mesa vibratória e desmoldada logo após a moldagem em uma base plana e impermeável. Isto faz com que as peças tenham a superfície lisa, dando a aparência estética mais agradável.
- As peças dormidas - Produção manual: São peças que em sua produção é usado o concreto, mas não o concreto plástico, apesar do preenchimento dos moldes serem iguais, com o auxílio de uma mesa vibratória, deixando o concreto endurecer, procedendo a desmoldagem no dia seguinte da moldagem.
- As peças vibroprensadas - Produção mecânica: São peças que em sua produção é usado o concreto seco com a utilização de vibroprensas hidráulicas ou mecânicas.

As peças vibroprensadas são as mais utilizadas pela sua alta produção e alto controle tecnológico. Estes equipamentos são vibroprensas multifuncionais que podem ser utilizadas na

produção de uma grande família de produtos de artefatos de cimento, tais como: blocos de concreto, tijolos, meio fio, grelhas, peças pré-moldadas de concreto (*pavers*) e placas.

Com relação às vibroprensas, desde a década de 1970, vários tipos de equipamentos têm sido patenteados em todo o mundo. Uma classificação inicial destes tipos de equipamentos é quanto ao seu processo de desmoldagem, divididos em:

- Vibroprensa tipo poedeira;
- Vibroprensa com desmoldagemsobre paletes;
- Vibroprensa com desmoldagem de multi-camada 30.

As vibroprensas tipo poedeira são equipamentos dotados de pneus ou trilhos para se movimentarem livremente. Utilizam o próprio piso onde se movimentam para desmoldar as peças. Este tipo de equipamento é pouco utilizado em nosso país nos dias de hoje. As vibroprensas que desformam sobre paletes utilizam a própria mesa da máquina para efetuar as operações de desmoldagem. Os equipamentos são estáticos e o processo de desformar é realizado sobre paletes, que alimentam manual ou automaticamente o equipamento a cada ciclo de fabricação. Os paletes são recolhidos em mesas transportadoras e dispostos em prateleiras especiais ou colocadas em áreas pré-determinadas para iniciar a etapa de cura. A capacidade produtiva destes equipamentos é definida pelo seu tamanho, tipo de acionamento de vibração e prensagem (pneumático e/ou hidráulico), potência e tipo de vibradores empregados. Um fator diferenciador é o sistema de alimentação do concreto à máquina que permite manter a constância e homogeneidade de produção. Apesar das características multifuncionais das vibroprensas, sua regulagem de energia de vibração se dá pela prensagem e pelo tipo de peça a ser produzido. A máxima compacidade da mistura seca nas peças vibroprensadas é obtida por meio do ajuste conjunto da dosagem do concreto utilizado com a potência e vibração do equipamento. A forma geométrica, volume de concreto por peça, altura e superfície de contato entre a peça e a forma da máquina também influem no desempenho das peças produzidas.

Existe um paletizador automático integrado à máquina de multicamada. Segundo Imazu (1996) as principais vantagens do sistema de arranjo automático com cores distintas são:

- Possibilita combinar peças de três diferentes cores e três diferentes formas geométricas concomitantemente;
- Possibilita a montagem de quatro arranjos de assentamento;

- Mistura modelos de peças no mesmo palete;
- Produz uma bandeja de até 1,14 m² de peças por palete.

A Figura 2.13 apresenta um exemplo de máquina vibroprensas e a Figura 2.14 um fluxograma da produção dessas peças:

**Figura 2.13:Moldagem das peças na vibroprensa semi automática (Fonte: AKASAKI *et al.*, 2004)**

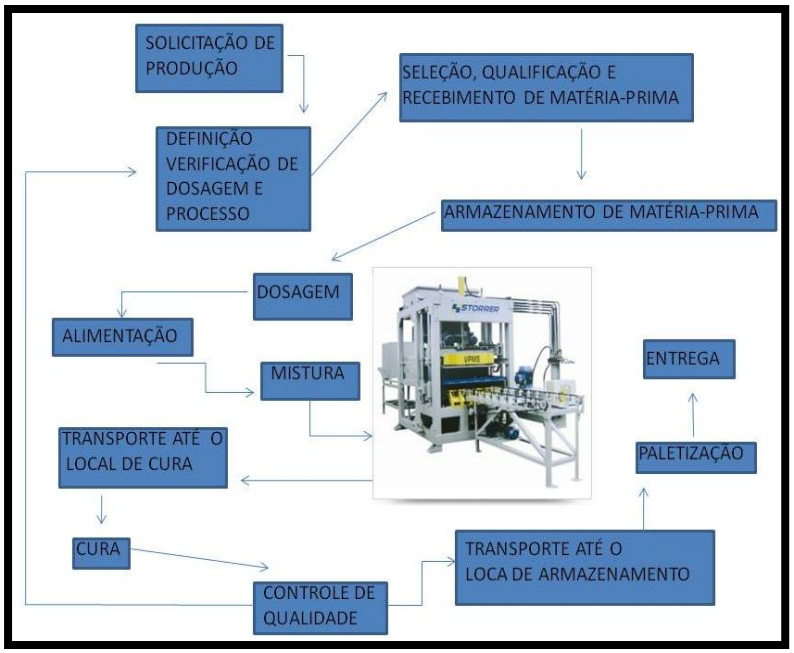


**Figura 2.14:Fluxograma da Fabricação das peças (Fonte: compilado ABCP,2009)**

## 2.4 CONSTRUÇÃO DO PAVIMENTO

Para que o produto atenda as vantagens que ele oferece, alguns critérios devem ser adotados, descritos a seguir.

Em primeiro lugar, deve-se conhecer a procedência do *paver* a ser adquirido. Deve-se verificar se o fabricante segue as normas técnicas brasileiras e se prima pela qualidade de seus produtos.

Após adquirir um produto de qualidade técnica comprovada, é necessário verificar as condições do solo onde será assentado o *paver.* É Recomendado que seja feito um projeto de pavimentação em obras de grande porte, onde um engenheiro responsável irá avaliar as condições do solo encontrado por meio de sondagens. Em seguida, determinar pelo projeto se é necessário fazer um reforço na sub-base, pois tão essencial quanto a resistência do *paver* é a resistência da base para assentamento do produto (ABCP,2009).

A ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) disponibiliza uma cartilha de explicação passo-a-passo de como é feita a instalação do *paver*, como se encontra a seguir, pois no Brasil não existem normas técnicas para a execução, apenas para o produto em questão. Esta cartilha é uma obra de pequeno porte, uma calçada, por isso não existe a preocupação com o subleito, mas é importante salientar que também é necessária a preocupação com esta camada, sua compactação e adequação, sendo nesta fase feita a linha de drenagem e redes subterrâneas. As Figura 2.15 a Figura 2.30mostram as etapas da construção de um trecho com o pavimento intertravado.

**Figura 2.15: Execução da base (Fonte: ABCP,2009)**

**Figura 2.16: Regularização e compactação da base (Fonte: ABCP,2009)**

**Figura 2.17: Colocação de tubo régua guia (Fonte: ABCP, 2009)**

**Figura 2.18: Colocação de areia de assentamento (Fonte: ABCP, 2009)**

**Figura 2.19: Nivelamento da areia assentamento (Fonte: ABCP, 2009)**

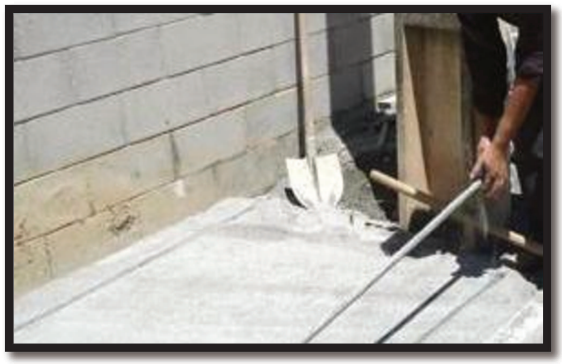

**Figura 2.20: Remoção dos tubos guias (Fonte: ABCP, 2009)**

**Figura 2.21: Preenchimento do espaço do tubo (Fonte: ABCP, 2009)**

**Figura 2.22: Colocação dos *pavers*(Fonte: ABCP, 2009)**

**Figura 2.23: Início do assentamento das peças (Fonte: ABCP, 2009)**

**Figura 2.24: Continuação do assentamento, observando as juntas (Fonte: ABCP, 2009)**

**Figura 2.25: Execução de recortes e paginação (Fonte: ABCP, 2009)**

**Figura 2.26: Compactação dos *pavers* com placa vibratória (Fonte: ABCP, 2009)**

**Figura 2.27: Retirada de peças quebradas (Fonte: ABCP, 2009)**

**Figura 2.28: Selamento das juntas com areia (Fonte: ABCP, 2009)**

**Figura 2.29: Recompactação com placa vibratória (Fonte: ABCP, 2009)**

**Figura 2.30: Varrição e inspeção final (Fonte: ABCP, 2009)**

As funções da contenção lateral são: conter o empuxo que é exercido no pavimento para evitar o deslocamento das peças, a abertura das juntas, o que acarretaria a perda do intertravamento e evitar a fuga da areia da camada de assentamento das peças, para isso a contenção lateral deve ter face interna vertical e reta e se estender por no mínimo 15 cm abaixo do topo da camada de areia.

A areia de selagem deve ser areia fina, granulometria sugerida é aquele que passa 100% na peneira número 16 e que passe 10% na peneira número 200. A areia deve ser limpa e seca, com umidade natural. A areia tem a função de ocupar os espaços entre as peças trabalhando com seu confinamento e distribuir as cargas verticais entre elas permitindo que uma trabalhe em conjunto com a outra e que assim todas suportem as cargas solicitantes (ABCP, 2009).

**Tabela 2.4: Granulometria para areia de assentamento**

| Peneira | | % que passa |
|---|---|---|
| 3/8 | 9,5mm | 100% |
| Nº 4 | 4,75mm | 95-100% |
| Nº 8 | 2,36mm | 80-100% |
| Nº 16 | 1,16mm | 50-85% |
| Nº 30 | 0,60mm | 25-60% |
| Nº 50 | 0,30mm | 10-30% |
| Nº 100 | 0,15m | 5-15% |
| Nº 200 | 0,075mm | 0-10% |

**Fonte: (ABCP, 2009)**

As funções da areia de assentamento são: proporcionar uma camada uniforme tanto em comportamento quanto em espessura para o assentamento das peças e preencher a parte inferior das juntas entre as peças, para se obter o intetravamento. A espessura recomendada desta camada, já compactada com as peças de concreto, é de 3 a 4 cm. Em nenhum caso esta camada pode ser usada para corrigir problemas no acabamento da base. Esta areia deve ser limpa, sem materiais

orgânicos e a granulometria sugerida para esta areia está apresentada na Tabela 2.4 (ABCP, 2009).

## 2.5 DIMENSIONAMENTO DA VIA PARA TRÁFEGO

As principais funções de um pavimento, segundo a NBR-7207:1987, são: resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais provenientes do tráfego; melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança; resistir aos esforços horizontais tornando mais durável possível a superfície de rolamento.

CRUZ (2003) afirma que a maioria dos métodos utilizados para o dimensionamento de pavimentos intertravados se baseia nos seguintes critérios:

- O pavimento intertravado é tratado como um pavimento flexível, passando a empregar métodos de cálculo de tensões originalmente desenvolvidos para pavimentos asfálticos;
- Utiliza-se uma relação linear para representar o comportamento tensão x deformação dos materiais das camadas e do subleito, inclusive admitindo que a camada composta pelos *pavers* e colchão de areia trabalha como uma camada equivalente ao revestimento asfáltico composto de concreto betuminoso quanto ao valor de módulo de resiliência;
- Admite-se que a existência das juntas entre as peças pré-moldadas dispensa a consideração de tensões de tração quando se realiza o dimensionamento, ou seja, a analogia com o revestimento asfáltico de uma camada contínua só é válida na modelagem numérica da distribuição de tensões, mas o comportamento real desta camada está longe de ser contínuo;
- As juntas funcionam como descontinuidades para as tensões de tração, ou seja, não transmitem esforços de tração entre peças e as pequenas dimensões das peças em relação à área de contato das cargas não levam ao desenvolvimento de flexão na própria peça;
- Considera-se que a utilização de base estabilizada com cimento é quase uma imposição da maioria das considerações de carga;
- Considera-se a espessura e a forma das peças fixas em muitos dos métodos de dimensionamento.

O Projeto de pavimento intertravado pode ser dividido em: dimensionamento estrutural; especificações (desempenho que o pavimento deve ter, ou seja, o programa) e projeto arquitetônico (estética, o desenho).

Para o cálculo das cargas elas podem ser móveis ou estáticas, podem ser importantes de acordo com sua magnitude ou pela quantidade de carga.

Nos Estados Unidos, a NCA (*National Concrete Masonry Association*), realizou uma adaptação do método de dimensionamento de pavimentos flexíveis da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) para a utilização em pavimentos intertravados. Já na Inglaterra o método utilizado segundo CRUZ (2003) e SHACKEL (1990) descreve o *LOCKPAVE* como o método de dimensionamento mecanístico de pavimentos intertravados, tanto para meios rodoviários quanto para áreas industriais.

Diversos estudos estão sendo realizados com o intuito do aperfeiçoamento de métodos de dimensionamentos que simulam o revestimento como uma camada elástica linear, baseados em constatações de que um pavimento intertravado possui diferentes mecanismos de distribuição de esforços e considerando-se que os pavimentos de peças de concreto são menos sensíveis a sobrecargas do que os pavimentos flexíveis.

### 2.5.1 Método de dimensionamento PCA-1984 (*Portland Cement Association*- USA)

O PCA é o método mais utilizado no Brasil. Atualmente é o método que o DNIT (Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes) utiliza.

No subleito o principal parâmetro que deve ser utilizado é o Índice de Suporte Califórnia (CBR), porém considera-se também necessário, dependendo do porte da obra, os ensaios de caracterização, de expansão e a determinação dos índices físicos do material.

Através de tabelas determina-se a espessura de uma camada granular única, mas utilizando-se de fatores de equivalência estrutural é possível a definição de outros tipos e espessuras de materiais que podem ser utilizados na construção da base e da sub-base. Neste caso o fator de equivalência para camadas cimentadas é igual a 1,65. Este método envolve dois grupos:

Veículos de linha: caminhões, reboques, empilhadeiras e outros equipamentos de pequeno porte, o grupo 1.

Veículos especiais: guindastes, empilhadeiras de grande porte, transportadoras de contêineres, o grupo 2.

*Cálculo para veículos de linha (Grupo 1)*

Deve-se determinar o número previsto de solicitações de cada tipo de carga por eixo durante o período de projeto adotado, esse número é multiplicado por seu respectivo fator de equivalência em relação ao eixo padrão de 8,2 tf ou 80 kN. Este fator de equivalência encontra-se na

Tabela **2.5**,na Tabela 2.6.e na Tabela 2.7 verifica-se a espessura total da camada.

**Tabela 2.5:Fator de equivalência para veículos de linha em função do tipo de eixo (grupo 1)**

| **Veículos do primeiro grupo** | | |
|---|---|---|
| **Carga por eixo (tf)** | **Fator de equivalência** | |
| | **Eixos simples** | **Eixos tandem duplos** |
| 2 | 0,002 | |
| 3 | 0,008 | |
| 4 | 0,020 | 0,010 |
| 4,5 | 0,060 | 0,020 |
| 5 | 0,130 | 0,050 |
| 6 | 0,270 | 0,080 |
| 7 | 0,530 | 0,140 |
| 8 | 1,000 | 0,210 |
| 9 | 1,800 | 0,330 |
| 10 | 3,200 | 0,490 |
| 11 | 5,300 | 0,710 |
| 12 | 8,800 | 1,000 |
| 13 | 14,000 | 1,400 |
| 14 | 22,000 | 1,900 |
| 15 | | 3,300 |
| 17 | | 5,600 |
| 19 | | 9,000 |
| 21 | | 14,000 |
| 23 | | 21,000 |

**(Fonte: Adaptado de ABCP, 2009)**

**Tabela 2.6:Fator de equivalência para veículos sobre esteiras e empilhadeiras (grupo 1)**

| Veículos do primeiro grupo | | |
|---|---|---|
| **Peso bruto total (tf)** | **Fator de equivalência** | |
| | **Veículos sobre esteiras** | **Empilhadeiras** |
| 2 | 0,007 | 0,001 |
| 4,5 | 0,032 | 0,030 |
| 7 | 0,120 | 0,026 |
| 9 | 0,400 | 1,400 |
| 11 | 0,900 | 5,300 |
| 14 | 2,100 | 16,000 |
| 16 | 4,500 | 44,000 |
| 18 | 9,000 | 105,000 |
| 20 | 17,000 | |
| 23 | 31,000 | |
| 25 | 54,000 | |
| 27 | 91,000 | |

**(Fonte: Adaptado de ABCP, 2009)**

**Tabela 2.7: Número CAT2**

| Veículos do segundo grupo | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Número de solicitações do CAT 988B** | **Espessura total das camadas de base e sub-base (cm)** | | | | | | | | | | |
| | **CBR do subleito (%)** | | | | | | | | | | |
| | **2** | **2,5** | **3** | **3,5** | **4** | **5** | **6** | **8** | **10** | **15** | **20** |
| 100 | 71 | 59 | 52 | 45 | 41 | 34 | 28 | 21 | 16 | mínimo 15 cm | |
| 200 | 82 | 69 | 60 | 53 | 48 | 40 | 34 | 26 | 20 | | |
| 400 | 91 | 77 | 68 | 60 | 54 | 45 | 38 | 29 | 24 | | |
| 800 | 101 | 86 | 75 | 67 | 60 | 50 | 43 | 33 | 27 | 17 | |
| 1.000 | 105 | 89 | 78 | 69 | 62 | 52 | 45 | 35 | 28 | 18 | |
| 2.000 | 115 | 98 | 86 | 76 | 69 | 57 | 50 | 39 | 32 | 21 | |
| 4.000 | 121 | 103 | 90 | 80 | 72 | 61 | 52 | 41 | 34 | 22 | 15 |
| 8.000 | 132 | 112 | 98 | 87 | 79 | 66 | 57 | 45 | 37 | 25 | 18 |
| 10.000 | 136 | 116 | 101 | 90 | 81 | 68 | 59 | 47 | 38 | 26 | 19 |
| 20.000 | 144 | 123 | 107 | 96 | 86 | 73 | 63 | 50 | 41 | 28 | 20 |
| 40.000 | 150 | 128 | 112 | 100 | 90 | 76 | 66 | 52 | 43 | 30 | 22 |
| 80.000 | 161 | 137 | 120 | 107 | 97 | 82 | 71 | 56 | 47 | 32 | 24 |
| 100.000 | 163 | 139 | 122 | 109 | 98 | 83 | 72 | 57 | 47 | 33 | 24 |
| 200.000 | 174 | 149 | 130 | 116 | 105 | 89 | 77 | 61 | 51 | 36 | 26 |

**(Fonte: Adaptado de ABCP, 2009)**

A Tabela 2.8 apresenta o fator de equivalência para os veículos do grupo 2, na tabela 2.9 verifica-se o número de solicitações equivalentes do Caterpillar 988B.

**Tabela 2.8 Fator de equivalência grupo 2**

| Veículos do segundo grupo | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Equipamento** | | **Peso bruto do veículo (tf)** | **Número de rodas** | **Carga por roda simples (tf)** | **Fator de equivalência** |
| Empilhadeiras | Caterpillar 988B | 75 | 4 | 30 | 1,00 |
| | Hyster 700 | 81 | 6 | 19 | 0,80 |
| | Kalmar | 93 | 6 | 22 | 2,13 |
| | Clark C500 | 90 | 6 | 21 | 1,65 |
| | Taylor 66 | 96 | 6 | 22 | 1,76 |
| Transportadores de contêineres | Clark C512 | 70 | 6 | 13 | 0,28 |
| | Ferranti | 102 | 4 | 26 | 0,60 |
| Guindastes | Grove 80tf (A) | 125 | 4 apoios | 32 | 3,64 |
| | Grove 80tf (B) | 54 | 12 | 5 | 0,05 |

**Fonte: Adaptado de ABCP,2009**

**Tabela 2.9Número de solicitações tráfego misto**

| Tráfego misto | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Número de solicitações do eixo-padrão** | | **Número de solicitações equivalentes do Caterpillar 988B** | | | | | | | | |
| | | **CBR do subleito (%)** | | | | | | | | |
| | | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **8** | **10** | **15** | **20** |
| $1 \times 10^4$ | 10.000 | 16 | 16 | 16 | 16 | 15 | 13 | 11 | 6 | 2 |
| $4 \times 10^4$ | 40.000 | 25 | 24 | 24 | 24 | 23 | 20 | 16 | 9 | 3 |
| $1 \times 10^5$ | 100.000 | 33 | 32 | 32 | 31 | 30 | 26 | 21 | 10 | 3 |
| $4 \times 10^5$ | 400.000 | 49 | 48 | 48 | 47 | 44 | 38 | 31 | 14 | 4 |
| $1 \times 10^6$ | 1.000.000 | 64 | 63 | 63 | 61 | 58 | 49 | 39 | 17 | 4 |
| $4 \times 10^6$ | 4.000.000 | 97 | 95 | 94 | 91 | 87 | 73 | 57 | 23 | 5 |
| $1 \times 10^7$ | 10.000.000 | 130 | 125 | 122 | 119 | 113 | 94 | 73 | 29 | 5 |
| $4 \times 10^7$ | 40.000.000 | 195 | 187 | 161 | 177 | 167 | 139 | 106 | 39 | 6 |
| $1 \times 10^8$ | 100.000.000 | 250 | 240 | 234 | 230 | 217 | 179 | 135 | 47 | 7 |

**Fonte: Adaptado de ABCP,2009**

### 2.5.2 Metodologia de dosagem

A metodologia de dosagem utilizada para produção dos *pavers* depende do tipo de técnica de produção adotada. A maioria das fábricas utiliza vibroprensas requerendo concretos de consistência seca e coesão suficientes para se manterem íntegros até seu endurecimento, sem sofrer desmoronamentos ou quebra de arestas. A coesão da mistura é obtida principalmente em função da correta quantidade de finos em conjunto com a vibração e pressão de adensamento exercido pelo equipamento no momento da moldagem dos *pavers* (Shackel, 1991 e Abreu, 2002).

Para o concreto seco não existe método seguro de dosagem, pois diferentemente do que ocorre com o concreto plástico que, com plasticidade fixa e correlação entre a resistência, a quantidade água/cimento e o consumo de cimento. (Fernandes, 2008 e Metha, 1994).

### 2.5.3 Composição

Os materiais constituintes na produção dos *pavers* são as britas de dimensão máxima de 9,5 mm, areia natural e ou artificial, cimento portland, água, aditivos químicos, pigmentos e adições minerais, fluidos estes empregados quando são requeridas algumas características especiais, como, por exemplo, o controle de eflorescência e maior resistência à abrasão dos *pavers.*

A compacidade é obtida com o proporcionamento dos materiais disponíveis (distribuição granulométrica dos agregados e umidade da massa) e da vibroprensa utilizada.

Os materiais que compõem a dosagem são:

- Cimento Portland: CP V ARI, CP-II-E, CP-II-F-CPII-Z, todos devem atender às especificações brasileiras NBR 5732, NBR 5733, NBR 5735, NBR 11578, NBR 5737 quanto aos limites mínimos de qualidade. Os cimentos indicados para a produção de blocos e *pavers* são CPV ARI e cimentos da classe CP40 que apresentam 50 MPaaos 28 dias (Fernandes,2008).
- Agregados
  - Agregado Graúdo- brita zero: material retido na peneira 4,8 e diâmetro máximo de 9,5 mm, Coeficiente de forma: >0,15, o mais cúbico possível.
  - Agregado miúdo: de 25% a 35% de material passante na peneira 0,3mm. Coeficiente de forma: > 0,20, o mais arrendondado possível. Módulo de finura: 2,20 a 2,80.
  - Os agregados deverão atender os requisitos prescritos na norma brasileira NBR 7211.
- Aditivos: incorporadores de ar
- Pigmentos: pigmentos sintéticos a base de óxidos em pó ou liquido, componente responsável pela cor das peças.

## 2.6 O AGREGADO

Segundo Fernandes (2008) as principais características para um agregado de qualidade são: tipo de rocha, dimensão máxima, formato, rugosidade superficial e dureza dos grãos, curva granulométrica e limpeza do material.

Os agregados utilizados na produção dos *pavers* são areia natural ou industrializada, pó de pedra e pedrisco.

### 2.6.1 Agregado reciclado

Atualmente buscam-se soluções para diversos problemas ambientais, dentre eles o destino final de resíduos da construção civil, conhecido como RCD. A fração mineral inerte do RCD vem cada vez mais sendo beneficiada e reutilizada na confecção de produtos reciclados, assim como: brita, areia e diversos outros artefatos. Porém, não basta a fabricação desses produtos sem seu devido emprego no cotidiano da construção.

Segundo a NBR 10004(2004) os resíduos provenientes da construção civil podem ser classificados como uma mistura de materiais inertes, não perigosos, e conforme as classes da Conama 307 estes se classificam como classe II B, caracterizando-se por ter baixa degradação. Uma das principais vantagens deste resíduo é a possibilidade de reutilização no próprio processo, ou na obtenção de produtos para o mesmo, pois segundo Pires (2003),cerca de 90% do volume corresponde a materiais desta classe, podendo ser reutilizados.

O agregado reciclado é uma mistura de agregado graúdo e miúdo, gerado pela operação de britagem, em geral com o britador de mandíbula. A porcentagem de cada agregado depende basicamente da granulometria e da composição do entulho, bem como do diâmetro máximo do agregado graúdo reciclado. A granulometria desejada pode ser obtida mediante pequenos ajustes na abertura do britador e pelo conjunto de peneiras instalado. Em geral, o agregado reciclado apresenta uma forma mais irregular e uma textura superficial mais áspera e porosa. Os estudos realizados sobre a utilização de agregados reciclados confirmam a potencialidade do seu uso na produção de diversos sub-produtos e materiais de construção (PINTO, 1997).

A aplicação do agregado reciclado na produção de concreto apresenta algumas vantagens semelhantes às da pavimentação, além de apresentar a possibilidade de melhorias no desempenho do concreto em relação aos agregados convencionais, quando se utiliza baixo consumo de cimento (CARNEIRO, 2001).

Segundo MEDINA e MOTTA (2005), a ABNT em 2004 publicou as primeiras normas nacionais vigentes que especifica prescrições técnicas referentes aos agregados provenientes da

reciclagem. Estas tratam desde a instalação de recebimento do material até a aplicação destes em pavimentação ou em concretos sem função estrutural, sendo as seguintes normas:

- NBR 15112 – Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15113 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15114 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Área da reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15115 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos;
- NBR 15116 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

A utilização de agregado reciclado como componentes básicos para pavimentos são utilizados em países da Europa, Estados Unidos entre outros, todos com resultados bastante satisfatórios.

### 2.6.2 Pó de pedra

A característica principal do pó de pedra é a variação de granulometria e quantidade de finos, pois um material muito fino, ou seja, dimensão menor que 0,074 mm, atua como um material inerte consequentemente diminuindo a resistência do concreto; já uma areia grossa, sem finos, dificulta a coesão da mistura. O pó de pedra ideal é aquele com uma quantidade balanceada de finos para juntar aos pedriscos, completando assim a curva ideal para a produção dos *pavers* (FERNANDES, 2008).

### 2.6.3 Areia de Fundição

Denomina-se fundição, o processo de fabricação em que um metal completamente fundido (estado líquido) é vazado na cavidade de um molde projetado com o formato desejado, seguindo-se de um resfriamento a fim de produzir uma peça sólida resultante da solidificação. O

processo de fundição emprega modelos, machos e moldes que promovem às peças fundidas a sua conformação de acordo com as etapas existentes de moldagem, fusão e acabamentos (CHEGATTI, 2004).

O processo de fundição no Brasil teve início com a chegada dos primeiros imigrantes, na maioria colonos que utilizavam o ferro como matéria-prima para a confecção de seus instrumentos de trabalho na lavoura. No início do século XVIII, o ferro já começava a se tornar imprescindível aos povoadores para a fabricação de utensílios como fechaduras, pregos, cravos, enxadas, foices, pás, armas e cunhas para o aprisionamento de índios e negros (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS, 1989).

No Brasil, a produção de ferro data o ano de 1554, quando o Padre José de Anchieta anunciou à Coroa de Portugal a descoberta de minérios de ferro na região de São Paulo (OLIVEIRA, 1998).

Com o advento da indústria automobilística, na década de 50, criou-se demanda suficiente para impulsionar a indústria de fundição não só em São Paulo, mas em todo Brasil (OLIVEIRA, 1998).

A técnica de fundir metais foi aperfeiçoada continuamente por meio das experiências que buscavam a melhoria dos moldes e da forma de vazar a liga metálica, sendo hoje esta prática essencial para a qualidade das atividades de fundição (CHEGATTI, 2004).

Em 2010, segundo dados da ABIFA (Associação Brasileira de Fundição), o Brasil ocupava o 11º lugar entre os produtores mundiais de fundidos, produzindo quase 4.250.200 toneladas/ ano.

A indústria de fundição é um dos segmentos da economia que apesar de utilizar sucata como matéria-prima para a fabricação de suas peças é grande geradora de resíduos sólidos destacando-se em maior volume a areia de fundição advinda das atividades de moldagem e desmoldagem. Mas é importante ressaltar que além da areia outros resíduos são gerados no processo de fundição e que representam uma menor parcela, citando-se: o pó de exaustão gerado pelo sistema de mistura e preparo da areia, as escórias e refratários oriundos da fusão dos metais, a areia da quebra de canais e o pó das atividades de acabamento (ABIFA, 2006).

Para dar um destino adequado ao resíduo alguns estudos foram feitos no Brasil incorporando a areia de fundição como agregado para a pavimentação, e todos eles obtiveram

resultados positivos em seus testes, como é o caso de COUTINHO (2004); STEFENOM(2003) e BONET (2002) entre outros.

*Tipos de Areia de Fundição*

Os processos de fundição em todo o mundo utilizam, em sua grande maioria, como areia-base a areia de quartzo ou sílica como matéria-prima fundamental para a confecção de moldes e machos, na obtenção de peças fundidas. Esta areia é encontrada com relativa abundância na natureza (CASTRO, 2001).

Castro (2001) em seu trabalho realizado junto a Sibelco Mineração Ltda e apresentado no Congresso de Fundição (CONAF) em 2001 destaca que sendo o Estado de São Paulo um produtor potencial de peças fundidas do país, é também o maior produtor desse bem mineral, estando as suas principais jazidas situadas na região de Descalvado e Analândia, na faixa centro/leste do Estado, e estas também são responsáveis pela maior parte da produção de areia vidreira no Estado de São Paulo. No sul do país as principais fundições estão no Estado de Santa Catarina, onde jazidas de areia para fundição também são produtoras de areia e quartzo moído para cerâmicas, concentradas em dois pólos: um no litoral norte, que atende o norte do estado e outro no litoral sul, que atende o sul de Santa Catarina e também o estado do Rio Grande do Sul.

Conforme SCHEUNEMANN(2005) os requisitos básicos para um desempenho satisfatório das areias de fundição são: possuir estabilidade dimensional e térmica a elevadas temperaturas; possuir tamanho e formato de partículas adequado; ser quimicamente inerte a metais fundidos; não ser facilmente molhada por metais fundidos; não conter elementos voláteis que produzam gases ao serem aquecidas; ser disponível em grandes quantidades e a preços razoáveis; possuir pureza e pH de acordo com os requisitos dos sistemas ligantes; ser compatível com os atuais e novos ligantes químicos à medida que são desenvolvidos.

A areia verde de fundição é uma mistura de vários elementos que se combinam dando características de perfeita trabalhabilidade da mistura que compõem a caixa de moldagem (CUNHA *et al.* 2005).

Maleabilidade, compatibilidade, refratariedade, coesão, resistência a esforços mecânicos como compressão e tração, expansividade volumétrica, permeabilidade e perfeita desmoldagem são algumas características que a areia adquire devido sua mistura (BONIN, 1995).

A areia verde de fundição é constituída basicamente por: areia, pó de carvão, bentonita e água (COSTA e GIÃO, 2001).

## 2.7 ESTUDOS REALIZADOS PARA A PRODUÇÃO DO *PAVER* COM RESÍDUOS SÓLIDOS PROVENIENTES DA RECICLAGEM

No estudo feito por Angulo e John, pela escola politécnica USP, em 2002, foi avaliada a adequação às condições brasileiras das especificações internacionais, e das especificações de um pesquisador brasileiro (LIMA, 1999) sobre agregados graúdos produzidos pela reciclagem de RCD para o uso em concretos. Nesta pesquisa foram coletadas amostras de agregados de RCD reciclados de uma central de reciclagem piloto no município de Santo André, no estado de São Paulo, que recebia na época um volume de 4m³ de RCD/dia. Este volume foi reduzido a 10% em volume e coletado segundo procedimentos expostos na NBR 7216 e NBR 10007. Foram feitos ensaios de caracterização dos materiais encontrados e conclui-se que a curva granulométrica estava fora dos intervalos permitidos para as normas holandesas de agregados, como se pode ver na Figura 2.31, sugerindo então um maior controle granulométrico nas usinas de reciclagem.

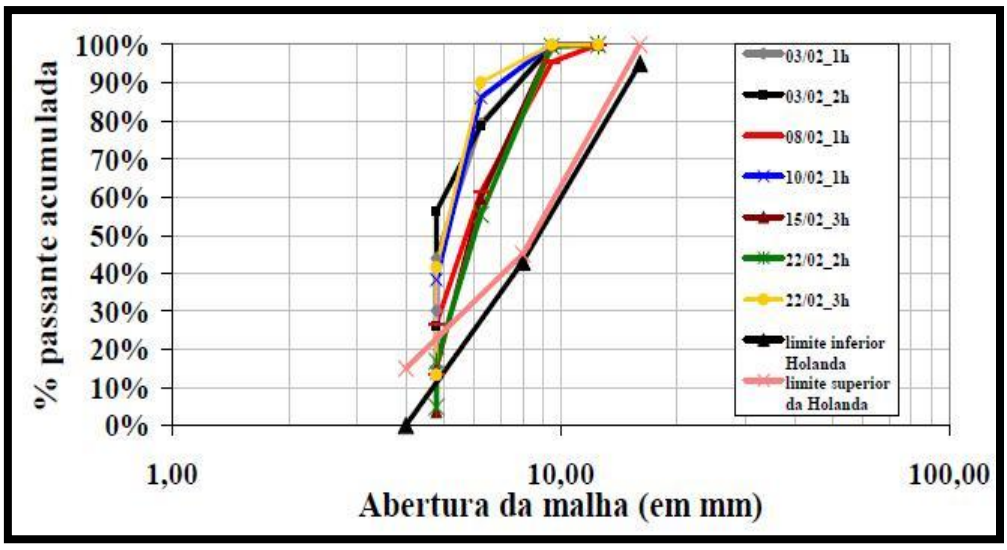


**Figura 2.31: Curva Granulométrica de agregado RCD(Fonte: adaptado de Ângulo, 2002)**

Outro fator analisado é o teor de contaminantes encontrado nos RCD, como se vê na Figura 2.32.

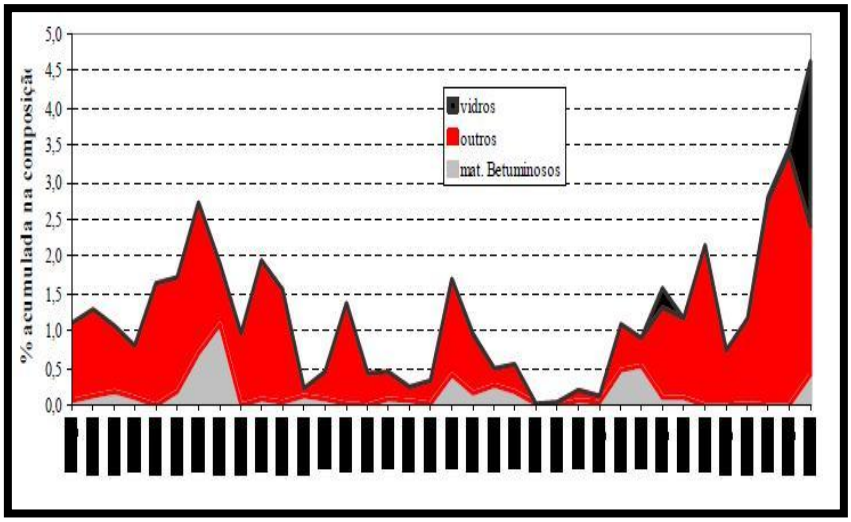


**Figura 2.32 – Teor de contaminantes encontrados no agregado RCD (Fonte: Ângulo, 2002)**

Portanto, pelos os resultados deste estudo foi possível concluir que no Brasil os RCD não poderiam ser utilizados para concreto estrutural, por não atenderem as normas de granulometria, teor de contaminantes, materiais pulverulentos, massa específica e absorção de água. Como solução deveria se ter um controle mais adequado dos agregados beneficiados nas Usinas de Reciclagem.

No estudo de Buttler e Correia (2006) do Departamento de Engenharia de Estruturas (USP) sobre o desenvolvimento de unidades de alvenaria estrutural produzidas com agregados reciclados de concreto, foram produzidos blocos estruturais com resistências de 4,5 MPa, 8,0 MPa e 12MPa, através de uma vibro-prensa da marca Piorotti ( com controle de alimentação, vibração e compactação). Das peças fabricadas constatou-se que, para a propriedade de absorção de água, os blocos com agregados reciclados apresentaram valores significativamente maiores em comparação às unidades de referência, devido à argamassa ser porosa. Para a propriedade de retração por secagem, todos os exemplares cumpriram a norma que estabelece uma retração máxima de 0,065%, para as propriedades de resistência à compressão e tração indireta, os valores obtidos foram equivalentes as unidades de referência, de forma geral o resultado foi satisfatório.

No estudo feito por Mizumoto *et al.* (2007), utilizou-se agregado reciclado do resíduo da construção civil para a fabricação de *pavers*. A metodologia utilizada foi divida em etapas onde primeiramente foi feito a seleção do resíduo, composição química e características físicas do

mesmo, em seguida foi avaliado a possibilidade do uso do concreto de consistência plástica, que permite a fabricação das peças em formas de plástico. Os materiais utilizados foram: aglomerante cimento CP V ARI), água, agregado (pedrisco < 7,0 mm, areia fina e média, agregado reciclado de concreto proveniente da britagem de blocos de concreto). Concluiu-se neste estudo que analisando o espraiamento diametral manteve-se dentro dos padrões. O traço do concreto em estudo visou facilitar a produção das peças em formas plásticas, dispensando o uso de mesa vibratória. Utilizou-se 0, 20, 40, 60 e 80 % de incorporação de agregados reciclados. Os materiais foram avaliados segundo os procedimentos para os ensaios de caracterização granulométrica para agregados (NBR NM 248 e NBR 7211), determinação de umidade (NBR 9775) e massa unitária (NBR 7251). Para o agregado fino foram realizados ensaios de absorção (NBR NM 30), análises das impurezas orgânicas (NBR NM45) e da massa específica, e para o agregado graúdo, determinadas a massa especifica aparente e a absorção (NBR NM 53). O traço utilizado foi 1:2,36:1,81 com 0,8% aditivo. Foram confeccionados3 corpos de prova de 10 cm x 20 cm. O ensaio de resistência a compreensão feito aos 7, 28 e 56 dias resultou que, até 40% de substituição, os valores encontrados comparados ao padrão foram superiores. Como se pode verificar na figura 2.33.

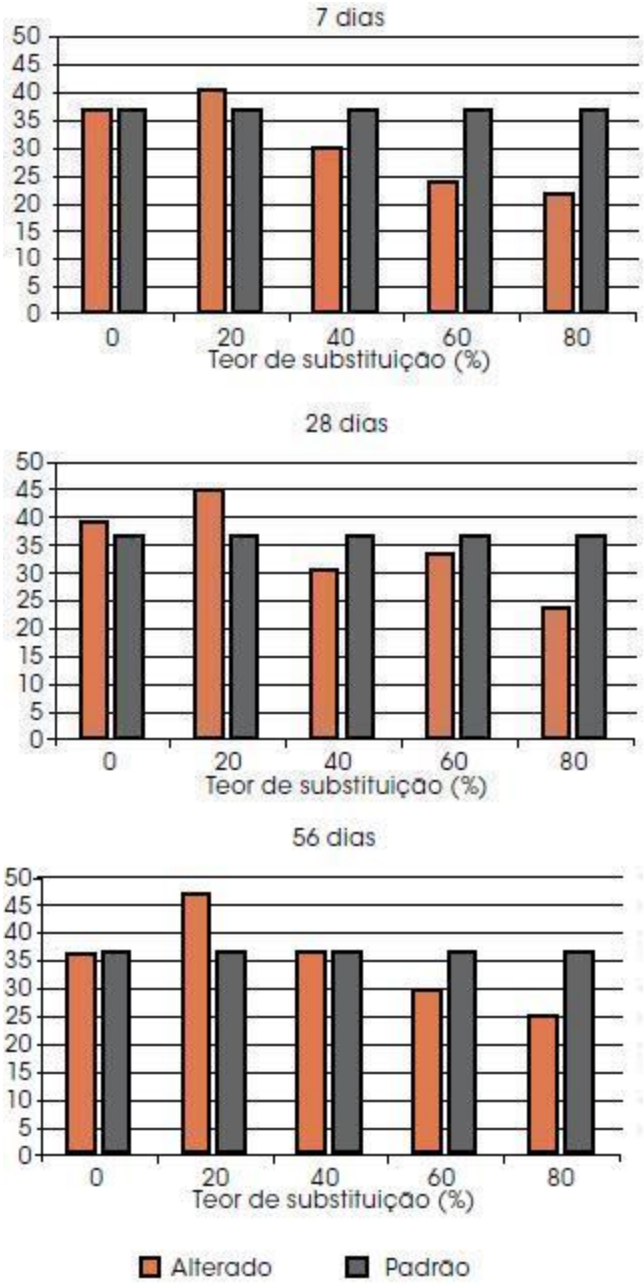


**Figura 2.33– Resultado ensaio de Resistência a compressão (Fonte:Mizumoto *et al,* 2007)**

No estudo feito por SANTOS e BORJA (2007) utilizou-se resíduo de pneu reciclado na fabricação dos *pavers*. Após a definição do traço de referência e com base em pesquisas bibliográficas, optou-se pela substituição parcial da areia pelo resíduo de pneu nas proporções, em massa, de 10%, 20% e 30%. Foram moldados9 corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura para cada traço, incluindo o traço de referência e os outros 3 com

acréscimos de pneu nas proporções acima citadas. Foram determinadas as massas específicas e a resistência à compressão para as idades de 1 dia, 3 dias, 7 dias e 28 dias, com as quantidades de amostras distribuídas da seguinte forma: 2 CP´s para serem ensaiados com 1 dia, 2 CP´s para 3 dias, 2 CP´s para 7 dias e os últimos 3 CP´s ensaiados com 28dias. A sigla CP é usada para designar Corpos de Prova. No traço feito sem a adição de resíduo de pneu, a resistência atingida foi de 38 MPa. Em significante contraste com esse valor, a resistência obtida do traço feito com 30% de resíduo de pneu atingiu 12 MPa, portanto não atende a norma brasileira.

No estudo feito por FERRAZ *et al.* (2007) utilizou-se os rejeitos de pisos cerâmicos da construção civil no processo de fabricação de blocos intertravados para pavimentação. Utilizou-se um cimento hidráulico do tipo CP II F 32 da marca Itaú de embalagem de 50 kg, do qual se avaliou as principais características em laboratório. O agregado foi produzido por moagem em britador de mandíbula, classificado granulometricamente por meio de peneiras normatizadas, em que os procedimentos são regidos pela NBR NM 248, pelos quais se determina o diâmetro máximo característico, o módulo de finura e os limites granulométricos. Para a fabricação dos blocos (em molde hexagonal de 100 mm de aresta e 75 mm de altura) utilizou-se como traço unitário a proporção de uma parte de cimento para dez de agregado (1:10), tendo como base para a determinação da quantidade de materiais a densidade dos mesmos, a mistura foi feita de forma manual, na qual se determinou por meio empírico um fator água/aglomerante de 1,70. Dos resultados obtidos com a caracterização do produto reciclado, demonstra-se um ponto positivo, indicando a predisposição para utilização de blocos para pavimentação leve produzidos com rejeitos de piso cerâmico provenientes de obras civis.

No estudo para a fabricação de um bloco de concreto ecológico foi utilizado a relação ótima de associação de materiais. Segundo Gebur (2003), foi adotada como base a proporção de 3 partes de entulho para cada uma de areia, adicionando-se esta relação ao cimento e misturando-se até que o produto tivesse a consistência desejada. Após o ensaio de ruptura por compressão obteve-se um resultado de resistência média de 6,5 MPa em área total. Levando-se em consideração que a resistência necessária, segundo normas, para que um bloco seja considerado de vedação é de 2 MPa e de 6 MPa para estruturais, conclui-se que a resistência do bloco testado supera os valores mínimos aceitáveis e permite sua empregabilidade na construção civil.

Segundo estudo de Poon e Chan (2005) que trata de blocos para a pavimentação usando agregados de concreto reciclados e de tijolos de barro esmagados conclui-se que: o uso do tijolo

de barro reduz a densidade das peças diminuindo a resistência a compressão. Já as peças preparadas com 50% de agregado reciclado de concreto e 50% de tijolo de barro esmagado atenderam as normas de pavimentação especificados para área de pedestres segundo a norma AS/NZS 4455 e ETWB de Hong Kong (Grade B blocos de pavimentação) onde o valor mínimo especificado é de 30 MPa, e utilizando uma substituição de 25% de tijolo de argila na mistura atende as normas para tráfego de veículos que é de 45 MPa.

# 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Apresenta-se neste capítulo uma descrição dos materiais e dos métodos utilizados nesta pesquisa para se alcançar o objetivo proposto.

No desenvolvimento desta dissertação houve a colaboração de empresas particulares, desde o fornecimento dos materiais até a fabricação das peças de pisos intertravados, aqui denominados *pavers,* conforme descrito nos itens a seguir.

A empresa Cinpal (Companhia Industrial de peças para automóveis), localizada na cidade de Taboão da Serra-SP, forneceu a areia de fundição proveniente da sua linha de montagem. A empresa de blocos Pacaembu, localizada na cidade de Leme-SP, moldou os *pavers* utilizados neste trabalho. A empresa de reciclados de resíduos da construção civil CEMARA, localizada na cidade de Americana-SP, forneceu a brita e a areia reciclada em quantidade necessária para a confecção das peças.

## 3.1 MATERIAIS

### 3.1.1 Cimento

Neste trabalho foi utilizado um cimento do tipo Cimento *Portland* CP V ARI (Alta Resistência Inicial - NBR 5733), este tipo de cimento é o mais empregado na fabricação de pisos de concreto, pois sua composição na produção do clinquer recebe maior quantidade de calcário e argila fazendo com que ao reagir com a água. Este cimento recebe uma moagem mais fina que os demais da sua categoria, alcance altas resistências rapidamente. Segundo a NBR 7215 a

resistência aos 3 dias deve ser maior ou igual a 24 MPa e aos 7 dias deve ser maior ou igual a 34 MPa.

### 3.1.2 Agregados

#### *3.1.2.1 Agregados naturais (brita e areia)*

Este material foi cedido pela empresa de blocos que fez a moldagem as peças de concreto. É o mesmo material utilizado comumente na fabricação de seus produtos.

A brita empregada é do tipo agregado graúdo (Zona 4,75/12,5 pela NBR 7211:2005) proveniente de uma pedreira, localizada na cidade de Leme.

A areia empregada é do tipo agregado miúdo, areia média (Zona 3, pela NBR 7211:2005) proveniente de uma jazida localizada na cidade de Leme.

O pó-de-pedra empregado é agregado miúdo caracterizado como areia grossa (Zona 4, pela NBR 7211:1987) proveniente de uma pedreira localizada na cidade de Leme.

#### *3.1.2.2 Agregado Reciclado*

O agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil utilizado neste trabalho é um subproduto obtido a partir da reciclagem da fração mineral inerte classe A e foi fornecido, conforme supracitado, por uma usina de reciclagem.

Este tipo de resíduo é separado na usina em materiais cinza (concreto e argamassa), vermelho (cerâmicos) ou mistos (cinza e vermelho). Somente o produto do resíduo cinza é empregado na produção de agregado para utilização em concreto não estrutural. Já o material vermelho destina-se à produção de agregados para pavimentação, assim como o entulho misto vermelho e cinza.

Neste trabalho foi selecionado o material cinza para produção das peças de concreto tendo em vista que, conforme pesquisas desenvolvidas por Metha e Monteiro (1994), a composição de concreto e de argamassa desses materiais pode contribuir para obtenção de maiores valores de resistência a compressão devido à presença de cimento não hidratado.

*3.1.2.3 Areia de fundição*

A areia de fundição foi fornecida pela empresa de autopeças localizada na cidade de São Paulo, tendo sido obtida em quantidade suficiente para a realização dos ensaios de caracterização e produção dos *pavers*.

A areia natural foi adquirida de empresa mineradora localizada no interior do Estado de São Paulo, pela empresa de autopeças para desenvolvimento de suas atividades fim. Atividades estas que geram aproximadamente 100 toneladas de material para descarte a cada mês. Este resíduo é composto basicamente por areia, bentonita sódica, bentonita natural, carvão cardiff, carvão PCA e totalmente sem resinas.

Segundo ensaios realizados pela CETESB a pedido da empresa, trata-se de uma areia quartzosa Industrial de granulometria 60-70 SGk, de Classe IIA, portanto não inerte, e podendo ser utilizada para reuso. Esta areia é proveniente da fundição de peças em máquina de alta pressão com areia verde. As peças fabricadas nessa fundição são de ferro fundido cinzento GG25- GG30 e ferro fundido modular GGG 50.

A análise físico-química desta areia foi realizada por um Laboratório na cidade de São Paulo e os resultados são apresentados na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2, respectivamente ensaio de lixiviação e ensaio de solubilização.

**Tabela 3.1: Ensaio de Lixiviação. Relatório de Ensaio Nº 87007**

| PARÂMETROS (mg/L) | L.M. | L.Q. | L.D. | RESULTADOS |
|---|---|---|---|---|
| Arsênio | 1,0 | 0,006 | 0,002 | n.d. |
| Bário | 70,0 | 0,900 | 0,300 | 0,300 |
| Cádmio | 0,5 | 0,012 | 0,004 | n.d. |
| Chumbo | 1,0 | 0,15 | 0,05 | n.d. |
| Cromo | 5,0 | 0,048 | 0,016 | n.d. |
| Mercúrio | 0,1 | 0,012 | 0,004 | n.d. |
| Prata | 5,0 | 0,027 | 0,009 | n.d. |
| Selênio | 1,0 | 0,0049 | 0,0015 | n.d. |
| Fluoretos | 150 | 0,3 | 0,1 | <0,5 |

Onde: L.M.: Limites máximos segundo a NBR 10004:2004; L.D.: Limites de Detecção do Método; L.Q.: Limites de Quantificação; N.d.: não detectado

Analisando a Tabela 3.1 verifica-se que, exceto bário e fluoretos, todos os outros materiais não foram detectados durante a análise. Ainda, comparando-se os resultados dos elementos detectados com os valores máximos segundo a NBR 10005/2004 para reuso da areia,

observa-se que o bário apresenta um resultado aproximadamente 233 vezes menor do que o limite máximo e os fluoretos aproximadamente 250 vezes menores do que o máximo permitido.

**Tabela 3.2: Ensaio de Solubilização. Relatório de Ensaio Nº 87007**

| PARÂMETROS (mg/L) | L.M. | L.Q. | L.D. | RESULTADOS |
|---|---|---|---|---|
| Alumínio | 0,2 | 0,09 | 0,03 | 104 |
| Bário | 0,7 | 0,06 | 0,02 | 1,06 |
| Cobre | 2,0 | 0,003 | 0,001 | 0,153 |
| Ferro | 0,3 | 0,036 | 0,012 | 96,4 |
| Manganês | 0,1 | 0,03 | 0,01 | 1,680 |
| Sódio | 200 | 0,06 | 0,02 | 246 |
| Zinco | 5,0 | 0,003 | 0,01 | 0,400 |
| Fluoretos | 1,5 | 0,3 | 0,1 | 6,4 |
| Sulfato | 250 | 6 | 2 | 367 |
| Cloretos | 250 | 1,8 | 0,6 | 147 |
| Nitratos | 10 | 0,3 | 0,1 | <10 |
| Fenóis Totais | 0,01 | 0,003 | 0,001 | <0,002 |

Onde: L.M.: Limites máximos segundo a NBR 10004:2004; L.D.: Limites de Detecção do Método; L.Q.: Limites de Quantificação; N.d.: não detectado

Analisando a Tabela 3.2 verifica-se que, exceto o cobre, o zinco, os cloretos e os fenóis totais, todos os demais materiais excedem aqueles limites máximos estabelecidos pela NBR 10005/2004. No caso do alumínio e do ferro os resultados são aproximadamente 520 e 321 vezes maiores que os preconizados pela norma, respectivamente.

Diante de tais resultados, a análise físico-química deste material o caracterizou como resíduo Areia de Fundição Classe II A (Resíduo não inerte e não perigoso).

### 3.1.3 Ensaios de caracterização dos agregados reciclados

Para a caracterização dos agregados estudados neste trabalho quanto à granulometria, foi executado peneiramento mecânico obedecendo à norma NBR NM 248 e NBR 7211. A Tabela 3.3 apresenta os resultados da caracterização da areia reciclada.

**Tabela 3.3: Determinação da Composição Granulométrica- Agregado Miúdo Areia Reciclada**

| Peneiras (mm) | Material Retido (g) | | Porcentagens retidas, em massa | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Individuais (%) | | | Acumuladas (%) | | |
| | M 1 | M2 | M1 | M2 | Média | M1 | M2 | Média |
| 9,5 | 0,00 | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0,0 | 0 |
| 6,3 | 3,01 | 2,39 | 0,8 | 0,6 | 1 | 0,8 | 0,6 | 1 |
| 4,8 | 4,63 | 7,38 | 1,2 | 1,9 | 2 | 2,0 | 2,5 | 2 |
| 2,4 | 63,45 | 63,18 | 16,7 | 16,7 | 17 | 18,7 | 19,2 | 19 |
| 1,2 | 54,97 | 51,77 | 14,5 | 13,7 | 14 | 33,2 | 32,9 | 33 |
| 0,6 | 46,68 | 46,61 | 12,3 | 12,3 | 12 | 45,5 | 45,2 | 45 |
| 0,3 | 87,38 | 86,92 | 23,0 | 22,9 | 22 | 68,5 | 68,1 | 68 |
| 0,15 | 75,37 | 77,52 | 19,9 | 20,5 | 20 | 88,4 | 88,6 | 89 |
| Fundo | 43,95 | 43,12 | 11,6 | 11,4 | 12 | 100,0 | 100,0 | 100 |
| **Totais** | **379,44** | **378,89** | **100,0** | **100,0** | **100** | | | |

A Tabela 3.4 apresenta características físicas da areia reciclada e sua classificação. Esta areia tem módulo de finura de 2,56 e dimensão máxima característica de 4,8 mm. A Figura 3.1 mostra sua curva granulométrica onde a curva se enquadra nos limites da zona utilizável para agregados miúdos. A Figura 3.2 mostra uma imagem da areia reciclada.

**Tabela 3.4: Classificação da areia reciclada**

| | |
|---|---|
| Módulo de Finura (da Média) = | 2,56 |
| Dimensão Máxima Característica = | 4,8 mm |
| Classificação do Agregado (2005) = | Aproximou-se da Zona Ótima, com um desvio máximo de 3% e com somatória dos desvios de 5%. |
| Classificação do Agregado (1987) = | Agregado Miúdo - Areia Média (Zona 3) |

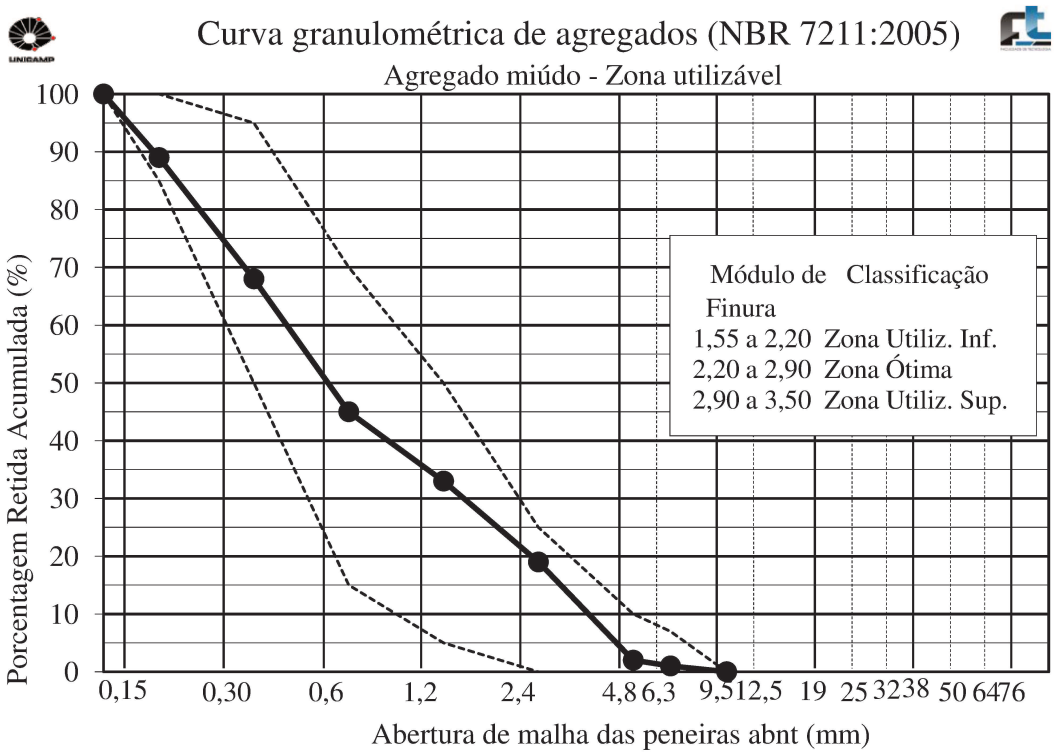


**Figura 3.1: Curva Granulométrica do Agregado miúdo Areia Reciclada- Zona Utilizável**

**Figura 3.2: Amostra de Areia Reciclada**

A Tabela 3.5 apresenta os resultados da caracterização do pó-de-pedra e a Tabela 3.6 as suas características físicas e classificação onde consta que o seu módulo de finura é de 3,15 e dimensão máxima característica é de 6,3mm. A Figura 3.3 mostra a sua curva granulométrica onde o agregado se enquadra na zona utilizável superior. A Figura 3.4 apresenta uma imagem da amostra do material pó-de-pedra.

**Tabela 3.5: Determinação da Composição Granulométrica- Agregado Miúdo Pó-de-Pedra**

| Peneiras (mm) | Material Retido (g) | | Porcentagens retidas, em massa | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Individuais (%) | | | Acumuladas (%) | | |
| | M1 | M2 | M1 | M2 | Média | M1 | M2 | Média |
| 9,5 | 0,00 | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0,0 | 0 |
| 6,3 | 0,81 | 0,62 | 0,2 | 0,2 | 0 | 0,2 | 0,2 | 0 |
| 4,8 | 23,58 | 22,58 | 6,2 | 5,9 | 6 | 6,4 | 6,1 | 6 |
| 2,4 | 112,90 | 114,30 | 30,0 | 29,9 | 30 | 36,4 | 36,0 | 36 |
| 1,2 | 77,40 | 75,47 | 20,5 | 19,8 | 20 | 56,9 | 55,8 | 56 |
| 0,6 | 37,45 | 37,92 | 9,9 | 10,0 | 10 | 66,8 | 65,8 | 66 |
| 0,3 | 23,32 | 25,24 | 6,2 | 6,6 | 6 | 73,0 | 72,4 | 73 |
| 0,15 | 20,89 | 22,03 | 5,5 | 5,8 | 6 | 78,5 | 78,2 | 78 |
| Fundo | 81,24 | 82,94 | 21,5 | 21,8 | 22 | 100,0 | 100,0 | 100 |
| **Totais** | **377,59** | **381,10** | **100,0** | **100,0** | **100** | | | |

**Tabela 3.6: Classificação do pó-de-pedra**

| | |
|---|---|
| Módulo de Finura (da Média) = | 3,15 |
| Dimensão Máxima Característica = | 6,3 mm |
| Classificação do Agregado (2005) = | Aproximou-se de Zona Utilizável Superior, com um desvio máximo de 11% e com somatória dos desvios de 24%. |
| Classificação do Agregado (1987) = | Aproximou-se de Agregado Miúdo - Areia Grossa (Zona 4), com um desvio máximo de 12% e com somatória dos desvios de 19%. |

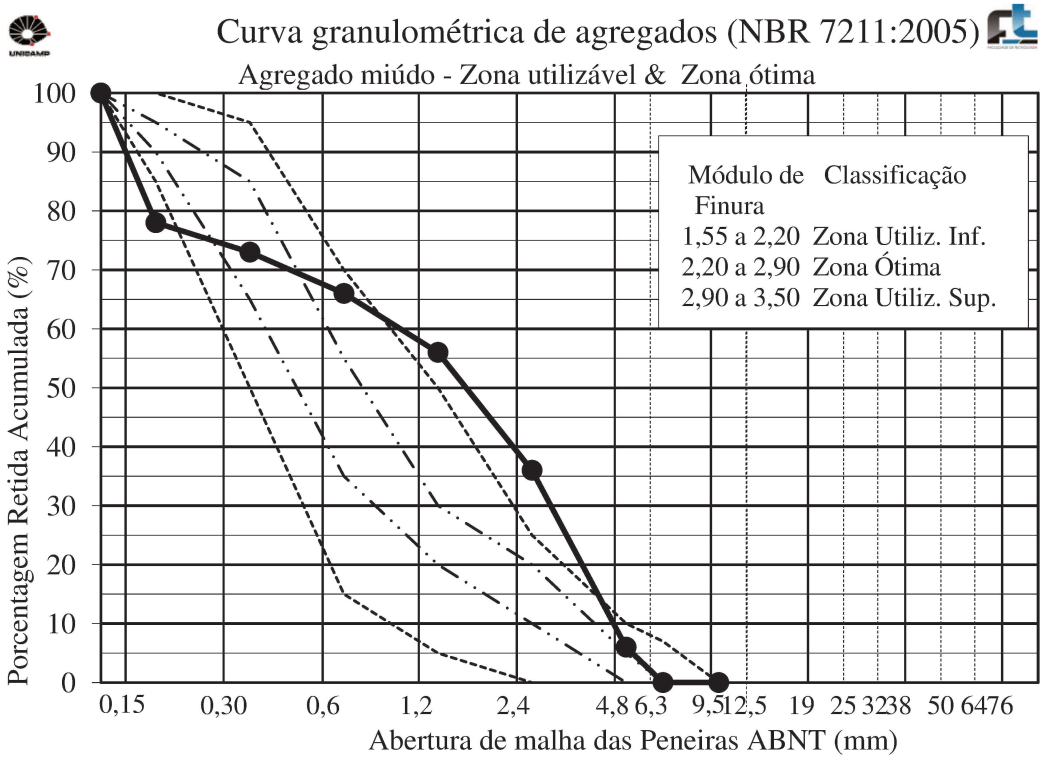


**Figura 3.3: Curva Granulométrica do Agregado miúdo Pó-de-pedra- Zona Utilizável**

**Figura 3.4: Amostra do Agregado miúdo Pó-de-pedra**

A Tabela 3.7 apresenta os resultados da caracterização da brita reciclada onde se constata que o modulo de finura da brita reciclada é de 5,81 e a dimensão máxima característica é de 9,5mm. A Tabela 3.8 apresenta suas características físicas e sua classificação. A Figura 3.5 mostra sua curva granulométrica, onde este agregado se encontra dentro da zona utilizável para agregado graúdo. A Figura 3.6 apresenta a amostra de brita reciclada.

**Tabela 3.7: Determinação da Composição Granulométrica- Agregado Graúdo Brita Reciclada**

| Peneiras (mm) | Material Retido (g) | | Porcentagens retidas, em massa | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Individuais (%) | | | Acumuladas (%) | | |
| | M1 | M2 | M1 | M2 | Média | M1 | M2 | Média |
| 12,5 | 6,43 | 2,14 | 0,3 | 0,1 | 0 | 0,3 | 0,1 | 0 |
| 9,5 | 19,52 | 34,34 | 0,8 | 1,4 | 1 | 1,1 | 1,5 | 1 |
| 6,3 | 1523,20 | 1512,20 | 63,5 | 60,4 | 62 | 64,6 | 61,9 | 63 |
| 4,8 | 568,10 | 637,50 | 23,7 | 25,5 | 25 | 88,3 | 87,4 | 88 |
| 2,4 | 228,78 | 251,45 | 9,6 | 10,1 | 10 | 97,9 | 97,5 | 98 |
| 1,2 | 8,82 | 11,81 | 0,4 | 0,5 | 0 | 98,3 | 98,0 | 98 |
| 0,6 | 5,10 | 4,99 | 0,2 | 0,2 | 0 | 98,5 | 98,2 | 98 |
| 0,3 | 6,16 | 7,54 | 0,3 | 0,3 | 0 | 98,8 | 98,5 | 99 |
| 0,15 | 12,23 | 18,37 | 0,5 | 0,7 | 1 | 99,3 | 99,2 | 99 |
| Fundo | 16,56 | 19,83 | 0,7 | 0,8 | 1 | 100,0 | 100,0 | 100 |
| **Totais** | **2394,90** | **2500,17** | **100,0** | **100,0** | **100** | | | |

**Tabela 3.8: Classificação da brita reciclada**

| | |
|---|---|
| Módulo de Finura (da Média) = | 5,81 |
| Dimensão Máxima Característica = | 9,5 mm |
| Classificação do Agregado (2005) = | Agregado Graúdo - Zona 4,75 / 12,5 |
| Classificação do Agregado (1987) = | Agregado Graúdo - Brita 0 |

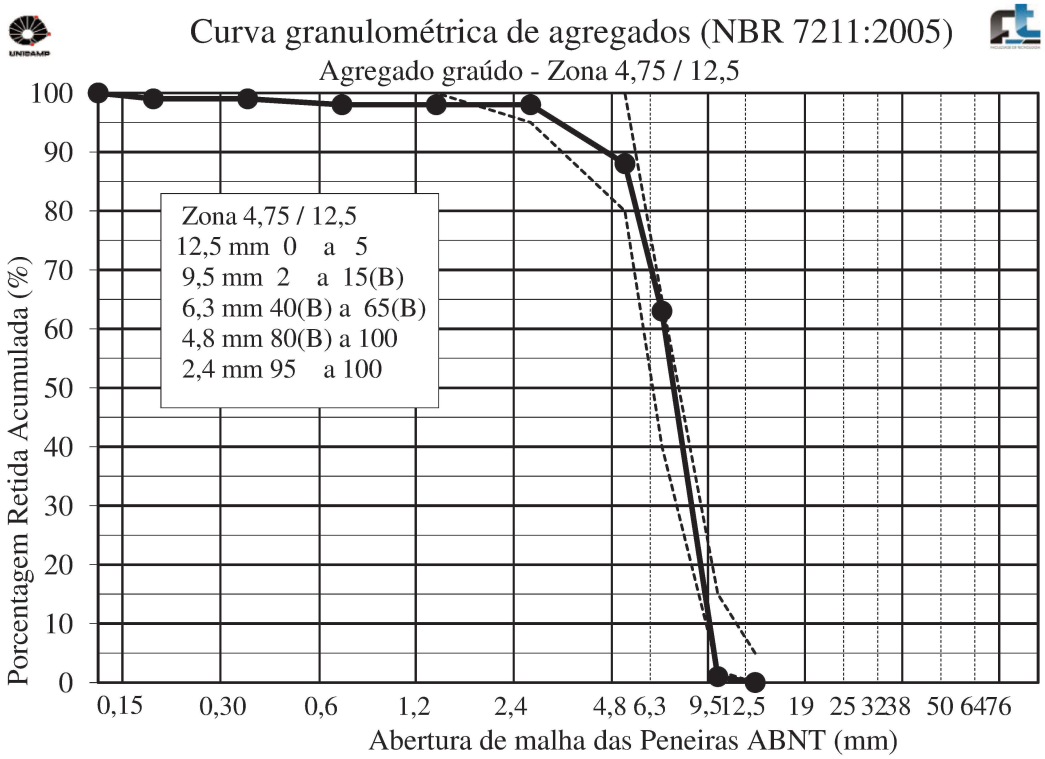


**Figura 3.5: Curva Granulométrica do Agregado Graúdo Brita Reciclada- Zona Utilizável**

**Figura 3.6: Amostra do Agregado Graúdo Brita Reciclada**

A Tabela 3.9 apresenta as massas específicas da areia reciclada, do pó-de-pedra e da brita reciclada. A Tabela 3.10 apresenta as massas unitárias da areia, pó-de-pedra e brita respectivamente.

**Tabela 3.9: Massa específica, massa específica aparente da areia reciclada, pó-de-pedra e brita reciclada**

| Material | Massa específica | Média (g/cm³) |
|---|---|---|
| ***Areia reciclada*** | aparente do agregado seco | 3,9050 |
| | do agregado saturado superfície seca | 2,1997 |
| | do Agregado | 1,4545 |
| ***Pó-de-pedra*** | aparente do agregado seco | 2,5689 |
| | do agregado saturado superfície seca | 2,8360 |
| | do Agregado | 3,6293 |
| ***Brita reciclada*** | aparente do agregado seco | 2,2181 |
| | do agregado saturado superfície seca | 2,4606 |
| | do Agregado | 2,9337 |

**Tabela 3.10: Massa unitária da areia reciclada, da brita reciclada e do pó-de-pedra**

| Material | Média (kg/dm³) |
|---|---|
| Areia Reciclada | 1,27 |
| Brita Reciclada | 1,39 |
| Pó-de-pedra | 1,67 |

Analisando a Tabela 3.10 e comparando os valores dos materiais reciclados com observados para os agregados naturais verifica-se que a areia reciclada apresenta uma massa unitária inferior à da natural, os valores obtidos são respectivamente 1,27 e 1,47 kg/dm$^3$. Já a brita reciclada apresentou uma massa unitária próxima ao dos agregados naturais, obtiveram-se os valores 1,39 e 1,37 kg/dm$^3$, respectivamente.

### 3.1.4 Peças de concreto pré-moldado (*Pavers*)

Conforme discutido anteriormente, os *pavers* foram produzidos na fábrica de blocos na cidade de Leme e posteriormente foram ensaiados para determinação da resistência à compressão simples no laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP. Os resultados destes ensaios são discutidos no Capítulo 4.

Destaca-se que, para cada uma das condições analisadas neste estudo foram moldados 10 corpos de prova. Destes, foram selecionados sempre os seis melhores resultados para composição das médias. Contudo, antes ainda da determinação das médias para caracterização dos produtos produzidos, realizou-se a verificação da existência de *outliers* sendo estes descartados quando necessário.

### *3.1.4.1 Dimensão dos pavers*

Os *pavers* podem ser produzidos com 3 alturas (6, 8 e 10 cm) a depender do tráfego solicitante, podendo variar as demais dimensões e forma, conforme já discutido no Capítulo 2. Para desenvolvimento deste trabalho selecionou-se uma única configuração geométrica adequada à realidade da fábrica que produziu as peças. Assim, os *pavers* têm formato retangular e dimensões10 cm de largura por 19 cm de comprimento e 8 cm de altura (vide Figura 3.7).

**Figura 3.7: Exemplo do *paver* moldado com dimensões 8x10x19 cm**

### *3.1.4.2 Moldagem e cura dos pavers*

Para moldagem dos *pavers* os materiais que compõem determinado traço são adicionados a um misturador acoplado a uma prensa realizando-se então a prensagem dos materiais, a vibração e a compactação das peças. A fábrica de blocos que realizou a confecção das peças

trabalha com uma máquina vibroprensa do tipo semi-automático, modelo pneumático, conforme se pode visualizar na Figura 3.8.

**Figura 3.8. Máquina Vibroprensa usada na produção dos *pavers* pela fábrica de blocos**

A cura das peças foi realizada na própria fábrica seguindo o mesmo padrão utilizado para os *pavers* por ela comercializada. O procedimento inicia-se imediatamente após a moldagem com a armazenagem das peças em um barracão coberto onde passam por um processo de cura úmida. Os *pavers* são molhados 4 vezes ao dia durante os 4 primeiros dias.

*3.1.4.3 Composições estudadas para produção dos pavers*

Para o desenvolvimento deste trabalho adotou-se como método a substituição de determinadas quantidades dos componentes de um traço padrão estabelecido com o uso dos

materiais naturais utilizados pela fábrica de blocos por aqueles materiais em estudo, a saber: areia reciclada, brita reciclada e areia de fundição.

Dessa forma, a primeira etapa do trabalho foi à definição de um traço padrão para comparação dos resultados, que foi denominado de Traço T. A partir deste foram incorporados os materiais alternativos estudados (brita, areia reciclada e areia de fundição), em proporções de 20% e 40% em substituição aos agregados naturais. Ressalta-se que esta substituição é de um material individualmente, ou seja, a substituição de apenas areia, somente brita e finalmente, apenas a areia de fundição.

Dessa forma foi possível a comparação entre os resultados de resistência à compressão simples do traço padrão com os traços obtidos com a substituição de cada material individualmente permitindo que se avalie a influência de cada material e sua proporção de substituição no parâmetro de resistência.

Destaca-se ainda que, como forma de evitar a interferência de variáveis ao problema como diferença entre os materiais empregados na moldagem, e que poderiam prejudicar as comparações, optou-se por produzir todos os *pavers* utilizados em determinadas condições sempre no mesmo dia garantindo assim que o cimento e agregados fossem sempre os mesmos em todos os corpos de prova.

## 3.2 MÉTODOS - ESTUDO REALIZADOS

É possível separar nesta dissertação de mestrado o estudo em três etapas: o estudo I, o estudo II e o estudo definitivo conforme descrito a seguir. No total foram moldadas 1500 peças e ensaiadas 560 peças.

### 3.2.1 Estudo I

Nesta etapa do trabalho adotou-se como traço padrão aquele utilizado pela Empresa de Blocos localizada na cidade de Leme para produção de suas peças de concreto (1:2,84:2,2:0,28 de cimento, areia, brita e água). Realizou-se neste traço a substituição dos agregados conforme proporções já citadas (vide Tabela 3.11). Destaca-se que nesta etapa não houve utilização de aditivos para produção das peças.

**Tabela 3.11: Traços utilizados no estudo I**

| Traço | Quantidade de corpos de prova | Dosagem |
|---|---|---|
| T | 30 | Padrão- Traço de referência |
| T1 | 30 | Traço com 20% areia reciclada |
| T2 | 30 | Traço com 40% areia reciclada |
| T3 | 30 | Traço com 20% brita reciclada |
| T4 | 30 | Traço com 40%brita reciclada |
| T5 | 30 | Traço com 20% areia de fundição |
| T6 | 30 | Traço com 40%areia de fundição |

Como a fábrica não possui a balança, os traços foram convertidos em volume de material para composição. Foram produzidas 30 peças de cada traço para ensaios aos 7, 14 e 28 dias, sendo 10 em cada período. Contudo, após realização dos ensaios de compressão aos 7 dias, os valores obtidos foram inferiores ao esperado. Dessa forma, optou-se não se realizar os ensaios nos demais períodos de cura, descartando-se assim as demais peças produzidas. A Tabela 3.12 apresenta a quantidade de cada material componente do traço em volume.

**Tabela 3.12: Quantidades de material, em litros, de cada traço estudado**

| Material (litros) | T | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Areia | 46 | 36,8 | 27,6 | 46 | 46 | 36,8 | 27,6 |
| Brita | 36 | 36 | 36 | 28,8 | 21,6 | 36 | 36 |
| Cimento | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 | 16,2 |
| Água | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 |
| Areia reciclada | | 9,2 | 18,4 | | | | |
| Brita reciclada | | | | 7,2 | 14,4 | | |
| Areia de fundição | | | | | | 9,2 | 18,4 |

*3.2.1.1 Preparação das peças*

As imagens apresentadas na sequência ilustram o processo de moldagem dos *pavers*. A Figura 3.9 mostra a separação dos materiais conforme o volume definido em cada traço. Observa-se que a "dosagem" é realizada com uso de latas de 18 litros. Posteriormente, os materiais previamente separados são colocados em um misturador conforme apresentado na Figura 3.10 e na Figura 3.11. Após a mistura dos materiais, este é levado através de uma esteira para o alimentador da máquina como se observa na Figura 3.12. A Figura 3.13 mostra as peças de

concreto já moldadas e prontas para transporte até o local em que são submetidos ao processo de cura, conforme descrito anteriormente.

**Figura 3.9: Separação dos materiais para composição dos traços**

**Figura 3.10: Colocação dos materiais no misturador**

**Figura 3.11: Rampa para acesso ao misturador**

**Figura 3.12: Esteira de alimentação da vibroprensa**

**Figura 3.13:Paver moldado: (a) vista frontal; (b) vista superior**

Ressalta-se que o procedimento descrito neste item foi utilizado na produção de todos os *pavers* e nos diferentes estudos realizados.

*3.2.1.2 Ensaio de Resistência à Compressão Simples*

Os ensaios de resistência à compressão seguiram o preconizado pela norma brasileira NBR 9780 em todas as etapas, conforme descrito sucintamente a seguir. A exceção é que nesta etapa dita preliminar os *pavers* foram ensaiados aos 7 dias de cura, enquanto a norma especifica ensaios aos 28 dias.

Antes da realização dos ensaios de compressão todas as peças passaram por uma análise dimensional, com resolução de 1 mm, determinando altura, largura, comprimento, sua identificação de numeração e seu peso.

Posteriormente, para garantir que a superfície da peça ficasse plana e ocorresse distribuição uniforme da carga aplicada, realizou-se o capeamento de todos os *pavers* ensaiados. Este procedimento foi realizado com uma mistura composta de 70% de enxofre e 30% de areia fina. Esta mistura foi derretida e mantida em uma temperatura de aproximadamente 130 graus, para posterior aplicação nas duas superfícies da peça que ficavam em contato com o atuador da prensa. A Figura 3.14 mostra a capela onde se realizou o procedimento de capeamento das peças. A Figura 3.15 mostra os *pavers* já capeados.

**Figura 3.14:Capela onde se realiza o capeamento dos *pavers***

**Figura 3.15:*Paver* capeado**

Conforme estabelece a NBR 9780, o ensaio de resistência à compressão simples deve ser realizado após imersão das peças em água por 24 horas. Este procedimento foi adotado na realização deste estudo.

Todos os procedimentos descritos anteriormente, assim como os ensaios de compressão simples, foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Tecnologia - UNICAMP.

A Figura 3.16 mostra a prensa usada na realização dos ensaios de compressão simples. O equipamento possui capacidade máxima de 100 toneladas e utiliza um dispositivo de ruptura de pavimento intertravado composto de dois discos de 90 mm diâmetro centralizados na prensa. A Figura 3.17 ilustra o rompimento de um *paver* durante a execução do ensaio de compressão simples. Ressalta-se que o carregamento é realizado a uma velocidade de 0,55 ± 0,25 MPa/s ou 3500 N/s. Concluído o ensaio, anota-se a carga, em Newtons, que produziu a ruptura do *paver* para posterior cálculo da tensão de ruptura das peças individualmente, denominadas de resistências individuais ($f_{pi}$), sendo resultado da razão entre carga, em N, e a área da peça, em $mm^2$.

**Figura 3.16:Prensa usada nos ensaios de compressão simples**

**Figura 3.17:Rompimento *paver* durante a execução do ensaio**

Conforme discutido anteriormente, para cada traço foram moldados 10 *pavers*, e destes selecionados os 6 melhores resultados. Este procedimento foi adotado, pois a NBR 9781 estabelece que, para lotes de até 50 m², são necessárias 6 peças para ensaio, sendo estas provenientes do mesmo lote e estando devidamente identificadas e integras. Adicionalmente, este conjunto de peças foi submetido a procedimento para identificação de *outliers*, o que poderia então reduzir o número de peças consideradas durante as análises.

A média dos valores individuais resulta na resistência média ($f_{pj}$). Contudo, a resistência deve ser considerada pelo valor característico ($f_{pk}$) que corresponde ao limite inferior do intervalo de confiança a um nível de confiança de 80%. O cálculo deste valor é realizado a partir da equação 1.

Ressalta-se que o procedimento descrito neste item foi utilizado no ensaio de todos os *pavers* e nos diferentes estudos realizados.

Da forma como foi estabelecido, este permitiu avaliar, para períodos de cura de 7 dias, a ordem de grandeza das resistências obtidas para o traço padrão utilizado pela empresa, bem como o efeito da substituição dos agregados naturais por reciclados.

### 3.2.2 Estudo II

Conforme se apresenta no Capítulo 4, os resultados obtidos no Estudo I não atenderam à expectativa inicial, ou seja, os valores de resistência obtidos foram em muito inferiores aos requisitos da NBR 9780. Assim, com o intuito de se alcançar resultados mecânicos compatíveis com as especificações de norma realizou-se o estudo de um novo traço, também denominado padrão por ser constituído apenas de agregados naturais e a partir do qual foram realizadas as substituições por agregados reciclados conforme proporções já estabelecidas no estudo preliminar. Como forma de diferenciar os traços deste estudo daquele do preliminar, utilizou-se na codificação dos nomes o sufixo I.

Empreendeu-se então uma análise da bibliografia existente sobre o assunto e optou-se por estabelecer um traço baseado nos estudos feitos por CRUZ (2003) e MULLER (2005) e nos métodos de dosagem sugeridos pela ABCP. O traço, em massa, padrão T I escolhido foi 1:2,29:0,77:1,08:0,33 (cimento, areia, pó-de-pedra, brita, água) feita com uso do aditivo ATRAI

Block na medida de 1% para a massa de cimento e a incorporação ao traço de pó de pedra. As composições estudadas nesta etapa do trabalho são apresentadas na Tabela 3.13. A Tabela 3.14 apresenta as quantidades de cada material em cada um dos traços estudados, em massa (Kg).

**Tabela 3.13: Traços avaliados no Estudo II**

| Traço | Quantidade de Corpos de prova. | Dosagem |
|---|---|---|
| T I | 30 | Padrão- traço de referência |
| T1 I | 30 | Traço com 20% areia reciclada |
| T2 I | 30 | Traço com 40% areia reciclada |
| T3 I | 30 | Traço com 20% brita reciclada |
| T4 I | 30 | Traço com 40%brita reciclada |
| T5 I | 30 | Traço com 20% areia de fundição |
| T6 I | 30 | Traço com 40%areia de fundição |

**Tabela 3.14: Quantidades, em massa (kg), dos materiais componentes dos traços do Estudo II**

| Material | T I | T1 I | T2 I | T3 I | T4 I | T5 I | T6 I |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Areia (kg) | 82,43 | 65,94 | 49,46 | 82,43 | 82,43 | 65,94 | 49,46 |
| Pó-de-pedra (kg) | 27,49 | 27,49 | 27,49 | 27,49 | 27,49 | 27,49 | 27,49 |
| Brita (kg) | 38,90 | 38,90 | 38,90 | 31,12 | 23,34 | 38,90 | 38,90 |
| Cimento (kg) | 36,00 | 36,00 | 36,00 | 36,00 | 36,00 | 36,00 | 36,00 |
| Água (kg) | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 |
| Areia reciclada (kg) | | 16,49 | 32,97 | | | | |
| Brita reciclada (kg) | | | | 7,88 | 15,56 | | |
| Areia de fundição (kg) | | | | | | 16,49 | 32,97 |

A moldagem dos *pavers* foi realizada conforme discutido no item 3.2.1.1, contudo para obter melhor controle tecnológico das quantidades de cada material o mesmo foi medido em peso e não mais em volume.

De forma semelhante ao realizado no Estudo I, todas as peças foram produzidas no mesmo dia e com os mesmos materiais buscando-se assim evitar variabilidades nos ensaios que não aquelas produzidas pela substituição dos agregados.

Os ensaios de compressão simples foram realizados conforme apresentado no item 3.2.1.2 aos 7 e 28 dias.

Conforme se discute no Capítulo 4, verificaram-se após a realização dos ensaios que os valores de resistência alcançados ainda se encontravam inferiores àqueles indicados por norma aos 28 dias. Assim, um terceiro traço padrão foi estabelecido. Sendo assim, optou-se pela realização de nova moldagem seguindo o mesmo padrão aqui estabelecido para verificação dos resultados. A esta nova moldagem denominou-se Estudo Definitivo.

Da forma como foi desenvolvido o estudo permitirá avaliar o efeito da substituição dos agregados naturais por reciclados para períodos de cura de 7 e 28 dias.

### 3.2.3 Estudo definitivo

O estudo definitivo corresponde ao um novo traço baseado no Estudo II, tendo sido realizado segundo os mesmo critérios e condições. O novo traço padrão adotado foi de 1:0,77:2,33:1,11:0,33 (cimento, areia, pó-de-pedra, pedrisco, água) com 1% aditivo. A tabela 3.19 apresenta a quantidade dos materiais utilizada para este estudo. Foram produzidas 10 peças para cada traço e analisadas aos 28 dias. Como forma de diferenciar os traços deste estudo dos estudos anteriores, utilizou-se na codificação dos nomes o sufixo II. A Tabela 3.15 apresenta as quantidades de cada material em cada um dos traços estudados, em massa (Kg).

**Tabela 3.15: Quantidades, em kg, dos materiais componentes dos traços do Estudo Definitivo**

| Material | T II | T1 II | T2 II | T3 II | T4 II | T5 II | T6 II |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Areia (kg) | 9,24 | 7,39 | 5,54 | 9,24 | 9,24 | 7,39 | 5,54 |
| Pó-de-pedra (kg) | 27,96 | 27,96 | 27,96 | 27,96 | 27,96 | 27,96 | 27,96 |
| Brita (kg) | 13,32 | 13,32 | 13,32 | 10,65 | 7,99 | 13,32 | 13,32 |
| Cimento (kg) | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 | 12,00 |
| Água (L) | 3,96 | 3,96 | 3,96 | 3,96 | 3,96 | 3,96 | 3,96 |
| Areia reciclada (kg) | | 1,84 | 3,69 | | | | |
| Brita reciclada (kg) | | | | 2,66 | 5,33 | | |
| Areia de fundição (kg) | | | | | | 1,84 | 3,69 |

# 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Apresentam-se neste capítulo os resultados dos estudos realizados bem como a análise destes.

## 4.1 ESTUDO PRELIMINAR- ESTUDO I

Ressalta-se que foram moldados 30 *pavers* para cada um dos traços estudados, conforme descrito no Capítulo 3, item 3.2, para ensaio em dois períodos de cura, a saber: 7 e 28 dias. Contudo, os resultados obtidos aos 7 dias fizeram com que os ensaios para os demais períodos fossem descartados e fosse iniciado o estudo de um novo traço, na etapa aqui denominada Estudo I.

A despeito dos pequenos valores de resistência obtidos no ensaio de compressão simples nesta etapa do estudo decidiu-se pela apresentação e discussão dos resultados obtidos.

### 4.1.1 Resultados ensaios de Compressão simples

Conforme discutido no Capítulo 3, foram ensaiadas 10 peças de concreto e entre estes selecionados os seis melhores resultados para composição da média. A Tabela 4.1 apresenta os resultados de resistência à compressão simples para os seis melhores resultados desta etapa do estudo.

De posse destes resultados procedeu-se uma avaliação para detecção de *outliers* na amostra. Como padrão, decidiu-se pela exclusão destes valores da amostra estudada se a sua presença fosse identificada. A análise foi realizada para um nível de confiança de 80%. As

médias, desvios padrão e coeficientes de variação eram então recalculados para as análises posteriores. A Figura 4.1 apresenta um gráfico de Whisker utilizado na identificação de *outliers* no estudo preliminar para um nível de confiança de 80%.

**Tabela 4.1: Valores de resistência à compressão simples para os seis melhores resultados determinados no estudo I**

| Nº | Traço | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | T | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 |
| | Resistência à compressão simples ($f_{pi}$) (MPa) ($f_{pi}$) | | | | | | |
| 1 | 11,72 | 11,87 | 8,02 | 8,02 | 7,86 | 7,40 | 3,85 |
| 2 | 13,87 | 12,49 | 9,56 | 8,63 | 8,02 | 7,25 | 3,39 |
| 3 | 12,33 | 10,95 | 9,40 | 9,56 | 6,78 | 8,48 | 4,01 |
| 4 | 12,33 | 12,33 | 7,25 | 9,40 | 8,17 | 7,25 | 3,70 |
| 5 | 13,10 | 11,56 | 8,02 | 8,48 | 8,17 | 7,25 | 4,01 |
| 6 | 12,33 | 10,79 | 8,17 | 8,32 | 6,47 | 8,48 | 4,62 |
| Média = | 12,62 | 11,66 | 8,40 | 8,74 | 7,58 | 7,68 | 3,93 |
| d-p = | 0,76 | 0,70 | 0,90 | 0,61 | 0,75 | 0,62 | 0,41 |
| CV = | 6,01% | 6,01% | 10,68% | 7,03% | 9,92% | 8,07% | 10,45% |

Onde: T: Traço padrão; T1: 20% de areia reciclada; T2: 40% de areia reciclada; T3: 20% de brita reciclada; T4: 40% de brita reciclada; T5: 20% de areia de fundição; T6: 40% de areia de fundição; d-p: desvio padrão amostral; CV: coeficiente de variação determinado pela razão entre o d-p e a média.

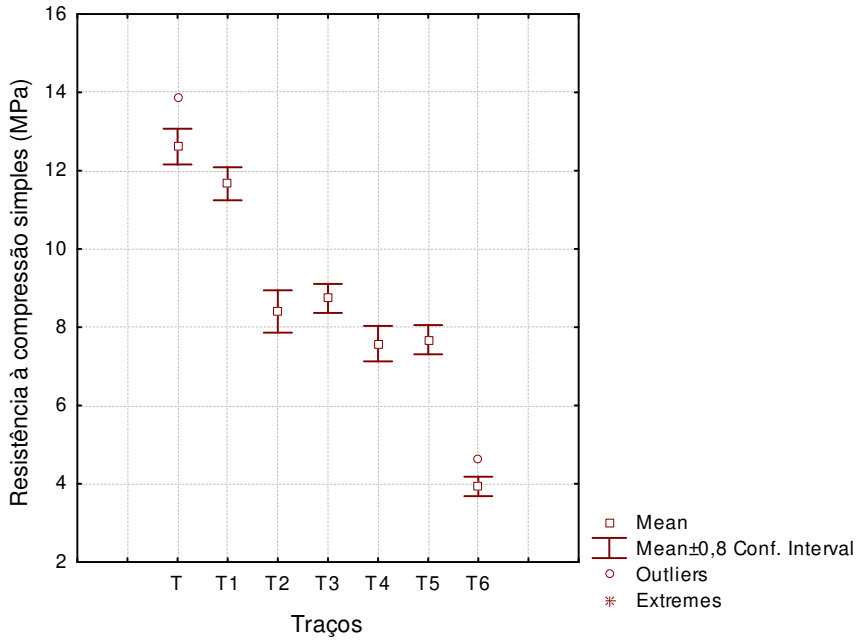


**Figura 4.1: Gráfico de Whisker para identificação de *outliers* na amostra do estudo I para um intervalo de confiança de 80% e ensaios realizados aos 7 dias**

Analisando-se a Figura 4.1 é possível verificar a presença de pontos experimentais tidos como *outliers* nos traços T e T6. Estes valores correspondem aos máximos de cada um dos traços

citados, ou seja, 13,87 MPa e 4,62 MPa. A Figura 4.2 apresenta gráfico semelhante ao anterior após exclusão pontos de *outliers*.

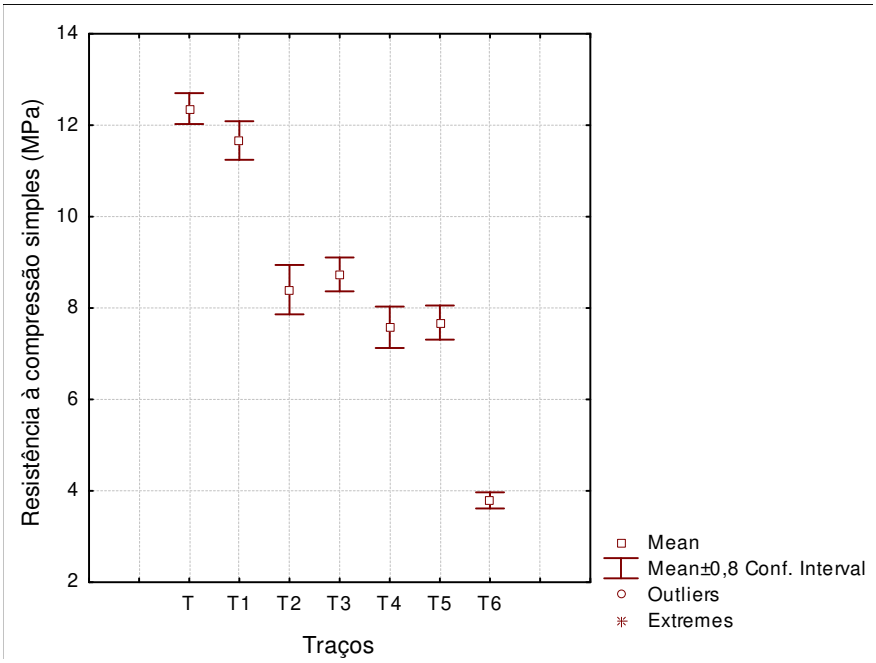


**Figura 4.2: Gráfico de Whisker com indicação da média e intervalo de confiança de 80% para o estudo I e ensaios realizados aos 7 dias**

A Tabela 4.2 apresenta os valores de média, desvio-padrão e coeficiente de variação recalculada após exclusão dos outliers da amostra estudada. Verifica-se que há diferença apenas nos valores determinados para os traços T e T6, os demais permanecem inalterados. A Figura 4.3 apresenta um gráfico de barras com os valores médios de resistência à compressão simples aos 7 dias para os traços avaliados no estudo I.

Após este último tratamento procedeu-se a análise de variância (ANOVA) para verificar a igualdade entre as médias. Tomando como hipótese nula ($h_0$) a igualdade entre as médias e como hipótese alternativa ($h_a$) que as médias de um ou mais níveis são diferentes, verificou-se que, a um nível de significância de 5%, de forma geral as médias são significativamente diferentes. Há, portanto, indícios estatísticos de que a substituição dos agregados naturais por reciclados ou areia de fundição produziu alterações nos valores médios de resistência obtidos.

**Tabela 4.2: Valores de resistência à compressão simples para os melhores resultados determinados no estudo I excluídos os *outliers***

| Nº | Traço | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | T | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 |
| | Resistência à compressão simples ($f_{pi}$) (MPa) ($f_{pi}$) | | | | | | |
| 1 | 11,72 | 11,87 | 8,02 | 8,02 | 7,86 | 7,40 | 3,85 |
| 2 | -- | 12,49 | 9,56 | 8,63 | 8,02 | 7,25 | 3,39 |
| 3 | 12,33 | 10,95 | 9,40 | 9,56 | 6,78 | 8,48 | 4,01 |
| 4 | 12,33 | 12,33 | 7,25 | 9,40 | 8,17 | 7,25 | 3,70 |
| 5 | 13,10 | 11,56 | 8,02 | 8,48 | 8,17 | 7,25 | 4,01 |
| 6 | 12,33 | 10,79 | 8,17 | 8,32 | 6,47 | 8,48 | -- |
| Média = | 12,36 | 11,66 | 8,40 | 8,74 | 7,58 | 7,68 | 3,79 |
| d-p = | 0,49 | 0,70 | 0,90 | 0,61 | 0,75 | 0,62 | 0,26 |
| CV = | 3,98% | 6,01% | 10,68% | 7,03% | 9,92% | 8,07% | 6,80% |

Onde: T: Traço padrão; T1: 20% de areia reciclada; T2: 40% de areia reciclada; T3: 20% de brita reciclada; T4: 40% de brita reciclada; T5: 20% de areia de fundição; T6: 40% de areia de fundição; d-p: desvio padrão amostral; CV: coeficiente de variação determinado pela razão entre o d-p e a média.

Analisando a Tabela 4.2 observa-se que os coeficientes de variação (CV) são bons, todos abaixo de 11%, indicando baixa dispersão entre os valores de resistência em cada traço.

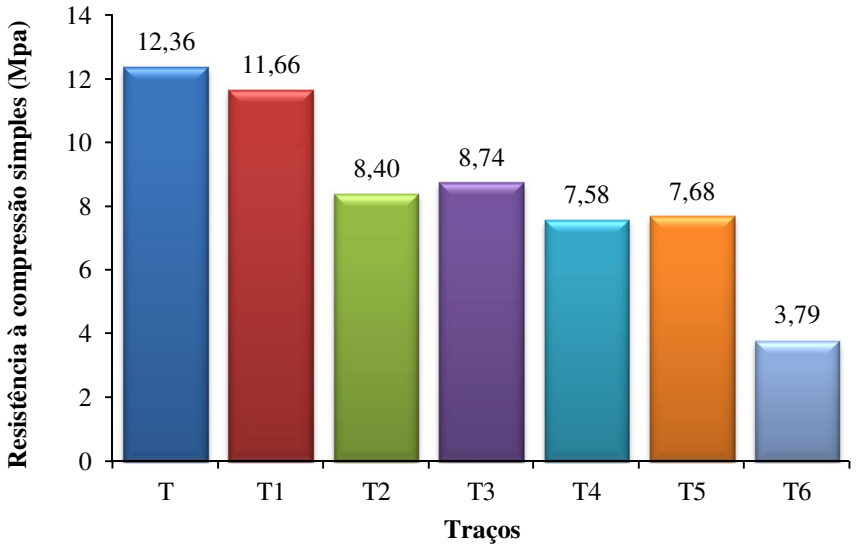


**Figura 4.3: Valores de resistência à compressão simples dos traços avaliados no estudo I e ensaiados aos 7 dias**

Analisando conjuntamente a Tabela 4.42 e a Figura 4.3, em comparação ao traço padrão, verifica-se uma tendência de redução dos valores de resistência com a substituição dos agregados naturais pelos materiais estudados, qualquer que seja ele. Observa-se também que quanto maior a proporção de substituição, maior a redução da resistência, ou seja, a substituição de 40% sempre

resultou em valores inferiores de resistência se comparados aos valores com 20% de substituição. Embora todos esses valores estejam abaixo da NBR9780 onde os valores mínimos exigidos para a resistência a compressão é de 35 Mpa.

A Tabela 4.3 apresenta as diferenças, absolutas e relativas, entre os traços com substituição (T1 a T6) e o traço padrão.

**Tabela 4.3: Diferenças absolutas e relativas entre os traços com substituição e o traço padrão para os ensaios do estudo I ensaiados aos 7 dias**

| | Diferença entre as médias | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 |
| Absoluta (MPa) | -0,95 | -4,21 | -3,88 | -5,04 | -4,93 | -8,68 |
| Relativa | -7,5% | -33,4% | -30,8% | -39,9% | -39,1% | -68,8% |

Analisando-se a Tabela 4.3, verifica-se que a substituição da areia natural por areia reciclada resultou em reduções de aproximadamente 7,5% e 33,4% com relação ao traço padrão, respectivamente para o traço T1, com 20% de areia reciclada, e o traço T2, com 40% de areia reciclada. Analogamente, a substituição por brita reciclada resultou em reduções de aproximadamente 30,8% e 39,9%, respectivamente para o traço T3, com 20% de brita reciclada, e o traço T4, com 40% de brita reciclada. A substituição por areia de fundição resultou, respectivamente para 20% e 40%, em reduções de aproximadamente 39,1% e 68,8%. Assim, observando-se a Figura 4.3 e Tabela 4.3, pode-se avaliar que o melhor resultado de substituição ocorreu para o traço T1 e o pior resultado para o traço T6, respectivamente traços com 20% de areia reciclada e 40% de areia de fundição. Os demais traços produziram reduções entre 30 e 40% aproximadamente, ensejando comportamento semelhante entre estes.

Um teste estatístico de comparação entre médias permitiu avaliar se as diferenças observadas entre as médias são estatisticamente significativas ou não. A Tabela 4.4 apresenta um resumo do resultado do teste de comparação entre médias. O valor 0 indica que a diferença entre as médias não é significante estatisticamente ao nível de confiança de 80%, e o valor 1 indica o contrário.

Analisando a Tabela 4.4, tomando-se como referência o traço padrão T, observa-se que, exceto o traço T1, todos os traços apresentam médias estatisticamente diferentes daquela observada para o traço padrão, ou seja, pode-se depreender que a substituição dos agregados naturais por 40% de areia reciclada, brita reciclada e areia de fundição leva a alterações do

comportamento mecânico dos *pavers*, reduzindo sua resistência à compressão. Analogamente, poder-se-ia dizer que não há diferença significativa entre a média de resistência do traço T e do traço T1, com 20% de areia reciclada. Assim, conclui-se que a substituição nesta proporção não altera o comportamento mecânico dos *pavers*.

**Tabela 4.4: Resumo dos teste de comparação entre as médias dos ensaios do estudo I para um nível de confiança de 80%**

| Traço | T | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T | -- | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| T1 | | -- | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| T2 | | | -- | 0 | 0 | 0 | 1 |
| T3 | | | | -- | 1 | 1 | 1 |
| T4 | | | | | -- | 0 | 1 |
| T5 | | | | | | -- | 1 |
| T6 | | | | | | | -- |

Onde: T: Traço padrão; T1: 20% de areia reciclada; T2: 40% de areia reciclada; T3: 20% de brita reciclada; T4: 40% de brita reciclada; T5: 20% de areia de fundição; T6: 40% de areia de fundição; Significância 0: indica que a diferença entre as médias não é significante ao nível de significância de 20%; Significância 1: indica que a diferença entre as médias é significante ao nível de significância de 20%.

Na comparação entre os demais traços, não apresenta diferenças significativas entre a média do traço T2 e as médias dos traços T3, T4, e T5.

De forma geral, pode-se dizer que a substituição de agregados naturais por areia reciclada, brita reciclada ou areia de fundição altera o comportamento mecânico dos *pavers*, produzindo a redução da resistência à compressão. Exceção feita à substituição por 20% de areia reciclada, onde as diferenças observadas não indicam diferenças significativas com relação ao traço padrão.

## 4.2 ESTUDO II

Nesta etapa do trabalho foram compactados 30 *pavers* para cada um dos traços estudados (Vide Capítulo 3), sendo ensaiados 10 em cada período de cura considerado (7, 14 e 28 dias). Contudo, nesta etapa decidiu-se por não realizar o ensaio aos 14 dias. Portanto, são apresentados e discutidos neste item os ensaios realizados após períodos de cura de 7 e 28 dias.

### 4.2.1 Resultados ensaios de Compressão simples aos 7 dias

A Tabela 4.5 apresenta os valores de resistência à compressão simples para os seis melhores resultados obtidos para cada traço. Ressalta-se que o mesmo procedimento aplicado no

estudo preliminar para identificação de *outliers* foi aqui aplicado. Dessa forma, dois pontos experimentais foram descartados, um no traço T3 I e outro no traço T5 I, respectivamente substituições de 20% de brita reciclada e 40% de areia de fundição. Analisando-se a mesma tabela, verifica-se que o coeficiente de variação em todos os casos é inferior a 14%, indicando pequena dispersão entre os resultados de ensaio utilizados para determinação das médias.

A Figura 4.4 mostra o gráfico de Whisker com indicação das médias de cada traço estudado e o intervalo de confiança da média para um nível de confiança de 80%.

**Tabela 4.5: Valores de resistência à compressão simples para os seis melhores resultados determinados no estudo II ensaiados aos 7 dias**

| Nº | Traço | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **T I** | **T1 I** | **T2 I** | **T3 I** | **T4 I** | **T5 I** | **T6 I** |
| | **Resistência à compressão simples ($f_{pi}$) (MPa) ($f_{pi}$)** | | | | | | |
| 1 | 15,72 | 24,36 | 16,34 | 12,02 | 11,10 | 12,64 | 3,08 |
| 2 | 13,87 | 26,21 | 18,19 | 12,02 | 9,56 | 12,64 | 3,70 |
| 3 | 13,87 | 21,89 | 20,35 | 11,10 | 11,10 | 12,95 | 3,70 |
| 4 | 13,57 | 22,51 | 18,50 | 11,10 | 10,48 | 13,10 | 3,39 |
| 5 | 16,34 | 20,35 | 19,73 | 10,79 | 9,87 | 13,57 | 4,32 |
| 6 | 13,57 | 21,58 | 18,50 | | 9,56 | | 4,32 |
| Média = | 14,49 | 22,82 | 18,60 | 11,41 | 10,28 | 12,98 | 3,75 |
| d-p = | 1,22 | 2,12 | 1,39 | 0,58 | 0,72 | 0,38 | 0,49 |
| CV = | 8,40% | 9,28% | 7,46% | 5,06% | 7,01% | 2,96% | 13,17% |

Onde: T: Traço padrão; T1: 20% de areia reciclada; T2: 40% de areia reciclada; T3: 20% de brita reciclada; T4: 40% de brita reciclada; T5: 20% de areia de fundição; T6: 40% de areia de fundição; d-p: desvio padrão amostral; CV: coeficiente de variação determinado pela razão entre o d-p e a média.

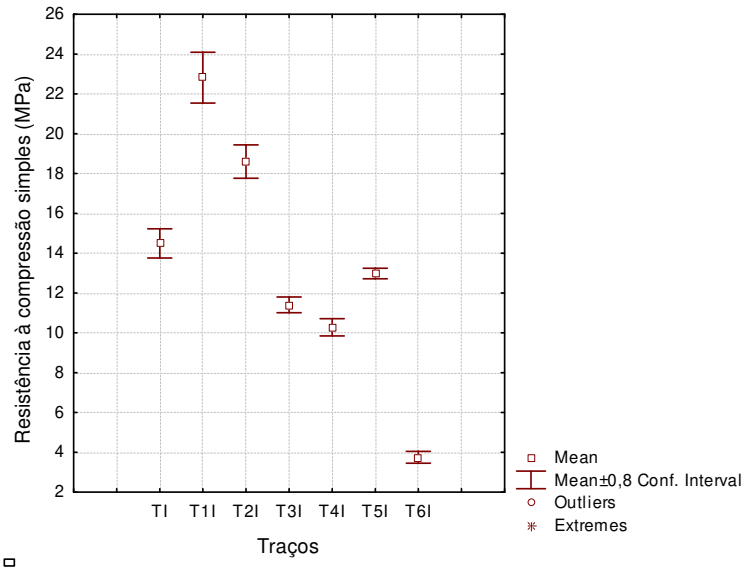


**Figura 4.4: Gráfico de Whisker com indicação da média e intervalo de confiança de 80% para o estudo II e ensaios realizados aos 7 dias**

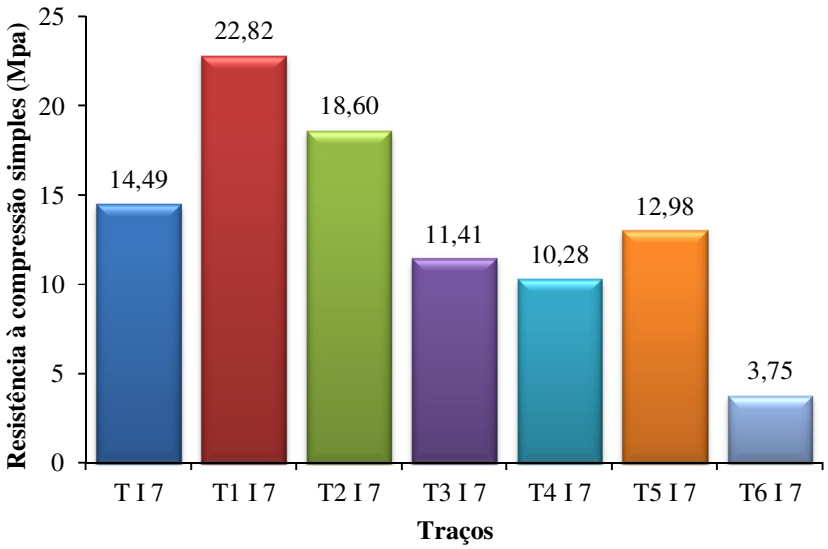


**Figura 4.5: Valores de resistência à compressão simples dos traços avaliados no estudo II e ensaiados aos 7 dias**

Analisando em conjunto a Tabela 4.5, a Figura 4.4 e a Figura 4.5 observa-se que as substituições com areia reciclada promoveram o aumento dos valores de resistência à compressão simples se comparado ao traço padrão T. Os demais traços, também comparados ao padrão, resultaram em valores inferiores a este. Neste caso também a areia de fundição na proporção de 40% foi responsável pela maior redução. A Tabela 4.6 apresenta as diferenças, absolutas e relativas, entre os traços com substituição (T1 I a T6 I) e o traço padrão (T I).

**Tabela 4.6: Diferenças absolutas e relativas entre os traços com substituição e o traço padrão para os ensaios do estudo II ensaiados aos 7 dias**

| | Diferença entre as médias | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | T1 I | T2 I | T3 I | T4 I | T5 I | T6 I |
| Absoluta (MPa) | 8,3 | 4,1 | -3,1 | -4,2 | -1,5 | -10,7 |
| Relativa | 57,4% | 28,4% | -21,3% | -29,1% | -10,4% | -74,1% |

Analisando a Tabela 4.6 verifica-se que o traço T1 com 20% de areia reciclada promoveu um aumento de aproximadamente 57% na resistência média à compressão dos *pavers*, enquanto o T2, com 40% de areia reciclada, levou a um acréscimo de 28%, aproximadamente, na resistência média. Especula-se que a razão deste efeito seja a presença de cimento não hidratado na areia reciclada e que pode contribuir para este aumento. Na mesma tabela observa-se que a substituição

por brita reciclada levou a uma redução na resistência média, sendo maior a redução quanto maior a proporção de substituição. Neste caso, 20% de brita reciclada reduziram aproximadamente 21% a resistência média, se comparado ao traço padrão, enquanto 40% de brita reciclada promoveram uma redução de aproximadamente 29% na resistência média. Especula-se que a menor resistência dos agregados reciclados, relativamente aos naturais, pode produzir este efeito. No caso da areia de fundição, que levou a uma redução de aproximadamente 10% e 74% na resistência, respectivamente para substituições de 20% e 40%, não ficou evidenciado o fenômeno que promove tal redução. Pode-se apenas especular se a composição química da areia estudada contenha elementos que reagem com o cimento e promovam a redução da resistência média.

A exemplo do realizado no estudo anterior realizou-se a análise de variância para comparação entre as médias obtidas nos ensaios. O teste indica que, ao se analisar de forma conjunta todas as condições do estudo, verifica-se que as médias amostrais são significativamente diferentes ao nível de confiança de 80%. Portanto, pode-se pressupor que as substituições realizadas promovem alterações no comportamento mecânico dos *pavers*, podendo, como discutido, levar ao aumento ou diminuição da resistência a depender do material usado.

Realizou-se também a comparação entre as médias de cada traço. A Tabela 4.7 apresenta um resumo do resultado do teste de comparação entre médias do estudo II para ensaio aos 7 dias. O valor 0 indica que a diferença entre as médias não é significante estatisticamente ao nível de confiança de 80%, e o valor 1 indica o contrário.

**Tabela 4.7: Resumo dos teste de comparação entre as médias dos ensaios do estudo II para um nível de confiança de 80% e ensaio aos 7 dias**

| Traço | T I | T1 I | T2 I | T3 I | T4 I | T5 I | T6 I |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T I | -- | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| T1 I | | -- | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| T2 I | | | -- | 1 | 1 | 1 | 1 |
| T3 I | | | | -- | 0 | 0 | 1 |
| T4 I | | | | | -- | 1 | 1 |
| T5 I | | | | | | -- | 1 |
| T6 I | | | | | | | -- |

Onde: T: Traço padrão; T1: 20% de areia reciclada; T2: 40% de areia reciclada; T3: 20% de brita reciclada; T4: 40% de brita reciclada; T5: 20% de areia de fundição; T6: 40% de areia de fundição; Significância 0: indica que a diferença entre as médias não é significante ao nível de significância de 20%; Significância 1: indica que a diferença entre as médias é significante ao nível de significância de 20%.

Analisando a Tabela 4.7, tomando-se como referência o traço padrão T, observa-se que, exceto o traço T5 I, todos os traços apresentam médias estatisticamente diferentes daquela observada para o traço padrão, ou seja, pode-se depreender que a substituição dos agregados naturais por areia reciclada, brita reciclada e 40% de areia de fundição leva a alterações do comportamento mecânico dos *pavers*. Analogamente, poder-se-ia dizer que não há diferença significativa entre a média de resistência do traço T I e do traço T5 I, com 20% de areia de fundição. Assim, conclui-se que a substituição nesta proporção não alteraria o comportamento mecânico dos *pavers*.

Portanto, pode-se concluir, conforme já discutido, que a substituição com areia reciclada levou a um aumento da resistência, sendo este maior quanto menor a proporção substituída. Os demais materiais levaram a uma redução da resistência independente da proporção usada. Contudo, a redução é maior quanto maior o teor de substituição.

Ainda na Tabela 4.7, ao se analisar a comparação entre as médias dos traços com os mesmos materiais, conclui-se que o aumento nas proporções (20% para 40%) de areia reciclada e areia de fundição resultam em redução da resistência à compressão na medida em que as médias são significativamente diferentes ao nível de confiança de 80%, estando de acordo com as análises anteriores. Contudo, no caso da brita reciclada, as médias não são significativamente diferentes ao nível de confiança de 80%. Portanto, não se pode concluir que o aumento na proporção deste material levou à redução da resistência à compressão dos *pavers*.

### 4.2.2 Resultados de resistência à compressão simples aos 28 dias

A Tabela 4.8 apresenta os valores de resistência à compressão simples para os melhores resultados obtidos para cada traço. Ressalta-se que o mesmo procedimento aplicado no estudo preliminar para identificação de *outliers* foi aqui aplicado. Verifica-se que um ponto experimental foi descartado em cada traço por ter sido caracterizado como *outliers*.

A Figura 4.6 apresenta o gráfico com os valores de resistência à compressão para os ensaios realizados aos 28 dias. A Figura 4.7 mostra o gráfico de Whisker com indicação das médias de cada traço estudado e o intervalo de confiança da média para um nível de confiança de 80%.

Analisando a Tabela 4.8, verifica-se que o coeficiente de variação em todos os casos é inferior a 18%, indicando pequena dispersão entre os resultados de ensaio utilizados para determinação das médias amostrais.

A análise de variância indica que, ao se avaliar de forma conjunta todas as condições do estudo, verifica-se que as médias amostrais são significativamente diferentes ao nível de confiança de 80%. Portanto, há indícios estatísticos de que as substituições realizadas promovem alterações no comportamento mecânico dos *pavers*, em uma ou mais das condições analisadas.

**Tabela 4.8: Valores de resistência à compressão simples para os seis melhores resultados determinados no estudo II ensaiados aos 28 dias**

| Nº | Traço | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **T I 28** | **T1 I 28** | **T2 I 28** | **T3 I 28** | **T4 I 28** | **T5 I 28** | **T6 I 28** |
| | **Resistência à compressão simples ($f_{pi}$) (MPa) ($f_{pi}$)** | | | | | | |
| 1 | 24,97 | 29,29 | 18,81 | 14,64 | 16,19 | 14,95 | 5,70 |
| 2 | 31,60 | 23,59 | 18,04 | 13,87 | 15,88 | 18,96 | 6,17 |
| 3 | 29,29 | 26,82 | 18,96 | 14,18 | 15,72 | 16,96 | 5,86 |
| 4 | 26,51 | 24,82 | 18,50 | 14,49 | 15,42 | 11,56 | 5,86 |
| 5 | 23,12 | 30,37 | 18,50 | 14,18 | 15,72 | 16,03 | 5,86 |
| Média = | 27,10 | 26,98 | 18,56 | 14,27 | 15,79 | 15,69 | 5,89 |
| d-p = | 3,38 | 2,87 | 0,35 | 0,30 | 0,28 | 2,74 | 0,17 |
| CV = | 12,48% | 10,65% | 1,91% | 2,11% | 1,77% | 17,45% | 2,87% |

Onde: T: Traço padrão; T1: 20% de areia reciclada; T2: 40% de areia reciclada; T3: 20% de brita reciclada; T4: 40% de brita reciclada; T5: 20% de areia de fundição; T6: 40% de areia de fundição; d-p: desvio padrão amostral; CV: coeficiente de variação determinado pela razão entre o d-p e a média.

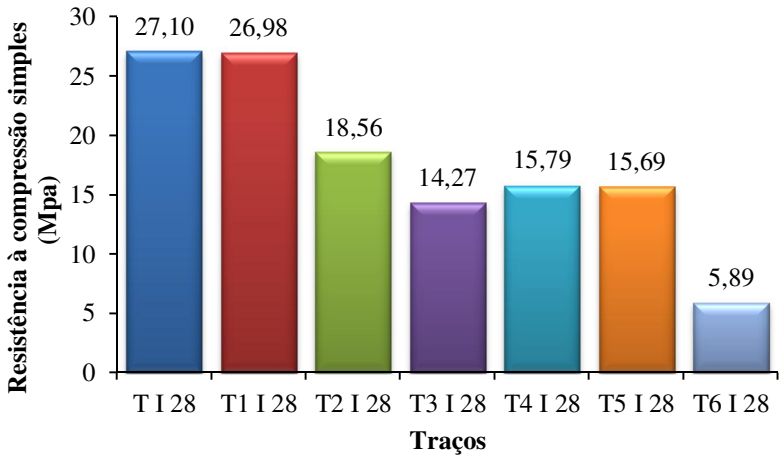


**Figura 4.6: Gráfico dos valores de resistência à compressão simples dos traços avaliados no estudo II e ensaiados aos 28 dias**

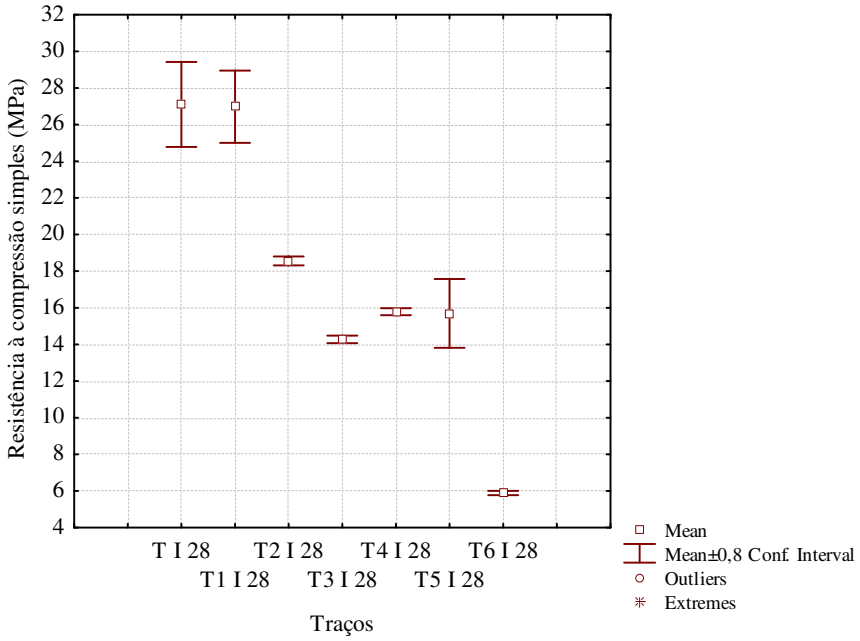


**Figura 4.7: Gráfico de Whisker com indicação da média e intervalo de confiança de 80% para o estudo II e ensaios realizados aos 28 dias**

A comparação das médias entre os traços também foi realizada nesta etapa do estudo. A Tabela 4.9 apresenta um resumo do resultado do teste de comparação entre médias do estudo II para ensaio aos 28 dias. O valor 0 indica que a diferença entre as médias não é significante estatisticamente ao nível de confiança de 80%, e o valor 1 indica o contrário.

**Tabela 4.9: Resumo dos teste de comparação entre as médias dos ensaios do estudo II para um nível de confiança de 80% e ensaio aos 28 dias**

| Traço | T I 28 | T1 I 28 | T2 I 28 | T3 I 28 | T4 I 28 | T5 I 28 | T6 I 28 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T I 28 | -- | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| T1 I 28 | | -- | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| T2 I 28 | | | -- | 1 | 0 | 0 | 1 |
| T3 I 28 | | | | -- | 0 | 0 | 1 |
| T4 I 28 | | | | | -- | 0 | 1 |
| T5 I 28 | | | | | | -- | 1 |
| T6 I 28 | | | | | | | -- |

Onde: T: Traço padrão; T1: 20% de areia reciclada; T2: 40% de areia reciclada; T3: 20% de brita reciclada; T4: 40% de brita reciclada; T5: 20% de areia de fundição; T6: 40% de areia de fundição; Significância 0: indica que a diferença entre as médias não é significante ao nível de significância de 20%; Significância 1: indica que a diferença entre as médias é significante ao nível de significância de 20%.

Analisando a Tabela 4.9, tomando-se como referência o traço padrão T I 28, observa-se que, exceto o traço T1 I 28 dias, todos os outros traços apresentam médias estatisticamente

diferentes daquela observada para o traço padrão, ou seja, há indícios estatísticos de que a substituição dos agregados naturais por 40% de areia reciclada, brita reciclada e areia de fundição leva a alterações do comportamento mecânico dos *pavers* promovendo a redução da resistência à compressão média. Analogamente, poder-se-ia dizer que não há diferença significativa entre a média de resistência do traço T I 28 (padrão) e do traço T1 I 28, com 20% de areia de reciclada. Assim, conclui-se que a substituição nesta proporção não alteraria o comportamento mecânico dos *pavers*. Analisando para os mesmos materiais de substituição nas diferentes proporções estudadas, observa-se que há diferenças estatísticas entre as médias com 20% (T1 I 28) e 40% (T2 I 28) de areia reciclada. Assim, conclui-se que o aumento na proporção deste material reduziu a resistência amostral média do *paver*, sendo maior a redução quanto maior a proporção de substituição. Análise semelhante pode ser feita para a areia de fundição, observa-se que há diferenças estatísticas significativas entre as médias dos traços T5 I 28 e T6 I 28, respectivamente 20% e 40% de areia de fundição. Portanto, o aumento da proporção de areia de fundição no traço reduziu sua resistência média, sendo maior redução quanto maior a proporção de substituição. Com relação à brita reciclada, não há diferenças significativas entre as médias obtidas com 20% e 40% deste material. Portanto, não há indícios de o aumento da proporção deste material de 20% para 40% no traço reduza a resistência dos *pavers*.

A Tabela 4.10 apresenta as diferenças, absolutas e relativas, entre os traços com substituição (T1 I a T6 I) e o traço padrão (T I) para os ensaios aos 28 dias.

**Tabela 4.10: Diferenças absolutas e relativas entre os traços com substituição e o traço padrão para o estudo II ensaiados aos 28 dias**

| | Diferença entre as médias amostrais | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | T1 I 28 | T2 I 28 | T3 I 28 | T4 I 28 | T5 I 28 | T6 I 28 |
| Absoluta (MPa) | -0,1 | -8,5 | -12,8 | -11,3 | -11,4 | -21,2 |
| Relativa | -0,5% | -31,5% | -47,3% | -41,8% | -42,1% | -78,3% |

Analisando a Tabela 4.10 observa-se que, exceto o traço com 20% de areia reciclada (T1 I 28), todos os demais traços apresentaram reduções na resistência média superiores a 30%, com uma redução máxima de aproximadamente 78% para o traço T6 I 28 (40% de areia de fundição).

### 4.2.3 Comparação entre os resultados de compressão simples aos 7 e aos 28 dias - efeito do tempo de cura

Discute-se neste item a comparação entre os resultados dos ensaios aos 7 e aos 28 dias. Dessa forma foi possível avaliar o efeito do tempo de cura sobre a resistência mecânica dos *pavers* produzidos com cada um dos traços estudados. A Tabela 4.11 apresenta o resumo das resistências médias obtidas para cada traço aos 7 e aos 28 dias de cura, bem como as diferenças de resistência entre estes mesmos períodos em valores absolutos e relativos.

**Tabela 4.11: Valores médios de resistência à compressão para períodos de cura de 7 e 28 dias e diferenças de resistências absolutas e relativas**

| Traço | Período (dias) | | Diferença entre as resistências | |
|---|---|---|---|---|
| | 7 | 28 | Absoluta (MPa) | Relativa |
| | Resistência média (MPa) | | | |
| T I | 14,49 | 27,10 | 12,61 | 87,0% |
| T1 I | 22,82 | 26,98 | 4,16 | 18,2% |
| T2 I | 18,60 | 18,56 | -0,04 | -0,2% |
| T3 I | 11,41 | 14,27 | 2,87 | 25,1% |
| T4 I | 10,28 | 15,79 | 5,51 | 53,6% |
| T5 I | 12,98 | 15,69 | 2,71 | 20,9% |
| T6 I | 3,75 | 5,89 | 2,14 | 57,0% |

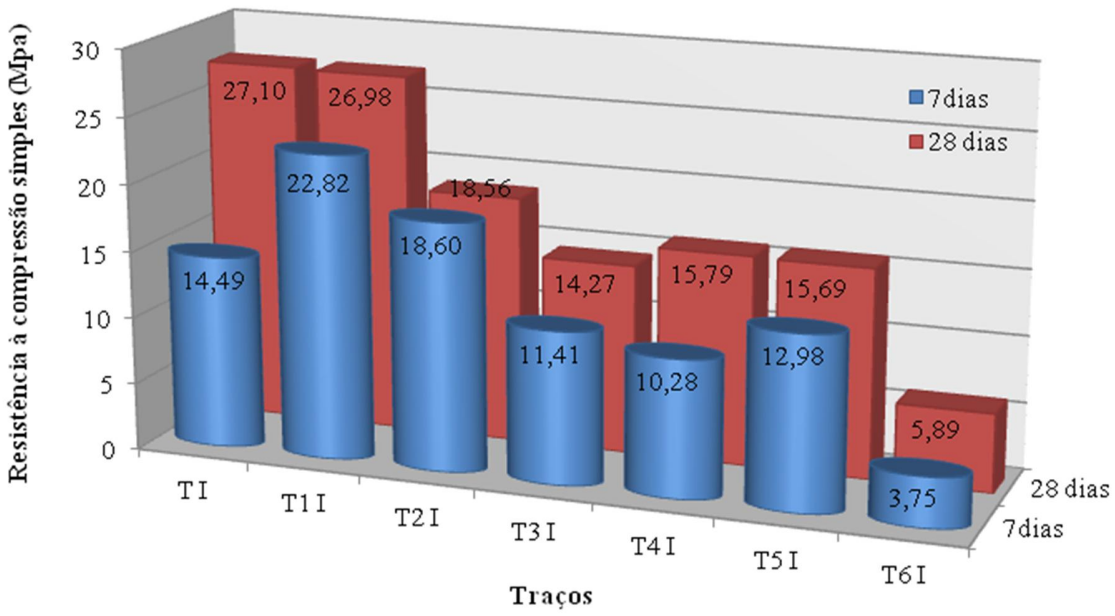


**Figura 4.8: Gráfico com valores médios de resistência à compressão para períodos de cura de 7 e 28 dias**

Como forma de melhor analisar as informações fornecidas foram criados gráficos em função do tipo de material de substituição e sempre acompanhado do traço padrão como parâmetro de comparação. A Figura 4.9, a Figura 4.10 e a Figura 4.11 apresentam as resistências à compressão aos 7 e 28 dias respectivamente para os conjuntos de traços: T I, T1 I e T2 I; T I, T3 I e T4 I; e, T I, T5 I e T6 I.

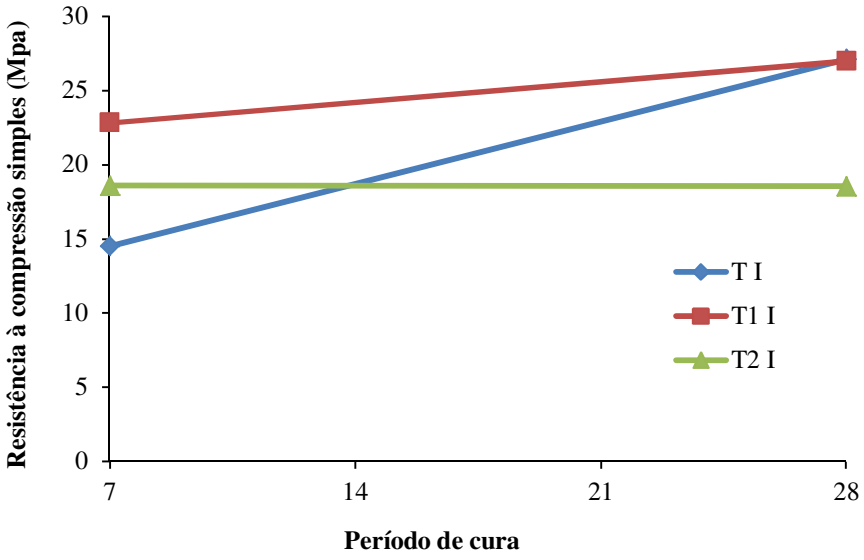


**Figura 4.9: Variação de resistência média aos 7 e 28 dias para os traços T I, T1 I e T2 I**

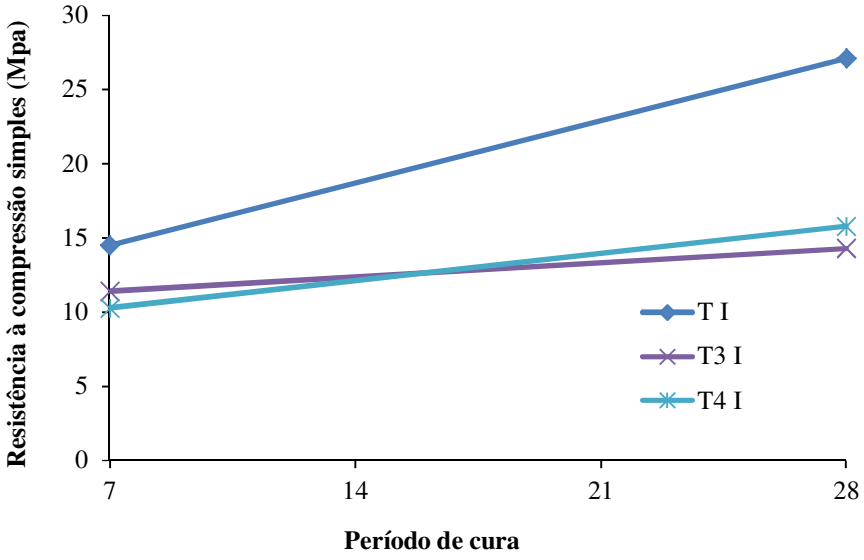


**Figura 4.10: Variação de resistência média aos 7 e 28 dias para os traços T I, T3 I e T4 I**

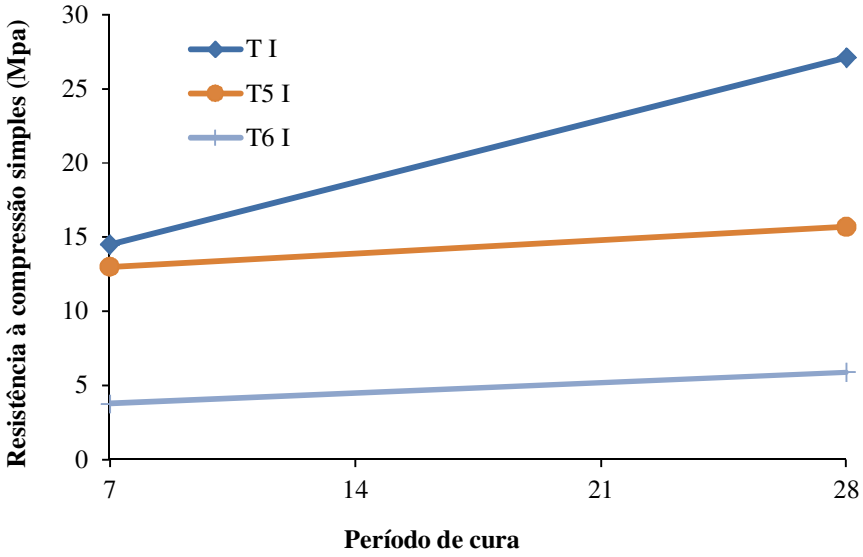


**Figura 4.11: Variação de resistência média aos 7 e 28 dias para os traços T I, T5 I e T6 I**

Analisando conjuntamente a Tabela 4.11 e a Figura 4.9 observa-se um ganho de aproximadamente 87% na resistência do traço padrão (T I), comparando-se as médias obtidas aos 7 e aos 28 dias. Um teste estatístico de comparação entre as médias para os dois períodos indica que os valores são significativamente diferentes ao nível de confiança de 80%. Portanto, é possível dizer que há indícios de que o aumento do tempo de cura produziu aumento na resistência media dos *pavers*. Análise semelhante realizada para o traço T1 I (20% de areia reciclada) mostra também diferenças significativas entre as médias aos 7 e aos 28 dias. Dessa forma, existem também evidências estatísticas de que o tempo de cura promoveu o aumento da resistência média dos *pavers*. Contudo, neste caso o ganho observado de aproximadamente 18% foi inferior ao do traço padrão. Apesar de aos 7 dias o traço T1 I ter apresentado resistência superior ao do traço padrão, verifica-se uma tendência de convergência dos resultados dos dois traços aos 28 dias. Para melhor compreender este fenômeno seria necessário realizar ensaios com tempos superiores aos aqui realizados para confirmar, ou não, esta tendência. Com relação ao traço T2 I (40% de areia reciclada), teste de comparação entre médias indicam não haver diferenças significativas entre os resultados aos 7 e aos 28 dias ao nível de confiança de 80%. Portanto, para o traço em questão não existem evidências estatísticas de o tempo de cura aumente, ou diminua, a resistência média dos *pavers*. Dessa forma, a redução de 0,2% verificada pode ser devido apenas à variabilidade intrínseca do ensaio.

Analisando conjuntamente a Tabela 4.11 e Figura 4.10 verifica-se que de 7 para 28 dias houve um ganho na resistência média de aproximadamente 25% e 53%, respectivamente para os traços T3 I (20 de brita reciclada) e T4 I (40% de brita reciclada). Um teste de comparação entre médias ao nível de confiança de 80% indica haver diferenças significativas entre os valores obtidos aos 7 e aos 28 dias. Portanto, existem indícios estatísticos de que o tempo de cura produziu aumento da resistência média dos *pavers* produzidos com brita reciclada.

Analisando conjuntamente a Tabela 4.11 e Figura 4.11 verifica-se que de 7 para 28 dias houve um ganho na resistência média de aproximadamente 21% e 57%, respectivamente para os traços T5 I (20% de areia de fundição) e T6 I (40% de areia de fundição). Um teste de comparação entre médias ao nível de confiança de 80% indica haver diferenças significativas entre os valores obtidos aos 7 há aos 28 dias. Portanto, existem indícios estatísticos de que o tempo de cura produziu aumento da resistência média dos *pavers* produzidos com areia de fundição.

De todos os traços analisados, aquele que apresentou o pior resultado, independente do período de cura foi o T6 I, com 40% de areia de fundição. O traço T5 I, com 20% de areia de fundição, apresentou comportamento semelhante aos traços T2 I, T3 I e T4 I, aos 28dias. Conforme se verifica na Tabela 4.9, testes estatísticos mostraram não haver diferenças significativas entre as resistências médias destes traços. Já o melhor comportamento foi observado para o traço T2 I, com 20% de areia reciclada, que aos 7 dias apresentou resistência superior ao traço padrão e aos 28 dias resistência de mesma ordem de grandeza.

De forma geral, como era esperado, é possível avaliar que o aumento do tempo de cura resultou em aumento da resistência à compressão do *pavers*, exceto para o traço T2 I.

## 4.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE COMPRESSÃO SIMPLES AOS 7 DIAS DO ESTUDO I E DO ESTUDO II

Neste item são realizadas comparações entre os ensaios aos 7 dias obtidos durante a etapa preliminar de estudos e a etapa de estudo II. Dessa forma, foi possível avaliar o efeito da mudança no traço sobre a resistência à compressão dos *pavers*. A Tabela 4.12 apresenta os valores médios de resistência para esta análise, bem como a diferença entre as médias em termos

absolutos e relativos. A Figura 4.12 apresenta um gráfico com comparativo entre as resistências médias aos 7 dias do estudo preliminar e do estudo definitivo.

**Tabela 4.12: Valores médios de resistência à compressão para períodos de cura de 7 do estudo I e do estudo II e diferenças de resistências absolutas e relativas**

| Traço | Estudo | | Diferença entre as resistências | |
|---|---|---|---|---|
| | Preliminar | Definitivo I | Absoluta (MPa) | Relativa |
| | Resistência média aos 7 dias (MPa) | | | |
| T | 12,36 | 14,49 | 2,13 | 17,2% |
| T1 | 11,66 | 22,82 | 11,15 | 95,6% |
| T2 | 8,40 | 18,60 | 10,20 | 121,4% |
| T3 | 8,74 | 11,41 | 2,67 | 30,6% |
| T4 | 7,58 | 10,28 | 2,70 | 35,6% |
| T5 | 7,68 | 12,98 | 5,30 | 69,0% |
| T6 | 3,79 | 3,75 | -0,04 | -1,1% |

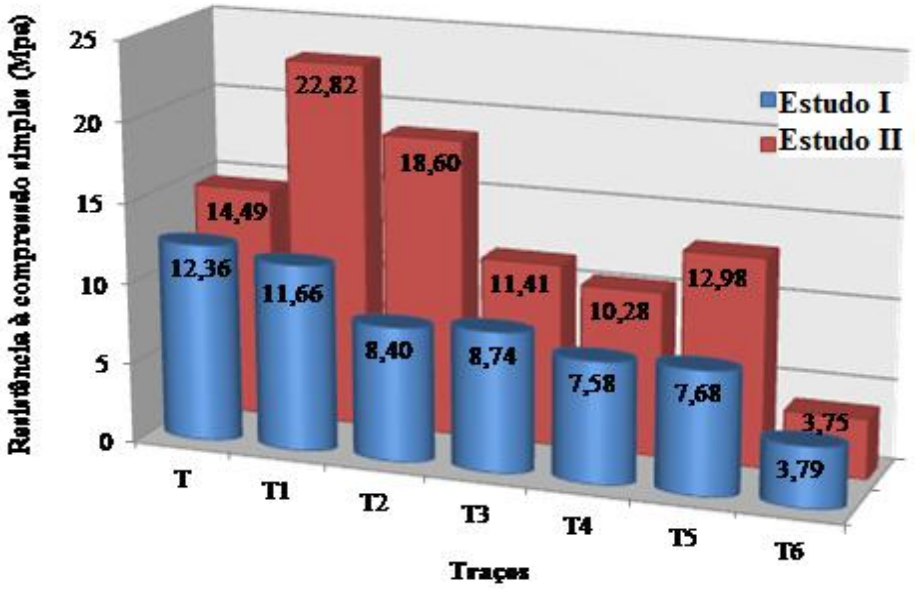


**Figura 4.12: Gráfico comparativo entre as resistências médias aos 7 dias do estudo I e do estudo II**

Analisando conjuntamente a Tabela 4.12 e Figura 4.12 verifica-se que, exceto para o traço T6 (40% de areia de fundição), todos os demais traços apresentaram maiores valores de resistência no estudo definitivo se comparado ao seu respectivo no estudo preliminar. Para avaliar se as diferenças eram resultado da variabilidade do ensaio ou se efetivamente a mudança de traço promoveu alterações no comportamento mecânico dos *pavers* realizaram-se teste de comparação

entre médias. Analisando-se os resultados destes testes verificou-se que, comparados dois a dois os traços com mesmo material de substituição e igual proporção, ao nível de confiança de 80%, as médias obtidas são significativamente diferentes, exceto para o traço T6. Há, portanto, indícios estatísticos de que a alteração no traço promoveu aumento na resistência à compressão dos *pavers*. As Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15 mostram a variação da resistência à compressão aos 7 dias entre os estudo I e o Estudo II, respectivamente para os traços: T, T1 e T2; T, T3 e T4; T, T5 e T6.

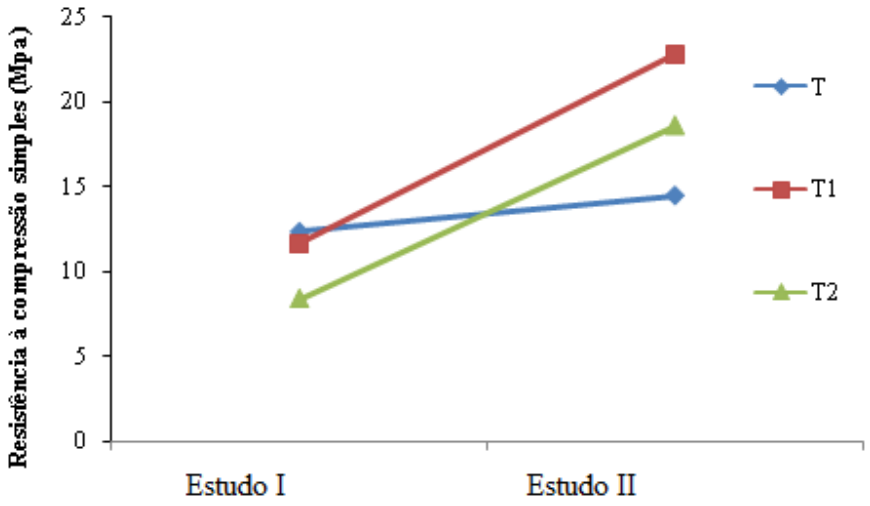


**Figura 4.13: Variação da resistência média aos 7 dias entre o estudo I e o estudo II para os traços T, T1 e T2**

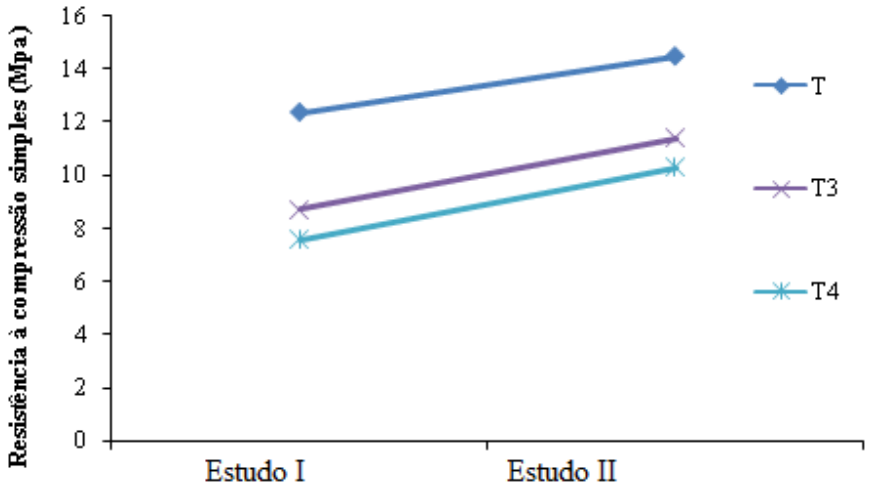


**Figura 4.14: Variação da resistência média aos 7 dias entre o estudo I e o estudo II para os traços T, T3 e T4**

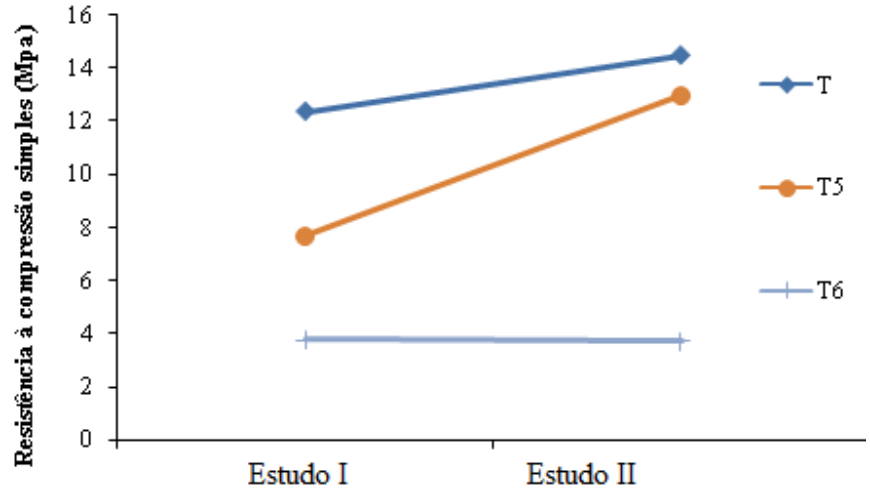


**Figura 4.15: Variação da resistência média aos 7 dias entre o estudo I e o estudo II para os traços T, T5 e T6**

Observando-se a Tabela 4.12 e as Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15, verifica-se que os maiores ganhos foram encontrados para os traços com substituição de areia reciclada, aproximadamente 96% e 121% respectivamente para T2 (20% de areia reciclada) e T3 (40% de areia reciclada). No caso do traço padrão (T) houve um aumento de aproximadamente 17% na resistência, enquanto para brita reciclada os ganhos foram de aproximadamente 31% e 36%, respectivamente para os traços T3 (20% de brita reciclada) e T4 (40% de brita reciclada). Outro ganho expressivo ocorreu para o traço T5 (20% de areia de fundição) que aumentou a resistência

em aproximadamente 69%. Para o traço T6 a alteração promovida no traço parece não ter resultado em ganhos de resistência, na medida em que, conforme já discutido, não diferenças significativas entre as médias.

De modo geral, analisando-se os resultados obtidos aos 7 dias, pode-se concluir que a alteração promovida no traço padrão do estudo I para o estudo II resultou em ganhos de resistência média dos *pavers*. Do ponto de vista de transferência tecnológica, essa é uma grande vantagem para a empresa que produziu os *pavers* neste trabalho. Havendo desejo, vislumbra-se a possibilidade de melhorar a qualidade mecânica de suas peças de concreto.

## 4.4 ESTUDO DEFINITIVO

Nesta etapa do trabalho foram compactados 10 *pavers* para cada um dos traços estudados (Vide Capítulo 3), sendo ensaiados para um período de cura de 28 dias. Decidiu-se buscar melhores resultados de resistência a compressão, sendo assim o traço foi refeito e o traço padrão, em massa, considerado nesta etapa do trabalho é 1:0,77:2,33:1,11:0,33 (cimento, areia, pó-de-pedra, brita e água).

### 4.4.1 Resultados ensaios de Compressão simples aos 28 dias

A Tabela 4.13 apresenta os valores de resistência à compressão simples obtidos para cada traço testado. Ressalta-se que o mesmo procedimento usado nos estudos I e II para identificação de *outliers* foi aqui aplicado. Dessa forma, dois pontos experimentais foram descartados, um no traço T1 II e outro no traço T3 II, respectivamente substituições de 20% de areia reciclada e 40% de brita reciclada. Analisando-se a mesma tabela, verifica-se que o coeficiente de variação em todos os casos é inferior a 21%, indicando pequena dispersão entre os resultados de ensaio utilizados para determinação das médias. A

A Figura 4.16 apresenta o gráfico com os valores de resistência à compressão para os ensaios realizados aos 28 dias. A Figura 4.17 mostra o gráfico de Whisker com indicação das médias de cada traço estudado e o intervalo de confiança da média para um nível de confiança de 80%.

**Tabela 4.13: Valores de resistência à compressão simples para os seis melhores resultados determinados no estudo definitivo ensaiados aos 28 dias**

| Nº | Traço | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | T II | T1 II | T2 II | T3 II | T4 II | T5 II | T6 II |
| | Resistência à compressão simples ($f_{pi}$) (MPa) ($f_{pi}$) | | | | | | |
| 1 | 28,0564 | 31,60 | 26,2 | 23,43 | 14,18 | 9,56 | 10,48 |
| 2 | 27,75 | 32,06 | 25,4 | 24,97 | 13,87 | 14,18 | 13,87 |
| 3 | 26,9774 | 32,99 | 26,5 | 24,97 | 16,96 | 12,02 | 15,11 |
| 4 | 28,5189 | 31,60 | 29,3 | 24,36 | 16,19 | 16,49 | 10,79 |
| 5 | 28,98 | 31,14 | 28,1 | 23,43 | 13,87 | 10,79 | 12,33 |
| 6 | 26,98 | | 28,1 | | 14,18 | 11,56 | 12,02 |
| Média = | 27,88 | 31,88 | 27,27 | 24,23 | 14,88 | 12,44 | 12,44 |
| d-p = | 0,81 | 0,70 | 1,47 | 0,77 | 1,34 | 2,51 | 1,78 |
| CV = | 2,91% | 2,20% | 5,37% | 3,19% | 9,03% | 20,17% | 14,34% |

Onde: T: Traço padrão; T1: 20% de areia reciclada; T2: 40% de areia reciclada; T3: 20% de brita reciclada; T4: 40% de brita reciclada; T5: 20% de areia de fundição; T6: 40% de areia de fundição; d-p: desvio padrão amostral; CV: coeficiente de variação determinado pela razão entre o d-p e a média.

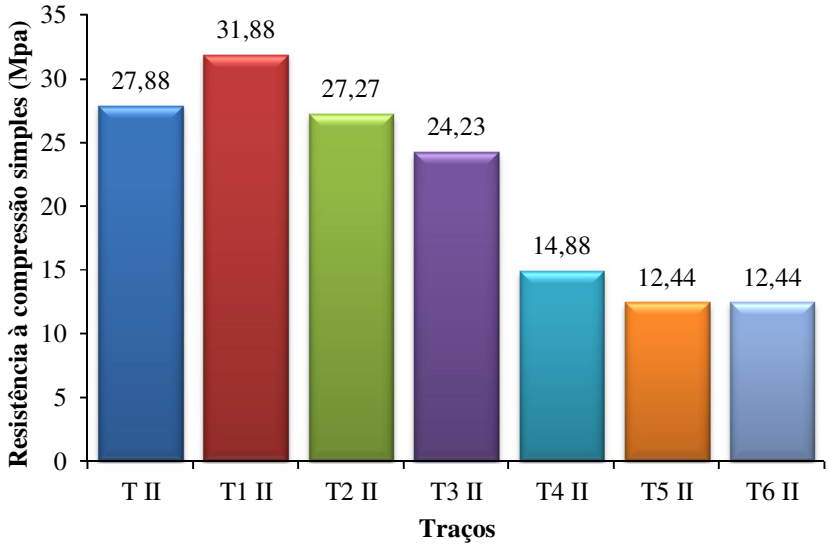


**Figura 4.16: Gráfico dos valores de resistência à compressão simples dos traços avaliados no estudo definitivo e ensaiados aos 28 dias**

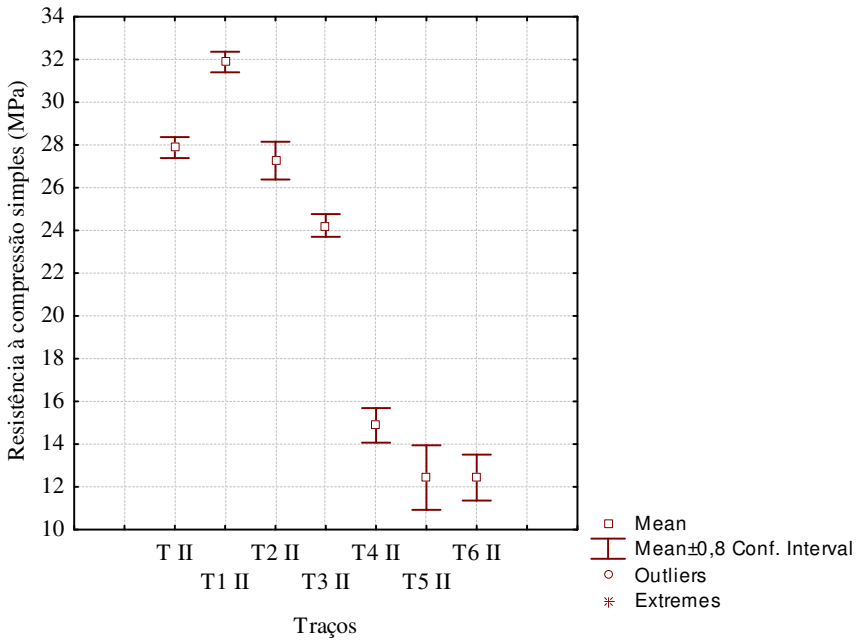


**Figura 4.17: Gráfico de Whisker com indicação da média e intervalo de confiança de 80% para o estudo definitivo e ensaios realizados aos 28 dias**

A análise de variância indica que, ao se avaliar de forma conjunta todas as condições do estudo, verifica-se que as médias amostrais são significativamente diferentes ao nível de confiança de 80%. Portanto, há indícios estatísticos de que as substituições realizadas promovem alterações no comportamento mecânico dos *pavers*, em uma ou mais das condições analisadas.

A comparação das médias entre os traços foi realizada também nesta etapa do estudo. A Tabela 4.14 apresenta um resumo do resultado do teste de comparação entre médias para o estudo definitivo II. O valor 0 indica que a diferença entre as médias não é significante estatisticamente ao nível de confiança de 80%, e o valor 1 indica o contrário.

Analisando a Tabela 4.14, tomando-se como referência o traço padrão T, observa-se que, exceto o traço T2 II, todos os outros traços apresentam médias estatisticamente diferentes daquela observada para o traço padrão, ou seja, há indícios estatísticos de que a substituição dos agregados naturais por 20% de areia reciclada, brita reciclada e areia de fundição leva a alterações do comportamento mecânico dos *pavers*. Analogamente, poder-se-ia dizer que não há diferença significativa entre a média de resistência do traço T II (padrão) e do traço T2 II, com 40% de areia de reciclada. Assim, existem evidências estatísticas de que a substituição nesta proporção não alteraria o comportamento mecânico dos *pavers* para ensaios aos 28 dias.

Considerando-se o traço T1 II (20% de areia reciclada) observa-se que nesta proporção há um aumento na resistência média se comparado ao traço padrão (T II). Nos demais casos há redução da resistência média dos *pavers*.

**Tabela 4.14: Resumo dos testes de comparação entre as médias dos ensaios do estudo definitivo para um nível de confiança de 80% e ensaio aos 28 dias**

| Traço | T II | T1 II | T2 II | T3 II | T4 II | T5 II | T6 II |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T II | -- | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| T1 II | | -- | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| T2 II | | | -- | 1 | 1 | 1 | 1 |
| T3 II | | | | -- | 1 | 1 | 1 |
| T4 II | | | | | -- | 1 | 1 |
| T5 II | | | | | | -- | 0 |
| T6 II | | | | | | | -- |

Onde: T: Traço padrão; T1: 20% de areia reciclada; T2: 40% de areia reciclada; T3: 20% de brita reciclada; T4: 40% de brita reciclada; T5: 20% de areia de fundição; T6: 40% de areia de fundição; Significância 0: indica que a diferença entre as médias não é significante ao nível de significância de 20%; Significância 1: indica que a diferença entre as médias é significante ao nível de significância de 20%.

Analisando para os mesmos materiais de substituição nas diferentes proporções estudadas, observa-se que há diferenças estatísticas entre as médias com 20% (T1 II) e 40% (T2 II) de areia reciclada. Assim, conclui-se que o aumento na proporção deste material reduziu a resistência amostral média do *paver*, sendo maior a redução quanto maior a proporção de substituição. Análise semelhante pode ser feita para a brita reciclada, observa-se que há diferenças estatísticas significativas entre as médias dos traços T5 II e T6 II, respectivamente 20% e 40% de brita reciclada. Portanto, o aumento da proporção deste material no traço reduziu sua resistência média, sendo maior redução quanto maior a proporção de substituição. Com relação à areia de fundição, não há diferenças significativas entre as médias obtidas com 20% e 40% deste material. Portanto, não há indícios de o aumento da proporção deste material de 20% para 40% no traço reduza a resistência dos *pavers*.

A Tabela 4.15 apresenta as diferenças, absolutas e relativas, entre os traços com substituição (T1 II a T6 II) e o traço padrão (T II) para ensaios aos 28 dias.

Analisando a Tabela 4.15 observa-se que, exceto o traço com 20% de areia reciclada (T1 II), todos os demais traços apresentaram reduções na resistência média variando de 2,2% até 55,4%.

**Tabela 4.15: Diferenças absolutas e relativas entre os traços com substituição e o traço padrão para o estudo definitivo ensaiados aos 28 dias**

| | Diferença entre as médias amostrais | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | T1 II | T2 II | T3 II | T4 II | T5 II | T6 II |
| Absoluta (MPa) | 4,0 | -0,6 | -3,6 | -13,0 | -15,4 | -15,4 |
| Relativa | 14,4% | -2,2% | -13,1% | -46,6% | -55,4% | -55,4% |

## 4.5 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE COMPRESSÃO SIMPLES AOS 28 DIAS DO ESTUDO II E DO ESTUDO DEFINITIVO

Neste item são realizadas comparações entre os ensaios aos 28 dias obtidos durante a etapa de estudo II e a etapa de estudo definitivo . Dessa forma, foi possível avaliar o efeito da mudança no traço sobre a resistência à compressão dos *pavers*. A Tabela 4.16 apresenta os valores médios de resistência para esta análise, bem como a diferença entre as médias em termos absolutos e relativos. A Figura 4.18 apresenta um gráfico com comparativo entre as resistências médias aos 28 dias do estudo II e do estudo definitivo.

**Tabela 4.16: Valores médios de resistência à compressão para períodos de cura de 28 dias do estudo II e do estudo definitivo e diferenças de resistências absolutas e relativas**

| **Traço** | **Estudo** | | **Diferença entre as resistências** | |
|---|---|---|---|---|
| | **Estudo II** | **Definitivo** | **Absoluta (MPa)** | **Relativa** |
| | **Resistência média aos 7 dias (MPa)** | | | |
| T | 27,10 | 27,88 | 0,78 | 2,9% |
| T1 | 26,98 | 31,88 | 4,90 | 18,2% |
| T2 | 18,56 | 27,27 | 8,71 | 46,9% |
| T3 | 14,27 | 24,23 | 9,96 | 69,8% |
| T4 | 15,79 | 14,88 | -0,91 | -5,8% |
| T5 | 15,69 | 12,44 | -3,26 | -20,8% |
| T6 | 5,89 | 12,44 | 6,55 | 111,2% |

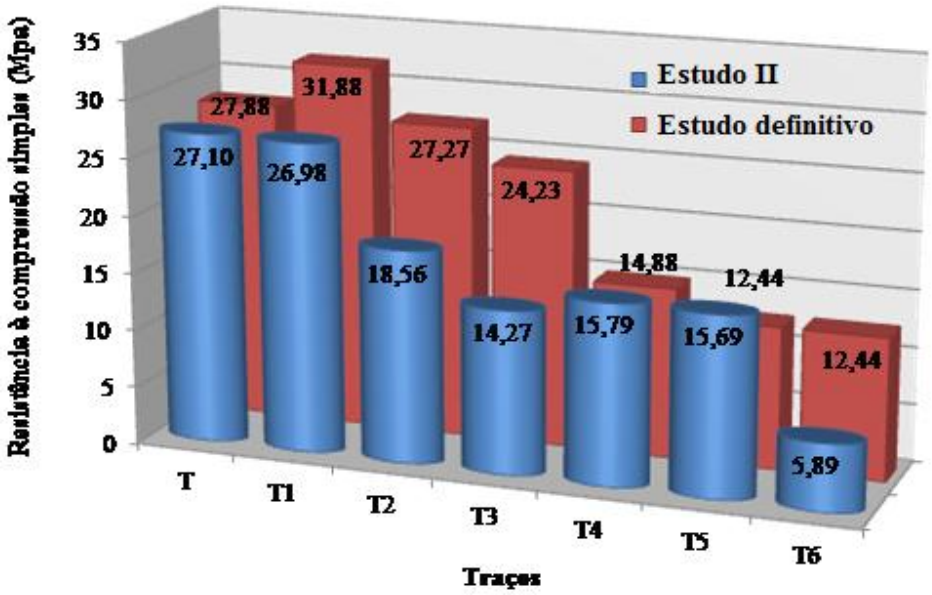


**Figura 4.18: Gráfico comparativo entre as resistências médias aos 28 dias do estudo II e do estudo definitivo**

Analisando conjuntamente a Tabela 4.16 e Figura 4.18 verifica-se que, exceto para os traços T4 (40% de brita reciclada) e T5 (20% de areia de fundição), todos os demais traços apresentaram maiores valores de resistência no estudo definitivo se comparado ao seu respectivo no estudo II. Para avaliar se as diferenças eram resultado da variabilidade do ensaio ou se efetivamente a mudança de traço promoveu alterações no comportamento mecânico dos *pavers* realizaram-se teste de comparação entre médias. Analisando-se os resultados destes testes verificou-se que, comparados dois a dois os traços com mesmo material de substituição e igual proporção, ao nível de confiança de 80%, as médias obtidas são significativamente diferentes, exceto para o traço padrão (T). Há, portanto, indícios estatísticos de que a alteração no traço promoveu aumento na resistência à compressão dos *pavers,* exceto para o traço T que apresentou uma diferença de aproximadamente 2,9% entre os estudos. A Figura 4.19, a Figura 4.20 e a Figura 4.21 mostram a variação da resistência à compressão aos 28 dias entre o estudo II e o Definitivo, respectivamente para os traços: T, T1 e T2; T, T3 e T4; T, T5 e T6.

Observando-se a Tabela 4.16 e as Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15, verifica-se que os maiores ganhos foram encontrados para os traços com substituição de 40% de areia reciclada e 20% de brita reciclada e 40% de areia de fundição, respectivamente 47%, 70% e 111%, aproximadamente. No caso do traço padrão (T) houve um aumento de aproximadamente 3% na

resistência, enquanto para o traço T1 (20% de areia reciclada) o ganho foi de aproximadamente 18%. No caso dos traços T4 e T5 verificam-se reduções de aproximadamente 6 e 21%.

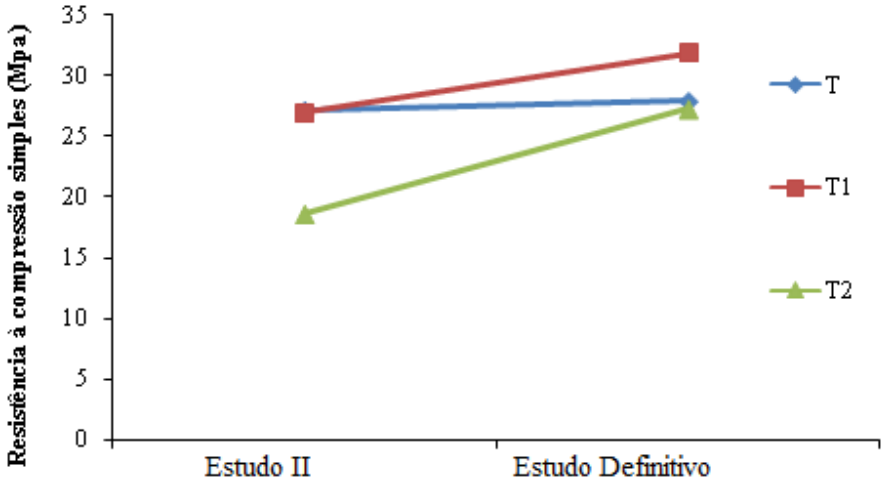


**Figura 4.19: Variação da resistência média aos 7 dias entre o estudo II e o definitivo para os traços T, T1 e T2**

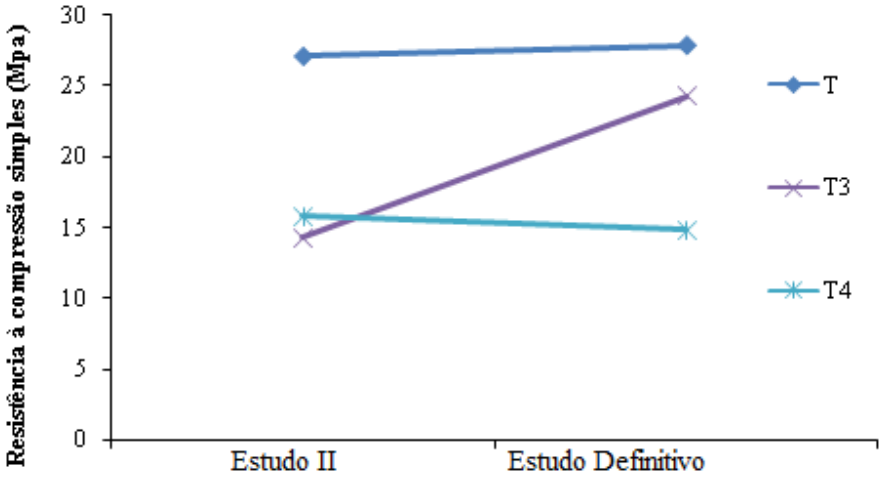


**Figura 4.20: Variação da resistência média aos 7 dias entre o estudo II e o definitivo para os traços T, T3 e T4**

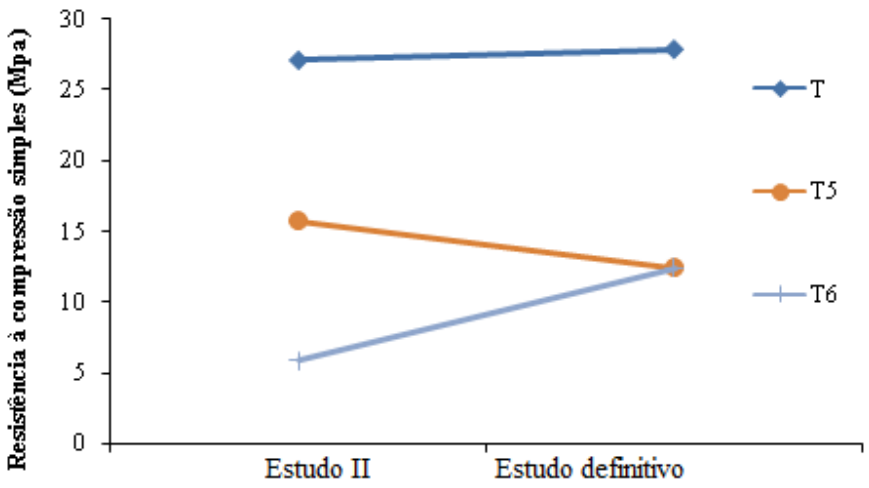


**Figura 4.21: Variação da resistência média aos 7 dias entre o estudo II e o definitivo para os traços T, T5 e T6**

De modo geral, analisando-se os resultados obtidos aos 28 dias, pode-se concluir que a alteração promovida no traço padrão do estudo definitivo I para o definitivo II resultou em ganhos de resistência média dos *pavers*, principalmente os materiais com substituição de areia reciclada (20% e 40%) e 20% de brita reciclada.

## 4.6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO ESTUDO DEFINITIVO COM ESPECIFICAÇÕES DAS NORMAS

No Capítulo 2 foram apresentadas especificações de resistência à compressão de diferentes normas. Neste item são comparados os resultados obtidos com as especificações destas normas, aplicadas em diferentes regiões ou países.

A resistência à compressão como especificada por diferentes normas não fornece uma medida direta da durabilidade do *paver*, contudo fornece um método simples e útil de verificação da qualidade de cada peça. Seria aceitável pensar que um pavimento constituído por peças de resistência característica de 50 MPa esteja mais apto a resistir às cargas aplicadas em sua superfície do que pavimentos com uma resistência característica de 25 MPa. Porém, dependo da solicitação imposta, a resistência da ordem de 25 MPa, ou mesmo 15 MPa, talvez fossem suficientes. Deve-se considerar ainda que especificações de países de clima temperado, com altos

valores de resistência, estejam também preocupados em garantir durabilidade aos elementos que estarão sujeitos a ciclos de gelo e degelo.

Há que se discutir também a tendência de substituição da resistência à compressão simples pela resistência à tração como parâmetro de caracterização mecânica dos *pavers*. Algumas normas já adotam este parâmetro em conjunto com a resistência abrasão e outros como medida de qualidade das peças.

**Tabela 4.17: Especificações de norma para avaliação mecânica de pavers**

| Norma | | Parâmetro |
|---|---|---|
| Européia | BS EM-1388 (2003) | Utiliza o ensaio de tração indireta com corpos de prova cilíndricos |
| Americana | ASTMC936:1996 | Resistência à compressão ħ 55,0 MPa |
| Canadense | CSAA23.2-95:1995 | Resistência à compressão ħ 50 MPa |
| Brasileira | NBR 9780:1987 | Resistência à compressão ħ 35 MPa (solicitação de veículos comerciais, ou de linha)<br>Resistência à compressão ħ 50 MPa (tráfego de veículos especiais ou solicitações capazes de produzir acentuados efeitos de abrasão) |
| Austrália | AS/NZS 4456.4:2003 | Resistência à compressão: 25 a 60 MPa |
| África do Sul | SANS 1058:2009 | Resistência à compressão ħ 25 MPa e tensão de tração de 2,2 MPa (tráfego leve)<br>Resistência à compressão ħ 35 MPa e tensão de tração de 2,8 MPa (tráfego pesado) |

As especificações de resistência à compressão usualmente são estabelecidas para períodos de cura de 28 dias. Assim, para efeito de comparação usaremos apenas os resultados obtidos aos 28 dias nos ensaios deste trabalho. Analisando a Tabela 4.16 verifica-se que nenhum dos traços estudados atingiu o valor mínimo especificado pela norma Brasileira de 35 MPa. Entretanto, os traços T (padrão) e T1 (20% de areia reciclada) e T2 II atenderiam às especificações mínimas das normas Australiana e Sul africana para tráfego leve. Considerando o exposto por Fioriti et al. (2007), de que resistências de 15 MPa seriam suficientes para suportar as cargas exercidas em calçadas, praças e locais com trânsito leve, todos os traços estudados, exceto o T6 I, T4 II, T5 II e T6 II, poderiam ser utilizados com esta finalidade.

# 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

## 5.1 CONCLUSÕES

As principais conclusões desta pesquisa, que teve por objetivo avaliar as propriedades mecânicas de *pavers* produzidos com brita reciclada, areia de fundição e areia reciclada em substituição a agregados naturais, são apresentadas a seguir:

No estudo preliminar obteve-se uma variação para os ensaios de compressão simples aos 7 dias entre 3 MPa valor mínimo e 12 MPa valor máximo, atribuindo aos respectivos valores a areia de fundição com 40% de substituição e ao traço padrão, em comparação ao traço padrão preliminar ( traço este utilizado pela fábrica de blocos), verifica-se uma tendência de redução dos valores de resistência com a substituição dos agregados naturais pelos materiais estudados, qualquer que seja ele. Observa-se também que quanto maior a proporção de substituição, maior a redução da resistência, ou seja, a substituição de 40% sempre resultou em valores inferiores de resistência se comparados aos valores com 20% de substituição;

No estudo definitivo I obteve-se uma variação para os ensaios de compressão simples aos 7 dias entre 3,75MPa como valor mínimo e 22,82MPa, atribuindo aos respectivos valores a areia de fundição com 40% de substituição e ao traço com areia reciclada com 20% de substituição, o que difere do traço preliminar onde o maior resultado foi encontrado no padrão, portanto substituições com areia reciclada promoveram o aumento dos valores de resistência à compressão simples se comparado ao traço padrão T. Os demais traços, também comparados ao padrão, resultaram em valores inferiores a este. Neste caso também a areia de fundição na proporção de 40% foi responsável pela maior redução;

No estudo definitivo I obteve-se uma variação para os ensaios de compressão simples aos 28 dias entre 5,89MPa como valor mínimo e 27,10MPa, na média todos os outros traços apresentam médias estatisticamente diferentes daquela observada para o traço padrão, ou seja, há indícios estatísticos de que a substituição dos agregados naturais por 40% de areia reciclada, brita reciclada e areia de fundição leva a alterações do comportamento mecânico dos *pavers* promovendo a redução da resistência à compressão média. Analogamente, poder-se-ia dizer que não há diferença significativa entre a média de resistência do traço T I 28 (padrão) e do traço T1 I 28, com 20% de areia de reciclada. Assim, conclui-se que a substituição nesta proporção não alteraria o comportamento mecânico dos *pavers*;

Entre o estudo preliminar e o estudo definitivo I foi constatado que, exceto para o traço T6 (40% de areia de fundição), todos os demais traços apresentaram maiores valores de resistência no estudo definitivo I se comparado ao seu respectivo no estudo preliminar. Indícios estatísticos provam que a alteração no traço promoveu aumento na resistência à compressão dos *pavers* onde os maiores ganhos foram encontrados para os traços com substituição de areia reciclada, aproximadamente 96% e 121% respectivamente para T2 (20% de areia reciclada) e T3 (40% de areia reciclada). No caso do traço padrão (T) houve um aumento de aproximadamente 17% na resistência, enquanto para brita reciclada os ganhos foram de aproximadamente 31% e 36%, respectivamente para os traços T3 (20% de brita reciclada) e T4 (40% de brita reciclada). Outro ganho expressivo ocorreu para o traço T5 (20% de areia de fundição) que aumentou a resistência em aproximadamente 69%. Para o traço T6 a alteração promovida no traço não teve resultado em ganhos de resistência;

No estudo definitivo II obteve-se uma variação para os ensaios de compressão simples aos 28 dias entre 12,44MPa como valor mínimo e 31,48MPa , atribuindo aos respectivos valores a areia de fundição com 40% de substituição e ao traço com areia reciclada com 20% de substituição, tendo como referência o traço padrão T II, foi constatado que, exceto o traço T2 II, todos os outros traços apresentaram médias estatisticamente diferentes daquela observada para o traço padrão, ou seja, há indícios estatísticos de que a substituição dos agregados naturais por 20% de areia reciclada, brita reciclada e areia de fundição leva a alterações do comportamento mecânico dos *pavers*. Analogamente, poder-se-ia dizer que não há diferença significativa entre a média de resistência do traço T II (padrão) e do traço T2 II, com 40% de areia de reciclada. Assim, existem evidências estatísticas de que a substituição nesta proporção não alteraria o comportamento

mecânico dos *pavers* para ensaios aos 28 dias. Considerando-se o traço T1 II (20% de areia reciclada) foi observado que nesta proporção há um aumento na resistência média se comparado ao traço padrão (T II). Nos demais casos houve redução da resistência média dos *pavers*;

Na comparação entre o Estudo Definitivo II e Estudo Definitivo I aos 28 dias constatou-se que, exceto para os traços T4 (40% de brita reciclada) e T5 (20% de areia de fundição), todos os demais traços apresentaram maiores valores de resistência no estudo definitivo II se comparado ao seu respectivo no estudo definitivo I. Analisando-se ,comparados dois a dois, os traços com mesmo material de substituição e igual proporção, ao nível de confiança de 80%, as médias obtidas são significativamente diferentes, exceto para o traço padrão (T). Há, portanto, indícios estatísticos de que a alteração no traço promoveu aumento na resistência à compressão dos *pavers,* exceto para o traço T que apresentou uma diferença de aproximadamente 2,9% entre os estudos. Verificou-se que os maiores ganhos foram encontrados para os traços com substituição de 40% de areia reciclada e 20% de brita reciclada e 40% de areia de fundição, respectivamente 47%, 70% e 111%, aproximadamente. No caso do traço padrão (T) houve um aumento de aproximadamente 3% na resistência, enquanto para o traço T1 (20% de areia reciclada) o ganho foi de aproximadamente 18%. No caso dos traços T4 e T5 verificam-se reduções de aproximadamente 6 e 21%;

Analisando-se os resultados aos 28 dias concluiu-se que a areia de fundição utilizada neste estudo contribuiu para reduzir a resistência à compressão simples dos pavers, relativamente ao traço padrão e independentemente do traço analisado e da proporção de substituição;

Os resultados para 28 dias mostraram também que a substituição por brita reciclada reduziu a resistência à compressão dos *pavers*, relativamente ao traço padrão e independentemente do traço analisado e da proporção de substituição;

Dentre os materiais utilizados na substituição, observou-se que aos 28 dias o melhor comportamento foi apresentado pelos *pavers* com substituição de areia reciclada. Esse melhor comportamento traduz-se em não alteração do comportamento mecânico, se comparado ao traço padrão, para substituições de 20% e 40%, respectivamente para os traços do estudos definitivo I e II e aumento da resistência com substituição de 20% de areia reciclada para o traço utilizado no estudo definitivo II.

Uma das variáveis que podem interferir efetivamente na qualidade das peças produzidas é o tipo de equipamento utilizado. Em participações em cursos sobre a produção de *pavers*

promovidos pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), chamava-se a atenção para existência de equipamentos de qualidade reconhecidamente inferior pelo mercado e que resultariam em produtos que poderiam não atender às especificações de norma. Uma das razões que se acredita tenha interferido nos resultados obtidos neste estudo, onde as resistências foram inferiores àqueles recomendados pelas normas nacionais, seja exatamente o tipo de equipamento empregado no preparo das peças;

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Projetar e produzir *pavers* com as mesmas características deste trabalho, mas em uma máquina de melhor qualidade e com melhor controle tecnológico;
2. Avaliar os traços estudados a partir de corpos de provas cilíndricos;
3. Estudar novos traços e novas porcentagens de substituição na produção dos *pavers*.
4. Ampliar os períodos de cura em análise como forma de melhor caracterizar o efeito do tempo no ganho de resistência;
5. Realizar ensaios de tração indireta e absorção seguindo a tendência mundial de ensaios de caracterização de pavers;
6. Realizar a análise econômica da utilização dos traços aqui estudados na produção dos *pavers*.

# 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


AASHTO **Guide for Design of Pavement** . American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington DC, USA, 1986.

_____. **Guide for Design of Pavement Structures** . American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, USA, 1993.

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

_____.**Pavimento Intertravado**. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/hot_site_intertravados/index.htm> . Acesso em: 28 mai 2009.

_____. **Apostila curso de Dimensionamento do Pavimento Intertravado.** 1ª ed, São Paulo ¯ SP. 2009.

ABIFA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO ¯ COMISSÃO DE MEIO AMBIENTE. **Manual de Regeneração e Reuso de Areias de Fundição**. São Paulo: Associação Brasileira de Fundição, p.1-49, 1999.

ABIFA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. Areias descartadas de Fundição - ADF. **ABIFA,** set 2006, São Paulo.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. NBR 5732**: Cimento Portland comum ¯ especificação. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 5732**: Cimento Portland comum ¯ especificação. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial -especificação. Rio de Janeiro, 1983.

_____. **NBR 5735**: Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5737**: Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 7216**: Amostragem de Agregados. Rio de Janeiro, 1987. Norma cancelada e substituída pela NM 26:2001.

_____. **NBR 7251**: Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982. Norma cancelada e substituída pela NM 45:2006.

_____. **NBR 9775**: Determinação da umidade superficial em agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 9780**: Peças de concreto para pavimentação: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 9780**: Peças de concreto para pavimentação - método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação: especificação. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos ¯ Classificação. Rio de Janeiros, 1995.

_____. **NBR 10004**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido. Rio de Janeiros, 2004.

_____. **NBR 111578**: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiros, 1991 corrigido em 1997

_____. **NBR 111578**: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiros, 1991 corrigido em 1997

_____. **NM 26**: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiros, 2009.

_____. **NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiros, 2001.

_____. **NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiros, 2006.

_____. **NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiros, 2009.

ABREU, J. V**. Estudo de Concreto de Alta Resistência Compactado com Rolo Para Pavimentação**, Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, 116 p. 2002.

ANGULO, S.C.; JOHN, V.M. **Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade.** ENTAC, Foz do Iguaçu-PR, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **ASTM C 936** : Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units, Conshohocken, Pennsylvania, USA.1996.

BERNUCCI, L.P.; MOTTA, L.M.;CERATTI, J.A; SOARES, J.B. **Pavimentaçao asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, Petrobrás, ABEDA, 2006.

BONET, Ivan Ideraldo. **Valorização do Resíduo Areia de Fundição. Incorporação nas Massas Asfálticas do Tipo CBUQ.** Dissertação de Mestrado (Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina. 2002.

BONIN, A. L. **Reutilização da Areia Preta de Fundição na Construção Civil**. Congresso de Fundição. São Paulo, p-203-221. Setembro, 1995.

BRITO FILHO, J. A. Cidades versus entulho. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 1999, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Comitê Técnico do IBRACON; CT 206 ¯ Meio Ambiente, 1999. p.56-67.

BUTTLER, A.M.; CORREIA, M.R.S. **Desenvolvimento de unidades de alvenaria estrutural produzidas com agregados reciclados de concreto,** Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 8, n. 32, p. 9-12, 2006.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION, **CSA A231-2-95**: Precast Concrete Pavers, CSA, Rexdale, Ontario. 1995.

CARNEIRO, A. P; BURGOS, P. C. ; ALBERTE, E. P. V. Livro: ***Reciclagem de Entulho para a Produção de Materiais de Construção***. In: Projeto Entulho Bom. EDUFBA /Caixa Econômica Federal, Salvador, BA, 2001. p.190-227.

CASTRO, César A. G. **A produção de areia base para fundição e o meio ambiente: Sibelco Mineração Ltda.** In: Congresso de Fundição, São Paulo, 2001. **Anais.** São Paulo, 2001.

CHEGATTI, S. **Aplicação de Resíduos de Fundição em Massa Asfáltica, Cerâmica Vermelha e Fritas Cerâmicas**. 2004. 137p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Santa Catarina.

COSTA, O. GIÃO, D. **Tecnologia de fundição em areia verde.** Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia. Portugal, 2001.

COUTINHO, Bendito Neto. **Avaliação do Reaproveitamento de Areia de Fundição como Agregado em Misturas Asfálticas.** Tese de Doutorado (Engenharia de Transportes). Universidade de São Carlos, 2004.

CUNHA, Carlos Jorge et al. **Reaproveitamento do Resíduo de Areia Verde de Fundição como Agregado em Misturas Asfálticas**. In: Congresso de Fundição, São Paulo, 2005. **Anais.** São Paulo, 2005.

CRUZ, L. O. M. **Pavimento Intertravado de Concreto: Estudo dos Elementos e Métodos de Dimensionamento**. 2003, Tese M. Sc.COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro ¯ RJ, Brasil, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, **DNER-PRO 007**: Avaliação Subjetiva da Superfície de Pavimentos, 1994.

_____, **DNER-ES 303/97**. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/normas/DNER-ES321-97.pdf> . Acesso em: 3 jun 2009.

DNIT. DEPARTAMENTO NACIONAL D INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006. **Manual de pavimentação:** banco de dados. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf> . Acesso em: 25 mai. 2009.

FERNANDES, I**. Blocos e Pavers: produção e controle de qualidade**. São Paulo, 2008. 75p.

FERRAZ, M.H.T.; ALMEIDA, E.S.; RIBEIRO, B.V.; COSTA, J.S. **Estudo do Agregado Reciclado de Piso Cerâmico Vidrado para utilização na Indústria da Construção Civil,** 2007. 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Salvador, Bahia, 2007.

FIORITI, C. F. **Avaliação de compósitos de concreto com resíduos de borracha na produção de blocos para alvenaria**. 2002. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.

GARNAR JR, T.E. **Mineralogy of Foundry Sands and its Effects on Performance and Properties**. American Foundrymen´s Society Transactions, v.85, p.399-416, 1977.

GEBUR, C. L. **Utilização do entulho cerâmico da construção civil como agregado para concreto.** Curitiba, 2003. 62p.

**GLOBO**, 1995. A Origem de Roma, Atlas da História Universal ¯ The Times, Editora O Globo, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 60-62.

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

HALLACK, A. 2001, Pavimento Intertravado: uma solução universal. **Revista Prisma**, dez. 2001, pp 25-27.

IMAZU, H., **Multicolored Design Arranging Device (Laying Device) for Mechanical Laying**, Fifth International Concrete Block Paving Conference, pp. 199-212, Tel-Aviv, Israel, June, 1996.

**Interlocking Concrete Pavement Institute, Tech Spec.** Nº 1, 2002, `Glossary of terms Used in the Production, Design, Construction and Testing of Interlocking Concrete Pavement_, Washington, USA.

_____**Tech Spec**. Nº 10, 2002, `Application Guide for Interlocking Concrete Pavements_, Washington, USA.

_____**Tech Spec**. Nº 11, 2002, `Mechanical Instalation of Interlocking Concrete Pavements_, Washington, USA.

_____**Tech Spec**. Nº 13, 2002, `Slip and Skid Resistance of Interlocking Concrete Pavements_, Washington, USA.

_____**Tech Spec.** Nº 2, 2002, `Construction of Interlocking Concrete Pavements_, Washington, USA.

_____**Tech Spec**. Nº 3, 2002, `Edge Restraints for Interlocking Concrete Pavements_, Washington, USA.

_____**Tech Spec**. Nº 4, 2002, `Structural Design of Interlocking Concrete Pavement for Roads and Parking Lots_, Washington, USA.

_____**Tech Spec.** Nº 6, 2002, `Reisntatement of Interlocking Concrete Pavements_, Washington, USA.

KNAPTON, J., **A Design Method for Lightly Trafficked and Pedestrian Pavements**, Fifth International Concrete Block Paving Conference, pp.339-348, Tel-Aviv, Israel, June, 1996.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduos de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 240p. Dissertação (Mestrado) ¯ Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

MADRID, G. G., 1992, `**Standards and Specifications For Concrete Paving Blocks in Latin-American Countries**_, Fourth International concrete Block Paving Conference, Vol. 2, pp. 345-354, Auckland, February 1992.

MARIOTTO, C. L. **Regeneração de Excedentes de Areia de Fundição**. Seminário Latino Americano de Fundição, 2001.

MARQUES NETO, J. C. **Estudo da gestão municipal dos resíduos de construção e demolição da bacia hidrográfica do Turvo Grande**. 2009, 629p. Tese de Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental. Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR. São Carlos..

MEHTA, P. K ; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** Estrutura, propriedades e materiais. São Paulo. Ed. PINI. 1994.

MEDINA, J e MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Ed UFRJ, 2005.

MIZUMOTO, C.; SIMIELI, D.; SALLES, F.M. **Uilização de Agregados Reciclados em Pavimentos Intertravados**. Exacta, São Paulo, v.5, n.2, p.231-241, jul-dez.2007.

MOTTA, L.M.G.; **Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis:** Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas. 1991 Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.

MULLER, R. M. **Avaliação de transmissão de esforços de pavimentos intertravados de blocos de Concreto**. 2005, Tese M. Sc.COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro ¯ RJ, Brasil, 2005.

MULLER, R. M.; MOTTA, L. M. G. (2005). **Pavimentos Intertravados de Blocos de Concreto ¯ Instrumentação e Avaliação de um Painel Experimental.** In 35ª .Reunião Anual de Pavimentação, RAPv, Rio de Janeiro ¯ RJ. 2005

OLIVEIRA, J. C.**Variação dos parâmetros de compactação e CBR de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil.** In: 36ª Reunião anual de pavimentação. Curitiba, 2005.

OLIVEIRA, Thereza M. N. **Eco-Estratégia Empresarial no setor Metal-Mecânico da Escola Técnica Tupy.** Tese de Doutorado em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998

PEREIRA, C. E. **Reaproveitamento do entulho como agregado reciclado em argamassa de revestimento.** Curitiba, 2003. 45 p

PEREIRA, A. **Estudo da viabilidade técnica e ambiental da incorporação de resíduo de areia de fundição em matriz asfáltica**. 2004. Dissertação de Mestrado. Universidade Regional de Blumenau ¯ FURB . Santa Catarina.

PINTO, I. E., DOMINGUES, F. A. A. **A Contribuição ao Estudo de Correlação entre Equipamentos Medidores de Deflexões**: Viga Benkelman e Falling Weight Deflectometer ¯ FWD. In: SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MAINTENANCE AND REHABILITATION OF PAVEMENT AND TECHNOLOGICAL CONTROL. 2001 **Anais.....** Auburn, Alabama - USA. 2001.

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

PIRES, A. P. **Estudo sobre a utilização de entulho fragmentado como agregado de concreto.** Trabalho de conclusão de curso. UTFPR, Curitiba, 2003. 59p.

PMSP ¯ Prefeitura Municipal de São Paulo. PMSP/SP IP-06 ¯ **Instruções para Dimensionamento de Pavimento com Blocos Intertravados de Concreto.** 1999.

POON, C. S., CHAN, D. **Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick.** Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong 2005.

PREGO, A. S. S. **A Memória da Pavimentação no Brasil. Relatos Históricos, Recordações e Depoimentos**. Rio de Janeiro: ABPV, 2001.

Resolução CONAMA 307 de 5 de Julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios **e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.** Brasil. Publicação DOU: 17/07/2002. Acesso em: 10/07/2011. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/legipesq.cfm?tipo=3&numero=307&ano

SANTOS, A. V. e BORJA, E. V. **Avaliação das propriedades mecânicas de blocos intertravados com resíduo de pneu reciclado.** Revista Holos, ano 23, Vol 3. Rio Grande do Norte, 2007.

SCHEUNEMANN, R. **Regeneração de areia de fundição através de tratamento químico via processo fenton.** 2005, 71p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina.

SHACKEL, B. 1990, **Design and Construction of Interlocking Concrete Block. Pavements**, First Edition and Reprinted 1991, Elsevier, New York and London.

Site Institucional do CEMPRE ¯ Compromisso Empresarial para Reciclagem. São Paulo, 2006. Disponível em: <**http://www.cempre.org.br/fotos**>. Acesso em: 10/08/2011.

STEFENON, Fernando. **Incorporação de Resíduos Industriais em Concreto Betuminoso Usinado à Quente.** Universidade de Caxias do Sul. Mestrado Profissionalizante e Engenharia. Caxias do Sul, 2003.