

EDUARDO VIVIANI DE CARVALHO

**“UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DA RETÍFICA DE
CERÂMICA DE REVESTIMENTO NA PRODUÇÃO DE
CONCRETO PARA PAVIMENTO INTERTRAVADO”**

*“USE OF GRINDING CERAMIC COATING WASTE IN THE
PRODUCTION OF CONCRETE FOR INTERLOCKED
PAVEMENT”*

LIMEIRA
2013

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA**

EDUARDO VIVIANI DE CARVALHO

**“UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DA RETÍFICA DE CERÂMICA DE
REVESTIMENTO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO PARA
PADEVIMENTO INTERTRAVADO”**

Orientadora: Prof^ª. Dra. Carmenlucia Santos Giordano Penteado

Co-Orientadora: Prof^ª. Dra. Rosa Cristina Cecche Lintz

***“USE OF GRINDING CERAMIC COATING WASTE IN THE PRODUCTION
OF CONCRETE FOR INTERLOCKED PAVEMENT”***

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia na área de concentração Tecnologia e Inovação

Master degree submitted to the Graduate Program in Technology, Faculty of Technology, State University of Campinas for obtaining the title of Master in Technology in the concentration area of Technology an Innovation

**LIMEIRA
2013**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia
Vanessa Evelyn Costa - CRB 8/8295

C253u Carvalho, Eduardo Viviani de, 1952-
Utilização do resíduo da retífica de cerâmica de revestimento na produção de concreto para pavimento intertravado / Eduardo Viviani de Carvalho. – Limeira, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Carmenlucia Santos Giordano Penteado.
Coorientador: Rosa Cristina Cecche Lintz.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia.

1. Resíduos. 2. Cerâmica. 3. Concreto. 4. Pavimentos. I. Penteado, Carmenlucia Santos Giordano. II. Lintz, Rosa Cristina Cecche. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Use of grinding ceramic coating waste in the production of concrete for interlocked pavement

Palavras-chave em inglês:

Waste
Ceramic
Concrete
Floors

Área de concentração: Tecnologia e Inovação

Titulação: Mestre em Tecnologia

Banca examinadora:

Carmenlucia Santos Giordano Penteado [Orientador]
Luísa Andréia Gachet Barbosa
Carlos Roberto dos Santos

Data de defesa: 10-07-2013

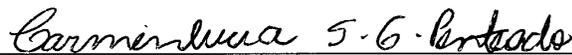
Programa de Pós-Graduação: Tecnologia

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

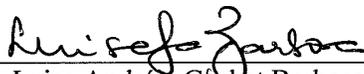
**UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DA RETÍFICA DE CERÂMICA DE REVESTIMENTO NA
PRODUÇÃO DE CONCRETO PARA PAVIMENTO INTERTRAVADO**

Autor: Eduardo Viviani de Carvalho

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Profa. Dra. Carmenlucia Santos Giordano Pentead, Presidente
FT/UNICAMP



Profa. Dra. Luisa Andréa Gachet Barbosa
FT/UNICAMP



Dr. Carlos Roberto dos Santos
CETESB

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha mãe Palmira, à minha mulher Gisela e
às minhas filhas Thaís e Bianca,
minhas queridas que estão
sempre ao meu lado, incondicionalmente.

Agradecimentos

À Deus.

À Profª Carmenlucia, minha orientadora, pelos ensinamentos, dedicação e paciência.

À Profª Rosa, minha co-orientadora, pela dedicação e ensinamentos.

À Profª Luisa e ao Dr. Carlos Roberto pelas sugestões dadas nos exames de qualificação e defesa da dissertação, as quais enriqueceram este trabalho.

À Prof. Gisela pela ajuda e conselhos.

Ao Emerson e Reginaldo do Laboratório de Materiais de Construção e ao Ivonei do Laboratório de Solos, pelas conversas, reflexões e acima de tudo, pela amizade e companheirismo.

Ao Instituto de Física da Universidade de Campinas pela caracterização mineralógica dos resíduos.

Ao Pierre e à Anjaina pela ajuda nas análises estatísticas.

À Faculdade de Tecnologia da UNICAMP que me acolheu e me proporcionou a oportunidade de desenvolver este trabalho.

À Capes, pela bolsa de estudos.

“A poesia da Terra nunca morre.”

John Keats

Resumo

Neste trabalho, a utilização do resíduo da retífica de placas cerâmicas de revestimentos em peças pré-moldadas de concreto para uso em pavimento intertravado, em bases técnica e ambiental, foi investigada. Foram realizados estudos em ambiente laboratorial utilizando o resíduo cerâmico como substituto parcial da areia e do cimento nas porcentagens de 5% a 30% em massa. Foram produzidas peças pré-moldadas de concreto para avaliação da resistência à compressão e absorção de água e os dados obtidos foram analisados estatisticamente utilizando-se ANOVA seguida de teste de Tukey. Em relação à resistência mecânica e absorção de água, a substituição de areia pelos resíduos cerâmicos apresentou melhores resultados em comparação ao controle. Porém, a substituição do cimento pelo resíduo de porcelanato nas maiores proporções de incorporação apresentou um decréscimo da resistência mecânica e aumento da absorção de água. Os resultados deste estudo demonstram a viabilidade da utilização do resíduo da retífica de placas cerâmicas como elemento substituto parcial da areia e do cimento na produção de concreto para uso em pisos intertravados. A utilização do resíduo de revestimento leva à economia dos recursos naturais, contribuindo para a sustentabilidade ambiental.

Palavras-Chave: resíduo, cerâmica, concreto, pavimento intertravado

Abstract

In this work the use of grinding waste of coating ceramic tiles production in interlocking pavement blocks was investigated. Technical and environmental issues were studied. Laboratory studies were conducted using the ceramic waste as partial replacement of sand and cement from 5% to 30% in mass. Precast concrete specimens were produced, compressive strength and water absorption evaluated and data statistically analyzed using ANOVA followed by Tukey test. In relation to compressive strength and water absorption, when the ceramic wastes were used as substituent of sand better results were obtained in relation to the control. But when the porcelain wastes were used as substituent of cement in the highest proportions, a decrease of compressive strength and increase in water absorption was observed. The results indicated the technical feasibility of using grinding waste to partially substitute sand and cement in concrete production to be used in interlocking paving production. The use of grinding ceramic wastes as described in this work leads to the economy of natural resources, contributing to environmental sustainability.

Key Words: waste, ceramic, concrete, interlocking pavement

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------------|---|-----------|
| Figura 1 | Micrografia com os elementos constituintes do corpo cerâmico..... | 10 |
| Figura 2 | Fluxograma da produção de revestimentos cerâmicos..... | 13 |
| Figura 3 | Atomização do material granulado..... | 14 |
| Figura 4 | Mistura e moagem das matérias-primas..... | 15 |
| Figura 5 | Prensa hidráulica..... | 16 |
| Figura 6 | Secador vertical..... | 17 |
| Figura 7 | Fornos interligados para queima cerâmica..... | 18 |
| Figura 8 | Estrutura de base usada na construção de antigas estradas romanas..... | 29 |
| Figura 9 | Detalhe de disposição intertravada de pedras talhadas em antiga estrada romana..... | 30 |
| Figura 10 | Pavimentos no século XVIII – paralelepípedos (a); no século XIX- tijolos cerâmicos (b)..... | 31 |
| Figura 11 | Pavimento intertravado: calçada em fase de acabamento (a); detalhe de assentamento dos pisos (b)..... | 32 |
| Figura 12 | Composição típica da estrutura do pavimento intertravado..... | 33 |
| Figura 13 | Tipos de intertravamento das peças pré-moldadas de concreto..... | 35 |
| Figura 14 | Formatos típicos de pisos intertravados..... | 36 |
| Figura 15 | Modelos típicos de assentamento em pavimentação intertravada..... | 37 |
| Figura 16 | Resíduos da retífica das placas cerâmicas de revestimento: a) porcelanato; b) cerâmica porosa; c) cerâmica semi-grês..... | 58 |
| Figura 17 | Ensaio de pozolanicidade: a) corpos-de-prova na estufa; b) ruptura dos corpos-de-prova..... | 64 |

| | | |
|------------------|---|------------|
| Figura 18 | Amostras de pisos: a) com uma condição estética ruim; b) com uma condição estética boa..... | 72 |
| Figura 19 | Moldagem dos pisos: a) preenchimento dos moldes sobre mesa vibratória; b) pisos moldados a serem transportados para a câmara úmida..... | 75 |
| Figura 20 | Pisos após a desfôrma: a) pisos identificados; b) pisos em processo de cura até a idade de rompimento..... | 76 |
| Figura 21 | Amostras de pisos após serem retirados da câmara úmida: a) processo de capeamento; b) pisos capeados..... | 76 |
| Figura 22 | Identificação dos pisos pré-moldados de concreto..... | 77 |
| Figura 23 | Equipamento utilizado no ensaio de abatimento..... | 79 |
| Figura 24 | Ensaio de abatimento pelo método do tronco de cone..... | 80 |
| Figura 25 | Abatimento verdadeiro, cortante ou cisalhamento e com desagregação..... | 81 |
| Figura 26 | Equipamento utilizado no ensaio de resistência à compressão..... | 82 |
| Figura 27 | Ruptura de piso no ensaio de resistência à compressão..... | 83 |
| Figura 28 | Ensaio de absorção de água: a) piso tendo sua massa medida na balança digital; b) pisos em processo de secagem na estufa..... | 86 |
| Figura 29 | Curva granulométrica do resíduo cerâmico de porcelanato..... | 91 |
| Figura 30 | Curva granulométrica do resíduo de cerâmica semi-grês..... | 93 |
| Figura 31 | Curva granulométrica do resíduo de cerâmica porosa..... | 96 |
| Figura 32 | Difratograma do resíduo cerâmico de porcelanato | 99 |
| Figura 33 | Difratograma do resíduo de cerâmica semi-grês | 100 |
| Figura 34 | Difratograma do resíduo de cerâmica porosa | 100 |
| Figura 35 | Curva granulométrica do agregado miúdo (areia) | 104 |
| Figura 36 | Curva granulométrica do agregado miúdo (pó de pedra) | 106 |

| | | |
|------------------|--|------------|
| Figura 37 | Curva granulométrica do agregado graúdo | 108 |
| Figura 38 | Distribuição granulométrica dos resíduos e agregados miúdos..... | 109 |
| Figura 39 | Abatimento do concreto produzido com a incorporação parcial dos resíduos em substituição à areia | 111 |
| Figura 40 | Resistência à compressão das peças pré-moldadas na idade de 7 e 28 dias... | 114 |
| Figura 41 | Resistência à compressão das peças pré-moldadas na idade de 7 e 28 dias... | 117 |
| Figura 42 | Resistência à compressão das peças pré-moldadas na idade de 7 e 28 dias... | 119 |
| Figura 43 | Comparação das médias de resistência à compressão aos 28 dias com a incorporação parcial dos resíduos em substituição ao agregado miúdo..... | 120 |
| Figura 44 | Resistência à compressão das peças pré-moldadas nas idades de 7 e 28 dias. | 122 |
| Figura 45 | Médias de absorção e porosidade aos 28 dias com a incorporação do resíduo de porcelanato em substituição ao agregado miúdo..... | 124 |
| Figura 46 | Médias de absorção e porosidade aos 28 dias com a incorporação do resíduo de cerâmica semi-grês em substituição ao agregado miúdo..... | 126 |
| Figura 47 | Médias de absorção e porosidade aos 28 dias com a incorporação do resíduo de cerâmica porosa em substituição ao agregado miúdo..... | 128 |
| Figura 48 | Comparação das médias de absorção e porosidade aos 28 dias com a incorporação parcial dos resíduos em substituição ao agregado miúdo..... | 129 |
| Figura 49 | Médias de absorção e porosidade as 28 dias com a incorporação do resíduo de porcelanato em substituição ao cimento..... | 131 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------------|--|-----------|
| Tabela 1 | Tipos de revestimentos conforme classificação por absorção de água e resistência mecânica, segundo a Norma ISO 13006/1998 e ABNT NBR13818/1997..... | 8 |
| Tabela 2 | Requisitos técnicos para a produção de peças pré-moldadas para pavimentação intertravada conforme a ABNT-NBR 9781/1987..... | 40 |
| Tabela 3 | Fator multiplicativo de correção da resistência à compressão..... | 41 |
| Tabela 4 | Parâmetros técnicos utilizados na norma europeia BS EM-1388/2003..... | 43 |
| Tabela 5 | Principais tipos de concreto dosado em central e suas características..... | 46 |
| Tabela 6 | Principais tipos de cimento..... | 51 |
| Tabela 7 | Quantidade de peças produzidas para cada resíduo em relação aos parâmetros propostos..... | 60 |
| Tabela 8 | Resultados dos ensaios preliminares de resistência à compressão axial da argamassa com incorporação parcial dos resíduos em substituição ao cimento..... | 61 |
| Tabela 9 | Especificações do cimento CP V-ARI conforme a NBR 5733/1991 (ABNT, 1991a)..... | 65 |
| Tabela 10 | Dosagens experimentais de adequação do fator água/cimento para a definição do traço em condições laboratoriais..... | 71 |
| Tabela 11 | Dosagem do concreto com as concentrações de resíduo em substituição a areia..... | 73 |
| Tabela 12 | Dosagem do concreto com as concentrações de resíduo em substituição ao cimento | 73 |

| | | |
|------------------|---|------------|
| Tabela 13 | Terminologia utilizada na identificação dos pisos para o ensaio de absorção com as concentrações de resíduo em substituição a areia..... | 87 |
| Tabela 14 | Terminologia utilizada na identificação dos pisos para o ensaio de absorção com as concentrações de resíduo em substituição ao cimento..... | 87 |
| Tabela 15 | Composição granulométrica do resíduo cerâmico de porcelanato..... | 90 |
| Tabela 16 | Massa unitária e específica do resíduo cerâmico de porcelanato..... | 91 |
| Tabela 17 | Composição granulométrica do resíduo de cerâmica semi-grês..... | 92 |
| Tabela 18 | Massa unitária e específica do resíduo de cerâmica semi-grês..... | 94 |
| Tabela 19 | Composição granulométrica do resíduo de cerâmica porosa..... | 95 |
| Tabela 20 | Massa unitária e específica do resíduo de cerâmica porosa..... | 96 |
| Tabela 21 | Índice de atividade pozolânica dos resíduos | 98 |
| Tabela 22 | Resultados da composição mineral dos resíduos cerâmicos..... | 98 |
| Tabela 23 | Resultados do ensaio de finura do cimento..... | 101 |
| Tabela 24 | Massa unitária e massa específica do cimento..... | 102 |
| Tabela 25 | Composição granulométrica do agregado miúdo (areia)..... | 103 |
| Tabela 26 | Massa unitária e específica do agregado miúdo (areia)..... | 104 |
| Tabela 27 | Composição granulométrica do agregado miúdo (pó de pedra)..... | 105 |
| Tabela 28 | Massa unitária e específica do agregado miúdo (pó de pedra)..... | 106 |
| Tabela 29 | Composição granulométrica do agregado graúdo (brita)..... | 107 |
| Tabela 30 | Massa unitária e específica do agregado graúdo (brita) | 108 |
| Tabela 31 | Valores de abatimento com a incorporação dos resíduos em substituição parcial do agregado miúdo..... | 110 |

| | | |
|------------------|---|------------|
| Tabela 32 | Valores de abatimento com a incorporação do resíduo de porcelanato em substituição parcial do cimento..... | 112 |
| Tabela 33 | Médias de resistência à compressão das peças pré-moldadas na idade de 28 dias..... | 113 |
| Tabela 34 | Médias de resistência à compressão das peças pré-moldadas na idade de 28 dias..... | 116 |
| Tabela 35 | Médias de resistência à compressão das peças pré-moldadas na idade de 28 dias..... | 118 |
| Tabela 36 | Médias de resistência à compressão das peças pré-moldadas na idade de 28 dias..... | 121 |
| Tabela 37 | Absorção e porosidade com a incorporação do resíduo de porcelanato em substituição ao agregado miúdo e as respectivas significâncias estatísticas.. | 123 |
| Tabela 38 | Absorção e porosidade com a incorporação do resíduo de cerâmica semi-grês em substituição ao agregado miúdo e as respectivas significâncias estatísticas..... | 125 |
| Tabela 39 | Absorção e porosidade com a incorporação do resíduo de cerâmica porosa em substituição ao agregado miúdo e as respectivas significâncias estatísticas..... | 127 |
| Tabela 40 | Absorção e porosidade com a incorporação do resíduo de porcelanato em substituição ao cimento e as respectivas significâncias estatísticas..... | 130 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------------------------------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| a/c | Relação água/cimento |
| Al ₂ O ₃ | Óxido de alumínio (alumina) |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| C ₂ S | Silicato dicálcico |
| C ₃ A | Aluminato tricálcico |
| C ₃ S | Silicato tricálcico |
| C ₄ AF | Ferroaluminato tetracálcico |
| CAD | Concreto de alto desempenho |
| CaO | Óxido de cálcio |
| CH | Hidróxido de cálcio |
| CO ₂ | Gás carbônico |
| CPV-ARI | Cimento Portland de Alta Resistência Inicial |
| C-S-H | Silicato de cálcio hidratado |
| Fe ₂ O ₃ | Óxido de ferro |
| IBRACON | Instituto Brasileiro do Concreto |
| K ₂ O | Óxido de potássio |
| MgO | Óxido de magnésio |
| Na ₂ O | Óxido de sódio |
| NBR | Norma Brasileira |
| RS | Resistente a Sulfatos |
| SiO ₂ | Óxido de silício (sílica) |
| SNIC | Sindicato Nacional da Indústria de Cimento |
| SO ₃ | Óxido de enxofre |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 | OBJETIVO | 4 |
| 2.1 | Objetivo geral | 4 |
| 2.2 | Objetivos específicos | 4 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 3.1 | História da cerâmica | 5 |
| 3.2 | A indústria cerâmica de revestimento | 6 |
| 3.2.1 | Classificação e tipologia da cerâmica de revestimento..... | 7 |
| 3.2.2 | Processo de produção da cerâmica de revestimento..... | 11 |
| 3.3 | Resíduos da indústria cerâmica | 20 |
| 3.3.1 | Aspectos ambientais dos resíduos cerâmicos de revestimento..... | 21 |
| 3.3.2 | Reaproveitamento dos resíduos cerâmicos..... | 22 |
| 3.4 | Pavimento Intertravado | 27 |
| 3.4.1 | Aspectos gerais do pavimento..... | 27 |
| 3.4.2 | Histórico do pavimento intertravado..... | 28 |
| 3.4.3 | Estrutura do pavimento intertravado..... | 32 |
| 3.4.4 | Intertravamento das peças pré-moldadas de concreto..... | 33 |
| 3.4.5 | Revestimento do pavimento intertravado..... | 35 |
| 3.4.6 | Assentamento das peças pré-moldadas de concreto..... | 37 |
| 3.4.7 | Normatização técnica do pavimento intertravado..... | 38 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 3.5 | Concreto | 44 |
| 3.5.1 | Aspectos gerais do concreto..... | 44 |
| 3.5.2 | Composição e estrutura do concreto..... | 46 |
| 3.5.3 | Propriedades do concreto..... | 47 |
| 3.6 | Cimento | 49 |
| 3.6.1 | Fabricação, tipos e classes do cimento Portland..... | 49 |
| 3.6.2 | Propriedades do cimento Portland..... | 50 |
| 3.6.3 | Processo de hidratação do cimento Portland..... | 51 |
| 3.7 | Agregados | 52 |
| 3.7.1 | Classificação dos agregados..... | 52 |
| 3.7.2 | Granulometria dos agregados..... | 53 |
| 3.7.3 | Propriedades dos agregados..... | 54 |
| 3.8 | Aditivos | 55 |
| 3.8.1 | Aplicação dos aditivos..... | 55 |
| 3.8.2 | Classificação dos aditivos..... | 55 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS | 56 |
| 4.1. | Programa experimental | 56 |
| 4.2 | Caracterização dos materiais | 61 |
| 4.2.1 | Resíduos cerâmicos | 61 |
| 4.2.2 | Cimento..... | 64 |
| 4.2.3 | Agregado miúdo Areia..... | 66 |
| 4.2.4 | Agregado miúdo – Pó de Pedra..... | 66 |
| 4.2.5 | Agregado graúdo..... | 67 |
| 4.2.6 | Aditivo plastificante..... | 67 |
| 4.2.7 | Água..... | 68 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 4.3 | Produção do concreto para pisos intertravados..... | 69 |
| 4.3.1 | Dosagem do concreto | 69 |
| 4.3.2 | Produção das peças pré-moldadas de concreto..... | 73 |
| 4.4 | Caracterização do concreto..... | 77 |
| 4.4.1 | Ensaio de abatimento do tronco de cone – <i>Slump test</i> | 77 |
| 4.4.2 | Ensaio de resistência à compressão axial..... | 80 |
| 4.4.3 | Ensaio de absorção de água..... | 83 |
| 4.5 | Análise Estatística..... | 87 |
| 4.6 | Resíduos Gerados em Laboratório..... | 87 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 87 |
| 5.1 | Caracterização dos resíduos..... | 87 |
| 5.1.1 | Resíduo cerâmico de porcelanato..... | 87 |
| 5.1.2 | Resíduo de cerâmica semi-grês..... | 89 |
| 5.1.3 | Resíduo de cerâmica porosa..... | 91 |
| 5.1.4 | Índice de Atividade Pozolânica | 93 |
| 5.1.5 | Análise por Difração de Raio X | 94 |
| 5.2 | Caracterização dos Materiais Constituintes do Concreto | 97 |
| 5.2.1 | Cimento | 97 |
| 5.2.2 | Agregado miúdo – areia | 98 |
| 5.2.3 | Agregado miúdo – pó de pedra | 100 |
| 5.2.4 | Agregado graúdo..... | 102 |
| 5.2.5 | Distribuição granulométrica | 103 |
| 5.3 | Caracterização do concreto..... | 105 |
| 5.3.1 | Ensaio de abatimento do tronco de cone – <i>Slump Test</i> | 105 |
| 5.3.2 | Ensaio de resistência à compressão axial..... | 107 |
| 5.3.3 | Ensaio de absorção de água..... | 117 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6 | CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS ... | 125 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 128 |

1 INTRODUÇÃO

A discussão entre a perspectiva de desenvolvimento sustentável e as estratégias corporativistas de acumulação de capital é histórica. Esta questão evidencia de forma inequívoca, que o modelo de desenvolvimento que acompanha a sociedade ao longo das últimas décadas se mostra inviável, quando baseado na exploração extrativista dos recursos naturais primários e não renováveis. A percepção de que os recursos naturais são finitos está levando a sociedade a repensar o atual modelo de desenvolvimento e a buscar formas de conciliar crescimento econômico e preservação ambiental.

Segundo dados da edição de 2010 do Relatório do Estado do Mundo a população mundial cresceu 2,2 vezes nos últimos 50 anos, mas o crescimento do consumo no mesmo período foi seis vezes superior. Atualmente consome-se 30% a mais de recursos naturais do que os ecossistemas consegue repor e são lançados todos os anos na natureza 30 bilhões de toneladas de lixo (WWI, 2010). O Brasil produziu 61,9 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos em 2011, quantidade 1,8% superior ao registrado em 2010 conforme dados da edição de 2011 do Panorama dos Resíduos Sólidos tornando o gerenciamento de resíduos urbanos um dos maiores problemas atuais (ABRELPE, 2011).

No setor de construção civil o cenário de crescente geração de resíduos não é diferente, em virtude do significativo volume de produção e investimentos proporcionado pelo crescimento do poder econômico da população brasileira verificado nos últimos anos. A construção civil é reconhecida como umas das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico e social do país. O setor encerrou o ano de 2010 com investimentos de 625 bilhões de reais, representando 20% do Produto Interno Bruto e responsável por 12% do total de empregos no Brasil. As perspectivas de investimento no setor, em função das obras do PAC - Programa de Aceleração do Crescimento, projetos de moradia popular como o "Minha Casa, Minha Vida" e as obras necessárias para a Copa 2014 e os Jogos Olímpicos de 2016 apontam para um aumento de 6,8% na taxa de investimentos em 2012/2014 (DIEESE, 2011).

Por outro lado, o setor de construção civil, dentre todas as indústrias de transformação é certamente a maior geradora de resíduos e consumidora de recursos naturais no mundo, absorvendo entre 20% a 50% de todos os recursos explorados (CABRAL et al., 2010). A produção nacional de cimento, principal componente do concreto usado na construção civil, alcançou em

2011 a marca de 64,2 milhões de toneladas e devendo chegar em 2016 a ultrapassar os 100 milhões de toneladas (SNIC, 2011). De acordo com a Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil a indústria de agregados para construção civil fechou o ano de 2010 com uma produção de 650 milhões de toneladas (ANEPAC, 2011).

Neste cenário se inserem as atividades da indústria cerâmica, cujo volume de produção é responsável por 1% do Produto Interno Bruto brasileiro. Os principais segmentos dentro do setor cerâmico são os de cerâmica branca representada principalmente pelas louças sanitárias, cerâmica vermelha composta pelos tijolos, blocos e telhas e a cerâmica de revestimentos compreendendo os pisos e azulejos. A indústria cerâmica de revestimentos fechou o ano de 2011 com uma produção nacional de 986,5 milhões de m² e com um crescimento de 12% em relação ao ano de 2010. Estes principais segmentos da indústria cerâmica geram anualmente cerca de seis milhões de toneladas de resíduos provenientes de seus processos produtivos (ANFACER, 2012).

Em face da constatação e consciência cada vez maior da limitação dos recursos naturais, somado à necessidade da incorporação do discurso ambiental em suas estratégias de atuação no mercado, as empresas vem buscando a reutilização dos resíduos provenientes de seus processos industriais. Com a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, a reutilização destes resíduos tem recebido considerável atenção nos últimos anos devido aos benefícios técnicos, econômicos e ambientais que esses materiais podem promover.

A intensa atividade do setor de construção civil resulta em um fator altamente impactante ao ambiente, o que leva este segmento econômico a ser um parceiro natural na incorporação de resíduos na produção de concreto, o qual é o material mais usado na construção civil dada a sua versatilidade de formas, resistência, baixo custo e facilidade de execução. O consumo de concreto perde apenas para a água e a grande produção deste material no mundo se deve à sua constante evolução técnica (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Desta forma, torna-se imperativo que o concreto incorpore em sua composição, resíduos em substituição às matérias primas naturais necessárias para a sua produção.

A utilização de adições minerais proporcionadas por estes resíduos industriais em complemento ou substituição parcial ao cimento e ao agregado fino para a produção de concretos com propriedades e características melhoradas tem aumentado nos últimos anos. Fatores econômicos e ambientais têm um papel importante no crescimento do uso desses materiais. Eles fornecem um conforto ambiental, pois subprodutos industriais são reciclados, emissões perigosas

lançadas na atmosfera durante a produção do cimento são reduzidas, matérias-primas são preservadas e energia é economizada. Assim, existe um duplo benefício ambiental por meio da utilização das adições minerais como uma alternativa frente à problemática da geração de resíduos, resultando em concretos ecologicamente corretos para os mais diversos usos (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

O uso do concreto na produção de peças pré-moldadas para pisos intertravados se evidencia cada vez mais como um material alternativo de pavimentação. Atualmente este tipo de pavimento é produzido em peças de diversos tamanhos e formatos e compostos de vários materiais, sendo os mais comuns os fabricados em concreto. Atendendo às mais diversas aplicações na área de Engenharia de Transportes, se caracteriza pelo baixo custo, praticidade de assentamento e estética agradável, sendo aplicado em espaços como: calçadas, estacionamentos, áreas industriais, aeroportos e em leitos carroçáveis internos e externos (FIORITI, AKASAKI e INO, 2007).

O resíduo objeto deste estudo é proveniente da retífica das placas cerâmicas, o qual ocorre no final do processo de produção da indústria cerâmica de revestimento.

Este trabalho de pesquisa pretende estudar o comportamento do concreto, com a incorporação parcial dos resíduos em substituição ao agregado fino e ao cimento na produção de peças pré-moldadas para uso em pisos intertravados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Investigar a viabilidade da substituição parcial do agregado fino e do cimento pelos resíduos da retífica de placas cerâmicas de revestimento na fabricação de peças pré-moldadas de concreto para uso em pisos intertravados. Para tanto, será necessário analisar a influência deste resíduo no comportamento do concreto em bases técnica e ambiental.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a resistência mecânica das peças pré-moldadas de concreto com a incorporação de diferentes proporções dos resíduos em substituição a areia e ao cimento a partir da especificação técnica brasileira para pisos intertravados.
- Analisar os níveis de absorção de água das peças pré-moldadas de concreto com a incorporação de diferentes proporções dos resíduos em substituição a areia e ao cimento.
- Analisar a consistência e a plasticidade do concreto para uso em pisos intertravados com a incorporação parcial dos resíduos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 História da Cerâmica

A cerâmica é o material artificial mais antigo produzido pelo homem, percorrendo historicamente as diversas etnias quase que ao mesmo tempo e refletindo nas suas formas e cores a cultura dos povos. Os artefatos cerâmicos descobertos em sítios arqueológicos são os únicos elementos sobre os quais é possível reconstruir o grau de evolução de comunidades já desaparecidas. Estudos arqueológicos indicam a ocorrência de utensílios cerâmicos a partir do período pré-neolítico e de materiais de construção, como tijolos, telhas e blocos, por volta de 5.000 a 6.000 a.C, quando os povos primitivos perceberam que o barro, quando seco sob o calor do sol, endurecia adquirindo firmeza e resistência (ANFACER, 2011).

Segundo estudos arqueológicos, a cerâmica é a mais antiga das indústrias e nasceu efetivamente quando o homem começou a utilizar o barro endurecido pelo fogo. Os primeiros tijolos queimados datam de 3000 a.C., cuja aplicação estava voltada aos revestimentos externos e muros de proteção, apesar da técnica ter se desenvolvido séculos antes, especialmente na queima de utensílios domésticos. Foram encontrados alguns exemplares destes artefatos na região onde se localizava a antiga Babilônia e alguns séculos depois, em torno de 280 a.C., identificou-se a utilização, por parte dos romanos, de barro cozido para construção de telhados. A atividade foi aprimorando-se e o século I a.C. começa a revelar evolução na qualidade dos artefatos cerâmicos decorrente da tecnologia produtiva empregada e resultando em peças de maior valor estético e monetário. A cerâmica passou a substituir a pedra trabalhada, a madeira e mesmo as vasilhas feitas de frutos como coco ou as cabaças confeccionadas com a casca de certos vegetais (AMBONI, 1997 apud TACLA, 1984).

A cerâmica para construção e com características industriais só surgiu na antiguidade em grandes centros comerciais, passando por um intenso desenvolvimento após a Revolução Industrial.

No Brasil, há mais de 2000 anos, antes mesmo da sua descoberta pelos portugueses, existia no país atividades de fabricação de artefatos cerâmicos. O mais antigo centro de cerâmica encontrava-se na ilha de Marajó, onde foi criado um estilo próprio: a cerâmica marajoara. Essas peças eram altamente elaboradas e tiveram sua origem na avançada cultura indígena da ilha.

Entretanto, estudos arqueológicos indicam que a presença de uma cerâmica mais simples ocorreu na região amazônica há mais de 5.000 anos (SEBRAE, 2008).

A tradição ceramista não chegou ao Brasil com os portugueses quando da chegada de Pedro Alvarez Cabral em território brasileiro. Os indígenas já possuíam uma cultura de trabalho com cerâmica e os colonizadores portugueses apenas trouxeram com eles a estrutura e a concentração de mão de obra na instalação de olarias. Com a implantação de olarias nos engenhos, fazendas e colégios jesuítas, o processo de fabricação empregado pelos índios sofreu modificações permitindo que as peças cerâmicas passassem a ser produzidas com maior simetria nas formas, acabamento mais aprimorado e redução do tempo de trabalho (ANFACER, 2011).

3.2 A Indústria Cerâmica de Revestimento

A produção de artefatos de cerâmica é uma atividade que tem como base no seu processo produtivo a argila, que se torna muito plástica e fácil de moldar quando umedecida. Depois de submetida a uma secagem para retirar a maior parte da água, a peça moldada é submetida a altas temperaturas adquirindo rigidez e resistência mediante a fusão das matérias-primas na composição da massa cerâmica (AMBONI, 1997 apud TACLA, 1984).

As atividades do setor cerâmico exercem um papel significativo dentro do contexto industrial nacional tendo significativa participação na economia brasileira. A abundância de matérias-primas e disponibilidade de tecnologias e equipamentos especializados permitiram que as indústrias nacionais evoluíssem rapidamente e vários tipos de produtos cerâmicos atingissem nível de qualidade mundial. A estrutura produtiva do setor cerâmico é composta por diversos segmentos, destacando-se no setor da construção civil, a cerâmica de revestimentos representada pelos azulejos e pisos cerâmicos (AMBONI, 1997 apud TACLA, 1984).

A indústria de revestimentos cerâmicos é considerada um segmento da indústria de transformação e tem como atividade a produção de pisos e azulejos cerâmicos e representa juntamente com a cerâmica estrutural vermelha, uma cadeia produtiva do setor de construção civil. As placas cerâmicas são utilizadas em revestimentos de pisos e paredes de ambientes internos e externos. Este setor é grande consumidor de matérias-primas minerais e insumos energéticos. A produção de revestimentos cerâmicos em escala industrial requer um elevado consumo de energia térmica e elétrica, sendo estas, utilizadas em várias etapas ao longo de todo o processo produtivo.

O gás natural é a principal fonte de geração de energia térmica utilizada pelas indústrias de revestimentos cerâmicos no mundo e também é um dos itens que tem maior participação sobre o custo do produto acabado (CONSTANTINO, ROSA e CORRÊA, 2006).

A produção brasileira de cerâmica de revestimento está concentrada nas regiões Sul e Sudeste. Quatro são os pólos regionais que reúnem as empresas responsáveis pela maior parcela da produção nacional. Este pólos regionais estão localizados na região de Criciúma no Estado de Santa Catarina que tem reconhecimento como pólo internacional, Mogi-Guaçu situada na região da Grande São Paulo e nas regiões de Cordeirópolis e Santa Gertrudes no Estado de São Paulo. O Brasil é hoje, um dos grandes produtores mundiais de revestimento cerâmico. O país é o segundo maior produtor e consumidor mundial de revestimentos cerâmicos, quarto maior exportador mundial e segundo maior exportador para o mercado norte-americano (ANFACER, 2011).

3.2.1 Classificação e Tipologia da Cerâmica de Revestimento

As placas cerâmicas de revestimento são peças constituídas por um corpo cerâmico ou suporte, de natureza argilosa e porosidade variável, com ou sem uma cobertura de natureza vítrea ou esmalte, o qual tem a função de impermeabilizar e decorar uma das faces da placa cerâmica. Os revestimentos cerâmicos esmaltados são cada vez mais utilizados por suas características funcionais e estéticas, e principalmente por levarem uma série de vantagens sobre cerâmicas de revestimento não esmaltadas (BRITO, 2009).

As principais características técnicas dos revestimentos cerâmicos são a absorção de água, graus de dureza e a resistência à abrasão, a manchas, ao choque térmico e a ácidos (ROSSO, CUNHA e ROJAS-RAMIREZ 2005). A Tabela 1 mostra a classificação da cerâmica de revestimento, conforme a absorção de água e resistência mecânica.

Tabela 1 – Tipos de revestimentos conforme classificação por absorção de água e resistência mecânica, segundo a Norma ISO 13006/1998 e ABNT NBR13818/1997.

| Tipologia | Absorção % | Grupo Absorção | Características |
|------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Porcelanato | até 0,5 | B Ia | baixa absorção alta resistência |
| Grês | 0,5 – 3,0 | B Ib | baixa absorção alta resistência |
| Semi-Grês | 3,0 – 6,0 | B IIa | média absorção média resistência |
| Semi-Porosa | 6,0 – 10,0 | B IIb | alta absorção baixa resistência |
| Porosa | acima de 10,0 | B III | alta absorção baixa resistência |

Fonte: ROSSO, CUNHA e ROJAS-RAMIREZ, 2005.

Além da absorção de água e resistência mecânica, de acordo com a ABNT NBR 13817/1997 e baseado na ISO 13006/1995, os revestimentos mecânicos são classificados conforme os seguintes critérios técnicos:

- 1) Quanto ao tipo de superfície :
 - a) esmaltados : cobertura vítrea em uma de suas superfícies.
 - b) não esmaltados : superfície rústica ou polida.

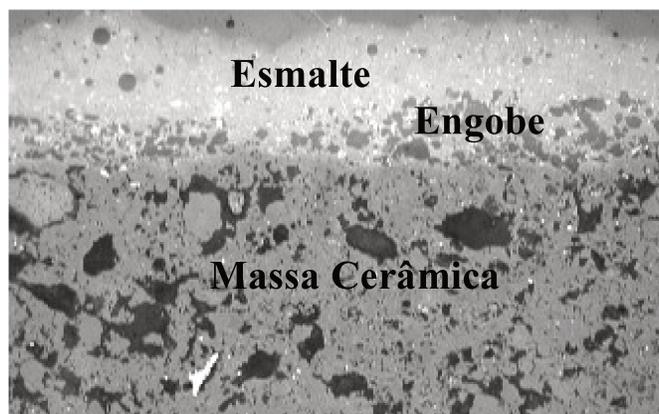
- 2) Quanto ao método de fabricação :
 - a) por extrusão (A) : processo de molde mais usado para a terracota.
 - b) por prensagem (B) : processo de molde mais usado na produção cerâmica.

Na especificação de um revestimento mecânico deverá constar o método de fabricação e o grupo de absorção de água. Por exemplo, o revestimento cerâmico classificado como B IIa é um produto produzido pelo método de prensagem (B) e categorizado no segundo grupo de absorção de água (IIa), sendo considerado um revestimento cerâmico prensado e com absorção de água de 3,0 a 6,0% e média resistência mecânica (MALISKA, 2007).

- 3) Quanto a resistência à abrasão superficial (PEI): capacidade de resistência ao desgaste superficial do produto segundo o PEI – Porcelain Enamel Institute e que pode ser provocado por atrito em ambientes residenciais, comerciais e industriais.
- 4) Quanto a resistência a manchas: classificação que indica os níveis de facilidade ou a impossibilidade de remoção de manchas.
- 5) Quanto a resistência ao ataque de agentes químicos: indica o nível de resistência química dos revestimentos cerâmicos a ácidos, álcalis e produtos domésticos e de piscinas.
- 6) Quanto ao aspecto superficial ou análise visual: classifica a qualidade das placas cerâmicas de revestimento quanto a defeitos visíveis observáveis a distância padrão de $1,00 \pm 0,05$ metros.

Nos revestimentos cerâmicos esmaltados, a camada entre o suporte e o esmalte é denominada engobe e consiste em um substrato branco e opaco que permite atenuar as diferenças de composição entre o suporte e o esmalte mascarando a cor da argila sempre que o esmalte a ser aplicado possuir tonalidade clara. Além disso, atua como impermeabilizante e possibilita a aplicação de camadas de esmalte menos espessas reduzindo o custo de produção. O esmalte cerâmico é um revestimento liso e cristalino aplicado em uma das superfícies da placa cerâmica adicionando cor e decoração ou variando a sua textura. A sua composição consiste geralmente de pó de vidro combinado com óxidos e elementos de pigmentação (MALISKA, 2007). A Figura 1 mostra uma micrografia com os elementos que compõe o corpo cerâmico.

Figura 1 – Micrografia com os elementos constituintes do corpo cerâmico.



Fonte: MALISKA, 2007.

Dentre as propriedades que caracterizam a qualidade dos esmaltes e a sua utilização, podemos citar:

- a) estética, brilho e textura da superfície;
- b) resistência mecânica, à abrasão e ao choque térmico;
- c) resistência a ataques químicos e aos raios ultra-violetas;
- d) impermeabilidade

No setor de revestimentos cerâmicos, entre as demais cerâmicas existentes no mercado, o porcelanato é atualmente o produto que apresenta as melhores características técnicas e estéticas. Isto se deve a um intenso e contínuo processo de desenvolvimento que permitiu a elaboração de um material com uma microestrutura muito densa e elevada dureza. O porcelanato é produzido com a utilização de prensas hidráulicas de elevada capacidade de pressão e compactação superiores a da cerâmica tradicional, temperaturas de queima de até 1.280°C e massas com granulação muito fina e rica em feldspatos e fundentes nobres (MALISKA, 2007).

O porcelanato pode se apresentar na forma polida ou esmaltada, ambos apresentando alta resistência ao desgaste físico e a ataques químicos e elevada resistência mecânica. É um produto cerâmico com especificação B1a, indicando que é um material prensado e com absorção de água igual ou inferior a 0,5%. A cerâmica semi-grês é um revestimento que tem a sua composição elaborada especificamente para aplicação em pavimentos e que podem ser esmaltados ou rústicos, sem a cobertura de esmalte. Sua temperatura de queima pode atingir até 1.150°C. É um produto

cerâmico com especificação BIIa, indicando que é um material prensado, com absorção de água entre 3% e 6% e com média resistência razão pela qual, apresenta uma espessura maior em relação a outros tipos de revestimentos a fim de obter um aumento na resistência mecânica e a impactos (MALISKA, 2007).

Tanto o porcelanato como a cerâmica semi-grês, são resultantes de uma evolução tecnológica ocorrida a partir de 1970 em todo o processo produtivo cerâmico, consistindo principalmente na reformulação das massas e na redefinição dos ciclos de queima com o objetivo de aumentar o índice de produtividade industrial (ROSSO, CUNHA e ROJAS-RAMIREZ, 2005).

A cerâmica porosa é um revestimento que tem como características principais a elevada porosidade e a baixa resistência mecânica. É classificado no grupo das cerâmicas porosas com especificação BIII e absorção de água acima de 10%. Sua temperatura de queima gira em torno de 900 °C. Nesta classe se destacam os azulejos, os quais são revestimentos de paredes interiores e não requerem grande resistência mecânica, razão pela qual, o suporte apresenta espessura mais fina em relação a outros tipos de revestimentos cerâmicos (MALISKA, 2007).

3.2.2 Processo de Produção da Cerâmica de Revestimento

A produção de revestimentos cerâmicos tem passado por consideráveis transformações tecnológicas nas últimas décadas, fato que proporcionou contínuas automatizações do processo de fabricação e na melhoria da qualidade dos produtos cerâmicos. As composições adotadas na confecção das massas cerâmicas têm seguido uma evolução paralela a estes avanços tecnológicos, adequando-se aos ciclos de queima mais rápidos e à produção por queima simultânea do suporte e do esmalte. Por outro lado, a necessidade de atender a imposições do mercado consumidor tem levado este segmento industrial ao emprego de matérias-primas de maior qualidade e a um melhor nível de elaboração (MALISKA, 2007).

Na fabricação de revestimentos cerâmicos são utilizados vários materiais, os quais se dividem em matérias-primas plásticas e não plásticas. As principais matérias-primas plásticas utilizadas no preparo das pastas cerâmicas de revestimento são as argilas plásticas, os caulins e as argilas fundentes. A argila é a principal matéria-prima utilizada na fabricação das placas cerâmicas de revestimentos. A argila é um produto natural, terroso, constituído por componentes de granulação fina, entre os quais se destacam os minerais argilosos. Este produto natural desenvolve

plasticidade na presença de água e endurece depois de seco ou cozido. As argilas plásticas são compostas de caulinita e de vários argilominerais como a illita e a esmectita com quantidade variável de quartzo, feldspato e matéria orgânica. O caulim é composto basicamente por caulinita e as argilas fundentes integram em sua composição caulinita, illita, esmectita, quartzo e óxidos fundentes (MALISKA, 2007).

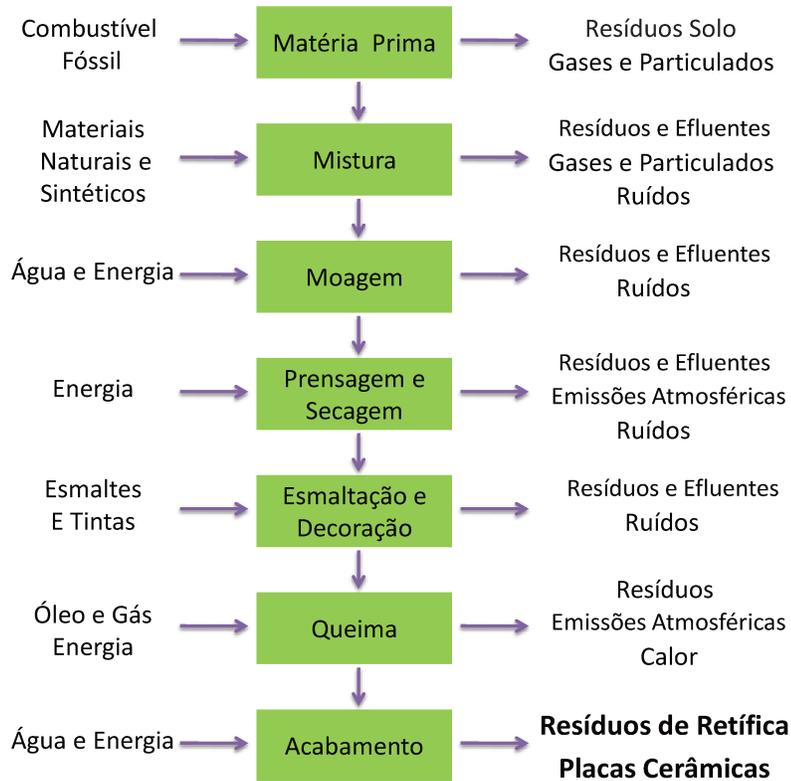
As matérias-primas plásticas são essenciais na fase conformação atuando como facilitadores da modelagem das peças proporcionando plasticidade à massa e fornecendo a resistência mecânica necessária para a sua manipulação. As matérias-primas não plásticas são utilizadas para compor a mistura com a argila e têm a função de sustentar o corpo cerâmico e promover a fusão da massa sendo fundamentais na fase de processamento térmico. Os materiais não plásticos habitualmente utilizados no preparo das massas cerâmicas são os feldspatos que atuam como fundentes, as sílicas ou quartzo e os carbonatos. Os fundentes são minerais do grupo de feldspato como alumínio e silicatos, os quais atuam nas camadas de cobertura do suporte. O filito é um mineral muito fino, formado basicamente de quartzo e caulinita e que pode compor até 50% da pasta cerâmica em virtude das suas características químico-mineralógicas. Os carbonatos contendo magnésio em sua composição são essenciais nos suportes de revestimentos porosos (MALISKA, 2007).

A correta associação de materiais plásticos e não plásticos proporciona plasticidade à pasta cerâmica para uma adequada moldagem e conferem ao produto final as características requeridas. O processo de produção dos revestimentos cerâmicos ocorre conforme as etapas abaixo descritas.

3.2.2.1 Seleção e Dosagem

O processo de fabricação de revestimentos cerâmicos tem início no recebimento e seleção das matérias-primas componentes da pasta cerâmica, a qual sofre diversas transformações físico-químicas durante o processo produtivo até atingir as propriedades requeridas pelo produto acabado. A composição da pasta deve ser elaborada levando-se em consideração as características da peça que se deseja obter e do método de fabricação a ser adotado. A Figura 2 mostra o processo básico de produção da indústria cerâmica de revestimentos.

Figura 2 – Fluxograma da produção de revestimentos cerâmicos.



Fonte: Modificado de OLIVEIRA e MAGANHA, 2006.

Desta forma, a partir de uma formulação pré-determinada é feita a dosagem dos materiais. No processo de dosagem é realizado um controle rigoroso da umidade das matérias primas a fim de se obter o peso real da massa cerâmica conforme a composição desejada (BRITO, 2009).

3.2.2.2 Moagem

O preparo das matérias-primas tem como objetivo a obtenção de uma mistura de composição homogênea, com uma distribuição granulométrica adequada e com o apropriado teor de umidade de acordo com o processo de conformação adotado. A principal etapa no processo de preparação das matérias-primas é a moagem, a qual poderá ser realizada através de dois métodos distintos: a via seca e a via úmida. O processo via seca consiste basicamente no preparo das argilas e demais matérias-primas para a prensagem, com a sua umidade natural e praticamente sem

beneficiamento. O beneficiamento envolve apenas as desagregações e a mistura. A regulagem da umidade é realizada através de pulverizadores especiais seguido do processo de moagem e granulação (MALISKA, 2007).

Na via úmida o preparo das argilas e demais matérias-primas é efetuado com a incorporação de água e em seguida são moídas. O resultado deste processo é uma mistura chamada barbotina que após ser homogeneizada, segue para a atomização, a qual consiste em uma operação que é efetuada somente no processo de produção por via úmida. Esta operação consiste na desumidificação da barbotina obtida no final do processo de moagem. Ao final do processo de atomização é possível obter grãos arredondados com umidade e distribuição granulométrica adequadas à prensagem (MALISKA, 2007). As Figuras 3 e 4 mostram os equipamentos de moagem e atomização.

Figura 3 – Atomizador do material granulado.



Figura 4 – Mistura e moagem das matérias-primas.



Os materiais granulados obtidos por via seca possuem características tecnológicas próximas às obtidas por via úmida, no entanto apesar da via seca se apresentar como um processo mais econômico, a via úmida proporciona maior qualidade na mistura permitindo a obtenção de um material mais fino e a realização de um melhor peneiramento para a eliminação de impurezas (BOSCHI, 2008).

No ano de 2009, a via seca foi responsável por 69% da produção brasileira de revestimentos cerâmicos (JUNIOR et al., 2010).

3.2.2.3 Conformação

A prensagem é o processo pelo qual se consegue a conformação da massa cerâmica e onde se configura a placa propriamente dita nas dimensões e modelo determinados. Este processo proporciona o adensamento da massa, reduzindo a porosidade e permitindo uma elevada densidade do corpo cerâmico. A prensagem é o processo de conformação mais utilizado na indústria cerâmica de revestimentos (BRITO, 2009).

Neste processo, os grãos que constituem a massa cerâmica são comprimidos em prensa hidráulica com pressões variáveis entre 200 a 500 Kgf/cm² conforme o formato e o tipo de produto. Para que ocorra uma elevada compactação do corpo cerâmico os grãos devem apresentar um

adequado teor de umidade a fim de proporcionar suficiente plasticidade ao material (MALISKA, 2007). A Figura 5 mostra equipamento de prensagem para conformação das placas cerâmicas.

Figura 5 – Prensa hidráulica.



Fonte: MALISKA, 2007.

No processo de prensagem, além da conformação da placa cerâmica, procura-se reduzir a porosidade interna da peça.

3.2.2.4 Secagem

A etapa de secagem possibilita a redução de água do corpo cerâmico de forma que o processo de queima seja realizado em um período de tempo industrialmente adequado. Caso a sinterização ocorra por monoqueima, ou seja, a queima do suporte e do esmalte conjuntamente, a secagem proporciona um aumento da resistência mecânica do suporte cru a fim de permitir o seu transporte nas linhas de esmaltação (MALISKA, 2007).

A etapa de secagem deve estar condicionada ao período de tempo necessário para a migração interna da água no interior do corpo cerâmico, a fim de se evitar fissuras na peça ocasionadas por zonas de retração que propiciem tensões inadequadas no material. Na etapa de secagem é importante o controle de possíveis e eventuais variações dimensionais em virtude da

perda de água, devendo-se ao final do processo, permitir um índice mínimo de umidade ao corpo cerâmico (ROSSO, CUNHA e ROJAS-RAMIREZ 2005). A Figura 6 mostra equipamento de secagem.

Figura 6 – Secador vertical.



Fonte: MALISKA, 2007.

3.2.2.5 Queima

O processo de queima ocorre ao longo de fornos contínuos interligados, onde os materiais cerâmicos passam por complexas transformações físico-químicas a fim de reduzir ao máximo a porosidade das peças. A densificação e a conseqüente redução da porosidade ocorre devido à presença de fundentes na massa permitindo ao corpo cerâmico a obtenção das características mecânicas adequadas ao uso previsto. As temperaturas de queima podem chegar até 1.280 °C onde o controle da viscosidade da massa é fundamental para se manter as condições de contração linear da peça cerâmica (ROSSO, CUNHA e ROJAS-RAMIREZ 2005).

O processo de sinterização das massas cerâmicas de revestimento pode ocorrer com a queima do suporte sendo realizada simultaneamente ou não com a queima do esmalte :

- Monoqueima: a técnica pela qual o suporte e o esmalte são queimados juntos proporcionando ao corpo cerâmico maior resistência e durabilidade.

- Biqueima: nesta técnica o suporte e o esmalte são queimados em duas etapas distintas sendo largamente utilizada na fabricação de azulejos. Este processo permite uma maior riqueza em detalhes decorativos na peça cerâmica (MALISKA, 2007). A Figura 7 mostra os fornos interligados para queima cerâmica.

Figura 7 – Fornos interligados para queima cerâmica



Finalizado o processo de queima, os corpos cerâmicos passam por uma etapa de resfriamento rápido até atingir a temperatura de 650 °C para em seguida entrarem em um ciclo de resfriamento lento devido à evolução do quartzo aproximadamente a 570°C (MALISKA, 2007).

As etapas de esmaltação e a decoração integram o processo de queima das peças cerâmicas. A esmaltação consiste na aplicação em uma das superfícies do corpo cerâmico de uma ou várias camadas de vidrado com espessuras variáveis. O processo de esmaltação compreende as fases de preparação das fritas e dos esmaltes. As fritas são materiais vítreos obtidos pela fusão das matérias-primas integrantes de misturas submetidas a temperaturas em torno de 1.500 °C, e que depois de

secas e moídas, são utilizadas com outros materiais não fritados na preparação dos esmaltes. Os esmaltes são constituídos basicamente por fundentes (Na_2O , K_2O , ZnO , CaO , MgO), estabilizante (Al_2O_3) e os vitrificantes (SiO_2 , TiO_2) que conferem ao produto queimado propriedades mecânicas e estéticas. A composição dos esmaltes depende das características técnicas do corpo cerâmico, bem como da tecnologia de produção empregada e principalmente do tipo de queima (MALISKA, 2007).

Na decoração das peças cerâmicas de revestimento, a serigrafia é atualmente a técnica mais utilizada em virtude da sua facilidade de execução no sistema de esmaltação. É utilizada tanto no processo de monoqueima quanto na biqueima e consiste na reprodução de desenhos pela aplicação de telas sobrepostas obtendo-se os efeitos estéticos desejados (MALISKA, 2007).

3.2.2.6 Retífica

O processo de retífica ocorre no final da linha de produção dos revestimentos cerâmicos, onde na presença de água, rebolos diamantados de alta capacidade de remoção trabalham sobre as laterais das peças removendo eventuais rebarbas e promovendo o seu perfeito esquadrejamento. Além disto, esta etapa visa assegurar às placas cerâmicas as dimensões finais precisas permitindo total alinhamento durante o assentamento (BRITO, 2009 apud BIFFI, 2002).

Em seguida, as placas cerâmicas passam por análise visual ou equipamento específico para a avaliação das suas características técnicas e estéticas e seguem para a estocagem.

3.3 Resíduos da Indústria Cerâmica

A indústria cerâmica gera uma grande quantidade de resíduos em virtude do seu significativo volume de investimento e produção em seus vários segmentos, disponibilizando anualmente cerca de 6 milhões de toneladas de resíduos provenientes da sua produção industrial (ANFACER, 2011).

As atividades industriais do setor cerâmico geram rejeitos oriundos de várias operações produtivas e com características diversas, tais como efluentes líquidos, emissões gasosas e rejeitos sólidos. As operações de manuseio e processamento da argila e de outras matéria primas ocasionam a formação e emissão de material particulado no ambiente. A dispersão destes particulados podem levar a sérios problemas respiratórios se caracterizando como danos à saúde do trabalhador. Estas dispersões podem ter origem na armazenagem inadequada da argila, na preparação da massa cerâmica por via seca e nos processos de moagem, peneiramento e secagem. Os compostos presentes nas matérias primas contribuem também para a emissão de poluentes gasosos nos processos de secagem e queima originadas pelas colas e materiais aglutinantes ou pelas resinas presentes nas tintas (OLIVEIRA e MAGANHA, 2006).

Dentro da geração dos resíduos sólidos gerados na produção cerâmica encontram-se cacos de cerâmica crus e queimados originados da quebra de peças, além de aparas de metal, embalagens, pallets e tambores. A disposição direta destes resíduos sobre o solo pode acarretar em sua contaminação, assim como na contaminação de lençóis freáticos por meio da percolação de metais pesados devido à chuva, principalmente chumbo e zinco, acima dos padrões estabelecidos pela legislação. A geração de resíduos de embalagens é outro impacto ambiental a ser considerado, pois advém de caixas de papelão, sacos e galões plásticos e de tambores e bombonas de produtos químicos. A disposição inadequada dessas embalagens pode causar sérios danos ao meio ambiente pelo potencial de contaminação do solo e das águas subterrâneas por restos de produtos químicos tóxicos (OLIVEIRA e MAGANHA, 2006).

A água utilizada na limpeza das unidades de preparação e dos moldes de fundição geram efluentes líquidos, os quais podem alterar as características químicas de um corpo d'água se lançado sem tratamento prévio adequado. Além disso, podem ocasionar impactos à biota, como a contaminação de solos e de águas subterrâneas (OLIVEIRA e MAGANHA, 2006).

3.3.1 Aspectos Ambientais dos Resíduos Cerâmicos de Revestimento

O crescimento do poder econômico da população brasileira verificado nos últimos anos proporcionou um forte incremento na produção de bens de consumo. Esta forte expansão das atividades industriais tem como reflexo imediato a geração de um grande volume de resíduos e rejeitos oriundos dos seus processos produtivos.

Com a crescente necessidade da incorporação da questão ambiental em suas estratégias de negócios, as empresas do setor cerâmico buscam identificar oportunidades de melhoria nas etapas de produção com o objetivo de reduzir a carga de resíduos gerados nos seus processos produtivos. Os resíduos industriais que não tenham a sua disposição ambientalmente adequada causam impactos ao ambiente, ameaçando os ciclos naturais onde são lançados.

A busca pela melhoria da qualidade ambiental está fortemente associada à redução da disponibilização de resíduos gerados pelas diversas atividades industriais. Dentro deste contexto, o conceito de reciclagem se apresenta como uma solução técnica, econômica e ambientalmente viável à destinação do enorme volume de resíduos decorrente da produção industrial.

A recente Lei 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) tem como diretriz básica melhorar a gestão de resíduos, atualmente um dos grandes desafios da sociedade moderna. A partir de uma gestão integrada e mediante a divisão de responsabilidades entre a sociedade, poder público e iniciativa privada esta legislação incentiva a reciclagem colaborando com a preservação do meio ambiente e promovendo o desenvolvimento sustentável.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos define resíduo como “todo material originado de um processo produtivo, que através da reciclagem se apresente apto a ser aproveitado no seu processo de origem ou na formação de novos produtos”. Já o rejeito, é definido como “um material originado de um processo produtivo que, esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresente outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada” (BRASIL, 2010)

No segmento de revestimentos cerâmicos a produção de esmaltados, por apresentarem melhores características técnicas e estéticas, vem aumentando de forma significativa e gerando um crescente volume de resíduos decorrente do seu processo produtivo (CONSTANTINO, 2006).

Os resíduos provenientes da fabricação dos revestimentos cerâmicos esmaltados de porcelanato, cerâmica semi-grês e cerâmica porosa, objetos de estudo desta pesquisa, são gerados

na etapa de retífica onde na presença de água, rebolos diamantados de alta capacidade de remoção trabalham sobre as laterais das peças removendo eventuais rebarbas e promovendo o seu perfeito esquadrejamento. O resíduo produzido nesta etapa do processo industrial é constituído por uma mistura de água, material cerâmico e esmalte, gerando uma pasta com alto índice de umidade denominada industrialmente de “lodo de acabamento”, o qual após ser desidratado, é descartado diretamente em aterros classe IIA apesar do seu potencial como matéria-prima alternativa para produção de novos materiais.

O setor da construção civil se evidencia como um parceiro natural demonstrando grande potencial para o reaproveitamento dos resíduos da retífica de placas cerâmicas de revestimento na produção de novos materiais com perspectivas atraentes nos aspectos técnico e ambiental.

3.3.2 Reaproveitamento dos Resíduos Cerâmicos

A disposição de resíduos industriais em aterros, além dos elevados custos econômicos, pode trazer inúmeros problemas ambientais, como contaminação do solo, das águas subterrâneas e agressão a vegetação presente no local. Desta forma, a reciclagem e a reutilização são as soluções mais indicadas para o manejo da grande maioria dos resíduos industriais, reduzindo custos, minimizando a extração de recursos naturais não renováveis, diminuindo a carga de poluentes lançados no meio ambiente e reduzindo os impactos ambientais e efeitos danosos à saúde humana causados pelo descarte indiscriminado de resíduos na natureza.

A reutilização dos diferentes resíduos da indústria cerâmica na produção de materiais a base de cimento Portland tem sido objeto de estudos nos últimos anos devido aos benefícios técnicos e ambientais que esses materiais podem promover. Guerra et al. (2009) utilizaram resíduos cerâmicos de louça sanitária provenientes de demolição em substituição parcial ao agregado graúdo natural na produção de concreto. O resíduo foi incorporado parcialmente ao concreto em proporções que variaram de 3% a 9% para a avaliação do seu desempenho mecânico. Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão mostraram um acréscimo constante da resistência à compressão a partir de 5% de incorporação do resíduo em comparação à resistência apresentada pelo concreto de referência na idade de 28 dias. Os autores concluem que o resíduo apresenta viabilidade técnica na produção de concretos ecológicos.

Higashiyama et al. (2012) realizaram estudos da incorporação parcial de resíduo cerâmico de isoladores elétricos, como substituto do agregado miúdo e do cimento na produção de argamassa. Os resíduos foram triturados obtendo-se várias granulometrias, sendo que o tamanho das partículas para a substituição do agregado miúdo variaram entre 5,0 e 0,075mm e partículas menores que 0,075mm foram utilizadas para a substituição parcial do cimento. Foram moldados corpos-de-prova de 50mm x 100mm com porcentagens de incorporação de 10%, 20% e 30% em substituição ao agregado miúdo natural e ao cimento. Os resultados dos ensaios de compressão axial mostram um aumento da resistência nas porcentagens de 10% e 20% em substituição ao agregado miúdo natural e ao cimento comparados à argamassa controle sem a incorporação de resíduo. Os ensaios de porosidade mostram uma diminuição do tamanho dos poros nas argamassas com a incorporação do resíduo cerâmico, indicando uma menor absorção de água e consequentemente maior durabilidade.

Evangelista et al. (2006) desenvolveram estudos com resíduos cerâmicos presentes no efluente líquido gerado nas etapas de produção de louças sanitárias. Foram produzidos corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm x 100 mm com incorporação parcial em substituição ao cimento nas proporções de 5%, 10%, 15% e 50% na produção de argamassas, os quais foram rompidos na idade de 28 dias. Nos ensaios de compressão axial observou-se um aumento de 3,8% na resistência mecânica de 10% de substituição em relação ao controle. Nas substituições de 5%, 15% e 50% ocorreu uma redução na resistência mecânica de 15%, 13% e 64% respectivamente. No entanto, os autores sugerem que os elevados teores de sílica e alumínio presentes no resíduo, indicam que este poderá apresentar atividade pozolânica, característica importante na durabilidade das estruturas de concreto e argamassa aplicadas na construção civil.

Cabral et al. (2010) investigaram a influência da incorporação de agregados reciclados de cerâmica vermelha, concreto e argamassa provenientes de construção e demolição para a produção de concreto. Os resíduos foram triturados e moídos obtendo-se várias granulometrias similares aos agregados naturais a fim de compor os agregados miúdos e graúdos reciclados. A relação água/cimento variou entre 0.46 e 0.74 e as porcentagens de substituição foram de 25%, 33%, 50% e 100%. Foram moldados corpos-de-prova de 100 mm x 200 mm, os quais foram rompidos na idade de 28 dias para os ensaios de resistência à compressão axial. Os estudos concluíram que a substituição dos agregados naturais por reciclados resultou em uma redução da resistência mecânica das misturas, exceto a incorporação do resíduo de tijolos cerâmicos como substituto do

agregado miúdo, o qual proporcionou um incremento na resistência do concreto de 14% com substituição de 100% dos agregados naturais. Segundo os autores, isto pode ter ocorrido devido a reações pozolânicas, as quais melhoram a zona de transição interfacial entre a pasta e o agregado favorecendo as propriedades mecânicas de concretos e argamassas.

Pacheco-Torgal e Jalali (2010) investigaram a incorporação dos resíduos da indústria cerâmica na produção de concreto. Os resíduos cerâmicos incluíram duas categorias: resíduos da produção cerâmica vermelha, como telhas, tijolos e blocos e resíduos da cerâmica de revestimentos como pisos e azulejos. Os resíduos foram triturados obtendo-se várias granulometrias, os quais substituíram os agregados graúdos e miúdos em 100% e o cimento em 20%. O estudo conclui que a substituição parcial ao cimento reduziu a resistência em 25,2% em 7 dias, 20% em 28 dias e 9,6% em 90 dias em relação ao concreto de referência. A substituição dos agregados miúdos e graúdos naturais pelos resíduos cerâmicos não afetou a resistência mecânica em relação ao concreto de referência. Os ensaios de permeabilidade e absorção de água indicam um melhor desempenho de durabilidade no concreto com a incorporação dos resíduos cerâmicos em relação ao concreto de referência, exceto na substituição dos agregados graúdos onde a absorção aumenta. Os autores atribuem os resultados de durabilidade à reatividade pozolânica presente nos resíduos cerâmicos e concluem que a substituição do agregado miúdo é a melhor opção por não haver perda de resistência mecânica.

A indústria de revestimentos cerâmicos demonstra grande potencial para o reaproveitamento dos resíduos da sua produção na fabricação de novos materiais. Jacoby (2011) estudou a produção de argamassas com a incorporação de resíduo do polimento de porcelanato nas concentrações de 5%, 10% e 20% em substituição ao cimento. Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm x 100 mm com um traço de referência de 1:3:0,60 (cimento, areia e água), os quais foram rompidos nas idades de 28 e 84 dias. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias não mostram alteração no comportamento mecânico das argamassas e na idade de 84 dias verificou-se um aumento de 18% na resistência na concentração máxima de 20% em relação a argamassa controle. O autor atribui o aumento da resistência ao efeito pozolânico do resíduo, cujas partículas finas diminuem a porosidade e a permeabilidade da matriz cimentícia.

Kummer et al (2007) utilizaram o resíduo de polimento de porcelanato e o resíduo da produção de feldspato, mineral que contém em sua composição silicato de alumínio, potássio, cálcio e eventualmente bário, na fabricação de um novo produto. Foram utilizadas diferentes

proporções de resíduo de porcelanato e de feldspato submetidos ao processo de queima a 1100 °C, 1150 °C e 1200°C. Os autores concluíram que o material gerado quando queimado a 1100°C pode ser aplicado como agregados leves para revestimentos internos. Já os produtos obtidos a temperaturas mais elevadas, tornando-se mais porosos, poderiam ter outras aplicações como na fabricação de placas de isolamento acústico ou forros, devido a suas propriedades de leveza.

Da mesma forma, Souza (2007) investigou o comportamento plástico e mecânico do concreto com a adição do resíduo do polimento de porcelanato. Os teores de resíduo adicionados ao concreto variaram de 10% a 50%, com e sem aditivo. Para os ensaios de resistência a compressão axial, porosidade e absorção de água foram moldados corpos-de-prova de 100 mm x 200 mm, os quais foram rompidos nas idades de 7, 28 e 90 dias. Com a concentração de 50% de adição a mistura teve sua plasticidade comprometida. Os resultados mostram um aumento gradual da resistência à compressão à medida que a quantidade do resíduo aumenta nos traços do concreto atingindo um incremento de até 50% com relação ao concreto de referência. Os ensaios de porosidade e absorção indicam um decréscimo da porosidade e da absorção à medida que a quantidade de resíduo de porcelanato aumenta nos traços do concreto favorecendo o desempenho de durabilidade.

Estudo desenvolvido por Bernardin, Silva e Riella (2006) demonstraram que pela existência de carbetos de silício na composição do material abrasivo usado no processo de polimento, o resíduo da produção de porcelanato pode ser usado como agente promotor de expansão pela formação de bolhas em espumas cerâmicas de baixa densidade decorrentes da formação de sílica e dióxido de carbono em altas temperaturas. As espumas cerâmicas são aplicadas no preenchimento de lajes e fabricação de divisórias para isolamento térmico.

Dentre os novos materiais produzidos a partir da incorporação de resíduos industriais, encontra-se a produção de peças pré-moldadas de concreto para uso em pisos intertravados. Simieli et al. (2007) investigaram o uso de agregado reciclado de demolição na produção de concreto para pisos intertravados em ambiente laboratorial sem a necessidade do uso de vibroprensas. Foram produzidas peças pré-moldadas de concreto em concentrações que variaram de 20% a 80% em substituição ao agregado natural. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão mostram que nos teores de substituição de 20% e 40% todas as idades atingiram 35 MPa exigidos pela norma no uso de pisos intertravados para veículos comerciais. O melhor desempenho mecânico ocorreu na idade de 56 dias com 20% de substituição. A crescente adição do resíduo ocasionou o

aumento de consumo de água, determinando a necessidade de aditivo nas misturas. O concreto produzido com os agregados reciclados em ambiente laboratorial apresentou trabalhabilidade apropriada para a produção das peças de pavimento intertravado com a utilização de fôrmas de plástico, obtendo-se peças com adequado padrão de acabamento.

Bittencourt (2011) avaliou o comportamento mecânico de blocos de concreto para pavimento intertravado com a substituição parcial dos agregados miúdos e graúdos pelos resíduos de construção e demolição e areia de fundição. Os resíduos de demolição foram triturados e moídos manualmente obtendo-se granulometrias similares aos agregados naturais. As incorporações parciais foram de 20% e 40% para os ensaios de resistência à compressão axial com rompimentos nas idades de 7 e 28 dias. A pesquisa mostrou uma redução da resistência mecânica a medida que aumentava a incorporação dos resíduos. No entanto, a incorporação parcial de areia reciclada e areia de fundição na porcentagem de 20% não alteraram significativamente o comportamento mecânico das peças de concreto.

O potencial de utilização de resíduo de tijolos de argila na produção de concretos e argamassas tem sido examinado em vários estudos. Poon et al. (2006) investigaram a utilização de tijolos de argila triturados, provenientes de demolição, como agregados miúdo e graúdo na produção de concreto para fabricação de pisos intertravados. Os dados obtidos foram comparados com os requisitos prescritos pelo Escritório dos Transportes e Obras de Hong Kong para a fabricação de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação. Os tijolos de argila foram triturados manualmente obtendo-se partículas de 10mm e partículas menores de 5mm e as impurezas características da demolição não foram eliminadas. Os resultados deste estudo indicaram que o uso do resíduo reduziu a densidade dos blocos de pavimentação. A resistência à compressão e à tração diminuíram a medida que aumentava a incorporação do resíduo. A absorção de água dos blocos de pavimentação aumentou significativamente a medida que aumentava a adição do resíduo. A investigação conclui também que a argamassa aderida aos tijolos de argila proporcionou o aumento do valor de absorção de água. Jankovic et al. (2012) desenvolveram estudo similar a Poon et al. (2006) onde investigaram a incorporação de resíduos de tijolos comuns de argila moídos provenientes de demolição, substituindo parcialmente o agregado miúdo natural na produção de concreto para uso em pavimentação para áreas de pedestres. A exemplo de Poon et al. (2006), sua investigação concluiu que a resistência à compressão e a densidade da mistura sofrem redução à medida que aumenta a incorporação do resíduo sendo o melhor resultado de

resistência à compressão obtido com uma incorporação de 32,5% do resíduo em relação ao concreto de referência. Entretanto, os testes de congelamento demonstraram que a incorporação parcial do resíduo de tijolos de argila proporciona um bom desempenho na durabilidade do concreto.

A atividade científica acerca dos aspectos ambientais da produção cerâmica de revestimento, nomeadamente o porcelanato, não reflete a importância econômica neste segmento, portanto, estudos devem ser aprofundados acerca do reaproveitamento destes resíduos, a fim de atingir a sustentabilidade ambiental e econômica desejada na atualidade (SANCHEZ et al., 2010).

3.4 Pavimento Intertravado

3.4.1 Aspectos Gerais do pavimento

Pavimento é uma estrutura constituída de várias camadas, construída sobre uma superfície terraplenada, de forma a resistir e distribuir os esforços verticais e horizontais provenientes do tráfego de veículos e do clima, proporcionando aos usuários conforto, segurança e economia. Historicamente a função do pavimento era a de dar estabilidade e boa trafegabilidade aos veículos, porém com o desenvolvimento tecnológico dos meios de transporte e o aumento da capacidade de carga dos transportes automotivos, os revestimentos requerem características de qualidade como conforto, segurança, volume de carga, economia operacional e durabilidade do pavimento (HALLACK, 1998). Os pavimentos podem ser divididos basicamente em dois grupos: flexíveis e rígidos.

O pavimento flexível é aquele em que as suas diversas camadas possuem a capacidade de acomodar uma flexão estrutural, ou seja, sofrem uma deformação elástica devido às cargas do tráfego. Os pavimentos flexíveis são revestidos com material asfáltico ou betuminosos aplicados na sua superfície e utilizados tanto em estradas de volume baixo ou de volume elevado.

Os pavimentos rígidos possuem revestimento composto por placas de concreto de cimento Portland, sendo consideravelmente mais rígidos que os pavimentos flexíveis devido a sua elevada capacidade de elasticidade, as quais permitem a distribuição da carga sobre uma área maior do

subleito. Por outro lado, os pavimentos flexíveis distribuem as cargas para uma área menor do subleito devido às várias camadas em sua estrutura (MULLER, 2005).

De acordo com Motta (2005), a estrutura de um pavimento apresenta-se da seguinte forma:

- 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.

Os pavimentos revestidos de blocos pré-moldados de concreto com distribuição intertravada podem ser considerados pavimentos flexíveis, devido as suas características semelhantes ao revestimento asfáltico como a capacidade de deflexão e distribuição de cargas.

3.4.2 Histórico do Pavimento Intertravado

O pavimento intertravado é constituído por peças pré-moldadas de concreto, assentadas sobre base de areia, as quais possuem capacidade de intertravamento em relação às peças vizinhas com o objetivo de resistir aos movimentos de deslocamento individual, seja ele vertical, horizontal, de rotação ou de giração em relação às peças componentes do revestimento (HALLACK, 1998).

A forma de disposição das peças no revestimento intertravado já era conhecida dos romanos aproximadamente em 500 a.C. quando da construção de estradas e caminhos, os quais eram pavimentados com uma camada de rolamento assentada sobre bases granulares estabilizadas. Os romanos já classificavam os vários tipos de areia e as utilizavam misturadas com calcário formando argamassas, as quais eram usadas como camadas com propriedades estruturais (KNAPTON, 1996; CRUZ, 2003).

Entre o período compreendido entre 400 a.C. e 200 a.C. os leitos das estradas romanas eram construídos de forma notável, visto sua estrutura ser constituída por sobreposições de camadas de resistência crescente a uma camada drenante de areia (KAEFER, 1998). A Figura 8 mostra detalhe da estrutura de base usada na construção de antigas estradas romanas.

Figura 8 – Estrutura de base usada na construção de antigas estradas romanas.



Fonte: KAEFER, 1998.

As cidades e fortificações dos territórios conquistados eram ligadas por um sistema de estradas e caminhos devido a necessidade de comunicação e de deslocamento rápido de tropas militares. Estas ligações foram implantadas por todo o Império Romano e construídas de acordo com os materiais disponíveis e da topografia da região. O uso de pedras talhadas e laminadas na forma octogonal e dispostas com o objetivo de proporcionar travamento ao pavimento foi a forma preferidamente adotada nas antigas estradas romanas quando era exigida grande resistência ao desgaste (MULLER, 2005).

Entre outras importantes vias construídas na época, a via Ápia que ligava Roma ao sul da Itália, considerada uma das precursoras do pavimento intertravado, evidencia a tecnologia do uso de pedras laminadas na forma octogonal e dispostas com o objetivo de proporcionar travamento ao revestimento do pavimento. A Figura 9 mostra detalhe de pedras talhadas intertravadas.

Figura 9 - Detalhe de disposição intertravada de pedras talhadas em antiga estrada romana.



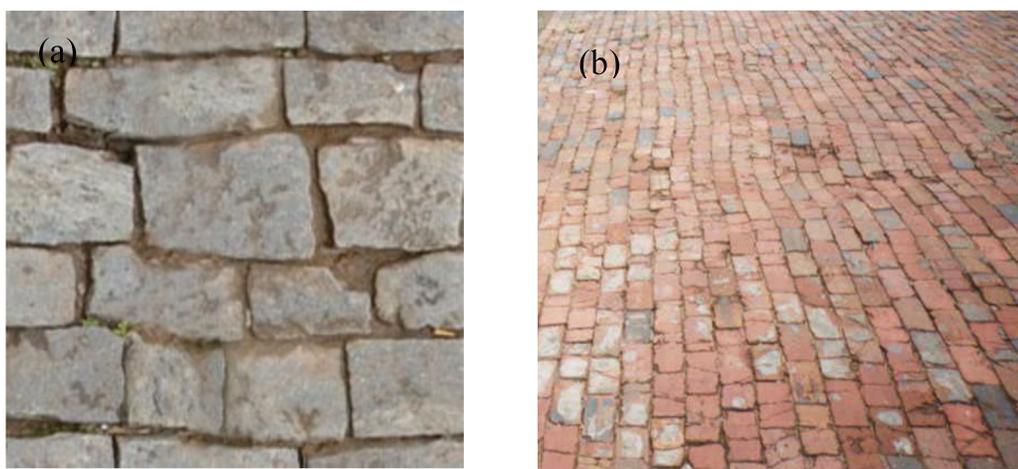
Fonte: <http://pt.dreamstime.com/imagem-de-stock-estrada-romana-antiga-image2412151>.

Devido a intensificação das rotas comerciais, as peças de revestimento e os processos construtivos destes pavimentos foram evoluindo ao longo dos anos. O assentamento de pedras talhadas dispostas em fileiras apareceram nos meados do século XVIII e já evidenciavam o cuidado para que as juntas entre as peças tivessem o mínimo de espessura entre elas. Posteriormente estas juntas passaram a ser seladas com cimento Portland ou com uma mistura de areia e asfalto. O assentamento destas peças é efetuada sobre uma densa camada de areia e as juntas chegam a ter 20mm entre as pedras. Este tipo de pavimento é mais conhecido como paralelepípedos e ainda hoje é empregado em muitas localidades do interior do Brasil. Anterior aos paralelepípedos, os revestimentos denominados de “pé-de-moleque” chegou ao Brasil trazido pelos portugueses no século XVII. Este tipo de revestimento é composto de pedras de formato irregular e medindo até 50cm podem ser vistas em várias cidades históricas brasileiras (MULLER, 2005).

No início do século XIX houveram algumas experiências com pisos confeccionados em madeira com o objetivo de diminuir o barulho que resultava do atrito das rodas de ferro com as pedras que compunham o pavimento. Com o advento do automóvel e das rodas de borracha este tipo de revestimento foi definitivamente abandonado (CRUZ, 2003).

Com o aparecimento dos fornos para a queima no final do século XIX, a argila passou a ser usada na fabricação de tijolos por apresentarem maior desempenho mecânico, os quais eram utilizados também como revestimento nos pavimentos intertravados. Quando adequadamente misturada e queimada apresentavam boa resistência à compressão e ao desgaste. Devido à boa disponibilidade deste material no norte do Brasil, muitas cidades da região fazem uso deste tipo de revestimento nas suas ruas (MULLER, 2005). A Figura 10 mostra pavimentos construídos com paralelepípedos e tijolos cerâmicos.

Figura 10 – Pavimentos no século XVIII – paralelepípedos (a); no século XIX- tijolos cerâmicos (b).



Fonte: MULLER, 2005.

Embora existam registros de pedidos de patentes para fabricação de peças pré-moldadas de concreto para uso em pavimentos intertravados no início do século XX, foi a partir do final da Segunda Guerra Mundial, durante a reconstrução dos países atingidos pelo conflito, que ocorreu um desenvolvimento significativo deste tipo de pavimento principalmente na Holanda e Alemanha. Posteriormente se desenvolveu alguns modelos diferenciados e rapidamente se percebeu as vantagens deste tipo de pavimento tais como, o seu custo mais baixo e a igualdade dimensional facilitando o seu assentamento. Da mesma forma, a evolução de novos desenhos geométricos associados ao tipo de tráfego permitiu que a concepção de intertravamento experimentasse um

grande avanço na tecnologia das peças pré-moldadas de concreto para uso em pavimento intertravado (CRUZ, 2003).

No início da década de 1980 diversos tipos de equipamentos para a sua fabricação eram comercializados indicando a consolidação deste sistema de pavimentação em vários países do mundo. Os equipamentos de alta produtividade para a sua fabricação e a constante evolução tecnológica possibilitou o desenvolvimento de um material versátil, estético e estruturalmente adequado para aplicação em qualquer tipo de ambiente interno ou externo (CRUZ, 2003).

3.4.3 Estrutura do Pavimento Intertravado

As peças pré-moldadas para uso em revestimentos com pisos intertravados são produzidas em diversos tamanhos e formatos e constituídas por vários materiais, sendo as mais utilizadas as fabricadas em concreto. Tendo como características baixo custo, praticidade de assentamento e estética agradável, se evidenciam como uma alternativa de pavimentação atendendo às mais diversas aplicações em espaços como calçadas, estacionamentos, áreas industriais, aeroportos e em arruamentos internos e externos. A Figura 11 mostra a aplicação de pisos intertravados em calçadas.

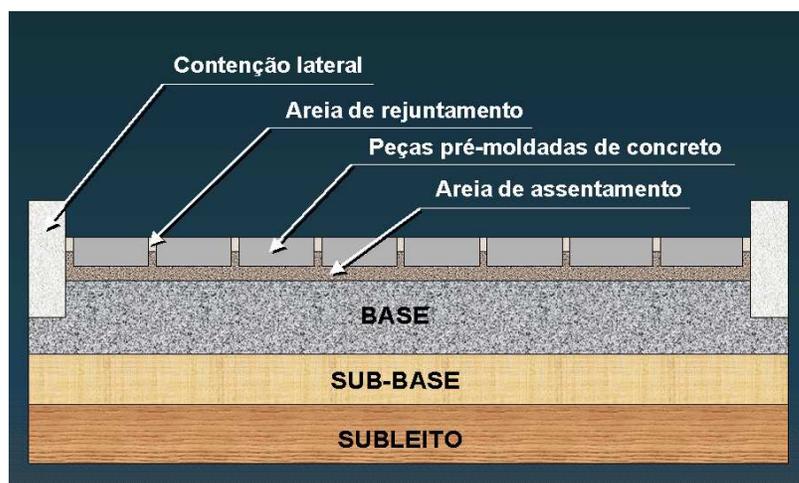
Figura 11 – Pavimento intertravado: calçada em fase de acabamento (a); detalhe de assentamento dos pisos (b).



A camada de rolamento é formada pelas peças pré-moldadas de concreto, compondo um revestimento que além de possuir grande durabilidade e resistência, deve ser capaz de suportar as cargas e tensões decorrentes do tráfego. Este revestimento se encontra assentado sobre uma leve camada de areia, a qual está apoiada sobre uma base constituída de material pouco permeável ou impermeável, cuja função é absorver e distribuir os esforços ao subleito, permitindo melhor estabilidade do material estrutural e impedir eventuais deformações no pavimento (HALLACK, 1998; ABCP, 2002).

Sobre a superfície da camada de revestimento é espalhada areia fina para o preenchimento das juntas que permite o intertravamento das peças pré-moldadas de concreto (MULLER, 2005). A Figura 12 mostra a estrutura típica do pavimento intertravado.

Figura 12 – Composição típica da estrutura do pavimento intertravado.



Fonte: ABCP, 2002.

Em virtude das variadas intensidades das cargas geradas pelo tráfego e dependendo das características mecânicas e dos módulos de elasticidade da base e do leito, o dimensionamento estrutural poderá requerer como reforço, uma camada de sub-base suplementar à base e executada sobre o subleito (CRUZ, 2003).

3.4.4 Intertravamento das Peças Pré-moldadas de Concreto

Intertravamento de um pavimento é a capacidade de resistência aos esforços de deslocamento individual de suas peças seja ele vertical, horizontal, de rotação ou de giração em relação às peças vizinhas do revestimento. O adequado desempenho do pavimento requer que estes tipos de intertravamento operem simultaneamente durante a sua vida útil de serviço.

Para a obtenção de um travamento apropriado ao seu funcionamento, as peças pré-moldadas de concreto necessitam de uma contenção lateral ao longo do pavimento. Um adequado travamento permite às peças pré-moldadas a distribuição das cargas do tráfego para áreas mais extensas das camadas de base, mantendo as tensões no subleito dentro de limites técnicos aceitáveis (HALLACK, 1998).

3.4.4.1 Intertravamento Horizontal

É a capacidade que as peças alcançam de não se deslocarem horizontalmente em relação às outras peças componentes do revestimento. As juntas quando devidamente preenchidas com material adequado, além do formato e o arranjo de assentamento das peças pré-moldadas no revestimento, são os principais responsáveis pelo intertravamento horizontal. A escolha adequada do formato e o correto assentamento das peças pré-moldadas sobre a base de areia propicia a distribuição dos esforços de cisalhamento horizontal (KNAPTON, 1996; ICPI, 2002).

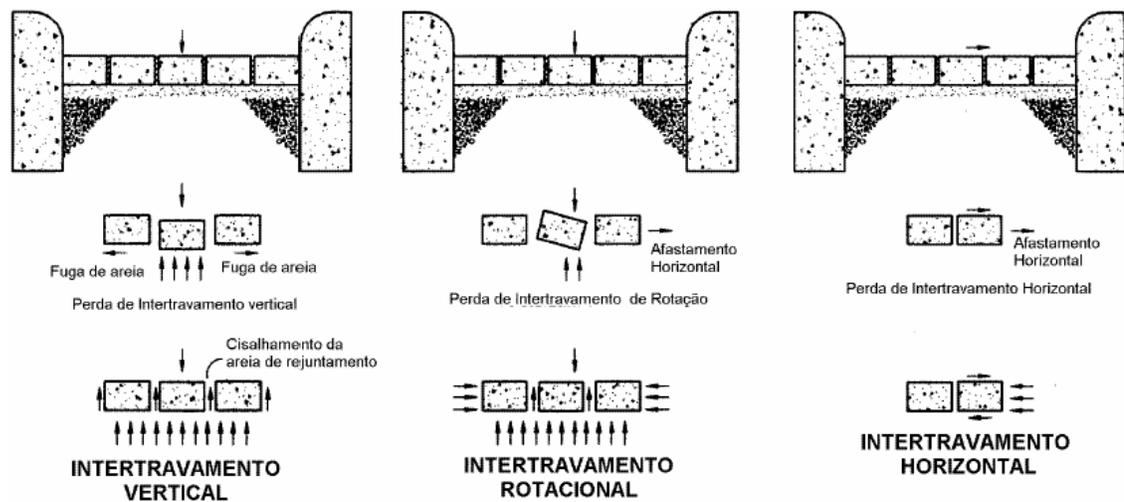
3.4.4.2 Intertravamento Vertical

É a capacidade que as peças alcançam de não se deslocarem verticalmente em relação às outras peças componentes do revestimento. O adequado rejuntamento entre as peças e a capacidade estrutural das camadas inferiores do pavimento favorecem a resistência aos esforços de cisalhamento provocados pelas cargas aplicadas ao revestimento. O formato de encaixes reentrantes das peças é o mais adequado a fim de impossibilitar este tipo de movimento em virtude do contato macho-fêmea do seu desenho, permitindo a distribuição dos esforços às peças vizinhas (KNAPTON, 1996; ICPI, 2002).

3.4.4.3 Intertravamento Rotacional ou Giratório

É a capacidade que as peças pré-moldadas alcançam de não girarem em relação ao seu próprio eixo e em qualquer direção. A largura do rejuntamento e o confinamento promovido pelas peças vizinhas podem contribuir decididamente para a não ocorrência destes movimentos, os quais ocorrem geralmente em áreas de frenagem e aceleração, além de regiões de confinamento lateral realizada de forma não adequada (KNAPTON, 1996; ICPI, 2002). A Figura 13 mostra os tipos de intertravamento das peças pré-moldadas de concreto.

Figura 13 – Tipos de intertravamento das peças pré-moldadas de concreto.



Fonte: Modificado de ICPI, 2004.

3.4.5 Revestimento do Pavimento Intertravado

As peças pré-moldadas de concreto que formam o revestimento ou a camada de rolamento do pavimento intertravado determinam as condições de durabilidade, de conforto do usuário e favorece o sistema estrutural do pavimento absorvendo as cargas oriundas do tráfego e distribuindo as tensões decorrentes para as camadas de base.

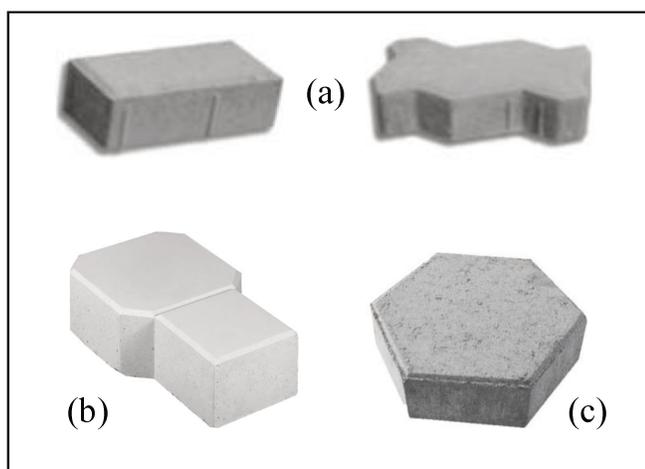
A capacidade de distribuição dos esforços da camada de revestimento depende essencialmente de algumas de suas características como formato, espessura e do desenho ou

modelo de assentamento (HALLACK,1998). Atualmente o mercado dispõe de uma grande variedade de formatos para as peças pré-moldadas de concreto para uso em pisos intertravados. A seguir, destaca-se os formatos típicos destas peças:

- a) Formato retangular reto e retangular angular: peças de concreto segmentadas ou retangulares, geralmente medindo 200 mm de comprimento por 100 mm de largura, podendo ser intercaladas entre si nos quatro lados e assentadas em fileiras, em tramas ou na forma de "espinha-de-peixe". Podem ser carregadas facilmente com apenas uma mão;
- b) Formato "I", em cruz ou raquete: peças com proporções similares às anteriores, podendo ser intercaladas em apenas dois lados e assentadas em fileiras ou tramas. Podem ser carregadas facilmente com apenas uma mão;
- c) Formato arquitetônico: peças de concreto com formatos geométricos característicos como hexágonos, triedros e trapézios e com tamanhos maiores do que as duas categorias anteriores. São assentadas observando-se sempre um mesmo padrão de fileiras. O seu peso e tamanho impossibilita a sua manipulação com apenas uma mão.

A Figura 14 ilustra os formatos típicos de peças pré-moldadas de concreto para uso em pavimentação intertravada.

Figura 14 – Formatos típicos de pisos intertravados



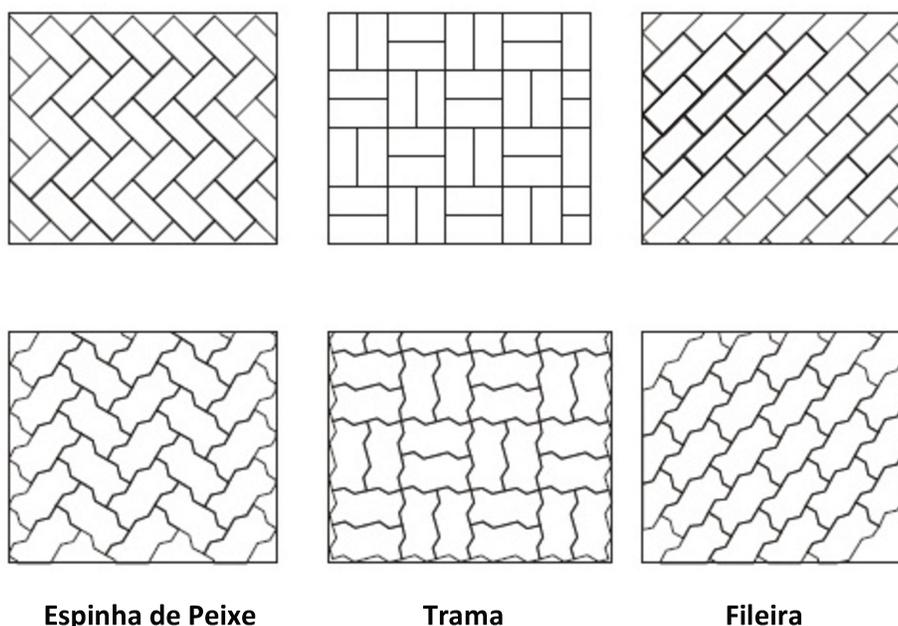
Fonte: Modificado de CRUZ, 2003.

As peças pré-moldadas de concreto são fabricadas com espessuras de 60 mm, 80 mm e 100 mm e a sua utilização está diretamente relacionada com o desempenho estrutural e funcional do pavimento. Ensaio realizados com um simulador de veículos pesados mostraram que as deformações do pavimento foram menores com o uso de peças com 80mm de espessura do que com as peças de 60mm, em um mesmo nível de solicitação (MULLER, 2005).

3.4.6 Assentamento das peças pré-moldadas de concreto

O modelo de assentamento das peças pré-moldadas de concreto influencia tanto na aparência estética quanto no desempenho do pavimento. Em áreas de tráfego veicular, é recomendável o uso do tipo "espinha-de-peixe" devido a este modelo de assentamento proporcionar níveis maiores de travamento e melhor desempenho estrutural (ICPI, 2002). A Figura 15 mostra os modelos de assentamentos mais utilizados em pavimentos intertravados.

Figura 15 – Modelos típicos de assentamento em pavimentação intertravada.



Espinha de Peixe

Trama

Fileira

Fonte: CRUZ, 2003.

As características de qualidade da areia na camada de assentamento e no rejuntamento das peças pré-moldadas de concreto são de fundamental importância no desempenho estrutural do pavimento intertravado. Este estrato faz a ligação entre as peças pré-moldadas e a camada de base, atuando como uma barreira de proteção à propagação de fissuras às camadas inferiores do pavimento.

A espessura, granulometria e as formas dos grãos da camada de assentamento estão intrinsecamente relacionados ao comportamento estrutural do pavimento. Após a compactação a espessura mínima recomendada é de 15mm podendo atingir até 40mm dependendo do tipo de peça utilizada. É recomendado a utilização de grãos angulares por possuírem maior coeficiente de atrito permitindo uma melhor distribuição dos esforços (CRUZ, 2003 apud SHACKEL, 1990).

A existência de silte e argila na areia de assentamento permite a presença de partículas com diâmetro abaixo de 75 μ m provocando perda de rejuntamento e desnível entre as peças. Além disto, a correta metodologia de execução desta camada contribui para o desempenho final do pavimento (CRUZ, 2003 apud SHACKEL, 1990).

3.4.7 Normatização Técnica do Pavimento Intertravado

As normas atuais existentes no mundo originaram-se de experiências de países europeus como Alemanha, Holanda, Bélgica e França, os quais destacam-se pela tradição no emprego de pisos intertravados. A grande demanda por este tipo de pavimentação a partir da década de 1970 permitiu que América do Norte, Canadá, Austrália, Japão e África do Sul começassem a desenvolver tecnologia para este tipo de pavimentação. A Alemanha desenvolveu as primeiras vibroprensas para fabricação das peças pré-moldadas de concreto em larga escala, permitindo a obtenção de peças de excelente resistência mecânica e controle dimensional (CRUZ, 2003).

O enorme crescimento da produção de pisos intertravados registrado na última década motivou a maioria destes países a promoverem sucessivas revisões nos seus processos normativos na busca de um consenso internacional quanto às técnicas construtivas e à avaliação do desempenho dos pisos intertravados. As normas nacionais e internacionais estabelecem características consideradas importantes para o controle na fabricação das peças pré-moldadas de concreto e para a execução do pavimento intertravado visando estabelecer padrões de qualidade a fim de garantir o desempenho final do pavimento (CRUZ, 2003).

Um aspecto importante é a especificação dos tipos de materiais que podem ser utilizados na fabricação e execução do pavimento intertravado. O tipo de cimento, agregados miúdos e graúdos, aditivos, pigmentos e água normalmente seguem as mesmas especificações relativas ao concreto, sendo usadas as normas nacionais de cada país (CRUZ, 2003 apud SHACKEL, 1990).

O dimensionamento das peças pré-moldadas é outra característica fundamental, pois permite o perfeito alinhamento horizontal da camada de revestimento. Na maioria das normatizações existentes são toleradas variações 2,0 a 3,0 mm para comprimento e largura enquanto que para altura a tolerância é de 2,0 a 5,0 mm (CRUZ, 2003).

A resistência mecânica das peças pré-moldadas de concreto é um dos principais parâmetros de qualidade requeridos nas normas técnicas existentes. A maioria das especificações mundiais determinam que as peças pré-moldadas de concreto devem apresentar resistência à compressão igual ou maior que 40 MPa a fim de garantir capacidade suficiente para resistir aos vários níveis de cargas decorrentes do tráfego. Na avaliação da resistência mecânica das peças pré-moldadas de concreto não existe consenso internacional acerca dos métodos de ensaios e tipos de equipamentos utilizados (CRUZ, 2003).

As especificações internacionais quanto à durabilidade são norteadas pelas condições climáticas incluindo ou não resistência aos ciclos de gelo e degelo. Em alguns países europeus considera-se que o controle de durabilidade das peças pré-moldadas de concreto pode ser efetuado pelo fator água/cimento e pelas resistências à compressão e à flexão.

A aparência estética das peças pré-moldadas de concreto é um atributo essencial na pavimentação intertravada. Embora seja uma característica importante devido às imposições do mercado consumidor, não se observa nas normas técnicas nenhuma referência a este tipo de controle. São discriminados a seguir parâmetros e especificações recomendadas pelas normas nacional e internacionais.

3.4.7.1 Norma Técnica Brasileira

No Brasil, a produção de peças pré-moldadas de concreto para uso em pisos intertravados e a sua execução estão baseadas em duas normas editadas pela ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. São elas :

NBR 9781/2013 – Peças de Concreto para Pavimentação - Especificação e Métodos de Ensaio (ABNT, 2013)

NBR 15953/2011 - Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução (ABNT, 2011b)

A NBR 9781/2013 (ABNT, 2013) estabelece a metodologia de ensaios e os requisitos técnicos exigíveis para a aceitação das peças pré-moldadas de concreto destinadas ao revestimento de pavimentação intertravada para o tráfego de pedestres, de veículos dotados de pneumáticos e áreas de armazenamento de produtos. Esta norma especifica o piso como peça pré-moldada de formato geométrico regular, com comprimento máximo de 400 mm, largura mínima de 100 mm e altura mínima de 60 mm. A Tabela 2 mostra os requisitos técnicos para a produção de peças pré-moldadas para pisos intertravados.

Tabela 2 – Requisitos técnicos para a produção de peças pré-moldadas para pavimentação intertravada conforme a NBR 9781/2013 (ABNT, 2013).

| Requisitos Físicos | | Limites Admissíveis |
|--------------------------------------|------------------|-------------------------------|
| Tolerância Dimensional (mm) | Comprimento (mm) | ± 3,0 |
| | Largura (mm) | ± 3,0 |
| | Altura (mm) | ± 5,0 |
| Resistência à Compressão (MPa) | I | ≥ 35,0 Veículos Comerciais |
| | II | ≥ 50,0 Veículos Especiais |

Fonte: NBR 9781/2013 (ABNT, 2013).

A norma especifica a metodologia para a determinação da resistência à compressão de peças pré-moldadas de concreto destinadas ao revestimento de pavimentação de vias urbanas, pátios de estacionamento ou similares. No ensaio de resistência à compressão axial, a norma determina que o carregamento das peças pré-moldadas de concreto seja realizado com o auxílio de dois cilindros de aço, ambos com diâmetro de $90 \pm 0,5$ mm de maneira que seus eixos verticais fiquem perfeitamente alinhados.

No momento do ensaio, as peças representativas do lote amostrado devem estar saturadas de água e suas superfícies de carregamento devidamente capeadas.

O resultado do ensaio de resistência à compressão (MPa) da peça pré-moldada é obtida dividindo-se a carga de ruptura (N) pela área de carregamento (mm²), multiplicando-se o resultado pelo fator “p”, função da altura da peça. A Tabela 3 mostra os fatores multiplicativos de acordo com a altura nominal das peças pré-moldadas de concreto.

Tabela 3 – Fator multiplicativo de correção da resistência à compressão.

| Altura nominal da peça (mm) | Fator multiplicativo “p” |
|-----------------------------|--------------------------|
| 60 | 0,95 |
| 80 | 1,00 |
| 100 | 1,05 |

Fonte: NBR 9781/1987 (ABNT, 1987b).

A recente norma NBR 15953/2011 (ABNT, 2011b) estabelece as diretrizes de execução de pavimentos com revestimento intertravado destinado ao tráfego de pedestres, áreas de armazenamento de produtos e ao tráfego de veículos dotados de pneumáticos.

A norma prevê atribuições de responsabilidade na execução do pavimento delineando os atributos mínimos de todos os envolvidos na obra como contratante, projetista, fiscalização, fornecedor de peças e executor. O executor tem a responsabilidade do atendimento das especificações da norma e do projeto, além da avaliação e a aceitação das peças de concreto, assim como a utilização de equipamentos e ferramentas apropriados.

As especificações da norma NBR 15953/2011 (ABNT, 2011b) permitem a qualidade final do pavimento servindo de referência para que organismos públicos realizem licitações para o uso de peças pré-moldadas de concreto para pisos intertravados.

A Prefeitura Municipal de São Paulo, considerando que a pavimentação urbana com revestimento em blocos pré-moldados de concreto de cimento Portland representa uma versão moderna e alternativa de pavimento, editou em 1999 a IP-06 – Instrução para Dimensionamento de Pavimentos de Blocos Intertravados de Concreto, com o objetivo de orientar e padronizar os procedimentos técnicos para a sua execução. Baseada nas normas brasileiras recomenda que as

peças pré-moldadas possuam espessuras de 60 mm para veículos leves, 80mm para veículos comerciais e 100 mm para veículos especiais.

A norma técnica NBR 9781 (ABNT, 2013), contempla os ensaios de absorção de água como requisito de durabilidade, conforme foi realizado neste trabalho.

3.4.7.2 Norma Técnica Européia

Elaborada pelo CEN - European Committee for Standardization a norma técnica BS EM-1388/2003 - Concrete paving blocks requirements and test methods, se apresenta dividida em três partes: definições gerais e requisitos de materiais e produtos fabricados, avaliação da conformidade dos produtos produzidos e oito anexos da metodologia de ensaios. Diferentemente da norma técnica brasileira, a resistência mecânica é medida pelo ensaio de tração indireta utilizado para corpos de prova cilíndricos. A Tabela 4 mostra os ensaios constantes da norma e os respectivos limites requeridos.

Tabela 4 – Parâmetros técnicos utilizados na norma europeia BS EM-1388/2003.

| Tipo de requisito | | Limites aceitáveis | | |
|--|----------------|---|---------|--------|
| Resistência a ciclos de gelo-degelo | | Média de 3 resultados < 1,0 kg/m ² e nenhum resultado individual > 1,5 kg/m ² | | |
| Absorção | | < 6,0 % | | |
| Resistência à tração por compressão | | Nenhum resultado individual < 3,6 MPa e a carga de ruptura < 250 N/mm | | |
| Resistência à abrasão (*disco de Bohme) (**disco de Desgaste Metálico) | | ≤ 20 cm ³ /50 cm ² (*) ≤ 23 mm (**) | | |
| Resistência a frenagem | | < 45 | | |
| Aspectos visuais | | Não deve apresentar fissuras ou quebras | | |
| Tolerância dimensional (mm) | Altura da peça | Comprimento | Largura | Altura |
| | < 100 | ± 2 | ± 2 | ± 3 |
| | > 100 | ± 3 | ± 3 | ± 3 |

Fonte: FIORITI, AKASAKI e INO, 2007.

3.4.7.3 Normas Técnicas Americana e Canadense

No início da década de 1990, com a necessidade da criação de normas de dimensionamento e especificações gerais para a produção de peças pré-moldadas de concreto para uso em pisos intertravados nos EUA, o ICPI - Interlocking Concrete Pavement Institute, entre outros institutos de pesquisa, desenvolveu estudos para a regulamentação de métodos com este objetivo. Baseado nestes estudos, foram realizadas revisões na normalização de fabricação e controle das peças pré-moldadas de concreto na norma técnica americana ASTM C936/1996 - Standard specification for solid concrete interlocking paving units e na norma técnica canadense CSA A23.2/1995- Precast concrete pavers. A norma americana estabelece que a resistência mecânica das peças pré-moldadas de concreto seja igual ou superior a 50 MPa e a absorção de água seja igual ou menor a 7%. A

norma canadense determina que a resistência mecânica seja igual ou superior a 45 MPa, não contemplando ensaios de absorção de água em sua normatização (FIORITI, AKASAKI e INO, 2007).

3.4.7.4 Normas Técnicas Africana e Australiana

Na África do Sul a norma técnica SANS 1058/2009 determina que para os ensaios de compressão, a resistência mecânica das peças pré-moldadas de concreto seja igual ou superior a 25 MPa para veículos leves e de 35 MPa para veículos pesados. Em 2010 foi realizada uma revisão nesta norma e acrescentados testes de tração, abrasão e absorção de água com o objetivo de uma melhor qualidade do pavimento. A norma técnica australiana AS/NZS 4456.4/2003 determina que para os ensaios de compressão, os valores mínimos exigidos para a resistência mecânica das peças pré-moldadas seja de 25 MPa para veículos leves e de 60 MPa para veículos especiais. Para revestimento em ciclovias e estacionamentos, a norma especifica o valor de 15 MPa para o ensaio de resistência à compressão (FIORITI, AKASAKI e INO, 2007).

3.5 Concreto

3.5.1 Aspectos gerais do concreto

O concreto de cimento Portland é o material mais largamente utilizado na construção civil e é resultante da mistura em proporções adequadas de um aglomerante hidráulico, o cimento, com os agregados naturais ou reciclados e água. Eventualmente, em determinadas condições, pode-se incorporar à mistura, aditivos e adições minerais. A reação dos componentes do cimento quando misturado com a água formam uma pasta com propriedades de endurecimento, que adicionada às partículas dos agregados converte-se em um material com grande resistência mecânica (FONSECA, 2010 apud COUTINHO, 1997).

As constantes pesquisas acerca das propriedades físico-químicas do concreto e sua evolução tecnológica nas últimas décadas, permitem o seu uso em vários campos da construção civil. As suas diversas formas de aplicação fazem com que se torne um material versátil, resistente e durável, sendo utilizado em ambientes extremamente agressivos.

De acordo com Metha e Monteiro (2008), o concreto pode ser classificado conforme o seu desempenho mecânico:

- a) Concreto de baixa resistência: compressão menor que 20 MPa;
- b) Concreto de média resistência: compressão entre 20 a 40 MPa;
- c) Concreto de alta resistência: compressão superior a 40 MPa.

A norma NBR 12655/2006 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento (ABNT, 2006) define como concreto de alta resistência a mistura com resistência à compressão superior a 50 MPa. A Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem do Brasil – ABESC classifica a mistura do concreto conforme suas características e necessidades de aplicação na obra, conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5: Principais tipos de concreto dosado em central e suas características

| Tipo | Aplicação |
|--------------------------|---|
| Rolado | Barragens e pavimentação rodoviária e urbana |
| Bombeável | De uso corrente em obras de difícil acesso |
| Resfriado | Peças de elevado volume como bases ou blocos de fundações |
| Projetado | Reparo ou reforço estrutural, revestimento de túneis, monumentos, contenção de taludes, canais e galerias |
| Alta Resistência Inicial | Estruturas convencionais ou protendidas e pré-fabricados |
| Fluido | Concretagens de difícil acesso para a vibração |
| Pesado | Uso em lastros, barreiras à radiação e lajes de subpressão |
| Leve | Uso corrente em vedações e nivelamento de pisos |
| Pavimentos Rígidos | Pavimentos rodoviários e urbanos, pisos industriais e pátios de estocagem |
| Alto Desempenho | Elevada resistência para pré-fabricados e peças protendidas |
| Convencional | Uso corrente na construção civil (a partir de 20 MPa) |
| Submerso | Plataformas marítimas |

Fonte: Modificada de ABESC, 2007.

Os investimentos acerca do seu desenvolvimento tecnológico propiciaram a criação de vários tipos de concreto, utilizando uma enorme gama de cimentos, agregados, adições, aditivos e formas de aplicação. O concreto é encontrado na fundação de plataformas petrolíferas oceânicas ou enterrado a centenas de metros abaixo da terra em fundações, túneis e minas e a centenas de metros acima do solo em edificações (KAEFER, 1998).

Atualmente os grandes desafios tecnológicos da indústria do concreto são aumentar a durabilidade das estruturas, recuperar as estruturas danificadas e entender cada vez mais o

complexo mecanismo químico e mecânico de suas propriedades. Além disto, pesquisas inovadoras (JANKOVIC, 2012; BITTENCOURT, 2011; CABRAL et al., 2010; GUERRA, 2009) acerca da incorporação de resíduos na composição do concreto na produção de novos materiais visam buscar a sua sustentabilidade.

3.5.2 Composição e Estrutura do Concreto

Na composição do concreto, a hidratação do cimento produz uma matriz constituída por diversas fases mineralógicas associadas a uma estrutura de vazios que na presença de partículas de agregados miúdos e graúdos, forma um material contínuo e estruturalmente estável.

De acordo com Metha e Monteiro (2008), o concreto possui uma estrutura altamente complexa e heterogênea e as suas propriedades físico-químicas e mecânicas, as quais condicionam o seu emprego, dependem dos três constituintes de sua microestrutura: a pasta de cimento hidratada, o agregado e a zona de transição na interface entre a pasta de cimento e o agregado. Assim, o concreto é entendido como um material constituído de partículas de agregado envolvidos por uma matriz de pasta de cimento, com uma zona de transição entre elas e cuja relação entre estas três fases tem importância fundamental nas suas propriedades. O estudo de sua microestrutura permite identificar os mecanismos responsáveis pela resistência, estabilidade dimensional e durabilidade das misturas e através do controle da estrutura do concreto, as suas propriedades podem ser modificadas a fim de se obter um desempenho específico para determinada aplicação.

O comportamento do concreto quando submetido a esforços pode ser explicado quando a interface pasta-agregado ou zona de transição é analisada separadamente. A zona de transição é uma região de maior porosidade e constituída de uma fina camada de água, formada ao redor do agregado de modo a enfraquecer a ligação com a pasta. Esta região é considerada a fase mais fraca na resistência do concreto e a sua presença ocasiona a ruptura do material a baixo nível de tensão (METHA e MONTEIRO, 2008).

A matriz ou pasta de cimento hidratada é constituída pela zona de transição e pela própria pasta de cimento. A pasta de cimento hidratada se dá quando este aglomerante é submetido à presença de água e o sulfato e demais compostos de cálcio entram em solução, originando após algum tempo, cristais de trissulfoaluminato de cálcio conhecidos como etringita. Posteriormente, cristais de hidróxido de cálcio e de silicatos de cálcio hidratado começam a preencher os vazios

ocupados anteriormente pela água e partículas de cimento em dissolução e dando início ao processo de endurecimento do concreto.

Segundo Metha e Monteiro (2008), o processo de hidratação do cimento que dá origem a matriz, resulta em três elementos principais e que caracterizam a pasta de cimento endurecida:

- a) Silicato de cálcio hidratado (C-S-H): representa de 50 a 60% do volume de sólidos presentes na pasta de cimento e é responsável pela resistência da mistura a esforços mecânicos.
- b) Hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$): ocupa de 20 a 25% do volume de sólidos na pasta e não tem significativa contribuição na resistência mecânica da mistura.
- c) Sulfoaluminatos de cálcio: constitui de 15 a 20% do volume de sólidos presentes na pasta e seus principais compostos são a etringita e o monossulfato de cálcio.

A resistência da pasta está diretamente relacionada com sua porosidade, uma vez que a mesma apresenta em sua composição variados tipo de vazios, dentre os quais, o mais significativos são os poros de ar incorporados que, por suas grandes dimensões reduzem de forma significativa a resistência do concreto. A fase agregado é a principal responsável pelo módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto. As características físicas do agregado, tais como volume, tamanho e porosidade, além da forma e textura, influenciam as propriedades do concreto (METHA e MONTEIRO, 2008).

A dimensão e a forma do agregado gráudo podem influenciar indiretamente o seu desempenho mecânico. Quanto maior o tamanho do agregado e quanto maior a proporção de partículas alongadas e achatadas no concreto, maior será a probabilidade de acúmulo de filme de água junto à superfície do agregado enfraquecendo a zona de transição na interface pasta-agregado (METHA e MONTEIRO, 2008).

3. 5.3 Propriedades do Concreto

O concreto de cimento Portland apresenta diversas propriedades, as quais devem ser analisadas em seus estados fresco e endurecido. O tempo decorrido desde o início da mistura até o começo da pega do aglomerante, entende-se como concreto fresco que compreende as fases de

mistura, compactação e acabamento. As principais características para que estas etapas se efetuem adequadamente é a trabalhabilidade e a consistência da mistura. A trabalhabilidade da mistura permite a facilidade de utilização e manuseio do concreto sem que este perca a sua homogeneidade, proporcionando um bom adensamento da massa no processo de compactação, eliminando a existência de vazios (KOVLER e ROUSSEL, 2011).

A consistência da massa consiste em um maior ou menor grau de fluidez da mistura em seu estado fresco, proporcionando a mobilidade da massa e permitindo facilidade em ser moldado (KOVLER e ROUSSEL, 2011).

Como as principais características do concreto em seu estado de endurecimento, pode-se citar a resistência à esforços mecânicos e à durabilidade. A resistência mecânica do concreto consiste em sua capacidade de resistir às condições de carga a que esteja submetido, destacando-se a resistência à compressão axial. O processo de endurecimento do concreto pode levar até dois anos, podendo atingir já na idade de 28 dias até 90% de sua resistência mecânica (METHA e MONTEIRO, 2008).

Durabilidade é a capacidade que o concreto possui de resistir a qualquer tipo de deterioração física ou química ao longo do tempo. A durabilidade está intimamente ligada a impermeabilidade do concreto, fator este que impede o acesso de agentes agressivos.

Desta forma, na definição do uso do concreto, é fundamental a cuidadosa análise da dosagem da mistura. Para ter-se um concreto com as características desejadas, tanto no seu estado fresco como no estado endurecido, é necessário que a dosagem do concreto seja bem elaborada e que todos os cuidados de seleção dos materiais, preparação da mistura e o processo de cura sejam efetuados adequadamente (KOVLER e ROUSSEL, 2011).

3.6 Cimento

3.6.1 Fabricação, Tipos e Classes do Cimento Portland

Os materiais com propriedades cimentíceas já eram largamente utilizados pelos povos egípcios e gregos em suas construções. Na construção das pirâmides os egípcios usavam argamassas a base de gesso e os povos gregos introduziram o calcário nas misturas. Posteriormente, os romanos passaram a produzir misturas com a adição de cinzas vulcânicas juntamente com argila e cal, dando origem a uma massa de maior durabilidade.

No século XVIII registra-se avanços significativos na tecnologia do cimento a partir de experimentos de Smeaton e Vicat. Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin desenvolve uma mistura de calcário calcinado e argila em forma de um pó fino que quando seco tornava-se tão dura quanto às pedras utilizadas nas construções. Este produto recebeu o nome de cimento Portland por apresentar semelhanças às rochas existentes na ilha de Portland na Inglaterra (KAEFER, 1998).

O cimento é um produto largamente utilizado na construção civil como constituinte na produção de argamassas e concreto tendo em sua constituição silicatos e aluminatos de cálcio que ao serem misturados com água, endurece devido as suas propriedades aglomerantes e adquire elevada resistência mecânica. O cimento é resultante da operação de moagem e mistura de calcário e argila em determinadas proporções e aquecido em fornos à temperatura aproximada de 1.400 °C para a obtenção do clínquer. Com a adição de gesso em pequenas proporções, tem-se o cimento Portland na forma de pó fino e na cor cinza (GIAMMUSSO, 1992).

Com o desenvolvimento técnico acerca do assunto, foram sendo desenvolvidos vários tipos de misturas, resultando em cimentos com características e propriedades específicas para uso em argamassas e concreto.

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), o mercado brasileiro oferece vários tipos de cimento. O cimento Portland comum (CP I) é a referência. Os diferentes tipos se diferenciam de acordo com a proporção de adições incorporadas ao clínquer no momento da moagem. A Tabela 6 apresenta os principais tipos de cimento.

Tabela 6: Principais tipos de cimento.

| Tipos de Cimento | Adições | Siglas |
|---|--|------------|
| Cimento Portland Comum | Escória, pozolana ou filler (até 5%) | CP I-S 32 |
| | | CP I-S 40 |
| Cimento Portland Composto | Escória (6 – 34%) | CP II-E 32 |
| | | CP II-E 40 |
| | Pozolana (6 – 14%) | CP II-Z 32 |
| | Filler (6 -10%) | CP II-F 32 |
| CP II-F 40 | | |
| Cimento Portland Alto Forno | Escória (35 – 70%) | CP III 32 |
| | | CP III 40 |
| Cimento Portland Pozolânico | Pozolana (15 – 50%) | CP IV 32 |
| Cimento Portlande de Alta Resistência Inicial | Materiais Carbonáticos (até 5%) | CP V-ARI |
| Cimento Portland Resistente a Sulfatos | Estes cimentos são designados pela sigla RS Ex: CP III 40-RS, CP V-ARI-RS | |

Fonte: Modificado ABCP, 2002.

Segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2011), as vendas de cimento, insumo básico do setor de construção e principal componente de argamassas e concretos, devem alcançar no ano de 2011 a marca de 67 milhões de toneladas, devendo chegar em 2016 a ultrapassar os 100 milhões de toneladas.

3.6.2 Propriedades do Cimento Portland

Segundo Neville (1997), o nome Portland no cimento é usado para definir um produto obtido da mistura em proporções adequadas de materiais argilosos e calcários e demais compostos como sílica, óxidos de ferro e aluminas que quando aquecidos originam o clínquer, principal

componente no processo de fabricação do cimento. Durante a produção do clínquer, formam-se os aluminatos e silicatos, elementos determinantes nos processos da resistência mecânica, porosidade, calor de hidratação e em várias outras propriedades do cimento.

Em sua composição química, o cimento Portland é formado basicamente pelos seguintes elementos: aluminato tricálcico (C_3A), silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). Com a evolução dos conhecimentos técnicos acerca do cimento, outros materiais foram sendo incorporados em sua composição. Esta prática proporcionou cimentos com melhor desempenho e com custos reduzidos (COUTINHO, 1997).

3.6.3 Processo de Hidratação do Cimento Portland

A reação química do cimento com a água, conhecida como hidratação, transforma o cimento Portland anidro em um produto ligante e com características de endurecimento. Na presença de água, os silicatos e os aluminatos, presentes no cimento, formam produtos de hidratação que com o transcorrer do tempo dão origem a uma massa coesa e resistente.

Os aluminatos presentes na composição do cimento são responsáveis pelo endurecimento da pasta, pois hidratam de forma mais rápida que os silicatos. Já os silicatos, que estão presentes na ordem de 75% no cimento Portland determinam o desenvolvimento da resistência mecânica.

A reação dos aluminatos (C_3A) com a água é imediata e por isto há a necessidade da adição de sulfatos (gipsita) a fim de retardar a reação. Esta reatividade origina a formação de etringita que é responsável pelo fenômeno da pega e pela resistência inicial da mistura. A hidratação dos silicatos ocorre algumas horas após o início da hidratação do cimento originando compostos que preenchem os espaços ocupados pela água, os quais determinam a resistência da pasta a esforços mecânicos (METHA e MONTEIRO, 2008).

3.7 Agregados

O agregado é um componente geralmente inerte, resistente, constituído por partículas que devem ser cimentadas entre si pela pasta e em virtude de não determinar reações complexas na presença da água, normalmente é considerado como um material de enchimento no concreto. No entanto, a sua contribuição na pasta, além de favorecer muitas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, pode influenciar na redução da retração e no aumento da resistência do concreto a esforços mecânicos (METHA e MONTEIRO, 2008).

Os agregados possuem características importantes para a tecnologia do concreto, as quais incluem porosidade, absorção de água, composição granulométrica, forma e textura, resistência à compressão, módulo de elasticidade e os tipos de substâncias deletérias presentes nas partículas (METHA e MONTEIRO, 2008).

Areias, cascalhos e pedras britadas são os principais tipos de agregados podendo ocupar entre 60% e 80% do volume total do concreto proporcionando assim grande redução de custo. Desta forma, no desenvolvimento da tecnologia do concreto, torna-se natural o aumento da quantidade do agregado em função do seu menor custo em relação ao cimento (METHA e MONTEIRO, 2008).

3.7.1 Classificação dos Agregados

Os agregados podem ser classificados, de acordo com a origem, em minerais naturais e artificiais. São considerados agregados naturais areia, pedregulho e pedra britada procedentes de jazidas naturais. Os materiais termicamente processados como a argila e os rejeitos industriais como a escória de alto-forno e cinzas volantes são considerados agregados artificiais. Materiais residuais podem também ser reaproveitados em substituição aos agregados naturais na composição do concreto. Os agregados minerais naturais constituem a classe mais importante de agregados para a produção de concreto de cimento Portland. Suas características são determinadas pela composição mineralógica da rocha matriz, das condições de exposição às quais a rocha foi submetida antes de gerar o agregado e dos tipos de operação e equipamentos utilizados para a produção do agregado (METHA e MONTEIRO, 2008).

Os agregados podem ser classificados também de acordo com o tamanho, em agregados miúdos e agregados graúdos. O agregado graúdo é constituído por partículas maiores que 4,75

mm, retidas na peneira nº 4 e o agregado miúdo é composto por partículas que passam pela peneira # 4,75 mm (METHA e MONTEIRO, 2008).

No Brasil, a areia de sílica natural é muito utilizada como agregado miúdo, enquanto que a pedra britada é mais comumente utilizada como agregado graúdo. Porém, novos materiais ou materiais reciclados estão sendo utilizados para a produção de concreto. Resíduos industriais ou de construção civil estão sendo pesquisados e os resultados mostram que há uma forte perspectiva desses materiais serem empregados como agregados na produção de concretos (SOUZA, 2007).

Outra classificação é de acordo com a massa específica, podendo o agregado ser leve, médio ou pesado. Esta classificação é importante para a produção de concretos especiais, como concretos leves, utilizados para produção de blocos para isolamento térmico, ou concreto pesado, cuja principal aplicação está na indústria da energia atômica. Habitualmente se utiliza agregados com massa específica média por serem os mais abundantemente encontrados na natureza (SOUZA, 2007).

3.7.2 Granulometria dos Agregados

A análise granulométrica divide a amostra do agregado em frações de partículas de mesma dimensão, as quais são definidas por aberturas de peneiras padronizadas, cujo objetivo é avaliar a constância das dimensões das partículas. Para a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, a distribuição adequada das partículas dos agregados é um fator importante (GIAMMUSSO, 1992).

A determinação das dimensões e da distribuição das partículas e sua distribuição são realizadas por peneiras com aberturas padronizadas divididas em quatro séries de aberturas crescentes geometricamente. A partir do ensaio de peneiramento são obtidos os valores acumulados retidos ou passantes em cada peneira, determinando a curva granulométrica do agregado (SOUZA, 2007).

3.7.3 Propriedade dos Agregados

As características dos agregados são determinam as diversas propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido. A porosidade e a composição mineralógica da rocha matriz afeta a

resistência mecânica e elasticidade do agregado e influencia diretamente nas propriedades do concreto.

Outra importante propriedade do agregado é a sua capacidade de resistência à abrasão onde é medido o desgaste superficial do material. A capacidade de resistência ao atrito é uma característica importante quando se trata do concreto aplicado em pavimentação.

A condição de porosidade dos agregados é outro fator importante nas propriedades do concreto. A absorção de água do agregado na ocasião da mistura irá determinar a trabalhabilidade do concreto e poderá influenciar na sua resistência mecânica e durabilidade. Além disto, agregados muito permeáveis podem absorver água da hidratação do cimento e comprometer a qualidade da mistura (METHA e MONTEIRO, 2008).

A forma geométrica e a textura superficial das partículas do agregado são fatores importantes na composição da mistura. A forma e a textura das partículas dos agregados influenciam mais as propriedades do concreto no estado fresco do que no estado endurecido. Quanto à forma geométrica, as partículas do agregado podem ser arredondadas, angulosas, achatadas ou alongadas. As texturas superficiais do agregado podem ser lisas ou ásperas. Uma textura mais áspera parece favorecer a formação de uma aderência mais forte entre a pasta de cimento e o agregado determinando uma maior resistência mecânica do concreto nas primeiras idades. Nas idades mais avançadas ocorre uma forte aderência química entre o agregado e a pasta de cimento (METHA e MONTEIRO, 2008).

3.8 Aditivos

Aditivos são produtos químicos que, adicionados em pequenas proporções ao concreto, modificam algumas de suas características a fim de proporcionar uma melhor adequação às condições pretendidas. Muito utilizado atualmente na composição de argamassas e concretos, os aditivos já são considerados o quarto elemento na mistura além do cimento, dos agregados e da água (GIAMMUSO, 1991).

3.8.1 Aplicação dos Aditivos

Os aditivos são indicados quando é necessário modificar ou proporcionar certas propriedades da argamassa ou do concreto a fim de se obter melhor qualidade e durabilidade e conferindo maior plasticidade, resistência e impermeabilidade à mistura (SOUZA, 2007).

O uso de aditivos na produção de matrizes cimentícias resulta em vários benefícios:

- a) melhora a coesão do concreto fresco;
- b) aumenta a resistência mecânica;
- c) melhora a trabalhabilidade;
- d) aumenta a durabilidade;
- e) retardam ou aceleram a pega;
- f) proporciona a obtenção de concretos auto-adensantes

3.8.2 Classificação dos Aditivos

Os aditivos são classificados de acordo com a sua atuação no concreto. São produzidos atualmente vários tipos de aditivos para concreto de cimento Portland, sendo os mais usados os plastificantes, os aceleradores e os retardadores. A função dos aditivos plastificantes consiste em melhorar a plasticidade da mistura possibilitando a redução da quantidade de água e influenciando na resistência dos concretos e argamassas. O aditivo acelerador reduz o tempo de início e fim de pega do concreto, bem como acelera o desenvolvimento das resistências iniciais da mistura. A função do aditivo retardador é aumentar o tempo de pega da mistura a fim de que seja possível realizar operações de trabalho com o concreto. Os aditivos devem ser usados de acordo com as especificações do fabricante a fim de que não comprometa a qualidade dos concretos e argamassas (GIAMMUSSO, 1992).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Programa Experimental

Com o intuito de alcançar os objetivos propostos neste estudo, foi desenvolvido um planejamento experimental a fim de avaliar o comportamento do concreto com a incorporação parcial de resíduos da retífica de placas cerâmicas de revestimento em substituição a areia e ao cimento, destinado à produção de peças pré-moldadas para pisos intertravados. Desta forma, foram determinados os parâmetros e as etapas de procedimentos de modo que, fundamentado nos ensaios realizados, possibilitem avaliar a utilização do resíduo objeto deste estudo.

O trabalho incluiu as seguintes etapas de procedimentos:

- a) acompanhamento do processo industrial de retífica das placas cerâmicas de revestimento;
- b) identificação dos resíduos gerados no processo de retífica de placas cerâmicas de revestimento;
- c) amostragem dos resíduos (coleta, transporte e armazenamento);
- d) consulta às normas técnicas nacionais;
- e) preparo e caracterização dos resíduos e dos demais materiais;
- f) produção de pisos intertravados em escala laboratorial contendo diferentes concentrações dos resíduos cerâmicos;
- g) ensaios para avaliação do desempenho mecânico e de durabilidade, de acordo com as exigências técnicas nacionais.

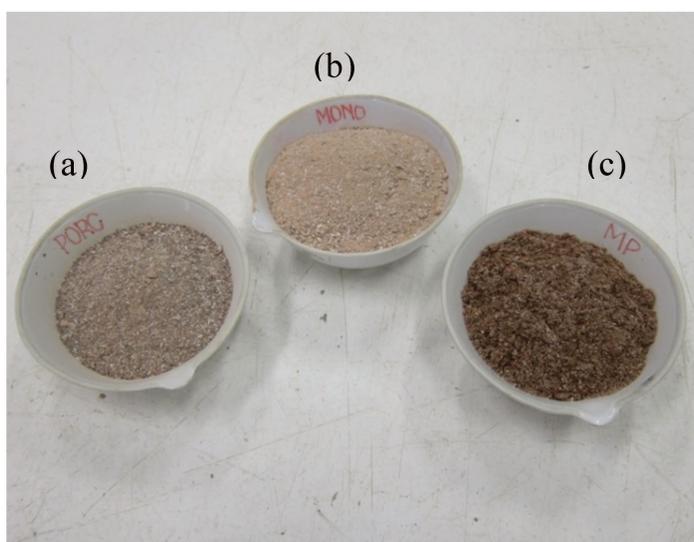
Com o objetivo de obter as informações necessárias para o desenvolvimento deste estudo, foi realizado o acompanhamento do processo de retífica das placas cerâmicas em uma indústria de revestimentos cerâmicos localizada no município de Limeira com o objetivo de responder as questões sobre os resíduos gerados a partir de matérias primas utilizadas na produção de revestimentos cerâmicos. As massas cerâmicas apresentam grande variedade de tipos e composições e a sua mistura resulta em pastas cerâmicas de características distintas conforme a aplicação desejada.

As visitas efetuadas a empresa, na qual foi realizada a coleta dos resíduos, permitiram identificar três linhas de produção de massas cerâmicas para diferentes aplicações. Estas três

massas cerâmicas geradoras dos resíduos estudados são denominadas industrialmente de porcelanato, cerâmica semi-grês e cerâmica porosa e os seus processos de fabricação assemelham-se parcialmente, podendo diferir de acordo com as características do material desejado. A constituição química e mineralógica e o processo de produção destes produtos é basicamente a mesma. As características das matérias primas, o processo de granulação e composição da mistura e os níveis de queima determinam a sua diferenciação. As propriedades fundamentais e comuns entre estes materiais são a porosidade e a resistência, sendo que a absorção de água é a característica principal que determina as suas aplicações.

Após a etapa de secagem do esmalte aplicado em uma das superfícies da placa cerâmica, a peça segue através de esteiras rolantes para o processamento de retífica. O processo de retífica das placas cerâmicas de revestimento consiste na utilização de equipamento munido de rolos diamantados com grande capacidade de remoção e que na presença de água, efetuam o apartamento lateral das placas cerâmicas visando o acabamento estético e o dimensionamento uniforme das peças. A água utilizada neste processo passa por tratamento físico-químico para posterior reaproveitamento. Após o processo de decantação, o resíduo é seco naturalmente e estocado para destinação em aterros. A Figura 16 mostra os resíduos cerâmicos objetos deste estudo.

Figura 16 - Resíduos da retífica das placas cerâmicas de revestimento: a) porcelanato; b) cerâmica porosa; c) cerâmica semi-grês



Os parâmetros adotados neste trabalho são inerentes às características técnicas de pisos intertravados quanto às solicitações de esforços de compressão segundo as condições exigíveis para a aceitação das peças pré-moldadas de concreto especificadas na norma NBR 9781/1987 (ABNT, 1987b). Estes parâmetros determinaram as características de qualidade e desempenho técnico a serem avaliadas, as quais são:

- a) resistência à compressão axial nas idades de 28 dias de acordo com a norma NBR 5738/2003 (ABNT, 2003b);
- b) absorção de água e o índice de vazios de acordo com a norma NBR 9778/2005 (ABNT, 2005).

Foram definidos os níveis de incorporação dos resíduos, sendo eles: 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% em substituição da areia e do cimento, usualmente utilizados na composição do concreto. Além destas dosagens de incorporação parcial dos resíduos, foi definida a dosagem do concreto de referência sem a incorporação de resíduos.

Para tanto, elaborou-se um planejamento da quantidade de peças a serem produzidas para garantir a execução dos ensaios propostos observando-se as normas técnicas vigentes. Para os ensaios de resistência à compressão foram produzidas doze peças pré-moldadas de concreto para rompimentos aos 7 e 28 dias de acordo com a norma NBR 9781/2013 (ABNT, 2013) e duas peças de reserva, totalizando 14 exemplares para cada proporção de incorporação dos resíduos. Para os ensaios de absorção de água e índice de vazios foram produzidas duas peças pré-moldadas de concreto de acordo com a norma NBR 9778/2005 (ABNT, 2005) para cada proporção de incorporação dos resíduos. No total foram moldados 448 corpos-de-prova, sendo que 336 corpos-de-prova resultaram da substituição da areia pelos três resíduos e 112 corpos-de-prova resultaram da substituição do cimento apenas pelo resíduo de porcelanato. A Tabela 7 apresenta o número de peças pré-moldadas de concreto produzidas para cada teor dos resíduos de porcelanato, cerâmica semi-grês e cerâmica porosa.

Tabela 7: Quantidade de peças produzidas para cada resíduo em relação aos parâmetros propostos.

| Resíduo % | Dosagem | Ensaio | Idade (dias) | Peças | Total Peças (unid.) |
|--------------------------------------|----------------|---------------|---------------------|--------------|----------------------------|
| 0 | 1 | Compressão | 7 | 7 | 16 |
| | | | 28 | 7 | |
| | | Absorção | 28 | 2 | |
| 5 | 1 | Compressão | 7 | 7 | 16 |
| | | | 28 | 7 | |
| | | Absorção | 28 | 2 | |
| 10 | 1 | Compressão | 7 | 7 | 16 |
| | | | 28 | 7 | |
| | | Absorção | 28 | 2 | |
| 15 | 1 | Compressão | 7 | 7 | 16 |
| | | | 28 | 7 | |
| | | Absorção | 28 | 2 | |
| 20 | 1 | Compressão | 7 | 7 | 16 |
| | | | 28 | 7 | |
| | | Absorção | 28 | 2 | |
| 25 | 1 | Compressão | 7 | 7 | 16 |
| | | | 28 | 7 | |
| | | Absorção | 28 | 2 | |
| 30 | 1 | Compressão | 7 | 7 | 16 |
| | | | 28 | 7 | |
| | | Absorção | 28 | 2 | |
| Total de espécimes para cada resíduo | | | | | 112 |

Os resíduos oriundos do processo de retífica das placas cerâmicas de revestimento é constituído por material cerâmico e esmalte utilizado no processo de esmaltação das peças, resultando em um pó de granulometria fina e com alto teor de umidade. A composição químico-mineralógica do resíduo de retífica das placas cerâmicas é, portanto, constituída de resíduos da própria massa cerâmica e de resíduos gerados no processo de esmaltação.

Com o objetivo de se ter uma avaliação preliminar dos resíduos, foram realizados ensaios de resistência à compressão em argamassa. Foram produzidos corpos-de-prova cilíndricos nas dimensões de 50 mm x 100 mm para cada teor de resíduo e para a argamassa controle onde o cimento foi substituído pelos resíduos nas proporções de 15% e 25%. Os corpos-de-prova foram rompidos aos 28 dias (CARVALHO et al., 2011).

Em razão do resíduo de porcelanato apresentar um desempenho mecânico superior nos ensaios preliminares em argamassa, nos ensaios definitivos em concreto para avaliação da resistência à compressão e absorção de água, onde o elemento constituinte substituído foi o cimento, optou-se pela utilização e avaliação apenas deste resíduo. A Tabela 8 mostra os resultados dos ensaios preliminares de avaliação da resistência à compressão em argamassa com incorporação parcial dos resíduos em substituição ao cimento.

Tabela 8: Resultados dos ensaios preliminares de resistência à compressão axial da argamassa com incorporação parcial dos resíduos em substituição ao cimento.

| Argamassa | % Resíduo | Corpos de Prova - MPa | | | | | |
|--------------------|-----------|-----------------------|----|----|----|-------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | Média | D.P. |
| Controle | 0 | 43 | 39 | 40 | 41 | 40,7 | 1,7 |
| Porcelanato | 15 | 40 | 39 | 38 | 41 | 39,5 | 1,3 |
| | 25 | 34 | 31 | 32 | 29 | 31,6 | 2,2 |
| Cerâmica Semi-Grês | 15 | 36 | 40 | 37 | 42 | 38,8 | 2,9 |
| | 25 | 36 | 33 | 35 | 32 | 34,0 | 1,9 |
| Cerâmica Porosa | 15 | 38 | 37 | 39 | 37 | 37,8 | 0,8 |
| | 25 | 32 | 33 | 34 | 33 | 33,0 | 0,7 |

Fonte: CARVALHO et al., 2011.

Nos ensaios definitivos em concreto para avaliação da resistência à compressão e absorção de água para pisos intertravado, onde o elemento constituinte substituído foi o agregado miúdo (areia) foram utilizados e avaliados os resíduos da retífica de porcelanato, cerâmica semi-grês e cerâmica porosa.

4.2 Caracterização dos Materiais

4.2.1 Resíduos Cerâmicos

Os resíduos foram coletados em uma indústria de revestimentos cerâmicos localizada no município de Limeira. Para o desenvolvimento desta pesquisa a empresa disponibilizou 250 kg dos resíduos gerados no processo de retífica das placas cerâmicas das linhas de produção de porcelanato, cerâmica semi-grês e cerâmica porosa.

Os resíduos foram coletados em junho de 2011 e transportados para o Laboratório de Materiais de Construção da Faculdade de Tecnologia – UNICAMP, em seu estado bruto e ainda com relativo teor de umidade. Posteriormente os resíduos foram submetidos à secagem em estufa a $105 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e após estarem totalmente secos apresentaram granulometria fina e isenta de torrões. Os resíduos não sofreram nenhum tipo de beneficiamento e após a secagem, foram acondicionados em sacos e devidamente armazenados até a sua utilização.

4.2.1.1 Ensaio de Granulometria

Para a determinação da dimensão das partículas dos resíduos, foram realizados ensaios de granulometria por sedimentação para solos finos, de acordo com a norma NBR 7181/1984 (ABNT, 1984).

4.2.1.2 Massa Específica e Massa Unitária

Os ensaios para a determinação da massa específica e da massa unitária dos resíduos, foram realizados segundo as normas NBRNM 52/2009 (ABNT, 2009a) e NBRNM 45/2006 (ABNT, 2006a).

4.2.1.3 Determinação Mineralógica dos Resíduos

Para se conhecer a composição mineralógica dos resíduos, foi realizada a Análise por Difração de Raio X (DRX) pelo laboratório de Física do Instituto de Física da Universidade de Campinas - UNICAMP.

4.2.1.4 Determinação de Atividade Pozolânica dos Resíduos

Para a determinação da atividade pozolânica dos resíduos foram realizados ensaios de acordo com a NBR 5752/2012 (ABNT, 2012a).

A determinação do índice de atividade pozolânica consiste na comparação entre duas argamassas sendo uma de referência (A), sem adição do suposto material pozolânico e outra com a substituição de 35% do cimento, em massa (B). O índice de atividade pozolânica com o cimento Portland é a relação entre a resistência à compressão axial das argamassas aos 28 dias de acordo com a equação a seguir:

$$\frac{f_{cB}}{f_{cA}} \times 1,00 (\%) \quad (1)$$

Sendo:

f_{cB} = resistência média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados com cimento e material pozolânico (argamassa B)

f_{cBA} = resistência média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados somente com cimento (argamassa A)

Foi determinada a quantidade de água necessária na composição das argamassas a fim de que cada uma alcançasse o índice de consistência de (225 ± 5) mm, segundo as recomendações de procedimentos de execução da norma NBR 7215/1996 (ABNT, 1996).

No ensaio de pozolanidade foram produzidas quatro misturas sendo uma argamassa controle com 100% de cimento e sem resíduos e três argamassas com a incorporação de 35% dos resíduos de porcelanato, cerâmica semi-grês e cerâmica porosa em substituição ao cimento. O traço adotado para as argamassas foi 1:3:0,60 (cimento/resíduo, areia e água) em massa, de acordo com a norma NBR 5752/2012 (ABNT, 2012a). Para cada argamassa foram moldados três corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura.

Após a moldagem os corpos-de-prova foram colocados em câmara úmida por um período de 24 horas, sendo a seguir desmoldados e acondicionados em um recipiente hermeticamente fechado, permanecendo em cura térmica a uma temperatura de (38 ± 2) °C durante 28 dias. A

Figura 17 ilustra os corpos-de-prova sendo acondicionados para a cura térmica e o ensaio de resistência à compressão axial.

Figura 17 – Ensaio de pozolanicidade: a) corpos-de-prova na estufa; b) ruptura dos corpos-de-prova.



Após este período, os corpos-de-prova foram resfriados à temperatura ambiente, capeados e submetidos aos ensaios de resistência à compressão axial para a determinação da atividade pozolânica. De acordo com a norma NBR 12653/2012 as misturas avaliadas devem apresentar resistência igual ou superior a 75% da argamassa controle sem resíduo (ABNT, 2012c).

4.2.2 Cimento

Para a produção das peças pré-moldadas de concreto para pisos intertravados, foi utilizado o cimento Portland - Alta Resistência Inicial – CP V-ARI, normalizado pela NBR 5733/1991 (ABNT, 1991a). A moagem mais fina do produto final e a dosagem de calcário e argila no processo produtivo do clínquer fazem com que este tipo de cimento, ao reagir com a água, adquira elevadas resistências em um reduzido período de tempo. Os lotes utilizados fazem parte do estoque regular da Faculdade de Tecnologia – UNICAMP e a opção por este tipo de aglomerante deve-se ao fato das indústrias de pré-fabricados terem a necessidade de obter altas resistências nas primeiras idades (CRUZ, 2003). A Tabela 9 apresenta as especificações do cimento CP V-ARI de acordo com a NBR 5733/1991 (ABNT, 1991a).

Tabela 9- Especificações do cimento CP V-ARI conforme a NBR 5733/1991 (ABNT, 1991a).

| Cimento CP V-ARI | Especificações |
|---------------------------------------|-----------------------|
| Ensaio Físicos | |
| Tempo de início de pega (h:min) | ≥ 1 |
| Tempo de fim de pega (h:min) | ≤ 10 |
| Blaine (cm ² /g) | ≥ 3000 |
| Finura # 200 (%) | $\leq 6,0$ |
| Expansibilidade a quente (mm) | $\leq 5,0$ |
| Resistência à compressão 1 dia (MPa) | $\geq 14,0$ |
| Resistência à compressão 3 dias (MPa) | $\geq 24,0$ |
| Resistência à compressão 7 dias (MPa) | $\geq 34,0$ |
| Ensaio Químicos | |
| Perda ao fogo (%) | $\leq 4,5$ |
| Resíduo insolúvel (%) | $\leq 1,0$ |
| Trióxido de enxofre (%) | $\leq 3,5$ |
| Óxido de magnésio (%) | $\leq 6,5$ |

4.2.2.1 Ensaio de Finura do Cimento

Com o propósito de medir a finura do cimento foi realizado o ensaio baseado na NBR 11579/2012 (ABNT, 2012b).

A finura é um valor relacionado com a dimensão dos grãos do produto, dado em porcentagem, sendo estabelecida como uma proporção em peso do material retido em peneira com malha definida. Para o cimento Portland - Alta Resistência Inicial – CP V-ARI o valor da finura não deve exceder 6%. A finura do cimento é calculada em porcentagem, de acordo com a equação a seguir:

$$F = \frac{R \cdot C}{M} \times 100 \quad (2)$$

Sendo:

F = índice de finura do cimento em porcentagem

R = resíduo retido na peneira, em gramas

M = massa inicial do cimento (50g)

C = fator de correção da peneira utilizada no ensaio

4.2.2.2 Massa Específica do Cimento

Para se conhecer a massa específica do cimento foi realizado o ensaio baseado na NBRNM 23/2001 (ABNT, 2001).

4.2.3 Agregado miúdo - Areia

Para a produção do concreto foi utilizado como agregado miúdo natural a areia quartzosa, disponibilizada por fornecedores da região de Limeira e disponível no estoque regular mantido no Laboratório de Materiais de Construção da Faculdade de Tecnologia – UNICAMP. Após a secagem em estufa, a areia foi acondicionada em caixas de madeira e devidamente armazenada até a sua utilização.

4.2.3.1 Ensaio de Granulometria

O ensaio para determinação da composição granulométrica do agregado miúdo foi realizado de acordo com as especificações da NBRNM 248/2003 (ABNT, 2003a).

4.2.3.2 Massa Específica e Massa Unitária

O ensaio para determinação da massa específica e a massa unitária do agregado miúdo foi realizado de acordo com as especificações da NBRNM 53/2009 (ABNT, 2009b) e da NBRNM 45/2006 (ABNT, 2006a).

4.2.4 Agregado miúdo – Pó de pedra

Para a produção do concreto, foi utilizado como parte do agregado miúdo natural o pó de pedra, tipo basáltico, proveniente do município de Limeira. Após secagem em estufa, o pó de pedra foi acondicionado em sacos de aniagem e devidamente armazenado até a sua utilização.

4.2.4.1 Ensaio de Granulometria

O ensaio para determinação da composição granulométrica do pó de pedra foi realizado de acordo com as especificações da NBRNM 248/2003 (ABNT, 2003a).

4.2.4.2 Massa Específica e Massa Unitária

O ensaio para determinação da massa específica e a massa unitária do pó de pedra foi realizado de acordo com as especificações da NBRNM 52/2009 (ABNT, 2009a) e da NBRNM 45/2006 (ABNT, 2006a).

4.2.5 Agregado Graúdo

Para a produção do concreto foi utilizado como agregado graúdo natural a brita nº 0, tipo basáltica, disponibilizada por fornecedores da região de Limeira e disponível no estoque regular mantido no Laboratório de Materiais de Construção da Faculdade de Tecnologia – UNICAMP. Após secagem em estufa, a brita foi acondicionada em sacos e devidamente armazenada até a sua utilização.

4.2.5.1 Ensaio de Granulometria

O ensaio para determinação da composição granulométrica do agregado graúdo foi realizado de acordo com as especificações da NBRNM 248/2003 (ABNT, 2003a).

4.2.5.2 Massa Específica e Massa Unitária

O ensaio para determinação da massa específica e a massa unitária do agregado graúdo foi realizado de acordo com as especificações da NBRNM 53/2009 (ABNT, 2009b) e da NBRNM 45/2006 (ABNT, 2006a).

4.2.6 Aditivo Plastificante

Na preparação do concreto foi utilizado um aditivo tipo SP, tendo sua estrutura química baseada em uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, propiciando super plastificação e redução de água. O produto foi desenvolvido para uso em uma ampla gama de concretos sendo geralmente empregado na indústria de pré-moldados onde se requer maior durabilidade e desempenho.

O aditivo é livre de cloretos e é compatível com todos os tipos de cimento Portland atendendo os requisitos da norma NBR 11768/2011 (ABNT, 2011a), sendo recomendado pelo fabricante, o seu uso nas dosagens de 0,2 a 1,0%.

A dosagem utilizada na preparação do concreto foi definida através de ensaios experimentais realizados no Laboratório de Materiais de Construção da Faculdade de Tecnologia – UNICAMP.

4.2.7 Água

A água utilizada na preparação do concreto foi coletada nas instalações do Laboratório de Materiais de Construção da Faculdade de Tecnologia proveniente da rede de abastecimento da cidade de Limeira e atendendo aos padrões mínimos de qualidade.

4.3 Produção do Concreto para Pisos Intertravados

4.3.1 Dosagem do Concreto

A dosagem do concreto é a busca da melhor composição dos seus materiais constituintes, de forma que, no estado fresco o concreto possua plasticidade suficiente a fim de permitir a adequada moldagem das peças e que, após o endurecimento, as mesmas tenham qualidade assegurada, atendendo as especificações pré-estabelecidas para o uso pretendido (ABREU, 2003).

A plasticidade é uma propriedade importante do concreto, pois permite que o mesmo seja adequadamente adensado e compactado de forma a garantir sua resistência mecânica, durabilidade e no caso de pisos intertravados, a aparência estética, atendendo imposições do mercado consumidor. Esta propriedade do concreto está intimamente relacionada a quantidade de água adicionada na mistura, ou seja, o concreto mais fluido apresenta uma maior capacidade de adensamento e compactação.

Cimentos de diferentes finuras combinados com agregados de diferentes granulometrias proporcionam concretos que requerem diferentes quantidades de água para obterem a plasticidade e a trabalhabilidade adequadas ao uso pretendido. A metodologia de dosagem do concreto para a fabricação de pisos intertravados depende do tipo de técnica de produção adotada, cuja quantidade de água na mistura é particular para cada equipamento utilizado no adensamento e compactação do concreto (FERNANDES, 2012).

Esta pesquisa foi desenvolvida inteiramente em laboratório, onde o concreto para uso em pisos intertravados foi moldado em fôrmas de plástico sendo adensado e compactado em mesa vibratória, motivo pelo qual, o primeiro passo nesta etapa do trabalho foi a obtenção de um traço padrão com um fator água/cimento que propiciasse a tralhabilidade adequada do concreto para este tipo de equipamento em escala laboratorial. Além disto, buscou-se alta resistência e baixa permeabilidade das peças pré-moldadas de concreto.

Desta forma, foi definido o traço em massa de 1 : 0,77 : 2,33 : 1,1 : 0,33 (cimento, areia, pó de pedra, brita e água), cuja dosagem é sugerida pela ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, sendo usualmente empregado na produção de artefatos de concreto vibroprensados e utilizado para a produção de pisos intertravados (FERNANDES, 2012; BITTENCOURT, 2011).

Em virtude do fator água/cimento de 0,33 ter se mostrado insuficiente para o adequado adensamento do concreto em mesa vibratória, gerando uma mistura extremamente seca, foram realizados ensaios quantitativos com o objetivo de promover os ajustes necessários na quantidade de água na mistura a fim de alcançar a plasticidade pretendida conforme demonstra a Tabela 10.

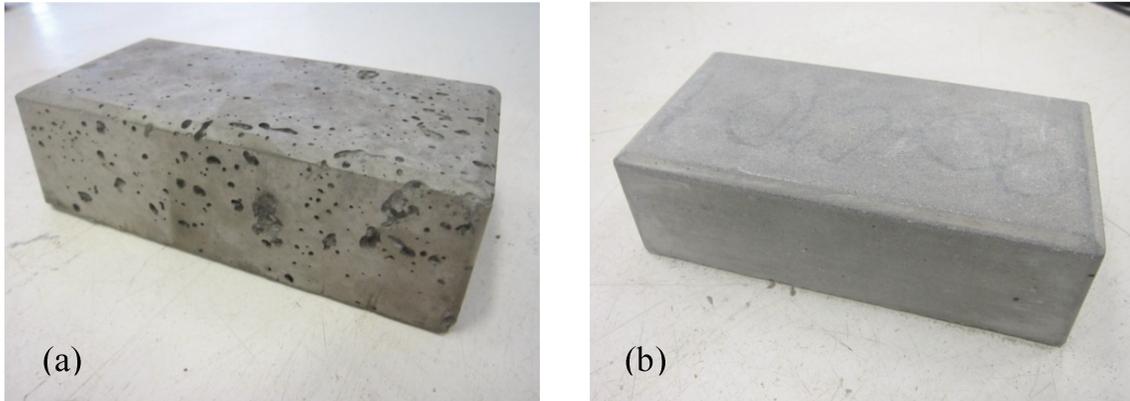
Tabela 10 – Dosagens experimentais de adequação do fator água/cimento para a definição do traço em condições laboratoriais.

| A/C | Aditivo | Resíduo (%) | Abatimento (mm) | Aparência Estética |
|------|---------|-------------|-----------------|--------------------|
| 0,45 | 0 | 30 | 5 | Ruim |
| 0,55 | 0 | 30 | 15 | Ruim |
| 0,65 | 0 | 30 | 40 | Boa |
| 0,48 | 0,4 | 30 | 25 | Ruim |
| 0,48 | 0,7 | 30 | 50 | Boa |

A alteração do fator água/cimento de 0,33 para 0,45 resultou em um concreto de consistência seca, ainda com baixíssima plasticidade e trabalhabilidade inviabilizando a moldagem das peças. O aumento do fator água/cimento para 0,55 permitiu a obtenção de uma mistura em condições de moldagem, média trabalhabilidade, porém com uma condição estética ruim. As condições ideais pretendidas, proporcionando um bom adensamento e boa aparência estética foi alcançada com uma relação água/cimento de 0,65 sem o uso de aditivo. No entanto, segundo Giammusso (1992), quanto maior o fator água/cimento em massa na mistura, maior será a porosidade da pasta e conseqüentemente, menor será a sua resistência.

Desta forma, o uso do aditivo superplastificante Grenium 50 foi considerado, sendo necessária a sua incorporação na mistura a fim de proporcionar a redução do teor de água, preservando a consistência adequada para a moldagem e aumentando a resistência aos esforços mecânicos. A Figura 18 ilustra amostras de pisos obtidas em diferentes condições estéticas.

Figura 18 – Amostras de pisos: a) com uma condição estética ruim; b) com uma condição estética boa.



Portanto, a partir destas dosagens experimentais, foi definida a composição em massa do concreto de referência em 1 : 0,77 : 2,33 : 1,1 (cimento, areia, pó de pedra e brita), com um fator água/cimento de 0,48 e com a adição de 0,7 de aditivo plastificante, sem a incorporação dos resíduos o que neste trabalho é denominado concreto de referência. A partir do concreto de referência, foram realizadas as incorporações parciais dos três resíduos em substituição à areia e do resíduo de porcelanato em substituição ao cimento. As Tabelas 11 e 12 mostram as dosagens do concreto sem e com a incorporação de resíduos substituindo individualmente a areia e o cimento, respectivamente.

Tabela 11 – Dosagem do concreto com as concentrações de resíduo em substituição a areia.

| Teor de Substituição (%) | Dosagem | | | | | | |
|---------------------------------|----------------|----------------|--------------|--------------------|--------------|------------|----------------|
| | Resíduo | Cimento | Areia | Pó de Pedra | Brita | A/C | Aditivo |
| Controle | 0 | 1 | 0,77 | 2,33 | 1,1 | 0,48 | 0,7 |
| 5 | 0,035 | 1 | 0,735 | 2,33 | 1,1 | 0,48 | 0,7 |
| 10 | 0,070 | 1 | 0,700 | 2,33 | 1,1 | 0,48 | 0,7 |
| 15 | 0,105 | 1 | 0,665 | 2,33 | 1,1 | 0,48 | 0,7 |
| 20 | 0,140 | 1 | 0,630 | 2,33 | 1,1 | 0,48 | 0,7 |
| 25 | 0,175 | 1 | 0,595 | 2,33 | 1,1 | 0,48 | 0,7 |
| 30 | 0,210 | 1 | 0,560 | 2,33 | 1,1 | 0,48 | 0,7 |

Tabela 12 – Dosagem do concreto com as concentrações de resíduo substituindo o cimento.

| Teor de Substituição (%) | Dosagem | | | | | | |
|---------------------------------|----------------|----------------|--------------|--------------------|--------------|-------------|----------------|
| | Resíduo | Cimento | Areia | Pó de Pedra | Brita | A/C | Aditivo |
| Controle | 0 | 1 | 0,77 | 2,33 | 1,1 | 0,48 | 0,7 |
| 5 | 0,05 | 0,95 | 0,77 | 2,33 | 1,1 | 0,48 | 0,7 |
| 10 | 0,10 | 0,90 | 0,77 | 2,33 | 1,1 | 0,48 | 0,7 |
| 15 | 0,15 | 0,85 | 0,77 | 2,33 | 1,1 | 0,48 | 0,7 |
| 20 | 0,20 | 0,80 | 0,77 | 2,33 | 1,1 | 0,48 | 0,7 |
| 25 | 0,25 | 0,75 | 0,77 | 2,33 | 1,1 | 0,48 | 0,7 |
| 30 | 0,30 | 0,70 | 0,77 | 2,33 | 1,1 | 0,48 | 0,7 |

4.3.2 Produção das Peças Pré-Moldadas de Concreto

Os procedimentos para a produção e moldagem dos pisos pré-moldados de concreto foram realizados conforme o disposto na norma NBR 5738/2003 (ABNT, 2003b).

Para a pesagem dos componentes do concreto, ou seja, o cimento, areia, pó de pedra, brita, água e aditivo, foi utilizada uma balança digital com capacidade de 100 kg e precisão de 20g, modelo LC100 da marca Marte. Para a medição da água usada na mistura, foi utilizada uma proveta de 1.000 ml. Por tratar-se de materiais utilizados em quantidades reduzidas, o aditivo e os resíduos foram medidos em balança digital com capacidade de carga de 5.000g e precisão de 0,01g, modelo AS 5500-C da marca Marte. Foi utilizado um Becker de 40 ml para a medição do aditivo. Após terem sido medidos, os materiais foram separados e acondicionados individualmente em baldes plásticos para, posteriormente, serem utilizados no preparo do concreto.

As quantidades dos materiais componentes da mistura foram mantidas constantes, com exceção da areia e do cimento quando substituídos pelos resíduos, que tiveram variação das quantidades de acordo com as concentrações de substituição nos traços.

Na produção do concreto foi utilizada uma betoneira de eixo inclinado, com capacidade de 55 litros. Antes de iniciar a mistura, foi efetuada a lavagem e lubrificação do equipamento em movimento, com uma mistura de cimento e areia com um traço de 1:3, sendo este material removido posteriormente. Este procedimento se faz necessário para que a água de amassamento do concreto não seja absorvida, em parte, pelas paredes internas do equipamento. Logo após, deu-se início à mistura dos materiais constituintes do concreto, conforme os procedimentos abaixo.

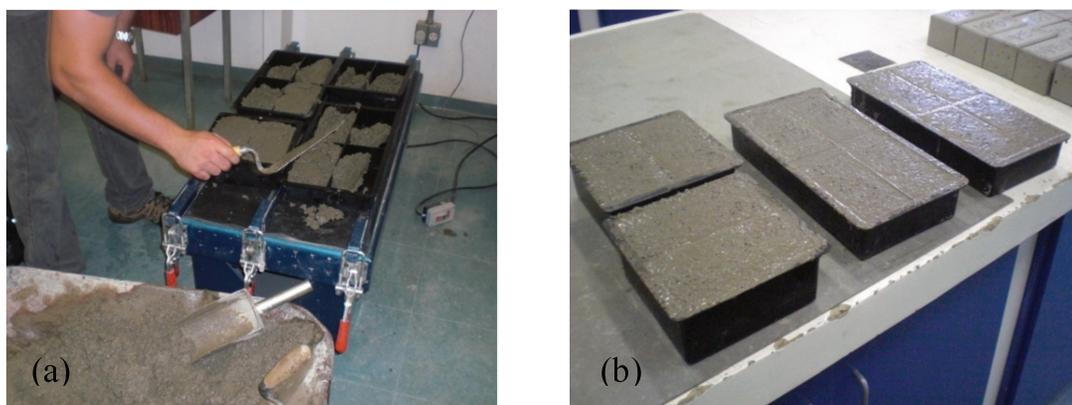
Inicialmente, com a betoneira em movimento, coloca-se a metade da água já com o aditivo incorporado e em seguida o agregado graúdo (brita). Logo em seguida adiciona-se o cimento, tomando-se o cuidado de, mediante inspeção visual, garantir que o mesmo esteja incorporado totalmente à mistura. Para os traços com a incorporação do resíduo em substituição parcial ao cimento, os mesmos foram misturados previamente. Em seguida o agregado miúdo (areia) é introduzido, seguido do restante da água. Para os traços com a incorporação dos resíduos em substituição parcial a areia, os mesmos foram misturados previamente. Finalmente, adiciona-se o pó de pedra, tomando-se o cuidado de, mediante inspeção visual, garantir que não haja material seco aderido às paredes internas do equipamento. Quando isto ocorrer, as placas de material seco

devem ser removidas com o auxílio de uma colher de pedreiro e o material reincorporado à mistura.

Após a incorporação de todos os materiais na betoneira, esta permaneceu ligada e em movimento durante 7 minutos. Decorrido este tempo, o concreto é descarregado em carriola previamente limpa, para em seguida e antes da moldagem dos pisos, determinar-se o índice de consistência do concreto através do ensaio de abatimento pelo tronco de cone de acordo com as especificações da NBRNM 67/1998 (ABNT, 1998).

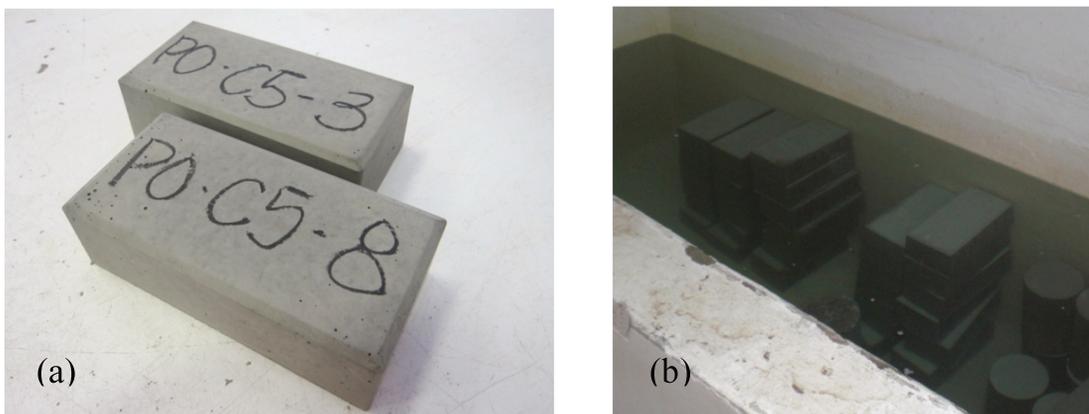
Para a moldagem dos pisos intertravados, foram utilizados moldes de plástico retangulares nas dimensões de 200 mm x 100 mm x 60 mm, os quais após terem suas superfícies internas lubrificadas, foram preenchidos com concreto. O adensamento do concreto nos moldes foi efetuado em duas camadas, com duração de 30 segundos cada uma, sobre mesa vibratória marca Erca. A Figura 19 mostra a moldagem dos pisos.

Figura 19 – Moldagem dos pisos: a) preenchimento dos moldes sobre mesa vibratória; b) pisos moldados a serem transportados para a câmara úmida.



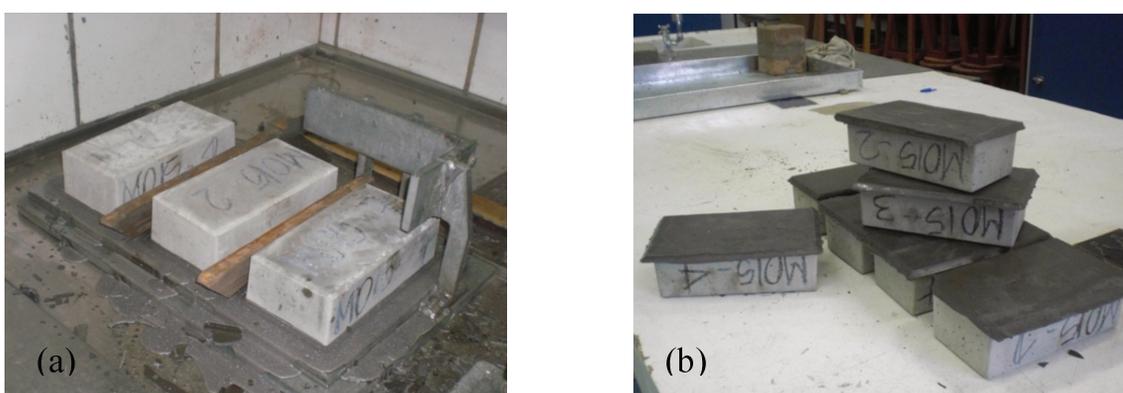
Após a moldagem, as superfícies expostas dos moldes foram isoladas com filme plástico a fim de impedir a perda de umidade da mistura. Em seguida, os moldes foram acondicionados em câmara úmida e decorrido um período de 24 horas, os pisos foram retirados dos moldes e submetidos ao processo de cura úmida onde as peças pré-moldadas permanecem em imersão até as idades de realização dos ensaios com a finalidade de evitar a evaporação prematura da água necessária para a hidratação do cimento, o qual é responsável pelo endurecimento do concreto. A Figura 20 mostra os pisos retirados dos moldes, identificados e submetidos à cura.

Figura 20 – Pisos após a desfôrma: a) pisos identificados; b) pisos em processo de cura até a idade de rompimento.



Após serem retirados da câmara úmida 24 horas antes do rompimento, os pisos foram capeados com uma mistura quente de enxofre e caulim com a finalidade de regularizar a superfícies de suas extremidades. Em seguida, retornam para a câmara úmida até o momento do rompimento. A Figura 21 ilustra o processo de capeamento dos pisos intertravados.

Figura 21 - Amostras de pisos após serem retirados da câmara úmida: a) processo de capeamento; b) pisos capeados.



A quantidade de diferentes traços decorrentes das variações de incorporação de resíduos desta pesquisa, exigiu a aplicação de uma terminologia de identificação das peças pré-moldadas de

concreto, a qual consistiu do tipo de resíduo incorporado (porcelanato, cerâmica semi-grês ou cerâmica porosa), o material substituído (areia ou cimento), a proporção de resíduo incorporado e a identificação da peça pré-moldada. A Figura 22 mostra a terminologia aplicada.

Figura 22 – Identificação dos pisos pré-moldados de concreto



Para cada traço de concreto foram produzidos um total de 16 (dezesesseis) pisos, sendo 14 (quatorze) pisos para rompimentos nas idades de 7 e 28 dias para os ensaios de resistência à compressão axial e dois pisos para os ensaios de absorção de água e porosidade aos 28 dias.

4.4 Caracterização do concreto

4.4.1 Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone

A consistência é um dos principais fatores que influenciam na plasticidade do concreto. O grau de umidade da mistura é o fator que determina a sua consistência. Conforme se modifica o grau de umidade da mistura é alterada também as suas características de plasticidade e de trabalhabilidade, ou seja, aumentando a quantidade de água, o concreto se torna mais mole e mais trabalhável (GIAMMUSSO, 1992). O ensaio universalmente usado para medir a consistência do concreto é denominado ensaio de abatimento do tronco de cone, também conhecido como Slump Test. Apesar de existirem outras formas de medir o abatimento do concreto, o método do tronco de cone é o mais utilizado em virtude da simplicidade do equipamento e da facilidade de execução nos canteiros de obras (METHA e MONTEIRO, 2008). O ensaio de abatimento do tronco de cone pode ser considerado como um índice qualitativo da estabilidade e da fluidez da mistura de concreto no estado fresco.

A consistência do concreto fresco foi medida pelo ensaio do abatimento do tronco de cone, conforme as especificações da NBR-NM 67/1998 (ABNT, 1998). O ensaio consiste na moldagem de um tronco de cone com o concreto a ser ensaiado e determinação do abatimento causado na massa de concreto pelo seu próprio peso. A Figura 23 ilustra o equipamento utilizado no ensaio de abatimento (METHA e MONTEIRO, 2008).

Figura 23 – Equipamento utilizado no ensaio de abatimento.



Os procedimentos para a realização do ensaio de abatimento do tronco de cone, estão discriminados a seguir:

- 1) Apoiar o molde troncocônico sobre a placa de base e ficar em pé sobre as suas duas abas a fim de mante-lo firme no chão durante o ensaio.
- 2) Preencher o molde em três camadas de mesmo volume, compactando-as com 25 golpes com o auxílio da haste de socamento, distribuindo bem os movimentos por toda a mistura e em cada camada.
- 3) Preencher o último terço com excesso de mistura e após o adensamento, rasar o concreto do topo do tronco de cone nivelando-o e limpar o excesso de concreto sobre a base.
- 4) Retirar os pés das abas mantendo pressionado o cone para baixo e em seguida retirar imediatamente, lenta e continuamente, o tronco de cone sem esforços laterais.
- 5) Toda a operação de ensaio deverá ser realizada em um período de tempo máximo de 2,5 minutos.
- 6) Colocar o tronco de cone cuidadosamente apoiado na placa metálica de base e em seguida apoiar a própria haste metálica de socamento sobre a superfície superior do tronco e com o auxílio da régua metálica graduada, medir o abatimento do concreto. O abatimento do

tronco de cone é a distância entre a base superior do molde e a base superior da amostra, sendo que o resultado deverá ser expresso em milímetros.

- 7) Caso o tronco de cone do concreto abatido não se apresentar coeso, ou seja, esteja desmoronando ou a sua parte superior muito fora de nível, a operação completa de ensaio deverá ser repetida com uma nova amostra de concreto fresco.

O concreto utilizado no abatimento do tronco de cone foi desprezado, não podendo ser usado em outros ensaios conforme especificações da norma técnica. A Figura 24 mostra o ensaio de abatimento pelo método do tronco de cone

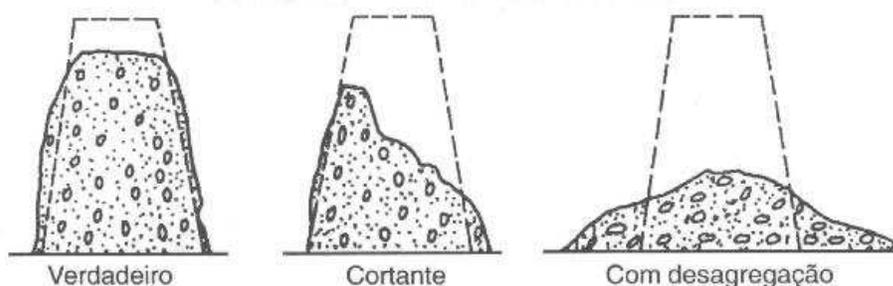
Figura 24 – Ensaio de abatimento pelo método do tronco de cone.



A principal função do ensaio de abatimento é controlar a uniformidade da produção do concreto, sendo que a ocorrência de uma variação fora do normal no resultado do abatimento pode significar uma mudança imprevista nas proporções da mistura, na granulometria ou no teor de água no concreto.

Como exemplos destas variações, pode-se citar o abatimento cortante ou cisalhamento, no qual uma das metades do cone de concreto desliza segundo um plano inclinado devido à falta de coesão da mistura. Poderá ocorrer também o abatimento com desagregação, o qual é resultante de concretos com alto teor de água em sua composição. Por outro lado, o abatimento verdadeiro é quando ocorre o abate uniforme e simétrico em toda a periferia da amostra (NEVILLE, 1997). A Figura 25 apresenta as formas de abatimento do concreto.

Figura 25 – Abatimento verdadeiro, cortante ou cisalhamento e com desagregação.



Fonte: NEVILLE, 1997.

Desta forma, o objetivo da realização do ensaio de abatimento foi o de verificar a consistência de cada traço do concreto produzido para uso em pisos intertravados com e sem a incorporação dos resíduos.

4.4.2 Ensaio de Resistência à Compressão Axial

A resistência mecânica à compressão é a principal propriedade do concreto em seu estado endurecido, sendo a característica mais valorizada no controle tecnológico do concreto. A resistência mecânica de uma determinada estrutura pode ser definida como a sua capacidade de suportar as solicitações externas sem que estas venham a lhe causar deformações plásticas ao longo do tempo (METHA e MONTEIRO, 2008).

Um concreto resistente e durável é caracterizado como um material com baixa porosidade e apresentando matrizes densas obtidas a partir do empacotamento dos materiais granulares constituintes da mistura antes do início da hidratação. O empacotamento das partículas destes

constituintes das misturas de concretos pode ser definido como a correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores possibilitando o refinamento dos poros, melhorando a zona de interface entre o agregado e a matriz e minimizando a exsudação interna e superficial da mistura. Com a introdução de adições minerais nas misturas de concreto, o empacotamento das partículas é favorecido enquanto a permeabilidade e a porosidade capilar são reduzidas, resultando na produção de concretos com trabalhabilidade adequada quando no estado fresco e alta resistência mecânica e durabilidade quando no estado endurecido (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

A resistência mecânica das peças pré-moldadas de concreto para pisos intertravados foi medida pelo ensaio de resistência à compressão axial, conforme as especificações da NBR 9780/1987 (ABNT, 1987a). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da Faculdade de Tecnologia – UNICAMP.

O equipamento utilizado no ensaio para a determinação da resistência à compressão é uma prensa hidráulica para ensaios mecânicos com capacidade de carga de 120 toneladas, conforme mostra a Figura 26.

Figura 26 – Equipamento utilizado no ensaio de resistência à compressão.



No ensaio de resistência à compressão, os pisos pré-moldados de concreto foram colocados na prensa e alinhados de tal modo que, o seu centro de gravidade coincidissem com o alinhamento do centro de carga dos cilindros de aço superior e inferior, ambos com diâmetro de $90 \pm 0,5\text{mm}$, sendo

que a tensão aplicada foi desenvolvida progressivamente a uma velocidade de carregamento de 0,5 MPa/s. A Figura 27 mostra a ruptura do piso pré-moldado de concreto no ensaio de resistência à compressão axial.

Figura 27 – Ruptura de piso no ensaio de resistência à compressão.



Todos os resultados dos ensaios de resistência a compressão axial foram aferidos em Newton (N) e transformados em MPa, ou seja, obtém-se a carga de ruptura do concreto (N), a qual dividida pela área de aplicação da carga e multiplicando-se por 0,95 (fator multiplicativo constante na Tabela 3) resultando na resistência (MPa), de acordo com a equação a seguir :

$$\Sigma = \frac{\text{carga (N)}}{\text{área (mm}^2\text{)}} \times 0,95 \text{ (fator multiplicativo)} \quad (3)$$

A resistência à compressão pode ser dada em N/mm², Kgf/cm² ou em MPa.

Os pisos pré-moldados de concreto foram rompidos nas idades de 7 e 28 dias.

4.4.3 Ensaio de Absorção de Água

O concreto é um material naturalmente poroso e a permeabilidade deste material depende do sistema de poros no interior de sua estrutura. A maior ou menor quantidade de poros no concreto depende da relação água/cimento na sua produção e do teor de ar no seu interior que, associados à presença de poros contínuos, influenciará na permeabilidade do material e na sua durabilidade (ROQUE e MORENO, 2005).

A durabilidade é uma característica qualitativa dos materiais que indica a sua capacidade de atender ou não à vida útil exigida para os mesmos. A vida útil de um material é o tempo no qual o mesmo permanece em uso mantendo as características que foram exigidas no momento da sua concepção (CARRIJO, 2005).

Os espaços preenchidos pela água nas pastas de cimento frescas constituem um sistema de poros capilares contínuos e interconectados contribuindo para o deslocamento de fluidos através do concreto influenciando diretamente na sua permeabilidade. As propriedades do concreto como, resistência, durabilidade e permeabilidade são diretamente influenciadas e controladas pelo número, tipo, tamanho e na conectividade desses poros e canais capilares presentes no seu interior. As adições minerais são introduzidas ao concreto para diminuir a conectividade entre os poros e a permeabilidade. Concretos com baixa permeabilidade têm uma maior capacidade de reduzir a absorção de substâncias agressivas e desta forma, permitir uma maior durabilidade a sua estrutura (SILVA apud GRIGOLI e HELENE, 2001).

A absorção de água e a porosidade das peças pré-moldadas de concreto para pisos intertravados foi medida de acordo com as especificações da NBR 9778/2005 (ABNT, 2005). Para tanto foram moldadas duas peças de concreto representativas de cada traço. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da Faculdade de Tecnologia – UNICAMP.

Os procedimentos realizados neste ensaio estão descritos a seguir :

- a) Os pisos foram submetidos a um processo de secagem em estufa na temperatura de 110 ± 5 °C, por um período de 72 horas;
- b) Após o período de 72 horas, os pisos foram retirados da estufa e resfriados naturalmente a temperatura ambiente e em seguida tiveram suas massas medidas (M_s) em balança de precisão digital;

- c) Em seguida, os pisos foram imersos em tanque contendo água a uma temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ por um período de 72 horas. Após este período, os pisos foram colocados em um recipiente com água, a qual foi aquecida progressivamente até alcançar a ebulição e onde permaneceram por 5 horas. Após a água esfriar naturalmente, foram determinadas suas massas (m_i) com o auxílio de balança hidrostática;
- d) Em seguida, os pisos foram retirados da água, secos superficialmente com panos úmidos e tiveram suas massas medidas (m_{sat}) em balança de precisão digital, de acordo com as equações a seguir:

$$A = \frac{msat - ms}{ms} \times 100 \quad (4)$$

$$Iv = \frac{msat - ms}{msat - mi} \times 100 \quad (5)$$

Sendo:

A: absorção do concreto

Iv: Índice de vazios do concreto

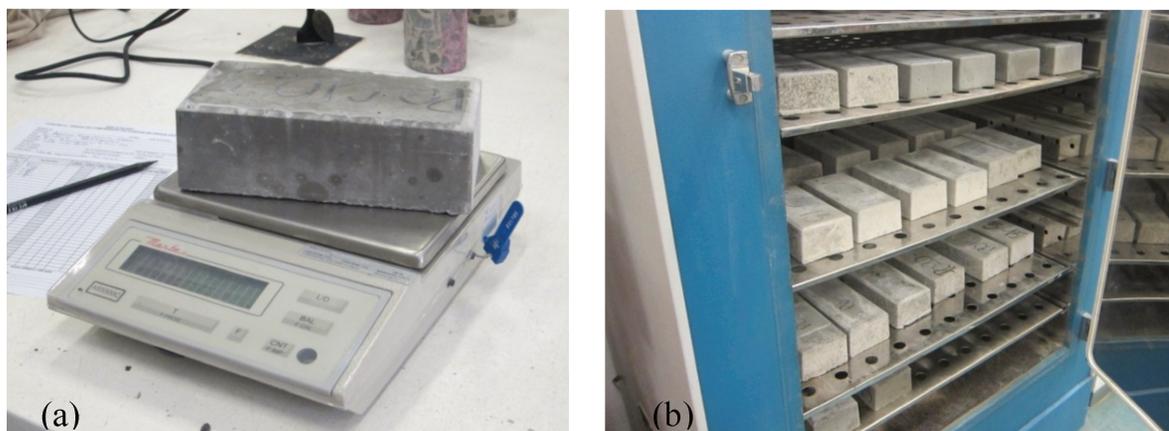
msat: massa saturada do concreto

ms: massa seca do concreto

mi: massa imersa do concreto

A Figura 28 mostra o ensaio de absorção de água das peças pré-moldadas de concreto para pisos intertravados.

Figura 28 – Ensaio de absorção de água: a) piso tendo sua massa medida na balança digital; b) pisos em processo de secagem na estufa.



A identificação dos pisos pré-moldados de concreto para o ensaio de absorção de água de acordo com os tipos de resíduos, seguiu a terminologia indicada nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 13 – Terminologia utilizada na identificação dos pisos para o ensaio de absorção com as concentrações de resíduo em substituição a areia.

| Terminologia – Piso 1 | Terminologia – Piso 2 |
|-----------------------|-----------------------|
| P 5-A-abs1 | P 5-A-abs2 |
| P10-A-abs1 | P10-A-abs2 |
| P15-A-abs1 | P15-A-abs2 |
| P20-A-abs1 | P20-A-abs2 |
| P25-A-abs1 | P25-A-abs2 |
| P30-A-abs1 | P30-A-abs2 |
| SG 5-A-abs1 | SG 5-A-abs2 |
| SG 10-A-abs1 | SG 10-A-abs2 |
| SG 15-A-abs1 | SG 15-A-abs2 |
| SG 20-A-abs1 | SG 20-A-abs2 |
| SG 25-A-abs1 | SG 25-A-abs2 |
| SG 30-A-abs1 | SG 30-A-abs2 |
| PO 5-A-abs1 | PO 5-A-abs2 |
| PO10-A-abs1 | PO10-A-abs2 |
| PO15-A-abs1 | PO15-A-abs2 |
| PO20-A-abs1 | PO20-A-abs2 |
| PO25-A-abs1 | PO25-A-abs2 |
| PO30-A-abs1 | PO30-A-abs2 |

Tabela 14 – Terminologia utilizada na identificação dos pisos para o ensaio de absorção com as concentrações de resíduo em substituição ao cimento.

| Terminologia – Piso 1 | Terminologia – Piso 2 |
|-----------------------|-----------------------|
| P 5-C-abs1 | P 5-C-abs2 |
| P10-C-abs1 | P10-C-abs2 |
| P15-C-abs1 | P15-C-abs2 |
| P20-C-abs1 | P20-C-abs2 |
| P25-C-abs1 | P25-C-abs2 |
| P30-C-abs1 | P30-C-abs2 |

Os resultados dos ensaios de absorção de água e porosidade são dados em porcentagem.

4.5 Análise Estatística

As médias obtidas nos ensaios de resistência à compressão, porosidade e absorção de água para cada resíduo utilizado em substituição a areia e ao cimento foram comparadas com os respectivos controles sem a incorporação de resíduos, utilizando uma análise de variância simples (*One Way ANOVA*) seguidos do teste de Tukey. As análises foram realizadas com auxílio do programa estatístico Orange 8.6. O nível de significância adotado foi de 5%. Essas análises permitem comparar as médias levando-se em consideração as diferenças observadas entre as réplicas. Quanto menor a variação observada entre as medidas do mesmo tratamento (réplicas) menor é o desvio padrão da média, portanto maior será a possibilidade de ocorrer diferenças significativas entre os tratamentos e no caso deste trabalho, porcentagem de incorporação de resíduos.

O teste de Tukey determina qual a diferença mínima necessária entre duas médias para que estas sejam estatisticamente diferentes com um nível de confiança de 5%.

4.6 Resíduos Gerados em Laboratório

Os resíduos gerados no laboratório durante os experimentos foram armazenados em local apropriado e destinados de acordo com o programa de gerenciamento de resíduos da UNICAMP.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados de caracterização dos materiais utilizados para a produção das peças pré-moldadas de concreto para pisos intertravados. Posteriormente serão apresentados os resultados da análise por Difração de Raio X e os resultados obtidos nos ensaios de abatimento, de resistência à compressão axial e de absorção de água e porosidade com o objetivo de conhecer o comportamento do concreto com a incorporação parcial das várias proporções do resíduo cerâmico.

5.1 Caracterização dos Resíduos

5.1.1 Resíduo Cerâmico de Porcelanato

5.1.1.1 Ensaio de granulometria

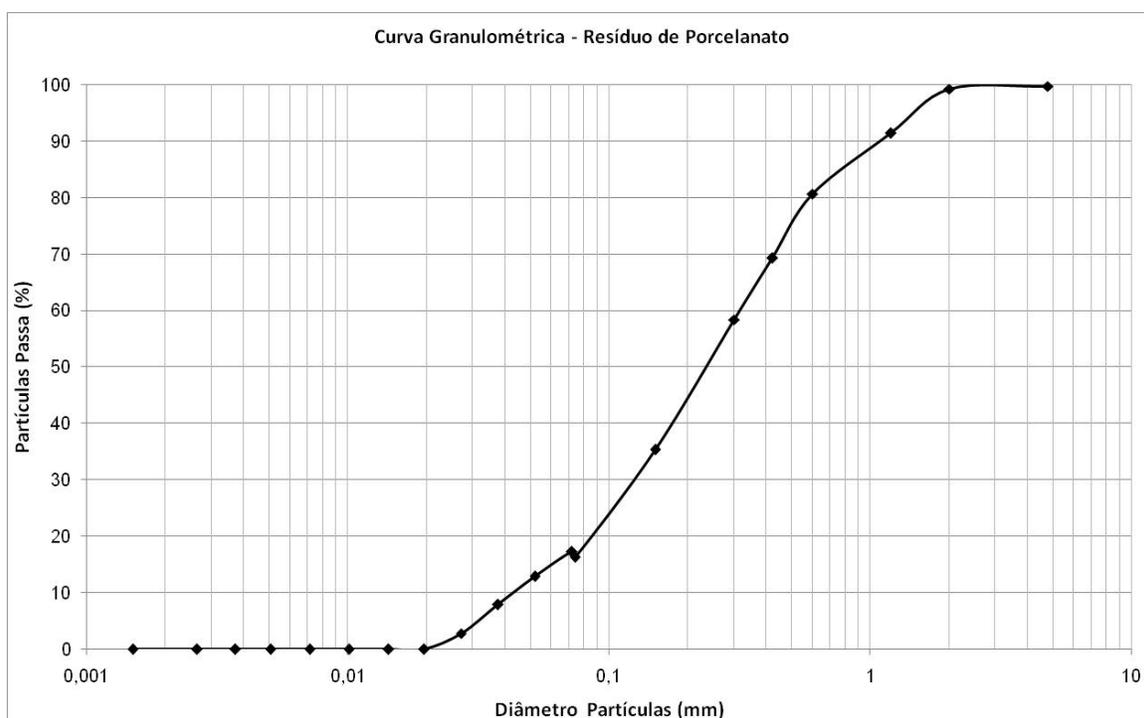
A distribuição granulométrica do resíduo cerâmico de Porcelanato foi realizada através de ensaio de sedimentação para solos finos atendendo as especificações da norma NBR 7181/1984 (ABNT, 1984). A composição granulométrica do resíduo cerâmico de Porcelanato está indicada na Tabela 15.

Tabela 15– Composição granulométrica do resíduo cerâmico de porcelanato.

| Diâmetro Partículas (mm) | Passantes (%) |
|-------------------------------------|----------------------|
| 4,76 | 99,798 |
| 2 | 99,295 |
| 1,2 | 91,42833 |
| 0,6 | 80,745 |
| 0,42 | 69,31167 |
| 0,3 | 58,42 |
| 0,15 | 35,38667 |
| 0,074 | 16,32833 |
| 0,072051 | 17,28469 |
| 0,05191 | 12,96351 |
| 0,037485 | 7,922147 |
| 0,027045 | 2,880781 |

O resíduo de porcelanato classifica-se como material de granulometria composta de 85% de partículas na faixa de areia (fina, média e grossa) e 15% de silte. A Figura 29 apresenta a curva granulométrica do resíduo de porcelanato.

Figura 29 – Curva granulométrica do resíduo cerâmico de porcelanato



5.1.1.2 Massa Específica e Massa Unitária

Os resultados dos ensaios para determinação da massa específica conforme a NBRNM 52/2009 (ABNT, 2009a) e da massa unitária conforme a NBRNM 45/2006 (ABNT, 2006a) do resíduo cerâmico de porcelanato estão indicados na Tabela 16.

Tabela 16 – Massa unitária e específica do resíduo cerâmico de porcelanato.

| Material | Amostra | Massa unitária (Kg/dm ³) | Média (Kg/dm ³) | Massa específica aparente (Kg/dm ³) | Média (Kg/dm ³) |
|-------------|---------|---|--------------------------------|---|--------------------------------|
| Porcelanato | 1 | 1,10 | 1,10 | 2,35 | 2,35 |
| | 2 | 1,09 | | 2,34 | |
| | 3 | 1,10 | | 2,35 | |

5.1.2 Resíduo de Cerâmica Semi-Grês

5.1.2.1 Ensaio de Granulometria

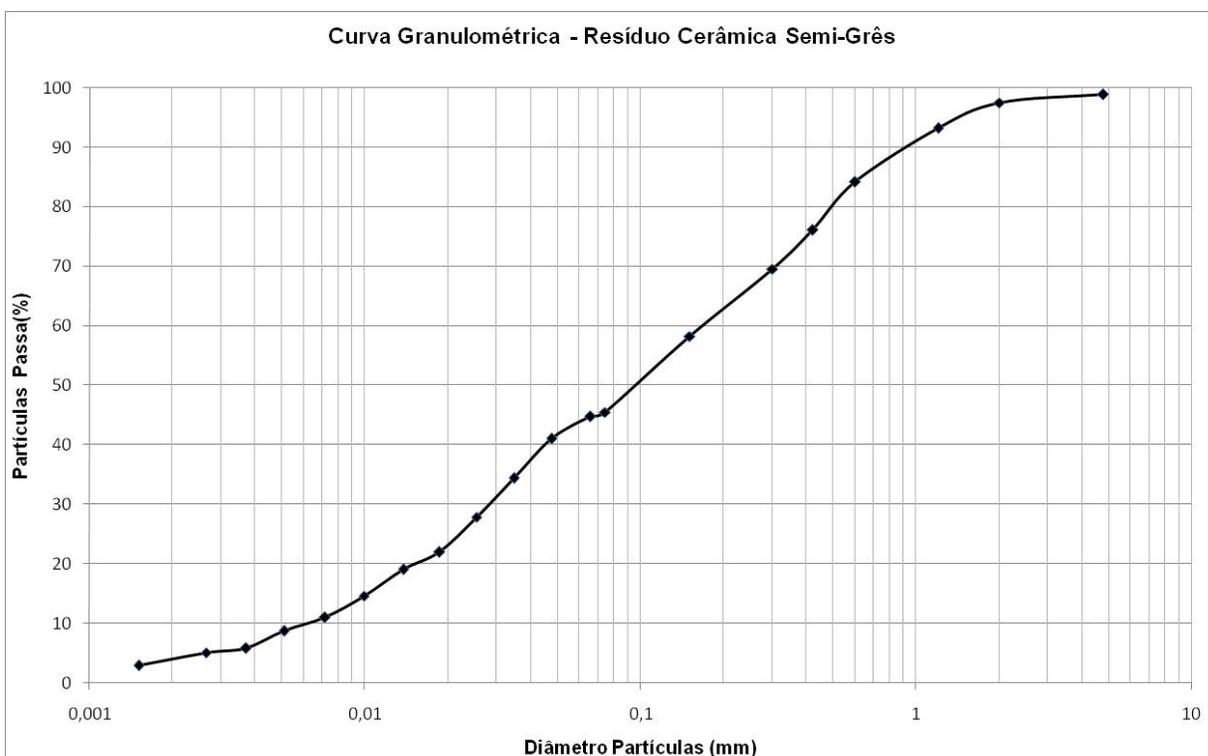
A distribuição granulométrica do resíduo de cerâmica semi-grês foi realizada através de ensaio de sedimentação para solos finos conforme a norma NBR 7181/84. A composição granulométrica do resíduo de cerâmica semi-grês está indicada na Tabela 17.

Tabela 17 – Composição granulométrica do resíduo de cerâmica semi-grês.

| Diâmetro Partículas (mm) | Passantes (%) |
|-------------------------------------|----------------------|
| 4,76 | 98,874 |
| 2 | 97,549 |
| 1,2 | 93,30733 |
| 0,6 | 84,18233 |
| 0,42 | 76,18233 |
| 0,3 | 69,61567 |
| 0,15 | 58,30733 |
| 0,074 | 45,53233 |
| 0,065618 | 44,78863 |
| 0,04737 | 41,11743 |
| 0,034697 | 34,50927 |
| 0,025355 | 27,90111 |
| 0,018565 | 22,02719 |
| 0,013738 | 19,09023 |
| 0,009903 | 14,6848 |
| 0,007163 | 11,0136 |
| 0,005074 | 8,810877 |
| 0,003697 | 5,873918 |
| 0,00265 | 5,139678 |
| 0,00151 | 2,936959 |

O resíduo de cerâmica semi-grês classifica-se como material de granulometria composta de 54,47 % de partículas na faixa de areia (fina, média e grossa) e 45,53% de silte. A Figura 30 apresenta a curva granulométrica do resíduo de cerâmica semi-grês.

Figura 30 – Curva granulométrica do resíduo de cerâmica semi-grês



5.1.2.2 Massa Específica e Massa Unitária

Os resultados dos ensaios para determinação da massa específica conforme a NBRNM 52/2009 (ABNT, 2009a) e da massa unitária conforme a NBRNM 45/2006 (ABNT, 2006a) do resíduo de cerâmica semi-grês estão indicados na Tabela 18.

Tabela 18 – Massa unitária e específica do resíduo de cerâmica semi-grês.

| | Amostra | Massa unitária (Kg/dm³) | Média (Kg/dm³) | Massa específica aparente (Kg/dm³) | Média (Kg/dm³) |
|-----------------------|----------------|---|--------------------------------------|--|--------------------------------------|
| | 1 | 1,23 | | 2,23 | |
| Cerâmica Semi-Grês | 2 | 1,24 | 1,24 | 2,24 | 2,24 |
| | 3 | 1,26 | | 2,24 | |

5.1.3 Resíduo de Cerâmica Porosa

5.1.3.1 Ensaio de Granulometria

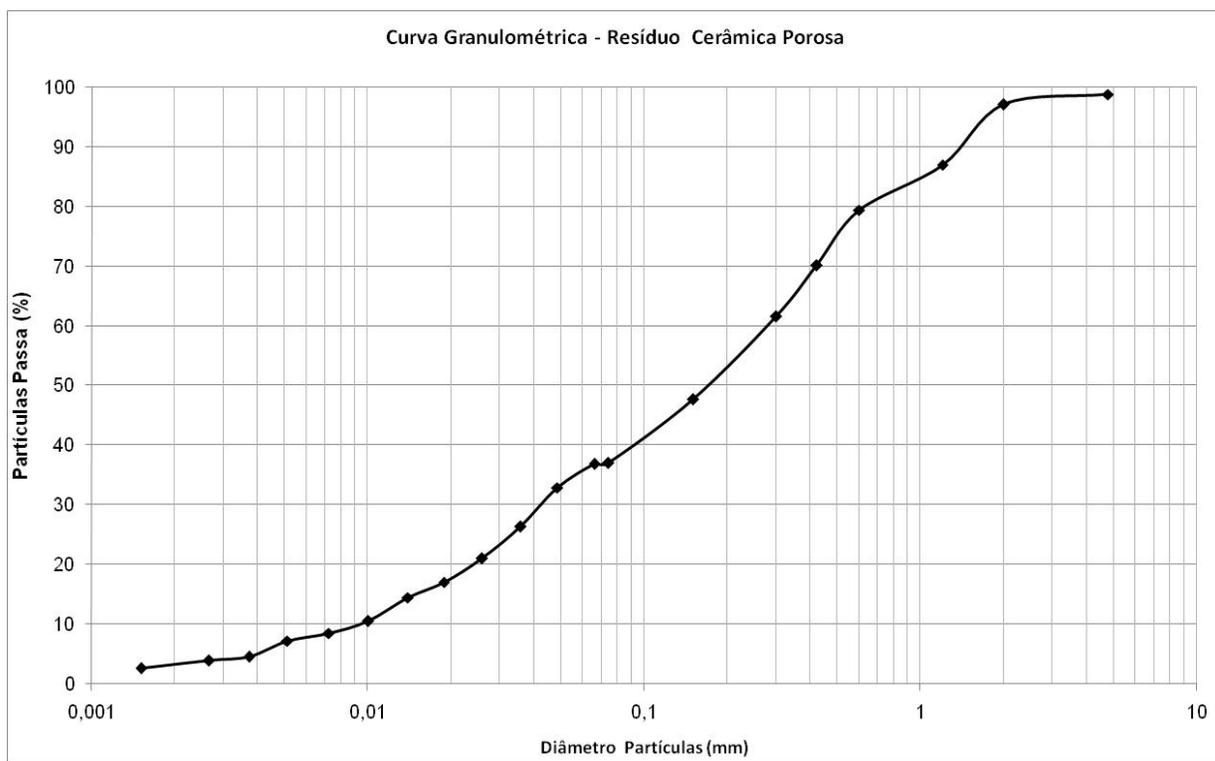
A distribuição granulométrica do resíduo de cerâmica porosa foi realizada através de ensaio de sedimentação para solos finos conforme a norma NBR 7181/84. A composição granulométrica do resíduo de cerâmica porosa está indicada na Tabela 19.

Tabela 19 – Composição granulométrica do resíduo de cerâmica porosa.

| Diâmetro Partículas (mm) | Passantes (%) |
|-------------------------------------|----------------------|
| 4,76 | 98,845 |
| 2 | 97,121 |
| 1,2 | 87,071 |
| 0,6 | 79,43767 |
| 0,42 | 70,16267 |
| 0,3 | 61,621 |
| 0,15 | 47,73767 |
| 0,074 | 37,071 |
| 0,065895 | 36,87612 |
| 0,048509 | 32,9251 |
| 0,035603 | 26,34008 |
| 0,025888 | 21,07207 |
| 0,018812 | 17,12105 |
| 0,013916 | 14,48705 |
| 0,010026 | 10,53603 |
| 0,007207 | 8,560527 |
| 0,005089 | 7,243523 |
| 0,003708 | 4,609514 |
| 0,002658 | 3,951012 |
| 0,00151 | 2,634008 |

O resíduo de cerâmica porosa classifica-se como material de granulometria composta de 62,93% de partículas na faixa de areia (fina, média e grossa) e 37,07 % de silte. A Figura 31 apresenta a curva granulométrica do resíduo de cerâmica porosa.

Figura 31 – Curva granulométrica do resíduo de cerâmica porosa.



5.1.3.2 Massa Específica e Massa Unitária

Os resultados dos ensaios para determinação da massa específica conforme a NBRNM 52/2009 (ABNT, 2009a) e da massa unitária conforme a NBRNM 45/2006 (ABNT, 2006a) do resíduo de cerâmica porosa estão indicados na Tabela 20.

Tabela 20 – Massa unitária e específica do resíduo de cerâmica porosa.

| Amostra | Massa unitária (Kg/dm ³) | Média (Kg/dm ³) | Massa específica aparente (Kg/dm ³) | Média (Kg/dm ³) |
|---------|---|--------------------------------|---|--------------------------------|
| Porosa | 1 | 1,15 | 2,59 | |
| | 2 | 1,16 | 2,59 | 2,60 |
| | 3 | 1,15 | 2,61 | |

5.1.4 Índice de Atividade Pozolânica

As pozolanas são definidas como substâncias constituídas de sílica e alumina que sozinhas possuem pouco ou nenhum valor cimentício, entretanto quando divididas finamente e na presença de umidade à temperatura ambiente reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento formando compostos com propriedades aglomerantes. O principal produto da reação entre o material pozolânico e o hidróxido de cálcio é o silicato de cálcio hidratado, podendo também haver a formação de aluminatos de cálcio hidratado (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

As pozolanas podem ser naturais como as cinzas vulcânicas e as terras diatomáceas ou artificiais como as argilas calcinadas, cinzas volantes, cinzas de casca de arroz, sílica ativas e outros (SILVA, 2005 apud NEVILLE, 1997; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Além das reações químicas, a atividade pozolânica pode ser também influenciada pela finura das partículas presentes no material pozolânico, propiciando a diminuição do volume de vazios na mistura. As características físicas das partículas e as reações químicas estão diretamente relacionadas e, atuando conjuntamente, geram um aumento de resistência mecânica, diminuição da permeabilidade e conseqüentemente um aumento na durabilidade do concreto (SILVA, 2005).

O potencial pozolânico de resíduos cerâmicos utilizados como substitutos dos agregados naturais e do cimento na produção de concretos e argamassas têm sido examinado em diversos estudos evidenciando a sua viabilidade técnica e ambiental (EVANGELISTA, 2006; PINHEIRO, 2010; CABRAL, 2011).

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão para determinação do índice de pozolanidade indicam que o resíduo de porcelanato possui propriedades pozolânicas. O índice de atividade pozolânica com cimento do resíduo de porcelanato aos 28 dias em relação a argamassa controle é de 76,50%. Os resíduos de cerâmica semi-grês e cerâmica porosa não atingiram as exigências normativas. As resistências adquiridas, bem como os índices de pozolanidade estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Índices de atividade pozolânica dos resíduos.

| Material | Resistência à Compressão (MPa) | | | | I.A.P. (%) |
|-------------|--------------------------------|-------|-------|-------|------------|
| | CP 1 | CP2 | CP3 | Média | |
| Controle | 31,47 | 31,07 | 29,77 | 30,77 | 100,00 |
| Porcelanato | 25,97 | 22,08 | 22,58 | 23,54 | 76,50 |
| Semi-Grês | 20,98 | 23,57 | 21,97 | 22,17 | 72,05 |
| Porosa | 23,18 | 20,47 | 20,97 | 21,54 | 70,00 |

5.1.5 Análise por Difração de Raio X

Foram realizadas análises por Difração de Raio X para a caracterização dos resíduos cerâmicos de porcelanato, cerâmica semi-grês e cerâmica porosa, cujos resultados são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Resultados da composição mineral dos resíduos cerâmicos.

| Amostra | Nome do Composto | Fator de Escala | Fórmula Química |
|--------------------|------------------|-----------------|---|
| Porcelanato | Quartzo | 1,007 | SiO ₂ |
| | Zirconita | 0,112 | Zr (SiO ₄) |
| | Feldspato | 0,117 | (Ca, Na)(Si, Al) ₄ , O ₈ |
| Cerâmica porosa | Quartzo | 0,918 | SiO ₂ |
| | Zirconita | 0,087 | Zr (SiO ₄) |
| | Feldspato | 0,117 | (Ca, Na)(Si, Al) ₄ , O ₈ |
| Cerâmica semi-grês | Quartzo | 1,012 | SiO ₂ |
| | Zirconita | 0,037 | Zr (SiO ₄) |

Os três resíduos apresentam majoritariamente quartzo em sua composição e zirconita em menor proporção conforme mostram os dados da Tabela 30 e os difratogramas das Figuras 32, 33 e 34. Observa-se a presença de feldspato em baixas proporções somente nos resíduos de porcelanato e cerâmica porosa, estando este resultado de acordo com os de outros pesquisadores (CABRAL, 2010; BRITO, 2009; SILVA, 2005).

Figura 32 – Difratograma do resíduo cerâmico de porcelanato.

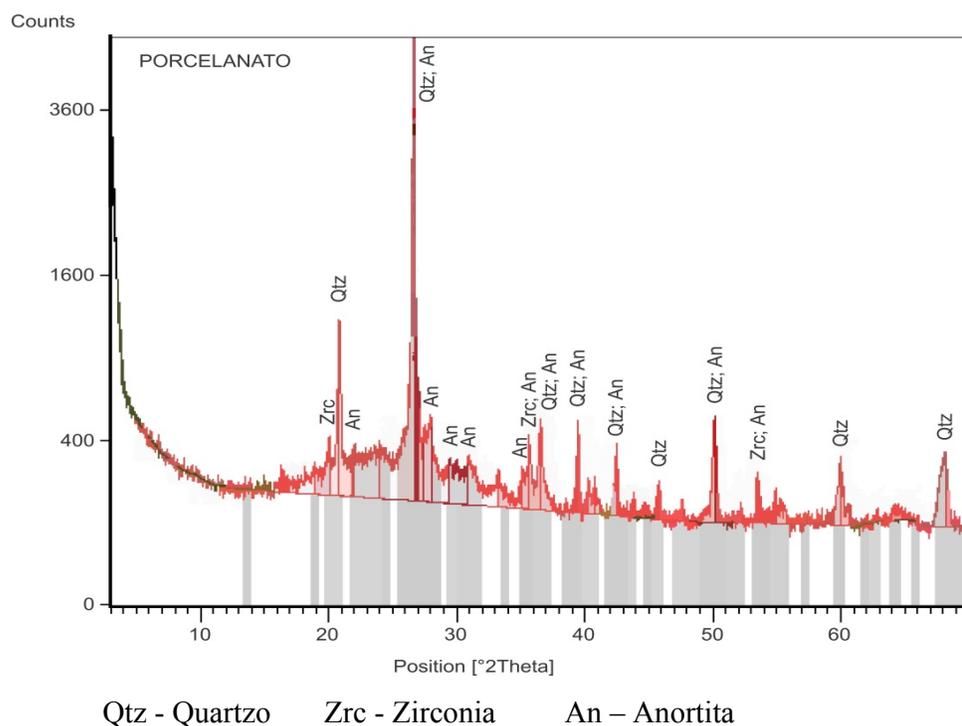


Figura 33 – Difratograma do resíduo cerâmico de cerâmica semi-grês

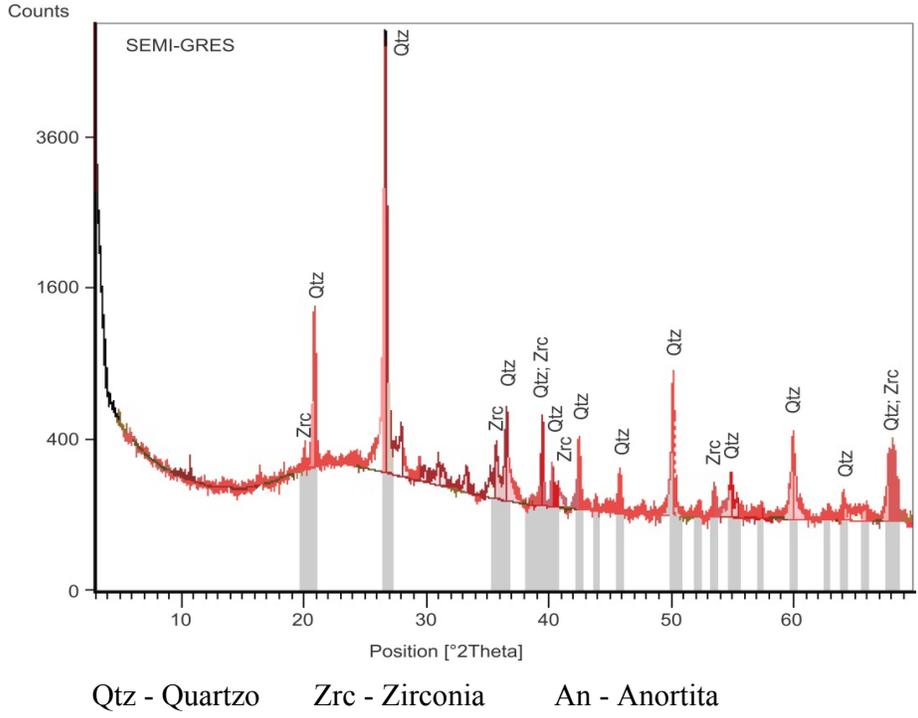
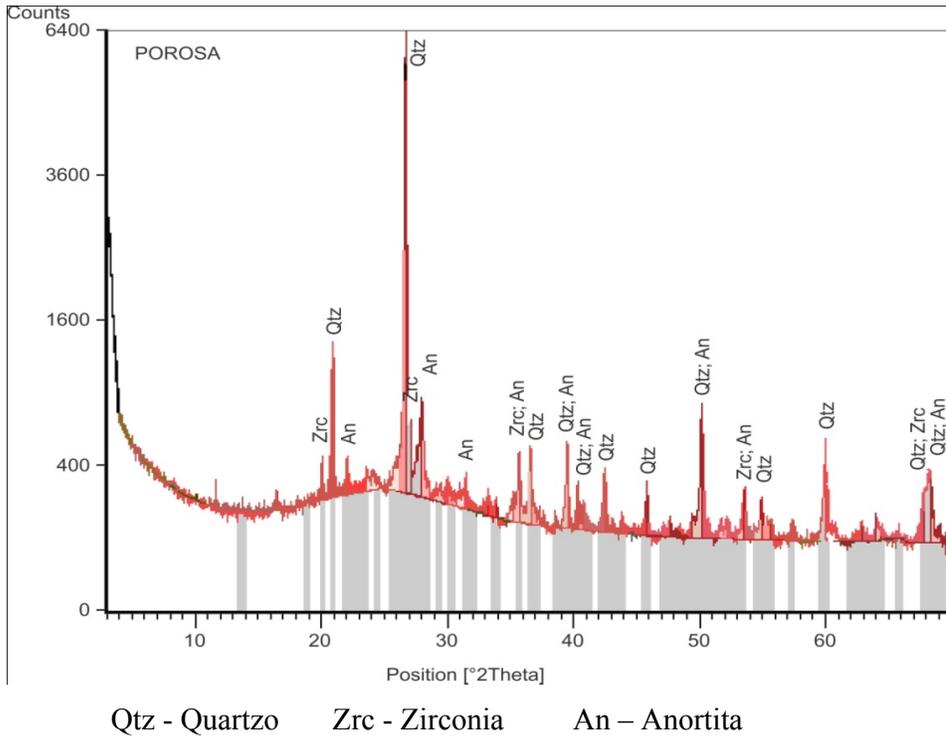


Figura 34 – Difratograma do resíduo cerâmico de cerâmica porosa.



A intensidade de picos característicos de cada mineral é proporcional a sua quantidade. O material cristalino apresenta um espectro com picos bem definidos. Já o material amorfo apresenta um espectro sem picos definidos. Os espectogramas da Difração de Raios X apresentam picos bem definidos de quartzo (SiO₂) e pequenas quantidades de sílica amorfa apresentando o resíduo ser uma estrutura basicamente cristalina. Além disso, observa-se em todos os resíduos a presença de zircônia e anortita.

A presença predominante de sílica nos resíduos corrobora os resultados obtidos nos ensaios para a determinação de atividade pozolânica, a qual somada à finura das partículas constituintes dos resíduos, influenciaram no concreto nos estados fresco e endurecido.

5.2 Caracterização dos Materiais Constituintes do Concreto

5.2.1 Cimento

5.2.1.1 Ensaio de Finura do Cimento

Os resultados dos ensaios para determinação do índice de finura do cimento conforme a NBRNM 11579/2012 (ABNT, 2012b) estão indicados na Tabela 23.

Tabela 23 - Resultados do ensaio de finura do cimento.

| Finura (75µm) | | |
|---------------|-----------|-----------|
| | Amostra 1 | Amostra 2 |
| I | 50 g | 50g |
| R | 0,838g | 0,886g |
| F | 1,68% | 1,77% |

A finura apresentada pelo cimento foi, em média, de 1,72%. Este valor está abaixo do índice máximo de finura sugerido pela Norma Técnica que é de 6%.

5.2.1.2 Massa Específica do Cimento

Os resultados dos ensaios para determinação da massa específica conforme a NBRNM 23/2001 (ABNT, 2001) do cimento estão indicados na Tabela 24.

Tabela 24 - Massa unitária e massa específica do cimento.

| Material | Amostra | Massa específica aparente (Kg/dm³) | Média (Kg/dm³) |
|-----------------|----------------|--|----------------------------------|
| Cimento | 1 | 3,10 | 3,09 |
| | 2 | 3,09 | |
| | 3 | 3,09 | |

5.2.2 Agregado Miúdo - Areia

5.2.2.1 Ensaio de Granulometria

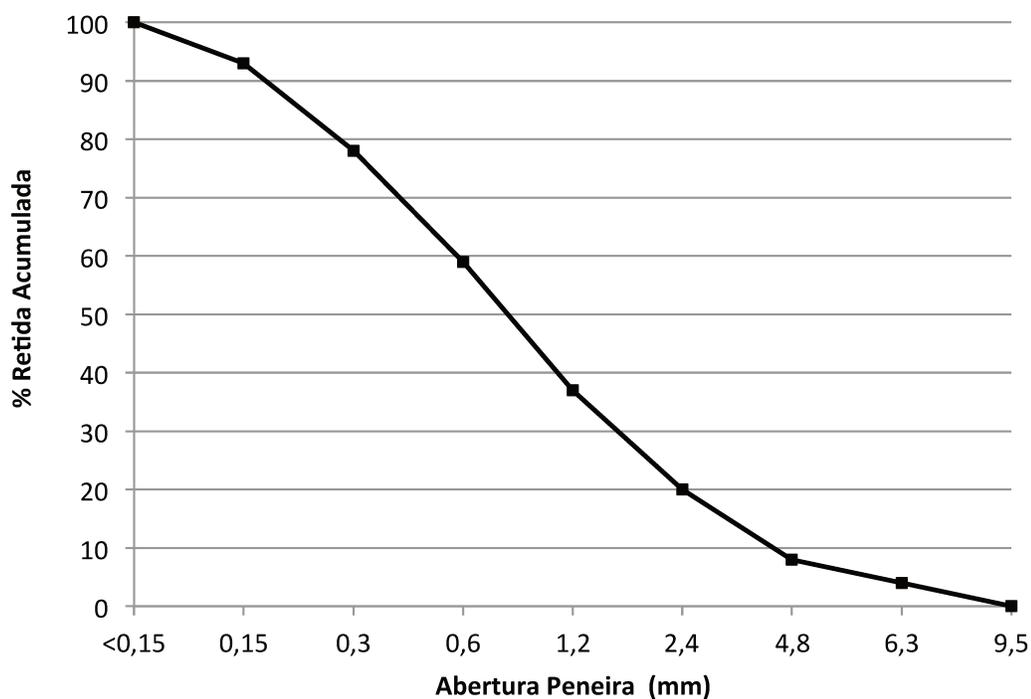
O ensaio de granulometria da areia foi realizado conforme a NBRNM 248/2003 (ABNT, 2003a) mediante a utilização de peneiras da série normal. A Tabela 25 ilustra os resultados obtidos no ensaio de granulometria da areia.

Tabela 25 – Composição granulométrica do agregado miúdo (areia).

| Diâmetro da Peneira (mm) | Material Retido (g) | Porcentagem Retida (%) | |
|---------------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------|
| | | Individual | Acumulada |
| 9,5 | 0,98 | 0 | 0 |
| 6,3 | 10,99 | 3 | 4 |
| 4,8 | 11,87 | 4 | 8 |
| 2,4 | 37,93 | 12 | 20 |
| 1,2 | 55,97 | 18 | 37 |
| 0,6 | 69,01 | 22 | 59 |
| 0,3 | 59,67 | 9 | 78 |
| 0,15 | 47,74 | 15 | 93 |
| <0,15 | 22,08 | 7 | 100 |
| Total | 316,27 | 100 | - |

Portanto a dimensão máxima característica da areia é de 6,3 mm e o módulo de finura calculado é de 2,95, atendendo as especificações da NBR 7211/2005 e classificando-se como agregado miúdo de granulometria médio grossa. A curva granulométrica da areia encontra-se na Figura 35.

Figura 35 – Curva granulométrica do agregado miúdo (areia).



5.2.2.2 Massa Específica e Massa Unitária

Os resultados dos ensaios para determinação da massa específica conforme a NBRNM 53/2009 (ABNT, 2009b) e da massa unitária conforme a NBRNM 45/2006 (ABNT, 2006a) da areia estão indicados na Tabela 26.

Tabela 26 – Massa unitária e específica do agregado miúdo (areia).

| Material | Amostra | Massa unitária (Kg/dm ³) | Média (Kg/dm ³) | Massa específica aparente (Kg/dm ³) | Média (Kg/dm ³) |
|----------|---------|---|--------------------------------|---|--------------------------------|
| Areia | 1 | 1,42 | | 2,58 | |
| | 2 | 1,43 | 1,43 | 2,60 | 2,61 |
| | 3 | 1,44 | | 2,65 | |

5.2.3 Agregado Miúdo – Pó de Pedra

5.2.3.1 Ensaio de Granulometria

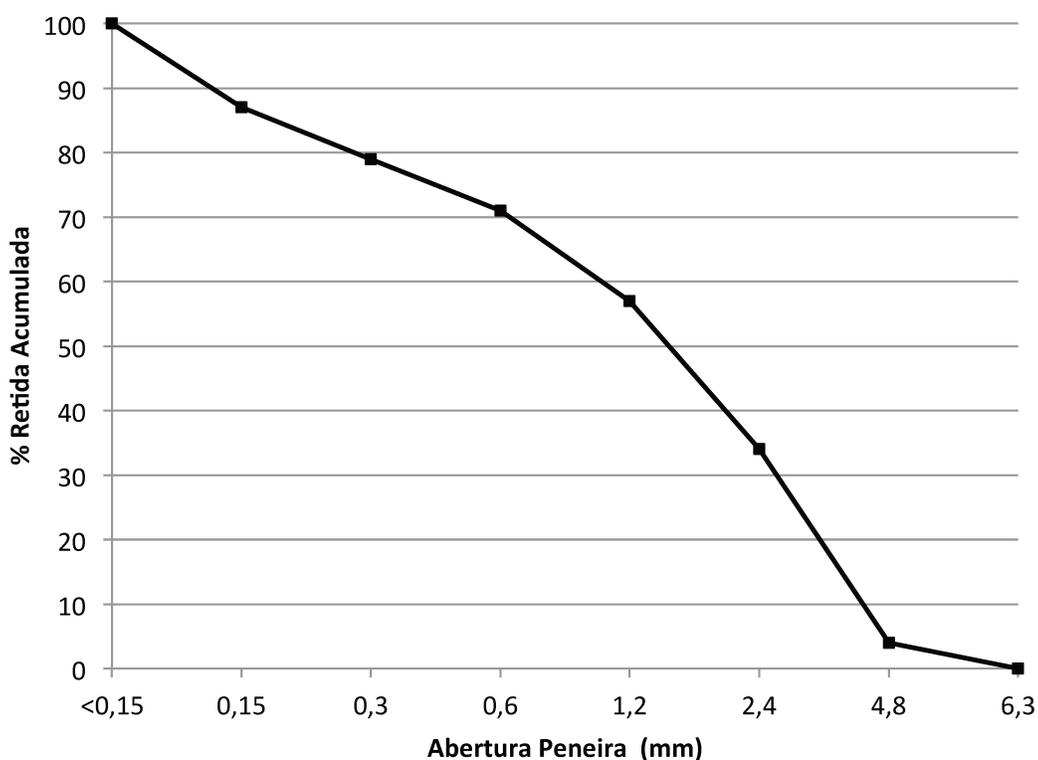
O ensaio de granulometria do pó de pedra foi realizado conforme a NBRNM 248/2003 (ABNT, 2003a) mediante a utilização de peneiras da série normal. A Tabela 27 ilustra os resultados obtidos no ensaio de granulometria do agregado miúdo.

Tabela 27 – Composição granulométrica do agregado miúdo (pó de pedra).

| Diâmetro da Peneira (mm) | Material Retido (g) | Porcentagem Retida (%) | |
|--------------------------|---------------------|------------------------|-----------|
| | | Individual | Acumulada |
| 4,8 | 13,35 | 4 | 4 |
| 2,4 | 112,23 | 31 | 34 |
| 1,2 | 87,66 | 23 | 57 |
| 0,6 | 46,13 | 13 | 71 |
| 0,3 | 31,92 | 9 | 79 |
| 0,15 | 25,88 | 7 | 87 |
| <0,15 | 48,65 | 13 | 100 |
| Total | 365,82 | 100 | |

Portanto a dimensão máxima característica pó de pedra é de 4,8 mm e o módulo de finura calculado é de 3,32 atendendo as especificações da NBR 7211/2005 e classificando-se como agregado miúdo de granulometria médio grossa. A curva granulométrica do pó de pedra encontra-se na Figura 36.

Figura 36 – Curva granulométrica do agregado miúdo (pó de pedra).



5.2.3.2 Massa Específica e Massa Unitária

Os resultados dos ensaios para determinação da massa específica conforme a NBRNM 52/2009 (ABNT, 2009a) e da massa unitária conforme a NBRNM 45/2006 (ABNT, 2006a) do pó de pedra estão indicados na Tabela 28.

Tabela 28 – Massa unitária e específica do agregado miúdo (pó de pedra).

| Material | Amostra | Massa unitária (Kg/dm ³) | Média (Kg/dm ³) | Massa específica aparente (Kg/dm ³) | Média (Kg/dm ³) |
|----------|---------|---|--------------------------------|---|--------------------------------|
| Areia | 1 | 1,57 | 1,58 | 2,62 | 2,64 |
| | 2 | 1,58 | | 2,64 | |
| | 3 | 1,60 | | 2,67 | |

5.2.4 Agregado graúdo

5.2.4.1 Ensaio de Granulometria

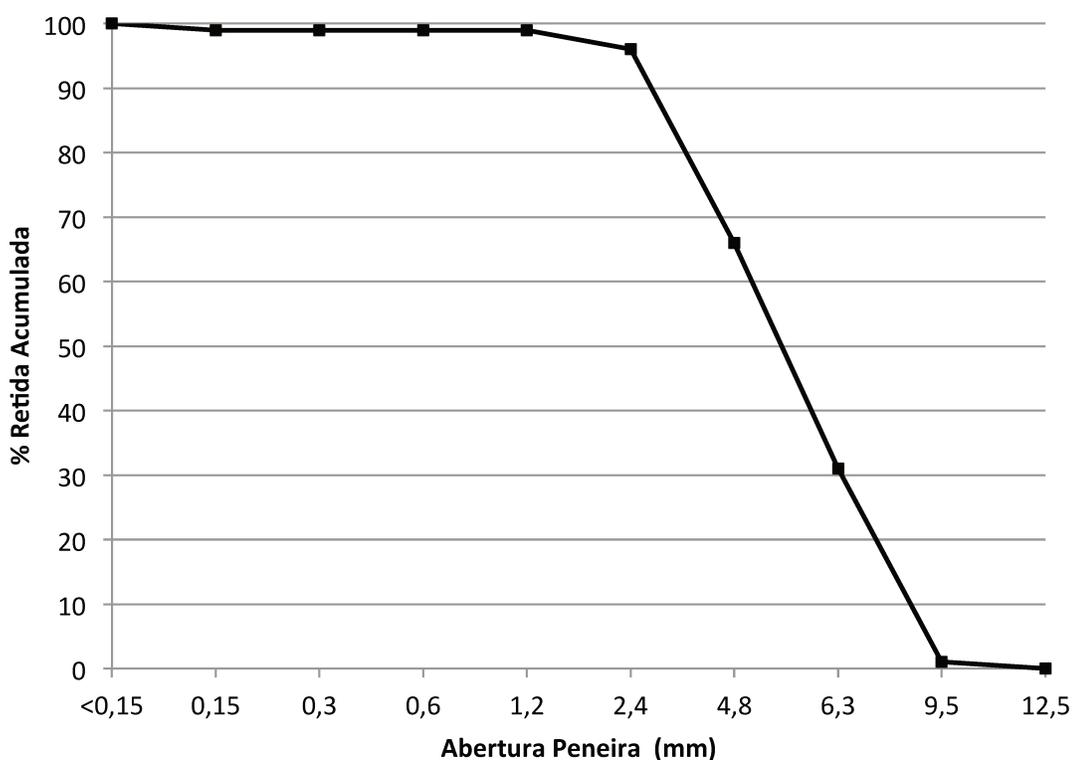
O ensaio de granulometria do agregado graúdo foi realizado conforme a NBRNM 248/2003 (ABNT, 2003a) mediante a utilização de peneiras da série normal. A Tabela 29 ilustra os resultados obtidos no ensaio de granulometria do agregado graúdo.

Tabela 29 – Composição granulométrica do agregado graúdo (brita).

| Diâmetro da Peneira (mm) | Material Retido (g) | Porcentagem Retida (%) | |
|--------------------------|---------------------|------------------------|-----------|
| | | Individual | Acumulada |
| 12,5 | 6,01 | 0 | 0 |
| 9,5 | 11,52 | 1 | 1 |
| 6,3 | 692,30 | 30 | 31 |
| 4,8 | 819,10 | 35 | 66 |
| 2,4 | 710,30 | 31 | 96 |
| 1,2 | 49,10 | 2 | 99 |
| 0,6 | 9,86 | 0 | 99 |
| 0,3 | 5,86 | 0 | 99 |
| 0,15 | 7,32 | 0 | 99 |
| <0,15 | 13,53 | 1 | 100 |
| Total | 2324,92 | 100 | |

Portanto, a dimensão máxima característica do agregado graúdo é de 9,5 mm e o módulo de finura calculado é de 5,58, atendendo as especificações da NBR 7211/2005 e classificando-se como agregado graúdo de granulometria média. A curva granulométrica do agregado graúdo (brita) está na Figura 37.

Figura 37 – Curva granulométrica do agregado graúdo (brita).



5.2.4.2 Massa Específica e Massa Unitária

Os resultados dos ensaios para determinação da massa específica conforme a NBRNM 53/2009 (ABNT, 2009b) e da massa unitária conforme a NBRNM 45/2006 (ABNT, 2006a) do agregado graúdo estão indicados na Tabela 30.

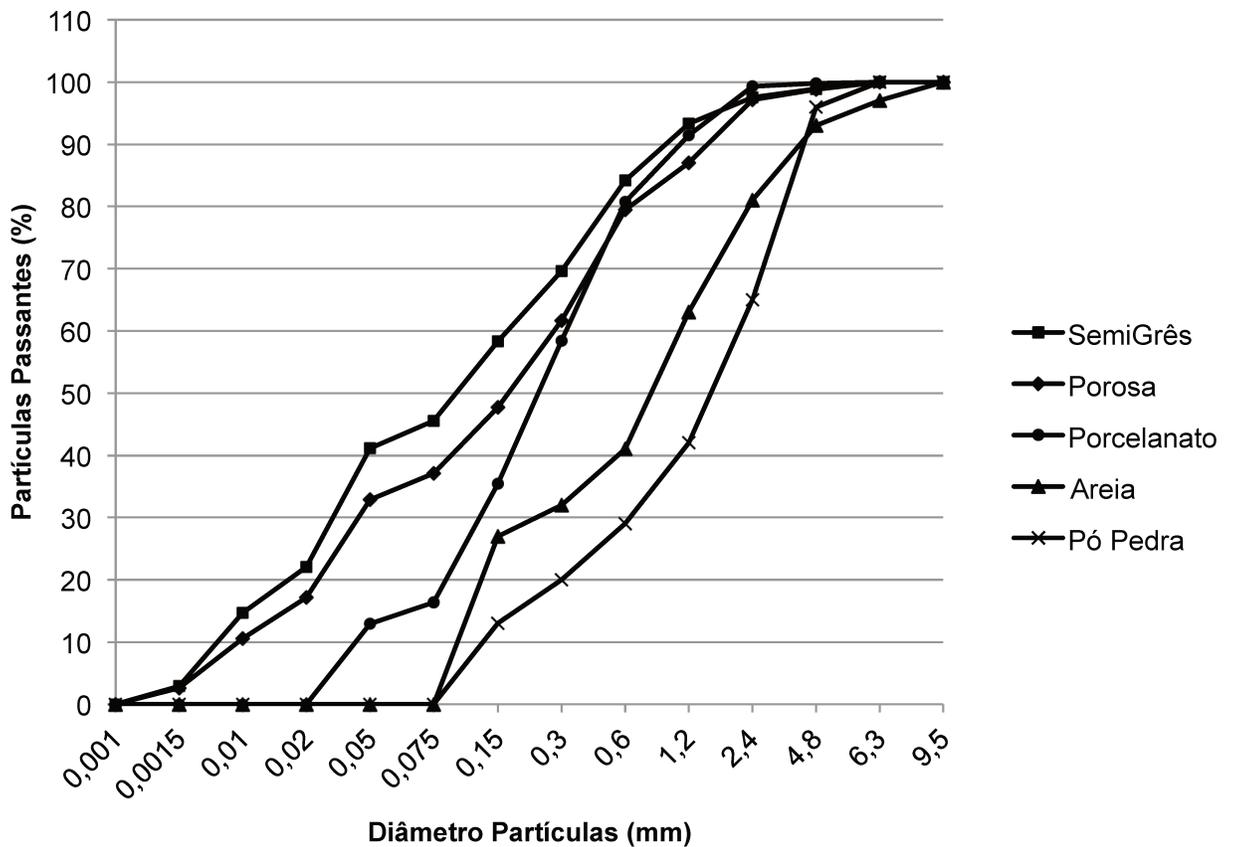
Tabela 30 – Massa unitária e específica do agregado graúdo (brita).

| Material | Amostra | Massa unitária (Kg/dm ³) | Média (Kg/dm ³) | Massa específica aparente (Kg/dm ³) | Média (Kg/dm ³) |
|----------|---------|---|--------------------------------|---|--------------------------------|
| Brita | 1 | 1,39 | 1,39 | 2,85 | 2,93 |
| | 2 | 1,39 | | 2,91 | |
| | 3 | 1,40 | | 3,02 | |

5.2.5 Distribuição Granulométrica

A distribuição granulométrica do material particulado presente nas misturas de concreto maximiza a densidade de empacotamento das partículas, promovendo a continuidade da granulometria e influenciando diretamente nas propriedades do concreto como resistência mecânica e durabilidade. A Figura 38 mostra a distribuição granulométrica dos resíduos e do agregado miúdo.

Figura 38 – Distribuição granulométrica dos resíduos e agregados miúdos



5.3 Caracterização do Concreto

5.3.1 Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone

A determinação da plasticidade do concreto pelo método do abatimento do tronco de cone consiste em um parâmetro para identificar a trabalhabilidade do material, ou seja, avaliar a possibilidade do concreto ser utilizado em uma determinada situação prática. Para cada proporção de incorporação dos resíduos estudados foi realizado um ensaio de abatimento com o objetivo de determinar a consistência do concreto antes da sua moldagem. Os ensaios foram realizados à sombra e a temperatura medida. O concreto de referência sem a incorporação de resíduos apresentou um abatimento de 150 mm. Os resultados do abatimento do concreto com a incorporação dos resíduos em substituição à areia estão demonstrados na Tabela 31.

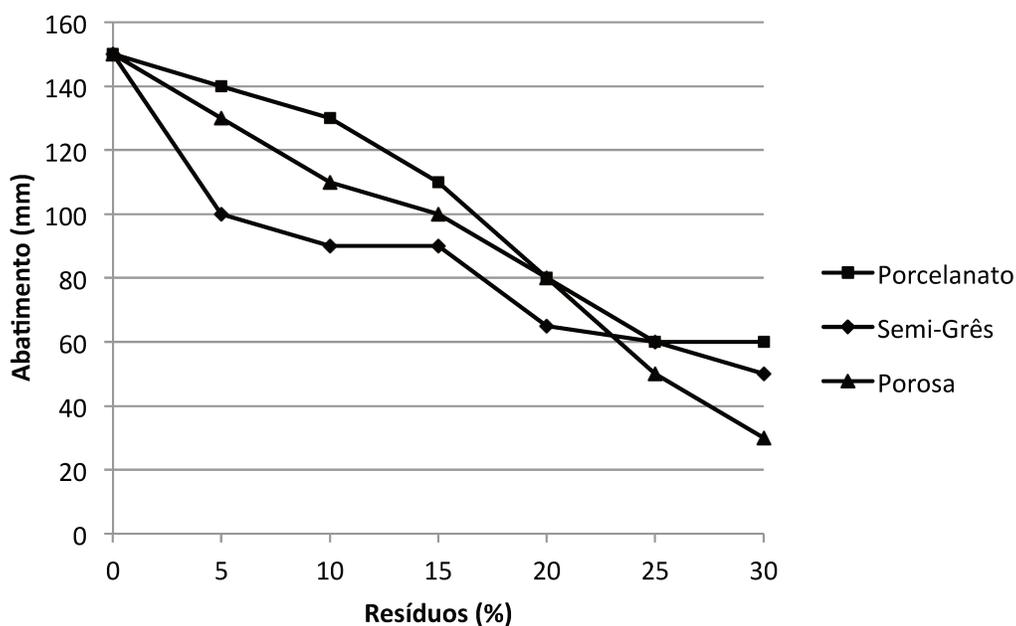
Tabela 31 – Valores de abatimento com a incorporação dos resíduos em substituição parcial do agregado miúdo.

| % Incorp. | Abatimento Resíduos (mm) | | |
|--------------|--------------------------|-----------|--------|
| | Porcelanato | Semi-Grês | Porosa |
| 5 | 140 | 100 | 130 |
| 10 | 130 | 90 | 110 |
| 15 | 110 | 90 | 100 |
| 20 | 80 | 65 | 80 |
| 25 | 60 | 60 | 50 |
| 30 | 60 | 50 | 30 |

Os resultados obtidos mostram um decréscimo do abatimento do concreto na medida em que aumenta as proporções de incorporação dos resíduos. Na proporção de 5% de incorporação o resíduo de cerâmica semi-grês apresentou um abatimento de 100 mm influenciando o concreto de forma mais significativa em relação aos demais resíduos. Na proporção de 30% de incorporação o resíduo de cerâmica porosa apresentou um abatimento de 30 mm indicando uma mistura de pouca

trabalhabilidade, porém sem comprometer a moldagem das peças. A Figura 39 apresenta o abatimento do concreto com a incorporação das diversas proporções dos resíduos em substituição parcial à areia.

Figura 39 – Abatimento do concreto produzido com a incorporação dos resíduos em substituição parcial à areia.



Os resultados obtidos nos ensaios de abatimento do concreto confirmam a granulometria mais fina dos resíduos de cerâmica porosa e semi-grês com relação ao resíduo de porcelanato, onde os primeiros possuem uma maior capacidade de absorção de água.

Os resultados do abatimento do concreto com a incorporação do resíduo de porcelanato em substituição parcial ao cimento estão demonstrados na Tabela 32.

Tabela 32 – Valores de abatimento com a incorporação do resíduo de porcelanato em substituição parcial do cimento.

| Resíduo | Incorporação (%) | Abatimento (mm) |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| Controle | 0 | 150 |
| | 5 | 120 |
| Porcelanato (cimento) | 10 | 90 |
| | 15 | 80 |
| | 20 | 80 |
| | 25 | 70 |
| | 30 | 70 |

Os resultados obtidos nos ensaios de abatimento permitem inferir que a incorporação parcial do resíduo de porcelanato em substituição do cimento interfere na plasticidade do concreto. Observa-se uma redução da consistência do concreto à medida que se aumenta a incorporação dos resíduos.

5.3.2 Ensaio de Resistência à Compressão Axial

A resistência mecânica é uma das propriedades que caracteriza o concreto do estado endurecido, a qual é medida através do ensaio de compressão axial com o objetivo de compreender a evolução deste parâmetro com a incorporação parcial dos resíduos cerâmicos.

5.3.2.1 Resíduo de Porcelanato em Substituição à Areia

Os resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias indicam que a substituição do agregado miúdo pelo resíduo de porcelanato altera o comportamento do concreto proporcionando um aumento em sua resistência mecânica à medida que aumenta as proporções de incorporação, com exceção da proporção de 5% de incorporação, a qual se apresenta ligeiramente abaixo do concreto de referência. Análise estatística por ANOVA/Tuckey apresenta significância entre as médias obtidas nos ensaios de resistência à compressão com a incorporação do resíduo nas

proporções de 25% e 30% em relação à média do concreto de referência. As proporções de 5% a 20% de incorporação do resíduo não apresentam significância estatística.

A Tabela 33 apresenta as proporções de incorporação do resíduo de porcelanato em substituição ao agregado miúdo e suas respectivas médias de resistência, bem como a sua significância estatística.

Tabela 33 – Médias de resistência à compressão das peças pré-moldadas na idade de 28 dias.

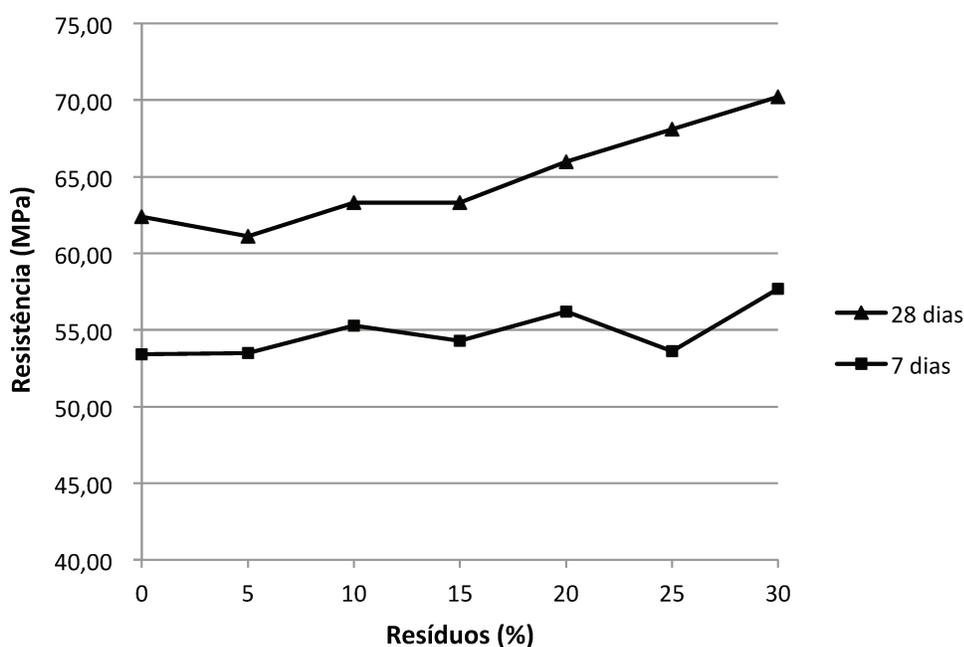
| | Média (MPa) | Desvio Padrão | Repetições (n) | Significância Estatística |
|----|------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| 0 | 62,40 | 3,35 | 21 | |
| 5 | 61,10 | 3,20 | 7 | n.s |
| 10 | 63,30 | 3,90 | 7 | n.s |
| 15 | 63,30 | 1,90 | 7 | n.s |
| 20 | 66,00 | 4,20 | 7 | n.s |
| 25 | 68,10 | 1,90 | 7 | s |
| 30 | 70,20 | 3,20 | 7 | s |

n.s. = não significativo em relação ao controle ($p > 0,05$)

s = significativo em relação ao controle ($p < 0,05$)

Na avaliação dos resultados, observa-se que a incorporação do resíduo na proporção de 5% apresenta uma redução de 2,08% em relação a média do concreto de referência. A incorporação do resíduo na proporção de 10% obteve um aumento da resistência mecânica de 1,44% e de 12,5% na proporção de 30% em relação ao concreto de referência. Tanto o controle como o concreto com a incorporação de resíduo atingem o limite máximo de 50 MPa para as solicitações de tráfego de veículos especiais conforme a norma NBR-9781/1987 (ABNT, 1987b). A Figura 40 apresenta as médias de resistência aos 7 e 28 dias e mostra uma tendência de aumento na resistência mecânica à medida que se aumenta a proporção do resíduo, sendo que o melhor desempenho foi obtido com a proporção de 30% de incorporação em substituição ao agregado miúdo.

Figura 40 – Resistência à compressão das peças pré-moldadas na idade de 7 e 28 dias.



Pode-se afirmar que a atividade pozolânica apresentada pelo resíduo de porcelanato, contribuiu de forma significativa para o aumento da resistência mecânica das peças pré-moldadas de concreto, principalmente nas proporções de 25% e 30% de incorporação em substituição ao agregado miúdo. Além da possível reação pozolânica da sílica presente no resíduo com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, o efeito físico (filler) proporcionado pelos grãos finos do resíduo permitiram um melhor empacotamento com as partículas de cimento diminuindo a porosidade e a permeabilidade da matriz cimentícia e contribuindo para o incremento da resistência mecânica.

Esta constatação pode ser observada também na pesquisa realizada por Cabral et al. (2010) que investigaram a influência da incorporação do resíduo de tijolos cerâmicos provenientes de demolição como substituto parcial do agregado miúdo na produção de concreto e concluíram que a substituição na proporção de 100% dos agregados naturais pelo resíduo resultou em um aumento de 14% da resistência mecânica em relação ao concreto de referência. Segundo os autores, isto pode ter ocorrido devido as reações pozolânicas, as quais melhoram a zona de transição interfacial entre a pasta e o agregado favorecendo as propriedades mecânicas de concretos e argamassas.

Higashiyama et al. (2012) realizou estudos acerca da incorporação parcial de resíduo cerâmico de isoladores elétricos como substituto parcial do agregado miúdo na produção de argamassas e constataram um aumento da resistência nas proporções de 10%, 20% e 30% aos 28 dias, comparados à argamassa controle sem a incorporação de resíduo. Da mesma forma, Souza (2007) investigou o comportamento mecânico do concreto com a adição do resíduo do polimento de porcelanato no concreto e obtiveram um aumento gradual da resistência à compressão à medida que a quantidade do resíduo aumenta nos traços do concreto.

Foi observado nesta pesquisa que a substituição parcial do agregado miúdo pelo resíduo de porcelanato altera significativamente o comportamento mecânico do concreto nas maiores proporções de incorporação. As dosagens das peças pré-moldadas de concreto que obtiveram as maiores resistências foram as que apresentaram capacidade de absorção de água mais baixa.

5.3.2.2 Resíduo de Cerâmica Semi-Grês em Substituição à Areia

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias, a incorporação parcial do resíduo de cerâmica semi-grês em substituição ao agregado miúdo proporciona um aumento em sua resistência mecânica nas proporções de 5% e 10% de incorporação em relação ao concreto de referência. A partir de 15% de incorporação o concreto apresenta redução em sua resistência mecânica embora todas as médias permaneçam próximas a média do concreto de referência. A análise estatística realizada por ANOVA/Tuckey não apresenta significância nas médias com a incorporação do resíduo em relação à média do concreto de referência.

A Tabela 34 apresenta as proporções de incorporação do resíduo de cerâmica semi-grês em substituição ao agregado miúdo e suas respectivas médias de resistência, bem como a sua significância estatística.

Tabela 34 – Médias de resistência à compressão das peças pré-moldadas na idade de 28 dias.

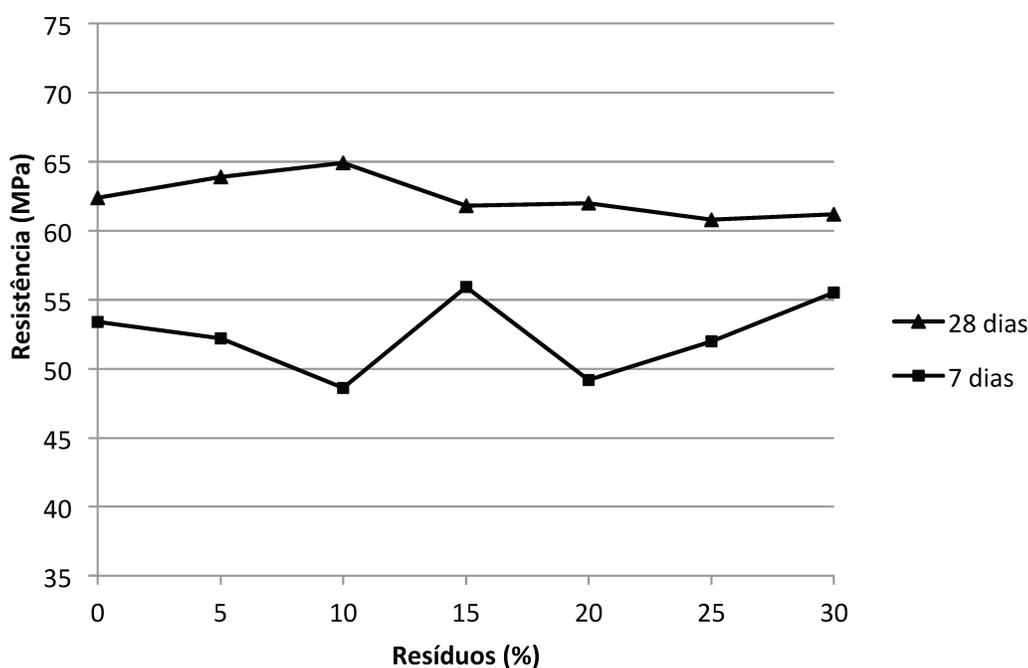
| Resíduo (%) | Média (MPa) | Desvio Padrão | Repetições (n) | Significância Estatística |
|--------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 0 | 62,40 | 3,35 | 21 | |
| 5 | 63,90 | 3,40 | 7 | n.s |
| 10 | 64,90 | 2,10 | 7 | n.s |
| 15 | 61,80 | 3,60 | 7 | n.s |
| 20 | 62,00 | 1,90 | 7 | n.s |
| 25 | 60,80 | 2,80 | 7 | n.s |
| 30 | 61,20 | 3,20 | 7 | n.s |

n.s. = não significativo em relação ao controle ($p > 0,05$)

Na avaliação dos resultados, observa-se que a incorporação do resíduo proporcionou um pequeno aumento 2,35% e 4,0% na resistência mecânica das peças pré-moldadas em relação ao concreto de referência nas proporções de 5% e 10% respectivamente. O maior índice de redução da resistência foi de 2,6%, a qual ocorreu com a proporção de 25% de incorporação do resíduo.

Tanto o concreto de referência como o concreto com a incorporação de resíduo atingem o limite máximo de 50 MPa para as solicitações de tráfego de veículos especiais conforme a norma NBR-9781/1987 (ABNT, 1987b). O comportamento do concreto com a incorporação do resíduo mostra uma tendência de redução na resistência mecânica à medida que aumenta a proporção do resíduo na idade de 28 dias. A Figura 41 apresenta as médias de resistência aos 7 e 28 dias.

Figura 41 – Resistência à compressão na idade de 7 e 28 dias



Embora tenha ocorrido um pequeno aumento na resistência nas proporções de 5% e 10%, a substituição parcial do agregado miúdo pelo resíduo de cerâmica semi-grês apresenta tendência de redução da resistência com as médias de incorporação situadas próximas do controle. Possivelmente a quantidade de grãos finos presentes no resíduo de cerâmica semi-grês, proporcionou uma maior demanda de água para a hidratação, reduzindo a sua consistência e influenciando na compactação da mistura. De acordo com Fernandes (2012), quando o produto possui grande quantidade de finos com dimensão menor que 0,074 mm, este pó atua como inerte, concorrendo com o cimento e diminuindo a resistência do concreto.

Na pesquisa desenvolvida por Pacheco-Torgal e Jalali (2010) onde foi investigada a incorporação dos resíduos da indústria cerâmica de revestimentos na produção de concreto, observa-se que a substituição do agregado miúdo na proporção de 100% não afetou a resistência mecânica em relação ao concreto de referência na idade de 28 dias.

As dosagens das peças pré-moldadas de concreto que obtiveram as maiores resistências foram as que apresentaram capacidade de absorção de água mais baixa.

5.3.2.3 Resíduo de Cerâmica Porosa em Substituição à Areia

Os resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias indicam que a substituição do agregado miúdo pelo resíduo de cerâmica porosa altera o comportamento do concreto proporcionando um decréscimo em sua resistência mecânica a medida que aumenta as proporções de incorporação, com exceção das proporções de 10% e 30% de incorporação, as quais se apresentam ligeiramente acima do concreto de referência. Análise estatística realizada por ANOVA/Tuckey não apresenta significância entre as médias obtidas nos ensaios de resistência à compressão com a incorporação do resíduo em relação à média do concreto de referência.

A Tabela 35 apresenta as proporções de incorporação do resíduo de cerâmica porosa em substituição ao agregado miúdo e suas respectivas médias de resistência, bem como a sua significância estatística.

Tabela 35 – Médias de resistência à compressão das peças pré-moldadas na idade de 28 dias.

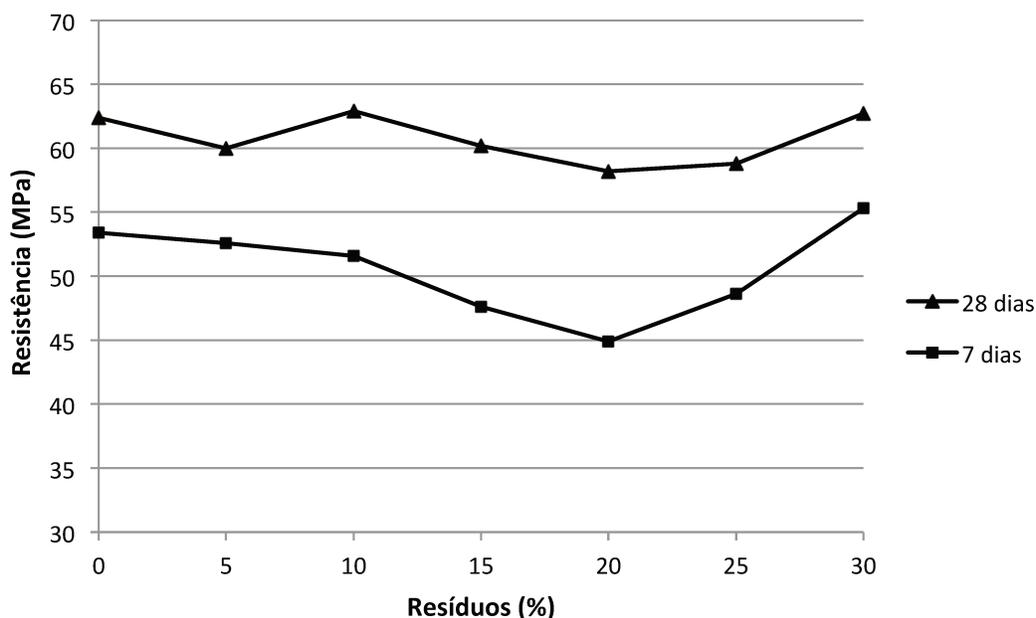
| Resíduo (%) | Média (MPa) | Desvio Padrão | Repetições (n) | Significância Estatística |
|--------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 0 | 62,40 | 3,35 | 21 | |
| 5 | 60,00 | 3,60 | 7 | n.s |
| 10 | 62,90 | 3,90 | 7 | n.s |
| 15 | 60,20 | 4,00 | 7 | n.s |
| 20 | 58,20 | 2,30 | 7 | n.s |
| 25 | 58,80 | 4,80 | 7 | n.s |
| 30 | 62,70 | 4,00 | 7 | n.s |

n.s. = não significativo em relação ao controle ($p > 0,05$)

Observa-se que a incorporação do resíduo apresenta um aumento 0,8% e 0,5% na resistência mecânicas das peças pré-moldadas em relação ao concreto de referência nas proporções de 10% e 30% respectivamente. Tanto o controle como o concreto com a incorporação de resíduo atingem o limite máximo de 50 MPa para as solicitações de tráfego de veículos especiais conforme

a norma NBR-9781/1987 (ABNT, 1987b). A Figura 42 apresenta as médias de resistência aos 7 e 28 dias.

Figura 42 – Resistência à compressão das peças pré-moldadas nas idades de 7 e 28 dias.

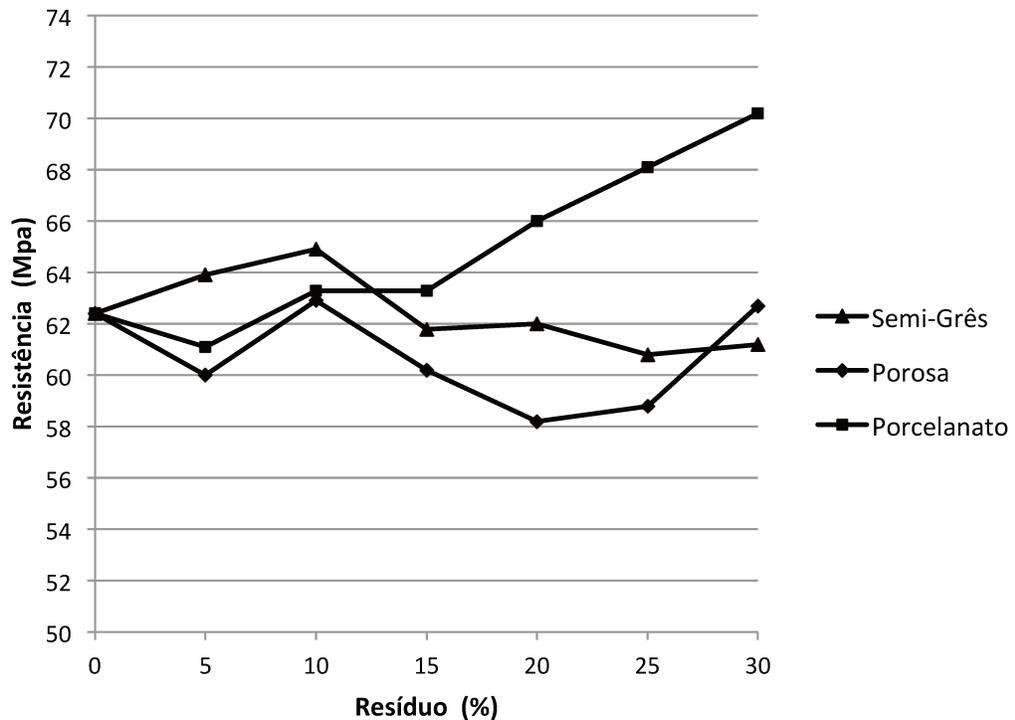


O comportamento do concreto com a incorporação do resíduo mostra uma tendência de redução na resistência mecânica nas proporções intermediárias à medida que se aumenta a incorporação do resíduo, embora as médias se apresentem próximas do controle não apresentando significância estatística, o que também foi observado por Pacheco-Torgal e Jalali (2010) e citado no item anterior.

Por outro lado, estudos realizados por Poon et al. (2006) e Jankovic et al. (2012) concluíram que a incorporação de resíduos de tijolos de argila moídos provenientes de demolição, substituindo parcialmente o agregado miúdo natural na produção de concreto para pisos intertravados reduziu a resistência à compressão a medida que aumentava a incorporação do resíduo. As dosagens das peças pré-moldadas de concreto que obtiveram as maiores resistências foram as que apresentaram absorção e porosidade mais baixas.

A Figura 43 apresenta a comparação das médias de resistência à compressão aos 28 dias com a incorporação dos resíduos em substituição parcial ao agregado miúdo.

Figura 43 - Comparação das médias de resistência à compressão aos 28 dias com a incorporação dos resíduos em substituição parcial ao agregado miúdo.



5.3.2.4 Resíduo de Porcelanato em Substituição ao Cimento

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias, a incorporação parcial do resíduo de porcelanato em substituição ao cimento proporciona uma redução em sua resistência mecânica à medida que aumenta as proporções de incorporação, com exceção da proporção de 5% de incorporação, a qual se apresenta ligeiramente acima do concreto de referência. As médias obtidas nos ensaios de resistência à compressão com a incorporação do resíduo nas proporções a partir de 15% em relação à média do concreto de referência, apresenta significância de acordo com análise estatística. As proporções de 5% e 10% de incorporação do resíduo não apresentam significância estatística.

A Tabela 36 apresenta as proporções de incorporação do resíduo de porcelanato em substituição ao cimento e suas respectivas médias de resistência, bem como a sua significância estatística.

Tabela 36 – Médias de resistência à compressão das peças pré-moldadas na idade de 28 dias

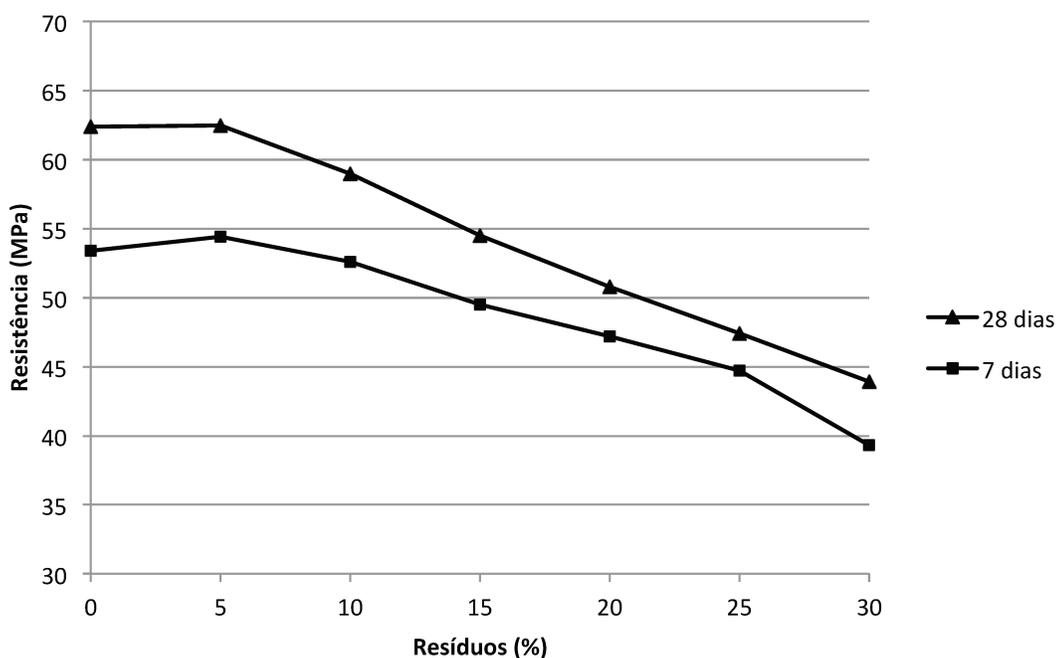
| Resíduo (%) | Média (MPa) | Desvio Padrão | Repetições (n) | Significância Estatística |
|--------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 0 | 62,40 | 3,35 | 21 | |
| 5 | 62,50 | 3,60 | 7 | n.s |
| 10 | 59,00 | 5,00 | 7 | n.s |
| 15 | 54,50 | 2,80 | 7 | s |
| 20 | 50,80 | 3,40 | 7 | s |
| 25 | 47,40 | 2,40 | 7 | s |
| 30 | 43,90 | 2,50 | 7 | s |

n.s. = não significativo em relação ao controle ($p > 0,05$)

s = significativo em relação ao controle ($p < 0,05$)

Na avaliação dos resultados, observa-se que a incorporação do resíduo teve como consequência um decréscimo de 5,45% e 29,65% na resistência mecânica das peças pré-moldadas nas proporções de 10% e 30% respectivamente, em relação ao concreto de referência. Tanto o controle como o concreto com a incorporação de resíduo nas proporções de até 20% atingem o limite máximo de 50 MPa para as solicitações de tráfego de veículos especiais conforme a norma NBR-9781/1987 (ABNT, 1987b). No entanto, com a incorporação do resíduo o comportamento do concreto mostra uma tendência de redução na resistência mecânica à medida que aumenta a proporção do resíduo nas idades de 7 e 28 dias conforme mostra a Figura 44.

Figura 44 – Resistência à compressão das peças pré-moldadas nas idades de 7 e 28 dias.



Pode-se afirmar que, embora o resíduo de porcelanato tenha apresentado atividade pozolânica, esta contribuição quando em substituição ao cimento, não é significativa o suficiente para manter os níveis de resistência mecânica próximas ao controle, principalmente nas proporções de 15% a 30% de incorporação.

Esta constatação pode ser observada também na pesquisa desenvolvida por Pacheco-Torgal e Jalali (2010) cujo estudo conclui que a substituição parcial de 20% do cimento pelo resíduo da indústria cerâmica de revestimentos reduziu a resistência em 20% em relação ao concreto de referência na idade de 28 dias. Da mesma forma, Evangelista et al. (2006) observaram um decréscimo da resistência mecânica de até 64% nas substituições do cimento pelo resíduo cerâmico da produção de louças sanitárias. No entanto, segundo os autores, os elevados teores de sílica e alumínio presentes no resíduo, indicam que este poderia apresentar atividade pozolânica. Jacoby (2011) estudando a incorporação de resíduo do polimento de porcelanato em substituição ao cimento na produção de argamassas não observou alteração na resistência mecânica aos 28 dias.

Foi observado nesta pesquisa que a substituição parcial do cimento pelo resíduo de porcelanato altera significativamente o comportamento mecânico do concreto nas maiores

proporções de incorporação. As dosagens das peças pré-moldadas de concreto que obtiveram as menores resistências foram as que apresentaram absorção e porosidade mais altas.

5.3.3 Ensaio de Absorção de Água

A porosidade é uma característica fundamental do concreto, pois o volume e o tamanho dos poros e canais capilares no seu interior interferem diretamente na sua durabilidade. A permeabilidade do concreto indica a maior ou menor capacidade de penetração e absorção de substâncias danosas à estrutura dos concretos. Para a avaliação da absorção e porosidade foram aferidas as massas das peças pré-moldadas de concreto nos estados seco, saturado e em imersão.

A Tabela 37 apresenta os resultados de absorção e porosidade com as diferentes proporções de incorporação do resíduo de porcelanato em substituição do agregado miúdo e suas respectivas médias, bem como as suas significâncias estatísticas.

Tabela 37 – Absorção e porosidade com a incorporação do resíduo de porcelanato em substituição ao agregado miúdo e as respectivas significâncias estatísticas.

| Resíduo | Incorp. (%) | Absorção (%) | | Média | Signif. Estatíst. | Poros (%) | | Média | Signif. Estatíst. |
|---------------------|-------------|--------------|--------|-------|-------------------|-----------|--------|-------|-------------------|
| | | Piso 1 | Piso 2 | | | Piso 1 | Piso 2 | | |
| Controle | 0 | 5,19 | 5,24 | 5,22 | | 12,04 | 12,11 | 12,07 | |
| | 5 | 5,81 | 5,74 | 5,78 | s | 12,98 | 12,64 | 12,81 | s |
| | 10 | 5,31 | 5,43 | 5,37 | n.s | 12,32 | 12,55 | 12,44 | n.s |
| Porcelanato (Areia) | 15 | 5,05 | 4,92 | 4,99 | n.s | 11,83 | 11,63 | 11,73 | n.s |
| | 20 | 4,86 | 4,89 | 4,88 | s | 11,22 | 11,23 | 11,22 | s |
| | 25 | 5,08 | 4,86 | 4,97 | n.s | 11,89 | 11,22 | 11,55 | n.s |
| | 30 | 4,67 | 4,73 | 4,70 | s | 10,88 | 11,10 | 10,99 | s |

n.s. = não significativo em relação ao controle ($p > 0,05$)
s = significativo em relação ao controle ($p < 0,05$)

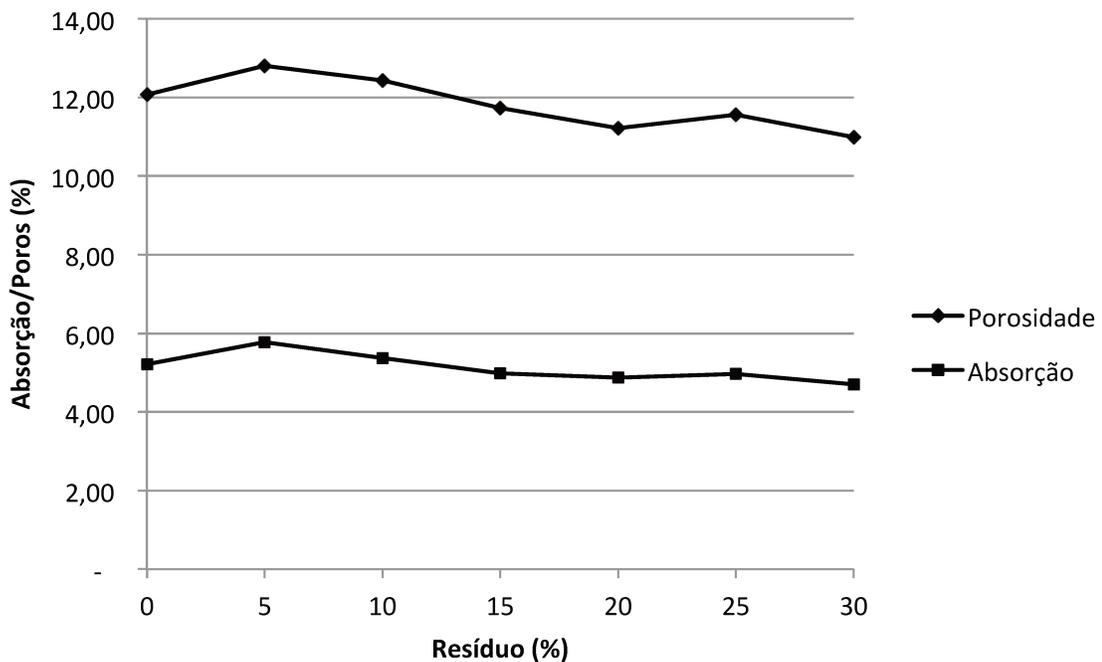
A análise dos resultados obtidos demonstra que as peças pré-moldadas de concreto apresentam redução da absorção e da porosidade à medida que aumenta a incorporação do resíduo de porcelanato em substituição ao agregado miúdo, com exceção das incorporações de 5% e 10%.

O concreto de referência sem a incorporação de resíduo apresentou uma absorção média de 5,22 % e porosidade média de 12,07%. As peças pré-moldadas de concreto apresentaram um aumento da absorção em relação ao controle de 10,73% e 2,87% nas proporções de incorporação de 5% e 10%, respectivamente. A porosidade apresentou um aumento de 6,13% e de 3,07% nas proporções de 5% e 10%, respectivamente.

A partir da incorporação de 15% do resíduo de porcelanato em substituição ao agregado miúdo observa-se um decréscimo da absorção e da porosidade à medida que aumenta a incorporação do resíduo. Na incorporação do resíduo nas proporções de 30% observou-se uma redução da absorção de 9,96% e da porosidade de 8,99% em relação ao controle.

As médias de absorção e porosidade aos 28 dias com a incorporação do resíduo de porcelanato em substituição ao agregado miúdo estão representadas na Figura 45.

Figura 45 – Médias de absorção e porosidade aos 28 dias com a incorporação do resíduo de porcelanato em substituição ao agregado miúdo.



Os resultados obtidos nos ensaios de absorção e porosidade permitem inferir que o resíduo de porcelanato nas maiores proporções de incorporação contribuiu para maior empacotamento das partículas finas presente no resíduo, contribuindo com o preenchimento dos vazios existentes na mistura e tornando o material menos poroso e mais resistente a entrada de líquidos corroborando os resultados obtidos por Silva (2005); Carrijo (2005); Souza (2007).

Observa-se que todas as proporções de incorporação apresentaram valores de absorção de água inferiores a 6% enquadrando-se dentro dos padrões internacionais conforme menciona Fioriti (2007).

A Tabela 38 apresenta os resultados de absorção e porosidade com as diferentes proporções de incorporação do resíduo de cerâmica semi-grês em substituição do agregado miúdo e suas respectivas médias, bem como as suas significâncias estatísticas.

Tabela 38 – Absorção e porosidade com a incorporação do resíduo de cerâmica semi-grês em substituição do agregado miúdo e as respectivas significâncias estatísticas.

| Resíduo | Incorp. (%) | Absorção (%) | | Média | Signif. Estatíst. | Poros (%) | | Média | Signif. Estatíst. |
|-------------------|-------------|--------------|--------|-------|-------------------|-----------|--------|-------|-------------------|
| | | Piso 1 | Piso 2 | | | Piso 1 | Piso 2 | | |
| Controle | 0 | 5,19 | 5,24 | 5,22 | | 12,04 | 12,11 | 12,07 | |
| | 5 | 5,12 | 5,04 | 5,08 | n.s | 12,07 | 11,56 | 11,82 | n.s |
| | 10 | 5,22 | 5,14 | 5,18 | n.s | 11,98 | 11,83 | 11,91 | n.s |
| Semi-Grês (Areia) | 15 | 5,11 | 5,09 | 5,10 | n.s | 12,49 | 11,70 | 12,10 | n.s |
| | 20 | 5,18 | 5,08 | 5,13 | n.s | 12,71 | 11,80 | 12,26 | n.s |
| | 25 | 5,12 | 5,22 | 5,17 | n.s | 12,14 | 11,90 | 12,02 | n.s |
| | 30 | 4,95 | 5,20 | 5,07 | n.s | 11,36 | 12,04 | 11,70 | n.s |

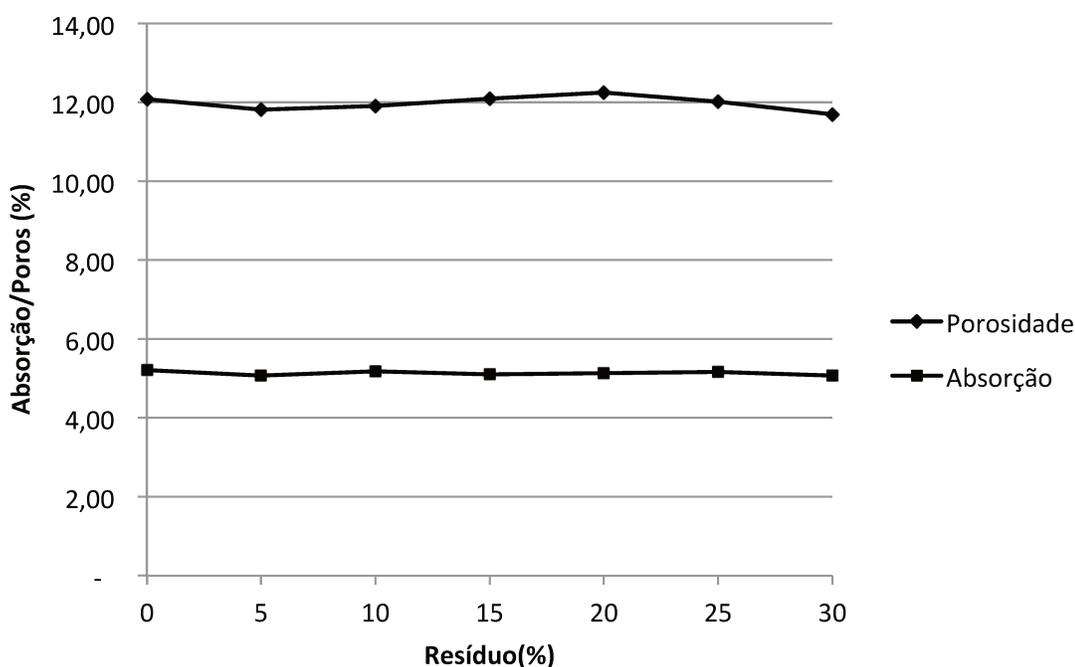
n.s. = não significativo em relação ao controle ($p > 0,05$)

As peças pré-moldadas de concreto apresentam redução da absorção à medida que aumenta a incorporação do resíduo de cerâmica semi-grês. Em relação ao concreto de referência sem a incorporação de resíduo, as proporções de 5% e 30% apresentaram reduções de 2,76%. Observou-

se um decréscimo da porosidade à medida que aumenta a incorporação do resíduo com exceção das proporções de 15% e 20% as quais apresentaram médias acima do controle. A incorporação do resíduo nas proporções de 5% e 10% apresentou reduções da porosidade de 2,12% e 3,07% respectivamente, em relação ao controle sem a incorporação de resíduo.

As médias de absorção e porosidade aos 28 dias com a incorporação do resíduo de cerâmica semi-grês em substituição ao agregado miúdo estão representadas na Figura 46.

Figura 46 - Médias de absorção e porosidade as 28 dias com a incorporação do resíduo de cerâmica semi-grês em substituição ao agregado miúdo.



Como pode ser observado pelas pequenas variações entre as médias de absorção e porosidade com relação ao concreto de referência, a incorporação do resíduo de cerâmica semi-grês não contribuiu com o preenchimento dos vazios existentes na mistura, não alterando significativamente a permeabilidade das peças pré-moldadas de concreto.

A Tabela 39 apresenta os resultados de absorção e porosidade com as diferentes proporções de incorporação do resíduo de cerâmica porosa em substituição do agregado miúdo e suas respectivas médias, bem como as suas significâncias estatísticas.

Tabela 39 – Absorção e porosidade com a incorporação do resíduo de cerâmica porosa em substituição do agregado miúdo e as respectivas significâncias estatísticas.

| Resíduo | Incorp. (%) | Absorção (%) | | Média | Signif. Estatíst. | Poros (%) | | Média | Signif. Estatíst. |
|----------------|-------------|--------------|--------|-------|-------------------|-----------|--------|-------|-------------------|
| | | Piso 1 | Piso 2 | | | Piso 1 | Piso 2 | | |
| Controle | 0 | 5,19 | 5,24 | 5,22 | | 12,04 | 12,11 | 12,07 | |
| | 5 | 5,42 | 5,35 | 5,39 | n.s | 12,17 | 12,45 | 12,31 | n.s |
| | 10 | 5,10 | 5,01 | 5,06 | n.s | 11,93 | 12,14 | 12,04 | n.s |
| Porosa (Areia) | 15 | 5,45 | 5,39 | 5,42 | n.s | 12,54 | 12,46 | 12,50 | s |
| | 20 | 5,41 | 5,58 | 5,50 | n.s | 12,47 | 12,60 | 12,54 | s |
| | 25 | 5,47 | 5,48 | 5,48 | n.s | 12,52 | 12,49 | 12,51 | s |
| | 30 | 4,69 | 4,82 | 4,76 | s | 11,05 | 11,19 | 11,12 | s |

n.s. = não significativo em relação ao controle ($p > 0,05$)

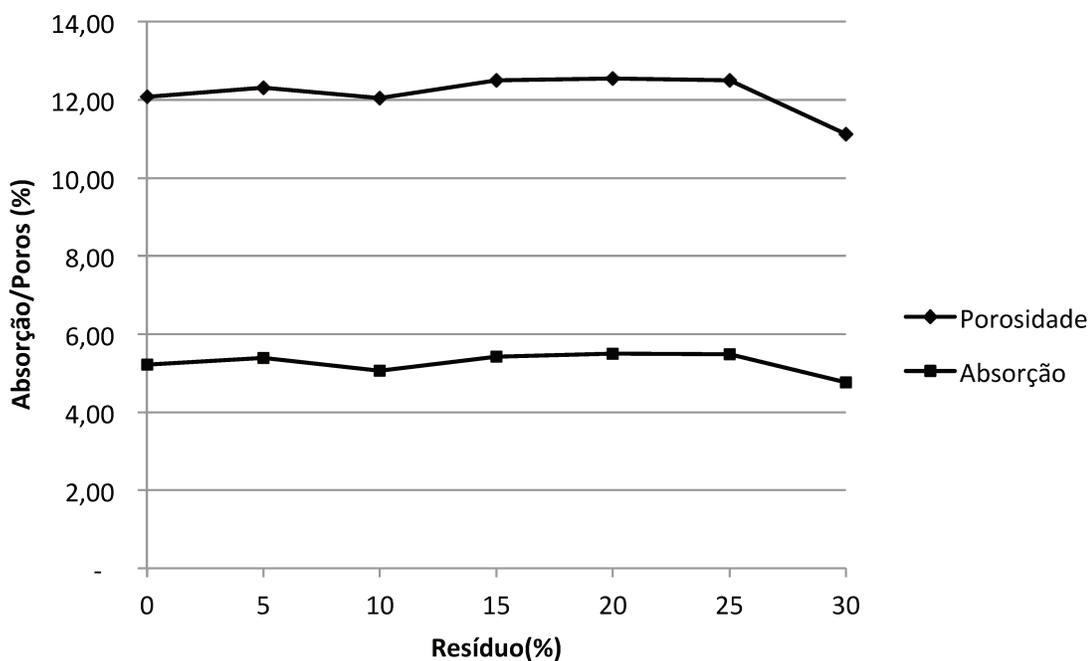
s = significativo em relação ao controle ($p < 0,05$)

As peças pré-moldadas de concreto apresentaram um aumento da absorção e da porosidade à medida que aumenta a proporção de incorporação do resíduo, com exceção das proporções de 10% e 30% onde se observou um decréscimo da absorção e da porosidade.

O concreto com 10% de incorporação do resíduo de cerâmica porosa em substituição ao agregado miúdo apresentou uma redução em relação ao controle de 3,06% na absorção e na porosidade apresentou média praticamente igual ao controle. Na proporção de 30% de incorporação observou-se um decréscimo de 9,66% na absorção e de 8,54% na porosidade.

As médias de absorção e porosidade aos 28 dias com a incorporação do resíduo de cerâmica porosa em substituição ao agregado miúdo estão representadas na Figura 47.

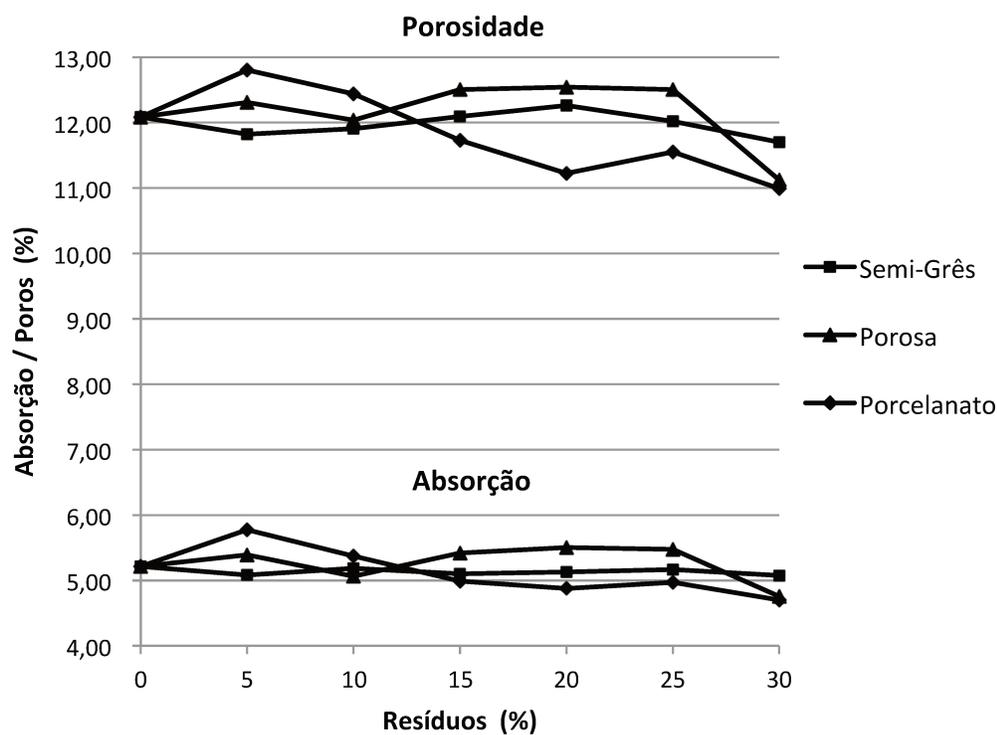
Figura 47 - Médias de absorção e porosidade as 28 dias com a incorporação do resíduo de cerâmica porosa em substituição ao agregado miúdo.



Os resultados obtidos demonstram uma redução significativa da absorção e da porosidade na maior proporção de incorporação do resíduo de cerâmica porosa. O efeito físico dos grãos finos presentes no resíduo de cerâmica porosa na proporção de 30% em substituição a areia permite um maior empacotamento com as partículas do cimento e do agregado miúdo reduzindo a porosidade na zona de transição entre a pasta e o agregado conforme já mencionado anteriormente.

A Figura 48 apresenta a comparação das médias de absorção e porosidade aos 28 dias com a incorporação dos resíduos em substituição ao agregado miúdo.

Figura 48 - Comparação das médias de absorção e porosidade aos 28 dias com a incorporação dos resíduos em substituição ao agregado miúdo.



A Tabela 40 apresenta os resultados de absorção e porosidade com as diferentes proporções de incorporação do resíduo de porcelanato em substituição ao cimento e suas respectivas médias, bem como as suas significâncias estatísticas.

Tabela 40 – Absorção e porosidade com a incorporação do resíduo de porcelanato em substituição ao cimento e as respectivas significâncias estatísticas.

| Resíduo | Incorp. (%) | Absorção (%) | | Média | Signif. Estatíst. | Poros (%) | | Média | Signif. Estatíst. |
|-----------------------|-------------|--------------|--------|-------|-------------------|-----------|--------|-------|-------------------|
| | | Piso 1 | Piso 2 | | | Piso 1 | Piso 2 | | |
| Porcelanato (Cimento) | 0 | 5,19 | 5,24 | 5,22 | | 12,04 | 12,11 | 12,07 | |
| | 5 | 5,35 | 5,36 | 5,35 | n.s | 12,64 | 12,53 | 12,59 | s |
| | 10 | 5,49 | 5,53 | 5,51 | n.s | 12,92 | 12,95 | 12,93 | s |
| | 15 | 5,59 | 5,55 | 5,57 | s | 13,25 | 13,15 | 13,20 | s |
| | 20 | 5,82 | 5,57 | 5,70 | s | 13,62 | 13,19 | 13,40 | s |
| | 25 | 5,89 | 5,71 | 5,80 | s | 13,85 | 13,51 | 13,68 | s |
| | 30 | 5,74 | 5,84 | 5,79 | s | 13,42 | 13,54 | 13,48 | s |

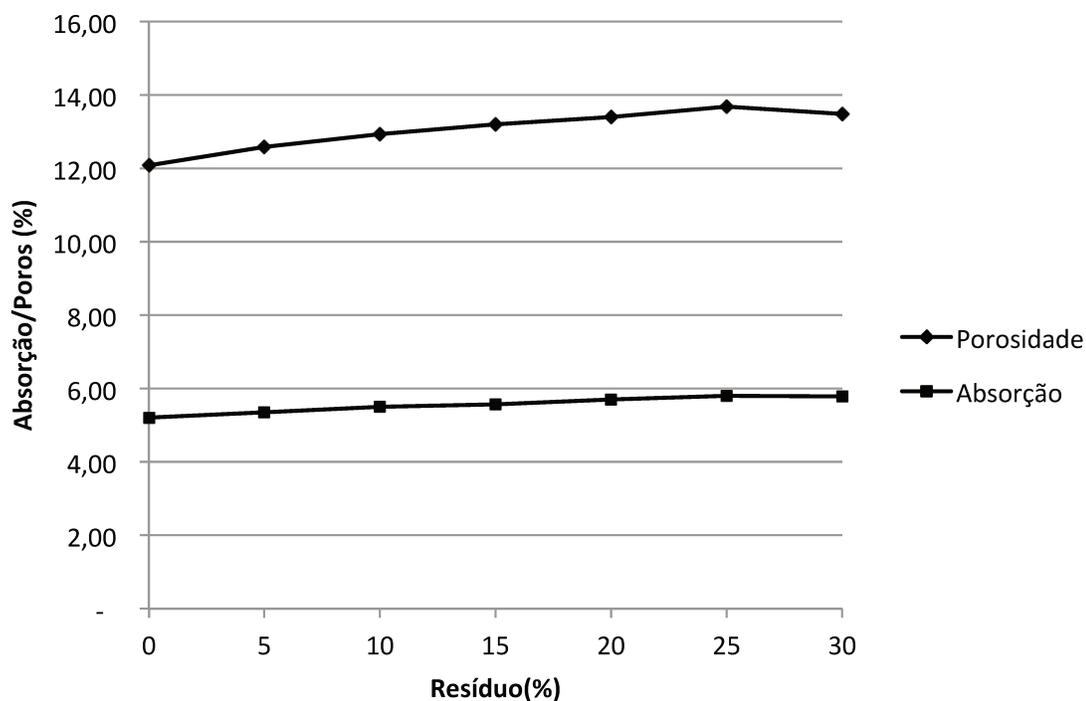
n.s. = não significativo em relação ao controle ($p > 0,05$)

s = significativo em relação ao controle ($p < 0,05$)

As peças pré-moldadas de concreto apresentam aumento da absorção e da porosidade à medida que aumenta a incorporação do resíduo de porcelanato em substituição ao cimento. Em relação ao concreto de referência, a incorporação de resíduo nas proporções de 5% e 30% apresentou um aumento na absorção de 2,49% e 10,92%, respectivamente.

A incorporação do resíduo apresentou um aumento na porosidade de 4,31% na proporção de 5% e de 11,68% na proporção de 30% em relação ao controle sem a incorporação de resíduo. As médias de absorção e porosidade aos 28 dias com a incorporação do resíduo de porcelanato em substituição ao cimento estão representadas na Figura 49.

Figura 49 - Médias de absorção e porosidade as 28 dias com a incorporação do resíduo de porcelanato em substituição ao cimento.



Os resultados obtidos indicam um aumento significativo da absorção e da porosidade nas maiores proporções de incorporação do resíduo de porcelanato. A substituição do cimento pelo resíduo de porcelanato não contribuiu para o refinamento dos poros e para um maior empacotamento das partículas tornando o material mais poroso e menos resistente a entrada de líquidos em relação ao concreto de referência conforme também verificado na pesquisa de Poon (2006).

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta pesquisa teve como premissa a análise da viabilidade técnica do uso de resíduos da retífica de placas cerâmicas de revestimento em substituição parcial ao agregado miúdo e ao cimento na produção de peças pré-moldadas de concreto para pisos intertravados.

As peças pré-moldadas de concreto foram avaliadas de acordo com as solicitações que estão sujeitas como resistência e durabilidade. Portanto, o desempenho das peças pré-moldadas com a incorporação dos resíduos cerâmicos foi determinado pelos ensaios de resistência à compressão e absorção de água.

Os resultados mostram que a incorporação parcial de resíduos da retífica de cerâmica de revestimento em substituição ao cimento e à areia é viável na produção de concreto para pisos intertravados.

O abatimento do concreto fresco com a substituição da areia pelos resíduos apresentou um decréscimo de 60% em média, em relação ao concreto de referência, influenciando em sua plasticidade. A substituição do cimento pelo resíduo de porcelanato apresentou um decréscimo de até 40% em relação ao concreto de referência, no abatimento do concreto em seu estado fresco. No entanto, o concreto produzido com os resíduos cerâmicos apresentou trabalhabilidade adequada para a moldagem dos pisos intertravados em todas as proporções de incorporação estudadas. Para incorporações dos resíduos em proporções acima de 30% é necessário alterar a quantidade de água da mistura.

Na substituição do agregado miúdo pelo resíduo de porcelanato houve um aumento significativo na resistência à compressão à medida que aumentava a proporção de incorporação. A substituição do agregado miúdo pelos resíduos de cerâmica semi-grês e cerâmica porosa não alterou significativamente as propriedades mecânicas do concreto.

A substituição do cimento pelo resíduo de porcelanato apresentou um decréscimo na resistência mecânica do concreto à medida que aumentava a proporção de incorporação.

Os resultados de resistência à compressão simples atenderam a normalização brasileira para pisos intertravados, tanto o concreto de referência sem a incorporação dos resíduos como o concreto com a incorporação dos resíduos em todas as proporções estudadas.

A absorção e a porosidade diminuíram com a substituição do agregado miúdo pelo resíduo de porcelanato à medida que aumentava a proporção de incorporação favorecendo a durabilidade.

A substituição do agregado miúdo pelos resíduos de cerâmica semi-grês e cerâmica porosa não alterou significativamente os índices de absorção e porosidade.

A substituição do cimento pelo resíduo de porcelanato apresentou um aumento na absorção e porosidade do concreto à medida que aumentava a proporção de incorporação e diminuía a resistência. A incorporação dos resíduos em todas as proporções estudadas, bem como o concreto de referência, apresentaram resultados com valores inferiores a 6% de absorção de água, como determina a maioria das normas internacionais.

Considerando os resultados obtidos, bem como os resultados obtidos por outros pesquisadores e relatados neste estudo, pode-se afirmar que do ponto de vista técnico a incorporação dos resíduos de revestimentos cerâmicos na produção de concreto para pisos intertravados, se apresenta como uma boa alternativa para o aproveitamento do grande volume de resíduos gerados pela indústria de cerâmica de revestimentos.

A reciclagem é de fundamental importância para a redução do impacto ambiental e vem se consolidando como uma alternativa viável para utilização dos resíduos industriais no setor da construção civil, levando ao desenvolvimento de materiais que atendam aos padrões técnicos, melhorando suas propriedades, reduzindo os impactos ambientais no ciclo de vida dos produtos e processos e resultando em ganhos econômicos para a indústria geradora de resíduos e para a indústria da construção civil.

Dada a relevância e abrangência do tema sugerem-se trabalhos complementares a este estudo:

- Análise detalhada da viabilidade econômica da reutilização destes resíduos com avaliação dos custos de implantação e operação de uma fábrica para o processamento de todos os resíduos similares produzidos na região de Limeira, considerando o Pólo Cerâmico de Santa Gertrudes, incluindo prospecção de mercado para os materiais produzidos.
- Análise do ciclo de vida dos materiais produzidos com a incorporação dos resíduos, considerando os cenários de disposição final dos resíduos em aterros (como é praticado atualmente pela indústria).
- Avaliação da resistência mecânica e absorção de água das peças pré-moldadas com a substituição parcial do cimento e da areia pelos resíduos no mesmo traço, e não apenas separadamente como foi realizado neste trabalho.

- Avaliação da resistência mecânica e absorção de água das peças pré-moldadas com a substituição parcial do cimento e da areia por uma mistura dos três resíduos, uma vez que as diferentes granulometrias destes materiais quando combinadas e incorporadas ao concreto, proporcionam um melhor empacotamento das partículas, diminuindo o volume de vazios e possivelmente produzindo um material mais resistente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCERAM – Associação Brasileira de Cerâmica, 2011, informação disponível em www.abceram.org.br , acessado em 28/08/2011

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, Guia básico de utilização do cimento Portland, São Paulo, ABCP 2002

ABESC – Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem do Brasil, Manual do concreto dosado em central, 2007, disponível em <http://www.abesc.org.br/pdf/manual.pdf>, acessado em 10/05/2011

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7181 – Solo – Análise Granulométrica, Rio de Janeiro, 1984

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 5733 – Cimento Portland de alta resistência inicial, Rio de Janeiro, 1991a

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 11578 – Cimento Portland, Rio de Janeiro, 1991b

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6502 – Solos e Rochas, Rio de Janeiro, 1995

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão, Rio de Janeiro, 1996

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBRNM 67 – Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, Rio de Janeiro, 1998

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR-NM 23 – Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica, Rio de Janeiro, 2001

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR NM 248– Agregados – Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 2003a

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 5738 – Concreto – Procedimentos para moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2003b

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2005

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR-NM 45 – Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios, Rio de Janeiro, 2006a

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 12655 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento - Procedimento, Rio de Janeiro, 2006b

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2007a

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6118 – Projeto e execução de obras de concreto armado, Rio de Janeiro, 2007b

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR-NM 52 – Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman, Rio de Janeiro, 2009a

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR-NM 53 – Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica unitária e absorção de água, Rio de Janeiro, 2009b

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7211 – Agregados para concreto - Especificação, Rio de Janeiro, 2009c

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 11768 – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos, Rio de Janeiro, 2011a

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15953 – Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução, Rio de Janeiro, 2011b

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 5752 - Materiais pozolânicos — Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento — Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2012a

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 11579 – Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200), Rio de Janeiro, 2012b

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 12653 – Materiais pozolânicos — Requisitos, Rio de Janeiro, 2012c

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 9781 – Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio, Rio de Janeiro, 2013

ABRELPE – Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, Panorama de Resíduos Sólidos, 2010, informação disponível em www.abrelpe.org.br, acessado em 16/01/2012

- ABREU, J. V., Estudo de concreto de alta resistência compactado com rolo para pavimentação, Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PCC-329, 2003
- AMBONI, N., O caso Cecrisa S.A. : Uma aprendizagem que deu certo. Florianópolis, 1997. 315p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997
- ANEPAC - Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil, DNPM Sumário Mineral Brasileiro 2010, disponível em <http://anepac.org.br/wp/mercado>, acessado em 20/09/2012
- ANFACER – Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica de Revestimentos, História da Cerâmica, informação disponível em <http://www.anfacer.org.br/site/default.aspx?idConteudo=157&n=Hist%C3%B3ria-da-Cer%C3%A2mica>, acessado em 08/10/2011, São Paulo, 2011
- BERNARDIN, A. M.; SILVA, M. J.; RIELLA, H. G., Characterization of cellular ceramics made by porcelain tile residues. *Materials Science & Engineering A*, 437, 222-225, 2006
- BITTENCOURT, S. F., Avaliação da resistência à compressão de *pavers* produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição e areia de fundição. Campinas, 2011. 125p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, 2011
- BOSCHI, A. O. Panorama atual da indústria brasileira de revestimentos cerâmicos. *Cerâmica Industrial*, v. 13, n.3, p. 13-16, 2008
- BRASIL (2010), Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, Política Nacional de Resíduos Sólidos, Ministério do Meio Ambiente – MMA. Disponível em <http://www.mma.gov.br>. Acesso em 28 dez. 2012
- BRITO, J. F., Produção de grés porcelanato a partir de matérias-primas do Estado da Bahia. Salvador, 2009. 108p. Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) 2009
- CABRAL, A.E.B., SCHALCH, V., MOLIN, D.C.C.D., RIBEIRO, J.L.D., Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 24 (2010) 421–430
- CARRIJO, P. M., Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto. São Paulo, 2005. 129p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Civil) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005

CARVALHO, E. V., LINTZ, R. C. C., BARBOSA, L. A. G., PENTEADO, C. S. G., Ceramic Waste Recycling as a Partial Substitute of Portland Cement for Manufacturing Interlocking Pavers, ISWA World Solid Waste Congress 2012, Firenzi, 2012

CASTRO, A. L., PANDOLFELLI, V. C., Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. Cerâmica, vol. 55, n. 155, p. 18-32, 2009

CONSTANTINO, A. O., ROSA, S. E. S., CORRÊA, A. R., Panorama do setor de revestimentos cerâmicos. BNDES, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conheciment o/relato/rs_rev_ceramicos.pdf Acesso em: 12 abril 2012

COUTINHO, A. S., Fabrico e propriedades do betão. Lisboa: Editora LNEC, 1997. 2vol. 646p.

CRUZ, L. O. M., Pavimento intertravado de concreto: estudo dos elementos e métodos de dimensionamento. Rio de Janeiro, 2003. 281p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Civil) COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003

DIEESE - Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos, Caderno de Estudo Setorial da Construção Civil 2011. Disponível em <http://www.dieese.org.br/esp/estPesq56ConstrucaoCivil.pdf>, Acesso em 08 out. 2011, São Paulo, 2011

EVANGELISTA, A. C. J. ALMEIDA, V. C., CORDEIRO, A. C., ALVES, L. S., Aplicação de resíduo cerâmico como adição mineral na produção de argamassas e concretos. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, n. 3, Rio de Janeiro, 2006

FERNANDES, I., Blocos e Pavers – Produção e Controle de Qualidade, São Paulo, ABCP, 2012, 182p.

FERNANDES, M., FIORITTI, C. F., AKASAKI, J. L., Dosagens de concreto para pavers utilizáveis em pavimentação intertravada. Colloquium Humanarum, vol. 8, p. 247-254, 2011

FIORITI, C. F., AKASAKI, J. L., INO, A., Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus, Ambiente Construído, v. 7, n. 4, Porto Alegre, 2007

FONSECA, G. C., Adições Minerais e as disposições normativas relativas à produção do concreto no Brasil: Uma abordagem sistêmica. Belo Horizonte, 2010. 105p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010

GIAMMUSSO, S. E., Manual do concreto. São Paulo: Editora PINI, 1992. 160p.

GRIGOLI, A. S., HELENE, P., Comportamento das Adições Minerais Inertes em Poros e Zona de Transição em Concretos. II Encontro Tecnológico de Engenharia Civil e Arquitetura de Maringá, Paraná, 2001

GUERRA, I., VIVAR, I., LLAMAS, B., JUAN A., MORAN J., Eco-efficient concretes: The effects of using recycled ceramic material from sanitary installations on the mechanical properties of concrete, *Waste Management*, 2009, 643–646

HALLACK, A., Dimensionamento de pavimentos intertravados com revestimento de peças pré-moldadas de concreto para áreas portuárias e industriais. São Paulo, 1998. 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1998

HIGASHIYAMA, H., YAGISHITA, F., SANO, M., TAKAHASHI, O. , Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars using ceramic waste as fine aggregate, *Construction and Building Materials*, n.26, p. 96–101, 2011

ICPI, Application Guide for Interlocking Concrete Pavements, Tech Spec, Interlocking Concrete Pavement Institute, Washington, USA, 2002

JACOBY, P. C., Utilização do resíduo de polimento de porcelanato na produção de materiais cimentícios, *Contribuições da Engenharia para o Desenvolvimento Sustentável*, p. 32-45, 2011

JANKOVIC, K., NIKOLIC, D., BOJOVIC, D., Concrete paving blocks and flags made with crushed brick as aggregate, *Construction and Building Materials* n. 28 p. 659–663, 2012

JUNIOR, M. C., BOSCHI, A. O., MOTTA, J. F. M., TANNO, L. C., SINTONI, A., COELHO, J. M., CARIDADE, M., Panorama e Perspectivas da Indústria de Revestimentos Cerâmicos no Brasil, *Cerâmica Industrial*, n. 15, 2010

KAEFER, L. F., A Evolução do Concreto Armado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. Disponível em: <http://www.lem.ep.usp.br/pef605/HistoriadoConcreto.pdf> Acesso em 22 fev. 2012

KNAPTON, J., The romans and their roads - The original small element pavements technologists, University of New Castle, Reino Unido, 1996

KOVLER, K., ROUSSEL, N., Properties of fresh and hardened concrete, *Cement and Concrete Research*, vol 41, p. 775-792, 2011

KUMMER, L. , BASSETTI, F. J. , RIELLA, H. G. , AZEVEDO, J. C. R. . Reutilização dos Resíduos de Polimento de Porcelanato e Feldspato na Fabricação de Novo Produto Cerâmico. *Cerâmica Industrial*, v. 12, p. 34-38, 2007

MALISKA, A., M., Caracterização de Revestimentos Cerâmicos. Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007

- MEHTA, P. K., MONTEIRO, P.J.M. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo: IBRACON, 3ª. ed., 2008. 674p.
- MOTTA, L. M. G., Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis: Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas. Rio de Janeiro, 1991. 366p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1991
- HALLACK, A., Dimensionamento de pavimentos intertravados com revestimento de peças pré-moldadas de concreto para áreas portuárias e industriais. São Paulo, 1998. 116p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1998
- MULLER, A. M., Avaliação de transmissão de esforços em pavimentos intertravados de blocos de concreto. Rio de Janeiro, 2005. 234p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005
- NEVILLE, A. M., Propriedades do concreto. São Paulo: Editora PINI, 2ª. d., 1997. 828p.
- OLIVEIRA, M., C., MAGANHA, M., F., B., Guia técnico-ambiental da indústria de cerâmica branca e de revestimentos, São Paulo, CETESB, 2006
- PACHECO-TORGAL, F., JALALI, S., Reusing ceramic wastes in concrete, Construction and Building Materials, n.24, p.832–838, Portugal, 2010
- PINHEIRO, I. S., MONTENEGRO, L. C., GUMIEIRI, A. G., Pozzolanic activity of recycled red ceramic bricks. II International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Università Politecnica delle Marche, Italy, 2010
- POON, C. S., CHAN, D., Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick, Construction and Building Materials 20 (2006) 569–577
- ROQUE, J. A., MORENO JUNIOR, A. L., Considerações sobre vida útil do concreto. 1º Encontro Nacional de Pesquisa em Concreto Pré-moldado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2005
- ROSSO, J., CUNHA, E. S., ROJAS-RAMIREZ, R. A., Características técnicas e polimento de porcelanatos, Revista Cerâmica Industrial, v. 10, p. 11-14, 2005
- SANCHEZ, E.; GARCIA-TEM, SANZ, V. MORENO, A., Porcelain tile: Almost 30 years of steady scientific-technological evolution. Ceramics International 36:831–845, 2010
- SEBRAE – Serviço de Apoio a Micro e Pequenas Empresas de São Paulo - Cerâmica vermelha para construção, Cadernos SEBRAE, São Paulo, 2008, informação disponível em [http://www.biblioteca.sebrae.com.br/bds/bds.nsf/C5B4284E12896289832574C1004E55DA/\\$File/NT00038DAA.pdf](http://www.biblioteca.sebrae.com.br/bds/bds.nsf/C5B4284E12896289832574C1004E55DA/$File/NT00038DAA.pdf), acessado em 22/11/2011

SHACKEL, B., Design and Construction of Interlocking Concrete Block Pavement, 1a. Edição, Elsevier, 229 p., Londres, 1990

SILVA, G. J. B., Estudo do comportamento do concreto de cimento Portland produzido com a adição do resíduo de polimento do porcelanato. Belo Horizonte, 2005. 92p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005

SIMIÉLI, D., MIZUMOTO, C., SEGANTINI, A. A. S., SALLES, F. M., Utilização de agregados reciclados em pavimentos intertravados, Exacta, São Paulo, v.5, n.2, p.231-241, 2007

SNIC – Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento, Panorama de Vendas de Cimento, 2011, Rio Grande do Sul, informação disponível em <http://fsindical-rs.org.br>, acessado em 10/11/2011.

SOUZA, P. A. B. F., Estudo do comportamento plástico, mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato. Natal, 2007. 207p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007

WWI – WORLDWATCH INSTITUTE, Relatório do Estado do Mundo 2010, Transformando culturas – Do consumismo à sustentabilidade, 2010, EUA