



**Universidade Federal de Pernambuco**  
**Centro Acadêmico do Agreste – Núcleo de Tecnologia**  
**Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental**

**Paloma Santos Xavier de Alcantara**

**BLOCOS INTERTRAVADOS COLORIDOS PARA PAVIMENTAÇÃO COM  
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA EM PROL DA  
REDUÇÃO DE PIGMENTOS**

**Caruaru**

**2015**

**PALOMA SANTOS XAVIER DE ALCANTARA**

**BLOCOS INTERTRAVADOS COLORIDOS PARA PAVIMENTAÇÃO COM  
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA EM PROL DA  
REDUÇÃO DE PIGMENTOS**

Dissertação de Mestrado para obtenção do título de Mestre, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco – Centro Acadêmico do Agreste.

Área de concentração: estruturas e materiais.

**Orientadora: Prof. Dr<sup>a</sup>. Ana Cecília Vieira da Nóbrega**

Caruaru – PE

2015

Catálogo na fonte

Bibliotecária Simone Xavier CRB4 - 1242

A347b Alcantara, Paloma Santos Xavier de.

Blocos intertravados coloridos para pavimentação com incorporação de resíduos de cerâmica vermelha em prol da redução de pigmentos. / Paloma Santos Xavier de Alcantara. - Caruaru: O Autor, 2015.

179f; il.; 30 cm.

Orientadora: Ana Cecília Vieira da Nóbrega

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA. Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2015.

Inclui bibliografia

1. Cerâmica – Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 2. Blocos intertravados. 3. Paver. 4. Cerâmica vermelha. 5. Concreto. I. Nóbrega, Ana Cecília Vieira da. (orientadora). II. Título.

620 CDD (23. ed.)

UFPE (CAA 2015-147)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental**  
**Área de Concentração em Estruturas e Materiais**

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**BLOCOS INTERTRAVADOS COLORIDOS PARA PAVIMENTAÇÃO COM  
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA EM PROL DA  
REDUÇÃO DE PIGMENTOS**

defendida por

**PALOMA SANTOS XAVIER DE ALCANTARA**

Considera a candidata APROVADA

Caruaru, 28 de agosto de 2015

---

ANA CECÍLIA VIEIRA DA NÓBREGA – PPGECAM/UFPE  
(orientadora)

---

ARNALDO MANOEL PEREIRA CARNEIRO – PPGEC/UFPE  
(examinador externo)

---

ÉRIKA PINTO MARINHO – PPGECAM/UFPE  
(examinador interno)

*Dedico este trabalho a todas as mulheres feministas que um dia lutaram, a todas que hoje lutam e, por fim, a todas que no futuro lutarão por uma sociedade justa e igualitária em direitos e deveres para todas as pessoas, independentemente de gênero (e suas múltiplas identidades), orientação sexual, raça, etnia, origem, situação social, idade e ideologia.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço acima e antes de tudo ao meu pai e à minha mãe, Adilson Xavier de Alcantara e Marineide Santos Xavier de Alcantara, por todo esforço, carinho, amor, dedicação, incentivos a mim dedicados; por me ensinarem que para conquistar vitórias é preciso ser perseverante e ter disciplina, andar por caminhos sinceros, éticos e honestos com a cabeça erguida.

Em especial, à professora, minha orientadora, Ana Cecília Nóbrega, pelo investimento acadêmico, pelo apoio em todos os momentos, pelo companheirismo, amizade, orientações que contribuíram fortemente na minha formação profissional e pessoal, bem como pelos tantos anos de parceria. Minha eterna admiração.

Às minhas grandes amigas, Sara Vasconcelos e Larissa Mota, por estarem ao meu lado em todos os momentos, pelo apoio nas situações críticas, pela cumplicidade e pelos sorrisos mais espontâneos de amizade.

Aos professores do PPGECAM/UFPE/CAA que participaram da minha formação profissional e acadêmica. Conviver diariamente com profissionais de excelência me serviu e serve de inspiração. Agradeço, além de tudo, por me apresentaram a natureza e me capacitaram a interferir nela para o bem comum.

Ao amigo Marcos Mota, colega de curso de pós-graduação, pelo companheirismo e apoio prestados.

Aos técnicos do Laboratório de Construção Civil/UFPE CAA, Everton Rodrigues e Fabíola Franca, pelo apoio nos ensaios, bem como às técnicas do Laboratório de Química/UFPE/CAA, Amanda Lucena e Claudete Marques.

Aos alunos bolsistas de manutenção acadêmica e graduandos do curso de Engenharia Civil da UFPE/CAA, Kalil Ruan e Vanderlan Vieira, pela forte contribuição nos ensaios, bem como pela dedicação aos mesmos.

A Nathalia Cavalcante, graduanda do curso de Engenharia Civil da UFPE/CAA, pela ajuda na obtenção de alguns dados essenciais.

Ao senhor Venceslau, técnico da UFPE/CAA, pela especial atenção na confecção de alguns equipamentos.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela oportunidade de ser bolsista.

A FACEPE – Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco, pela oportunidade de convênio de pesquisa com o CETENE – Centro de Tecnologia Estratégicas do Nordeste, amparado pelo projeto APQ-1038-3.01/14, e pela bolsa de cooperação técnica, BCT- 0121-3.01/15.

Ao CETENE e aos seus funcionários e técnicos pelo acolhimento, bem como pela qualidade e agilidade das análises realizadas.

Ao projeto de Desenvolvimento de Pesquisas em Controle Ambiental e Incorporação de Resíduos Industriais em Materiais de Construção (Casadinho – processo 552308/2011-0), coordenado pela professora Sávila Gazzava dos Santos Pessôa, pelo apoio financeiro.

Ao Programa de Apoio a Núcleos de Excelência – PRONEX/FACEPE/CNPq –, através do NUTREL II (Núcleo de Tecnologia de Tratamento e Reúso de Efluentes e Lodo II) de APQ-1065-3.07/10, coordenado pelo professor Mario Takayuki Kato, pelo apoio financeiro.

À empresa Kitambar Artefatos de Cerâmica, em nome do Engenheiro Civil Marcos Antonio Barbosa, pelos resíduos de cerâmica vermelha gentilmente cedidos para esta pesquisa.

À empresa JCL Lajes, pelos insumos gentilmente cedidos para esta pesquisa.

E, finalmente, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a elaboração deste trabalho.

*“A Física é olho que lê a poesia que a natureza escreve.”*

Mariana Valadares

## RESUMO

Peças de concreto intertravadas para pavimentação (pavers) coloridas com pigmento de óxido de ferro (vermelho) são utilizadas em projetos de urbanização. Entretanto, esse tipo de pigmento, além de encarecer de 20 a 30% o valor das peças, prejudica as propriedades dos concretos secos moldados sob vibrocompressão. Diante disso, propõe-se incorporar resíduo de cerâmica vermelha (RCV) como matiz colorimétrica em prol da redução de pigmento em pavers coloridos, tendo em vista também a possibilidade de melhoria de suas propriedades por efeitos *filler* e pozolânico. A fim de investigar o efeito do pigmento e do RCV no compósito estudado, as formulações foram: (a) traço padrão pelo método de dosagem da ABCP para blocos e pavers; (b) adição de pigmento ao traço padrão (2% e 4%); (c) substituição da areia média pelo RCV no traço padrão (50%, 75% e 100%); (d) adição de RCV ao traço padrão (20%, 30%, 40% e 50%); (e) adição de pigmento (2%) e RCV concomitantemente ao traço padrão (20%, 30%, 40%, 50%, 100% e 150%). Para todos os traços (exceto aqueles das formulações de substituição), foi feita a correção do consumo de cimento em relação ao traço padrão. Resistência à compressão, absorção de água e resistência à abrasão foram avaliadas de acordo com a norma NBR 9781:2013; além disso, foi realizada uma avaliação das cores dos compósitos desenvolvidos por inspeção visual. Pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento (padrão, 3% pigmento, 15% RCV e 3% pigmento – 15% RCV) também foram moldadas para avaliações de cunho microestrutural, cristalográfico e de análise térmica das reações de hidratação dos sistemas. O traço padrão foi 1:2,29:1,76:0,95 (cimento:areia média:areia muita grossa:pedrisco) com relação água-materiais secos 0,80. De uma maneira geral, adições de apenas pigmento (2% e 4%) reduziram em até 73% a resistência à compressão do paver padrão cinza (sem adições). Redução nos produtos de hidratação (CH e C-S-H) foram observadas. As substituições de areia média pelo RCV também foram prejudiciais a esse sistema. Já as adições de apenas RCV, bem como as de RCV concomitantemente com pigmento foram positivas em ganhos ou manutenção de propriedades (resistência à compressão, absorção de água, resistência à abrasão e cor) em relação ao paver padrão colorido (4% de pigmento), destacando-se a formulação 2% de pigmento e 50% de RCV. Assim, a adição de RCV é uma possibilidade técnica promissora, sustentável e economicamente viável na fabricação de pavers avermelhados.

Palavras-chave: Blocos intertravados. Concreto seco. Paver. Pigmento. Resíduo de cerâmica vermelha.

## ABSTRACT

Concrete interlocking blocks colored with pigment iron oxide (red) are used in urbanization projects. However, that kind of pigment increases around 20 to 30% the value of the pavers, as well as affect the properties of the dry concrete molded by vibrocompression. Therefore, it is proposed to incorporate red ceramic waste (RCW) as colorimetric hue in order of pigment content reduction in colored pavers, considering also the possibility of improving their properties by filler and pozzolanic effect. In order to investigate the effect of pigment and RCW in the studied composite, the formulations were: (a) reference paver designed by ABCP method for blocks and pavers; (B) adding pigment to the reference paver (2% and 4%); (C) substitution of medium sand by RCW in the reference paver (50%, 75% and 100%); (D) adding RCW in the reference paver (20%, 30%, 40% and 50%); (E) addition of pigment (2%) and RCW concurrently in the reference paver (20%, 30%, 40%, 50%, 100% and 150%). For all mixtures (except those of replacement formulations), it was made the correction in cement consumption related to the reference mix proportion. Compressive strength, water absorption and abrasion resistance were measured according to the ABNT NBR 9781: 2013 standards; besides that, the color and texture of all manufactured formulations were observed by visual inspection. Cement pastes made by vibrocompression with low water-cement ratio (reference paste, 3% pigment, 15% RCW and 3% pigment RCW - 15% RCW) were also molded for microstructural, crystallographic and thermal analysis of systems hydration reactions. The reference mix proportion was 1:2.29:1.76:0.95 (cement: medium sand: thick sand: gravel) with ratio water-dry material 0.80. In general, additions of only pigment (2% and 4%) up to 73% reduced the compressive strength of the reference paver (no additions). Reduction in hydration products (C-S-H and CH) was observed. The substitution formulations of medium sand by RCW were also harmful to the systems. Additions of only RCW and RCW concomitantly with pigment were positive in gains or maintaining of properties (compressive strength, water absorption resistance and abrasion resistance) compared to the reference colored paver (4% pigment), especially the formulation of 2% pigment and 50% RCW. Thus, the addition of RCW is a promising, economic and sustainable technique in the production of red pavers.

Keywords: Concrete interlocking blocks. Dry concrete. Paver. Pigment. Red ceramic waste.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resíduos de cerâmica vermelha gerados por mau armazenamento. ....	23
Figura 2 – Resíduos de cerâmica vermelha gerados no processo de fabricação. ....	24
Figura 3 – Argamassas de revestimentos com RCVs em substituição ao agregado miúdo nos... teores de 0%, 10%, 15%, 20% e 30%. ....	25
Figura 4 – Pavers coloridos em projeto de urbanização. ....	26
Figura 5 – Pavers coloridos. ....	26
Figura 6 – Pavers coloridos vermelhos da fábrica parceira. ....	27
Figura 7 – Pavers em projeto de reurbanização na cidade de Caruaru-PE. ....	30
Figura 8 – Ponte <i>Årsta</i> em Estocolmo, na Suécia, de cor marrom avermelhada. ....	32
Figura 9 – Adega <i>Antion</i> , na região da vinícola espanhola de <i>La Rioja</i> , construída com ..... concreto de coloração amarela. ....	33
Figura 10 – Pavers coloridos para pavimentação em projeto de urbanização. ....	34
Figura 11 – Exemplo de blocos de concreto para pavimentação. ....	37
Figura 12 – Perfil da solução pronta do piso intertravado. ....	37
Figura 13 – Diversos tipos de arranjo de assentamento da pavimentação intertravada. ....	38
Figura 14 – Exemplos de peças de concreto Tipo I. ....	39
Figura 15 – Exemplos de peças de concreto Tipo II. ....	39
Figura 16 – Exemplos de peças de concreto Tipo III. ....	39
Figura 17 – Exemplos de peças de concreto Tipo IV. ....	39
Figura 18 – Produção de paver virado do modelo sextavado. ....	41
Figura 19 – Diversidade de cores aplicadas em pavers. ....	42
Figura 20 – Versatilidade de aplicação de pavers coloridos em projetos de urbanização na cidade de..... Blumenau-SC. ....	43
Figura 21 – Aplicação de pisos intertravados drenantes. ....	43
Figura 22 – Misturador de concreto. ....	44
Figura 23 – Vibroprensa hidráulica. ....	46
Figura 24 – Máquina Amsler para o Ensaio de Resistência à Abrasão Proposto pela NBR..... 12042. ....	58
Figura 25 – Abrasímetro CAP, utilizado no ensaio de abrasão profunda em peças cerâmicas .....	58
Figura 26 – Fluxograma esquemático da metodologia experimental. ....	67
Figura 27 – Microscopia eletrônica de varredura (100x, 1800x, 10000x) do pigmento de óxido de ..... ferro. ....	72

Figura 28 – Difratoograma do pigmento de óxido de ferro.....	73
Figura 29 – Forno tipo abóbada da cerâmica parceira.....	74
Figura 30 – Curvas de queima obtida nos fornos da cerâmica parceira. ....	74
Figura 31 – Curva de moagem do moinho de bolas.....	76
Figura 32 – Aparência final do RCV após sua cominuição e moagem. ....	76
Figura 33 – Distribuição discreta e curva granulométrica do RCV para partículas finas. ....	77
Figura 34 – Difratoograma do RCV.....	79
Figura 35 – Microscopia eletrônica de varredura (150x) do RCV.....	80
Figura 36 – Microscopia eletrônica de varredura (5000x) de uma partícula de RCV em..... detalhe.....	80
Figura 37 – Difratoograma da mistura de pigmento e RCV.....	82
Figura 38 – Vibroprensa hidráulica semi-automática utilizada para a produção dos pavers. ..	87
Figura 39 – Moldes da vibroprensa em detalhe.....	88
Figura 40 – Pavers cobertos com plástico preto durante o procedimento de cura inicial de 24 horas.....	89
Figura 41 – Tanque utilizado para o processo de cura por imersão dos pavers. ....	89
Figura 42 – Faixa granulométrica indicada para pavers.....	93
Figura 43 – Curva granulométrica ponderada do traço T <sub>7</sub> e sua adequação na faixa..... recomendada para pavers.....	95
Figura 44 – Curva granulométrica ponderada do traço T <sub>8</sub> e sua adequação na faixa..... recomendada para pavers.....	95
Figura 45 – Dispositivo para ensaio de resistência à abrasão.....	101
Figura 46 – Esquema do abrasímetro em 3D. Parte frontal. ....	102
Figura 47 – Esquema do abrasímetro em 3D. Parte de trás.....	102
Figura 48 – Carro suporte e disco de aço do abrasímetro. ....	103
Figura 49 – Ensaio de abrasão para pavers segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013) realizado no..... LCC/UFPE/CAA.....	103
Figura 50 – Medição da cavidade na amostra ensaiada.....	104
Figura 51 – Valores de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade de pastas de cimento..... adicionadas com pigmento vermelho nos teores de 0% a 5%.....	109
Figura 52 – Valores de resistência à compressão de pastas aos 7 e 28 dias de idade de cimento..... adicionadas com RCV nos teores de 0% a 150%.....	110

Figura 53 – Valores de resistência à compressão de pastas de cimento aos 7 e 28 dias de idade..... adicionadas conjuntamente com 100% de cerâmica vermelha e com teores de 1% a 4% de pigmento vermelho.....	112
Figura 54 – Tempos de início, fim de pega e em aberto de pastas de cimento adicionadas com..... pigmento vermelho nos teores de 0% a 5%. .....	113
Figura 55 – Tempos de início, fim de pega e em aberto de pastas de cimento adicionadas com RCV.. nos teores de 50% a 150%. .....	114
Figura 56 – Tempos de início, fim de pega e em aberto de pastas de cimento adicionadas ..... conjuntamente com 100% de cerâmica vermelha e com teores de 1% a 4% de ..... pigmento vermelho. ....	115
Figura 57 – Valores do índice de consistência normal de pastas de cimento adicionadas com ... pigmentos nos teores de 0% a 5%. .....	116
Figura 58 – Valores do índice de consistência normal de pastas de cimento adicionadas com ... RCV nos teores de 0% a 150%.....	118
Figura 59 – Valores do índice de consistência normal de pastas de cimento adicionadas ..... conjuntamente com 100% de cerâmica vermelha e com teores de 1% a 4% de ..... pigmento vermelho. ....	119
Figura 60 – Variação das cores das argamassas produzidas com RCV e pigmento vermelho de forma... isolada e concomitante.....	120
Figura 61 – Curva de finos. ....	122
Figura 62 – Aparência e textura (acabamento) dos pavers produzidos no desenvolvimento da.. curva de finos.....	122
Figura 63 – Condição de falta de coesão de uma paver do traço T5.....	123
Figura 64 – Curva de umidade. ....	124
Figura 65 – Curva de consumo.....	126
Figura 66 – Consumos de cimento Portland ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) dos traços com RCV em substituição à..... areia média.....	131
Figura 67 – Consumos de cimento Portland ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) dos traços com RCV em adição ..... concomitante com pigmento.....	131
Figura 68 – Consumos de cimento Portland ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) dos traços sem pigmento e com adição de RCV..... .....	132
Figura 69 – Curvas de comportamento da variação do consumo do cimento Portland em ..... função do TS e de três diferentes valores de massa específica do RCV. ....	134

Figura 70 – Resistência à compressão (MPa) aos 3, 7 e 28 dias dos pavers padrões e do paver de traço 1:5 2%PIG.	137
Figura 71 – Intensidade dos picos característicos da portlandita por DRX em pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento sem e com adição de pigmento, após 28 dias de idade.	138
Figura 72 – Intensidade dos picos característicos C-S-H I por DRX (Taylor, 1997) em pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento sem e com adição de pigmento, após 28 dias de idade.	138
Figura 73 – Intensidade dos picos característicos C-S-H de laboratório por DRX (Bezerra, 2006) em pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento sem e com adição de pigmento, após 28 dias de idade.	139
Figura 74 – Intensidade dos picos característicos C-S-H II por DRX (Taylor, 1997) em pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento sem e com adição de pigmento, após 28 dias de idade.	139
Figura 75 – Microscopia (2000x) da pasta de cimento padrão vibroprensada com baixa relação água-cimento após 28 dias.	140
Figura 76 – Microscopia de fluorescência (40x) do pigmento de óxido de ferro laminado em água.	141
Figura 77 – Microscopia eletrônica de varredura (10000x) da pasta de cimento vibroprensada de baixa relação água cimento com adição de 3% de pigmento, com mais de 28 dias de idade.	142
Figura 78 – Resistência à Compressão (MPa) dos pavers com substituição parcial e total da areia média pelo RCV e com adição de 2% de pigmento aos 3, 7 e 28 dias.	143
Figura 79 – Resistência à compressão (MPa) dos pavers com adição de RCV sem consumo de cimento corrigido aos 3, 7 e 28 dias.	145
Figura 80 – Resistência à compressão (MPa) dos pavers com adição de RCV com consumo de cimento corrigido aos 3, 7 e 28 dias.	146
Figura 81 – Intensidade dos picos característicos da portlandita por DRX em pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento sem e com adição de RCV, após 28 dias de idade.	148
Figura 82 – Intensidade dos picos característicos C-S-H I por DRX (Taylor, 1997) em pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento sem e com adição de RCV, após 28 dias de idade.	148

Figura 83 – Intensidade dos picos característicos C-S-H de laboratório por DRX (Bezerra, ..... 2006) em pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento sem e com adição de RCV, após 28 dias de idade.....	149
Figura 84 – Intensidade dos picos característicos C-S-H II por DRX (Taylor, 1997) em pastas de ..... cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento sem e com adição de RCV,.... após 28 dias de idade.....	149
Figura 85 – (a) Microscopia eletrônica de varredura (1200x) de um grão de RCV ancorado na..... matriz cimentícia em uma pasta de cimento vibroprensado de baixa relação água-cimento e com adição de RCV. (b) EDS do grão de RCV.....	150
Figura 86 – Resistência à compressão (MPa) dos pavers com adição de RCV e 2% de ..... pigmento concomitantemente sem consumo de cimento corrigido aos 3, 7 e 28..... dias.....	152
Figura 87 – Resistência à compressão (MPa) dos pavers com adição de RCV e 2% de ..... pigmento com consumo de cimento corrigido aos 3, 7 e 28 dias. ....	153
Figura 88 – Microscopia eletrônica de varredura de pastas de cimento vibroprensadas com..... baixa relação água cimento, com mais de 28 dias. (a) PASTA PADRÃO (70x). (b) PASTA 3%PIG (80x). (c) PASTA 15% RCV (80x). (d) PASTA 3%PIG15%RCV (80x).....	155
Figura 89 – Microscopia eletrônica de varredura de pastas de cimento vibroprensadas com baixa .... relação água cimento, com mais de 28 dias. (a) PASTA PADRÃO (2000x). (b) ..... PASTA 3%PIG (1000x). (c) PASTA 15% RCV (1500x). (d) PASTA 3%PIG15%RCV (12000x). ....	156
Figura 90 – DTG pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento sem e com adição de pigmento e RCV de maneira isolada e concomitante, após 28 dias de idade. ....	157
Figura 91 – Taxa de absorção média (%) dos pavers com adição de RCV sem e com correção do.... consumo de cimento. ....	159
Figura 92 – Taxa de absorção média (%) dos pavers com adição de RCV e 2% de pigmento.... concomitantemente sem e com correção do consumo de cimento. ....	161
Figura 93 – Cavidade (mm) dos pavers com adição de RCV sem e com consumo de cimento .. corrigido.....	163
Figura 94 – Cavidade (mm) dos pavers com adição de RCV e 2% de pigmento ..... concomitantemente sem e com consumo de cimento corrigido. ....	164
Figura 95 – Cores e texturas dos pavers com formulações de substituição da areia média pelo RCV e.... adição de 2% de pigmentorelativamente aos pavers padrões.....	166

Figura 96 – Cores e texturas dos pavers com formulações de adição concomitante de..... pigmento e RCV relativamente aos pavers padrões. ....	166
Figura 97 – Cores e texturas dos pavers com formulações de adição de RCV relativamente aos .... pavers padrões. ....	166
Figura 98 – Cores e texturas – uma visão geral.....	168

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização química do cimento. Fonte: boletim técnico fornecido pela empresa de ... cimento.....	68
Tabela 2 – Caracterização física do cimento. Fonte: boletim técnico fornecido pela empresa de..... cimento.....	69
Tabela 3 – Caracterização física da areia média.....	69
Tabela 4 – Caracterização física da areia muito grossa.....	70
Tabela 5 – Caracterização física do pedrisco (brita 0). ....	70
Tabela 6 – Classificação física do pigmento de óxido de ferro.....	71
Tabela 7 – Requisitos mínimos de propriedades para pavers da categoria I da NBR 9781 (ABNT,... 2013).....	90
Tabela 8 – Granulometria ponderada dos agregados do traço T <sub>7</sub> .....	94
Tabela 9 – Granulometria ponderada dos agregados do traço T <sub>8</sub> .....	94
Tabela 10 – Fator multiplicativo p. ....	99
Tabela 11 – Formulações e quantitativos das pastas de cimento vibroprensadas ..... confeccionadas.....	105
Tabela 12 – Valores de resistência à compressão e desvio-padrão amostral aos 7 e 28 dias de .. idade de pastas de cimento adicionadas com pigmento vermelho nos teores de 0% a 5%. ....	108
Tabela 13 – Valores de resistência à compressão e desvio-padrão amostral aos 7 e 28 dias de .. idade de pastas de cimento adicionadas com RCV nos teores de 0% a 150%. ...	110
Tabela 14 – Valores de resistência à compressão e desvio-padrão amostral de pastas de ..... cimento aos 7 e 28 dias de idade adicionadas conjuntamente com 100% de cerâmica..... vermelha e com teores de 1% a 4% de pigmento vermelho.....	111
Tabela 15 – Tempos de início, fim de pega e em aberto de pastas de cimento adicionadas com..... pigmento vermelho nos teores de 0% a 5%. ....	113
Tabela 16 – Tempos de início, fim de pega e em aberto de pastas de cimento adicionadas com..... RCV nos teores de 50% a 150%. ....	114
Tabela 17 – Tempos de início, fim de pega e em aberto de pastas de cimento adicionadas ..... conjuntamente com 100% de cerâmica vermelha e com teores de 1% a 4% de pigmento . vermelho.....	115
Tabela 18 – Valores do índice de consistência normal de pastas de cimento adicionadas com ..... pigmentos nos teores de 0% a 5%. ....	116

Tabela 19 – Valores do índice de consistência normal de pastas de cimento adicionadas com .. RCV nos teores de 0% a 150%.....	117
Tabela 20 – Valores do índice de consistência normal de pastas de cimento adicionadas..... conjuntamente com 100% de cerâmica vermelha e com teores de 1% a 4% de pigmento vermelho.....	118
Tabela 21 – Quantitativos de materiais do primeiro conjunto de misturas da curva de finos para a.... produção de 8 peças. ....	121
Tabela 22 – Quantitativos de materiais do segundo conjunto de misturas da curva de finos para a.... produção de 8 peças. ....	121
Tabela 23 – Formulações e quantitativos de materiais para a curva de umidade.....	124
Tabela 24 – Traços analisados na curva de consumo. ....	125
Tabela 25 – Quantitativos de materiais dos traços da curva de consumo. ....	125
Tabela 26 – Formulações e nomenclatura dos traços. ....	129
Tabela 27 – Traços desenvolvidos (cimento:areia média:areia muito grossa:pedrisco:rcv:pig). ...	130
Tabela 28 – Formulações e nomenclatura dos traços com consumo de cimento corrigido. ..	135
Tabela 29 – Traços desenvolvidos com consumo de cimento corrigido. ....	136
Tabela 30 – Resistência à compressão (MPa) e desvio-padrão amostral aos 3, 7 e 28 dias dos..... pavers padrões e do paver de traço 1:5 2%PIG.....	136
Tabela 31 – Resistência à Compressão (MPa) dos pavers com substituição parcial e total da areia ... média pelo RCV e com adição de 2% de pigmento aos 3, 7 e 28 dias.....	143
Tabela 32– Resistência à compressão (MPa) dos pavers com adição de RCV sem consumo de ..... cimento corrigido aos 3, 7 e 28 dias. ....	145
Tabela 33 – Resistência à compressão (MPa) dos pavers com adição de RCV com consumo de..... cimento corrigido aos 3, 7 e 28 dias. ....	146
Tabela 34 – Resistência à compressão (MPa) dos pavers com adição de RCV e 2% de pigmento..... concomitantemente sem consumo de cimento corrigido aos 3, 7 e 28 dias.....	151
Tabela 35 – Resistência à compressão (MPa) dos pavers com adição de RCV e 2% de pigmento..... com consumo de cimento corrigido aos 3, 7 e 28 dias.....	152
Tabela 36 – Taxa de absorção média (%) dos pavers com adição de RCV sem e com o ..... consumo de cimento corrigido. ....	159
Tabela 37 – Taxa de absorção média (%) dos pavers com adição de RCV e 2% de pigmento ..... concomitantemente sem e com o consumo de cimento corrigido. ....	160
Tabela 38 – Cavidade (mm) dos pavers com adição de RCV sem e com consumo de cimento..... corrigido. ....	162

Tabela 39 – Cavidade (mm) dos pavers com adição de RCV e 2% de pigmento.....	
concomitantemente sem e com o consumo de cimento corrigido. ....	164
Tabela 40 – Teores de argamassas dos traços produzidos.....	169

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	23
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b>	28
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	31
1.2.1	<i>Geral</i>	31
1.2.2	<i>Específicos</i>	31
<b>2</b>	<b>CONCRETOS COLORIDOS</b>	32
<b>3</b>	<b>PAVIMENTOS INTERTRAVADOS</b>	36
<b>3.1</b>	<b>Definições Básicas</b>	36
<b>3.2</b>	<b>Considerações sobre a Fabricação de Pavers</b>	44
3.2.1	<i>Máquinas</i>	44
3.2.2	<i>Materiais</i>	46
3.2.3	<i>Considerações sobre o Concreto Seco Vibroprensado e sua Dosagem</i>	48
3.2.4	<i>Cura</i>	53
<b>3.3</b>	<b>Normatização Brasileira e Ensaio de Propriedades</b>	54
<b>3.4</b>	<b>Adição de Resíduos em Pavers</b>	59
<b>4</b>	<b>COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA</b>	62
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b>	66
<b>5.1</b>	<b>Primeira Etapa: Caracterização dos Materiais de Partida</b>	68
5.1.1	<i>Cimento</i>	68
5.1.2	<i>Agregados</i>	69
5.1.3	<i>Pigmento</i>	71
5.1.4	<i>Resíduo de Cerâmica Vermelha</i>	73
5.1.4.1	<i>Coleta do Resíduo de Cerâmica</i>	73
5.1.4.2	<i>Moagem do Resíduo de Cerâmica Vermelha</i>	75

5.1.4.3	Caracterização Físico-química, Cristalográfica e Microestrutural do do Resíduo de..... Cerâmica Vermelha Moído.....	76
5.1.5	Água.....	81
5.1.6	Mistura do Pigmento mais Resíduo de Cerâmica Vermelha.....	81
<b>5.2</b>	<b>Segunda Etapa: Testes Preliminares em Pastas de Cimento</b> .....	<b>82</b>
5.2.1	Resistência à Compressão das Pastas de Cimento.....	83
5.2.2	Tempos e Início e Fim de Pega das Pastas de Cimento .....	84
5.2.3	Índice de Consistência Normal das Pastas de Cimento .....	85
5.2.4	Cor .....	85
<b>5.3</b>	<b>Terceira Etapa: Dosagem do Traço Padrão, Formulações e Testes de Propriedades dos Pavers</b> .....	<b>85</b>
5.3.1	Procedimentos para a Produção dos Pavers .....	86
5.3.1.1	Mistura dos Materiais.....	86
5.3.1.2	Vibroprensa utilizada.....	86
5.3.1.3	Procedimento de Cura das Peças.....	88
5.3.2	Dosagem do Concreto Referência (Paver Padrão).....	89
5.3.2.1	Curva de Finos.....	90
5.3.2.1.1	<b>Determinação da Proporção entre os Agregados</b> .....	<b>92</b>
5.3.2.1.2	<b>Plotagem da Curva de Finos</b> .....	<b>96</b>
5.3.2.2	Curva de Umidade.....	96
5.3.2.3	Curva de Consumo.....	97
5.3.3	Desenvolvimento das Formulações de Substituição e Adição e Correção do Consumo de..... Cimento.....	98
5.3.4	Testes de Propriedades dos Pavers .....	98
5.3.4.1	Resistência à Compressão .....	100
5.3.4.2	Determinação da Absorção de Água .....	100
5.3.4.3	Resistência à Abrasão.....	100
5.3.4.4	Cor .....	104

<b>5.4</b>	<b>Quarta Etapa: Pastas de Cimento Vibroprensadas com Baixa Relação Água-Cimento...</b>	<b>105</b>
5.4.1	<i>Confecção das Pastas de Cimento Vibroprensadas</i> .....	105
5.4.2	<i>Análises Microestrutural, Térmica e Cristalográfica de Pastas de Cimento Vibroprensadas</i> .....	106
5.4.2.1	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com Análise de EDS .....	106
5.4.2.2	Termogravimetria (TG/DTG) .....	106
5.4.2.3	Difração de Raios-X (DRX) .....	107
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>108</b>
<b>6.1</b>	<b>Testes Preliminares em Pastas de Cimento</b> .....	<b>108</b>
6.1.1	<i>Resistência à Compressão das Pastas de Cimento</i> .....	108
6.1.2	<i>Tempo de Início e Fim de Pega</i> .....	113
6.1.3	<i>Índice de Consistência Normal</i> .....	116
6.1.4	<i>Análise da Cor e Considerações Finais sobre os Testes Preliminares</i> .....	119
<b>6.2</b>	<b>Dosagem do Traço Padrão, Formulações e Testes de Propriedades dos Pavers...</b>	<b>121</b>
6.2.1	<i>Dosagem do Concreto Referência (Paver Padrão)</i> .....	121
6.2.1.1	Curva de Finos .....	121
6.2.1.2	Curva de Umidade .....	124
6.2.1.3	Curva de Consumo .....	125
6.2.1.4	Considerações sobre o Traço Encontrado .....	127
6.2.2	<i>Formulações e Correção do Consumo de Cimento</i> .....	128
6.2.3	<i>Testes de Propriedades dos Pavers</i> .....	136
6.2.3.1	Resistência à Compressão .....	136
6.2.3.1.1	<i>Resistência à Compressão dos Pavers Padrão, Cinza, Padrão Colorido e 1:5 2%PIG</i> .....	136
6.2.3.1.2	<i>Resistência à Compressão dos Pavers com Substituição Parcial e Total da ... Areia Média pelo Resíduo de Cerâmica Vermelha e Adição de 2% de Pigmento</i> .....	143
6.2.3.1.3	<i>Resistência à Compressão dos Pavers com Adição de Resíduo de Cerâmica Vermelha</i> .....	136

<b>6.2.3.1.4 Resistência à Compressão dos Pavers com Adição de Resíduo de Cerâmica Vermelha e 2% de Pigmento Concomitantemente</b> .....	136
<b>6.2.3.2 Absorção de Água</b> .....	136
<b>6.2.3.2.1 Absorção de Água dos Pavers com Adição de Resíduo de Cerâmica Vermelha</b> .....	158
<b>6.2.3.2.2 Absorção de Água dos Pavers com Adição de Resíduo de Cerâmica Vermelha e 2% de ... Pimento Concomitantemente</b> .....	160
<b>6.2.3.3 Resistência à Abrasão</b> .....	162
<b>6.2.3.3.1 Resistência à Abrasão dos Pavers com Adição de Resíduo de Cerâmica Vermelha</b> ....	162
<b>6.2.3.3.2 Resistência à Abrasão dos Pavers com Adição de Resíduo de Cerâmica Vermelha e 2% de Pigmento Concomitantemente</b> .....	164
<b>6.2.3.4 Cor</b> .....	136
<b>7 CONCLUSÕES</b> .....	170
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	173
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	174

## 1 INTRODUÇÃO

Na cadeia produtiva da construção civil, o segmento da fabricação de telhas e tijolos de cerâmica vermelha gera resíduos após a queima, os quais usualmente não têm destinação adequada, perdendo a indústria, a administração pública e a sociedade em razão da ausência de sustentabilidade nesse processo. Diagnóstico conhecido destes resíduos mostra que a quantidade gerada é significativa e existe potencial para sua reciclagem na construção civil, devendo tal possibilidade ser investigada (FONSECA, 2006). A falta de modernização da indústria de cerâmica vermelha é um fator agravante e faz com que em seu processo haja uma grande perda com geração de resíduos provenientes de tijolos, telhas e blocos cerâmicos mal armazenados (Figura 1) e quebrados ou defeituosos (Figura 2). Eles passaram pelo ciclo total de produção e foram descartados por apresentar trincas, empenamentos, baixa resistência mecânica, deformações ou qualquer outro defeito que impeça o uso dentro dos padrões exigidos pela normalização vigente e pelo mercado.

Figura 1 – Resíduos de cerâmica vermelha gerados por mau armazenamento.



Fonte: Da Autora (2015).

Figura 2 – Resíduos de cerâmica vermelha gerados no processo de fabricação.



Fonte: Da Autora (2015).

Estudos em diversas instituições buscam soluções para destinação adequada desses resíduos a fim de conciliar vários aspectos, como tipo e quantidade de resíduo, tecnologia e processos de beneficiamento, reutilização e reciclagem, bem como seus impactos econômicos e ambientais. Assim, a presente pesquisa busca incorporar os resíduos de cerâmica vermelha (RCV) da região de Caruaru-PE em compósitos cimentícios, mais especificamente em pisos intertravados de concreto.

Os resíduos utilizados em compósitos cimentícios, dependendo da constituição química, morfologia e granulometria de seus grãos, podem vir a contribuir para a melhoria de suas propriedades através da atividade pozolânica e do efeito *filler*. As argilas calcinadas em temperaturas acima de 550°C e finamente moídas possuem potencialidade pozolânica. Em conversas com proprietários de cerâmicas vermelhas em Caruaru-PE, obteve-se a informação de que a temperatura média de queima nos fornos é de 500°C a 900°C, o que gerou expectativas em relação ao desenvolvimento de atividade pozolânica por esse resíduo regional. Além da possível ação química (pozolânica) do resíduo beneficiado granulometricamente por meio de processos de cominuição e moagem, existe a ação física de preenchimento dos vazios de empacotamento e de outros vazios da matriz cimentícia através do efeito *filler* no compósito estudado (paver). A escolha de uma fina granulometria do RCV

tem influência direta no comportamento mecânico, microestrutural e de durabilidade dos compósitos cimentícios produzidos com o mesmo.

A incorporação de RCVs gerados em Caruaru-PE e entorno em compósitos cimentícios já tem sido foco de pesquisas e trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Construção Civil (LCC) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Centro Acadêmico do Agreste (CAA). Alcantara, Nóbrega e Silva (2012) encontraram resultados bastante promissores do ponto de vista científico em argamassas de revestimento (Figura 3), substituindo o agregado miúdo por RCV em diversos teores; e o efeito *filler* foi responsável por melhorias e/ou manutenção das propriedades do sistema cimentício. Um ponto interessante a se notar com os resultados das pesquisas desenvolvidas no grupo é que, com o aumento do teor de incorporação de cerâmica vermelha no sistema, pode-se observar também um aumento na coloração alaranjada dos compósitos.

Figura 3 – Argamassas de revestimentos com RCVs em substituição ao agregado miúdo nos teores de 0%, 10%, 15%, 20% e 30%.



Fonte: Alcantara, Nóbrega e Silva (2012).

É prática comum e crescente o uso de pigmentos em materiais cimentícios, principalmente em argamassas e concretos. Um exemplo de prática comum do uso de concretos coloridos está em pisos, com o emprego de concreto estampado e de peças de pavimento intertravado (Figura 4 e Figura 5). Essas peças, mais conhecidas como pavers, são comumente utilizadas em projetos de urbanização, no assentamento de calçadas, estacionamentos, praças, entre outros. Seu mercado está em alta, e seu uso é bastante difundido. Dentre as principais vantagens do uso de pavers, podem-se citar:

- bom conforto térmico do pavimento;
- economia de energia elétrica na iluminação de vias públicas, por exemplo; perante a capacidade de reflexão da luz do piso intertravado;

- fácil assentamento, manutenção dos blocos e versatilidade de uso; podendo ser facilmente removido e recolocado para intervenções no subsolo e/ou em canos subterrâneos, sem desperdícios;
- alguns tipos de piso podem ser permeáveis contribuindo para não sobrecarregar os sistemas de drenagem de águas pluviais das cidades e controle de enchentes;
- estética, perante a possibilidade de uso de blocos coloridos.

Figura 4 – Pavers coloridos em projeto de urbanização.



Fonte: ABCP (200?) apud Piovesan (2009).

Figura 5 – Pavers coloridos.



Fonte: PCA (2002).

Em Caruaru-PE, há uma fábrica de pré-moldados que firmou parceria com o LCC/UFPE/CAA e que tem investido em produção de pavers coloridos, sendo o vermelho o mais demandado para venda (Figura 6). A coloração avermelhada desses compósitos é obtida com o pigmento inorgânico de óxido de ferro.

Figura 6 – Pavers coloridos vermelhos da fábrica parceira.



Fonte: Da Autora (2015).

Indústrias locais de pavers apontam que a adição de pigmento provoca uma redução da propriedade de resistência à compressão nos compósitos coloridos relativamente aos compósitos cinzas tradicionais. Na literatura, há controvérsias com relação à influência do pigmento vermelho em materiais cimentícios. Fernandes (2013) afirma que o pigmento não altera a resistência do produto. Outros autores também apontam manutenção ou suaves incrementos de resistência (PIOVESAN, 2009; LEE, LEE & YU, 2003). No entanto, há trabalhos que relatam perdas nesse parâmetro, tais como Alencar (2005), Costa et al. (2004) e Hendges et al. (2004).

Nesse cenário, observa-se uma linha de raciocínio confusa na comunidade científica atual em relação à influência da adição de pigmentos em materiais cimentícios. Assim, a presente pesquisa da UFPE/CAA busca, com ensaios mecânicos e análises de natureza microestrutural e cristalográfica, entender o comportamento desses compósitos; além disso, propõe a reutilização do RCV de Caruaru-PE através de sua incorporação na fabricação de blocos de concreto para pavimentação coloridos. O RCV incorporado ao sistema atuará como matiz colorimétrica para viabilizar a redução de teor de pigmento vermelho, visto que proporciona uma cor alaranjada ao mesmo, e ainda conferirá melhorias das propriedades do

compósito cimentício através do efeito *filler*. Vale ressaltar que o uso de pigmento na produção dos pavers encarece o produto. Atualmente, os pavers coloridos produzidos pela indústria parceira são 17% mais caros do que os seus pavers cinzas. Deste modo, reduzir a quantidade de pigmento utilizado no processo é vantajoso também do ponto de vista econômico.

A adição em teor reduzido (em relação à indústria) do pigmento de óxido de ferro (vermelho) somada à incorporação do RCV (alaranjado) nos compósitos estudados poderão lhes atribuir cores ligeiramente diferentes dos pavers coloridos do mercado; possuindo, assim, uma identidade visual própria que está intrinsecamente ligada ao viés da sustentabilidade.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A escolha da indústria de cerâmica vermelha está intrinsecamente ligada ao seu baixo grau de industrialização. Sua produção ainda segue moldes antigos, e poucas foram as contribuições para o seu crescimento sustentável. As indústrias produtoras de cerâmica vermelha, que são em geral de pequeno e médio porte, utilizam tecnologias ultrapassadas tanto no processo de produção (extração e preparo de matérias-primas, conformação, secagem e queima), quanto em relação aos equipamentos e nível de automação (MARIANO; LUCENA, 2008).

As regiões que mais tiveram crescimento no setor da indústria cerâmica foram a Sul e a Sudeste, como lembra a Associação Brasileira de Cerâmica – ABCERAM – em razão da “maior densidade demográfica, maior atividade industrial e agropecuária, melhores infraestrutura e distribuição de renda, associado ainda às facilidades de matérias-primas, energia, centros de pesquisa, universidades e escolas técnicas.” (CERÂMICA, 2011). Entretanto, as outras regiões têm tido um aumento significativo da demanda por cerâmica vermelha, principalmente nos setores ligados à construção civil.

Segundo estimativa do Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não Metálicos – Cerâmica Vermelha – do Ministério de Minas e Energia, em 2012 a produção de peças de cerâmica vermelha teve a seguinte distribuição nas regiões do país: Sudeste (45,56%), Nordeste (21%), Sul (16,67%), Centro-Oeste (10,0%) e Norte (6,78%).

O Brasil, em uma média anual, produz atualmente 130 milhões de toneladas de cerâmica vermelha, 65 bilhões de peças, tem um consumo de 170 milhões de toneladas de argila. No país, os resíduos chegam a 6,5 milhões de toneladas. No estado de São Paulo, os

números são significativos: 16 bilhões de peças, 32 milhões de toneladas de cerâmica e 37 milhões de toneladas de argila utilizadas (IPT, 2013).

Já, na região Nordeste, segundo o Informe Setorial de Cerâmica Vermelha do Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste (ENETE) em 2010, a cerâmica vermelha é uma das principais atividades industriais. A produção está localizada principalmente nos estados do Ceará, Bahia e Pernambuco – este último atende cerca de 8,3% da produção do Nordeste –, vindo em seguida Rio Grande do Norte, Maranhão e Piauí. As principais aglomerações em Pernambuco se encontram no Centro-Oeste do estado, no Agreste e na Zona da Mata, estando as principais concentrações nos municípios de Caruaru, Bezerros, Recife, São Lourenço da Mata, Pau D’Alho e Vitória de Santo Antão.

“Os resíduos gerados não têm uma aplicação econômica, esse material é descartado e, eventualmente, usado para cascalhamento de estradas vicinais e acessos aos próprios empreendimentos cerâmicos.” (IPT, 2013). Segundo dados coletados da indústria de cerâmica vermelha de Caruaru-PE, parceira desta pesquisa, o seu índice de perdas mensal é cerca de 5%, resultando no descarte de aproximadamente 60.000 peças de tijolos por mês, o que é em torno de 138 toneladas de rejeitos industriais ou ainda 17,3 casas populares. Associada a esse grande volume, tem-se a dificuldade de descarte desses resíduos e o fato de ainda não ter sido encontrada industrial ou cientificamente uma alternativa de utilização total desse montante.

Encontram-se instaladas, na cidade de Caruaru-PE, 10 indústrias de cerâmica vermelha cadastradas no banco de dados do ano de 2010 da Federação das Indústrias do Estado de Pernambuco (FIEPE), além de diversas olarias informais de menores portes, onde não existem sistemas para recuperação desses resíduos nem, em sua grande parte, qualquer controle sobre a sua disposição.

Já a indústria de pisos intertravados sofreu um grande impulso a partir do final dos anos 90. Segundo informações do Fórum Intercement (2013) sobre pavimentos intertravados, que reuniu vários representantes do setor de pré-moldados, são mais de 2000 indústrias de pavers espalhadas pelo país. Tal impulso foi consequência dos grandes investimentos em construções, edificações e estruturas; a versatilidade de uso desses blocos de pavimentação é ampla, eles são bastante aplicados em condomínios populares dos programas de habitação do Governo Federal (Minha Casa Minha Vida), bem como fizeram parte das especificações técnicas dos projetos das áreas externas dos estádios da última Copa do Mundo FIFA, ocorrida no Brasil.

No estado de Pernambuco, 24 indústrias estão especificadas no cadastro do ano 2014 da FIEPE como produtoras de blocos de concreto. Em Caruaru-PE, no ano de 2014, foi

implantado um projeto de reurbanização da principal avenida da cidade, em que foram assentados cerca de 3600 m<sup>2</sup> de pisos intertravados (180 mil peças), segundo dados coletados na Empresa Urbana de Planejamento de Caruaru-PE (URB/Caruaru-PE). Parte desse projeto é mostrada na Figura 7. Na cidade, encontram-se instaladas 2 indústrias de grande porte de peças pré-moldadas de concreto, que buscam cada vez mais investimentos no mercado local em ascensão.

Figura 7 – Pavers em projeto de reurbanização na cidade de Caruaru-PE.



Fonte: Da Autora (2015).

Perante tal crescimento, vislumbra-se que essas peças de concreto se tornem potenciais imobilizadoras de resíduos industriais e da própria construção civil, visto que estes, quando incorporados a compósitos cimentícios mais tradicionais (concretos convencionais e argamassas), já têm apresentado na literatura, de um modo geral, bons resultados na melhoria ou constância de suas propriedades. É esperado que esse comportamento se repita para os concretos de natureza seca e vibroprensados (tipo de concreto dos blocos de vedação e dos pavimentos intertravados).

Além disso, em relação aos pavers coloridos, tem-se que o preço final desses compósitos cimentícios acaba se tornando um ponto negativo, pois somada ao investimento para a compra do pigmento, há ainda a exigência de maior controle tecnológico, uma vez que a adição de pigmentos pode interferir nas suas propriedades. Por exemplo, em pavimentação, os blocos coloridos podem chegar a ser de 20% a 30% mais caros que os tradicionais (NAKARUMA, 2003). A fábrica parceira de pré-moldados, responsável pela fabricação dos

blocos de concreto intertravados para pavimentação, se mostrou interessada e aberta a inovações.

Deste modo, este estudo, através da incorporação de RCV em pavers, alia a melhoria de propriedades do sistema (proporcionada pelo efeito *filler*) com a possibilidade de redução de custo na produção dos pavers alternativos; visto que, com o resíduo cerâmico, torna-se mais fácil atingir uma coloração avermelhada/laranja com teores mais baixos de pigmento vermelho, que encarece o produto final.

O sucesso do trabalho refletirá em benefícios para as indústrias cerâmicas – proporcionando-lhes uma destinação adequada aos seus rejeitos –, para o meio ambiente – menos agredido –, para a população em geral – com materiais de construção de menor custo – e para as fábricas de pré-moldados – que poderão trabalhar também nas certificações e selos ambientais e materiais ecologicamente sustentáveis, temas tão exacerbados na atualidade.

## **1.2 OBJETIVOS**

### *1.2.1 Geral*

Desenvolver blocos de concreto intertravados coloridos para pavimentação, utilizando resíduos de cerâmica vermelha para conferir melhorias das propriedades do sistema e como matiz colorimétrica para viabilizar a redução de teor de pigmento.

### *1.2.2 Específicos*

1. Caracterizar físico, químico, microestrutural e cristalograficamente o RCV e o pigmento vermelho;
2. Desenvolver os traços através da metodologia de dosagem recomendada pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP – para blocos de concreto intertravados;
3. Avaliar como a incorporação do RCV (em adição e substituição) e do pigmento (em adição) – de formas isolada e concomitante – interfere nas propriedades no estado endurecido dos blocos de concreto para pavimentação;
4. Avaliar as alterações microestruturais e cristalográficas dos sistemas produzidos;
5. Avaliar as alterações na coloração dos sistemas produzidos.

## 2 CONCRETOS COLORIDOS

O concreto é o material que compõe a maioria das estruturas. “Sua baixa permeabilidade, flexibilidade de uso e formas e, principalmente, o seu desempenho mecânico são as principais características que fazem desse material um dos mais utilizados no mundo.” (PIOVESAN, 2009, p. 22). A essas características deve-se incluir a aparência estética ganhada pelas edificações ou infraestruturas quando, ao concreto, são adicionadas textura, cores (através de pigmentos) e formas. A partir daí, o mesmo deixa de ter função apenas estrutural, mas também passa a ser um elemento arquitetônico (PIOVESAN, 2009). Além da função estética, o uso de compósitos cimentícios coloridos dispensa revestimentos, caracterizando uma facilidade no processo construtivo.

Existem vários exemplos de construções que utilizam concreto colorido espalhadas pelo mundo. Em Estocolmo, na Suécia, encontra-se a ponte *Årsta* (Figura 8), de 833 metros de comprimento, inaugurada em 2005 e que atravessa a Baía *Årstaviken*. Na sua construção, para a obtenção da coloração marrom avermelhada, foram utilizadas 350 toneladas de pigmento (LANXESS ENERGIZING CHEMISTRY, 2014).

Figura 8 – Ponte *Årsta* em Estocolmo, na Suécia, de cor marrom avermelhada.



Fonte: *Lanxess Energizing Chemistry* (2014).

Na região da vinícola espanhola de *La Rioja*, encontra-se a adega *Antion*, construída entre 2004 e 2007 (Figura 9). Além de adega, este projeto também é definido como um centro de visitantes, onde os hóspedes podem aprender em detalhes sobre o vinho. Destaca-se que

12.000 m<sup>3</sup> de concreto, com uma superfície total de aproximadamente 14 mil m<sup>2</sup>, foram coloridos com pigmentação amarela (LANXESS ENERGIZING CHEMISTRY, 2014).

Figura 9 – Adega *Antion*, na região da vinícola espanhola de *La Rioja*, construída com concreto de coloração amarela.



Fonte: *Lanxess Energizing Chemistry* (2014).

Várias obras e estruturas coloridas podem ser citados: o edifício da Aliança Francesa de Bogotá – Colômbia –, o hotel Emirates Palace de *Abu Dhabi* – Emirados Árabes –, o estádio de futebol *Soccer City* em Johannesburgo – África do Sul –, entre outros. No Brasil, a aplicação de cores em concreto ganha destaque na pavimentação, através do uso dos pavers (Figura 10).

Figura 10 – Pavers coloridos para pavimentação em projeto de urbanização.



Fonte: Da Autora (2015).

As peças coloridas mais demandadas no mercado local são as vermelhas, cuja tonalidade é obtida através da adição de pigmento inorgânico de óxido de ferro. As diversas tonalidades de pigmentos podem ser obtidas a partir desse pigmento, através de variações do seu processo de oxidação. O primeiro processo é o amarelo e com variação de temperatura, tem-se o vermelho. Por fim, retirando o oxigênio do processo, tem-se o preto (PIOVESAN, 2009). “As outras cores resultam da combinação desses pigmentos básicos. As cores azul e verde são resultantes dos óxidos de cromo e cobalto, respectivamente [...]” (PIOVESAN, 2009, p. 36). A versatilidade e abrangência de aplicação do óxido de ferro como pigmento faz com que haja necessidade de estudos envolvendo esse pigmento.

Indústrias de pavers apontam uma redução da propriedade de resistência à compressão nos compósitos coloridos relativamente aos compósitos cinzas tradicionais. Na literatura, há controvérsias com relação à influência do pigmento vermelho em materiais cimentícios. Segundo Fernandes (2013), a utilização de pigmento em pavers, apesar de ser um fino inerte, não altera a resistência do produto, porque, ao tempo que aumenta o consumo de água do sistema, melhora as condições de compactação da mistura. Outros autores também apontam manutenção ou suaves incrementos de resistência à compressão (PIOVESAN, 2009). No entanto, há trabalhos que relatam perdas nesse parâmetro, tais como Alencar (2005), Costa et al. (2004) e Hendges et al. (2004).

Helene e Galante (1999), Lee, Lee e Yu (2005) e Piovesan (2009) abordam que os pigmentos para materiais cimentícios podem atuar como *filler*, influenciando na resistência, secagem, retração e durabilidade dos compósitos de cimento devido à finura e à forma das partículas de cada pigmento.

A análise de cromacidade dos compósitos cimentícios coloridos é também de grande importância, pois é sabido que se pode relacionar, segundo a literatura, variações dos diferentes teores de pigmentação às variações das propriedades dos mesmos. A Portland Cement Association (1999) ressalta que, entre os fatores que podem interferir na cor dos materiais cimentícios com pigmento, estão: o tipo e a cor do cimento; o tipo e a dosagem do pigmento; tipo, graduação, cor e limpeza dos agregados; e, por fim, tipo e dosagem das adições. Os autores colocam que quanto maior a relação água-cimento, menos intensa será a cor final alcançada junto ao material cimentício.

Sabe-se que o teor de pigmento ideal está intimamente relacionado ao ponto de saturação da cor no sistema; ou seja, a partir desse ponto de saturação, o aumento da tonalidade do compósito cimentício é praticamente nulo, não necessitando aumentar o teor de pigmento no sistema. Quantidades maiores adicionadas dos mesmos apenas acarretariam maiores interferências nas propriedades do compósito e nos custos de produção. Esse ponto de saturação normalmente é atingido entre 3% e 5% da adição do pigmento em relação à massa de cimento (PIOVESAN, 2009). A indústria de pré-moldados, parceira desta pesquisa, utiliza na produção de pavers coloridos vermelhos um teor de adição de 4% de pigmento de óxido de ferro.

É importante salientar que alterações no teor de finos dos compósitos cimentícios poderão provocar variações colorimétricas na superfície (KIRCHHEIM et al., 2005). Esse fenômeno se dá em função da maior superfície específica dos finos (PIOVESAN, 2009) e, conseqüentemente, maior quantidade de pasta requerida pelo sistema, segundo ressalta Coelho (2001). Além disso, a microestrutura final do material cimentício também está relacionada com a sensação visual do observador, de forma que o tamanho final dos cristais altera a forma de absorção da luz.

### 3 PAVIMENTOS INTERTRAVADOS

#### 3.1 Definições Básicas

Os blocos de concreto para pavimentação, também conhecidos como pavers, são peças pré-moldadas, cuja função é servir de superfície de rolamento e acabamento para pavimentação ou calçamento.

A camada superficial apresenta características que propiciam conforto ao trânsito de pessoas. Já sua estrutura permite o trânsito de veículos leves ou pesados, dependendo da categoria e da aplicação dos pavers. A pavimentação intertravada se caracteriza pela sua simplicidade de assentamento, visto que as peças são simplesmente colocadas sobre uma camada de areia que serve de regularização da base e também atua na distribuição das cargas (FERNANDES, 2013).

O intertravamento das peças, segundo Hallack (2001) apud Cruz (2003), é a capacidade que as mesmas possuem de adquirir resistência aos movimentos de deslocamento individual. Tal característica é obtida pela transmissão de parte da carga de uma peça para a peça vizinha através do atrito lateral entre elas (FERNANDES, 2013), pelo formato destas, pelo arranjo de assentamento, pelas características de rejuntamento e das camadas inferiores da pavimentação.

A NBR 9781 (ABNT, 2013) define pavimento intertravado como sendo:

pavimento flexível cuja estrutura é composta por uma camada de base (ou base e sub-base), seguida por camada de revestimento constituída por peças de concreto justapostas em uma camada de assentamento e cujas juntas entre as peças são preenchidas por material de rejuntamento e o intertravamento do sistema é proporcionado pela contenção. (ABNT, 2013, p. 2).

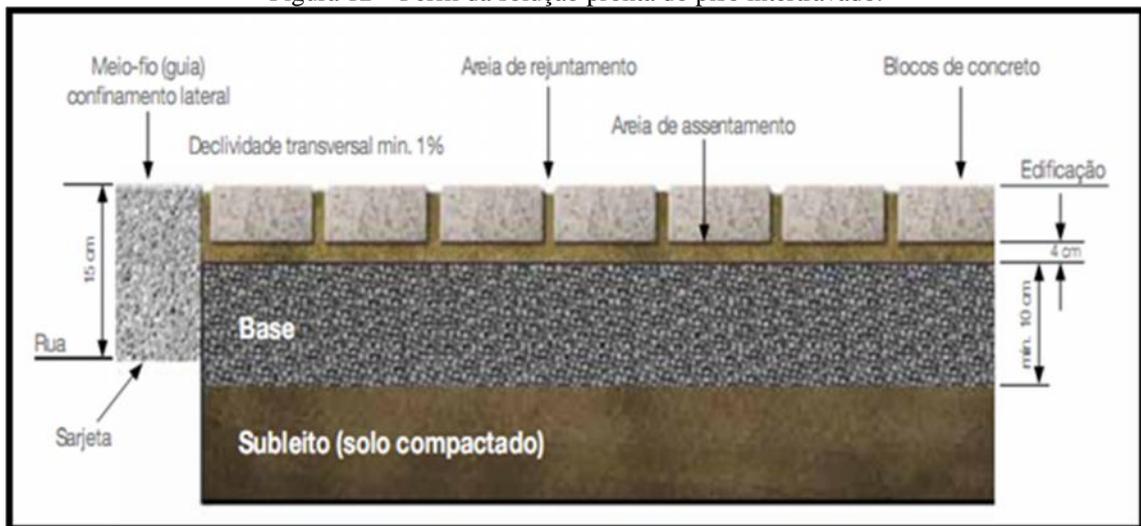
Vale aqui esclarecer a diferença entre piso intertravado e paver. Fernandes (2013) entende que o piso intertravado corresponde à solução pronta, com base compactada, confinamento e rejuntamento das peças; já o paver corresponde à peça em si. Nas Figuras 11 e 12, são mostrados exemplos de peça de paver e de perfil da solução pronta do piso intertravado, respectivamente.

Figura 11 – Exemplo de blocos de concreto para pavimentação.



Fonte: Hood (2006).

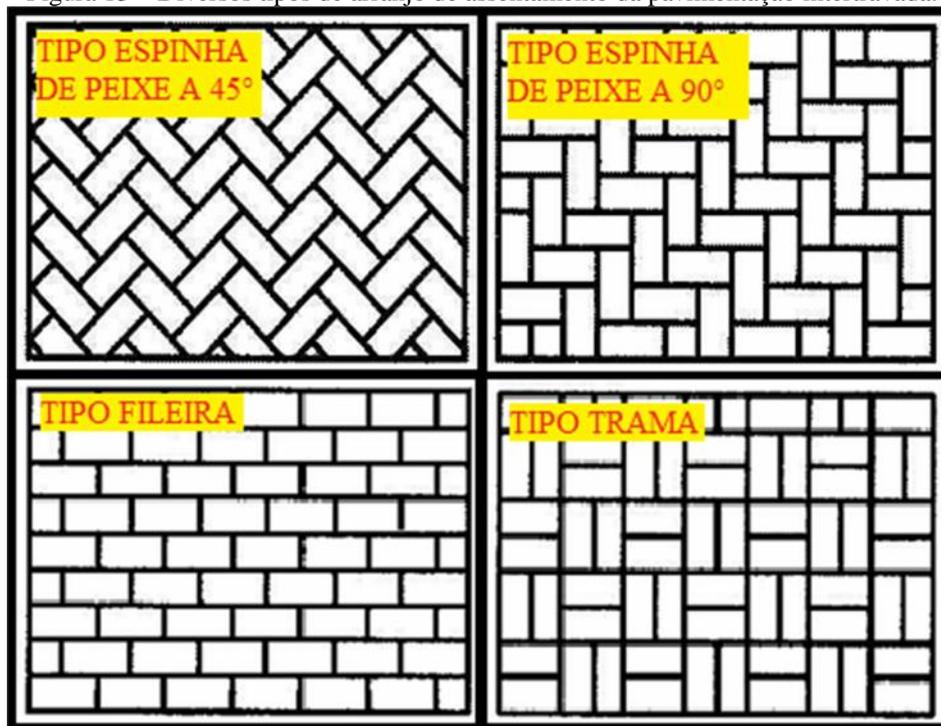
Figura 12 – Perfil da solução pronta do piso intertravado.



Fonte: ABCP (2010).

Os blocos permitem uma diversidade de arranjos de assentamento que irão definir a estética do pavimento. Cruz (2003) lembra que os mais utilizados no assentamento da pavimentação intertravada são os tipos de Espinha de Peixe a 45°, Espinha de Peixe a 90°, Fileira e Trama. Eles estão ilustrados na Figura 13.

Figura 13 – Diversos tipos de arranjo de assentamento da pavimentação intertravada.



Fonte: Cruz (2003).

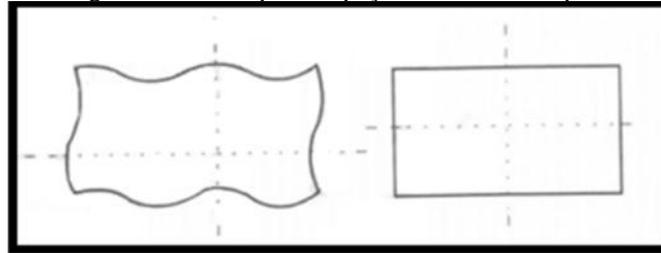
Fernandes (2013) aponta que no mundo existem mais de 100 modelos de pavers, inclusive com finalidades diferentes. No Brasil, os mais comuns são os modelos Prisma, 16 faces, Paviessse, Sextavado, Raquete, Duplo T e Estrela, segundo Fernandes (2013). Esses nomes variam de região para região.

Em relação aos formatos, segundo a NBR 9781 (2013), os pavers são definidos em quatro tipos básicos:

- Tipo I: peça de concreto com formato próximo ao retangular, com relação comprimento/largura igual a dois, que se arranjam entre si nos quatro lados e podem ser assentadas em fileiras ou em espinha de peixe.
- Tipo II: peças de concreto com formato único que só podem ser assentadas em fileiras.
- Tipo III: peças de concreto com formatos geométricos característicos, como trapézios, hexágonos, triedros, etc., com pesos superiores a 4 kg.
- Tipo IV: conjunto de peças de concreto de diferentes tamanhos, ou uma única peça com juntas falsas, que podem ser utilizadas com um ou mais padrões de assentamento.

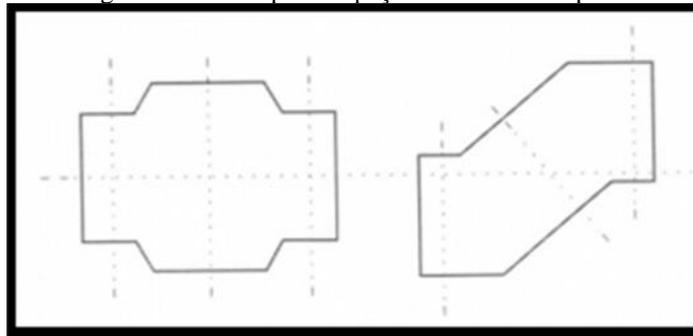
Nas Figuras 14, 15, 16 e 17, seguem representações desses modelos, respectivamente.

Figura 14 – Exemplos de peças de concreto Tipo I.



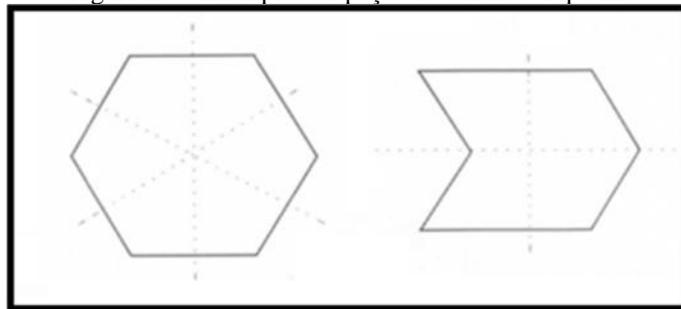
Fonte: ABNT (2013).

Figura 15 – Exemplos de peças de concreto Tipo II.



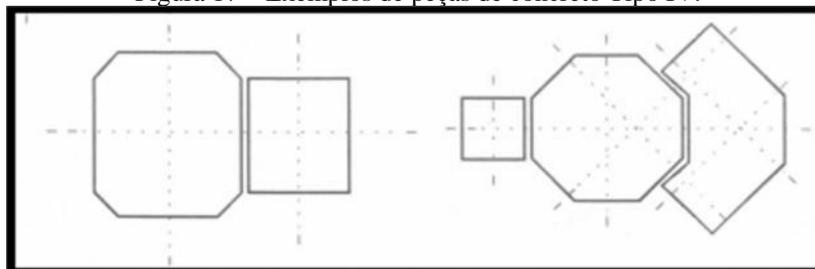
Fonte: ABNT (2013).

Figura 16 – Exemplos de peças de concreto Tipo III.



Fonte: ABNT (2013).

Figura 17 – Exemplos de peças de concreto Tipo IV.



Fonte: ABNT (2013).

Além de classificados segundo o formato, os pavers podem também ser descritos segundo seu processo de fabricação. Seguem abaixo tais processos e um resumo das considerações de Fernandes (2013) e Gregorio (2012) sobre os mesmos.

**Paver prensado:** este tipo de paver é fabricado através de um sistema de vibrocompressão, feito através de máquinas chamadas “vibroprensas”, que proporcionam elevada compactação às peças, aumentando sua resistência mecânica e durabilidade. Tal processo também resulta em um melhor desempenho estético e de produtividade, além de grande precisão dimensional das peças, visto que as vibroprensas são dotadas de moldes metálicos; requer altos investimentos iniciais por causa do maquinário.

**Paver dormido ou em descanso:** geralmente os pavers dormidos ficam nos moldes de um dia para o outro (daí o nome “dormido” ou “em descanso”). “Como [esses últimos] são de plástico, aço ou fibra, o paver fica com um acabamento superficial extremamente liso, sendo, por isso, preferido a aplicações em áreas domésticas [...]” (FERNANDES, 2013, p. 29). Este processo permite a produção de peças em duas camadas: uma camada fina – com menos agregado graúdo para obtenção de um melhor acabamento – e uma camada grossa – com mais agregado graúdo para obtenção de resistência com menos aglomerante –. As suas desvantagens são a baixa produtividade – com a demanda de uma grande quantidade de moldes –, bem como a necessidade de uma base bem executada; visto que as peças não possuem intertravamento pelo fato de serem bastante lisas.

**Paver batido ou virado:** para sua produção é suficiente um jogo de 4 a 8 formas metálicas, uma betoneira para misturar o concreto e uma mesa vibratória destinada a adensar a mistura (opcional). As formas são cheias, e as peças são imediatamente desformadas, virando o molde de cabeça para baixo sobre uma superfície nivelada e untada com óleo ou coberta com plástico ou ainda com areia a fim de evitar a aderência na base. O método também permite a confecção das peças em duas camadas, uma fina e outra mais grossa, fazendo com que o consumo de cimento seja reduzido nesta última. Outro ponto positivo do método é o fato de, necessariamente, o sistema irá trabalhar na umidade ótima, visto que, se a mistura ficar seca, esfarela, e, se ficar mole, deforma. Um ponto fraco desse processo produtivo é a produtividade, muito pequena em relação ao processo prensado. “Uma equipe de 6 pessoas bem habilitadas produz 50 m<sup>2</sup>/dia contra 100 m<sup>2</sup>/dia do sistema dormido e 400 m<sup>2</sup>/dia no sistema prensado.” (FERNANDES, 2013, p. 31). Geralmente esse processo se aplica na fabricação do paver sextavado (Figura 18), “onde a maior área da peça permite menor concentração de carga no solo, reduzindo as tensões solicitantes sobre o pavimento e diminuindo os efeitos de deformação sobre este.” (GREGORIO, 2012, p. 8).

Figura 18 – Produção de paver virado do modelo sextavado.



Fonte: Fernandes (2013).

Existem variações dessas classificações. Por exemplo, há o paver colorido, citado anteriormente, comumente utilizado em demarcações de ambientes, criação de faixas exclusivas, projetos de urbanização, entre outros. Ele é obtido a partir da adição de pigmentos de variadas cores à base de óxido de ferro, geralmente em teores que variam de 3% a 5% em relação à massa do cimento. Nas Figuras 19 e 20 podem ser vistas as diversas possibilidades de cores nas peças e a versatilidade de aplicação das mesmas em projetos urbanos.

Já o paver dupla capa é uma variação do paver prensado. Ele pode ser produzido em duas camadas com a adaptação de um segundo sistema de alimentação na máquina de extrusão (FERNANDES, 2013). A dupla camada permite redução de custo, diminuindo o consumo de cimento empregado na camada mais grossa inferior, visto que esta pode ser feita com agregados mais graúdos e sem pigmentos. Já a camada superior, menos espessa, possui mais finos (areia) e pode ser pigmentada. O uso desse tipo de paver ainda é pequeno no Brasil.

Também há os pavers drenantes e permeáveis. A diferença entre eles é que, segundo Fernandes (2013), nas peças permeáveis, a água passa pelo interior da peça, em poros propositalmente deixados com esta finalidade; já, no formato drenante, a água da chuva passa por aberturas grandes entre as peças, obtidas através do formato irregular ou por meio de espaçadores, que podem ser preenchidas com brita ou plantio de grama (Figura 21). A água passante pela camada superficial de pavers do pavimento é direcionada para as próximas

camadas, constituídas de agregados de graduação mais aberta, que servem de filtro e reservatório para a mesma, além de suavizarem o impacto de grandes chuvas até que a água infiltre naturalmente para os aquíferos (STORM, 2011). Este tipo de sistema é uma alternativa sustentavelmente promissora aos pavimentos convencionais de asfalto e de concreto, perante os problemas relacionados à sobrecarga dos sistemas de drenagem de águas pluviais e enchentes em áreas urbanas. Araújo et al. (2000) apud Pagnussat (2004) mostram que um pavimento de concreto impermeável gera um acréscimo no coeficiente de escoamento superficial em 44% em relação a um solo compactado, ao passo que em um pavimento semi-impermeável com blocos intertravados de concreto este valor cai para apenas 22%. Ainda existem outras variações de pavers, tais quais os tipos envelhecido, ecológico, mesclado, pisograma, entre outros.

Figura 19 – Diversidade de cores aplicadas em pavers.



Fonte: <http://www.engconcreto.com.br/fotos>

Figura 20 – Versatilidade de aplicação de pavers coloridos em projetos de urbanização na cidade de Blumenau-SC.



Fonte: <http://www.pinterest.com.br/julianabenigno/paver-ideas>

Figura 21 – Aplicação de pisos intertravados drenantes.



Fonte: James (2003) apud Godinho (2009).

Assim, perante essa diversidade de modelos, tipos e usos, percebe-se a grande vantagem desses blocos e o seu potencial uso na pavimentação de áreas urbanas. Aliados ao real crescimento do setor da construção civil responsável pela manufatura de pavers, estes fatos sugerem a necessidade em investimentos por partes dos fabricantes no domínio dessas tecnologias, bem como em alternativas sustentáveis para este mercado. Paralelamente, investimentos em pesquisas também devem ser realizados, para que a academia possa interagir com a indústria de modo a otimizar os processos produtivos, a qualidade dos blocos produzidos, a sustentabilidade da cadeia da construção e desenvolver inovações tecnológicas.

### 3.2 Considerações sobre a Fabricação de Pavers

Um processo de fabricação de paver comumente utilizado e que será estudado e aplicado à presente pesquisa é o viproprensado. Ele resulta em melhor desempenho estético e de propriedades do produto aplicado, tem maior produtividade e proporciona maiores possibilidades de cores e formatos, entretanto requer maiores investimentos nos equipamentos de produção.

Além disso, entender as principais características necessárias aos insumos do concreto, bem como sua natureza, faz-se de extrema importância para viabilizar procedimentos de dosagem e fabricação que proporcionem uma boa qualidade ao produto final. A escolha e o emprego adequado dos métodos de cura do concreto também devem se prestar a esse fim.

#### 3.2.1 Máquinas

Visto que a natureza do concreto utilizado para a produção de pavers é seca (concreto tipo “farofa”), o equipamento mais recomendado para se realizar a mistura dos materiais é o misturador de concreto (Figura 22), pois a massa precisa de uma energia a mais para garantir a homogeneização dos mesmos.

Fernandes (2013) recomenda os misturadores biplanetários do tipo bateadeira de bolo, os de eixo horizontal helicoidal que proporcionam uma mistura forçada (e por este motivo são mais indicados quando se utiliza pigmento), os de eixo vertical fixo e os de eixo horizontal de pás. As tradicionais betoneiras podem ser utilizadas, entretanto seu uso não é muito recomendado, haja vista que, pela mistura se dar por gravidade, “empelota” a massa no seu interior.

Figura 22 – Misturador de concreto.



Fonte: Fernandes (2013).

Após a mistura dos materiais, a massa é colocada nas vibroprensas, máquinas empregadas para a moldagem e extrusão das peças. Elas recebem este nome devido ao mecanismo de funcionamento empregado durante o processo de moldagem dos blocos, em que há uma vibração sincronizada com a compressão-prensagem (SOUSA, 2001). A vibração é responsável pelo preenchimento e adensamento da mistura nos moldes, já a compressão influencia no adensamento e no controle da altura das peças.

Existem muitos tipos de vibroprensas empregados na produção de pavers, com variações de modelos, da natureza das unidades de vibrocompressão, qualidade, eficiência e preços. Em relação aos sistemas de vibrocompressão, tem-se que as vibroprensas são divididas em manuais, pneumáticas e hidráulicas.

As mais eficientes e econômicas, produzindo uma peça de maior qualidade com um consumo menor de cimento são as hidráulicas. Os sistemas hidráulicos empregam bomba e pistões a óleo com uma prensagem, com vibração sincronizada, que gera peças com uma ótima compactação. Essas máquinas permitem ao operador um maior controle dos tempos de alimentação, prensagem, acomodação e extrusão das peças, garantindo mais uniformidade e consequente qualidade ao processo (FERNANDES, 2013). A produtividade é de aproximadamente 800 a 1000 ciclos por 8 horas de trabalho. Encontram-se no mercado vibroprensas hidráulicas com poder de prensagem estimado em 5000 kg.

Existem as máquinas pneumáticas, que são assim denominadas por empregarem pistão movido a ar comprimido. Segundo Fernandes (2013), essas máquinas apresentam maior velocidade na movimentação de bandejas e pistão de compressão, o que propicia ao sistema uma maior produtividade. Entretanto, elas ficam aquém em termos de energia de compactação em relação às vibroprensas hidráulicas, resultando em consumos superiores de cimento para se obter a mesma resistência, por exemplo. Encontram-se no mercado vibroprensas pneumáticas com poder de prensagem de aproximadamente 650 kg a 1000 kg. A produção desse tipo de sistema é em torno de 1500 ciclos em 8 horas de trabalho.

Já os sistemas manuais são mais simples; geralmente as máquinas possuem um motor elétrico, e o sistema de prensagem é manual. É indicada para pequenos construtores ou para iniciantes no ramo da fabricação de blocos e pavers. A falta de energia de prensagem demanda um maior consumo de cimento que praticamente inviabilizaria a obtenção de blocos de categoria estrutural (FERNANDES, 2013). A produção desse tipo de sistema é de aproximadamente 600 ciclos em 8 horas de trabalho.

Já o tempo de adensamento/prensagem do concreto está relacionado às características do bloco após a desforma. Segundo Sousa (2001), esse tempo é o que permite o total

preenchimento dos moldes da vibroprensa, bem como o adensamento da mistura nos mesmos, a adequada aparência e resistência dos blocos ao manuseio após a desforma imediata, bem como a esperada produtividade dos processos de produção. Pode-se observar na Figura 23 um exemplo de vibroprensa hidráulica empregada na produção de blocos e pavers de uma indústria na região de Caruaru-PE.

Figura 23 – Vibroprensa hidráulica.



Fonte: Da Autora (2015).

### 3.2.2 *Materiais*

Os pavers são peças produzidas com concreto-seco – que possui peculiaridades tecnológicas – e possuem uma demanda de rápida liberação no mercado para aplicação. Assim, a correta escolha dos insumos que irão compor as peças reflete diretamente na qualidade das mesmas e até mesmo na qualidade do sistema de pavimentação como um todo; as informações acerca dos materiais devem ser usadas estrategicamente na definição dos traços. Fernandes (2013) aponta que o desconhecimento destas características pode levar a práticas inadequadas, com maior consumo de cimento, menos produtividade e maior custo de produção.

Os cimentos mais utilizados no mercado para a produção dessas peças são os tipos II e V - ARI (Alta Resistência Inicial). Para Gregorio (2012) e Fernandes (2013), os cimentos mais indicados para fabricação de blocos e pavers são o CP V ARI e os cimentos de classe 40 MPa. Esses tipos de cimento são sugeridos, pois proporcionam maiores resistências

necessárias às peças nos primeiros dias de idade do concreto, visto que as mesmas têm desforma imediata, com demandas rápidas de aplicações antes mesmo dos 28 dias de cura.

Os agregados utilizados na produção de blocos de concreto e pisos intertravados são os mesmos dos concretos convencionais, com certas limitações. Tem-se em geral a areia (ou pó de pedra) e o pedrisco (brita 0) (GREGORIO, 2012). A escolha estratégica dos agregados deve ter em vista a boa distribuição granulométrica, formato, rugosidade superficial e dureza. Uma boa distribuição granulométrica determina o melhor arranjo entre eles, em que os grãos mais finos irão preencher os espaços entre os mais grossos, dando mais compacidade e resistência ao sistema, bem como diminuindo o consumo de cimento. Para Fernandes (2013), o formato dos grãos, lamelares ou arredondados, influi na trabalhabilidade do concreto, nos tempos de enchimento do molde, no adensamento e no acabamento das peças; a dureza do grão influi na resistência do concreto e, por último, a limpeza e a rugosidade superficial dos agregados influem na aderência à pasta de cimento, que por sua vez afeta a resistência à tração e à compressão das peças.

Gregorio (2012) e Fernandes (2013) aconselham um diâmetro máximo de agregado de 6,3 mm para pavers, de forma a garantir o bom acabamento superficial das peças. Gregorio (2012) afirma que, quanto maior o teor de pedrisco, menor será o consumo de cimento para se obter uma mesma resistência; pedriscos de diâmetro máximo superior a 9,5 mm estão limitados em percentual de uso na mistura para pisos intertravados em 20%; já os pedriscos mais finos permitem esse percentual aumentar para 30%. Gregorio (2012) ainda lembra que, normalmente, a proporção de agregados usados em blocos é de 25% a 50% de agregado graúdo e de 55% a 75% de miúdo. O teor de finos é importante, pois proporciona à mistura coesão, característica imprescindível às peças para resistir aos esforços da desforma imediata, do transporte até os locais de cura e aos de armazenamento final (FERNANDES, 2013). A coesão também é função das condições de vibração e pressão de adensamento exercidas pelo equipamento no momento da moldagem (ABREU, 2002). Além disso, quanto maior a quantidade de areia, melhor será o acabamento superficial das peças; entretanto, paralelamente ao aumento do teor desse material, pode haver queda de resistência do sistema. A areia lavada geralmente possui poucos finos, aumentando o índice de quebra das peças ainda nas esteiras. Deste modo, Gregorio (2012) recomenda a opção por uma areia média ou por uma mistura de areia média com areia muito grossa. Fernandes (2013), afirma que é muito comum o uso do pó de pedra na fabricação de blocos e pavers, visto que ele apresenta as três situações necessárias para a mistura, quais sejam: finos para coesão, grãos médios para formação de volume na argamassa e graúdos para a resistência da peça.

Assim, uma mistura adequada seria aquela que tivesse a máxima quantidade de agregado graúdo – resultando em ganho de resistência do sistema –, uma distribuição granulométrica dos agregados bem graduada – diminuindo o índice de vazios – com uma quantidade mínima adequada de argamassa (pasta de cimento mais areia) que proporcionasse à mistura coesão, trabalhabilidade e bom acabamento ao concreto (FERNANDES, 2013).

Outros materiais também podem ser incorporados à mistura com diferentes finalidades. Por exemplo, tem-se os pigmentos – já citados anteriormente, que conferem cor ao sistema –, os aditivos – que proporcionam maior plasticidade e consequente adensamento sem, no entanto, adicionar mais água à mistura –, os agregados reciclados – que geralmente são classificados como Resíduos de Construção e Demolição (RCDs), utilizados em programas de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, e que geralmente conferem ao produto final um menor desempenho – e as adições – como a sílica ativa, o Metacaulim, pó de quartzo, entre outros.

### *3.2.3 Considerações sobre o Concreto Seco Vibroprensado e sua Dosagem*

“A formulação da mistura de concreto, de modo simplificado, consiste em definir a proporção mais econômica de cada um dos materiais disponíveis para produzir as peças com a qualidade necessária.” (DOWNSON, 1981 apud MARCHIONI, 2012, p. 35). Além de garantir uma boa trabalhabilidade com coesão no estado fresco, bem como uma resistência mecânica adequada à categoria de aplicação e durabilidade no estado endurecido, o procedimento de dosagem deve proporcionar aos pavers um bom acabamento (estética) às peças prontas.

Diferentemente do concreto plástico, o concreto seco não possui uma metodologia consagrada de dosagem, isto ocorre, porque, segundo Fernandes (2013), existe uma variação muito grande na densidade da mistura provocada pela diferença de desempenho dos equipamentos utilizados na sua compactação. Geralmente, as indústrias de pequeno e médio porte, para a fabricação das peças, utilizam traços empíricos e adaptados sem uma base científica e metodológica que garanta o melhor custo-benefício ao sistema, gerando deficiências no processo produtivo, tais quais, de acordo com o apontamento feito por Fernandes (2013): curva granulométrica inadequada, proporcionamento incorreto dos materiais, falta de compactação da mistura ou mesmo cura insuficiente. Para superar essas falhas, o consumo de cimento é aumentado, o que onera o custo do produto, sem necessariamente garantir qualidade. É importante que a dosagem para peças que serão

produzidas em uma determinada indústria seja realizada nas suas próprias instalações, visto que o resultado final desse processo está particularmente ligado às especificações do seu maquinário (misturadores e vibroprensas), à natureza de seus insumos e aos processos de cura utilizados.

O concreto tipo seco, além de possuir uma baixa relação água-cimento, também apresenta algumas peculiaridades tecnológicas. O método IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992), consagrado para dosagens de concretos plásticos convencionais, não é adequado; pois, de acordo com Frasson Júnior (2000), os concretos utilizados para a fabricação de blocos e de pavimentação, via de regra, não seguem a lei de Abrams, que determina que a sua resistência à compressão cai quando aumenta a relação água-cimento. Tango (1994) explica que, no concreto plástico, praticamente a pasta (cimento mais água) ocupa todos os espaços deixados entre os agregados; enquanto que, no concreto para blocos e pavers, existe a presença de ar em volume significativo na mistura. Isso faz com que o concreto para blocos não esteja em consonância com o princípio de que é preciso menos água para aumentar a resistência; ocorre justamente o contrário: é preciso mais água para aumentar a resistência.

Perante este fato, a questão da água no processo de fabricação desse concreto seco é bastante crítica e sua incorporação requer uma análise adequada. Até certo ponto, quanto maior a quantidade de água, maior será a resistência final da peça, visto que a mistura será mais facilmente compactada, o que resulta numa menor quantidade de vazios no concreto, em virtude de uma melhor acomodação das partículas (FERNANDES, 2013). Entretanto, se a umidade ótima do sistema for ultrapassada, a peça perde a consistência seca e sua consequente capacidade de moldagem, deformando-se e/ou grudando suas partes nos moldes e na prensa (FERNANDES, 2013).

No concreto seco, o ganho de resistência está intrinsecamente ligado à capacidade de compactação e de adensamento através do processo de vibrocompressão. Por sua vez, a compactação e o adensamento da mistura são funções, além da capacidade da máquina, da quantidade de água no sistema. Assim, para cada traço, equipamento e procedimento de moldagem, existe um teor água-materiais secos ótimo, que corresponde à máxima massa unitária que pode ser obtida nessas condições (TANGO, 1994).

É válido ressaltar que, em um compósito cimentício de baixa relação água-cimento, as reações químicas de hidratação do cimento podem se apresentar incompletas, no sentido de que nem todos os grãos de cimento sofreriam hidratação; pois, possivelmente, não haveria contato com partículas de água; bem como, segundo explana Mota (2014), haveria insuficiente quantidade de água para preencher os poros de gel dos silicatos de cálcio

hidratados (C-S-H) e que serviriam de meio de transporte de compostos para a continuidade da hidratação. Metha e Monteiro (1994, p. 26) lembram que “dependendo da distribuição do tamanho de partículas de cimento anidro e do grau de hidratação, alguns grãos de clínquer não hidratados podem ser encontrados na microestrutura de pastas de cimento hidratado, mesmo após longo período de hidratação.”. Taylor (1997) apresenta o modelo de pastas de cimento hidratadas de Powers-Brownyard. Este modelo aponta que, para um cimento Portland típico, curado em condições úmidas, a relação água-cimento mínima que promove a completude das reações químicas de hidratação é de 0,38. Pastas com relação água-cimento inferior a este valor consistem de cimento não reagido e de produtos de hidratação. Entretanto, Helene e Tibério (2010) salientam que o cimento não hidratado existente nas pastas com baixas relações água-cimento pode não interferir negativamente na resistência do compósito. Assim, os concretos secos, utilizados para a fabricação de pavers, podem eventualmente possuir cristais de cimento anidros, atuando como *filler* no sistema.

Kanno (2009), em seu estudo sobre gesso de alto desempenho, alerta para a importância da compreensão do processo de adesão entre quaisquer partículas hidrofílicas. A produção do concreto seco possui duas características marcantes: baixa relação água-cimento e vibroprensagem. Acredita-se que a baixa relação água-cimento faz com que haja uma baixa disponibilidade de água para as reações de hidratação do cimento, fazendo que haja na matriz cristais anidros, por exemplo, de alita e belita. Já os grãos de cimento que sofreram hidratação geram cristais prismáticos grandes de hidróxido de cálcio, pequenos cristais fibrilares de silicato de cálcio hidratado, dentre outros (METHA & MONTEIRO, 1994). Além disso, a vibroprensagem imprime ao sistema pressão que pode propiciar proximidade e até mesmo contato entre as superfícies desses cristais, bem como o confinamento de partículas de água entre eles. Assim, esse tipo de concreto possui uma microestrutura diferente, influenciada pelas propriedades reológicas da massa no estado fresco, portanto um mecanismo de ganho de resistência distinto.

Restrita nesse pequeno espaço (de espessura nanométrica), a água fica sujeita às forças de superfície e à geometria em que se encontram, comportando-se como um sólido vítreo na temperatura ambiente e proporcionando adesão entre as superfícies (KANNO, 2009). “Em superfícies cristalinas hidrofílicas, os líquidos tendem a se alinhar mantendo a periodicidade da rede cristalina da superfície, aproximando do comportamento de um líquido estrutural.” (KANNO, 2009). Nesta condição a água recebe o nome de água confinada, possuindo características diferentes da água livre, como por exemplo: tempo de vida de suas ligações de hidrogênio reduzido de  $10^{-12}$  segundos para  $10^{-9}$  segundos e menor pressão de vapor. Atribui-

se então parcela da resistência mecânica às forças de adesão intercrystalinas por nanocamadas de água.

Metha e Monteiro (1994) classificam a água presente nas pastas de cimento em quatro situações:

- água capilar – livre da influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida, presente em capilares, chamados de macroporos, de 50 nm;
- água adsorvida – fisicamente adsorvidas na superfície dos sólidos na pasta, retidas por pontes de hidrogênio até seis camadas moleculares de água, 15 Å ;
- água interlamelar – sugerida como uma camada monomolecular de água presente entre as camadas de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) fortemente ligada por pontes de hidrogênio e associada a sua estrutura, num espaço de 18 Å , segundo o modelo de Powers-Brunauer;
- água quimicamente combinada – parte integrante da estrutura de vários produtos de hidratação do cimento.

O cimento Portland anidro consiste de partículas angulares de tamanho comumente entre 1 µm e 50 µm. O espaçamento entre as agregações de C-S-H varia de 0,5 nm a 3 nm. A espessura da película de água que molha cada grão de cimento na hidratação é de aproximadamente 2 µm (METHA & MONTEIRO, 1994). Assim, essas condições – de não completude das reações de hidratação por indisponibilidade hídrica do sistema e dimensões da matriz de cimento, de seus cristais e de seus poros, sejam macro ou microporos, compatíveis com o confinamento de água intercrystalina, segundo Kanno (2009) – associadas à compressão do sistema, favorecem a formação de água confinada dentro da matriz cimentícia de um concreto seco vibroprensado, principalmente daquelas de natureza adsorvida e interlamelar.

Cruz (2003) lista algumas outras características comuns atribuídas a este tipo de concreto:

- consistência de terra úmida, cuja trabalhabilidade não pode ser caracterizada pelo abatimento do tronco de cone;
- tendência à segregação quando de seu transporte, lançamento e adensamento;
- adensamento com auxílio de energia mecânica adequada a sua trabalhabilidade ou simplesmente compactação com máquina;
- características finais dependem sempre do equipamento utilizado na etapa de adensamento;

- manuseio precoce em relação ao concreto plástico.

Marchioni (2012) aponta que diversos autores apresentam metodologias para a obtenção de concretos secos, seja para a produção de blocos de concreto para alvenaria, seja para peças de concreto para pavimentação. As mais utilizadas são aquelas de fabricantes de equipamentos, como, por exemplo, os métodos propostos pela Columbia e pela Besser Company (PFEIFFENBERGER, 1985 apud MARCHIONI, 2012), o método IPT/USP adaptado para concreto seco (TANGO, 1994) e o proposto por Downson (1981).

De acordo com Marchioni (2012) os métodos propostos pela Columbia (1969) e pela Besser Company, este último desenvolvido inicialmente por Pfeiffenberger (1985) e adaptado por Medeiros (1993) para equipamentos nacionais, se assemelham e consistem basicamente em definir agregados que se adequem a uma distribuição granulométrica pré-definida empiricamente, fruto da experiência do fabricante. Após a escolha da melhor proporção entre os agregados, ambas as metodologias propõem testes no equipamento de fábrica, variando teores do cimento e de umidade para se obter a resistência desejada.

Dowson (1981) apud Marchioni (2012) também propõe uma metodologia baseada em ajuste dos agregados em uma curva granulométrica. Entretanto, nesse caso, a curva granulométrica com melhor empacotamento é obtida através de um equipamento o qual mede o volume de vazios, resultando assim em uma peça mais compacta.

Já Tango (1994) propõe uma adaptação à metodologia IPT/USP, tentando superar o problema da inadequação da lei de Abrams no primeiro quadrante (resistência à compressão x relação água-cimento) do diagrama clássico dessa metodologia, bem como modificando a unidade do eixo consumo de cimento de  $\text{kg/m}^3$  para  $\text{kg/bloco}$ . Basicamente, seu método se resume a seis passos. Primeiro passo: determinação da melhor proporção entre agregados miúdos e graúdos que resulte uma maior massa unitária. Segundo passo: estabelecimento da resistência média desejada, que é função da rigorosidade do controle de produção. Terceiro passo: estimativa dos teores de a relação agregado-cimento através da definição de pelo menos três traços de concreto, um “rico”, um “médio” e outro “pobre”. Quarto passo: determinação da proporção de argamassa e da umidade ótima do traço médio, confeccionando peças com diferentes proporções argamassa-concreto seco. Opta-se então por aquela que apresente no estado fresco um bom aspecto superficial, massa unitária mais elevada e boa trabalhabilidade. Já a quantidade de água é a maior possível, na umidade ótima. Quinto passo: confecção das misturas. Sexto passo: traçado e emprego do diagrama de dosagem.

Também existem métodos de dosagem, menos utilizados pelas indústrias, baseados em modelos matemáticos de empacotamento de partículas e ainda em elementos finitos. Esses

modelos buscam a “correta seleção do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente.” (OLIVEIRA et al., 2000 apud MARCHIONI, 2012, p. 43).

Um método mais atual é o apresentado pela ABCP através de Fernandes (2013). Dentre outros pontos, ele sistematicamente pressupõe: através de uma curva de finos, a verificação da melhor relação pedrisco-areia que é obtida, analisando o menor volume de vazios de diferentes misturas entre os dois materiais; através de uma curva de umidade, a obtenção do teor de água-materiais secos que confere ao sistema um melhor adensamento e, por último, através de uma curva de consumo, aponta a quantidade ideal de cimento que proporciona a resistência desejada.

#### 3.2.4 Cura

A cura do concreto consiste num conjunto de medidas que impedem a evaporação precoce da parte da água de amassamento que irá fazer parte das reações de hidratação do cimento. Para isso deve ser feito o controle das condições de temperatura e umidade do ambiente/sistema no qual o concreto será curado. Tais procedimentos têm ligação direta com as propriedades finais do concreto, tais como resistência mecânica à compressão, impermeabilidade e resistência ao ataque de agentes agressivos. Fernandes (2013) sugere que o ideal seria termos compartimentos com umidade acima de 80% e temperaturas de 20 a 65°C; mas isto demandaria muitos custos. Em climas frios, o que não é o caso do Brasil, a cura abrange também medidas de proteção contra o congelamento da água, visto que a sua expansão na solidificação rompe as ligações entre as partículas sólidas da matriz cimentícia em formação, o que pode diminuir a resistência do concreto. Em relação ao tempo de cura, deve-se levar em conta e balancear dois critérios: o critério técnico, visto que, quanto maior o tempo do processo de cura, melhor serão as características do concreto, e o critério econômico, que restringe esse tempo. Geralmente recomenda-se um período de cura mínimo de 7 a 10 dias.

Existem vários métodos de cura. A escolha do melhor método está ligada ao tipo e condições da obra, ao tipo de estrutura ou peça a ser curada, bem como aos requisitos de propriedades a que essas estão submetidas. Podem-se citar os exemplos de métodos de cura: por irrigação – que se caracteriza pela contínua aspensão da superfície exposta do concreto em intervalos frequentes –, por submersão – que mantém as peças de concreto submersas em

água (idealmente saturada com cal para simular o ambiente alcalino do concreto), geralmente em um tanque de cura; entretanto, sua aplicação não é muito prática para fins de produção industrial – e por recobrimento – mais utilizado em obras, caracteriza-se pela proteção do concreto com recobrimento para evitar a ação direta do Sol e do vento, mantendo também a umidade do sistema; tal ação geralmente é feita com plásticos, lonas pretas ou membranas de cura.

Fernandes (2013) aponta os tipos de processos de cura aplicados em artefatos de concreto:

Artefatos de concreto são curados pelos processos convencionais de molhagem com mangueira, aspersão de água através de sistemas de irrigação de jardim, cobertura com lona plástica, saturação da umidade por meio de bicos do tipo sprinklers ou ventiladores pressurizados. Outros processos mais sofisticados e que oferecem melhores resultados são o aquecimento através de queimadores de gás conjugados com umidificadores para manter a umidade, chamados de “cura ao bafo”. Já a principal e mais eficiente forma de cura é a aplicação do vapor de água à pressão atmosférica. (FERNANDES, 2013, p.125).

No estudo da produção de concreto seco moldado sob pressão, Mota (2014) comparou três metodologias de cura diferentes, analisando qual a mais eficiente em termos de ganho de resistência dos corpos de prova. Os tipos de cura avaliados foram a seca ao ar – em ambiente coberto sem nenhum controle de umidade e temperatura –, cura sob aspersão – com um sistema de recalque, utilizando uma bomba de aquário, que aspergia água ininterruptamente sobre os corpos de prova – e cura por imersão em solução saturada de cal. Os melhores resultados foram encontrados no processo de cura por imersão; vindo em seguida os métodos de aspersão e cura ao ar, respectivamente.

### **3.3 Normatização Brasileira e Ensaio de Propriedades**

A norma brasileira que atualmente estabelece requisitos e métodos de ensaio para as peças de concreto para pavimentação intertravada é a NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013). Dentre outros pontos, esta norma estabelece definições, classificações de forma e categorias de utilização, requisitos específicos de tolerância dimensional das peças, valores mínimos das propriedades de resistência característica à compressão ( $f_{pk}$ ) aos 28 dias, taxas limites de valores de absorção de água, valores de resistência à abrasão; bem como seus métodos de ensaios.

Em relação às categorias de utilização, a norma divide às peças em dois conjuntos:

- peças para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linhas, chamada neste trabalho de “categoria I”;
- peças para tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados, chamada neste trabalho de “categoria II”.

Em relação às especificações das dimensões das peças, tem-se que a medida nominal máxima do comprimento é de 250 mm; a mínima espessura aceita para uma peça é de 60 mm, podendo ser especificada em múltiplos de 20 mm. Já o índice de forma (IF), que é a relação entre o comprimento da peça e sua espessura, deve ser menor ou igual a 4 para peças de concreto utilizadas em vias com tráfego de veículos ou áreas de armazenamento. E a tolerância é de  $\pm 3$  mm para todas as dimensões (largura, comprimento e espessura) em relação à medida nominal (que são os valores dimensionais especificados pelo fabricante).

A resistência característica à compressão deve ser determinada para atender aos valores mínimos de 35 MPa e de 50 MPa para as categorias I e II respectivamente aos 28 dias de idade. A amostra de peças de concreto deve apresentar absorção de água com valor médio menor ou igual a 6%, não sendo admitido nenhum valor individual maior do que 7%. E, por fim, a última propriedade mecânica apontada pela norma é a de resistência à abrasão, cuja determinação é indiretamente dada pela medida do comprimento de uma cavidade que é obtida através do atrito de um disco de aço em rotação com a superfície do paver. Obviamente, quanto menor esta cavidade, mais resistente à abrasão será o concreto. O comprimento máximo dessa cavidade deve ser de 23 mm para pavers da categoria I e de 20 mm para da categoria II. A determinação da resistência à abrasão é facultativa.

Vale salientar aqui que a NBR 9781 teve sua última atualização em 2013. Antes dela, havia a NBR 9781 e a NBR 9780 que datavam de 1987. A primeira fixava as condições exigíveis para a aceitação de peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação de vias urbanas, pátios de estacionamento ou similares. Já a segunda, prescrevia o método de determinação da resistência à compressão desses pavers, única propriedade até então requerida como parâmetro de desempenho. Assim, assumia-se que todas as outras características (tais como durabilidade, absorção de água e impermeabilidade) estavam diretamente relacionadas com essa capacidade estrutural de receber esforços de compressão (CRUZ, 2003). A atualização da NBR 9781 em 2013 cancelou e substituiu as NBR 9781 e NBR 9780. Também pode-se citar a NBR 15953 (2011) que trata da execução do pavimento intertravado com peças de concreto, referindo-se à solução pronta e não à peça em si.

Destaca-se que, antes atualização da norma, apenas o ensaio de resistência à compressão das peças era requerido, como dito anteriormente. Desta forma, os ensaios

relativos à durabilidade do concreto, dentre eles absorção de água e resistência à abrasão, eram realizados segundo outras normas, que não foram desenvolvidas especificamente para pavers, mas sim para concretos de uma maneira geral e/ou para outros materiais. Para o ensaio de absorção de água não havia a necessidade de grandes mudanças, visto que ele é de simples realização, sendo já bastante difundido e consolidado em caracterizações de concreto, consistindo basicamente na comparação de massas das peças no estado seco e no estado saturado. Entretanto, não havia uma metodologia consagrada para o teste de abrasão, sendo assim utilizadas adaptações de outros ensaios.

Hood (2006) enfatiza a importância do teste de abrasão em blocos para pavimentação, visto que a vida útil deste está ligada ao desgaste provocado pela circulação de veículos e pedestres. Para Silva (2011), a resistência à abrasão do concreto está relacionada ao seu desempenho funcional, portanto a avaliação desta propriedade passa a ser um parâmetro de qualidade e adequação ao uso.

Segundo Silva (2011), normalmente os métodos de ensaio para determinar a resistência à abrasão consistem em provocar o desgaste de um material através da ação mecânica de determinada carga abrasiva e utilizar os resultados de forma comparativa. Para Godinho (2009), o objetivo do ensaio de abrasão é medir o denominado desgaste abrasivo, sendo esta a propriedade que um material possui em resistir à remoção contínua dos minerais de sua superfície, a qual pode ser medida por diminuição da massa.

Assim, a literatura apresenta alguns ensaios de resistência à abrasão adaptados para pavers. Seguem abaixo alguns exemplos.

- Método adaptado da NBR 12042 – Materiais Inorgânicos – Determinação do Desgaste por Abrasão (ABNT, 1992): utilizado por Godinho (2009), o equipamento de ensaio de abrasão, chamado de Máquina Amsler, consiste basicamente em um anel de ferro, onde um abrasivo quartzoso de diâmetro 0,15 mm é ininterruptamente despejado sobre ele (Figura 24). Os corpos de prova de 7 cm x 7 cm x 3 cm a serem ensaiados são presos a suportes que os mantêm constantemente sob o atrito do abrasivo sobre o anel de ferro que gira a velocidade constante, até atingir o equivalente de 1000 metros lineares. Para avaliar a abrasão, uma vez completados os 1000 metros, os materiais são pesados, para avaliar a perda massa (GODINHO, 2009).
- Metodologia CIENTEC: método próprio desenvolvido pela Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul para a avaliação do desgaste dos blocos. Utilizado por Pagnussat (2004), Hood (2006) e Silva (2011), este método tem como procedimento simular um percurso de 500 m percorridos por um bloco de concreto de

50 mm x 50 mm submetido a uma pressão constante de 0,06 MPa sobre pó abrasivo carborundo. São extraídas duas amostras de cada bloco através de corte com serra diamantada, sendo o resultado apresentado em termos de índice de desgaste, que equivale à média das diferenças entre as alturas iniciais e finais de cinco pontos no bloco de concreto (HOOD, 2006).

- Metodologia adaptada NBR 13818 – Placas Cerâmicas para Revestimento – Especificação e Métodos de Ensaio – Determinação da Resistência à Abrasão Profunda (ABNT, 1997): utilizado por Fioriti (2007), este ensaio é realizado com um equipamento chamado Abrasímetro CAP (Figura 25), constituído de um disco rotativo de aço, uma caixa de armazenagem de matérias abrasivo, um funil de escoamento para a saída deste material, um suporte para o corpo de prova e um contra-peso. Nele, os corpos de prova são colocados de encontro com o disco, rotacionando a uma velocidade constante, e, entre a peça e o disco, é deixado escoar um pó fino de alumina para provocar o desgaste do material. A quantidade de material removida do corpo de prova – ou seja, o volume desgastado – é o parâmetro utilizado para a avaliação da abrasão.

Já o ensaio de resistência à abrasão apresentado pela nova norma de peças de concreto para pavimentação, a NBR 9781 (ABNT, 2013), é uma releitura da NBR 13818 (ABNT, 1997), adaptando todas as condições de ensaio para a realidade do paver. O dispositivo de abrasão utilizado pela NBR 9781 (ABNT, 2013) consiste em um disco rotativo de aço com diâmetro de 200 mm e espessura de 70 mm, um funil de escoamento para alimentação de material abrasivo, um suporte para o corpo de prova e um contra-peso. O corpo de prova é colocado contra o disco em rotação constante, sendo escoado a um fluxo – também constante – entre este a superfície do paver, o material abrasivo (pó de óxido de alumínio fundido branco, grana F80). A medida do desgaste devido à abrasão é a dimensão (comprimento) da cavidade obtida.

Figura 24 – Máquina Amsler para o Ensaio de Resistência à Abrasão Proposto pela NBR 12042.



Fonte: Abi-Ackel (2009) apud Godinho (2009).

Figura 25 – Abrasímetro CAP, utilizado no ensaio de abrasão profunda em peças cerâmicas.



Fonte: Peres e Freire (2004) apud Fioriti (2007).

Outros ensaios não especificados pela NBR 9781 (ABNT, 2013) também podem ser utilizados para a caracterização dos pavers, servindo de parâmetros de controle de qualidade. Outras normas brasileiras, bem como internacionais, são geralmente utilizadas para esses ensaios. Cruz (2003) realizou, além dos supracitados ensaios de Resistência à Compressão, Absorção de Água e Resistência à Abrasão, os de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Pêndulo Britânico (ambos pela norma europeia “EN 1338 – Concrete Paving

Blocks – Requirements and Test Methods – 1996”). Este último, por exemplo, é uma avaliação da resistência à derrapagem, que mede a resistência ao escorregamento/atrito entre uma tira de borracha (montada na extremidade do pêndulo) e a superfície da via, simulando um veículo a 50 km/h (GODINHO, 2009). A resistência ao escorregamento é função da textura da superfície das peças (CRUZ, 2003).

### **3.4 Adição de Resíduos em Pavers**

Com o contínuo aumento do desenvolvimento socioeconômico, as indústrias vêm cada vez mais gerando resíduos. Esses resíduos, que muitas vezes não têm um tratamento adequado, representam uma ameaça significativa para o equilíbrio do meio ambiente. Por sua vez, a construção civil, segundo Santos (2005), é o maior gerador de resíduos de toda a sociedade, além, de ser responsável por cerca de 40% do consumo de recursos naturais extraídos do planeta. Deste modo, muitas pesquisas nas áreas da construção civil e de materiais giram em torno de soluções para este problema na busca do desenvolvimento sustentável. Paralelamente a este desenvolvimento e por consequência, o mercado de pisos intertravados vem cada vez mais se destacando, bem como sua produção tem aumentado. Isto estimula os fabricantes a investir mais no controle tecnológico da produção para garantir mais qualidade ao produto final.

Pesquisas relacionadas ao reaproveitamento de resíduos industriais em pavers também vêm sendo realizadas. Foram encontrados na literatura estudos de incorporação, nesse tipo de compósito, de RCDs, escórias granuladas de fundição, resíduos de pneu de borracha, cinzas volantes, resíduos de mármore, dentre outros. O intuito principal dos mesmos era avaliar o comportamento do concreto produzido com os resíduos, além das análises dos seus parâmetros mecânicos.

Hood (2006) estudou, por exemplo, a reciclagem de RCDs em substituição ao agregado miúdo natural nos blocos de concreto para pavimentação. As propriedades analisadas foram resistência à compressão, resistência à abrasão e absorção de água. Para o teor de até 25% de substituição, verificou-se a possibilidade de utilização do material reciclado.

Simieliet et al. (2007) estudaram propriedades de consistência e viscosidade, densidade, teor de ar incorporado, resistência à compressão e módulo de elasticidade de pavers com substituição parcial dos agregados naturais por resíduos produzidos na demolição de calçadas. Resultados satisfatórios foram encontrados.

Soutsos, Tang e Millard (2011) estudaram a incorporação de RCDs em substituição aos agregados miúdo e graúdo de forma isolada e concomitante em pavers. As propriedades estudadas foram resistência à compressão e à tração. A substituição em teores de até 60% dos agregados de forma concomitante por resíduos de concreto não gerou grandes perdas de propriedades; de maneira similar à substituição do agregado graúdo em 60% por resíduo de demolição. Já o teor de substituição do agregado miúdo por este resíduo pôde atingir até 40%, quando agregado graúdo natural foi utilizado; mas quando houve a substituição deste em 60%, apenas 20% do agregado miúdo pode ser resíduo de demolição. Assim, observou-se que é viável a substituição dos agregados em determinados teores, gerando peças com propriedades mecânicas similares às padrões sem aumentar o consumo de cimento.

Já Pagnussat (2004) avaliou as potencialidades de utilização de escória granulada de fundição, resíduo da produção de ferro fundido, na fabricação dos blocos intertravados, como substituição parcial do cimento e também como substituição parcial do agregado. Foram realizados ensaios de resistência mecânica à compressão, desgaste por abrasão e absorção de água. Resultados positivos foram encontrados para baixos teores de substituição.

Fioriti (2007) estudou algumas propriedades de pavers com substituição parcial do agregado por resíduos de pneus provenientes de recauchutagem. Os teores de incorporação do resíduo foram de até 20% em volume. As propriedades testadas foram resistência à compressão, absorção de água, resistência ao impacto, resistência à abrasão profunda e expansão por umidade. Houve queda nos valores de resistência à compressão quando da incorporação do resíduo, entretanto os outros parâmetros não foram afetados negativamente. De uma maneira geral, os resultados mostraram ser possível o uso dos resíduos de pneus na fabricação das peças.

Lintz e Gachet-Barbosa (2010) estudaram o comportamento de concreto contendo borracha de pneus inservíveis para utilização em pisos intertravados. Foi realizada uma avaliação das propriedades mecânicas de concretos com resíduos de borracha vulcanizada. As propriedades avaliadas foram resistência à compressão e à tração, sendo também medidas as taxas de absorção de água dos compósitos. Pôde-se verificar a viabilidade técnica do concreto a ser empregado na fabricação de pisos intertravados com a substituição parcial da massa de agregado miúdo natural pelo agregado reciclado de borracha.

Uygunoglu, Topcu e Gencil (2012) determinaram os efeitos de cinzas volantes da combustão do carvão em substituição parcial ao cimento e de agregados reciclados de concreto e de mármore em substituição total ao agregado miúdo em pisos de concreto intertravados. As propriedades avaliadas foram resistência à compressão, à tração, densidade,

porosidade aparente, absorção de água, resistência à abração, reação álcali-agregado e resistência a ciclos de congelamento e descongelamento. A incorporação dos resíduos prejudicou as propriedades físicas e mecânicas dos pavers; entretanto, o uso da cinza volante em substituição ao cimento em baixos teores teve um efeito significativo na melhoria de importantes outras propriedades. Pouco se encontrou na literatura a respeito da incorporação de resíduos de cerâmica vermelha em blocos de concreto intertravados para pavimentação.

Poon e Chan (2005) desenvolveram pavers com a incorporação de resíduos de tijolos cominuídos. As propriedades de densidade, resistência à compressão, resistência à tração e absorção de água foram testadas. De um modo geral, o resíduo diminuiu até certo ponto a qualidade dos blocos de pavimentação; entretanto, os blocos que continham 50% de resíduos de tijolos cominuídos ainda atenderam às exigências mínimas normativas para áreas de pedestres, e os que continham 25% ainda atenderam às exigências normativas de resistência à compressão para área de tráfego.

Assim, tais exemplos afirmam a potencialidade de viabilidade técnica da incorporação de resíduos em blocos intertravados. Mais estudos precisam ser realizados para categorizar mais minuciosamente essas incorporações e suas influências nas propriedades mecânicas e de durabilidade desses concretos, com o intuito fomentar a implementação de iniciativas sustentáveis na cadeia da indústria da construção civil brasileira, incipiente nas práticas de reaproveitamento de resíduos em compósitos cimentícios.

#### 4 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA

A adição de resíduos de cerâmica vermelha em compósitos cimentícios é um tema bem abordado na literatura. A grande vantagem de se utilizar o resíduo da cerâmica vermelha em materiais cimentícios é pela sua atuação como *filler* e pela possibilidade de desenvolvimento de atividade pozolânica por parte desse material.

O efeito *filler* é um efeito físico e consiste no fato de grãos menores de algum material inerte (*filler*), dentro do compósito cimentício, preencherem o espaço deixado entre o contato dos grãos maiores, bem como outros vazios da matriz cimentícia (poros capilares e de gel). Para tal, a obtenção de uma fina granulometria é fundamental a fim de diminuir a porosidade, permeabilidade e índice de vazios do sistema. Como consequência, aumenta-se sua compactidade e ganha-se em resistência e durabilidade. O *filler* é considerado o material mais fino, sendo constituído por partículas minerais com dimensões inferiores a 0,075 mm (BAHIENSE et al., 2008). Dentro da matriz cimentícia, atuam como pontos de nucleação para as reações de hidratação e de ancoragem.

Já a atividade pozolânica é de natureza química. A pozolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso que, em si mesmo, possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas, quando finamente moído e em contato com umidade, reage quimicamente com hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades cimentantes (METHA & MONTEIRO, 1994).

Um exemplo de pozolana artificial é a argila calcinada (AY & ÜNAL, 2000), que forma a cerâmica vermelha. Os argilominerais das argilas que compõem a cerâmica vermelha são compostos predominantemente por sílica e alumina e passam por um processo de desidroxilação e amorfismo durante o aquecimento nos fornos de calcinação das fábricas (GARCIA et al., 2015; NACERI & HAMINA, 2009). Tal fato provoca uma reestruturação do seu arranjo atômico, que passa de cristalino para amorfo instável e com significativa reatividade química, dando características pozolânicas ao material (GARCIA et al., 2015).

Durante as reações de hidratação do cimento,

são gerados cristais, com propriedades aglomerantes, e hidróxido de cálcio (Portlandita). Este composto é solúvel, sendo motivo de desagregação da argamassa ou do concreto. O material pozolânico quando incorporado neste sistema, em suma, irá consumir a Portlandita e gerar novos produtos com propriedades aglomerantes. Desta forma, ao eliminar a parte frágil do material cimentício, a pozolana é de alto interesse no que tange suas propriedades de resistência. (ALCANTARA, NÓBREGA & SILVA, 2012, p. 2).

Se pozolânico, o RCV pode substituir uma porcentagem do cimento Portland, visto que, a partir de reações químicas dentro do sistema, tem a capacidade de consumir a Portlandita e produzir compostos cimentantes. Caso a cerâmica vermelha não apresente características pozolânicas (que dependem de fatores tais quais composição química, finura e temperatura de calcinação nos fornos das indústrias), sua atuação se restringe exclusivamente como carga (material inerte), agindo apenas como *filler*, após beneficiamento granulométrico.

Vieira (2005) estudou o aproveitamento de RCV como substituição pozolânica em argamassas e concretos. Investigou-se o efeito da finura de resíduos de cerâmica moído na sua atividade pozolânica, comparando-os com uma pozolana convencional utilizada na indústria de cimento. Foram moldadas amostras desses compósitos com teores de substituição do cimento por resíduo cerâmico de 0%, 20% e 40% em peso, mantendo o fator água-cimento constante de 0,5 nas formulações. Os resultados demonstraram que o resíduo cerâmico estudado tem índices de atividade pozolânica satisfatórios, tanto para sistemas com cal quanto com cimento, apenas para finuras superiores a 5000 cm<sup>2</sup>/g, havendo uma finura ótima para pozolanicidade em torno de 8000 cm<sup>2</sup>/g. Amostras contendo 20% e 40% de substituição do cimento pelo resíduo retiveram 95% e 89% da resistência das amostras de controle, respectivamente.

Brito, Correia e Pereira (2005) estudaram o comportamento mecânico de concreto não-estrutural, de lajes de pavimento, produzido com agregado reciclado de RCV, provindo da indústria da construção civil. As formulações foram de substituição ao agregado graúdo nas proporções de 0% (concreto de referência), 2/3 e 3/3. Três propriedades mecânicas foram testadas: resistência à compressão, resistência à flexão e resistência à abrasão. Os resultados mostraram que as resistências à compressão e à flexão dos concretos tiveram seus valores diminuídos com o aumento do teor de substituição do agregado graúdo pelo resíduo. A resistência à compressão teve um decréscimo maior do que a resistência à flexão. Entretanto a resistência à abrasão do concreto feito com agregado cerâmico reciclado se apresentou maior do que a do concreto convencional.

Fonseca (2006) produziu concretos com substituição parcial e total do agregado graúdo por agregado reciclado de telha cerâmica. Os concretos produzidos foram comparados nos estados fresco e endurecido. No estado endurecido foram testadas as propriedades de resistência à compressão, à tração e o módulo de elasticidade. Os concretos com agregados reciclados, de uma maneira geral, apresentaram resistência mecânica mais baixa comparativamente aos concretos de referência. A substituição total do agregado natural pelo agregado reciclado de telha provocou queda de 42% na resistência à compressão. Entretanto, a substituição parcial de 50% resultou em resistência à compressão mais próxima da resistência do concreto de referência.

Gonçalves (2007) estudou a utilização do resíduo da indústria cerâmica como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de concretos, avaliando parâmetros de comportamento mecânico. Os resultados demonstraram que a substituição de cimento por esse resíduo no teor de 20% não influenciou significativamente as resistências à compressão, à tração por compressão diametral e à tração na flexão dos concretos aos 28 dias, promovendo concretos com maior capacidade de deformação.

Alcantara, Nóbrega e Silva (2012) desenvolveram argamassas de revestimento com RCVs em substituição em massa aos agregados nos teores de 10%, 15%, 20% e 30%. Dentre as propriedades analisadas, estava a de resistência à compressão. Por efeito *filler*, obteve-se ganhos de resistência de mais de 100%. Foi constatado que as modificações nas outras propriedades pela incorporação do resíduo cerâmico até o teor de 20% não afetaram significativamente a viabilidade da aplicação da argamassa em obras.

Dentro do contexto das propriedades dos concretos de natureza seca (baixa relação água-cimento), que compõe os blocos intertravados, por exemplo, vale lembrar que a incorporação de finos proporciona a coesão necessária à mistura no estado fresco para resistir aos esforços de desforma imediata (FERNANDES, 2013), como já discutido anteriormente. Entretanto o excesso de finos pode ser prejudicial, pois, além de atuar como um inerte e concorrer com o cimento (FERNANDES, 2013), também pode interferir na trabalhabilidade do sistema, dificultando o adensamento da mistura no momento da moldagem e, conseqüentemente, gerando peças com resistências inferiores.

Seguem alguns exemplos de estudos sobre a influência de incorporações de RCV beneficiados granulometricamente nas propriedades de consistência de compósitos cimentícios.

Vieira (2005), ao analisar a influência do teor de substituição de cimento por RCV na propriedade de consistência de argamassas, mantendo constante o fato água-cimento,

encontrou que, quanto maior o teor de substituição, menor a consistência das argamassas de acordo com uma tendência linear. Neste caso, o RCV apresentava uma alta superfície específica (igual a 6039 cm<sup>2</sup>/g), aproximadamente uma vez e meia maior do que a do cimento.

Costa, Martins e Baldo (2006), no trabalho sobre análise da absorção de água por imersão em argamassa com reciclado da indústria cerâmica, ao substituir 100% o agregado miúdo por RCV com uma granulometria semelhante (100% passante na peneira 4,8 mm e 98% retido na peneira de 0,075 mm), observaram uma leve diminuição do índice de consistência normal de 247 mm para 244 mm.

Naceri e Hamina (2009) estudaram a substituição parcial do clínquer por resíduo de tijolos na produção cimento. Os materiais para a produção do cimento (clínquer + resíduo de tijolo + gipsita) foram moídos em conjunto, proporcionando finura adequada para a mistura. Observou-se que, com o aumento do teor de incorporação do resíduo, havia também um aumento na demanda da quantidade de água para que a pasta de cimento apresentasse consistência normal.

Os resultados dos testes das argamassas produzidas por Alcantara, Nóbrega e Silva (2012) mostraram que, com baixos teores de incorporação (10% e 15%) do RCV moído em uma fina granulometria (passante na peneira de abertura 250 microns), houve uma tendência ao aumento do índice de consistência normal (a argamassa ficou mais fluida). Por outro lado, com teores mais altos (20% e 30%), houve redução do mesmo.

Percebe-se então que o RCV inserido na forma de finos no sistema é um fator importante a se considerar na confecção de compósitos cimentícios, (principalmente concretos de natureza seca) no que tange as suas propriedades de coesão, trabalhabilidade e consistência, que podem vir a interferir em propriedades no estado endurecido, tal qual resistência à compressão.

De uma maneira geral, constata-se que a utilização de cerâmica vermelha como material alternativo em argamassas e concretos, respeitando-se certas limitações, proporciona manutenção ou beneficiamento de suas propriedades, sendo assim um viés promissor de destinação desses resíduos.

## 5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O desenvolvimento desta pesquisa foi dividido em quatro etapas:

- 1ª Etapa: coleta e beneficiamento granulométrico do RCV, caracterização dos materiais de partida.
- 2ª Etapa: testes preliminares com pastas de cimento. Tais testes visaram ao entendimento da influência da adição de pigmento inorgânico de óxido de ferro e de RCV nesses sistemas de maneira isolada e concomitantemente. Além disso, buscou-se determinar a máxima redução possível do teor de pigmento que ainda proporcionasse uma matiz colorimétrica aceitável ao compósito cimentício adicionado com o resíduo. Foram realizados ensaios de resistência à compressão, tempos de início e fim de pega, índice de consistência normal e análise colorimétrica.
- 3ª Etapa: determinação do traço do paver padrão (para tal, foram desenvolvidas as curvas de finos, de umidade e de consumo), desenvolvimento das formulações dos traços com as incorporações (pigmento e RCV de maneira isolada e concomitante) e suas correções do valor do consumo de cimento, moldagem dos pavers para os testes de propriedades (resistência à compressão, absorção de água, resistência à abrasão e análise de cor).
- 4ª Etapa: formulação e moldagem de pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento adicionadas com pigmento e RCV de maneira isolada e concomitante, bem como suas análises microestrutural (Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV), térmica (Termogravimetria/Termogravimetria Diferencial – TG/DTG) e cristalográfica (Difração de Raios-X – DRX). O desenvolvimento dessas pastas de cimento vibroprensadas teve como objetivo a simulação de um sistema mais simples (sem agregados) do que o concreto seco, mas com características análogas de formação de matriz cimentícia (baixa relação água-cimento e sistema de moldagem com vibroprensado), com vistas ao entendimento de suas reações de hidratação.

Na Figura 26 segue o fluxograma esquemático da metodologia experimental empregada.

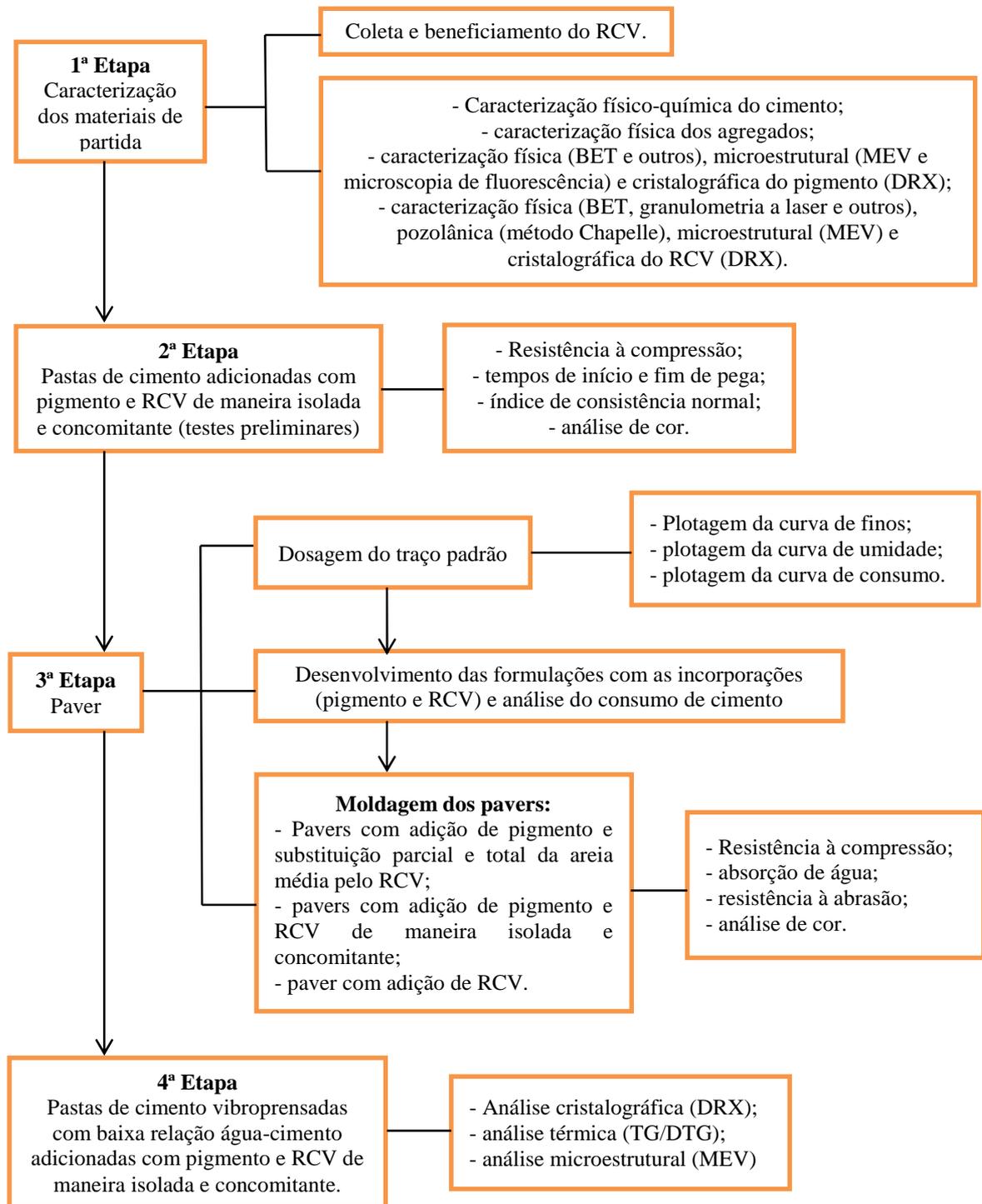


Figura 26 – Fluxograma esquemático da metodologia experimental.

## 5.1 Primeira Etapa: Caracterização dos Materiais de Partida

### 5.1.1 Cimento

A fábrica de pré-moldados parceira da pesquisa utiliza para fabricação de seus blocos e pavers os cimentos CP V ou o CP II Z – 32, na falta do primeiro. Além disso, para produção de blocos e pavers, em razão da necessidade de seu precoce manuseio e, conseqüentemente, a fim de diminuir o índice de quebras na fase de paletização, Fernandes (2013) indica os cimentos dos tipos II (composto) e V (ARI) por apresentarem maiores resistências nas primeiras idades comparativamente aos outros tipos de cimento (tipos III e IV). Assim, o cimento escolhido para esta pesquisa foi o CP II Z - 32, pelas razões supracitadas e por estar facilmente disponível no mercado da região de Caruaru – PE. Destaca-se que, apesar do CP II Z - 32 ser um cimento pozolânico, o seu uso não afeta as análises realizadas, visto que o intuito das mesmas foi de avaliar a imobilização como carga dos RCVs nos pavers de maneira comparativa. As características químicas e físicas fornecidas em boletim técnico da empresa de cimento para o lote utilizado se encontram apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. Sua massa específica, determinada pela NRB NM 23 (ABNT, 2001), é de 3,16 g/mL; já sua massa unitária é de 1,01 g/mL.

Tabela 1 – Caracterização química do cimento. Fonte: boletim técnico fornecido pela empresa de cimento.

Caracterização Química	Resultado (%)
Perda ao fogo	5,33
Resíduo insolúvel	11,06
SiO <sub>2</sub>	22,79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,37
CaO	54,09
MgO	4,51
SO <sub>3</sub>	3,65
Na <sub>2</sub> O	0,14
K <sub>2</sub> O	1,58

Fonte: Da Autora (2015).

Tabela 2 – Caracterização física do cimento. Fonte: boletim técnico fornecido pela empresa de cimento.

Caracterização Física	Unidade	Resultado
Área específica	m <sup>2</sup> /Kg	418,00
Início de pega	h	4,15
Fim de pega	h	5,20
Resistência compressão 1 dia	MPa	12,60
Resistência compressão 3 dias	MPa	23,10
Resistência compressão 7 dias	MPa	28,10
Resistência compressão 28 dias	MPa	38,10

Fonte: Da Autora (2015).

### 5.1.2 Agregados

Todos os agregados utilizados na presente pesquisa são os mesmos da produção de pavers da fábrica de pré-moldados parceira, que nos cedeu gentilmente tais materiais; sendo dois tipos de agregados miúdos e um tipo de gráudo. Para sua caracterização física, todos os agregados foram secos em estufa a 105°C por 24 horas. Seguindo os preceitos da NBR 7211 (ABNT, 1983), os agregados miúdos e gráudo utilizados foram classificados como areia média, areia muito grossa e pedrisco (brita 0), respectivamente. Para a caracterização granulométrica com dimensão máxima característica e módulo de finura dos agregados, foram seguidos os preceitos da NBR NM 248 (ABNT, 2007); para determinação da massa específica, NBR 9776 (ABNT, 1987) e para determinação da massa unitária, NBR NM 45 (ABNT, 2006). Nas Tabelas 3, 4 e 5 seguem tais caracterizações.

Tabela 3 – Caracterização física da areia média.

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Abertura da peneira	Porcentagem retida	
		ABNT (mm)	Individual	Acumulada
Composição granulométrica	NM 248	4,75	1,01	1,01
		2,36	4,03	5,04
		1,18	8,67	13,71
		0,59	24,70	38,41
		0,3	19,73	58,14
		0,15	15,66	73,80
		FUNDO	26,04	99,84
Dimensão máxima característica	NM 248	2,36 mm		
Módulo de finura	NM 248	2,90		
Massa específica	NBR 9776	2,54 g/mL ou g/cm <sup>3</sup>		
Massa unitária	NM 45	1,44 g/mL ou g/cm <sup>3</sup>		

Fonte: Da Autora (2015).

Tabela 4 – Caracterização física da areia muito grossa.

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Abertura da peneira	Porcentagem retida	
		ABNT (mm)	Individual	Acumulada
Composição granulométrica	NM 248	4,75	2,87	2,87
		2,36	9,15	12,02
		1,18	16,68	28,70
		0,59	45,87	74,57
		0,3	18,14	92,71
		0,15	5,81	98,52
		FUNDO	1,41	99,93
Dimensão máxima característica	NM 248	4,75 mm		
Módulo de finura	NM 248	4,09		
Massa específica	NBR 9776	2,60 g/mL ou g/cm <sup>3</sup>		
Massa unitária	NM 45	1,38 g/mL ou g/cm <sup>3</sup>		

Fonte: Da Autora (2015).

Tabela 5 – Caracterização física do pedrisco (brita 0).

Determinações	Método de ensaio	Resultados obtidos		
		Abertura da peneira	Porcentagem retida	
		ABNT (mm)	Individual	Acumulada
Composição granulométrica	NM 248	9,5	0,13	0,13
		4,75	73,32	73,45
		2,36	24,51	97,95
		1,18	0,42	98,37
		0,59	0,08	98,45
		0,3	0,08	98,53
		0,15	0,16	98,69
		FUNDO	1,23	99,92
Dimensão máxima característica	NM 248	9,5 mm		
Módulo de finura	NM 248	6,65		
Massa específica	NBR 9776	2,70 g/mL ou g/cm <sup>3</sup>		
Massa unitária	NM 45	1,29 g/mL ou g/cm <sup>3</sup>		

Fonte: Da Autora (2015).

### 5.1.3 Pigmento

O pigmento utilizado é classificado como inorgânico de óxido de ferro de coloração vermelha, cujo composto químico é a hematita ou óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Este material, cedido gentilmente pela fábrica de pré-moldados parceira, também é o mesmo utilizado em sua produção de pavers coloridos. Sua classificação física, dada através do boletim técnico da empresa fornecedora do pigmento, segue na Tabela 6. Sua área superficial específica, obtida através de ensaio de BET, é de 44,54  $\text{m}^2/\text{g}$ . Sua massa específica, determinada pela NRB NM 23 (ABNT, 2001), é de 4,68  $\text{g}/\text{mL}$ ; já sua massa unitária é de 1,05  $\text{g}/\text{mL}$ . Os ensaios de BET foram realizados no Laboratório de Nanotecnologia do Centro de Tecnologia Estratégicas do Nordeste (CETENE) em Recife-PE.

Tabela 6 – Classificação física do pigmento de óxido de ferro.

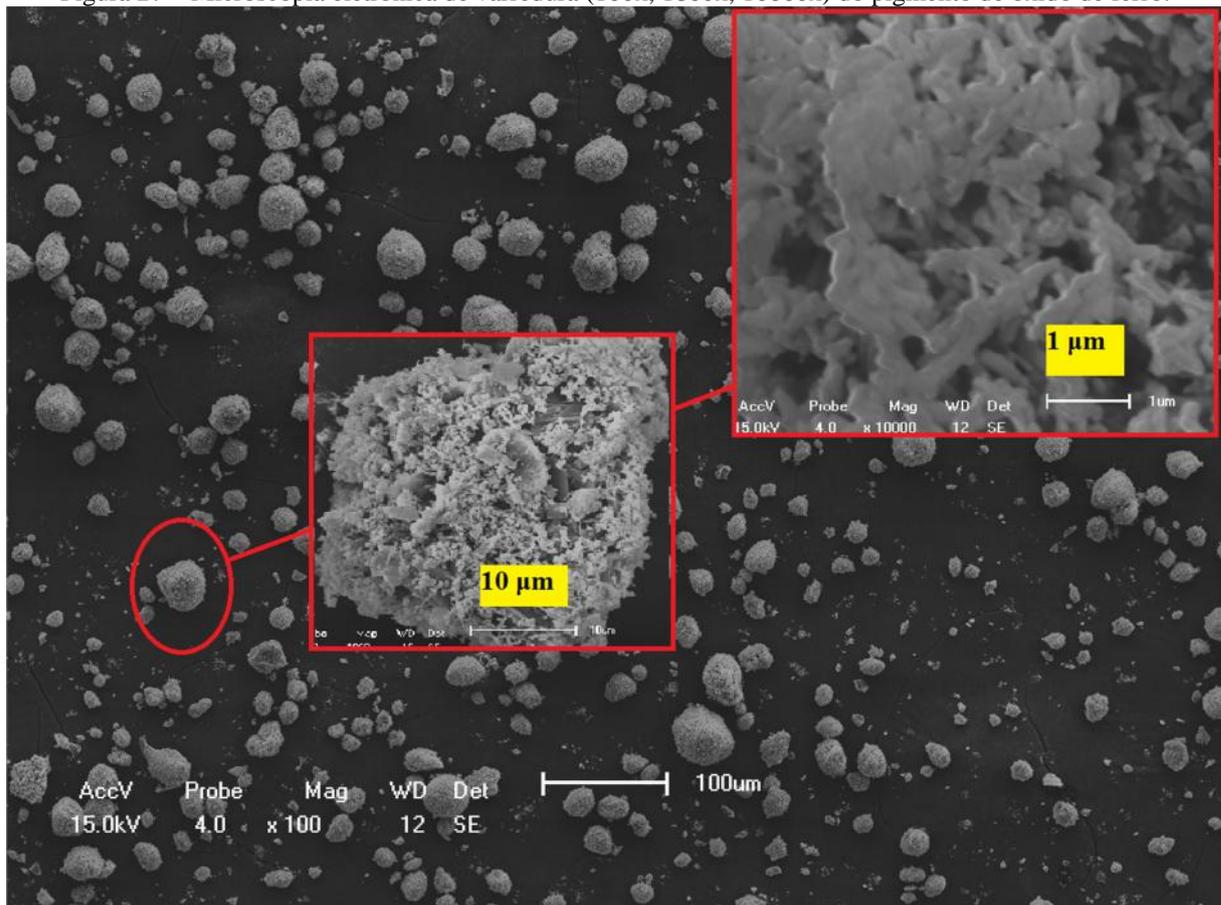
Item	Resultado
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ – Hematita (%)	96 - 98
pH	3 - 8
Densidade Específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	4,6 – 5,1
Absorção de Óleo ( $\text{g}/100\text{g}$ )	15 - 25
Solubilidade em água (%)	< 0,3
Retenção malha 325 mesh (%)	< 0,2

Fonte: boletim técnico fornecido pela empresa de pigmento.

Com o intuito de caracterizar a morfologia da partícula do pigmento de óxido de ferro, fez-se análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) a baixo vácuo. O aparelho utilizado foi da marca Shimadzu, modelo SS-550, Superscan. As análises de MEV do pigmento e do RCV foram realizadas no Departamento de Química da UFPE em Recife-PE.

A morfologia acicular do pigmento, em consonância com os resultados de Piovesan (2009), pode ser observada na microscopia da Figura 27.

Figura 27 – Microscopia eletrônica de varredura (100x, 1800x, 10000x) do pigmento de óxido de ferro.



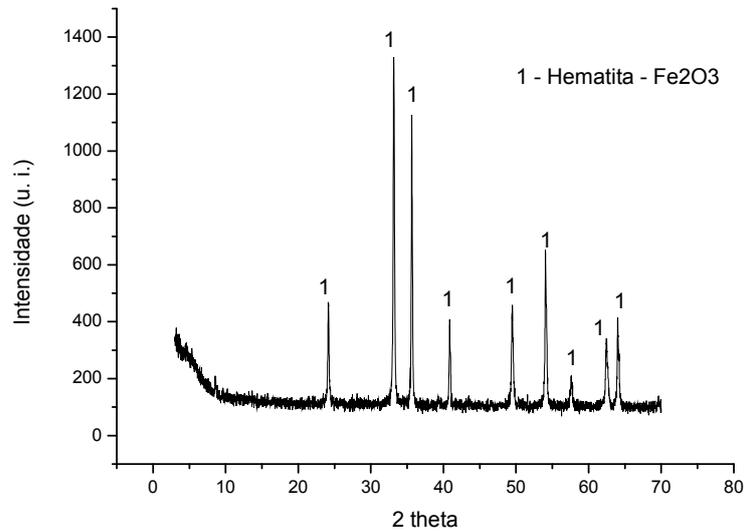
Fonte: Da Autora (2015).

Foi realizada a análise de microscopia de fluorescência do pigmento para melhor entender o arranjo e a forma das partículas. Tal análise foi realizada no Laboratório de Microscopia do CETENE em Recife-PE. O equipamento utilizado foi um Microscópio Invertido de Campo Claro e Fluorescência – ZEISS Observer Z.1 Apo Tome. A amostra foi preparada em lâmina, e o fluido utilizado foi a água.

Já a análise de DRX do pigmento foi realizada pelo método convencional (pó seco). As condições de operação foram fixadas em: radiação de CuK (40 kV/40 mA), leitura de 2 $\theta$ , variando de 3° a 70°, com passo de 0,02 a cada 0,5 segundo. Todas as análises de DRX foram realizadas no Laboratório de Nanotecnologia do CETENE em Recife-PE.

O difratograma do pigmento pode ser visto na Figura 28, evidenciando os picos cristalinos da hematita.

Figura 28 – Difratoograma do pigmento de óxido de ferro.



Fonte: Da Autora (2015).

#### 5.1.4 Resíduo de Cerâmica Vermelha

##### 5.1.4.1 Coleta do Resíduo de Cerâmica Vermelha

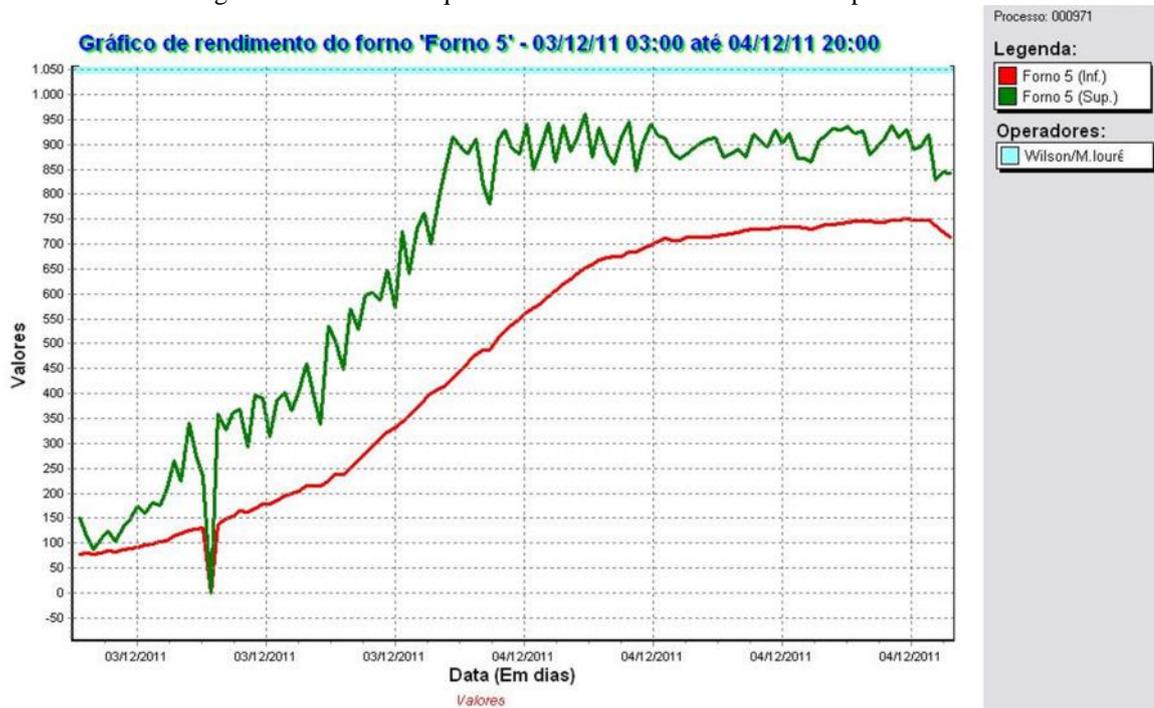
Os RCVs foram cedidos gentilmente por uma cerâmica parceira. Esta cerâmica produz telhas de dois tipos diferentes segundo suas temperaturas de patamar de calcinação. Os fornos do tipo abóbada (Figura 29), nesta cerâmica, possuem temperaturas de queima controladas através de uma curva, chamada “curva de queima”, que correlaciona a temperatura no interior dos fornos com o tempo. As temperaturas são medidas por termopares instalados na parte superior e na parte inferior do forno. Na parte superior, as telhas são calcinadas à temperatura de 900°C; já, na parte inferior, a calcinação chega até o patamar de 750 °C. Na Figura 30, pode ser observada uma curva de queima de um dos fornos da cerâmica parceira. Tal fato diferencia uma cerâmica de melhor qualidade e mais cara (900°C) e outra de qualidade mais inferior (750°C). Os resíduos gerados no processo são descartados no entorno da própria cerâmica, sendo, neste momento, misturados os dois tipos de telhas produzidas, como pôde ser visto na Figura 2 da seção 1. Assim, a coleta foi realizada a partir deste montante, acondicionando os resíduos em sacos apropriados (resistentes) e levando-os para o laboratório (LCC/CAA/UFPE). Vale salientar que, neste momento, não se pôde ter o controle de qual tipo de resíduo de telha era coletado, pois os materiais se encontravam misturados aleatoriamente.

Figura 29 – Forno tipo abóbada da cerâmica parceira.



Fonte: Da Autora (2015).

Figura 30 – Curvas de queima obtida nos fornos da cerâmica parceira.

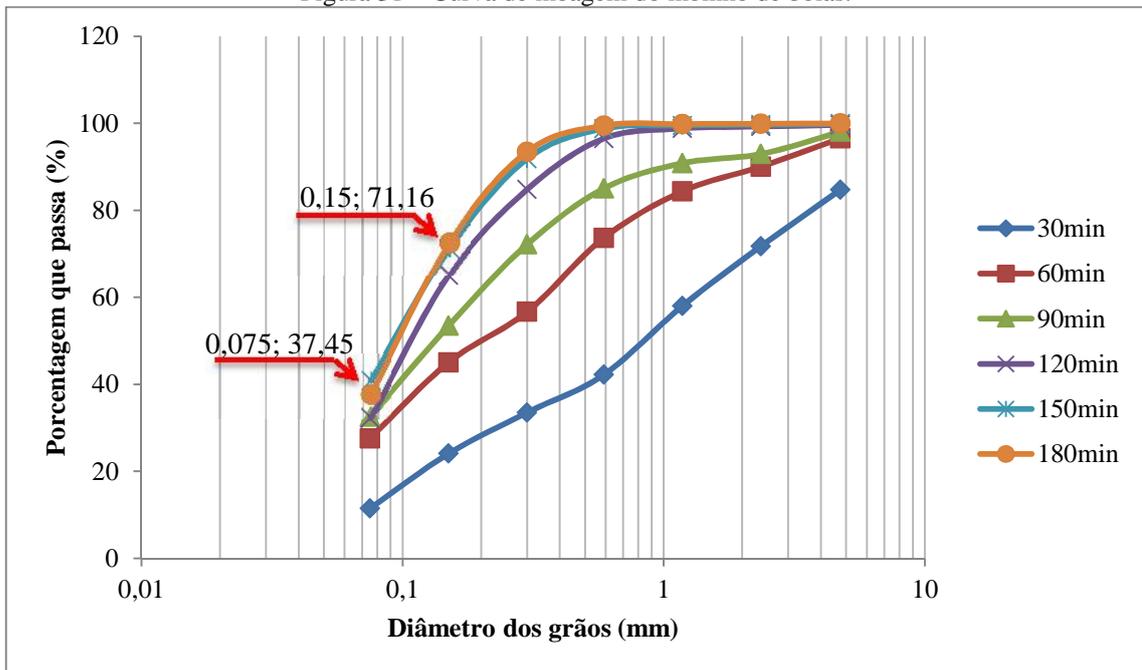


Fonte: Indústria cerâmica parceira.

#### 5.1.4.2 Moagem do Resíduo de Cerâmica Vermelha

O beneficiamento granulométrico do RCV foi dividido em duas partes. Na primeira parte, o material foi cominuído em cacos de tamanho aproximadamente de 5 cm. Já na segunda parte, ele foi moído em um moinho de bolas Sonnex Contenco com jarra de porcelana e capacidade de 15 kg, com cargas de bolas de alumina; utilizando-se o método de moagem empregado por Bahiense et al. (2008), a fim de obter um resíduo em tamanho fino de partícula com otimização consumo energético. Para tanto, desenvolveu-se a curva de moagem do moinho utilizado, que aponta tempo de moagem em função da granulometria resultante do material moído. Além disso, através dessa curva é possível determinar o tempo de funcionamento do moinho a partir do qual o material moído atinge uma finura máxima para as condições específicas daquela moagem. Foram adotados os períodos de 30 min, 1 h, 1,5 h, 2 h, 2,5 h e 3 h para moagem de amostras sempre de 10 kg de RCV com o intuito de garantir a uniformidade das condições. Os tempos foram arbitrados após análise visual dos fragmentos, buscando estipular um tempo ideal em função da eficiência do moinho e tamanho das partículas. A curva de moagem do moinho pode ser vista na Figura 31. Após a moagem e análise desta curva, verificou-se então que a máxima capacidade do moinho gera uma granulometria de RCV em que 71,16% do seu material passam na peneira de abertura 150  $\mu\text{m}$ , ou ainda 37,45% passam na de 75  $\mu\text{m}$  com 2,5 h de moagem (pontos destacados na curva granulométrica final do resíduo, que é a de 150 min ou 2,5 h, no gráfico da Figura 31). Vale salientar que a parcela do material que passa na peneira de abertura de 75  $\mu\text{m}$  (37,45% do resíduo) será a responsável pelo efeito *filler*, pela geração de pontos de nucleação e ancoragem, facilitando o preenchimento de vazios e favorecendo as reações de hidratação dos sistemas. Na Figura 32, segue uma imagem com a aparência final do RCV após a sua moagem.

Figura 31 – Curva de moagem do moinho de bolas.



Fonte: Da Autora (2015).

Figura 32 – Aparência final do RCV após sua cominuição e moagem.



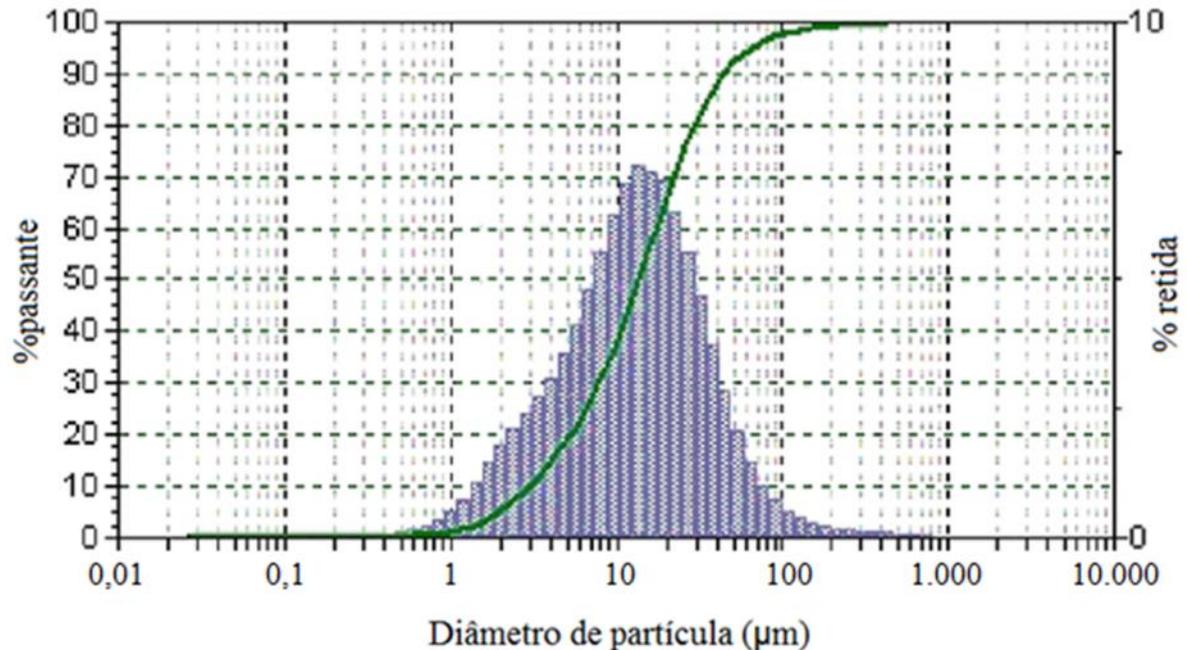
Fonte: Da Autora (2015).

#### 5.1.4.3 Caracterização Físico-química, Cristalográfica e Microestrutural do Resíduo de Cerâmica Vermelha Moído

Caracterizou-se fisicamente o RCV em termos de massa específica pela NRB NM 23 (ABNT, 2001) (2,69 g/mL) e de massa unitária (0,98 g/mL). Sua área superficial, determinada através de ensaio de BET, é de 27,31 m<sup>2</sup>/g. Ressalta-se que, devido ao RCV ser proveniente da moagem de um material já sinterizado, sua área superficial específica é aproximadamente

1,6 vez menor que a do pigmento. A distribuição granulométrica de tamanho de partícula do RCV através de granulometria a laser encontra-se exposta na Figura 33 e evidencia a presença de finos com maior frequência em torno de 15  $\mu\text{m}$ .

Figura 33 – Distribuição discreta e curva granulométrica do RCV para partículas finas.



Fonte: Da Autora (2015).

Para avaliar a potencialidade pozolânica do resíduo, que é uma propriedade química, foi empregado o método quantitativo de Chapelle da NBR 15895 (ABNT, 2010). O ensaio de Chapelle é realizado em uma suspensão de 2g de CaO puro proveniente da calcinação do  $\text{CaCO}_3$ , juntamente com 1g de pozolana em 250 mL de água, isenta de dióxido de carbono. A mistura é submetida à agitação mecânica sob a temperatura de 90°C durante 16 horas. Após o resfriamento da solução à temperatura ambiente, faz-se a titulação de 50 mL da mesma com HCL 0,1 M e fenofaleína (1g/L), estimando-se a quantidade em miligrama de  $\text{Ca(OH)}_2$  que foi combinada por grama de material (pozolana) através da Equação 1.

$$I_{\text{Ca(OH)}_2} = 28 \times (V_3 - V_2) \times Fc \times 1,32 / m_2 \quad (1)$$

Em que,

- $I_{\text{Ca(OH)}_2}$  é o índice de atividade pozolânica Chapelle obtido no ensaio, que corresponde ao teor de hidróxido de cálcio fixado, expresso em miligramas (mg) de  $\text{Ca(OH)}_2$  por grama (g) de material;

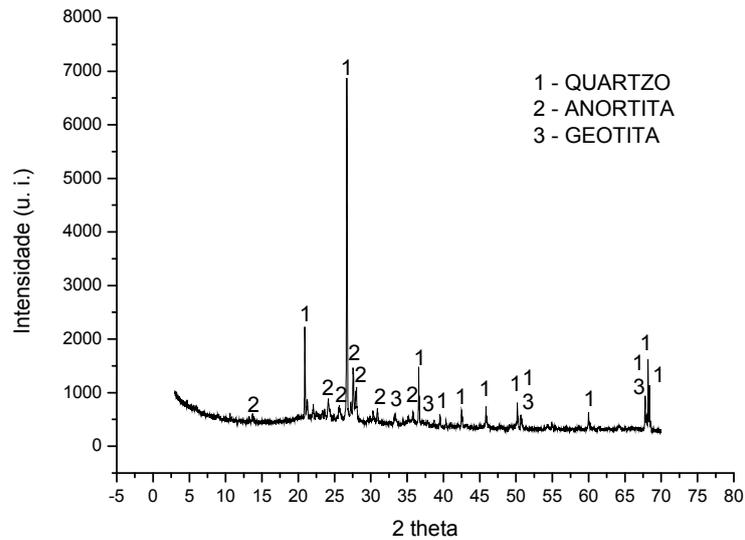
- $m_2$  é a massa de material pozolânico, expressa em grama (g);
- $V_2$  é o volume de HCl 0,1 M consumido no ensaio com amostra, expresso em mililitros (mL);
- $V_3$  é o volume de HCl 0,1 M consumido no ensaio em branco, expresso em mililitros (mL);
- $F_c$  é o fator de correção do HCl para uma concentração de 0,1 M;
- 1,32 é a relação molecular  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CaO}$ .

O índice de atividade pozolânica Chapelle ( $I_{\text{Ca}(\text{OH})_2}$ ) encontrado do resíduo foi de 311,71 mg CaO/g de acordo com a Equação 1. Na literatura, a cerâmica vermelha, quando pozolânica, apresenta tipicamente valores de pozolanicidade que vão de 533 à 795 mg CaO/g; embora, pelo método de Chapelle, o material para ser considerado efetivamente pozolânico deva apresentar um índice de consumo mínimo de 330 mg de CaO/g da amostra (CHRISTÓFOLLI, 2010). Nota-se que o resultado é um pouco abaixo do esperado, tal fato nos mostra que as temperaturas de queima dos fornos da cerâmica parceira não produzem uma cerâmica com propriedades pozolânicas. Rodom (2007) alerta que, em geral, as argilas necessitam de temperaturas na faixa de 600 °C a 900 °C para desenvolver atividade pozolânica; temperaturas superiores podem levar à perda da capacidade de fixação do cálcio (BARONIO & BINDA, 1997 apud RONDON, 2007).

Também foi realizada a DRX do RCV com as mesmas condições de operação da análise do pigmento. O intuito desta análise foi identificar a natureza cristalina ou amorfa do material e, assim, além de saber sua composição, dar suporte para os resultados de atividade pozolânica; visto que uma pozolana possui organização microestrutural predominantemente amorfa por serem reativas.

Como pode ser observado na Figura 34, o difratograma do RCV apresenta picos representativos de minerais cristalinos como quartzo, anortita e geotita, não acompanhados de halo amorfo significativo, caracterizando o RCV como pouco reativo e, conseqüentemente, de baixa pozolanicidade.

Figura 34 – Difratoograma do RCV.

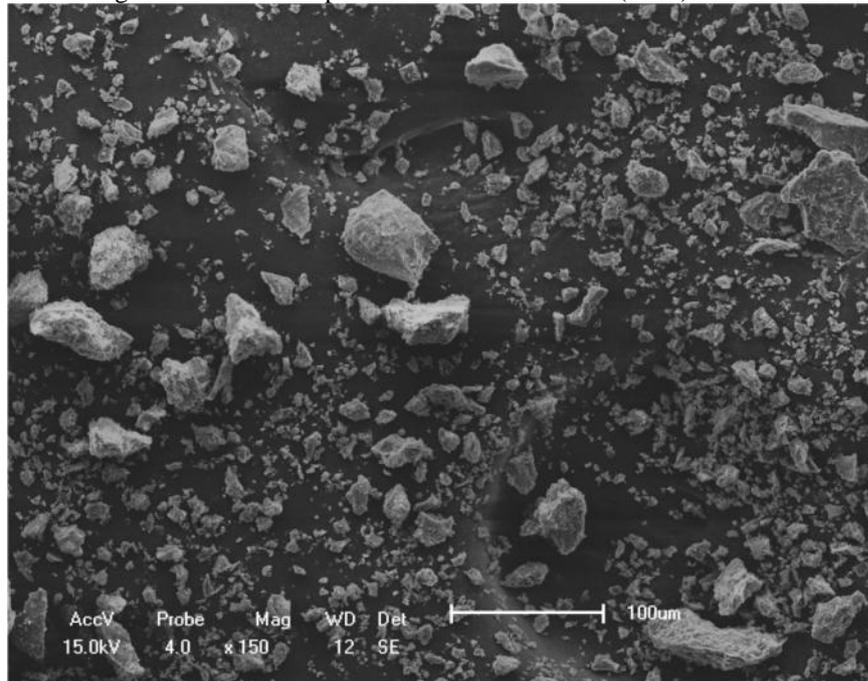


Fonte: Da Autora (2015).

Com o intuito de caracterizar a morfologia da partícula do RCV, fez-se análise de MEV por Elétrons Secundários (SE) a baixo vácuo.

O aspecto da superfície da partícula cerâmica, bem como seus diferentes tamanhos e formatos podem ser vistos na microscopia, exposta na Figura 35. Essas diferentes formas são oriundas da composição cristalográfica diversa do RCV, que contém quartzo, anortita e goetita (conforme DRX apresentado na Figura 34), de distintas durezas e características de clivagem de superfície.

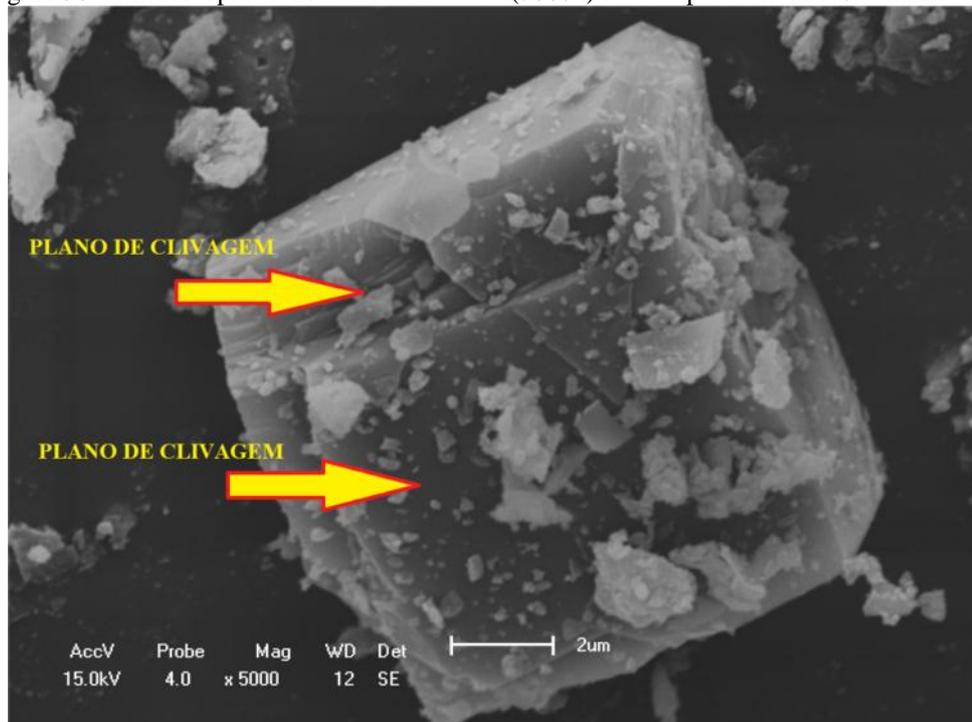
Figura 35 – Microscopia eletrônica de varredura (150x) do RCV.



Fonte: Da Autora (2015).

Uma microscopia mais detalhada de uma partícula de RCV (Figura 36) mostra sua natureza sem poros, densa e fechada, apresentando planos de clivagem provenientes do processo de moagem. Ainda na Figura 36, podem-se observar grãos menores aderidos à superfície de grãos maiores, responsáveis pelo incremento da área superficial do RCV.

Figura 36 – Microscopia eletrônica de varredura (5000x) de uma partícula de RCV em detalhe.



Fonte: Da Autora (2015).

### 5.1.5 Água

Foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento do LCC/UFPE/CAA.

### 5.1.6 Mistura do Pigmento mais Resíduo de Cerâmica Vermelha

*A priori*, a cerâmica vermelha bem como o pigmento são materiais inertes. Entretanto, desejou-se identificar uma possível reação química entre os mesmos, bem como os possíveis produtos desta reação que viriam estar presentes na matriz cimentícia do concreto, quando da adição concomitante do pigmento e do RCV no mesmo, interferindo possivelmente assim em suas propriedades.

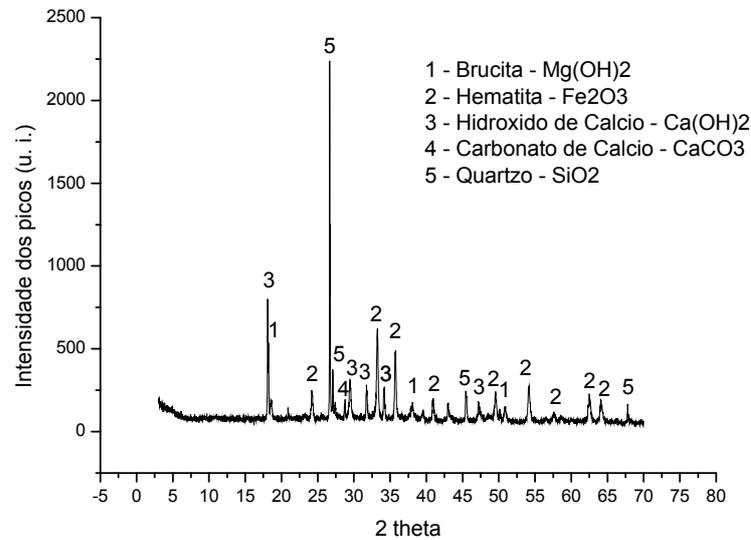
Deste modo, fez-se uma mistura pré-tratada desses materiais. Foram previamente misturadas 2 gramas de cada material em solução aquosa de hidróxido de cálcio (500 miligramas de água isenta de CO<sub>2</sub> mais 2 gramas de óxido de cálcio – CaO), sob agitação mecânica e à temperatura de 90°C em banho-maria por 16 horas. Após este procedimento, deixou-se a mistura esfriar naturalmente até temperatura ambiente e filtrou-se, em filtro de papel, a solução, restando assim um material em pó. Tal material foi submetido à secagem em estufa por 24 horas em uma temperatura de 110 °C.

A escolha da utilização da solução de hidróxido de cálcio teve o intuito de propiciar um meio de características alcalinas semelhantes ao sistema no qual o pigmento e o RCV foram inseridos, no caso o concreto. A agitação mecânica e a alta temperatura foram aplicadas com o intuito de favorecer e catalisar as possíveis reações químicas entre eles.

Fez-se a análise de DRX com o objetivo de identificação de fases cristalinas e amorfas, tentando encontrar alguma nova fase formada (o possível produto da reação química entre esses dois materiais).

O difratograma da mistura do pigmento com o RCV encontra-se na Figura 37, onde se podem observar inclusive os picos referentes a brucita, hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio, provenientes do pré-tratamento com a cal. Já os picos restantes caracterizam o pigmento e o RCV. Não foram observadas novas fases, confirmando que não há reação química entre esses dois materiais assim como esperado, visto que são de natureza inerte.

Figura 37 – Difratoograma da mistura de pigmento e RCV.



Fonte: Da Autora (2015).

## 5.2 Segunda Etapa: Testes Preliminares em Pastas de Cimento

A fim de iniciar os estudos para entendimento dos fenômenos acerca da adição do pigmento e do RCV – tanto de forma isolada, quanto sinergicamente – em compósitos cimentícios, bem como de determinar qual a máxima redução de pigmento possível – em relação aos 4% utilizados comumente nas indústrias – que ainda proporcionasse cor ao sistema e manutenção de propriedades, optou-se por analisar a influência dessas adições na pasta de cimento. Esse sistema é mais simples por não conter agregados, gerando maior possibilidade de avaliar as interferências fenomenológicas.

Os ensaios escolhidos para as análises preliminares foram resistência à compressão simples da pasta de cimento aos 7 e 28 dias de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996), tempo de início e fim de pega de acordo com a NBR NM 65 (ABNT, 2003) e consistência normal – NBR 7215 (ABNT, 1996). A verificação das cores dos compósitos foi feita por análise visual.

As formulações testadas nas pastas e argamassas continham adições em relação à massa de cimento de:

- 1%, 2%, 3%, 4% e 5% de pigmento vermelho;
- 50%, 75%, 100%, 125% e 150% de RCV;
- E conjuntamente 100% de cerâmica vermelha com 0%, 1%, 2%, 3% e 4% de pigmento vermelho.

Vale lembrar que, na indústria de pré-moldados, comumente o teor de adição de pigmento de 4% é utilizado para a fabricação dos pavers coloridos. Deste modo, optou-se aqui por avaliar as propriedades das pastas de cimento adicionadas com pigmentos até o teor de 5% (um pouco acima do que a indústria atualmente utiliza).

### *5.2.1 Resistência à Compressão das Pastas de Cimento*

Esta norma define a resistência à compressão da pasta de cimento como sendo a resistência à compressão de uma argamassa com traço previamente definido: uma parte de cimento (624 g) para três partes de areia (1872 g) e com relação água-cimento de 0,48. Tomou-se esse traço como padrão e a ele foram inseridas as adições.

Para a realização dos ensaios de resistência à compressão das pastas de cimento adicionadas com pigmento, a relação água-cimento das misturas foi de 0,28, necessária para obter a consistência normal da pasta de cimento sem nenhuma adição – ensaio realizado de acordo com a NBR NM 43 (ABNT, 2002).

Já para a realização dos ensaios de resistência à compressão das pastas de cimento adicionadas com RCV e adicionadas com pigmento mais RCV, a relação água-cimento das misturas foi de 0,78, necessária para obter a consistência normal da pasta de cimento, de acordo com a NBR NM 43 (ABNT, 2002), com adição de 150% de RCV. A escolha desta relação água-cimento se deve ao fato de que, ao passo que se aumenta o teor de cerâmica vermelha na mistura, também se aumenta significativamente a retenção de água do sistema, interferindo na sua consistência final, podendo dificultar ou até mesmo impedir a sua moldagem. Assim, optou-se por utilizar a relação água-cimento que permitisse a moldagem do pior caso relativo à perda de consistência de adição de cerâmica vermelha (teor de 150% de adição).

O agregado miúdo utilizado para a confecção das argamassas utilizadas nos testes de resistência à compressão das pastas de cimento foi a areia muito grossa.

Para a mistura dos materiais foi utilizada uma argamassadeira eletromecânica de eixo vertical planetário com cuba de 5 litros. Foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos de 5,0 cm x 10,0 cm por formulação e idade de rompimento, sendo ensaiados à compressão simples aos 7 e 28 dias. A cura inicial dos corpos de prova foi ao ar, ainda nos moldes com a face superior protegida por placa de vidro, e em câmara úmida por 24 horas. Após esse período, para a cura final, eles foram desmoldados e submersos em água saturada com cal até o momento do ensaio. Tais procedimentos seguiram os preceitos da NBR 7215 (ABNT, 1996).

O resultado da resistência é expresso em megapascals (MPa) e corresponde à média das resistências individuais dos 4 corpos de prova ensaiados. Já a resistência individual é obtida dividindo-se a carga de ruptura, expressa em newtons (N), pela área de carregamento, expressa em milímetros quadrados ( $\text{mm}^2$ ) da seção do corpo de prova.

### *5.2.2 Tempos e Início e Fim de Pega das Pastas de Cimento*

De uma forma geral, para a indústria de pré-moldados é interessante tempos de início de pega mais longos, a fim de proporcionar tempo suficiente para a mistura e conformação dos blocos no maquinário. No entanto, opostamente, quanto menor for o tempo de pega final, melhor será do ponto de vista de processo industrial, visto que os blocos necessitam ser rapidamente manuseados da esteira para as bandejas de armazenamento tão logo quanto possível. Consequentemente os tempos em aberto reduzidos são desejáveis para o processo industrial de peças pré-moldadas.

Para a mistura dos materiais foi utilizada argamassadeira eletromecânica de eixo vertical planetário com cuba de 5 litros. A massa de cimento utilizada em cada formulação foi de 500 g. A essa quantidade foram acrescentadas as adições de pigmento e de RCV isolada e concomitantemente. Já a relação água-cimento de cada formulação foi aquela necessária para a obtenção da pasta de consistência normal. Tal procedimento seguiu os preceitos da NBR NM 43 (ABNT, 2002). Definidos os valores da relação água-cimento de cada pasta, foram então realizados ensaios de tempos de início e fim de pega, através do aparelho de Vicat de acordo com a NBR NM 65 (ABNT, 2003), para averiguar suas interferências nessas propriedades.

O tempo de início de pega corresponde ao tempo transcorrido entre o instante em que a água e o cimento entraram em contato (instante zero) até o instante em que, ao soltar a agulha da haste móvel do aparelho de Vicat, fazendo com que ela penetre livremente a pasta ensaiada, essa esteja a uma distância da placa da base de  $(4 \pm 1)$  mm. Já o tempo de fim de pega corresponde ao tempo transcorrido entre o instante zero e o instante em que a agulha de Vicat (para determinação do tempo de fim de pega) penetre pela primeira vez apenas 0,5 mm na face oposta do corpo de prova que estava originalmente em contato com a placa base.

### 5.2.3 *Índice de Consistência Normal das Pastas de Cimento*

O índice de consistência normal da pasta de cimento é uma medida indireta da trabalhabilidade do sistema. Vale lembrar que a indústria de pré-moldados utiliza uma baixa relação água-cimento para a produção dos pavers, sendo o seu concreto classificado como seco, ou seja, com um baixo índice de consistência. Assim, a produção de pastas secas não é um problema.

Foram realizados os ensaios de determinação do índice de consistência normal das pastas de cimento adicionadas com pigmento e RCV isolada e concomitantemente através do método do abatimento do corpo de prova troncônico de acordo com os preceitos da NBR 7215 (ABNT, 1996). Essa norma define que o índice de consistência normal da pasta de cimento corresponde ao da argamassa confeccionada no ensaio de resistência à compressão supracitado na seção 5.2.1.

O índice de consistência normal da argamassa corresponde à média aritmética em milímetros das medidas de dois diâmetros ortogonais da base do tronco de cone após o abatimento. A diferença máxima aceitável entre essas duas medidas é de 5 mm.

### 5.2.4 *Cor*

A verificação da cor dos compósitos produzidos foi feita por inspeção visual a fim de terminar qual a máxima redução possível do teor de pigmento que ainda proporcionasse cor ao sistema e manutenção ou melhorias de propriedades.

## **5.3 Terceira Etapa: Dosagem do Traço Padrão, Formulações e Testes de Propriedades dos Pavers**

Nesta pesquisa, foram produzidos ao todo aproximadamente 454 pavers, sendo 124 peças para o procedimento de dosagem e 330 peças para os testes de propriedades. Os procedimentos utilizados para a sua produção seguem abaixo.

### 5.3.1 *Procedimentos para a Produção dos Pavers*

#### 5.3.1.1 Mistura dos Materiais

A medição dos materiais para confecção de todos os traços foi feita em massa, garantindo maior rigurosidade no controle da produção. A correção da umidade dos agregados era feita a cada traço.

Para a mistura dos traços, utilizou-se uma betoneira de 400 L (pela falta de um misturador). Para a sequência de introdução individual dos materiais dentro da betoneira foi seguida a sugestão de Helene e Terzian (1992), obedecendo a seguinte ordem: água (80%), pedrisco (100%), areia muito grossa (100%) e areia média (100%); após a homogeneização inicial dos agregados miúdos e graúdo com a porção de água, lança-se o cimento (100%) e o restante da água, esta última em pequenas frações pouco a pouco. Quando das formulações com RCV e pigmento, esses eram misturados previamente ao cimento e colocados na betoneira junto com o mesmo. Ao término da inserção da última fração de água, iniciava-se a contagem do tempo de mistura.

O tempo de mistura dos materiais recomendado pela metodologia aplicada é de 2 a 4 minutos. Verificou-se que o tempo de 4 minutos (com rápida parada intermediária para limpeza das pás da betoneira) era suficiente para a homogeneização da mesma.

Com o traço pronto, a massa era levada até a vibroprensa para a moldagem das peças. O tempo de vibroprensagem foi determinado durante os procedimentos de moldagem, sendo 30 segundos o tempo ideal para as peças atingirem 6 cm de altura, bem como uma boa conformação e aparência. Assim, esses tempos foram padronizados e aplicados na produção de todas as peças da pesquisa.

#### 5.3.1.2 Vibroprensa Utilizada

Inicialmente, pensou-se em realizar as moldagens dos pavers utilizando os equipamentos da fábrica de pré-moldados parceira. Entretanto, verificou-se que tal procedimento não iria garantir de forma desejável e segura a reprodutibilidade científica da metodologia. Assim, optou-se por dar continuidade ao estudo com a vibroprensa do LCC/UFPE/CAA. A mesma é do modelo MBHD-3/PERMAQ, semi-automática, operando com sistema de compressão hidráulico de capacidade de pressão de 90 bar, com vibração sincronizada; realiza até 1500 ciclos em 8 horas de trabalho, cada ciclo corresponde a 8 peças.

O motor elétrico da unidade hidráulica é de 15 cv de 4 pólos. As formas geram pavers de dimensões de 10 cm x 20 cm x 6 cm (largura x comprimento x espessura). Na Figura 38, pode-se observar uma imagem frontal da vibroprensa utilizada. Já, na Figura 39, verifica-se em detalhe os seus moldes.

Figura 38 – Vibroprensa hidráulica semi-automática utilizada para a produção dos pavers.



Fonte: Da Autora (2015).

Figura 39 – Moldes da vibroprensa em detalhe.



Fonte: Da Autora (2015).

### 5.3.1.3 Procedimento de Cura das Peças

O método de cura do concreto aplicado foi o por imersão, visto que foi o mais eficiente encontrado por Mota (2014) em termos de ganhos de resistência. O procedimento foi dividido em duas partes.

Na primeira parte, após a desmoldagem das peças, elas eram levadas, ainda nas bandejas, para uma seção de borrifamento com água e cobertas com plástico preto por 24 horas, como pode ser visto na Figura 40. Ao longo dessas 24 horas, eram feitas mais seções de borrifamento em intervalos de tempos distribuídos uniformemente, caracterizando assim a cura inicial de um dia. Os objetivos de borrifar as peças e de cobri-las com plástico preto eram de manter a umidade e o calor de hidratação do sistema, bem como de evitar a evaporação da água das reações de hidratação do cimento.

Na segunda parte, após as 24 horas e após o ganho de endurecimento de 1 dia das peças, as mesmas eram transferidas cuidadosamente para tanques de cura, sendo imersas em água saturada com cal até a data dos testes (Figura 41).

Figura 40 – Pavers cobertos com plástico preto durante o procedimento de cura inicial de 24 horas.



Fonte: Da Autora (2015).

Figura 41 – Tanque utilizado para o processo de cura por imersão dos pavers.



Fonte: Da Autora (2015).

### 5.3.2 Dosagem do Concreto Referência (Paver Padrão)

Para a dosagem do traço de concreto seco do paver padrão ou, como também pode ser chamado, paver cinza padrão (sem nenhuma adição), estabeleceu-se a metodologia proposta pela ABCP através de Fernandes (2013). A escolha desta metodologia está ligada ao fato de que a mesma apresenta sistematicamente os procedimentos da dosagem, permitindo a reprodutibilidade em laboratório, além de ser atual e sugerida por um órgão de representatividade.

É importante ressaltar que esta dosagem busca produzir peças que atendam aos requisitos mínimos de propriedades da NBR 9781 (ABNT, 2013) para o paver de categoria I

(peças para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linhas) de dimensões 10 cm x 20 cm x 6 cm. Na Tabela 7 segue um resumo quantitativo desses requisitos.

Tabela 7 – Requisitos mínimos de propriedades para pavers da categoria I da NBR 9781 (ABNT, 2013).

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Resistência à compressão ( $f_{pk}$ ) aos 28 dias	35	MPa
Taxa de absorção média de água	6	%
Resistência à abrasão	23	mm

Fonte: ABNT (2013)

Esta metodologia de dosagem é dividida em três fases: plotagem da curva de finos – que determina a proporção entre os tipos de agregados –, plotagem da curva de umidade – que determina a umidade – e plotagem da curva de consumo – que determina quantidade de cimento na mistura.

#### 5.3.2.1 Curva de Finos

O primeiro passo da dosagem é a determinação da proporção entre os tipos de agregados da mistura, a fim de obter uma granulometria com o menor número de vazios possível. Outro ponto a se ressaltar é que, quanto maior a parcela de agregado graúdo, mais resistente será o concreto; entretanto seu acabamento pode não ser satisfatório. Ao passo contrário, quanto mais finos forem os agregados, melhor será o acabamento da peça, e mais fraco o concreto. Assim, o ideal é o cruzamento desses dois comportamentos, como aponta Fernandes (2013), ou seja, finos suficientes para proporcionar coesão à mistura, bem como acabamento satisfatório para a peça, e material grosso para proporcionar a resistência com um traço economicamente viável. Para isso, é importante traçar a curva de finos, que correlaciona a resistência à compressão dos pavers com a porcentagem de agregado graúdo na mistura de sua composição.

No entanto, para desenvolver pavers com diferentes proporções de agregados é necessário antes determinar quantidades fixas de cimento e de água demandadas para a produção.

A fim de produzir os pavers e confeccionar as misturas, foram definidas uma proporção de cimento na mistura e uma relação água-cimento, ambas constantes. Vale salientar aqui que estas quantidades de cimento e de água não serão as definitivas do traço. Na verdade, a determinação de tais parâmetros e sua constância nas diversas formulações têm

como objetivo avaliar como a variação das quantidades de agregados influencia na estética das peças, bem como nas suas resistências.

Da estimativa do traço seco (sem a indicação da quantidade de água) sugerido por Fernandes (2013) para a obtenção de um paver de 35 MPa de resistência – 1 : 5 (cimento : areias + pedrisco) – definiram-se as proporções de cimento e de agregados desta etapa da dosagem, que são de 16,67% e 83,33% respectivamente.

As quantidades de cimento e agregados foram calculadas para a moldagem de 8 pavers (capacidade máxima de um ciclo da vibroprensa), levando em consideração que a densidade final do concreto vibroprensado, devidamente adensado, é de 2300 kg/m<sup>3</sup>, como indica Fernandes (2013).

Sendo o volume necessário de concreto para um paver igual a 0,00132 m<sup>3</sup> (volume da peça de dimensões 0,10 m x 0,20 m x 0,06 m mais um acréscimo de 10% para possíveis perdas), a massa final do mesmo será este valor multiplicado pela sua densidade. Logo, a estimativa inicial da massa de um paver com o traço sugerido é de 3,036 kg. Como o ciclo da prensa produz 8 peças, tem-se uma massa total necessária para a sua fabricação de 24,288 kg. Acrescentando ao traço 4% de água que será combinada com o cimento no processo de hidratação, tem-se 6,24 partes do mesmo (1 + 5 + 4%). Como a massa de cimento requerida equivale a uma parte desse traço, verifica-se que ela é igual a 3,89 kg (24,288 kg ÷ 6,24 partes). Assim, se 3,89 kg correspondem a 16,67% (proporção de cimento) do traço; 83,33% (proporção de agregados) corresponderão a 19,44 kg (quantidade de agregados).

A relação água-cimento utilizada foi a necessária para atingir o ponto empírico de umidade ótima da massa durante a execução do traço. Tal ponto é chamado comumente por “ponto de pelota”, permitindo, como afirma Tango (1994), moldar uma “pelota” de concreto nas palmas das mãos, sem que esta se esboroe (falta de água) ou que suje as excessivamente (excesso de água). O valor encontrado de umidade ótima foi de 0,58; ou seja, serão utilizados 2,26 L em cada traço. Nota-se aqui um alto valor de umidade para um concreto dito como seco; entretanto esta determinação é empírica e não será a definitiva do traço.

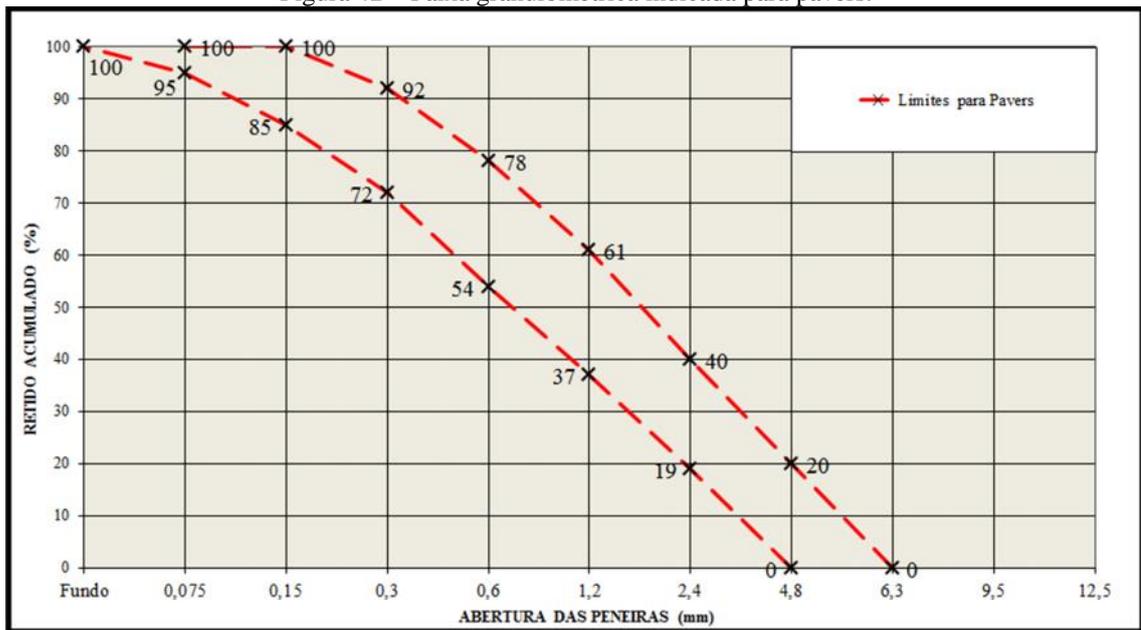
### ***5.3.2.1.1 Determinação da Proporção entre os Agregados***

Definidas as quantidades de cimento, água e agregados totais dos traços na plotagem da curva de finos; determinou-se então a melhor proporção entre os agregados. Para tal, foram desenvolvidos dois conjuntos de misturas.

No primeiro conjunto, foram feitos 6 traços ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$ ,  $T_5$  e  $T_6$ ) experimentais, variando-se a quantidade de agregado graúdo, em intervalos de 10%, até descobrir a mistura com o maior percentual do mesmo, cujo acabamento da peça ainda fosse satisfatório e com boa resistência; para a composição da parcela de agregado miúdo, manteve-se a proporção de 30% de areia média e 70% de areia muito grossa. Assim, por exemplo, o traço  $T_1$  possui 10% de agregado graúdo (pedrisco) e 90% de miúdo (areia média mais areia muito grossa). Dentro da parcela de agregado miúdo, 30% são de areia média e 70% de areia muito grossa; já o traço  $T_2$  possui 20% de agregado graúdo e 80% de miúdo; e assim sucessivamente.

No segundo conjunto, foram feitos 2 traços ( $T_7$  e  $T_8$ ), balanceando-se a proporção dos diferentes agregados, a fim de se determinar uma granulometria ponderada (com a contribuição de cada material em cada fração) que se inserisse entre duas outras curvas que delimitam uma faixa granulométrica recomendada para pavers. Esta faixa, segundo Fernandes (2013), corresponde a uma média entre as recomendações de um grande fabricante de equipamentos para produção de blocos e pavers, e outras granulometrias resultantes de experiências em consultorias prestadas para médios e grandes fabricantes no Brasil e no exterior nos últimos 20 anos. Este tipo de procedimento de determinação da proporção entre agregados é realizado geralmente quando se possui as suas curvas granulométricas individuais. Na Figura 42, podem ser vistos os limites granulométricos da faixa indicada por Fernandes (2013).

Figura 42 – Faixa granulométrica indicada para pavers.



Fonte: Fernandes (2013).

Analisando a Figura 42, quanto mais próxima do limite inferior da faixa a curva granulométrica resultante da mistura dos agregados estiver, mais fina será a composição da mistura e melhor o acabamento da peça. Já, quanto mais próxima do limite superior, ou ainda levemente fora dela, maior será a resistência obtida, porém com o acabamento prejudicado.

Para obter a granulometria ótima, estando de posse das granulometrias individuais dos agregados (Tabelas 3, 4 e 5), montou-se a curva granulométrica ponderada dos mesmos, tentando enquadrá-la, de preferência, o mais próximo possível do centro da faixa recomendada. Para isso, foram determinadas estimativas das porcentagens de cada tipo de material na mistura de agregados. Após esta determinação, a cada fração granulométrica, fez-se a média ponderada da porcentagem retida acumulada dos diferentes agregados, tendo como pesos dessa média as porcentagens estimadas anteriormente. Verificou-se então se o valor encontrado desta média estava dentro dos valores limites de porcentagem retida acumulada para aquela fração granulométrica da faixa recomendada na Figura 42. Caso não estivesse, fazia-se uma nova tentativa de estimativa das porcentagens de cada tipo de material na mistura de agregados e repetia-se o procedimento. Na determinação das estimativas das porcentagens de cada tipo de agregado, utilizou-se um método de iteração matemática através da ferramenta de teste de hipóteses “Solver” do software Excel da Microsoft®.

Foram encontrados então dois traços ( $T_7$  e  $T_8$ ) que se adequaram proximamente aos limites granulométricos recomendados. Para o traço  $T_7$ , seguem os valores dessas estimativas: 9,72% de areia média, 79,15% de areia muito grossa e 11,13% de pedrisco; resultando na

granulometria ponderada da Tabela 8. Para o traço T<sub>8</sub>, seguem os valores dessas estimativas: 45,87% de areia média, 35,22% de areia muito grossa e 18,91% de pedrisco; resultando na granulometria ponderada da Tabela 9. As adequações dos traços T<sub>7</sub> e T<sub>8</sub> dentro da faixa granulométrica recomendada podem ser observadas nas Figuras 43 e 44, respectivamente.

Tabela 8 – Granulometria ponderada dos agregados do traço T<sub>7</sub>.

Peneira (mm)	Granulometria Ponderada dos agregados do traço T <sub>7</sub>
	(% retida acumulada)
9,5	0,014
4,8	10,545
2,4	20,905
1,2	35,000
0,6	73,712
0,3	90,000
0,15	96,137
Fundo	99,920

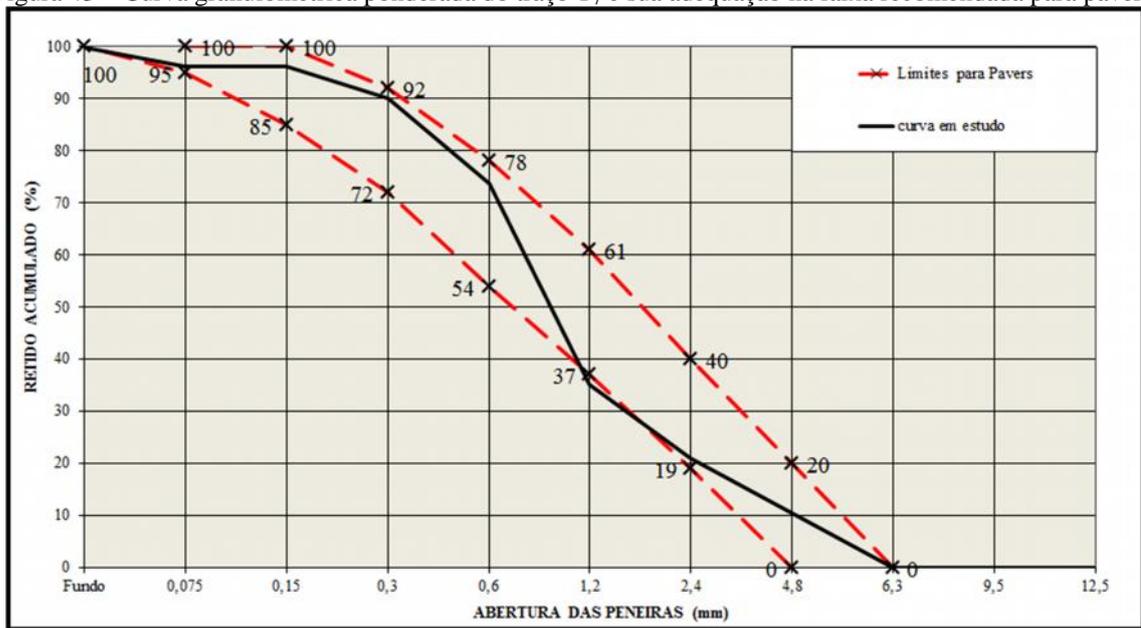
Fonte: Da Autora (2015).

Tabela 9 – Granulometria ponderada dos agregados do traço T<sub>8</sub>.

Peneira (mm)	Granulometria Ponderada dos agregados do traço T <sub>8</sub>
	(% retida acumulada)
9,5	0,025
4,8	15,364
2,4	25,068
1,2	35,000
0,6	62,500
0,3	77,957
0,15	87,213
Fundo	99,887

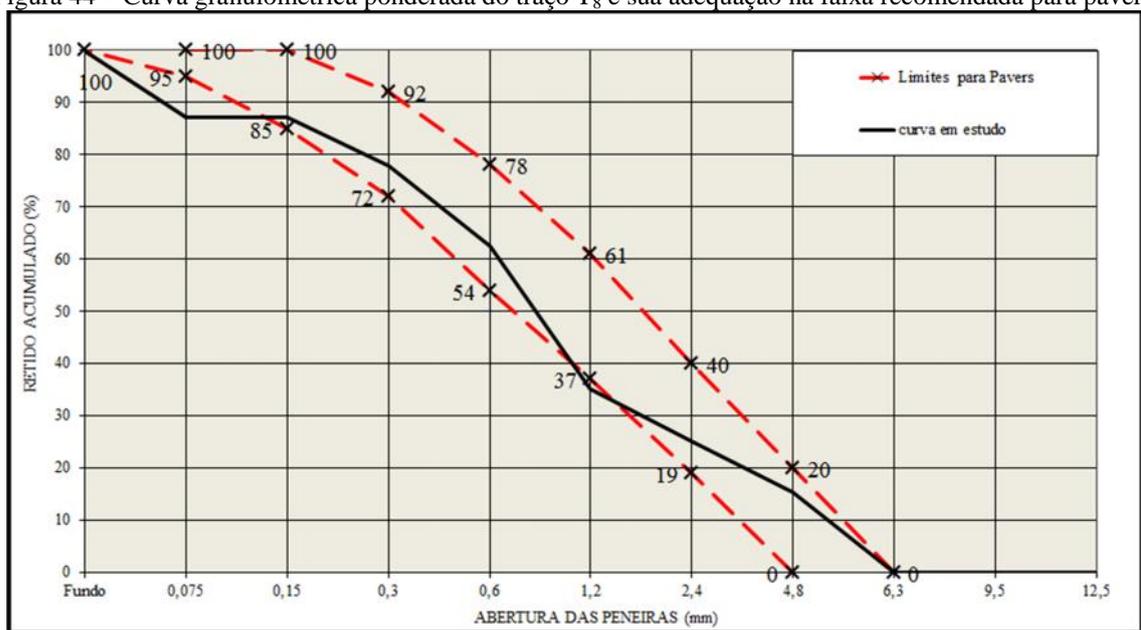
Fonte: Da Autora (2015).

Figura 43 – Curva granulométrica ponderada do traço T<sub>7</sub> e sua adequação na faixa recomendada para pavers.



Fonte: Da Autora (2015).

Figura 44 – Curva granulométrica ponderada do traço T<sub>8</sub> e sua adequação na faixa recomendada para pavers.



Fonte: Da Autora (2015).

Nota-se pela análise do procedimento realizado e das Figuras 43 e 44 que as porcentagens encontradas dependem inerentemente da natureza granulométrica de cada agregado; além disso, antes mesmo de se plotar a curva de finos, pode-se prever que o traço T<sub>8</sub> irá gerar um paver com melhor acabamento relativamente ao traço T<sub>7</sub>, visto que a sua curva granulométrica ponderada de agregados está mais próxima do limite inferior da faixa recomendada. Contrariamente, o traço T<sub>8</sub> terá melhor resistência e menor qualidade de acabamento.

### 5.3.2.1.2 *Plotagem da Curva de Finos*

Estando em posse das formulações e dos quantitativos de materiais dos traços, determina-se então a curva de finos. Deve-se levar em consideração, além da análise dos valores de resistência das peças produzidas, principalmente o acabamento das mesmas. Inclusive, Fernandes (2013) alerta que não haveria a necessidade de rompimento dos pavers, uma vez que o objetivo é avaliar o seu acabamento. O traço que apresentou a melhor combinação entre resistência à compressão e bom acabamento foi o escolhido para dar continuidade ao procedimento de dosagem.

Foram verificadas as resistências à compressão aos 7 dias de idade de todos os traços (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>, T<sub>5</sub>, T<sub>6</sub>, T<sub>7</sub> e T<sub>8</sub>), rompendo-se três corpos de prova de cada um, de acordo com a metodologia da seção 5.3.4.1.

### 5.3.2.2 Curva de Umidade

Definida a proporção de agregados no traço, o passo seguinte foi definir a umidade ótima do sistema, ou seja, a relação água-materiais secos. Para tal, traça-se a curva de umidade, que correlaciona a resistência à compressão das peças com a água utilizada no traço. Este passo é um diferencial, visto que trabalhar com a umidade controlada implica numa otimização da dosagem, com ganhos adequados de resistência e economia de materiais (no consumo de cimento, por exemplo). Geralmente a água é quantificada através do “ponto de pelota”, uma maneira muito imprecisa de se verificar a umidade visto que depende da interpretação e sensibilidade humanas, muito variáveis caso a caso.

Para desenvolver as formulações, manteve-se constante o traço seco encontrado na curva de finos fixo e, ao mesmo, foram adicionadas quantidades variáveis de água de 5%, 6%, 7%, 8% e 9% em relação à massa total de materiais secos (cimento mais agregados).

Foram verificadas as resistências à compressão das peças aos 14 dias de idade, rompendo-se três corpos de prova por traço, plotando-se a curva de umidade. O traço que apresentou o maior valor de resistência à compressão foi o escolhido para dar continuidade ao procedimento de dosagem.

### 5.3.2.3 Curva de Consumo

Definidas a proporção ideal entre os agregados e a umidade ótima da mistura, resta agora determinar qual o consumo de cimento que proporciona a resistência desejada. Para isto, deve-se traçar uma curva de consumo que correlaciona a resistência das peças com o consumo de cimento do traço utilizado (FERNANDES, 2013).

A resistência à compressão mínima dos pavers de traço padrão, aqui dosado, deve ser de, no mínimo, 35 MPa aos 28 dias de idade para atender às prescrições da NBR 9781 (ABNT, 2013).

Para o desenvolvimento das formulações, foram mantidas fixas a proporção entre os agregados (encontrada na curva de finos) e a relação água-materiais secos (encontrada na curva de umidade), variando-se a relação agregados-cimento nos valores de 2, 3, 4, 5, 6 e 7.

Foram escolhidos os melhores blocos do teste, seguindo a sugestão de Fernandes (2013), para fazer os ensaios de resistências; visto que, nesta etapa, o objetivo não é avaliar o processo, mas sim o que os materiais oferecem de resultados. As idades analisadas foram 1, 3, 7 e 28 dias, com o intuito de acompanhar os ganhos de resistência ao longo do tempo.

Além disso, percebendo-se a necessidade de análise do traço padrão encontrado, buscou-se verificar sua aplicabilidade, comparando o seu consumo de cimento com o de outros traços utilizados no mercado e na literatura. Para tal, foi calculado o consumo de cimento do traço encontrado através da Equação 2.

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{c} + \frac{a_m}{a_m} + \frac{a_g}{a_g} + \frac{p}{p} + x} \times 0,95 \quad (2)$$

Em que:

- C é o consumo de cimento em um metro cúbico de concreto em unidade de (kg/m<sup>3</sup>);
- a<sub>m</sub> é a proporção de areia média no traço;
- a<sub>g</sub> é a proporção de areia muito grossa no traço;
- p é a proporção de pedrisco no traço;
- x é a relação água-cimento do traço;
- c é a massa específica do cimento em unidades de (g/cm<sup>3</sup>);
- a<sub>m</sub> é a massa específica da areia média em unidades de (g/cm<sup>3</sup>);

- $\rho_{ag}$  é a massa específica da areia muito grossa em unidades de (g/cm<sup>3</sup>);
- $\rho_p$  é a massa específica do pedrisco em unidades de (g/cm<sup>3</sup>);
- 0,95 é o fator de correção do consumo de cimento para concretos vibroprensados. Fernandes (2013) aponta que, como esses concretos não são totalmente compactos, é necessária a correção de volume em função das densidades praticadas.

### 5.3.3 *Desenvolvimento das Formulações de Substituição e Adição e Correção do Consumo de Cimento*

A partir do traço padrão, foram desenvolvidas as formulações. Pelo fato do RCV não ter apresentado atividade pozzolânica, optou-se por incorporá-lo ao sistema via substituição parcial e total da areia média (agregado que apresenta a granulometria mais próxima do RCV) e via adição em relação à quantidade de cimento; não o incorporando em substituição ao cimento. Todos os teores de incorporação foram feitos relativamente às massas dos materiais.

Foi calculado também o consumo de cimento de cada formulação através da Equação 2, adicionando-se ao seu denominador as frações relativas ao RCV e ao pigmento. Após essa verificação, os consumos de cimento nos traços foram corrigidos, através do aumento da quantidade de cimento nas misturas, mantendo-se os outros parâmetros constantes: proporção entre os agregados e relação água-materiais secos. Os teores de adição do RCV continuaram em relação à massa de cimento do traço padrão. Já o teor de adição do pigmento foi aplicado em relação à nova massa de cimento em cada traço. Nos traços com substituição de RCV pela areia média, os consumos de cimento não foram corrigidos, como poderá ser justificado na seção 6.2.3.1.2. O objetivo dessas correções foi avaliar a influência da variação dos teores de adições de RCV em misturas de concreto seco com consumo de cimento Portland constante.

### 5.3.4 *Testes de Propriedades dos Pavers*

Os ensaios realizados nos pavers foram os de resistência à compressão, absorção de água e resistência à abrasão; todos segundo os preceitos da NBR 9781 (ABNT, 2013). O ensaio de resistência à abrasão, segundo esta norma, é facultativo; entretanto, perante as incorporações do RCV, enfatiza-se a importância de sua realização, a fim de analisar sua influência na durabilidade dos compósitos.

#### 5.3.4.1 Resistência à Compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em prensa hidráulica servo-controlada da marca Shimadzu, disponível no LCC/UFPE/CAA, com o auxílio de duas placas metálicas de espessura 20 mm, confeccionadas em aço. As amostras foram saturadas em água a  $(23 \pm 5)$  °C por 24 horas antes do ensaio. Para todos os traços, foram confeccionados 6 corpos de prova que foram rompidos nas idades de 3, 7 e 28 dias.

A resistência à compressão da peça, expressa em megapascals (MPa), é obtida dividindo-se a carga de ruptura, expressa em newtons (N), pela área de carregamento, expressa em milímetros quadrados (mm<sup>2</sup>), multiplicando-se o resultado pelo fator p, função da altura da peça (ABNT, 2013), conforme a Tabela 10:

Tabela 10 – Fator multiplicativo p.

Espessura nominal da peça (mm)	p
60,00	0,95
80,00	1,00
100,00	1,05

Fonte: ABNT (2013).

Dos 6 valores de resistência à compressão obtidos de cada traço, foram descartados até dois valores discrepantes do conjunto para a realização da média aritmética ( $f_p$ ) e aplicação do desvio padrão amostral ( $s$ ).

#### 5.3.4.2 Determinação da Absorção de Água

Para a determinação da absorção de água, os corpos foram imersos em água à temperatura de  $(23 \pm 5)$  °C por 24 horas; pesados individualmente na condição saturada com superfície seca, que é obtida drenando o corpo de prova sobre uma telha metálica por 1 minuto e removendo a água superficial visível com um pano úmido. O procedimento foi repetido a cada 2 horas, até que em duas determinações sucessivas não se registrasse para o corpo de prova diferença de massa superior a 0,5 % em relação ao valor anterior, anotando-se então a sua massa saturada ( $m_2$ ). Em seguida, os corpos de prova saturados foram levados à estufa com temperatura a  $(110 \pm 5)$  °C por 24 horas, pensado individualmente cada corpo de prova na condição seco em estufa. O procedimento foi repetido a cada 2 horas, até que em

duas determinações sucessivas não se registrasse para o corpo de prova diferença de massa superior a 0,5 % em relação ao valor anterior, anotando-se então a sua massa saturada ( $m_1$ ).

Os testes de absorção foram feitos com os traços que obtiveram os melhores resultados de resistência à compressão, com 3 corpos de prova por traço na idade de 28 dias. O valor da absorção de água de amostra foi calculado através da Equação 7.

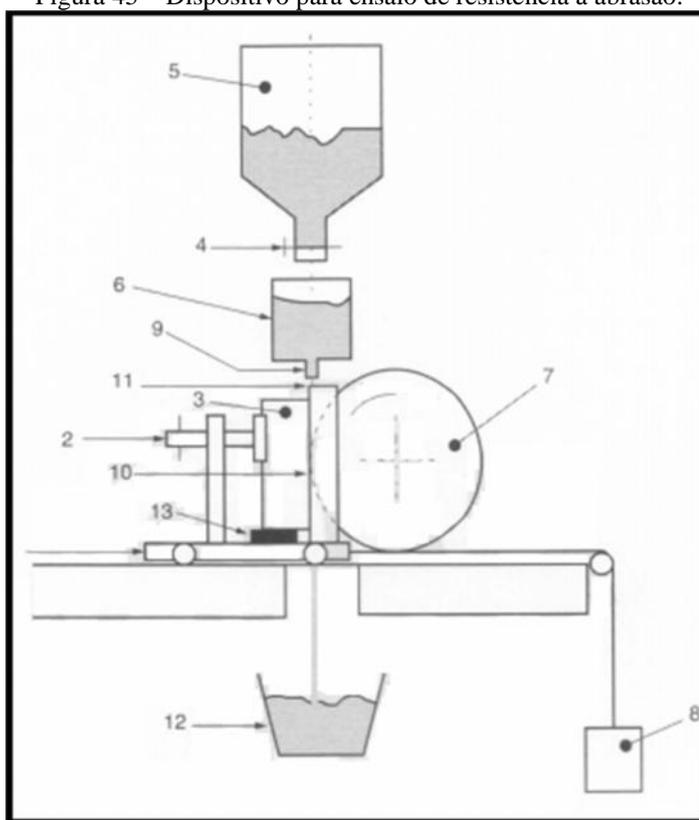
$$A = (m_2 - m_1) \times 100 \div m_1 \quad (7)$$

#### 5.3.4.3 Resistência à Abrasão

Para determinação da resistência à abrasão, cada corpo de prova— fixo em um suporte que, por sua vez, era puxado por um contrapeso —, foi pressionado, durante 60 segundos, contra um disco de aço de 200 mm de diâmetro e 70 mm de espessura em rotação a 75 RPM, de modo que o atrito entre eles gerasse uma cavidade na superfície da amostra. Entre o disco em rotação e a amostra, era derramado, a partir de um funil de escoamento, um material abrasivo (óxido de alumínio fundido branco grana F80) a uma vazão de  $(100 \pm 0,05)$  g a cada  $(100 \pm 5)$  rotações do disco. Na Figura 45, pode ser visto o esquema do ensaio, segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013).

A pressão do corpo de prova contra o disco de aço foi determinada pela calibração do equipamento contra um padrão de calibração (vidro comum), ajustando-se o contrapeso de maneira que, após 75 rotações em  $(60 \pm 3)$  s, fosse produzida uma cavidade de  $(17,0 \pm 0,5)$  mm de comprimento.

Figura 45 – Dispositivo para ensaio de resistência à abrasão.



Fonte: ABNT (2013).

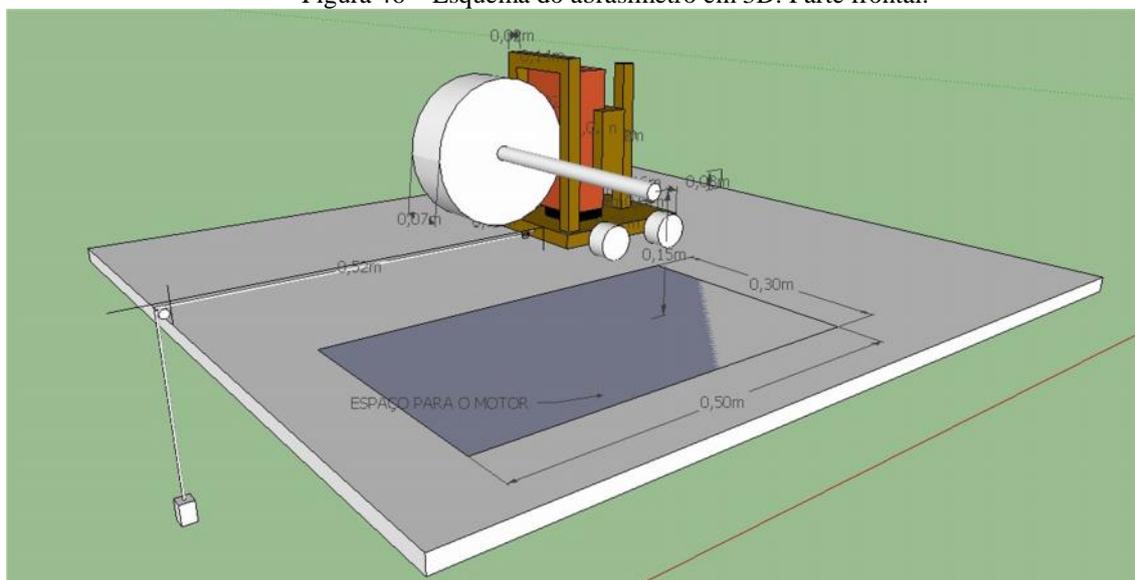
Em que,

- 1 – dispositivo móvel para empurrar a amostra;
- 2 – dispositivo para fixação;
- 3 – amostra;
- 4 – válvula de controle;
- 5 – reservatório de material abrasivo;
- 6 – guia para fluxo de material abrasivo;
- 7 – cilindro metálico para abrasão;
- 8 – contrapeso;
- 9 – saída do material abrasivo;
- 10 – moldura
- 11 – fluxo de material abrasivo;
- 12 – reservatório para coleta do material;
- 13 – apoio para centralizar a amostra.

Para a montagem do abrasímetro, foi desenvolvido um projeto a partir do esquema da norma (Figura 45) a fim de determinar com precisão medidas – tais como: altura do eixo do

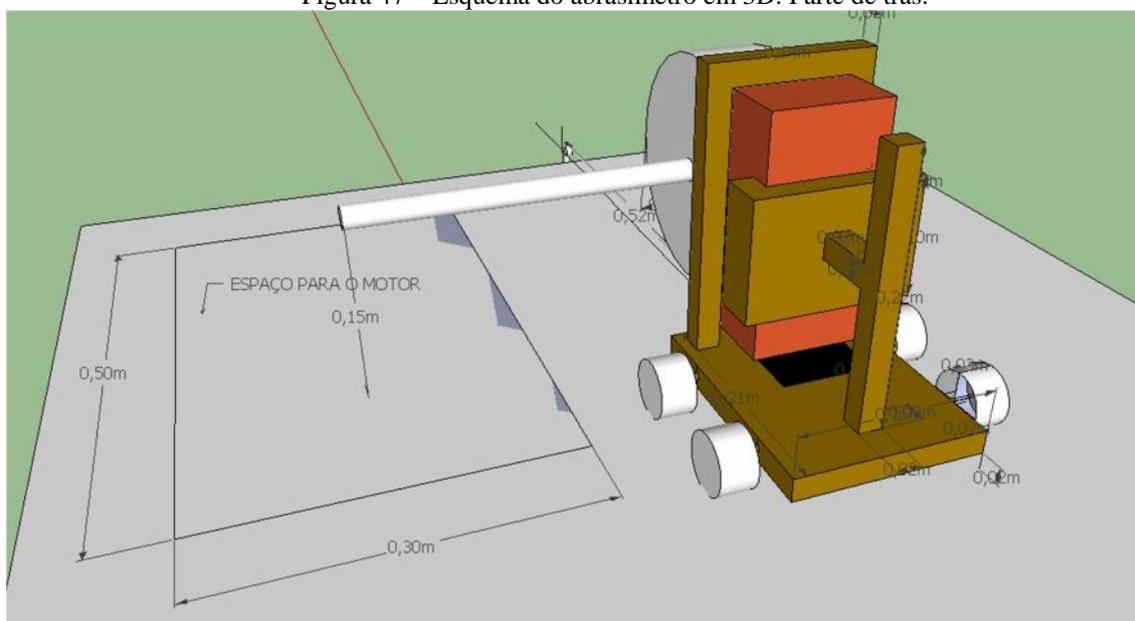
disco, dimensões do carro suporte da amostra, espaço para o motor – bem como de entender a esquematização geral do equipamento. Nas Figuras 46 e 47, pode ser visto o projeto em 3D do abrasímetro.

Figura 46 – Esquema do abrasímetro em 3D. Parte frontal.



Fonte: Da Autora (2015).

Figura 47 – Esquema do abrasímetro em 3D. Parte de trás.



Fonte: Da Autora (2015).

A partir de então, foram confeccionados separadamente o carro suporte e o disco de aço (Figura 48). Um eixo foi acoplado a um motor de 1700 RPM dotado de um inversor de frequência e de um redutor de frequência; estes dois últimos têm as funções, respectivamente, de controlar a rotação do eixo do motor de zero até sua rotação máxima (1700 RPM) e de

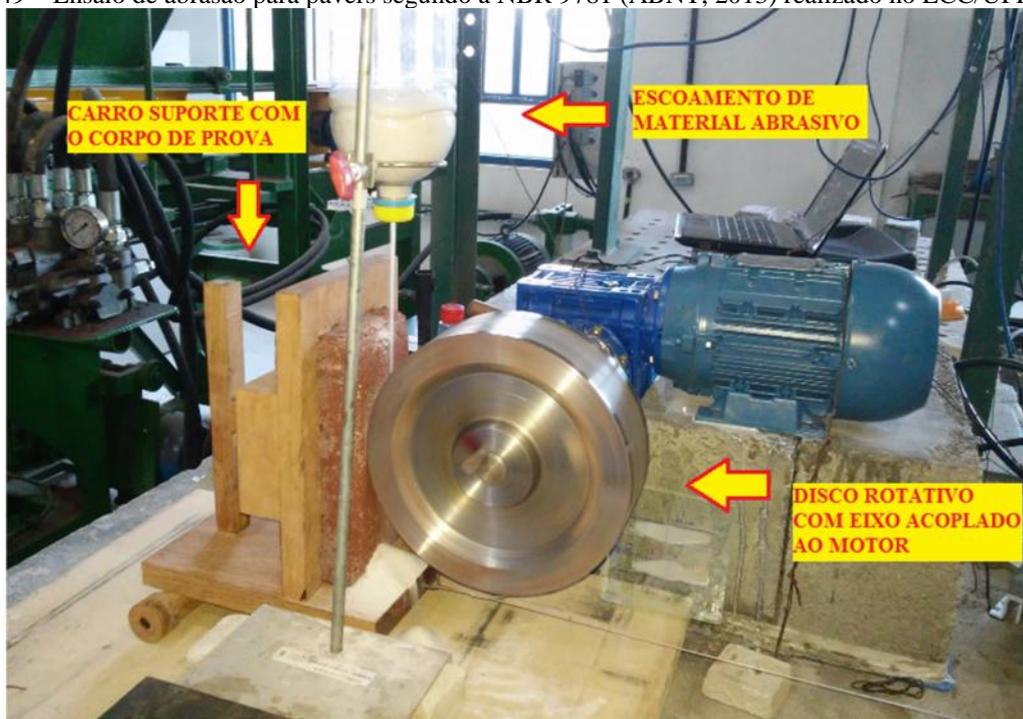
estabilizar e dar força ao sistema. O abrasímetro completamente montado pode ser visto na Figura 49.

Figura 48 – Carro suporte e disco de aço do abrasímetro.



Fonte: Da Autora (2015).

Figura 49 – Ensaio de abrasão para pavers segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013) realizado no LCC/UFPE/CAA.

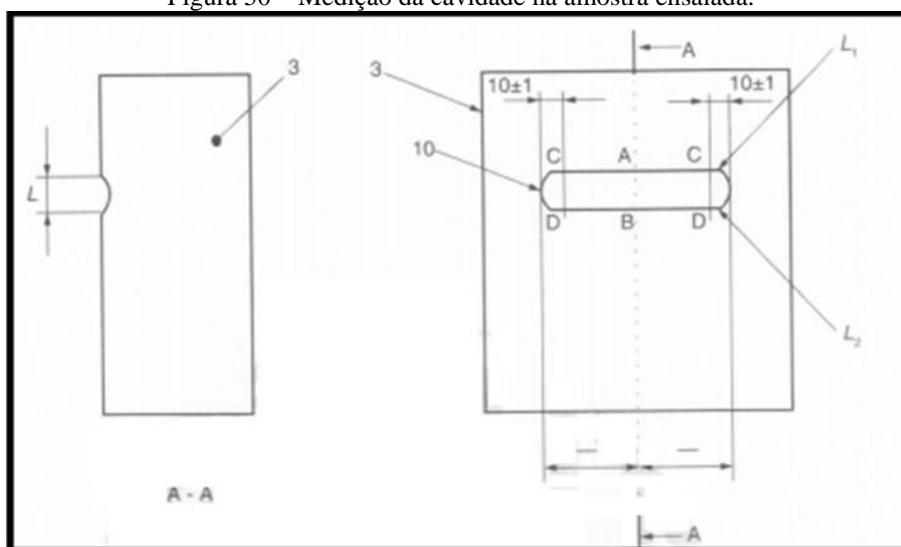


Fonte: Da Autora (2015).

Foram ensaiadas, na idade de 28 dias, 3 peças dos mesmos traços do ensaio de absorção de água. Antes de cada ensaio, os corpos de prova foram lavados em água corrente e enxugados com um pano úmido.

A medida de abrasão é a dimensão do comprimento ( $L$ ) da cavidade – resultante do desgaste da superfície do corpo de prova – corrigida por um fator de calibração. A medição foi feita com um paquímetro com resolução de 0,1 mm. Para determinar a dimensão da cavidade, utilizando uma régua metálica e um lápis com diâmetro de 0,9 mm e dureza 6H ou 7H, desenhou-se uma linha AB no centro da mesma perpendicular ao seu eixo, bem como os seus limites longitudinais ( $L_1$  e  $L_2$ ), de acordo com a Figura 50. O comprimento ( $L$ ) da cavidade é a distância entre seus limites longitudinais ( $L_1$  e  $L_2$ ) em cima da linha AB. Para a calibração, foram realizadas leituras também nos pontos C e D, a fim de se obter uma média.

Figura 50 – Medição da cavidade na amostra ensaiada.



Fonte: ABCP (2013).

O fator de calibração é a diferença aritmética entre 17,0 mm e o valor obtido na última calibração do dispositivo. O resultado final é a soma da leitura do comprimento da cavidade mais o fator de calibração.

#### 5.3.4.4 Cor

As análises das cores das peças confeccionadas nas diversas formulações foram realizadas por inspeção visual.

## 5.4 Quarta Etapa: Pastas de Cimento Vibroprensadas com Baixa Relação Água-Cimento

### 5.4.1 Confeção das Pastas de Cimento Vibroprensadas

Foram confeccionadas pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento, simulando um sistema mais simples (sem agregados) do que o concreto seco, mas com características análogas de formação de matriz cimentícia. Essa escolha foi feita por possivelmente facilitar o entendimento das interferências fenomenológicas das adições de pigmento e RCV nas reações de hidratação do cimento seco vibroprensado.

Na Tabela 11 estão apresentadas as formulações e os quantitativos das pastas confeccionadas. A relação água-cimento de todas as pastas foi de 0,20, valor inferior à relação de água-cimento mínima para a completude das reações de hidratação, como foi visto na seção 3.2.3.

Para a mistura dos materiais foi utilizada uma argamassadeira eletromecânica de eixo vertical planetário com cuba de 20 litros. Quando das formulações com adições, o pigmento e/ou o RCV eram misturados com o cimento antes de serem colocados na argamassadeira. Após a água ser colocada na argamassadeira, inseriam-se os materiais e iniciava-se a contagem do tempo de mistura. Este foi dividido em duas partes. Primeira parte: misturava-se a pasta durante 2 minutos em velocidade lenta para a homogeneização inicial; após esse tempo, desligava-se a argamassadeira por 15 segundos para raspar as paredes da cuba com espátula de borracha, fazendo com que toda a pasta a elas aderidas ficasse no fundo. Segunda parte: misturava-se a pasta durante 4 minutos em velocidade rápida para homogeneização final. Depois de preparadas, as pastas eram levadas para a vibroprensa, onde passavam pelo processo de vibrocompressão durante 30 segundos (mesmo tempo de vibrocompressão dos pavers).

Tabela 11 – Formulações e quantitativos das pastas de cimento vibroprensadas confeccionadas.

Tipo de mistura	Formulação	Cimento (g)	Pigmento (g)	RCV (g)	a/c
Pasta padrão	Pasta	4000,00	0	0	0,20
Pasta com adição de 3% de pigmento	Pasta 3%PIG	4000,00	120,00	0	0,20
Pasta com adição de 15% de RCV	Pasta 15%RCVA	4000,00	0	600,00	0,20
Pasta com adição de 3% pimento mais 15% de RCV	Pasta 3%PIG15%RCVA	4000,00	120,00	600,00	0,20

Fonte: Da Autora (2015).

A quantidade de cimento utilizada foi a suficiente para preencher um molde completo da vibroprensa (o que equivaleria a um paver). Já a relação água-cimento escolhida foi a que possibilitou a moldagem da pasta com adição de pigmento mais RCV (pior caso em termos de consistência seca), tendo valor de 0,2. O processo de cura das pastas foi o mesmo empregado na cura dos pavers.

#### 5.4.2 *Análises Microestrutural, Térmica e Cristalográfica de Pastas de Cimento Vibroprensadas*

Foram feitas análises de MEV, TG/DTG e DRX das pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento sem e com adições de pigmento e RCV de maneira isolada e concomitante. No dia das análises as pastas estavam com mais de 28 dias de idade.

##### 5.4.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com Análise de EDS

Com o intuito de caracterizar a morfologia da matriz cimentícia formada por pasta de cimento vibroprensada sem e com adições de pigmento e RCV, bem como de entender a influência dessas adições na estrutura do compósito, foram realizadas análises de MEV. O equipamento utilizado foi do modelo Quanta 200 FEG em operação a alto vácuo com acessório Espectrômetro de Energia Dispersiva de Raios-X ou, em inglês, Energy Dispersive Spectrometer (EDS). As análises de MEV foram realizadas no Laboratório de Nanotecnologia do CETENE, em Recife-PE.

Foram verificadas características e propriedades tais como: porosidade da matriz cimentícia, possível efeito *filler* das adições, disposição das partículas do pigmento e do RCV dentro do sistema, bem como a relação de suas partículas com a matriz e entre si, produtos de hidratação das pastas de cimento e possível hidratação incompleta dos grãos de cimento – devido à baixa quantidade de água – através de análise visual e do EDS.

##### 5.4.2.2 Termogravimetria (TG/DTG)

Com o intuito de identificar as fases de composição e suas transformações da pasta de cimento vibroprensada sem e com adições de pigmento e RCV ao longo de gradiente de temperatura, fez-se a análise de TG/DTG. O instrumento utilizado foi o Netzsch STA 449F3,

cobrindo o intervalo de temperaturas de 40°C a 1000°C a uma taxa de aumento de temperatura de 10 K/min. As análises de TG/DTG foram realizadas no Laboratório de Nanotecnologia do CETENE, em Recife-PE.

#### 5.4.2.3 Difração de Raios-X (DRX)

Com o intuito de identificar os produtos das reações de hidratação da pasta de cimento vibroprensada sem e com as adições feitas, foi realizada a análise de DRX. O método utilizado foi o convencional (pó seco) em equipamento Difratorômetro de Raios-X Bruker D8 Advance Davinci. As condições de operação foram fixadas em: radiação de CuK $\alpha$  (40 kV/40 mA), filtro de Níquel, leitura de  $2\theta$ , variando de 0° a 100°, com passo de 0,008 a cada 1 segundo, velocidade (Scan-Speed) de 2°/min.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados os resultados dos testes preliminares com pastas de cimento (resistência à compressão, tempos de início e fim de pega, índice de consistência normal e análise colorimétrica), da dosagem do traço padrão (curva de finos, curva de umidade e curva de consumo), das formulações e suas correções do consumo de cimento, bem como os dos testes de propriedades dos pavers (ensaios de resistência à compressão, absorção de água, resistência à abrasão e análise colorimétrica). As análises cristalográfica, térmica e microestrutural das pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento vêm complementar essa última discussão de maneira tal a corroborar e justificar os resultados apresentados.

A discussão dos resultados dos testes de propriedades dos pavers propõe avaliar a influência das incorporações de pigmento e de RCV nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos compósitos produzidos em relação ao paver padrão cinza (traço 1:5) e ao paver padrão colorido (traço 1:5 4%PIG).

### 6.1 Testes Preliminares em Pastas de Cimento

#### 6.1.1 Resistência à Compressão das Pastas de Cimento

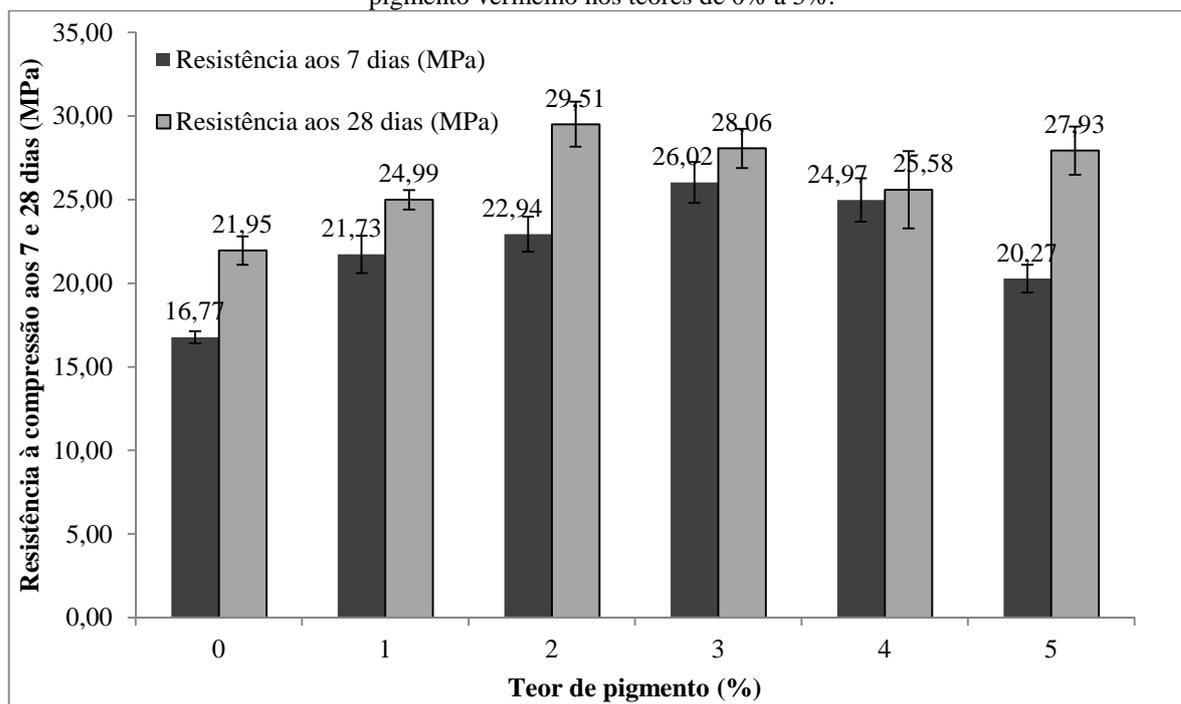
Seguem na Tabela 12 e na Figura 51 valores de resistência à compressão simples ( $f$ ) e seus desvios-padrões amostrais ( $s$ ) de pastas de cimento adicionadas com pigmento vermelho nos teores de 0%, 1%, 2%, 3%, 4% e 5% aos 7 e 28 dias de idade.

Tabela 12 – Valores de resistência à compressão e desvio-padrão amostral aos 7 e 28 dias de idade de pastas de cimento adicionadas com pigmento vermelho nos teores de 0% a 5%.

Adição de pigmento (%)	7 dias		28 dias	
	$f$ (MPa)	$s$ (MPa)	$f$ (MPa)	$s$ (MPa)
0	16,77	0,36	21,95	0,86
1	21,73	1,12	24,99	0,58
2	22,94	1,05	29,51	1,35
3	26,02	1,22	28,06	1,17
4	24,97	1,30	25,58	2,31
5	20,27	0,83	27,93	1,44

Fonte: Da Autora (2015).

Figura 51 – Valores de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade de pastas de cimento adicionadas com pigmento vermelho nos teores de 0% a 5%.



Fonte: Da Autora (2015).

Da análise da Figura 51, percebe-se que houve uma tendência ao aumento da resistência à compressão em ambas as idades, quando da adição do pigmento. Destaca-se o aumento significativo da resistência para o teor de 3% de adição, ao se atingir um aumento percentual em torno de 55,16% e 27,84% respectivamente nas idades de 7 e 28 dias em relação ao compósito padrão (sem nenhuma adição). Tal fato pode ser explicado pelo efeito *filler*. Como já abordado na seção 2, a literatura aponta que os pigmentos em materiais cimentícios podem atuar como *filler*, influenciando também na resistência dos mesmos devido à finura e à forma de suas partículas.

Os resultados justificam o uso do teor padrão da indústria (4%), uma vez que houve uma queda de resistência do compósito com 5% de pigmento em adição na idade de 7 dias e uma tendência de queda de resistência na idade de 28 dias a partir do teor de adição de 3%.

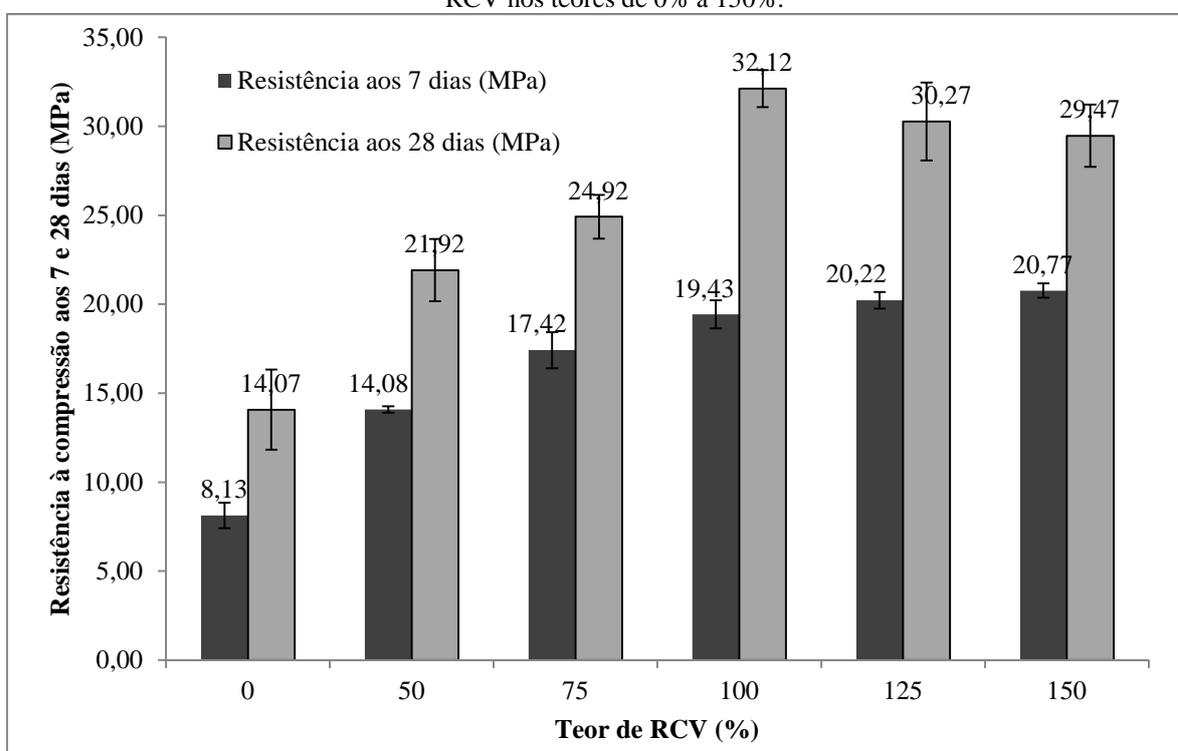
Já na Tabela 13 e na Figura 52 seguem valores de resistência à compressão simples ( $f$ ) e seus desvios-padrões amostrais ( $s$ ) de pastas de cimento adicionadas com RCV nos teores de 0%, 50%, 75%, 100%, 125% e 150% aos 7 e 28 dias de idade.

Tabela 13 – Valores de resistência à compressão e desvio-padrão amostral aos 7 e 28 dias de idade de pastas de cimento adicionadas com RCV nos teores de 0% a 150%.

Adição de RCV (%)	7 dias		28 dias	
	f (MPa)	s (MPa)	f (MPa)	s (MPa)
0	8,13	0,72	14,07	2,25
50	14,08	0,18	21,92	1,75
75	17,42	1,02	24,92	1,23
100	19,43	0,79	32,12	1,04
125	20,22	0,46	30,27	2,19
150	20,77	0,41	29,47	1,76

Fonte: Da Autora (2015).

Figura 52 – Valores de resistência à compressão de pastas aos 7 e 28 dias de idade de cimento adicionadas com RCV nos teores de 0% a 150%.



Fonte: Da Autora (2015).

Da análise da Figura 52, percebe-se que houve um real aumento da resistência à compressão aos 7 dias, quando da adição de RCV, com um patamar de resistência obtido a partir do teor de adição de 100%, ao se atingir um aumento percentual em torno de 139% em relação ao compósito padrão (sem nenhuma adição). Tal fato também pode ser explicado pelo efeito *filler*, assim como foi abordado na seção 4. Aos 28 dias de idade, percebe-se que há um pico de resistência quando também da adição de 100% de RCV com um aumento percentual em torno de 128% em relação ao compósito padrão (sem nenhuma adição). A partir do teor de adição de 100%, há uma tendência de queda de resistência nessa idade analisada.

Para avaliar os fenômenos acerca da adição do pigmento e do RCV de forma concomitante nas análises que seguem, escolheu-se por se manter fixo um teor de RCV frente às variações do teor de pigmento. Sendo o parâmetro de resistência à compressão essencial ao estudo e associado à qualidade dos pavers das análises *a posteriori*, optou-se pelo teor de adição de 100% de cerâmica vermelha, visto que este apresentou os melhores valores de resistência à compressão. Além disso, nas porcentagens de até 50% de cerâmica, a coloração cinza predominou sobre a coloração alaranjada da cerâmica nos compósitos produzidos; a partir da adição de 75%, percebeu-se uma predominância da matiz colorimétrica alaranjada proveniente do RCV, sendo assim o teor de 100% de RCV uma escolha razoável.

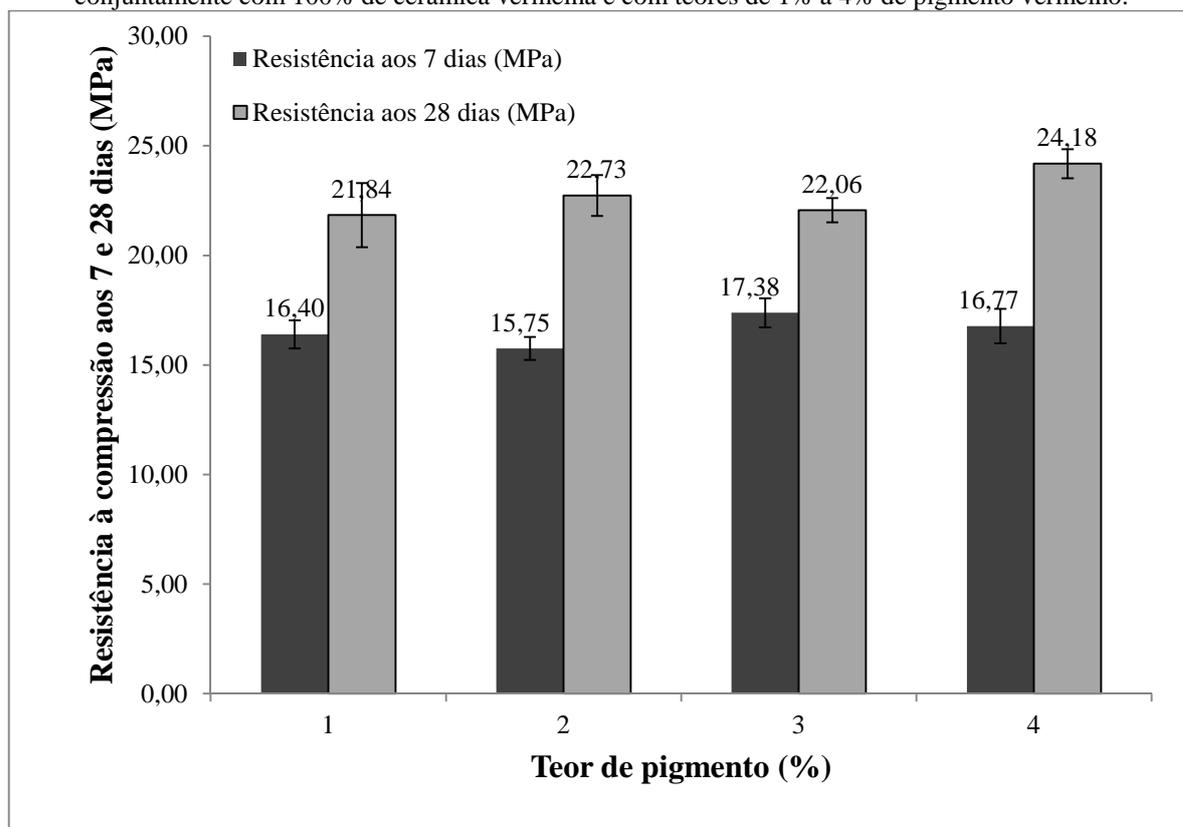
Finalmente, seguem na Tabela 14 e na Figura 53 valores de resistência à compressão simples (f) e seus desvios-padrões amostrais (s) de pastas de cimento adicionadas conjuntamente com 100% de cerâmica vermelha e com 1%, 2%, 3% e 4% de pigmento vermelho aos 7 e 28 dias de idade.

Tabela 14 – Valores de resistência à compressão e desvio-padrão amostral de pastas de cimento aos 7 e 28 dias de idade adicionadas conjuntamente com 100% de cerâmica vermelha e com teores de 1% a 4% de pigmento vermelho.

Adição de pigmento (%)	7 dias		28 dias	
	f (MPa)	s (MPa)	f (MPa)	s (MPa)
1	16,40	0,64	21,84	1,47
2	15,75	0,52	22,73	0,93
3	17,38	0,66	22,06	0,55
4	16,77	0,79	24,18	0,67

Fonte: Da Autora (2015).

Figura 53 – Valores de resistência à compressão de pastas de cimento aos 7 e 28 dias de idade adicionadas conjuntamente com 100% de cerâmica vermelha e com teores de 1% a 4% de pigmento vermelho.



Fonte: Da Autora (2015).

Ao observar a Figura 53, percebe-se que, em ambas as idades, quando o teor de cerâmica vermelha permanece constante (100%) e o teor de pigmento aumenta, não há mudança significativa nos valores de resistência à compressão dos compósitos. Tal fenômeno pode ser explicado pelo fato do efeito *filler* do RCV se sobressair em relação ao efeito *filler* do pigmento, visto que os teores de adição deste são bem inferiores aos teores de adição daquele. Pode-se sugerir também que, com o teor de adição de 100% de cerâmica vermelha, o sistema atingiu uma alta compactidade, ao passo que adicionar baixos teores de mais *filler* não altera significativamente o empacotamento do sistema.

### 6.1.2 Tempo de Início e Fim de Pega

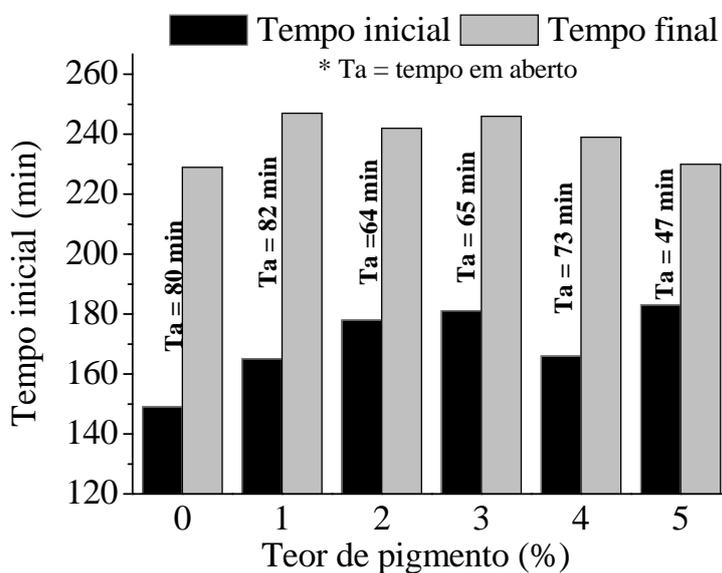
Seguem na Tabela 15 e na Figura 54 os resultados dos tempos de pega inicial, final e em aberto das pastas de cimento adicionadas com pigmento vermelho nos teores de 0%, 1%, 2%, 3%, 4% e 5%.

Tabela 15 – Tempos de início, fim de pega e em aberto de pastas de cimento adicionadas com pigmento vermelho nos teores de 0% a 5%.

Adição de pigmento (%)	Tempo (min)		
	Início de pega	Fim de pega	Tempo em aberto
0	149,00	229,00	80,00
1	165,00	247,00	82,00
2	178,00	242,00	64,00
3	181,00	246,00	65,00
4	166,00	239,00	73,00
5	183,00	230,00	47,00

Fonte: Da Autora (2015).

Figura 54 – Tempos de início, fim de pega e em aberto de pastas de cimento adicionadas com pigmento vermelho nos teores de 0% a 5%.



Fonte: Da Autora (2015).

Pode-se observar, na Figura 54, que há uma tendência ao incremento nos tempos de início de pega com a adição gradual do pigmento vermelho. Com relação aos tempos finais de pega, há uma redução dos mesmos com a adição gradual do pigmento vermelho. Por fim e, conseqüentemente, os tempos em aberto tenderam à redução. Verificam-se, então, nos

resultados dos tempos de pega, que a presença do pigmento até o teor de 5% foi positiva do ponto de vista da indústria de pré-moldados.

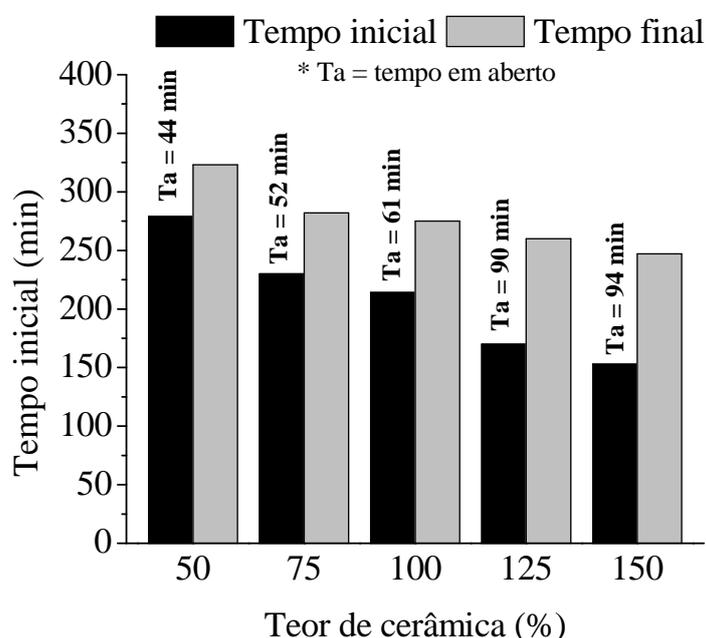
Seguem na Tabela 16 e na Figura 55 os resultados dos tempos de pega inicial, final e em aberto das pastas de cimento adicionadas com RCV nos teores de 50%, 75%, 100% e 150%.

Tabela 16 – Tempos de início, fim de pega e em aberto de pastas de cimento adicionadas com RCV nos teores de 50% a 150%.

Adição de RCV (%)	Tempo (min)		
	Início de pega	Fim de pega	Tempo em aberto
50	279,00	323,00	44,00
75	230,00	282,00	52,00
100	214,00	275,00	61,00
125	170,00	260,00	90,00
150	153,00	247,00	94,00

Fonte: Da Autora (2015).

Figura 55 – Tempos de início, fim de pega e em aberto de pastas de cimento adicionadas com RCV nos teores de 50% a 150%.



Fonte: Da Autora (2015).

Em relação aos tempos de pega no sistema com cerâmica vermelha (Figura 55), verifica-se que houve uma tendência à redução nos tempos de pega inicial e final, bem como um aumento do tempo em aberto.

Quando das adições de resíduo cerâmico, apenas o tempo de fim de pega foi contemplado positivamente do ponto de vista de indústria de pré-moldados, havendo

interferência negativa da cerâmica vermelha em termos de tempo de início de pega e em termos de tempo em aberto.

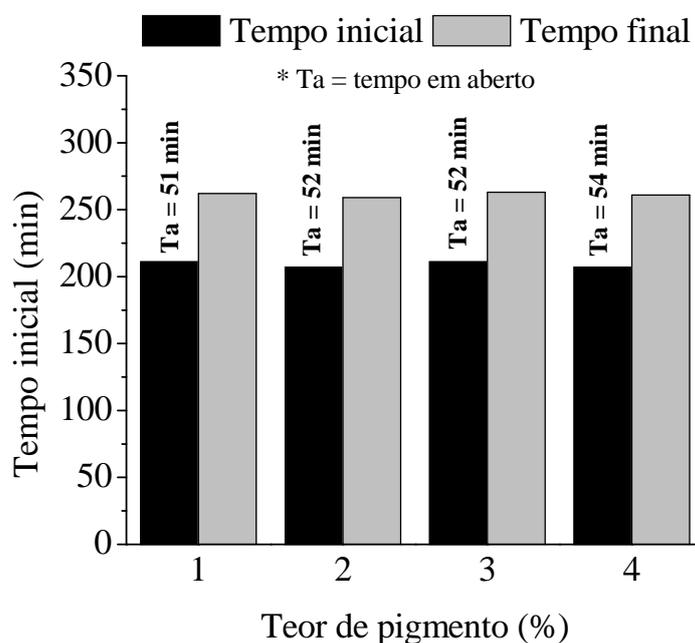
Seguem na Tabela 17 e na Figura 56 os resultados dos tempos de pega inicial e final das pastas de cimento adicionadas conjuntamente com 100% de cerâmica vermelha e com 1%, 2%, 3% e 4% de pigmento vermelho.

Tabela 17 – Tempos de início, fim de pega e em aberto de pastas de cimento adicionadas conjuntamente com 100% de cerâmica vermelha e com teores de 1% a 4% de pigmento vermelho.

Adição de pigmento (%)	Tempo (min)		
	Início de pega	Fim de pega	Tempo em aberto
1	211,00	262,00	51,00
2	207,00	259,00	52,00
3	211,00	263,00	52,00
4	207,00	261,00	54,00

Fonte: Da Autora (2015).

Figura 56 – Tempos de início, fim de pega e em aberto de pastas de cimento adicionadas conjuntamente com 100% de cerâmica vermelha e com teores de 1% a 4% de pigmento vermelho.



Fonte: Da Autora (2015).

Para o teor constante de 100% de RCV, verifica-se no gráfico da Figura 56 que o aumento gradual de 1% a 4% do teor de pigmento não alterou significativamente os valores dos tempos de início e fim de pega, bem como os de tempos em aberto da pasta. Isto indica uma boa interação no conjunto pigmento mais cerâmica, uma vez que as propriedades não foram deterioradas.

### 6.1.3 Índice de Consistência Normal

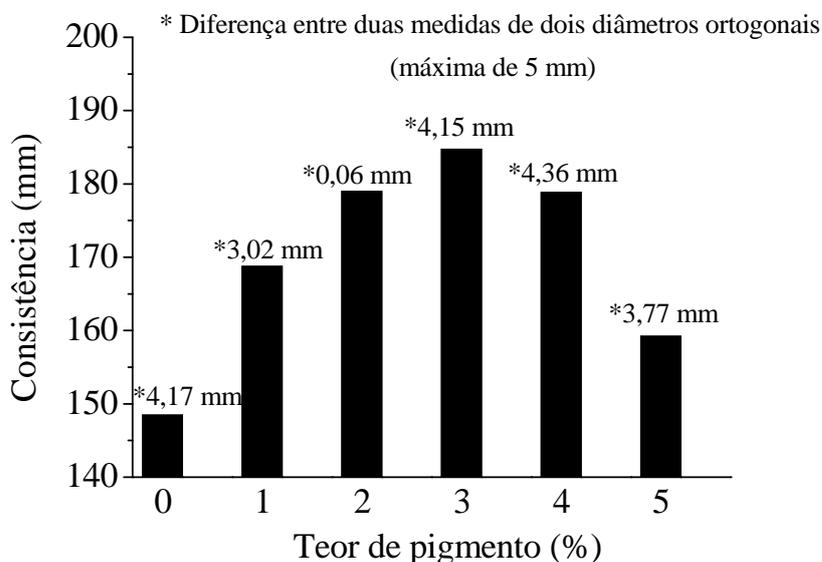
Na Tabela 18 e na Figura 57 seguem os valores do índice de consistência normal das pastas de cimento adicionadas com pigmentos nos teores de 0%, 1%, 2%, 3%, 4% e 5%.

Tabela 18 – Valores do índice de consistência normal de pastas de cimento adicionadas com pigmentos nos teores de 0% a 5%.

Adição de pigmento (%)	Consistência da amostra 1 (mm)	Consistência da amostra 2 (mm)	Diferença absoluta entre as medidas (mm)	Consistência média (mm)
0	150,54	146,37	4,17	148,46
1	167,25	170,27	3,02	168,76
2	179,00	178,94	0,06	178,97
3	182,64	186,79	4,15	184,72
4	176,65	181,01	4,36	178,83
5	157,34	161,11	3,77	159,23

Fonte: Da Autora (2015).

Figura 57 – Valores do índice de consistência normal de pastas de cimento adicionadas com pigmentos nos teores de 0% a 5%.



Fonte: Da Autora (2015).

Pela análise da Figura 57, nota-se que há dois fenômenos que concorrem concomitantemente no comportamento da consistência. Para adições menores (0 a 3%) houve uma tendência ao aumento do índice de consistência da argamassa, ou seja, a massa no estado fresco ficou mais fluida. Já para adições maiores houve uma tendência à diminuição.

Sugere-se que esses fenômenos são regidos pela morfologia das partículas do pigmento de óxido de ferro, que se apresentam na forma acicular, como visto anteriormente

na Figura 27. Apesar de essa morfologia favorecer a adsorção de água devido a sua alta área específica, baixos teores de adição do pigmento facilitariam o deslizamento e o rolamento da pasta de cimento em estado fresco com os grãos do agregado e do pigmento. De maneira oposta, com o sequencial aumento do teor de adição de pigmento, outro fenômeno regeu o comportamento do sistema, levando à redução da consistência. Esse fenômeno pode ser caracterizado pelo aumento do teor de finos no sistema, ou seja, pelo aumento da superfície ou área específica dos componentes da argamassa, devido à alta finura do pigmento (44,54 m<sup>2</sup>/g de área superficial). Deste modo, há uma maior absorção da água e uma diminuição da consistência normal. Ratificando esse raciocínio, Coelho (2001) ressalta que a incorporação de pigmentos no sistema cimentício geralmente resulta em uma redução de sua trabalhabilidade, tanto pelo tamanho de suas partículas (menor que 1µm) como também pela sua forma.

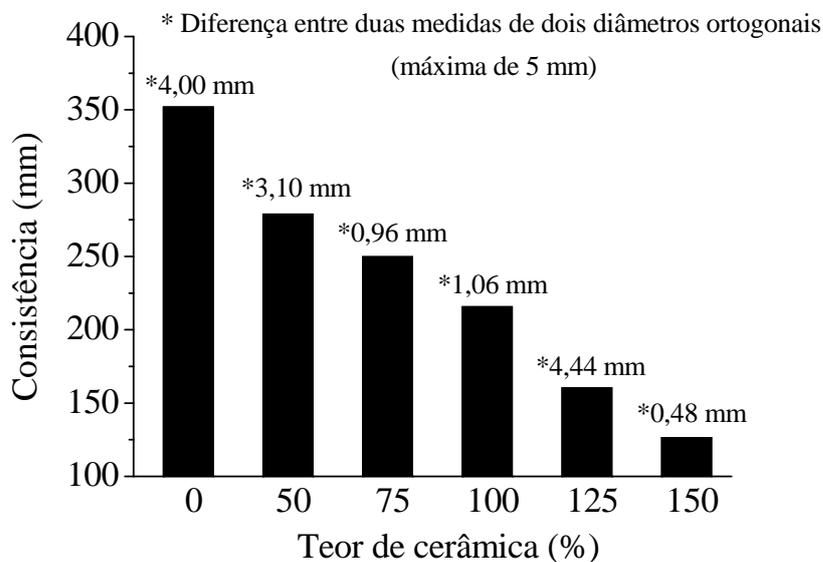
O mesmo fenômeno de alta absorção de água devido ao aumento dos teores de finos no compósito cimentício e uma conseqüente redução do índice de consistência normal também ocorreu nas misturas com adições do RCV. Este, por ser fino (27,31 m<sup>2</sup>/g de área superficial) e por estar presente em altos teores (no mínimo 50%), reduziu significativamente os valores da consistência das pastas das misturas, como pode ser observado na Tabela 19 e na Figura 58.

Tabela 19 – Valores do índice de consistência normal de pastas de cimento adicionadas com RCV nos teores de 0% a 150%.

Adição de RCV (%)	Consistência da amostra 1 (mm)	Consistência da amostra 2 (mm)	Diferença absoluta entre as medidas (mm)	Consistência média (mm)
0	350,00	354,00	4,00	352,00
50	280,51	277,41	3,10	278,96
75	249,31	250,27	0,96	249,79
100	215,13	216,19	1,06	215,66
125	158,23	162,67	4,44	160,45
150	126,63	126,15	0,48	126,39

Fonte: Da Autora (2015).

Figura 58 – Valores do índice de consistência normal de pastas de cimento adicionadas com RCV nos teores de 0% a 150%.



Fonte: Da Autora (2015).

Estes resultados não são negativos, visto que, quando dos testes nos pavers, a natureza seca e menos fluida do concreto será mantida com as adições tanto de pigmento quanto de RCV. A indústria de pré-moldados geralmente utiliza aditivos superplastificantes em suas produções para facilitar o adensamento da mistura, otimizando a quantidade de água no sistema.

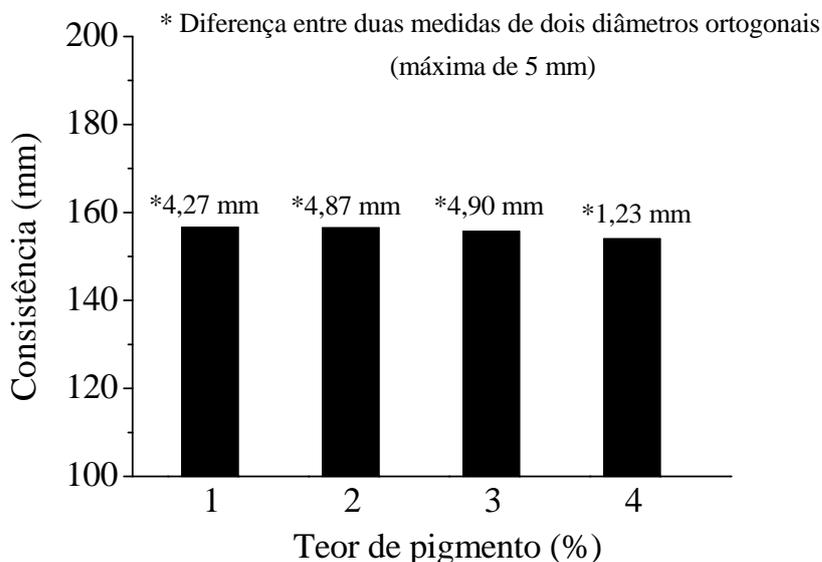
Os valores do índice de consistência normal da pasta de cimento adicionadas conjuntamente com 100% de cerâmica vermelha e com 1%, 2%, 3% e 4% de pigmento vermelho podem ser observados na Tabela 20 e na Figura 59.

Tabela 20 – Valores do índice de consistência normal de pastas de cimento adicionadas conjuntamente com 100% de cerâmica vermelha e com teores de 1% a 4% de pigmento vermelho.

Adição de pigmento (%)	Consistência da amostra 1 (mm)	Consistência da amostra 2 (mm)	Diferença absoluta entre as medidas (mm)	Consistência média (mm)
1	158,77	154,50	4,27	156,64
2	154,06	158,93	4,87	156,50
3	153,21	158,11	4,90	155,66
4	153,40	154,63	1,23	154,02

Fonte: Da Autora (2015).

Figura 59 – Valores do índice de consistência normal de pastas de cimento adicionadas conjuntamente com 100% de cerâmica vermelha e com teores de 1% a 4% de pigmento vermelho.



Fonte: Da Autora (2015).

Mais uma vez ratificou-se a boa interação entre o pigmento e o RCV, uma vez que a mistura proporcionou uma manutenção nas propriedades da consistência para a mesma porcentagem de cerâmica vermelha (100%).

#### 6.1.4 Análise da Cor e Considerações Finais sobre os Testes Preliminares

Na Figura 60, podem-se observar as cores de todas as formulações das argamassas produzidas: sem nenhuma adição (padrão), com a adição do RCV – nos teores de 50%, 75%, 100%, 125% e 150% –, com a adição do pigmento (PIG) – nos teores de 1%, 2%, 3%, 4% e 5% – e com a adição do RCV conjuntamente com pigmento – com o teor fixo de 100% do primeiro, variando-se de 1% a 4% o teor do segundo.

Figura 60 – Variação das cores das argamassas produzidas com RCV e pigmento vermelho de forma isolada e concomitante.



Fonte: Da Autora (2015).

A análise da cor foi feita de maneira visual. Nos compósitos produzidos com adições de apenas RCV, percebeu-se que, no teor de 50%, a coloração cinza predominou sobre a coloração alaranjada da cerâmica, havendo uma tímida manifestação desta coloração; já, a partir da adição de 75%, houve uma predominância da matiz colorimétrica alaranjada proveniente do RCV.

Nos compósitos produzidos com adições concomitantes de RCV e pigmento, teores menores que 2% de pigmento nesses sistemas não geraram uma matiz colorimétrica aceitável aos padrões mercadológicos do concreto colorido. Assim, decidiu-se reduzir pela metade o teor de pigmento de óxido de ferro às formulações *a posteriori* dos pavers.

A obtenção da cor com a adição do RCV e com a diminuição do teor de pigmento nos compósitos cimentícios foi alcançada com sucesso.

Outro ponto a se destacar é que todas as misturas foram possíveis de serem conformadas, inclusive as que possuem concomitantemente o RCV e o pigmento. Isto aponta uma possível boa interação entre esses dois materiais. As propriedades avaliadas das pastas (resistência à compressão, tempos de início e fim de pega, consistência normal) deram, de uma maneira geral, boas respostas com as adições.

Conclui-se então que a obtenção de um compósito cimentício colorido com a incorporação de RCV em prol da redução de pigmento é possível e viável com manutenção de propriedades ou, até mesmo, melhoria destas. De posse destas informações, deu-se prosseguimento aos estudos dos pavers coloridos.

## 6.2 Dosagem do Traço Padrão, Formulações e Testes de Propriedades dos Paviers

### 6.2.1 Dosagem do Concreto Referência (Paver Padrão)

#### 6.2.1.1 Curva de Finos

. Na Tabela 21 seguem os quantitativos de materiais suficientes para a produção de 8 paviers de cada formulação do primeiro conjunto de misturas (traços T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>, T<sub>5</sub> e T<sub>6</sub>) para o desenvolvimento da curva de finos.

Tabela 21 – Quantitativos de materiais do primeiro conjunto de misturas da curva de finos para a produção de 8 peças.

Traço	Cimento (kg)	Agregados (kg)	Total de água (L)	Agregado graúdo (%)	Agregado miúdo (%)	Pedrisco (kg)	Areia (média + muito grossa) (kg)	Areia média (kg)	Areia muito grossa (kg)
T <sub>1</sub>	3,89	19,44	2,26	10,00	90,00	1,94	17,50	5,25	12,25
T <sub>2</sub>	3,89	19,44	2,26	20,00	80,00	3,89	15,55	4,67	10,89
T <sub>3</sub>	3,89	19,44	2,26	30,00	70,00	5,83	13,61	4,08	9,53
T <sub>4</sub>	3,89	19,44	2,26	40,00	60,00	7,78	11,66	3,50	8,16
T <sub>5</sub>	3,89	19,44	2,26	50,00	50,00	9,72	9,72	2,92	6,80
T <sub>6</sub>	3,89	19,44	2,26	60,00	40,00	11,66	7,78	2,33	5,44

Fonte: Da Autora (2015).

Na Tabela 22 seguem os quantitativos de materiais suficientes para a produção de 8 paviers de cada formulação do primeiro conjunto de misturas (traços T<sub>7</sub> e T<sub>8</sub>) para o desenvolvimento da curva de finos.

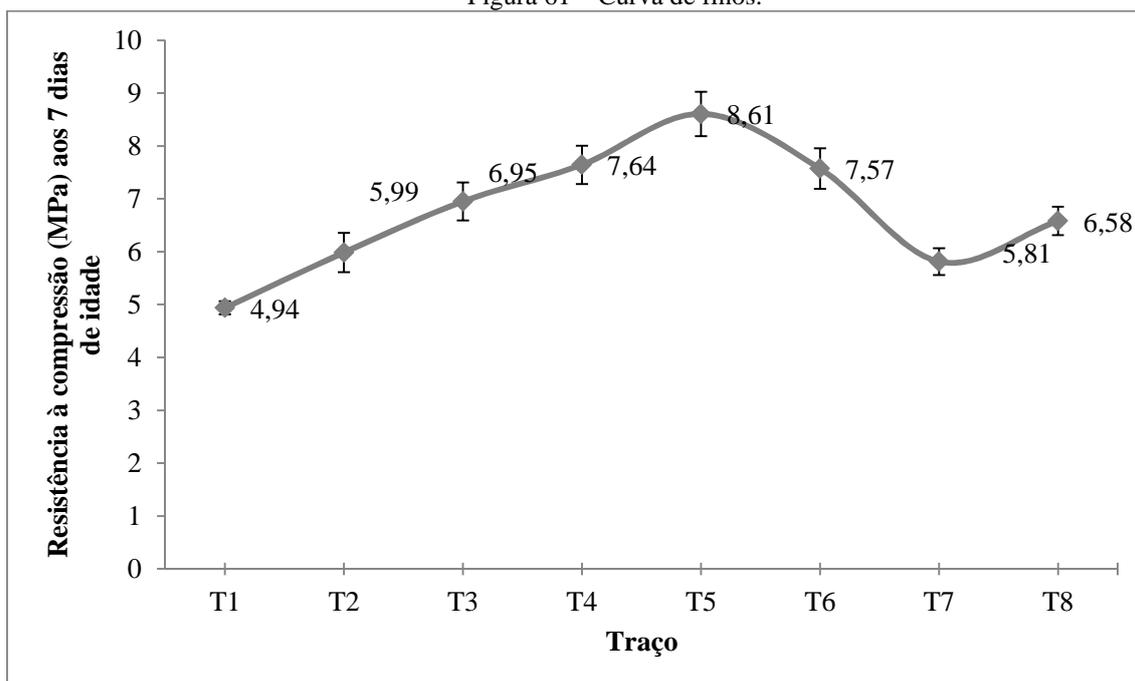
Tabela 22 – Quantitativos de materiais do segundo conjunto de misturas da curva de finos para a produção de 8 peças.

Traço	Cimento (kg)	Agregados (kg)	Total de água (L)	Pedrisco (%)	Areia média (%)	Areia muito grossa (%)	Pedrisco (kg)	Areia média (kg)	Areia muito grossa (kg)
T <sub>7</sub>	3,89	19,44	2,26	11,13	9,72	79,15	2,16	1,89	15,39
T <sub>8</sub>	3,89	19,44	2,26	18,91	45,87	35,22	3,68	8,92	6,85

Fonte: Da Autora (2015).

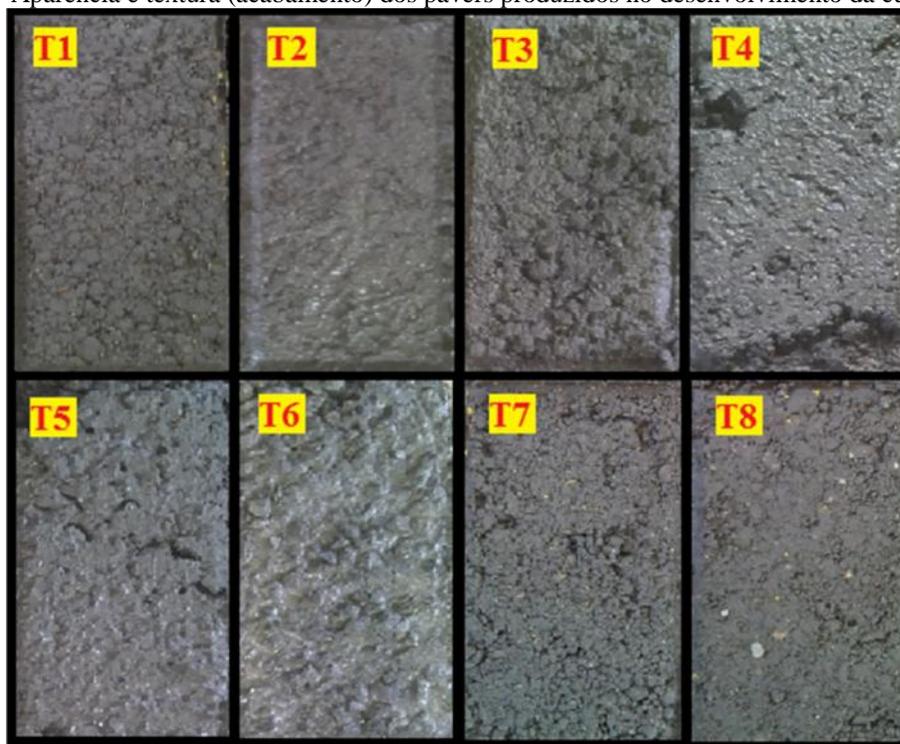
A curva de finos gerada pode ser observada na Figura 61. O acabamento dos paviers dos respectivos traços pode ser visualizado na Figura 62.

Figura 61 – Curva de finos.



Fonte: Da Autora (2015).

Figura 62 – Aparência e textura (acabamento) dos pavers produzidos no desenvolvimento da curva de finos.



Fonte: Da Autora (2015).

Da análise da curva de finos (Figura 61), para o primeiro conjunto de misturas (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>, T<sub>5</sub> e T<sub>6</sub>), verifica-se que o traço T<sub>5</sub> gera um paver com maior resistência que os demais. Entretanto, observando a Figura 62, percebe-se um acabamento não satisfatório do mesmo. Além disso, os traços desse conjunto apresentaram pouca coesão; alguns desmoronando logo

após a desmoldagem, indicando falta de finos na mistura. Na Figura 63, pode ser vista a condição de falta de coesão de um paver do traço T<sub>5</sub>.

Figura 63 – Condição de falta de coesão de uma paver do traço T<sub>5</sub>.



Fonte: Da Autora (2015).

Já para o segundo conjunto de misturas (T<sub>7</sub> e T<sub>8</sub>), verifica-se que o traço T<sub>8</sub> gera um paver com maior resistência relativamente ao T<sub>7</sub>, como já esperado. Além disso, esse traço apresentou melhor acabamento que todos os demais, uma superfície com textura mais fechada e com menos agregados expostos, como pode ser visto na Figura 62. Sua coesão foi suficiente para manter a peça intacta após a sua desmoldagem. Assim, escolheu-se o traço T<sub>8</sub> como melhor resultado, apresentando a melhor proporção entre os agregados em questão.

### 6.2.1.2 Curva de Umidade

Seguem na Tabela 23 as formulações e quantitativos para a produção de 4 corpos de prova por traço para o desenvolvimento da curva de umidade.

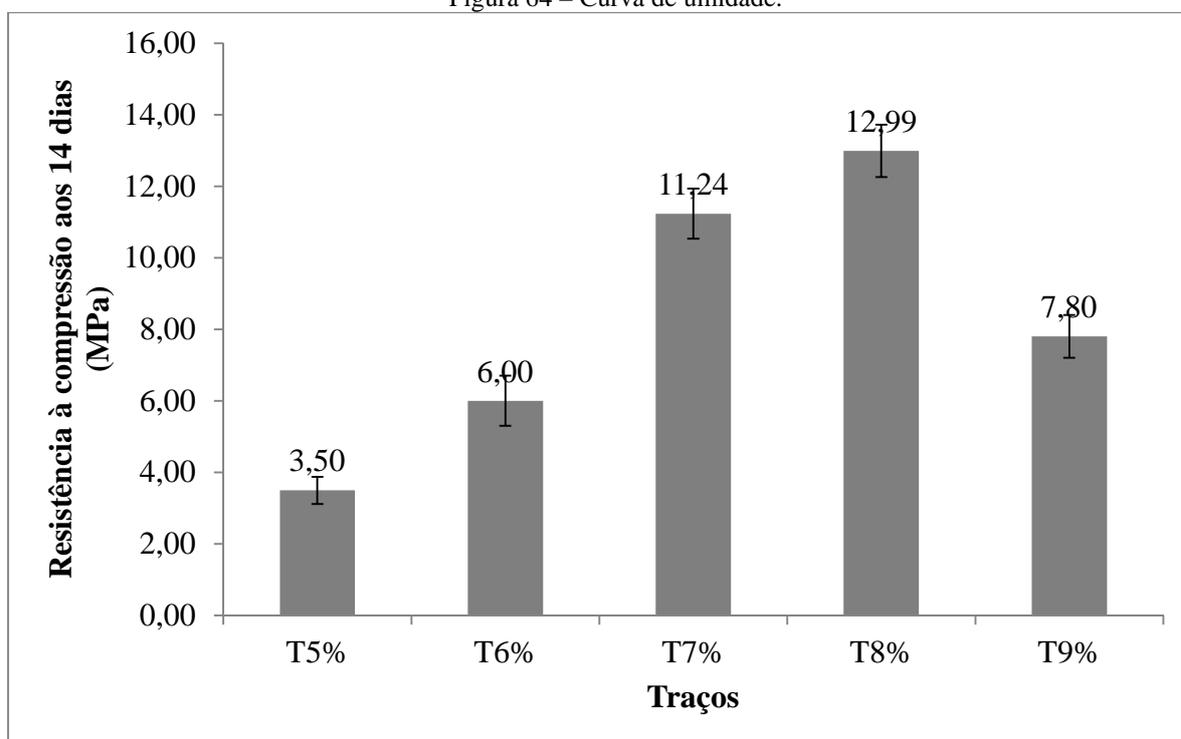
Tabela 23 – Formulações e quantitativos de materiais para a curva de umidade.

Traço	Umidade total (%)	Cimento (kg)	Areia média (kg)	Areia muito grossa (kg)	Pedrisco (kg)	Água total (L)
T <sub>5%</sub>	5	1,95	4,46	3,42	1,84	0,58
T <sub>6%</sub>	6	1,95	4,46	3,42	1,84	0,70
T <sub>7%</sub>	7	1,95	4,46	3,42	1,84	0,82
T <sub>8%</sub>	8	1,95	4,46	3,42	1,84	0,93
T <sub>9%</sub>	9	1,95	4,46	3,42	1,84	1,05

Fonte: Da Autora (2015).

Na Figura 64 segue a curva de umidade.

Figura 64 – Curva de umidade.



Fonte: Da Autora (2015).

Verifica-se que o traço T<sub>8%</sub>, com 8% de umidade, ou seja, 0,08 de relação água-materiais secos foi o mais resistente. Assim, adotou-se esta umidade como sendo a ótima. Além disso, também foi percebido que ela proporcionava às massas produzidas uma

consistência adequada, suficiente para um bom processamento de alimentação da vibroprensa e moldagem das peças. O resultado de 8% está de acordo com a estimativa de Fernandes (2013) de que, em geral, a umidade final da mistura fica em torno de 7% do total de material seco.

O comportamento dos resultados da curva de umidade corroboram as afirmações da literatura – Fernandes (2013), Frasson Júnior (2000) e Tango (1994) – de que, até certo ponto, mais água significa mais resistência no concreto; fato explicado pelo melhor adensamento e acomodação dos materiais no processo de vibroprensagem. O excesso de água, além de enfraquecer a resistência da pasta, proporciona uma maior dificuldade de alimentação dos moldes da máquina; gerando assim, peças com menor resistência.

### 6.2.1.3 Curva de Consumo

As formulações dos traços e os quantitativos de materiais para a moldagem de 6 pavers por traço para o desenvolvimento da curva de consumo seguem nas Tabelas 24 e 25, respectivamente.

Tabela 24 – Traços analisados na curva de consumo.

Traço	Cimento	Areia média	Areia muito grossa	Pedrisco	Água-materiais secos
Traço 1:7	1	3,21	2,47	1,32	0,08
Traço 1:6	1	2,75	2,11	1,13	0,08
Traço 1:5	1	2,29	1,76	0,95	0,08
Traço 1:4	1	1,83	1,41	0,76	0,08
Traço 1:3	1	1,38	1,06	0,57	0,08
Traço 1:2	1	0,92	0,70	0,38	0,08

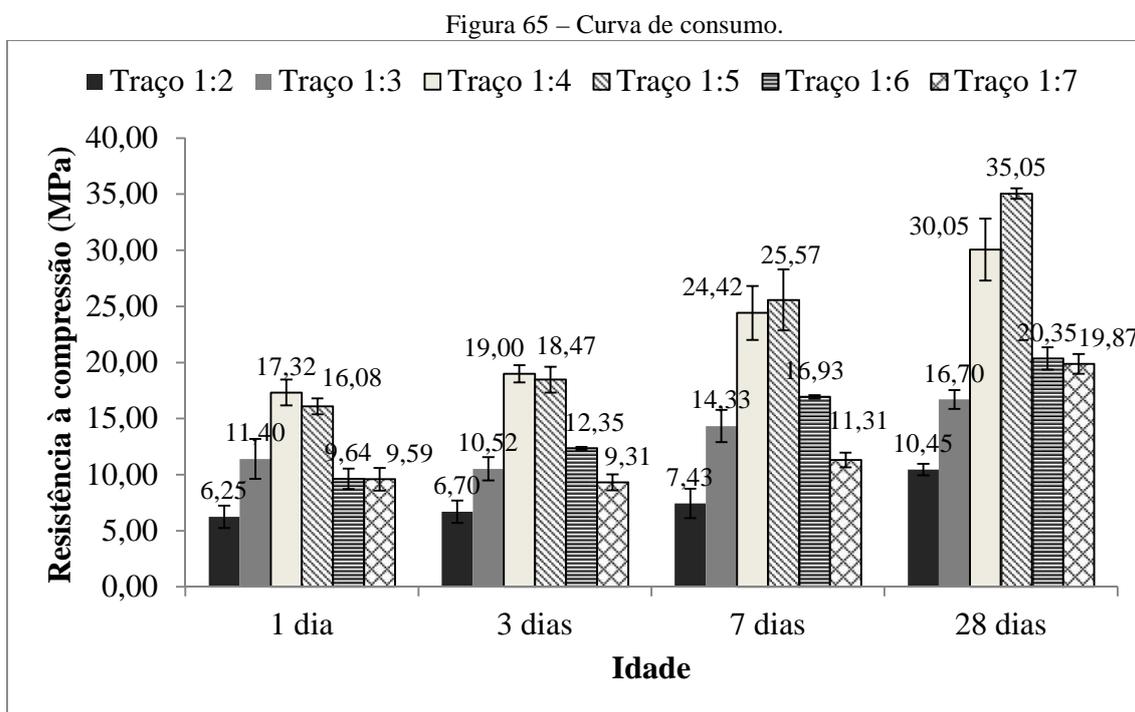
Fonte: Da Autora (2015).

Tabela 25 – Quantitativos de materiais dos traços da curva de consumo.

Traço	Cimento (kg)	Areia média (kg)	Areia muito grossa (kg)	Pedrisco (kg)	Água total (L)
Traço 1:7	2,19	7,03	5,40	2,90	1,40
Traço 1:6	2,50	6,89	5,29	2,84	1,40
Traço 1:5	2,92	6,69	5,14	2,76	1,40
Traço 1:4	3,50	6,43	4,94	2,65	1,40
Traço 1:3	4,38	6,03	4,63	2,48	1,40
Traço 1:2	5,84	5,36	4,11	2,21	1,40

Fonte: Da Autora (2015).

A curva de consumo segue na Figura 65.



Fonte: Da Autora (2015).

Nota-se pela Figura 65 que houve um ganho satisfatório de resistência dos traços ao longo das idades. Os traços que apresentaram melhores resistências foram os de 1:4 e 1:5, sendo que, este último, atingiu o valor mínimo normatizado de 35 MPa aos 28 dias.

Os traços 1:2 e 1:3, apesar de serem mais ricos (com um maior consumo de cimento), apresentaram menores resistências. Tal fato pode ser explicado pela saturação da pasta de cimento, como explica Fernandes (2013):

a pasta de cimento sempre será mais fraca do que o agregado, pois a rocha, por pior que seja, dificilmente será mais fraca do que a pasta. Logo, quando o plano de ruptura (fissura) procura uma trajetória na peça e encontra mais pasta do que rocha, invariavelmente a resistência do conjunto será menor. (FERNANDES, 2013, p. 93).

Assim, o traço em massa escolhido como padrão, dosado a partir da metodologia da ABCP apresentada por Fernandes (2013), é o 1:5 (cimento: agregados) ou ainda 1:2,29:1,76:0,95 (cimento: areia média: areia muito grossa: pedrisco) com relação água-materiais secos de 0,08 ou 0,48 de relação água-cimento ( $a/c$ ).

#### 6.2.1.4 Considerações sobre o Traço Encontrado

O traço em massa padrão encontrado apresenta um consumo de cimento de 348,35 kg/m<sup>3</sup> de concreto de acordo com a Equação 2.

Em busca de parâmetros comparativos, buscou-se analisar também o traço da fábrica de pré-moldados parceira, em termos de consumo e de resistência à compressão. Com os dados do traço em massa, cedidos gentilmente pela fábrica, pôde-se calcular o seu consumo de cimento, que foi de 439,40 kg/m<sup>3</sup>, 26,14% a mais do que o traço padrão dosado.

Coletou-se uma amostra de paver da fábrica aos 7 dias de idade para fazer um teste de resistência à compressão do mesmo; obteve-se um valor de 7,28 MPa. Justifica-se o rompimento do paver da fábrica nessa idade por dois fatores:

- o cimento utilizado em sua produção é do tipo CP V ARI, devendo *a priori* apresentar altos valores de resistência nas idades iniciais;
- a fábrica, por ter uma alta demanda, já libera os pavers para venda e aplicação após 7 dias de cura.

Comparando a resistência do paver da fábrica (7,28 MPa) com a resistência do paver padrão – paver obtido em laboratório e moldado com o traço padrão encontrado – (25,57 MPa), percebe-se um ganho substancial de 251%, afirmando a eficiência da metodologia de dosagem aplicada. Esta certamente contribuiu para a produção de pavers mais resistentes com menor consumo de cimento.

Na averiguação dessa diferença de valores de resistência, é importante considerar também que, além do traço do concreto supostamente não ser o otimizado para as características inerentes aos materiais e maquinários utilizados, o processo de cura do concreto, na fábrica, é diferente do aplicado nesta pesquisa. Além disso, no processo fabril, a medição dos materiais na produção dos traços é feita em massa, entretanto sem a correção de umidade dos mesmos. O teor de umidade na mistura é quantificado através do “ponto de pelota”. Todos esses fatores, individual e combinadamente, contribuem para a queda de resistência das peças.

Outro ponto importante a se ressaltar é que, na confecção das peças, as indústrias geralmente utilizam aditivo superplastificante com o objetivo de dar mais plasticidade ao sistema, facilitando o adensamento dos materiais nos moldes da vibroprensa e otimizando a quantidade de água do sistema. Tal fato favorece a economia de cimento, visto que, com os processos de mistura e adensamento otimizados, possivelmente, o produto final pode atingir uma determinada resistência com uma quantidade menor de cimento no traço. Na dosagem

realizada nenhum aditivo foi utilizado. O uso de um aditivo desta natureza seria uma opção para a produção dos pavers desta pesquisa; entretanto, optou-se por não o utilizar a fim de não inserir mais uma variável ao processo, e o seu uso poderia mascarar a influência das adições, interferindo nas análises dos sistemas.

Pode-se afirmar que o traço padrão desenvolvido é eficiente em termos de ganho de resistência, econômico em termos de redução da quantidade de cimento utilizada (relativamente ao traço da fábrica parceira; mesmo sem o uso de aditivos), bem como mais sustentável pelo mesmo motivo.

Outros valores de consumo de cimento foram encontrados na literatura. Fioriti (2007) utilizou para dosagens de pavers valores de 290 kg/m<sup>3</sup> e de 347 kg/m<sup>3</sup>; este mesmo autor ainda apontou valores de consumo de cimento utilizados em quatro fábricas no estado de São Paulo: 280 kg/m<sup>3</sup>, 300 kg/m<sup>3</sup>, 300 kg/m<sup>3</sup>, 340 kg/m<sup>3</sup>. Senço (1997) apud Fioriti (2007) relatou em seu trabalho um consumo médio de 320 kg/m<sup>3</sup>. Rodrigues (1995) apud Fioriti (2007) indicou valores de consumo que variam de 210 kg/m<sup>3</sup> a 425 kg/m<sup>3</sup>. Já Cruz (2003) adotou um consumo mínimo de 268 kg/m<sup>3</sup>. Deste modo, o consumo de cimento Portland encontrado no traço dosado (348,35 kg/m<sup>3</sup>) está coerente com os estudos levantados.

### 6.2.2 *Formulações e Correção do Consumo de Cimento*

O teor de adição do pigmento de óxido de ferro que foi aplicado na confecção das peças coloridas foi reduzido pela metade, passando de 4% para 2% em relação à massa de cimento; tendo como justificativa para tal decisão os resultados dos testes preliminares descritos na seção 6.1.

A fim de avaliar a influência do pigmento de forma isolada nas propriedades mecânicas do paver, foram moldadas misturas com adições de 2% e 4% do mesmo. O traço com 4% de pigmento é o traço padrão colorido, visto que é, em relação a ele, que se deseja obter melhorias de propriedades. A fim de avaliar a influência da incorporação do RCV – via substituição parcial e total da areia média – concomitante com 2% de pigmento nas propriedades mecânicas e na matiz colorimétrica do paver, optou-se pelos teores de 50%, 75% e 100%. A escolha desses teores é justificada pelo fato de que, como verificado nos testes preliminares, só a partir de altos de teores de substituição é que o compósito cimentício apresenta cor diferenciada. A fim de avaliar a influência da incorporação do RCV – via adição em relação à massa de cimento – concomitante com 2% de pigmento nas propriedades citadas, optou-se pelos teores de 20%, 30%, 40%, 50%, 100% e 150%. E, por fim, para de

avaliar a influência da incorporação do RCV – via adição em relação à massa de cimento – de forma isolada, optou-se pelos teores de 20%, 30%, 40% e 50%. Na Tabela 26 seguem as formulações e nomenclatura dos traços.

Tabela 26 – Formulações e nomenclatura dos traços.

Nomenclatura dos traços	Formulação/Especificação
1:5	Traço padrão/padrão cinza
1:5 2%PIG	Traço adicionado com 2% de pigmento
1:5 4%PIG	Traço adicionado com 4% de pigmento (padrão colorido)
1:5 2%PIG50%RCVS	Traço adicionado com 2% de pigmento e com substituição parcial de 50% da areia média por RCV
1:5 2%PIG75%RCVS	Traço adicionado com 2% de pigmento e com substituição parcial de 75% da areia média por RCV
1:5 2%PIG100%RCVS	Traço adicionado com 2% de pigmento e com substituição de 100% da areia média por RCV
1:5 2%PIG20%RCVA	Traço adicionado com 2% de pigmento e 20% de RCV
1:5 2%PIG30%RCVA	Traço adicionado com 2% de pigmento e 30% de RCV
1:5 2%PIG40%RCVA	Traço adicionado com 2% de pigmento e 40% de RCV
1:5 2%PIG50%RCVA	Traço adicionado com 2% de pigmento e 50% de RCV
1:5 2%PIG100%RCVA	Traço adicionado com 2% de pigmento e 100% de RCV
1:5 2%PIG150%RCVA	Traço adicionado com 2% de pigmento e 150% de RCV
1:5 20%RCVA	Traço adicionado com 20% de RCV
1:5 30%RCVA	Traço adicionado com 30% de RCV
1:5 40%RCVA	Traço adicionado com 40% de RCV
1:5 50%RCVA	Traço adicionado com 50% de RCV

Fonte: Da Autora (2015).

Seguem na Tabela 27 os traços das formulações, bem como seus consumos de cimento. O valor de 0,08 da relação água-materiais secos foi mantido constante em todos os traços a fim de se manter aproximadamente a mesma trabalhabilidade e coesão nas misturas.

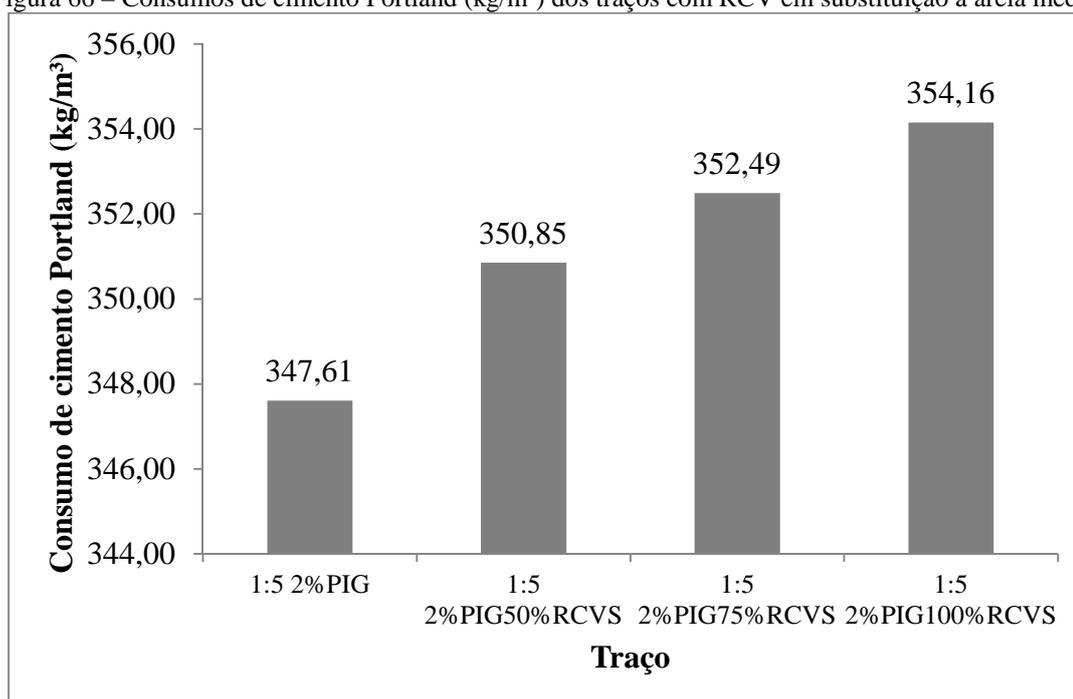
Tabela 27 – Traços desenvolvidos (cimento:areia média:areia muito grossa:pedrisco:rcv:pig).

Traços	Cimento	Areia média	Areia muito grossa	Pedrisco	RCV	Pigmento	a/c	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )
1:5	1,00	2,29	1,76	0,95	0,00	0,00	0,48	348,35
1:5 2%PIG	1,00	2,29	1,76	0,95	0,00	0,02	0,48	347,61
1:5 4%PIG	1,00	2,29	1,76	0,95	0,00	0,04	0,48	346,86
1:5 2%PIG50%RCVS	1,00	1,15	1,76	0,95	1,15	0,02	0,48	350,85
1:5 2%PIG75%RCVS	1,00	0,57	1,76	0,95	1,72	0,02	0,48	352,49
1:5 2%PIG100%RCVS	1,00	0,00	1,76	0,95	2,29	0,02	0,48	354,16
1:5 2%PIG20%RCVA	1,00	2,29	1,76	0,95	0,20	0,02	0,50	336,49
1:5 2%PIG30%RCVA	1,00	2,29	1,76	0,95	0,30	0,02	0,51	331,20
1:5 2%PIG40%RCVA	1,00	2,29	1,76	0,95	0,40	0,02	0,51	326,06
1:5 2%PIG50%RCVA	1,00	2,29	1,76	0,95	0,50	0,02	0,52	321,07
1:5 2%PIG100%RCVA	1,00	2,29	1,76	0,95	1,00	0,02	0,56	298,31
1:5 2%PIG150%RCVA	1,00	2,29	1,76	0,95	1,50	0,02	0,60	278,55
1:5 20%RCVA	1,00	2,29	1,76	0,95	0,20	0,00	0,50	337,19
1:5 30%RCVA	1,00	2,29	1,76	0,95	0,30	0,00	0,50	331,87
1:5 40%RCVA	1,00	2,29	1,76	0,95	0,40	0,00	0,51	326,71
1:5 50%RCVA	1,00	2,29	1,76	0,95	0,50	0,00	0,52	321,71

Fonte: Da Autora (2015).

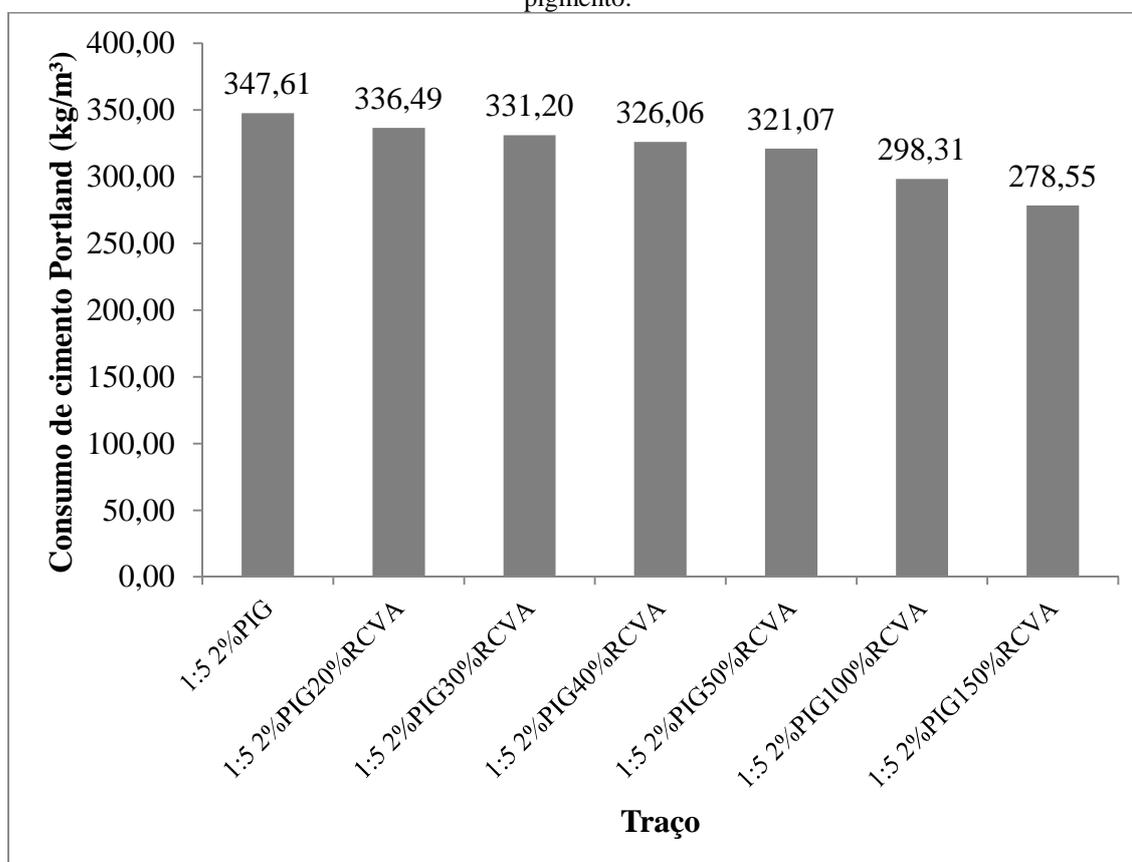
Pode-se observar através da análise da última coluna da Tabela 27 e da Figura 66 que as substituições da areia média por RCV geraram traços de maiores consumos de cimento; quanto maior o teor de substituição, maior o consumo de cimento. Inversamente, as adições de RCV (com e sem pigmento) geraram traços de menores consumos de cimento; quanto maior o teor de adição, menor o consumo de cimento – como pode ser observado na também na última coluna da Tabela 27 e nas Figuras 67 e 68

Figura 66 – Consumos de cimento Portland ( $\text{kg/m}^3$ ) dos traços com RCV em substituição à areia média.



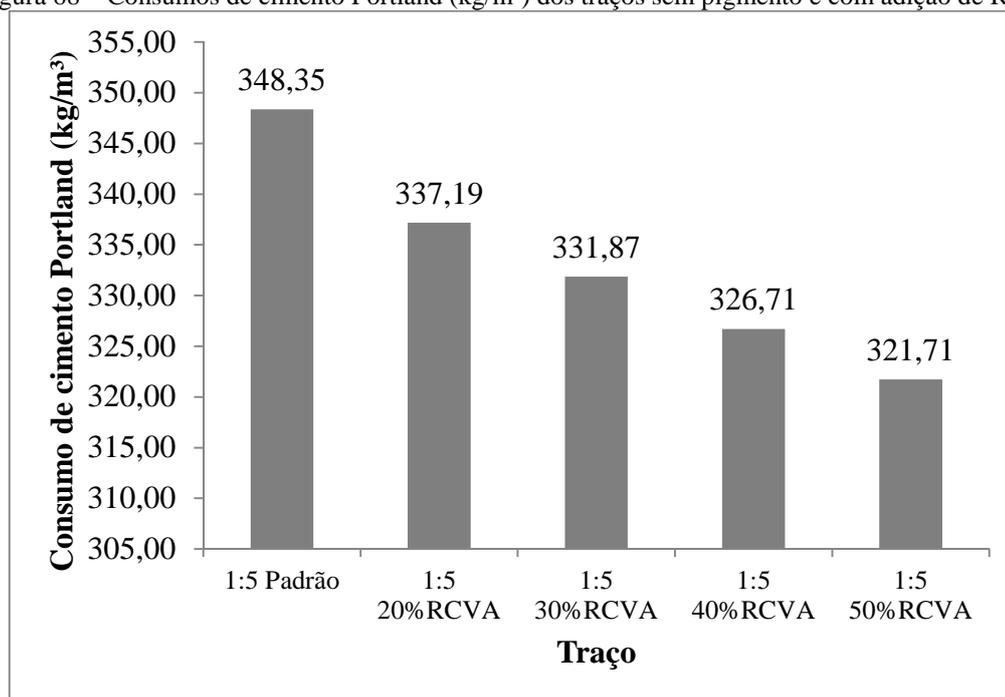
Fonte: Da Autora (2015).

Figura 67 – Consumos de cimento Portland ( $\text{kg/m}^3$ ) dos traços com RCV em adição concomitante com pigmento.



Fonte: Da Autora (2015).

Figura 68 – Consumos de cimento Portland (kg/m<sup>3</sup>) dos traços sem pigmento e com adição de RCV.



Fonte: Da Autora (2015).

O comportamento de queda dos valores do consumo de cimento dos traços com adição de RCV era esperado; visto que, ao passo que as adições são feitas nas misturas, a quantidade de cimento Portland permanece fixa. Assim, produz-se uma mistura com mais carga e menos cimento.

Entretanto, *a priori*, o comportamento da variação do consumo dos traços com substituição da areia média por RCV pode parecer estranho; visto que, na mistura, a substituição é feita em massa diretamente, sem aumento da sua quantidade de cimento. Entretanto, a partir de uma análise mais aprofundada, através de uma modelagem matemática, pode-se justificar este fato. Para tal, buscou-se desenvolver a equação que descreve o comportamento do consumo de cimento Portland em função do teor de substituição (TS) da areia pelo RCV.

A Equação 3 representa o consumo de cimento Portland dos traços com substituição.

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{c} + \frac{a_m}{a_m} + \frac{a_g}{a_g} + \frac{p}{p} + \frac{rcv}{rcv} + \frac{pig}{pig} + x} \times 0,95 \quad (3)$$

Em que:

- $rcv$  é a proporção de RCV no traço;
- $pig$  é a proporção de pigmento no traço.
- $rcv$  é a massa específica do RCV em unidades de  $(g/cm^3)$ ;
- $pig$  é a massa específica do pigmento em unidades de  $(g/cm^3)$ ;
- a identificação dos demais parâmetros já foi feita na Equação 2.

Tais proporções podem ser retiradas da Tabela 27. Na substituição, a proporção de areia média ( $a_m$ ) varia em função do TS, segundo a Equação 4, como pode ser constatado também na Tabela 27.

$$a_m = a_{m0} - TS \times a_{m0} \quad (4)$$

Em que,

- $a_{m0}$  é a proporção de areia média no traço padrão.

Além disso, a proporção de RCV ( $rcv$ ) também varia em função do TS, segundo a Equação 5, como também pode ser constatado na Tabela 27.

$$rcv = TS \times a_{m0} \quad (5)$$

Assim, substituindo as Equações 4 e 5 na Equação 3, tem-se a Equação 6, que representa o consumo de cimento Portland no traço em função do teor de substituição da areia média pelo RCV, ou seja, em função do TS.

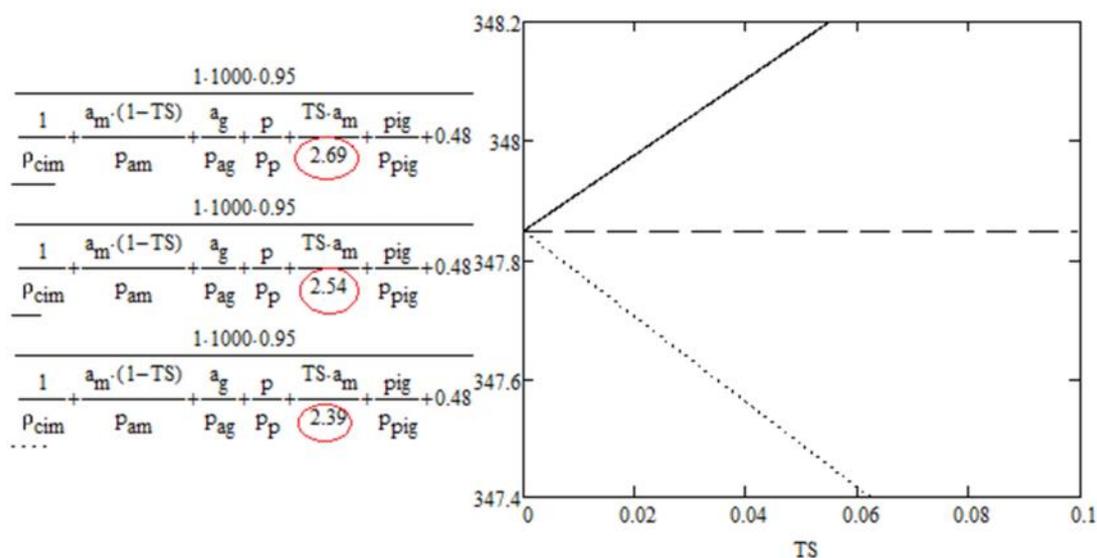
$$C = \frac{1000}{\frac{1}{c} + \frac{a_{m0} - TS \times a_{m0}}{a_m} + \frac{ag}{ag} + \frac{p}{p} + \frac{TS \times a_{m0}}{rcv} + \frac{pig}{pig} + X} \times 0,95 \quad (6)$$

A variável da Equação 6 é o TS, sendo os outros parâmetros constantes.

Vislumbrou-se que existe uma ligação entre a massa específica da areia média e a massa específica do RCV que irá influenciar no comportamento do consumo de cimento do sistema. Sugeriu-se então simular valores diferentes para o parâmetro da massa específica do

RCV a fim de ponderar sua influência dentro do sistema. Foram arbitrados três valores: um valor igual à massa específica da areia média, um valor menor do que a massa específica da areia média e outro maior, aplicando-os na Equação 6. Em seguida, foram plotadas as curvas de comportamento da variação do consumo de cimento nestas três diferentes condições, como podem ser vistas na Figura 69.

Figura 69 – Curvas de comportamento da variação do consumo do cimento Portland em função do TS e de três diferentes valores de massa específica do RCV.



Fonte: Da Autora (2015).

A curva contínua (e a mais acima) representa o consumo de cimento em função do TS na situação em que a massa unitária do RCV foi apresentada como maior do que a massa unitária da areia média, com o valor de 2,69 g/m<sup>3</sup> (que de fato o é). A tracejada (e central) representa o consumo de cimento em função do TS na situação em que a massa unitária do RCV foi apresentada como igual à massa unitária da areia média, com o valor de 2,54 g/m<sup>3</sup>. E a curva pontilhada (e a mais abaixo) representa o consumo de cimento em função do TS na situação em que a massa unitária do RCV foi arbitrada como menor do que a massa unitária da areia média, com o valor de 2,39 g/m<sup>3</sup>.

Analisando a Figura 69, percebe-se que, para valores arbitrados de massa unitária do RCV maiores do que a massa unitária da areia média, o consumo de cimento é uma função crescente; já para valores de massa unitária do RCV arbitrados menores do que a massa unitária da areia média, o consumo de cimento é uma função decrescente. Assim, matematicamente justifica-se o fato de que, nas formulações dos traços com substituições da

areia média pelo RCV, o consumo de cimento Portland aumenta devido ao fato de que a massa unitária do RCV é maior do que a da areia média.

Perante a queda do consumo de cimento nos traços com adição de RCV, decidiu-se corrigir os seus valores em relação ao consumo do traço padrão, desenvolvendo as formulações e os traços que seguem nas Tabelas 28 e 29, respectivamente. Para as correções, apenas se aumentou a quantidade de cimento nas misturas, mantendo-se os outros parâmetros constantes: proporção entre os agregados e relação água-materiais secos. Os teores de adição do RCV continuaram em relação à massa de cimento do traço padrão. Já o teor de adição do pigmento foi aplicado em relação à nova massa de cimento em cada traço.

Nos traços com substituição de RCV pela areia média, os consumos de cimento não foram corrigidos, visto que houve aumento dos seus valores e queda da resistência à compressão de seus pavers, como poderá ser visto na seção 6.2.3.1.2. Assim, perante a queda de resistência, corrigir os valores do consumo de cimento em relação ao consumo do traço padrão seria diminuir a quantidade de cimento na mistura, o que acarretaria em maiores quedas da propriedade citada.

Uma característica das peças a se esperar com a incorporação do RCV ao sistema é a melhoria de seus acabamentos, pois estão sendo inseridos finos às misturas. Além disso, como já elucidado anteriormente, espera-se também, de uma maneira geral, melhorias de propriedades por efeito *filler*.

Tabela 28 – Formulações e nomenclatura dos traços com consumo de cimento corrigido.

Nomenclatura dos traços	Formulação
1:5 2%PIG20%RCVA-CC	Traço adicionado com 2% de pigmento e 20% de RCV com consumo de cimento corrigido
1:5 2%PIG30%RCVA-CC	Traço adicionado com 2% de pigmento e 30% de RCV com consumo de cimento corrigido
1:5 2%PIG40%RCVA-CC	Traço adicionado com 2% de pigmento e 40% de RCV com consumo de cimento corrigido
1:5 2%PIG50%RCVA-CC	Traço adicionado com 2% de pigmento e 50% de RCV com consumo de cimento corrigido
1:5 2%PIG100%RCVA-CC	Traço adicionado com 2% de pigmento e 100% de RCV com consumo de cimento corrigido
1:5 2%PIG150%RCVA-CC	Traço adicionado com 2% de pigmento e 150% de RCV com consumo de cimento corrigido
1:5 20%RCVA-CC	Traço adicionado com 20% de RCV com consumo de cimento corrigido
1:5 30%RCVA-CC	Traço adicionado com 30% de RCV com consumo de cimento corrigido
1:5 40%RCVA-CC	Traço adicionado com 40% de RCV com consumo de cimento corrigido
1:5 50%RCVA-CC	Traço adicionado com 50% de RCV com consumo de cimento corrigido

Fonte: Da Autora (2015).

Tabela 29 – Traços desenvolvidos com consumo de cimento corrigido.

Traços	Cimento	Areia média	Areia muito grossa	Pedrisco	RCV	Pigmento	a/c	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )
1:5	1,00	2,29	1,76	0,95	0,00	0,00	0,48	348,35
1:5 2%PIG20%RCVA-CC	1,00	2,20	1,69	0,91	0,19	0,02	0,48	348,35
1:5 2%PIG30%RCVA-CC	1,00	2,16	1,66	0,89	0,28	0,02	0,48	348,33
1:5 2%PIG40%RCVA-CC	1,00	2,12	1,63	0,88	0,37	0,02	0,48	348,36
1:5 2%PIG50%RCVA-CC	1,00	2,09	1,60	0,86	0,45	0,02	0,48	348,35
1:5 2%PIG100%RCVA-CC	1,00	1,92	1,47	0,79	0,84	0,02	0,48	348,35
1:5 2%PIG150%RCVA-CC	1,00	1,78	1,37	0,74	1,17	0,02	0,49	346,35
1:5 20%RCVA-CC	1,00	2,21	1,70	0,91	0,19	0,00	0,48	348,35
1:5 30%RCVA-CC	1,00	2,17	1,66	0,89	0,28	0,00	0,48	348,36
1:5 40%RCVA-CC	1,00	2,13	1,63	0,88	0,37	0,00	0,48	348,35
1:5 50%RCVA-CC	1,00	2,09	1,61	0,86	0,46	0,00	0,48	348,34

Fonte: Da Autora (2015).

### 6.2.3 Testes de Propriedades dos Pavers

#### 6.2.3.1 Resistência à Compressão

Nas tabelas e figuras a seguir estão expostos os resultados dos testes de resistência à compressão dos pavers, em que “fp” é a resistência média dos blocos e “s” o desvio-padrão amostral.

##### 6.2.3.1.1 Resistência à Compressão dos Pavers Padrão Cinza, Padrão Colorido e 1:5 2%PIG

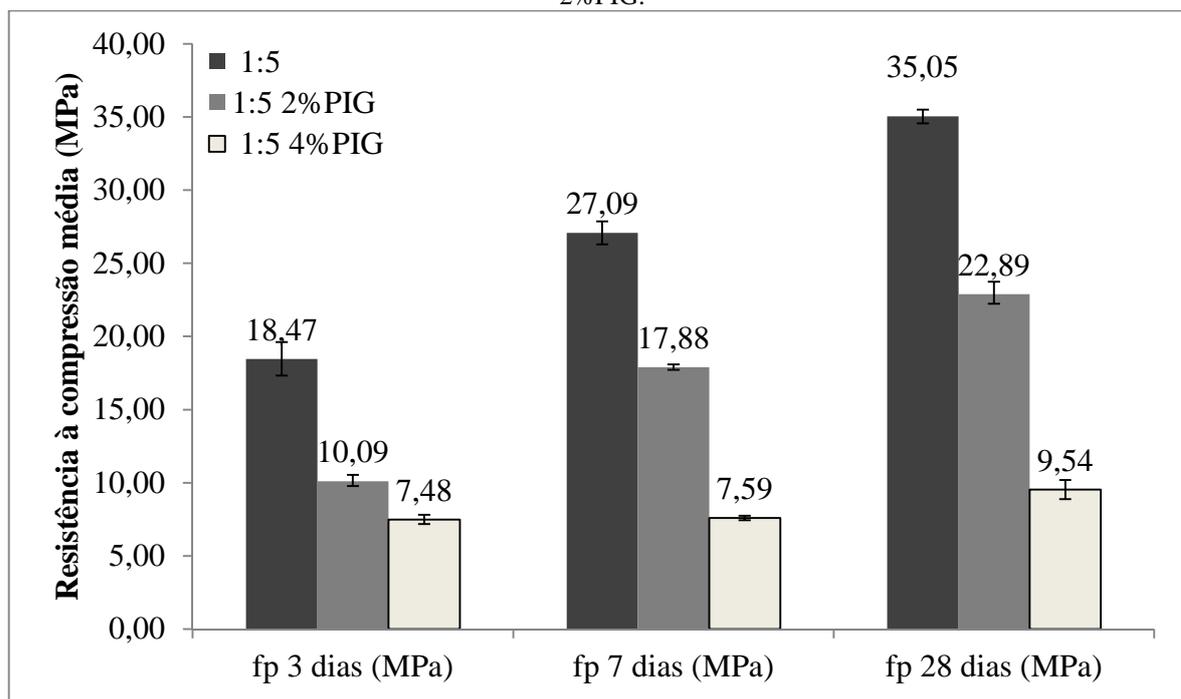
Os resultados dos testes de resistência à compressão dos pavers padrão cinza, padrão colorido e do traço 1:5 2%PIG nas idades de 3, 7 e 28 dias podem ser vistos na Tabela 30 e na Figura 70.

Tabela 30 – Resistência à compressão (MPa) e desvio-padrão amostral aos 3, 7 e 28 dias dos pavers padrões e do paver de traço 1:5 2%PIG.

	3 dias		7 dias		28 dias	
	fp (MPa)	s (MPa)	fp (MPa)	s (MPa)	fp (MPa)	s (MPa)
1:5	18,47	1,14	27,09	0,78	35,05	0,47
1:5 2%PIG	10,09	0,45	17,88	0,20	22,89	0,85
1:5 4%PIG	7,48	0,32	7,59	0,15	9,54	0,65

Fonte: Da Autora (2015).

Figura 70 – Resistência à compressão (MPa) aos 3, 7 e 28 dias dos pavers padrões e do paver de traço 1:5 2%PIG.

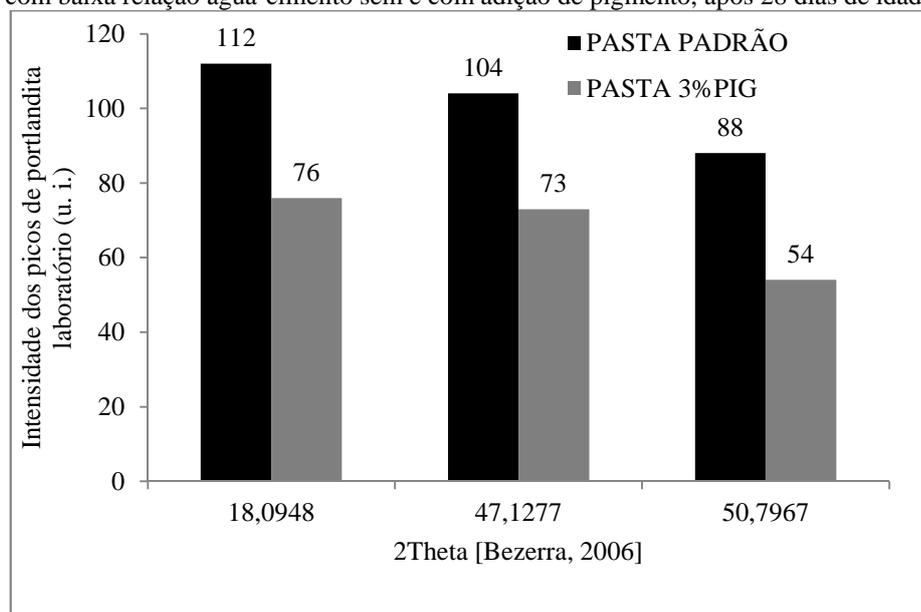


Fonte: Da Autora (2015).

Pela análise da Figura 70, pode-se perceber uma queda dos valores de resistência à compressão quando o pigmento é adicionado ao sistema; quanto maior o teor de pigmento, menor é a resistência dos pavers. Aos 28 dias de idade, houve uma redução de 34,7% na resistência à compressão do traço padrão cinza quando da adição de 2% de pigmento; e uma redução de 72,8% quando da adição de 4%, corroborando o depoimento da indústria de pré-moldados da região. Além disso, nota-se também que a adição de pigmento no teor de 4% retardou o ganho de resistência dos compósitos ao longo das idades. Por exemplo, dos 3 dias aos 28 dias de idade, o paver padrão cinza teve um ganho de resistência de 89,77%, saindo de 18,47 MPa para 35,05 MPa. Já o paver com adição de 4% de pigmento teve um ganho de resistência menor, de 27,54%, saindo de 7,48 MPa para 9,54MPa.

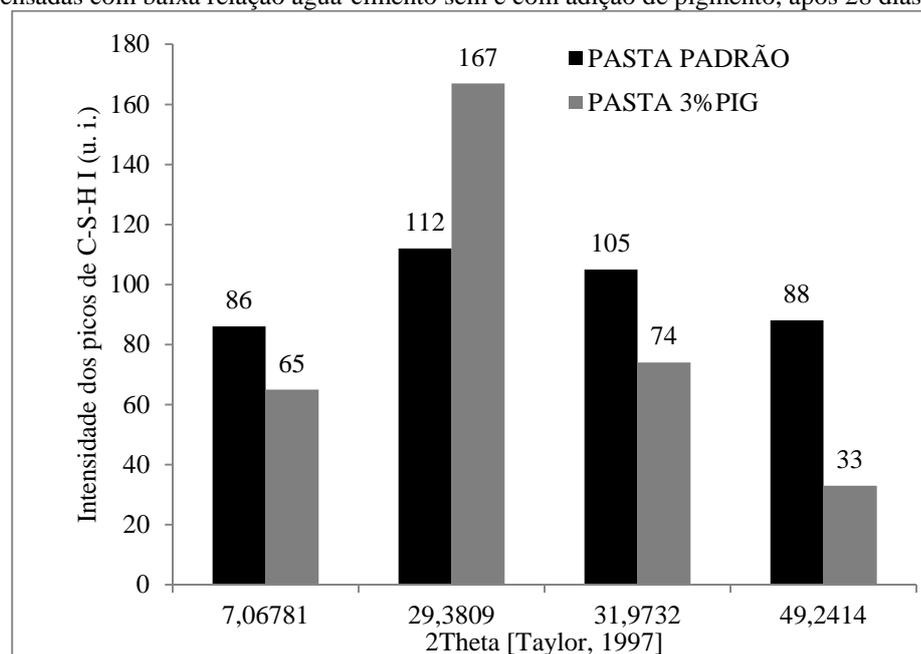
As Figuras 71, 72, 73 e 74 compilam as intensidades características dos picos de DRX após 28 dias, respectivamente, para a portlandita, o C-S-H I, o C-S-H sintetizado em laboratório e o C-S-H II em pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento sem e com adição de pigmento. Verifica-se que, em geral, houve redução da intensidade desses picos nas pastas com adição de pigmento, ou seja, houve um déficit na geração desses produtos; justificando, assim, que a perda de resistência dos pavers está associada, em parte, ao fato das reações de hidratação do sistema terem sido prejudicadas.

Figura 71 – Intensidade dos picos característicos da portlandita por DRX em pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento sem e com adição de pigmento, após 28 dias de idade.



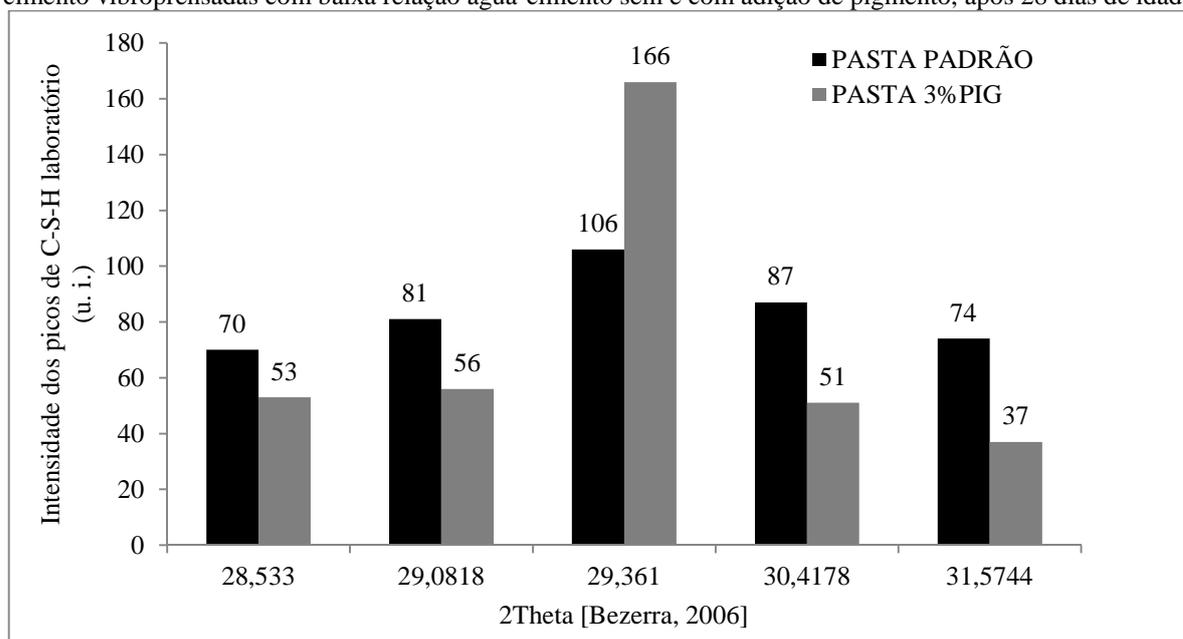
Fonte: Da Autora (2015).

Figura 72 – Intensidade dos picos característicos C-S-H I por DRX (Taylor, 1997) em pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento sem e com adição de pigmento, após 28 dias de idade.



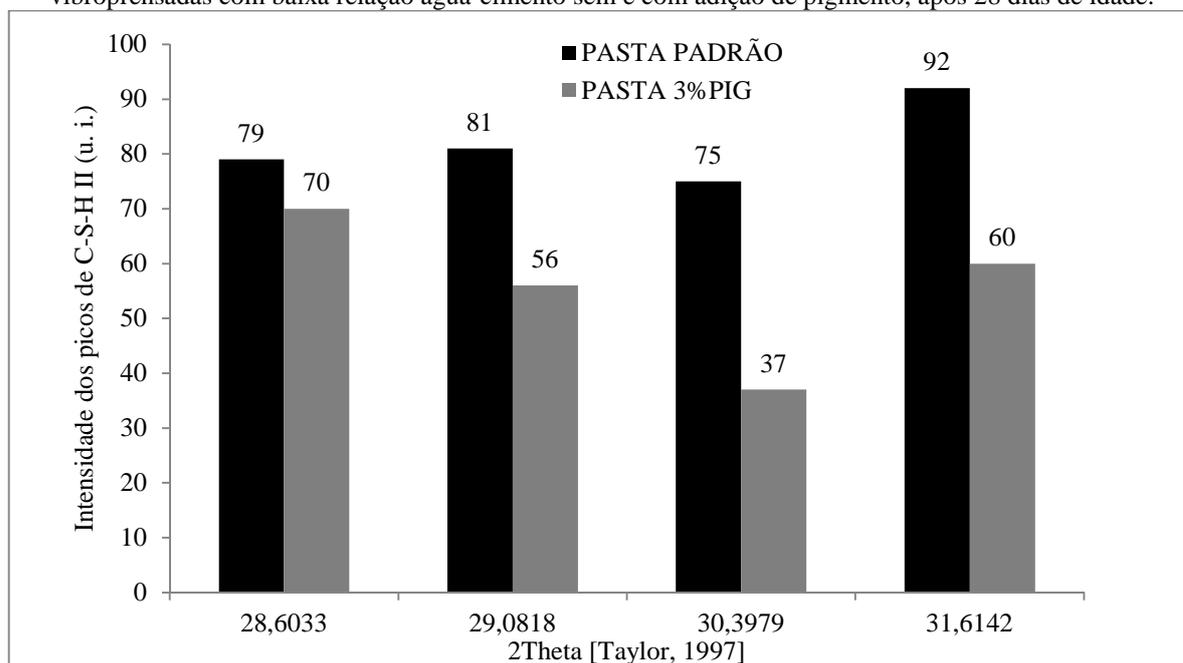
Fonte: Da Autora (2015).

Figura 73 – Intensidade dos picos característicos C-S-H de laboratório por DRX (Bezerra, 2006) em pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento sem e com adição de pigmento, após 28 dias de idade.



Fonte: Da Autora (2015).

Figura 74 – Intensidade dos picos característicos C-S-H II por DRX (Taylor, 1997) em pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento sem e com adição de pigmento, após 28 dias de idade.

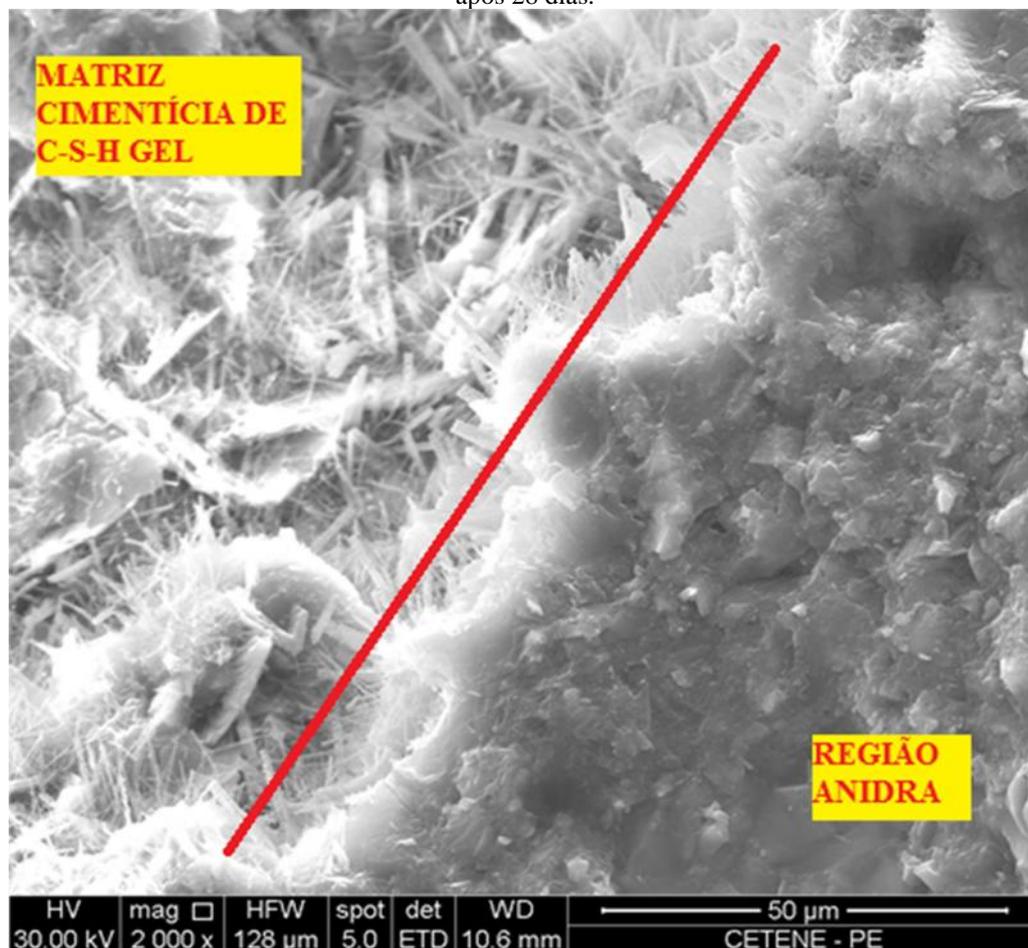


Fonte: Da Autora (2015).

Observou-se que, mesmo na pasta padrão, após os 28 dias, há presença de materiais anidros, caracterizando o processo de conformação dos sistemas vibroprensados com baixa relação água-cimento. Na Figura 75, podem ser vistas duas regiões distintas; uma mais fibrosa, em que houve a reação de hidratação, caracterizando a formação da matriz cimentícia

de C-S-H gel; e outra mais densa sem cristalinidade aparente e com características morfológicas anidras.

Figura 75 – Microscopia (2000x) da pasta de cimento padrão vibroprensada com baixa relação água-cimento após 28 dias.



Fonte: Da Autora (2015).

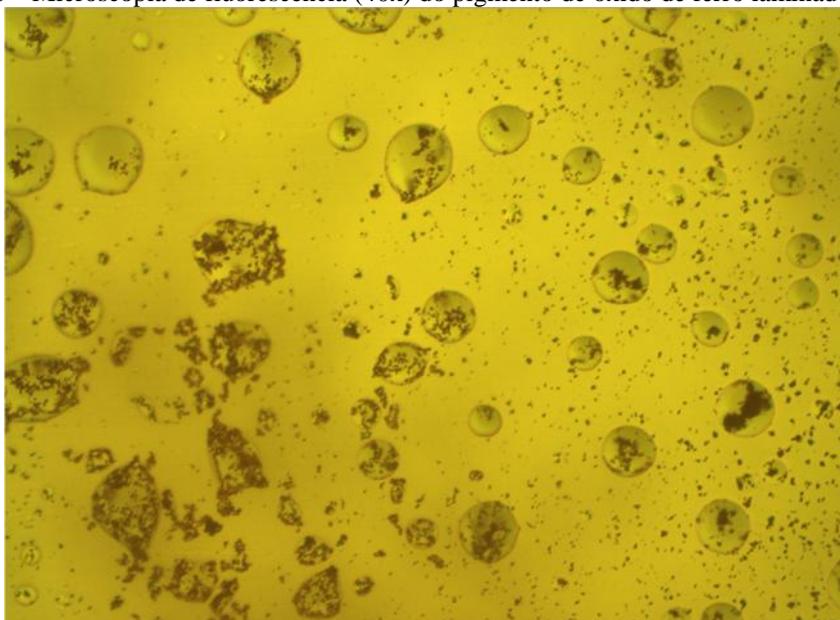
Diante deste fato, a primeira interpretação fenomenológica para a queda na resistência do sistema adicionado com pigmento está associada com a capacidade deste em adsorver parte da água prioritariamente disponibilizada para as reações de hidratação, cujo ótimo teor foi obtido através de dosagem para o traço padrão cinza (sem adições). De fato foi verificada sua alta área superficial obtida por BET (44,54 m<sup>2</sup>/g) e morfologia acicular (Figura 27), que favorecem a adsorção de água. Além disso, a potencialidade de aglomeração das partículas de hematita (óxido férrico – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – que compõe do pigmento) em meio de pH menos alcalino, comprovada pela análise de Potencial Zeta (LIMA & QUIRINO, 2003) também pode ter prejudicado a molhabilidade do sistema, visto que essas aglomerações concentram água em seu entorno e, conseqüentemente, prejudicam reações de hidratação de um modo geral, favorecendo ainda mais a presença de materiais anidros.

Na Figura 76 pode ser vista a microscopia de fluorescência do pigmento, cuja amostra de análise foi preparada em lâmina com água (de pH menos alcalino relativamente a um compósito cimentício), indicando a aglomeração e concentração de suas partículas dentro da água.

A existência de um pH menos alcalino no compósito é devido ao fato de haver uma baixa disponibilidade de água para a solubilização dos íons alcalinos do cimento. Tal fato pode não ter garantido as condições de dissociação iônica durante o processo de mistura dos componentes, desfavorecendo a presença de uma solução iônica básica no sistema.

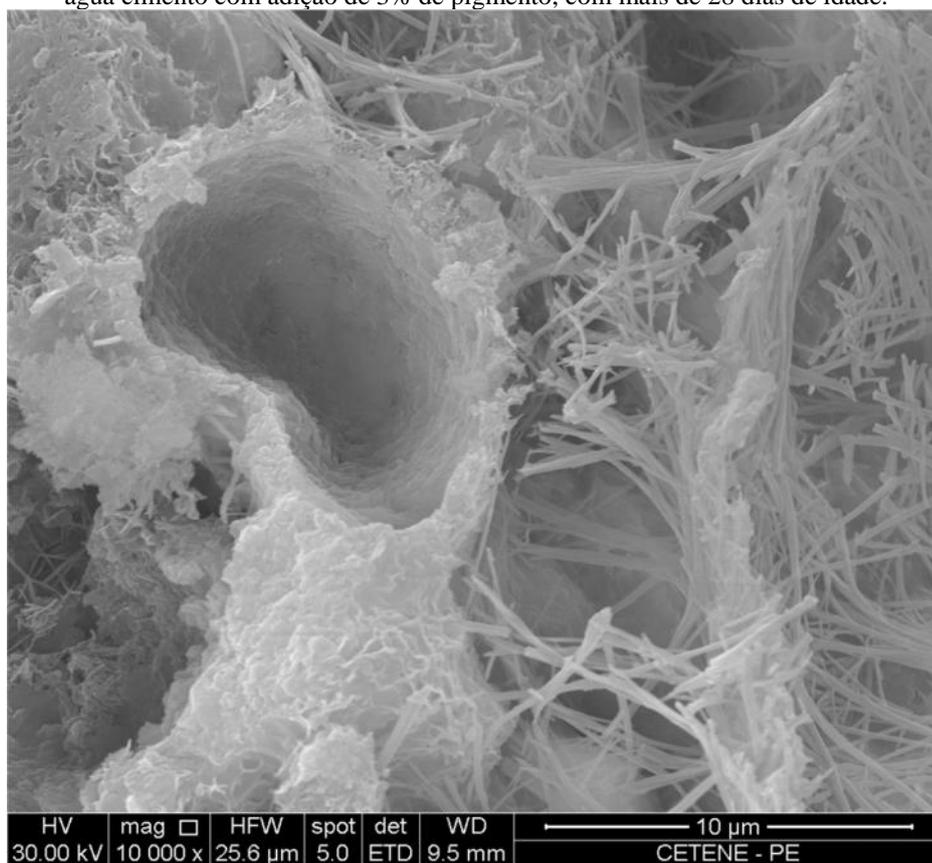
Assim, as partículas de pigmento potencialmente se apresentaram menos dispersas (mais aglomeradas) nos sistemas estudados, concentrando partículas de água em seu entorno, como pode ser visto na microscopia da pasta de cimento vibroprensada de baixa relação água-cimento e com adição de 3% de pigmento (Figura 77). Na Figura 77, pode-se notar um espaço vazio, que possivelmente foi gerado pela concentração de partículas de água, rodeado por C-S-H I e C-S-H II, produtos de reação de hidratação do cimento com essa água concentrada.

Figura 76 – Microscopia de fluorescência (40x) do pigmento de óxido de ferro laminado em água.



Fonte: Da Autora (2015).

Figura 77 – Microscopia eletrônica de varredura (10000x) da pasta de cimento vibroprensada de baixa relação água cimento com adição de 3% de pigmento, com mais de 28 dias de idade.



Fonte: Da Autora (2015).

Acredita-se que, o fato do pigmento ser composto de cristais de óxido férrico agrega uma carga negativa ao mesmo, uma vez que a hematita apresenta características elétricas negativas (LIMA & QUIRINO, 2003). A presença dessa carga negativa, associada à pouca disponibilidade hídrica no sistema de concreto vibroprensado de baixa relação água-cimento, provavelmente influenciou nas condições de mobilidade iônica e molhabilidade das partículas de cimento.

Além disso, nesses sistemas cimentícios, a água confinada intercrystalina pode vir a se comportar como um sólido vítreo, proporcionando adesão entre as superfícies e influenciando na resistência mecânica no sistema (KANNO, 2009). Acredita-se que, o fato do pigmento ser composto de cristais de óxido férrico, com propriedades magnéticas, ajudou a perturbar as ligações de hidrogênio entre as moléculas de água, desestruturando assim as camadas de água confinada, ajudando na queda de resistência dos sistemas. Segundo Kanno (2009), esta afirmação baseia-se na necessidade de certo grau de estruturação das moléculas para que a adesão por tais películas seja forte.

### 6.2.3.1.2 Resistência à Compressão dos Pavers com Substituição Parcial e Total da Areia média pelo Resíduo de Cerâmica Vermelha e Adição de 2% de Pigmento

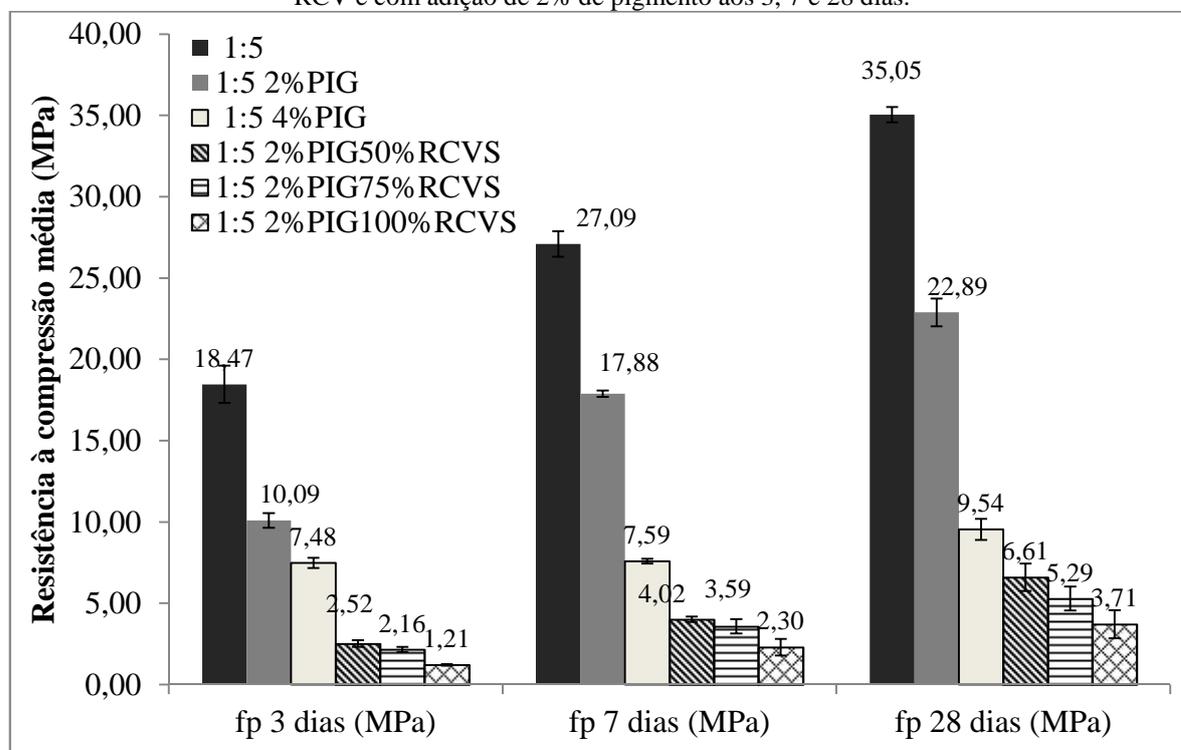
Os resultados dos testes de resistência à compressão dos pavers com substituição parcial e total da areia média pelo RCV e adição de 2% de pigmento comparativamente aos pavers padrões nas idades de 3, 7 e 28 dias podem ser vistos na Tabela 31 e na Figura 78.

Tabela 31 – Resistência à Compressão (MPa) dos pavers com substituição parcial e total da areia média pelo RCV e com adição de 2% de pigmento aos 3, 7 e 28 dias.

	3 dias		7 dias		28 dias	
	fp (MPa)	s (MPa)	fp (MPa)	s (MPa)	fp (MPa)	s (MPa)
1:5	18,47	1,14	27,09	0,78	35,05	0,47
1:5 2% PIG	10,09	0,45	17,88	0,20	22,89	0,85
1:5 4% PIG	7,48	0,32	7,59	0,15	9,54	0,65
1:5 2% PIG 50% RCVS	2,52	0,21	4,02	0,17	6,61	0,84
1:5 2% PIG 75% RCVS	2,16	0,16	3,59	0,45	5,29	0,74
1:5 2% PIG 100% RCVS	1,21	0,05	2,30	0,50	3,71	0,86

Fonte: Da Autora (2015).

Figura 78 – Resistência à Compressão (MPa) dos pavers com substituição parcial e total da areia média pelo RCV e com adição de 2% de pigmento aos 3, 7 e 28 dias.



Fonte: Da Autora (2015).

Pela análise da Figura 78 pode-se perceber uma significativa queda dos valores de resistência à compressão quando a areia média é substituída pelo RCV em qualquer teor; quanto

maior o teor de substituição, menor é a resistência dos pavers. Aos 28 dias de idade, quando a areia foi substituída 100% (1:5 2%PIG100%RCVS), houve uma redução de 89,42% na resistência à compressão do traço padrão cinza e, para o traço colorido, essa redução foi de 61,11%. Já o comportamento de retardo do ganho de resistência ao longo das idades não se repete nos traços com as formulações de substituição, apesar de esses conterem pigmento (em teor reduzido). A presença do RCV favoreceu os ganhos de resistência. Por exemplo, dos 3 dias aos 28 dias de idade, o paver padrão colorido cinza teve um ganho de resistência de 27,54%, saindo de 7,48 MPa para 9,54MPa. Já o paver 1:5 2%PIG100%RCVS teve um ganho de resistência maior, de aproximadamente 207%, saindo de 1,21MPa para 3,71 MPa. De um modo geral, as substituições não foram positivas, visto que não favoreceram o aumento da resistência à compressão das peças. Assim, descartou-se a continuidade do estudo deste tipo de formulação.

Acredita-se que essa queda de resistência quando da substituição da areia média pelo RCV tenha sido em função da alteração no empacotamento granulométrico dosado inicialmente de acordo com a metodologia proposta por Fernandes (2013). Visto que os teores de substituição foram altos (a partir de 50%), houve significativas alterações tanto no volume dos materiais incorporados quanto na sua granulometria. Comparativamente, o módulo de finura da areia média é o dobro do módulo de finura do RCV, 4,09 *versus* 1,98.

Além disso, os finos em excesso atuam como um inerte, concorrendo com o cimento e diminuindo significativamente a resistência do concreto; quanto mais finos, mais grãos precisam ser envolvidos com pasta de cimento (FERNANDES, 2013). Quando há muitos finos, o seu teor “deixa de ser um benefício para a coesão e passa a ser um problema para a resistência devido à dispersão do cimento e aumento do consumo de água.” (FERNANDES, 2013, p. 96).

#### ***6.2.3.1.3 Resistência à Compressão dos Pavers com Adição de Resíduo de Cerâmica Vermelha***

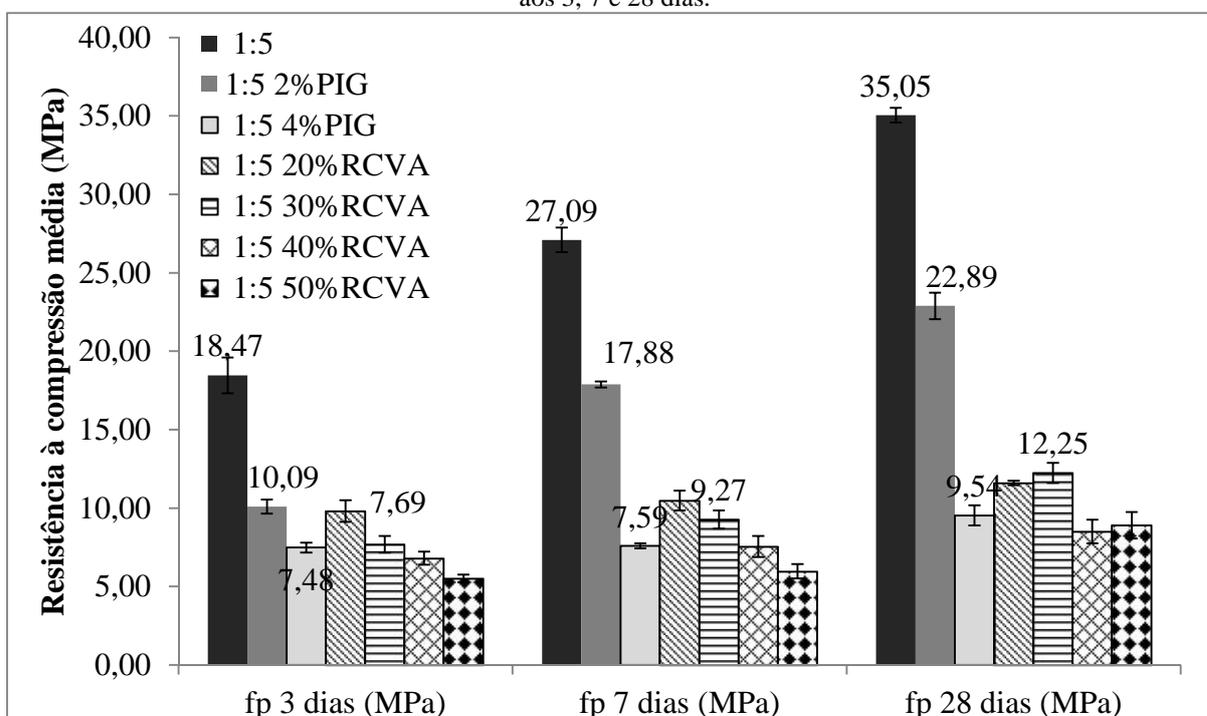
Os resultados dos testes de resistência à compressão dos pavers com adição de RCV de forma isolada comparativamente aos pavers padrões nas idades de 3, 7 e 28 dias podem ser vistos na Tabela 32 e na Figura 79. Já os resultados relativos a essas mesmas formulações com consumo de cimento corrigido estão expostos na Tabela 33 e Figura 80.

Tabela 32– Resistência à compressão (MPa) dos pavers com adição de RCV sem consumo de cimento corrigido aos 3, 7 e 28 dias.

	3 dias		7 dias		28 dias	
	fp (MPa)	s (MPa)	fp (MPa)	s (MPa)	fp (MPa)	s (MPa)
1:5	18,47	1,14	27,09	0,78	35,05	0,47
1:5 2%PIG	10,09	0,45	17,88	0,20	22,89	0,85
1:5 4%PIG	7,48	0,32	7,59	0,15	9,54	0,65
1:5 20%RCVA	9,81	0,69	10,48	0,63	11,61	0,15
1:5 30%RCVA	7,69	0,53	9,27	0,57	12,25	0,65
1:5 40%RCVA	6,81	0,42	7,56	0,67	8,51	0,76
1:5 50%RCVA	5,51	0,24	5,97	0,46	8,91	0,84

Fonte: Da Autora (2015).

Figura 79 – Resistência à compressão (MPa) dos pavers com adição de RCV sem consumo de cimento corrigido aos 3, 7 e 28 dias.



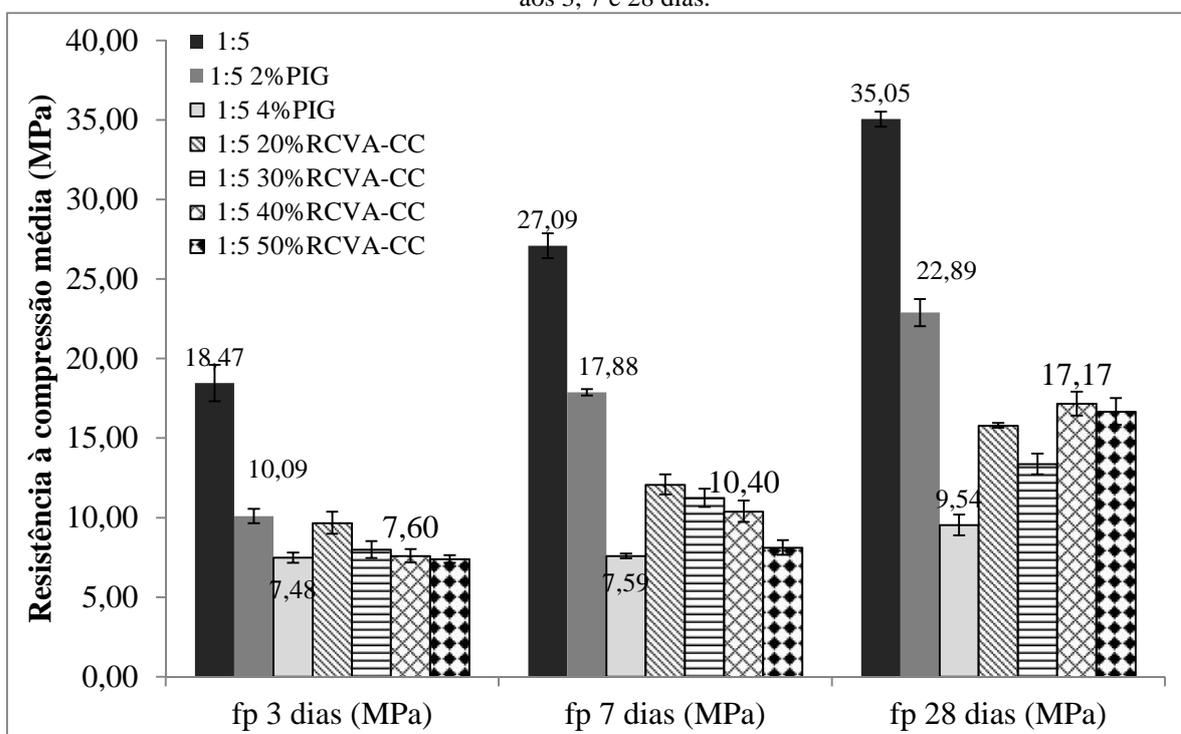
Fonte: Da Autora (2015).

Tabela 33 – Resistência à compressão (MPa) dos pavers com adição de RCV com consumo de cimento corrigido aos 3, 7 e 28 dias.

	3 dias		7 dias		28 dias	
	fp (MPa)	s (MPa)	fp (MPa)	s (MPa)	fp (MPa)	s (MPa)
1:5	18,47	1,14	27,09	0,78	35,05	0,47
1:5 2%PIG	10,09	0,45	17,88	0,20	22,89	0,85
1:5 4%PIG	7,48	0,32	7,59	0,15	9,54	0,65
1:5 20%RCVA-CC	9,68	0,69	12,09	0,63	15,80	0,15
1:5 30%RCVA-CC	8,00	0,53	11,25	0,57	13,37	0,65
1:5 40%RCVA-CC	7,60	0,42	10,40	0,67	17,17	0,76
1:5 50%RCVA-CC	7,40	0,24	8,12	0,46	16,67	0,84

Fonte: Da Autora (2015).

Figura 80 – Resistência à compressão (MPa) dos pavers com adição de RCV com consumo de cimento corrigido aos 3, 7 e 28 dias.



Fonte: Da Autora (2015).

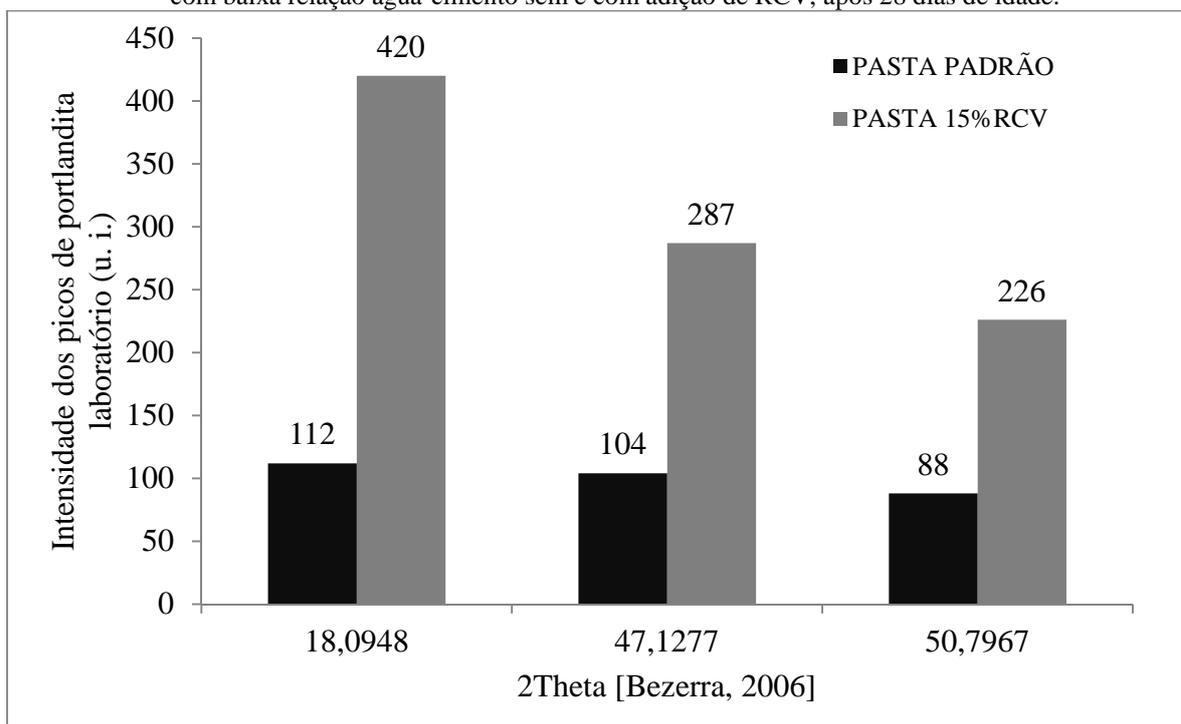
Pela análise da Tabela 32 e da Figura 79 pode-se perceber que, em relação ao paver padrão cinza, as adições de RCV de maneira isolada (ou seja, sem pigmento) conferiram queda do parâmetro de resistência à compressão. Entretanto, as adições de 20% e 30% de RCV conferiram uma melhoria dessa propriedade em relação ao paver padrão colorido. As adições de 40% e 50% não seguem tal tendência, ficando com baixos valores de resistência. Aos 28 dias de idade, destaca-se o paver 1:5 30%RCVA, tendo um valor de resistência de 12,25 MPa, equivalente a um ganho de 28,41% em relação ao paver padrão colorido. De uma maneira geral, a incorporação do RCV favoreceu o ganho de resistência dos sistemas ao longo

das idades. Por exemplo, dos 3 dias aos 28 dias de idade, o paver padrão colorido teve um ganho de resistência de 27,54%, saindo de 7,48 MPa para 9,54MPa. O paver 1:5 20%RCVA teve um ganho de resistência de 18,34%; o paver 1:5 30%RCVA, 59,30%; o paver 1:5 40%RCVA, 24,96%; e o paver 1:5 50%RCVA, 61,71%.

A correção do consumo de cimento nos traços em análise alterou positivamente os seus padrões de comportamento em relação ao parâmetro de resistência à compressão, como pode ser visto na Figura 80. A manutenção desse parâmetro foi essencial, pois, antes, a influência da adição do RCV ficou mascarada em função da perda de resistência pela redução do consumo de cimento; uma vez corrigido, foi possível avaliar realmente a influência do resíduo no sistema. Com o consumo de cimento constante nas diversas formulações, desta vez, todos os traços com adição de RCV tiveram resistência superior ao traço padrão colorido em todas as idades. Aos 28 dias de idade, destaca-se o paver 1:5 40%RCVA-CC, tendo um valor de resistência de 17,17 MPa, equivalente a um ganho de 79,98% em relação ao paver padrão colorido. Os ganhos de resistência dos traços ao longo das idades foram expressivos com a correção do seu consumo de cimento. O paver 1:5 20%RCVA-CC teve um ganho de resistência de 63,22%; o paver 1:5 30%RCVA-CC, 67,13%; o paver 1:5 40%RCVA-CC, 125,92%; e o paver 1:5 50%RCVA-CC, 125,27%.

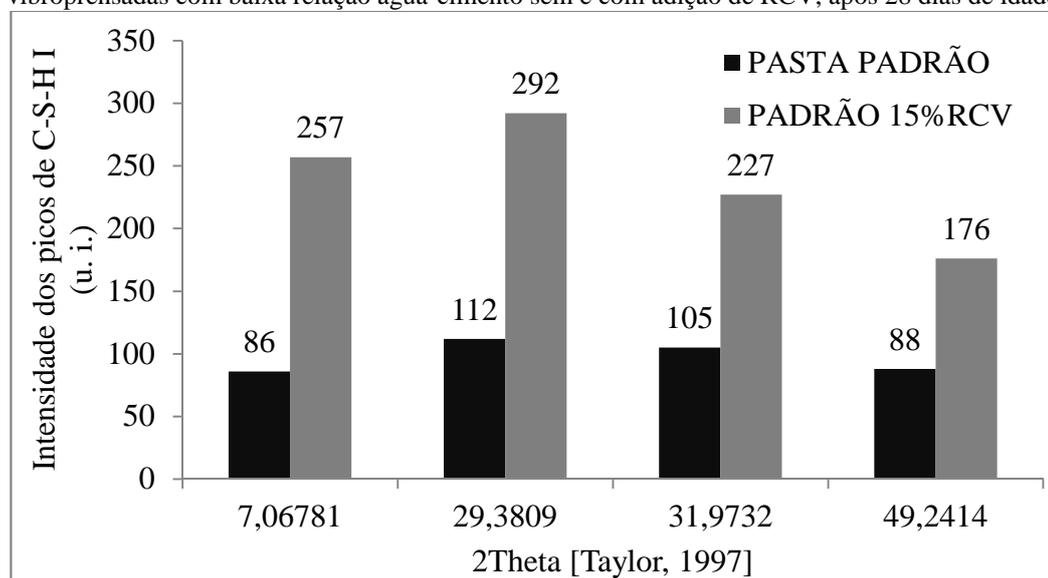
Também foram avaliados os produtos de hidratação C-S-H e CH para as pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento e adição de 15% de RCV após 28 dias de idade. Os resultados das intensidades dos picos obtidos por DRX para a portlandita (Figura 81), C-S-H I (Figura 82), C-S-H laboratório (Figura 83) e C-S-H II (Figura 84) indicam incremento nesses produtos de hidratação na presença do RCV.

Figura 81 – Intensidade dos picos característicos da portlandita por DRX em pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento sem e com adição de RCV, após 28 dias de idade.



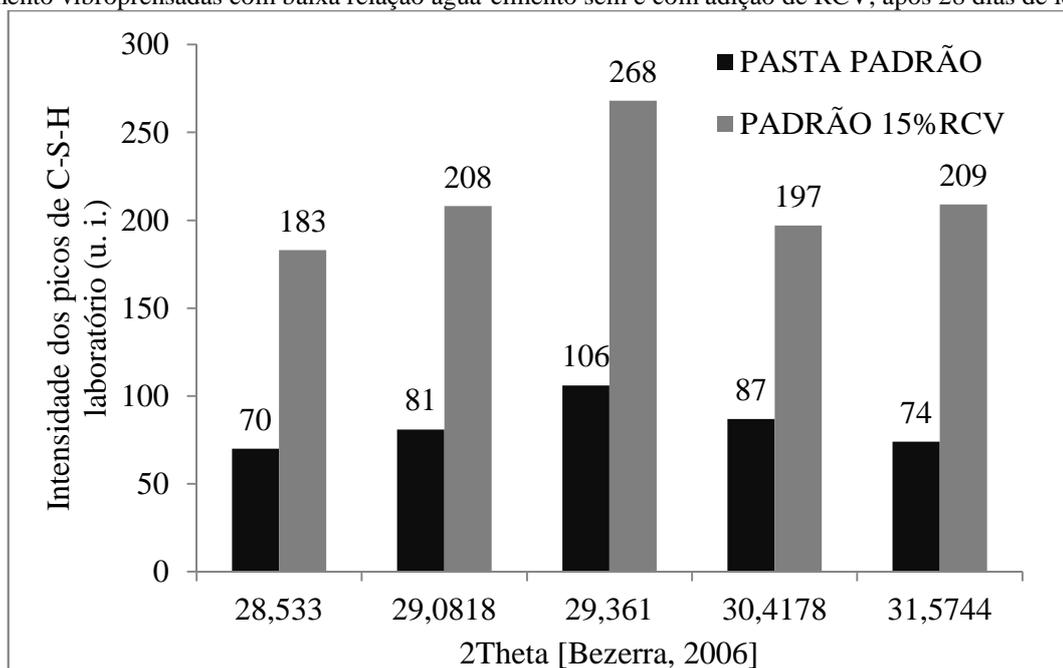
Fonte: Da Autora (2015).

Figura 82 – Intensidade dos picos característicos C-S-H I por DRX (Taylor, 1997) em pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento sem e com adição de RCV, após 28 dias de idade.



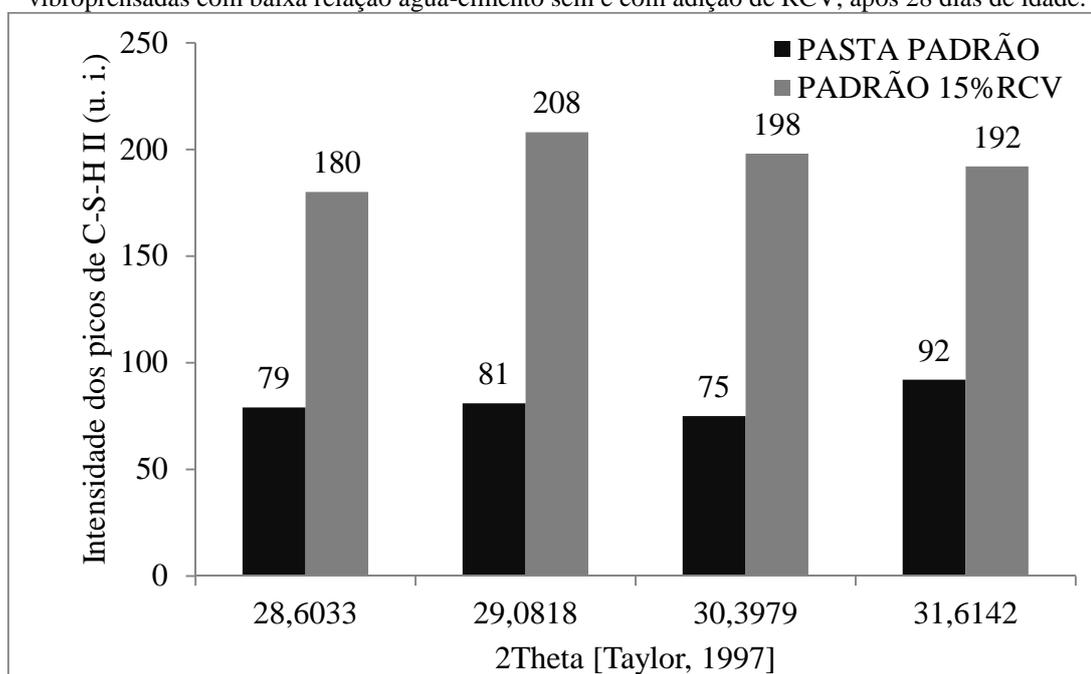
Fonte: Da Autora (2015).

Figura 83 – Intensidade dos picos característicos C-S-H de laboratório por DRX (Bezerra, 2006) em pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento sem e com adição de RCV, após 28 dias de idade.



Fonte: Da Autora (2015).

Figura 84 – Intensidade dos picos característicos C-S-H II por DRX (Taylor, 1997) em pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento sem e com adição de RCV, após 28 dias de idade.

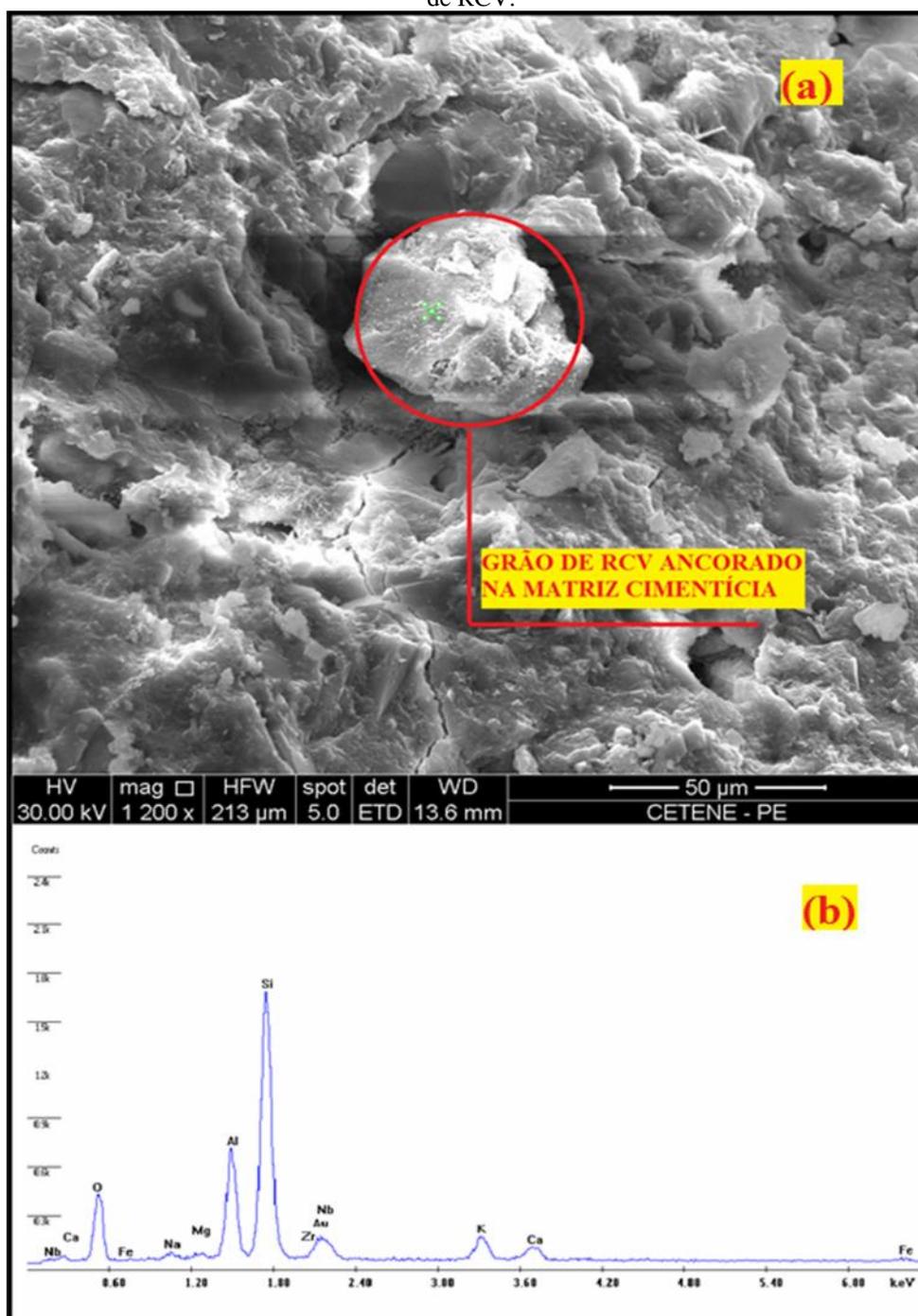


Fonte: Da Autora (2015).

A presença dos finos evidenciados na granulometria a laser do RCV (Figura 33) conjuntamente com a forma poliédrica dos grãos (Figura 35) favoreceram, respectivamente, a nucleação das fases, bem como a sua ancoragem mecânica nos produtos de hidratação da matriz cimentícia. Um exemplo deste fato pode ser encontrado na microscopia da pasta de

cimento vibroprensado com baixa relação água-cimento e adição de 15% de RCV – Figura 85(a). Foi comprovado através de uma análise de EDS, observada na Figura 85(b), que o grão ancorado realmente é de cerâmica vermelha, apontado seus principais componentes químicos (Si, Al, Fe, Mg, Ca) e destacando prioritariamente a intensidade dos picos de silício e alumínio, componentes do quartzo e anortita.

Figura 85 – (a) Microscopia eletrônica de varredura (1200x) de um grão de RCV ancorado na matriz cimentícia em uma pasta de cimento vibroprensado de baixa relação água-cimento e com adição de RCV. (b) EDS do grão de RCV.



Fonte: Da Autora (2015).

O fato da adição do RCV não ter ajudado as peças a superarem, em termos de resistência, o paver padrão cinza, se deve ao fato da inserção de material fino no sistema; que atuou como inerte, concorrendo com o cimento e diminuindo a resistência do concreto, como já explicado. Entretanto, devido as suas propriedades supracitadas, o RCV ajudou no ganho de resistência, relativamente ao paver padrão colorido, com a sua gradual inserção como *filler* e pontos de nucleação.

#### **6.2.3.1.4 Resistência à Compressão dos Pavers com Adição de Resíduo de Cerâmica Vermelha e 2% de Pigmento Concomitantemente**

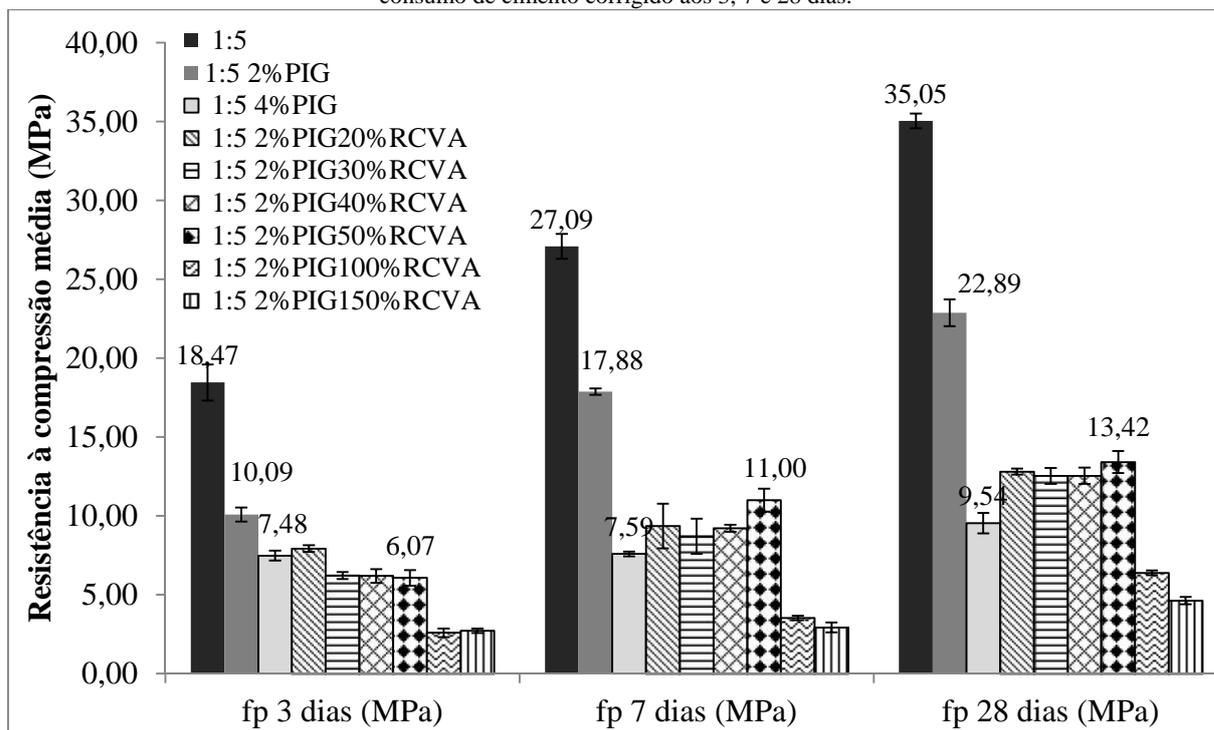
Os resultados dos testes de resistência à compressão dos pavers com adição de RCV e 2% de pigmento de forma concomitante comparativamente aos pavers padrões nas idades de 3, 7 e 28 dias podem ser vistos na Tabela 34 e na Figura 86. Já os resultados relativos a essas mesmas formulações com consumo de cimento corrigido estão expostos na Tabela 35 e Figura 87.

Tabela 34 – Resistência à compressão (MPa) dos pavers com adição de RCV e 2% de pigmento concomitantemente sem consumo de cimento corrigido aos 3, 7 e 28 dias.

	3 dias		7 dias		28 dias	
	fp (MPa)	s (MPa)	fp (MPa)	s (MPa)	fp (MPa)	s (MPa)
1:5	18,47	1,14	27,09	0,78	35,05	0,47
1:5 2%PIG	10,09	0,45	17,88	0,20	22,89	0,85
1:5 4%PIG	7,48	0,32	7,59	0,15	9,54	0,65
1:5 2%PIG20%RCVA	7,93	0,21	9,36	1,42	12,81	0,19
1:5 2%PIG30%RCVA	6,23	0,22	8,71	1,11	12,54	0,51
1:5 2%PIG40%RCVA	6,20	0,44	9,21	0,22	12,55	0,51
1:5 2%PIG50%RCVA	6,07	0,49	11,00	0,73	13,42	0,69
1:5 2%PIG100%RCVA	2,59	0,27	3,53	0,14	6,40	0,16
1:5 2%PIG150%RCVA	2,73	0,14	2,93	0,31	4,63	0,23

Fonte: Da Autora (2015).

Figura 86 – Resistência à compressão (MPa) dos pavers com adição de RCV e 2% de pigmento concomitantemente sem consumo de cimento corrigido aos 3, 7 e 28 dias.



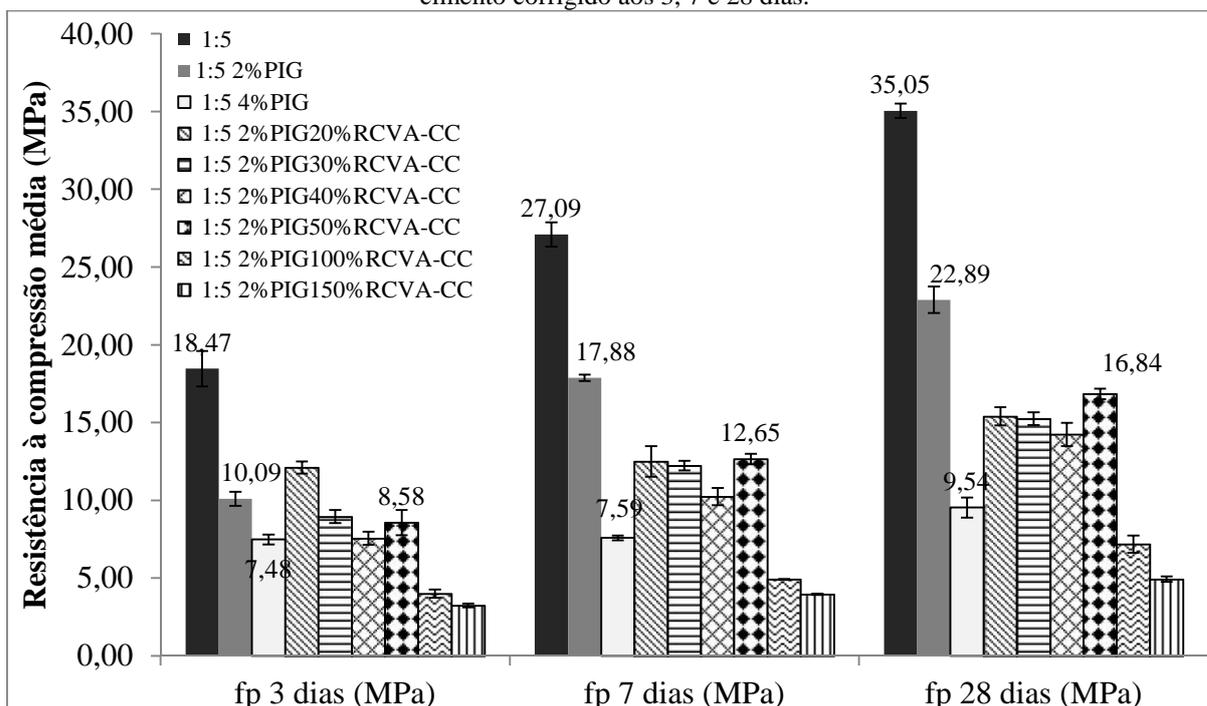
Fonte: Da Autora (2015).

Tabela 35 – Resistência à compressão (MPa) dos pavers com adição de RCV e 2% de pigmento com consumo de cimento corrigido aos 3, 7 e 28 dias.

	3 dias		7 dias		28 dias	
	fp (MPa)	s (MPa)	fp (MPa)	s (MPa)	fp (MPa)	s (MPa)
1:5	18,47	1,14	27,09	0,78	35,05	0,47
1:5 2% PIG	10,09	0,45	17,88	0,20	22,89	0,85
1:5 4% PIG	7,48	0,32	7,59	0,15	9,54	0,65
1:5 2% PIG20% RCVA-CC	12,11	0,38	12,51	0,98	15,40	0,58
1:5 2% PIG30% RCVA-CC	8,96	0,42	12,23	0,31	15,25	0,41
1:5 2% PIG40% RCVA-CC	7,56	0,43	10,25	0,55	14,24	0,75
1:5 2% PIG50% RCVA-CC	8,58	0,81	12,65	0,34	16,84	0,34
1:5 2% PIG100% RCVA-CC	4,01	0,26	4,92	0,03	7,18	0,55
1:5 2% PIG150% RCVA-CC	3,25	0,13	3,96	0,05	4,93	0,17

Fonte: Da Autora (2015).

Figura 87 – Resistência à compressão (MPa) dos pavers com adição de RCV e 2% de pigmento com consumo de cimento corrigido aos 3, 7 e 28 dias.



Fonte: Da Autora (2015).

Pela análise da Tabela 34 e da Figura 86 pode-se perceber que, em relação ao paver padrão cinza, as adições de RCV com 2% de pigmento conferiram queda do parâmetro de resistência à compressão. Entretanto, de uma maneira geral, as adições de 20% a 50% de RCV com 2% de pigmento conferiram uma melhoria dessa propriedade em relação ao paver padrão colorido. As adições de 100% e 150% não seguem tal tendência, ficando aquém de todas as outras formulações em questão. Aos 28 dias de idade, destaca-se o paver 1:5 2% PIG 50% RCVA, tendo um valor de resistência de 13,42 MPa, equivalente a um ganho de 40,67% em relação ao paver padrão colorido. Tal fato é extremamente positivo, visto que se conseguiu melhorar a propriedade de resistência à compressão do composto, reduzindo pela metade o seu teor de pigmento e incorporando ao sistema 50% de RCV em relação à massa do cimento. Novamente, a incorporação do RCV favoreceu o ganho de resistência dos sistemas ao longo das idades. Por exemplo, dos 3 dias aos 28 dias de idade, o paver padrão colorido cinza teve um ganho de resistência de 27,54%, saindo de 7,48 MPa para 9,54 MPa. Já o paver 1:5 2% PIG 20% RCVA teve um ganho de resistência maior, aproximadamente 61,53%; o paver 1:5 2% PIG 30% RCVA, 101,28%; o paver 1:5 2% PIG 40% RCVA, 102,42%; e o paver 1:5 2% PIG 50% RCVA, 121,09%.

A correção do consumo de cimento nos traços em análise não alterou os seus padrões de comportamento em relação ao parâmetro de resistência à compressão, como pode ser visto

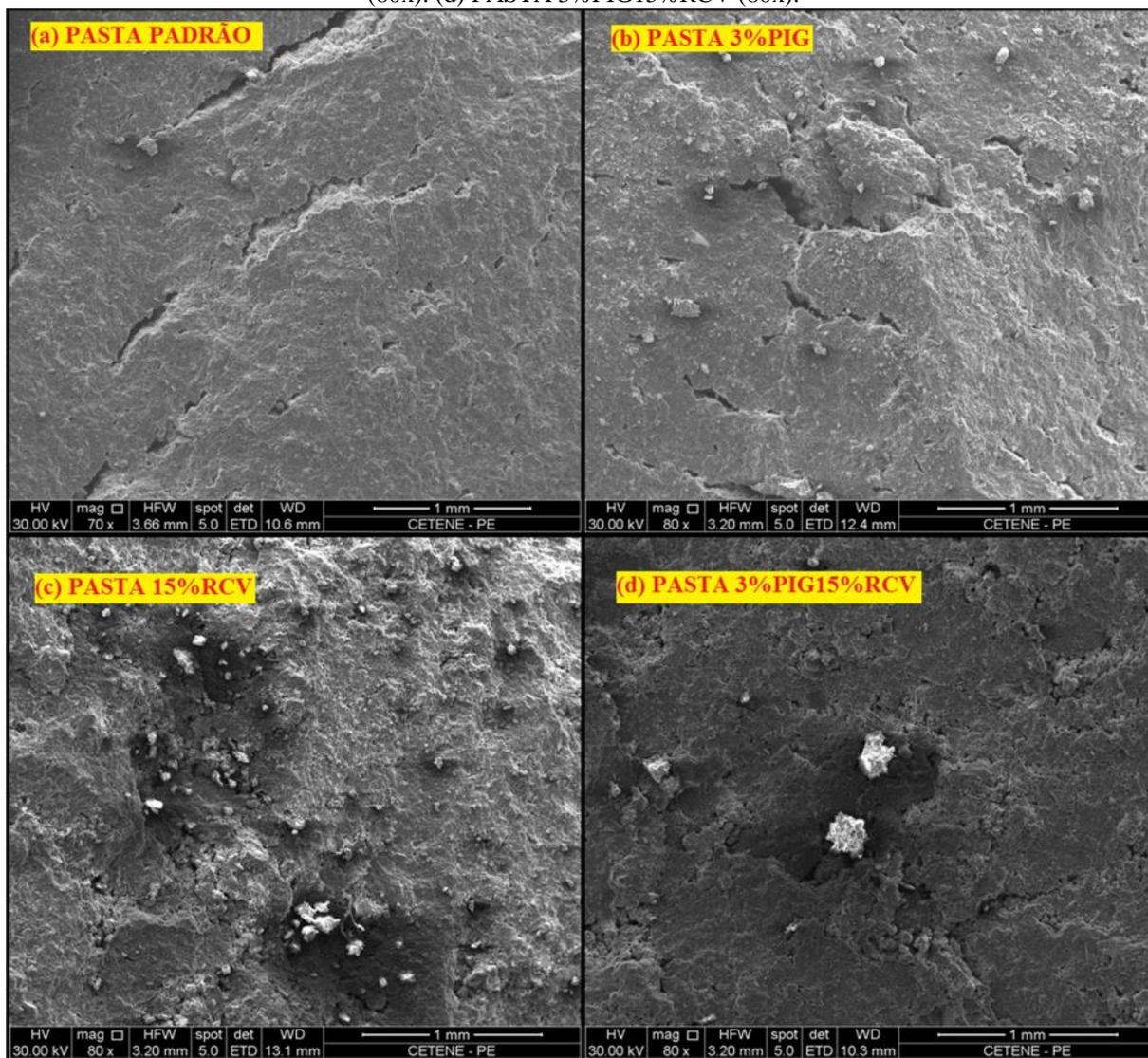
na Figura 87. Apenas, suas resistências individuais tiveram um leve aumento, visto que mais cimento foi inserido ao sistema.

Apesar de haver pigmento no sistema, e este prejudicar as reações de hidratação do cimento como explicado na seção 6.2.3.1.1, o RCV atuou como *filler* e pontos de nucleação no compósito; sendo assim, possivelmente, suas propriedades benéficas para o ganho de resistência superaram as propriedades deletérias do pigmento.

Salienta-se que o ganho de resistência não foi em função da formação de novas fases cristalinas no material cimentício estimuladas por alguma reação química entre o pigmento e o RCV, uma vez que não foram identificadas formação de novas fases quando da mistura desses dois materiais (pigmento mais RCV) em meio alcalino (solução saturada com cal), como pode ser visto no difratograma na Figura 37.

Na Figura 88, estão expostas as microscopias (na escala de 1 mm) das pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento. Pode-se observar, na Figura 88(a), que a pasta padrão apresenta uma microestrutura de aspecto mais denso e fechado. Já, na pasta com 3% de pigmento – Figura 88(b) –, percebe-se uma microestrutura um pouco mais aberta, com aspecto de esqueleto frágil, possuindo mais aberturas. A pasta com adição de 15% de RCV – Figura 88(c) – apresenta as partículas de RCV ancoradas na pasta de cimento, preenchendo os vazios, atuando como filler, bem como pontos de nucleação. E, por fim, a pasta com 3% de pigmento mais 15% de RCV – Figura 88(d) – apresenta uma microestrutura intermediária, sendo mais densa e fechada em relação à pasta 3% de pigmento, porém menos densa e fechada em relação à pasta padrão e à pasta com 3% de pigmento mais 15% de RCV.

Figura 88 – Microscopia eletrônica de varredura de pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água cimento, com mais de 28 dias. (a) PASTA PADRÃO (70x). (b) PASTA 3%PIG (80x). (c) PASTA 15% RCV (80x). (d) PASTA 3%PIG15%RCV (80x).

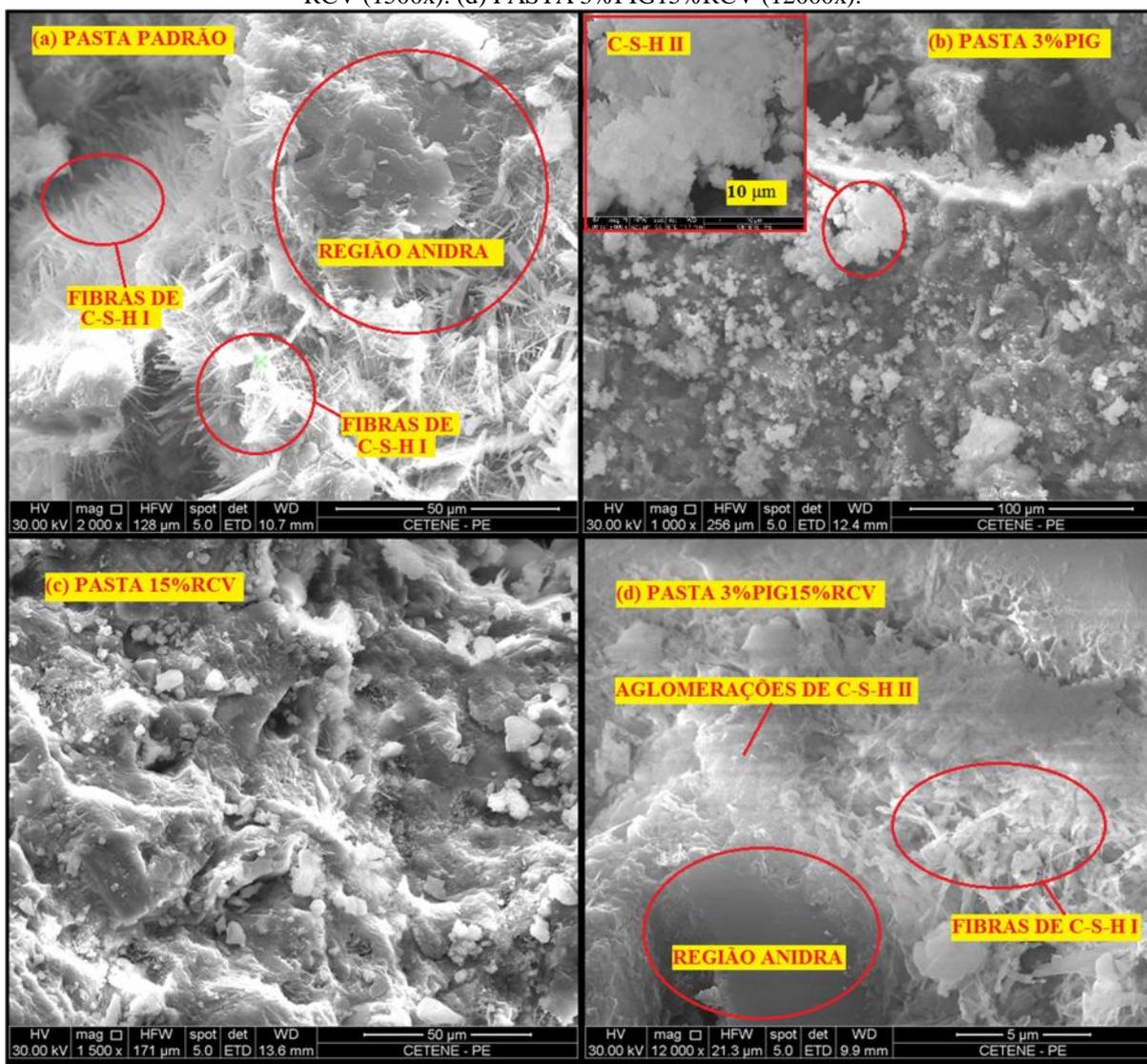


Fonte: Da Autora (2015).

Na Figura 89, estão expostas microscopias (em regiões e em escalas diferentes da Figura 88) das pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento. Ao comparar a pasta padrão – Figura 89(a) – com a pasta adicionada com 3% de pigmento – Figura 89(b) –, evidencia-se uma diferença no grau de hidratação desses sistemas. A pasta padrão possui regiões anidras, como já discutido, pela baixa relação água-cimento; bem como regiões hidratadas, evidenciadas pela predominância das fibras do C-S-H I. Já a pasta com adição de 3% de pigmento possui mais regiões anidras comparativamente à pasta padrão e uma predominância de formação de C-S-H II. Nas pastas com adição de 15% de RCV – Figura 89(c) –, identificam-se novamente os grãos de RCV preenchendo os vazios da matriz cimentícia, atuando como *filler*. E, por fim, nas pastas com 3% de pigmento e 15% de RCV – Figura 89(d) –, observa-se uma região anidra, bem como regiões

hidratadas, com formação dos dois tipos de C-S-H (I e II), corroborando assim a análise da Figura 88(d), que aponta uma microestrutura com características intermediárias relativamente às outras pastas.

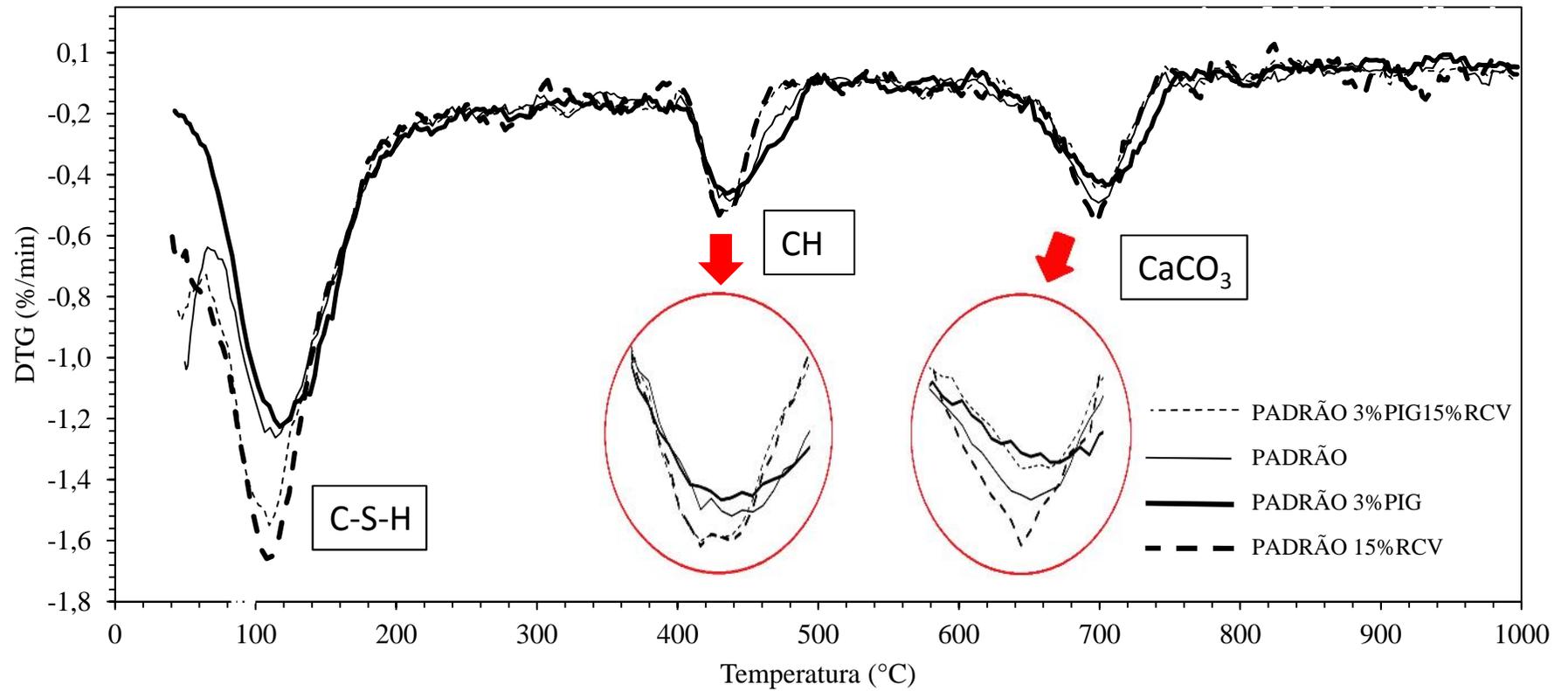
Figura 89 – Microscopia eletrônica de varredura de pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água cimento, com mais de 28 dias. (a) PASTA PADRÃO (2000x). (b) PASTA 3%PIG (1000x). (c) PASTA 15% RCV (1500x). (d) PASTA 3%PIG15%RCV (12000x).



Fonte: Da Autora (2015).

O favorecimento das reações de hidratação também foi ratificado pelos resultados de análise térmica (DTG), cujas curvas se encontram na Figura 90.

Figura 90 – DTG pastas de cimento vibroprensadas com baixa relação água-cimento sem e com adição de pigmento e RCV de maneira isolada e concomitante, após 28 dias de idade.



Fonte: Da Autora (2015).

Geralmente as análises das curvas de DTG do cimento são divididas em quatro zonas principais (JACOBY, 2012):

- 22 – 120,0°C: desidratação da água dos poros;
- 120 – 420°C: desidratação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H);
- 420 – 520°C: decomposição do hidróxido de cálcio (CH);
- 520 – 800°C: descarbonatação do  $\text{CaCO}_3$ .

Através da análise da Figura 90, observa-se que, na zona de desidratação do silicato de cálcio hidratado, a profundidade do vale formado na curva referente à pasta de cimento vibroprensada com adição de RCV é maior do que as profundidades dos outros vales nas curvas referentes às pastas: adicionada apenas com pigmento (menor profundidade do vale), sem adição e adicionada com pigmento e RCV (ordem crescente). Tal fato indica e confirma que a adição de RCV favorece as reações de hidratação do cimento, formando mais C-S-H. Em contrapartida, a adição de pigmento prejudica essas reações, formando menos C-S-H. Além disso, a análise de DTG aponta um favorecimento da formação do C-S-H em relação ao incremento do CH quando da adição de RCV na pasta de cimento vibroprensada. Tal fato pode ser explicado através da ação das partículas de granulometria fina (*filler*) de RCV como pontos de nucleação no sistema em hidratação.

Foram escolhidos os melhores traços em termos de resistência para dar continuidade às análises de absorção de água e de resistência à abrasão. Portanto, os traços de substituição e de adição de RCV (com 2% de pigmento) com teores superiores a 50% foram descartados.

#### 6.2.3.2 Absorção de Água

Nas tabelas e figuras a seguir estão expostos os resultados dos testes de absorção de água dos pavers, em que “s” o desvio-padrão amostral.

##### **6.2.3.2.1 Absorção de Água dos Pavers com Adição de Resíduo de Cerâmica Vermelha**

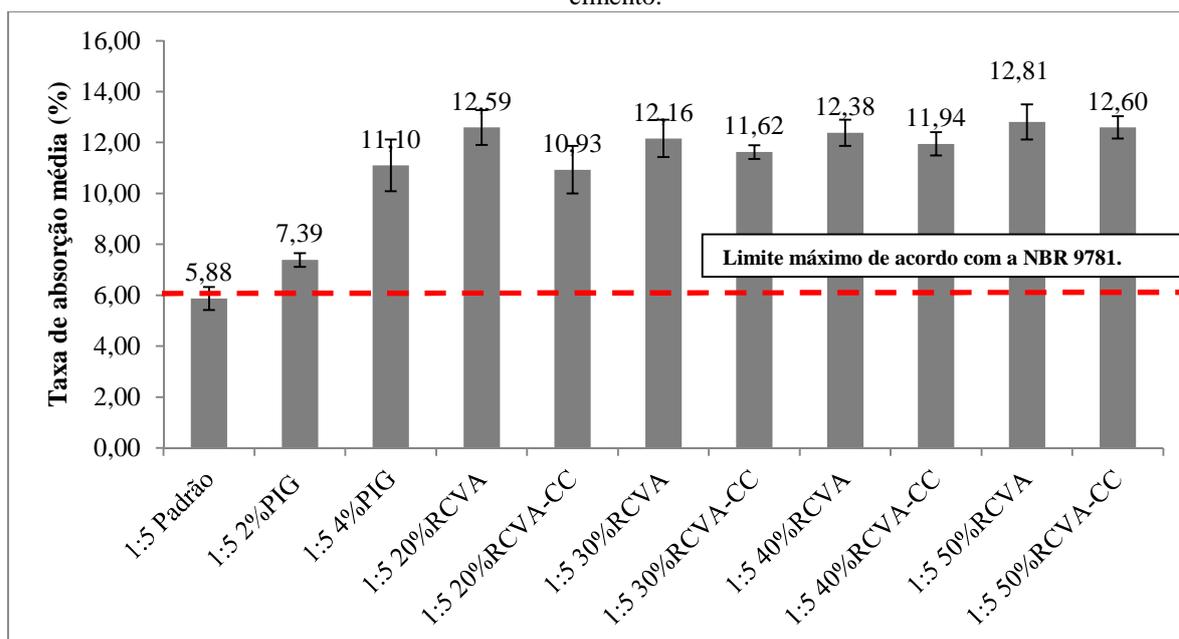
Os resultados dos testes de absorção de água dos pavers padrão cinza, padrão colorido, do traço 1:5 2%PIG e dos traços de adição de RCV sem e com o consumo de cimento corrigido podem ser vistos na Tabela 36 e na Figura 91.

Tabela 36 – Taxa de absorção média (%) dos pavers com adição de RCV sem e com o consumo de cimento corrigido.

Traço	Taxa de absorção média (%)	s (%)
1:5 Padrão	5,88	0,45
1:5 2%PIG	7,39	0,27
1:5 4%PIG	11,10	1,02
1:5 20%RCVA	12,59	0,68
1:5 20%RCVA-CC	10,93	0,94
1:5 30%RCVA	12,16	0,73
1:5 30%RCVA-CC	11,62	0,28
1:5 40%RCVA	12,38	0,51
1:5 40%RCVA-CC	11,94	0,46
1:5 50%RCVA	12,81	0,69
1:5 50%RCVA-CC	12,60	0,44

Fonte: Da Autora (2015).

Figura 91 – Taxa de absorção média (%) dos pavers com adição de RCV sem e com correção do consumo de cimento.



Fonte: Da Autora (2015).

Através da análise da Figura 91, observa-se a taxa de absorção do paver padrão cinza não ultrapassou o valor máximo de 6% estabelecido pela NBR 9781 (2013); todas as outras formulações ultrapassaram. Verifica-se também que o comportamento de aumento da taxa de absorção de água também se reproduz nos pavers com adições de RCV de forma isolada (sem pigmento), independentemente da correção do consumo de cimento.

A adição de pigmento no teor de 4% aumenta significativamente a absorção de água dos pavers, sugerindo assim um sistema com alto índice de vazios, gerado pela má formação

da matriz cimentícia em decorrência do déficit de hidratação do cimento. Já o RCV, por atuar como *filler*, diminuiu os vazios do sistema; entretanto, sua granulometria fina também contribui para a absorção de água. Assim, a adição desse resíduo não alterou significativamente tal propriedade em relação ao paver colorido padrão.

#### **6.2.3.2.2 Absorção de Água dos Pavers com Adição de Resíduo de Cerâmica Vermelha e 2% de Pigmento Concomitantemente**

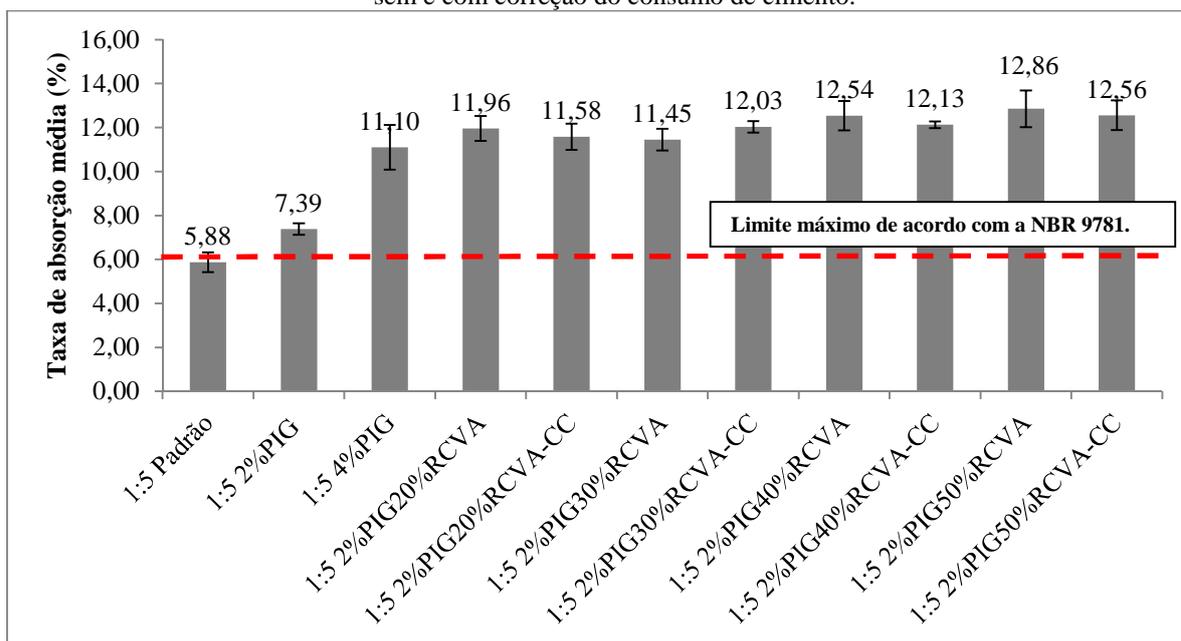
Os resultados dos testes de absorção de água dos pavers padrão cinza, padrão colorido, do traço 1:5 2%PIG e dos traços com adição de RCV e 2% de pigmento sem e com o consumo de cimento corrigido podem ser vistos na Tabela 37 e na Figura 92.

Tabela 37 – Taxa de absorção média (%) dos pavers com adição de RCV e 2% de pigmento concomitantemente sem e com o consumo de cimento corrigido.

Traço	Taxa de absorção média (%)	s (%)
1:5 Padrão	5,88	0,45
1:5 2%PIG	7,39	0,27
1:5 4%PIG	11,10	1,02
1:5 2%PIG20%RCVA	11,96	0,57
1:5 2%PIG20%RCVA-CC	11,58	0,59
1:5 2%PIG30%RCVA	11,45	0,49
1:5 2%PIG30%RCVA-CC	12,03	0,26
1:5 2%PIG40%RCVA	12,54	0,67
1:5 2%PIG40%RCVA-CC	12,13	0,15
1:5 2%PIG50%RCVA	12,86	0,84
1:5 2%PIG50%RCVA-CC	12,56	0,68

Fonte: Da Autora (2015).

Figura 92 – Taxa de absorção média (%) dos pavers com adição de RCV e 2% de pigmento concomitantemente sem e com correção do consumo de cimento.



Fonte: Da Autora (2015).

Através da análise da Figura 92, observa-se que o traço padrão cinza obteve uma taxa de absorção de água de 5,88%, atendendo ao recomendado pela NBR 9781 (ABNT, 2013), que é uma taxa máxima de 6%. Todas as outras formulações ultrapassaram este limite. O traço com adição de 2% de pigmento mostrou um aumento da taxa de absorção de água de 25,68% em relação ao paver padrão cinza; já o traço com 4% de adição de pigmento, mostrou um aumento de 88,78%. A adição de pigmento aumenta a taxa de absorção de água do sistema. De um modo geral, as adições de RCV com 2% de pigmento não alteraram este comportamento, independentemente da correção do consumo de cimento.

Os valores atingidos são próximos aos valores das taxas de absorção de água das adições de RCV de maneira isolada, como visto na seção 6.2.3.2.1.

É interessante pontuar que a quantidade de grãos anidros de cimento no sistema é aumentada pela adição do pigmento, de maneira que esses grãos anidros podem vir a contribuir com a absorção de água do sistema, visto que possui propriedades hidrofílicas.

Além disso, a inserção de finos no sistema, partículas de pigmento e RCV, caso não estejam envolvidas pelos produtos de hidratação, também ajudam a aumentar a absorção de água, em consequência do aumento da área superficial.

### 6.2.3.3 Resistência à Abrasão

Nas tabelas e figuras a seguir estão expostos os resultados dos testes de resistência à abrasão dos pavers, em que “s” o desvio-padrão amostral.

#### 6.2.3.3.1 Resistência à Abrasão dos Pavers com Adição de Resíduo de Cerâmica Vermelha

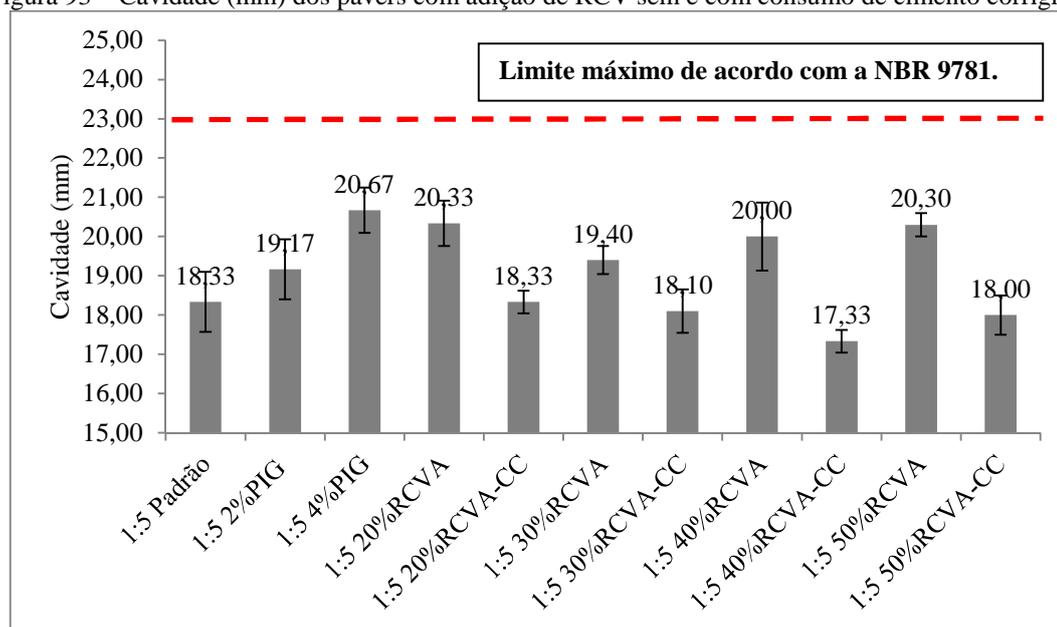
Os resultados dos testes de resistência à abrasão (dimensão da cavidade corrigida pelo fator de calibração) dos pavers padrão cinza, padrão colorido, do traço 1:5 2%PIG e dos traços de adição de RCV sem e com o consumo de cimento corrigido podem ser vistos na Tabela 38 e na Figura 93.

Tabela 38 – Cavidade (mm) dos pavers com adição de RCV sem e com consumo de cimento corrigido.

Traço	Cavidade média (mm)	s (mm)
1:5 Padrão	18,33	0,76
1:5 2%PIG	19,17	0,76
1:5 4%PIG	20,67	0,58
1:5 20%RCVA	20,33	0,58
1:5 20%RCVA-CC	18,33	0,29
1:5 30%RCVA	19,40	0,36
1:5 30%RCVA-CC	18,10	0,56
1:5 40%RCVA	20,00	0,87
1:5 40%RCVA-CC	17,33	0,29
1:5 50%RCVA	20,30	0,30
1:5 50%RCVA-CC	18,00	0,50

Fonte: Da Autora (2015).

Figura 93 – Cavidade (mm) dos pavers com adição de RCV sem e com consumo de cimento corrigido.



Fonte: Da Autora (2015).

Através da análise da Figura 93, observa-se todas as formulações não ultrapassaram o valor máximo de 23 mm de cavidade estabelecido pela NBR 9781 (2013). De um modo geral, as adições de RCV de forma isolada tenderam a diminuir o valor da cavidade em relação ao paver padrão colorido, tornando as peças mais resistentes à abrasão. Destaca-se o traço 1:5 40%RCVA, cuja cavidade média teve uma redução de 16,16% em relação à cavidade do traço padrão colorido. Os pavers com adição de RCV e traços corrigidos em relação ao consumo de cimento apresentaram maior resistência à abrasão do que aqueles sem essa correção.

A partir das adições de RCV de maneira isolada (sem pigmento), a dureza do sistema foi melhorada de uma maneira geral, tanto pelo favorecimento de formação da matriz cimentícia (como visto na seção 6.2.3.1.3) estimulada pelas propriedades do resíduo, bem como pela dureza do próprio material cerâmico em si. Além disso, a resistência à abrasão foi ainda mais melhorada nos traços com correção do consumo de cimento corrigido, em consequência de uma formação mais densa da microestrutura da pasta.

### 6.2.3.3.2 Resistência à Abrasão dos Pavers com Adição de Resíduo de Cerâmica Vermelha e 2% de Pigmento Concomitantemente

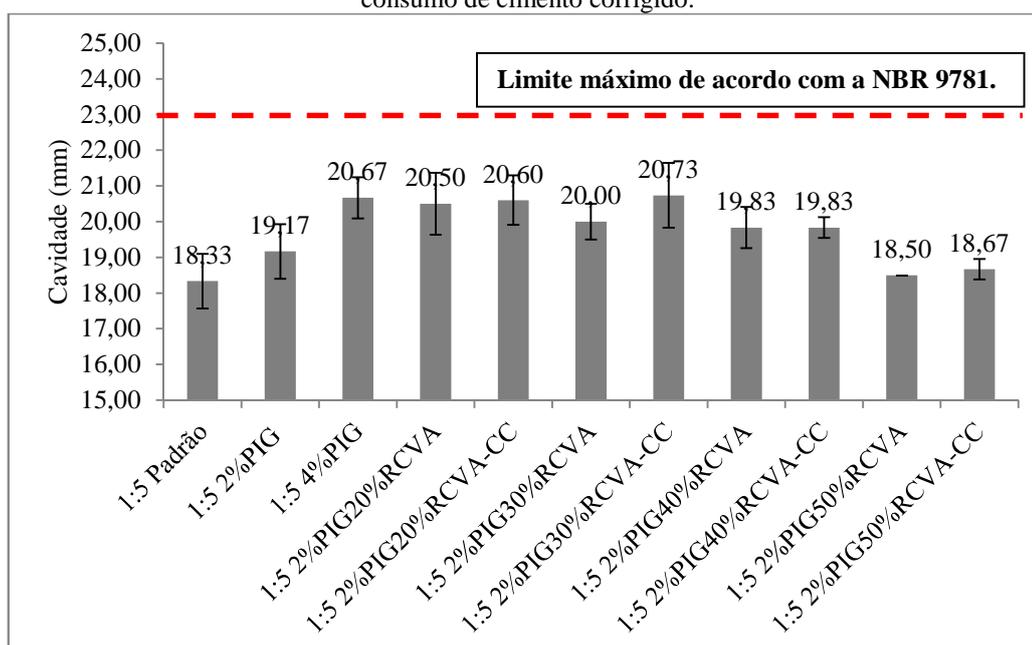
Os resultados dos testes de resistência à abrasão (dimensão da cavidade corrigida pelo fator de calibração) dos pavers padrão cinza, padrão colorido, do traço 1:5 2%PIG e dos traços com adição de RCV e 2% de pigmento sem e com o consumo de cimento corrigido podem ser vistos na Tabela 39 e na Figura 94.

Tabela 39 – Cavidade (mm) dos pavers com adição de RCV e 2% de pigmento concomitantemente sem e com o consumo de cimento corrigido.

Traço	Cavidade média (mm)	s (mm)
1:5 Padrão	18,33	0,76
1:5 2%PIG	19,17	0,76
1:5 4%PIG	20,67	0,58
1:5 2%PIG20%RCVA	20,50	0,87
1:5 2%PIG20%RCVA-CC	20,60	0,69
1:5 2%PIG30%RCVA	20,00	0,50
1:5 2%PIG30%RCVA-CC	20,73	0,91
1:5 2%PIG40%RCVA	19,83	0,58
1:5 2%PIG40%RCVA-CC	19,83	0,29
1:5 2%PIG50%RCVA	18,50	0,00
1:5 2%PIG50%RCVA-CC	18,67	0,29

Fonte: Da Autora (2015).

Figura 94 – Cavidade (mm) dos pavers com adição de RCV e 2% de pigmento concomitantemente sem e com consumo de cimento corrigido.



Fonte: Da Autora (2015).

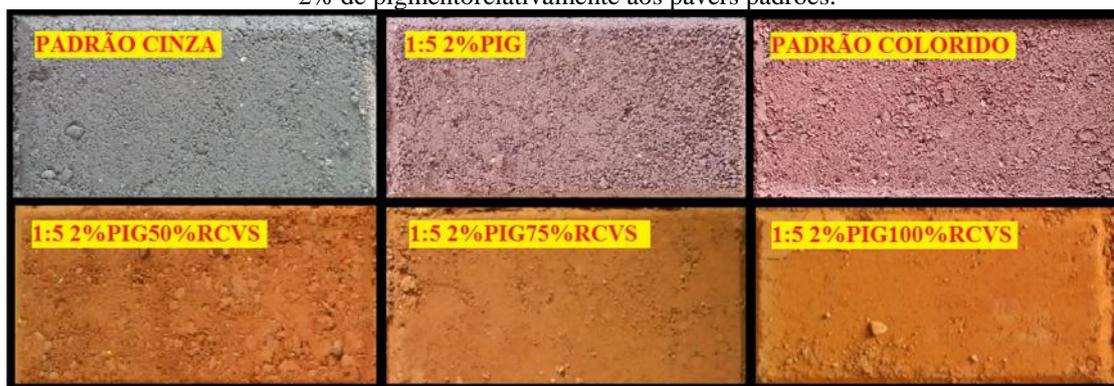
Através da análise da Figura 94, observa-se que o traço padrão cinza obteve um valor de comprimento corrigido de cavidade de 18,33 mm, atendendo ao recomendado pela NBR 9781 (ABNT, 2013), que é um comprimento de 23,00 mm. Todas as formulações não ultrapassaram este limite. O traço com adição de 2% de pigmento mostrou um aumento da cavidade de 4,58% em relação ao paver padrão cinza; já o traço com 4% de adição de pigmento, mostrou um aumento de 12,77%. A adição de pigmento aumenta o valor da cavidade média. Tal fato é negativo, visto que, quanto maior o valor da cavidade média, menos resistente à abrasão é o paver. Contrariamente a esse comportamento, de um modo geral, as adições de RCV com 2% de pigmento tenderam a diminuir o valor da cavidade em relação ao paver padrão colorido, independentemente da correção do consumo de cimento, tornando as peças mais resistentes à abrasão. Destaca-se o traço 1:5 2%PIG50%RCVA, cuja cavidade média teve uma redução de 10,49% em relação à cavidade do traço padrão colorido.

A diminuição da resistência à abrasão é consequência da fragilidade da matriz cimentícia adicionada com pigmento e RCV. Tal fragilidade também é confirmada pelos resultados dos testes de resistência à compressão. A microestrutura se forma menos densa e com mais poros, tendo um esqueleto mais frágil. Ao passo que se adiciona uma quantidade significativa de RCV no sistema (teor de 50%), a propriedade em análise melhora, visto que a dureza da cerâmica vermelha compensa a perda provocada pela microestrutura frágil da matriz cimentícia, incrementando assim a capacidade das peças na resistência à abrasão.

#### 6.2.3.4 Cor

Comparativamente aos pavers padrões, as cores e texturas dos pavers com formulações de substituição da areia média pelo RCV e adição de 2% de pigmento podem ser vistas na Figura 95; já as dos pavers com formulações de adição concomitante de pigmento e RCV podem ser vistas na Figura 96; as dos pavers com formulações de adição de RCV de maneira isolada (sem pigmento) podem ser vistas na Figura 97. Os pavers analisados nesta seção não são os que tiveram seus traços corrigidos em relação ao consumo de cimento, visto que a pequena alteração feita deste parâmetro não os diferenciou perceptivelmente em cores e texturas.

Figura 95 – Cores e texturas dos pavers com formulações de substituição da areia média pelo RCV e adição de 2% de pigmento relativamente aos pavers padrões.



Fonte: Da Autora (2015).

Figura 96 – Cores e texturas dos pavers com formulações de adição concomitante de pigmento e RCV relativamente aos pavers padrões.



Fonte: Da Autora (2015).

Figura 97 – Cores e texturas dos pavers com formulações de adição de RCV relativamente aos pavers padrões.



Fonte: Da Autora (2015).

Através da observação das Figuras 95, 96 e 97 nota-se que as adições de pigmento de óxido de ferro nos teores de 2% e de 4% imprimiram ao sistema uma matiz colorimétrica vermelha.

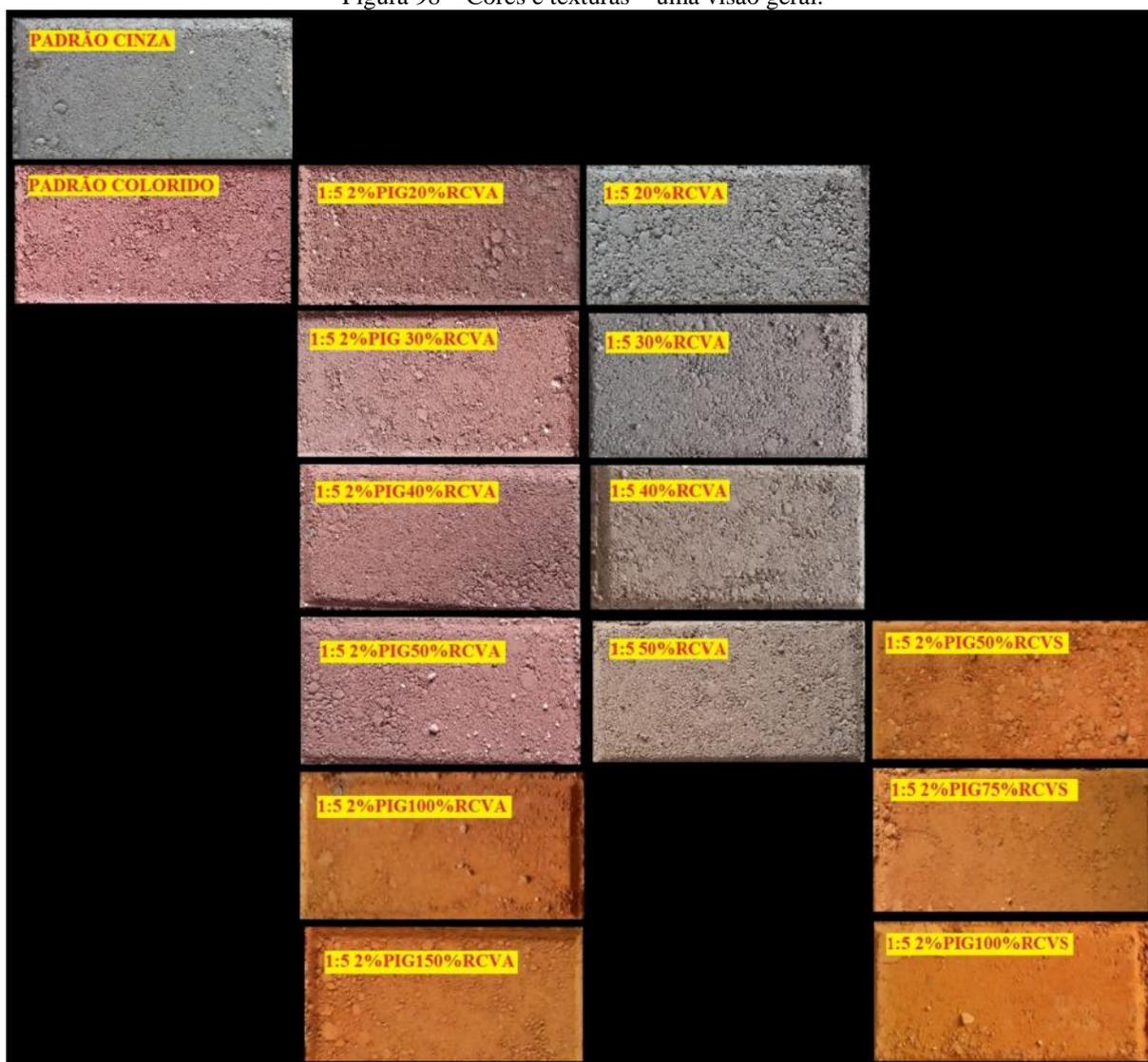
Os traços com substituição da areia médio pelo RCV e adição de 2% de pigmento apresentaram cores fortes alaranjadas, mais fidedignas à cor dos blocos de telhas e tijolos que deram origem aos resíduos, como pode ser visto na Figura 95.

Na Figura 96, nota-se que as adições de RCV (20%, 30%, 40% e 50%) concomitante com 2% de pigmento não alteraram significativamente a tonalidade do paver colorido padrão; o que é positivo, visto que os pavers atingiram tonalidades de cores aceitas pelo mercado com redução do teor de pigmento em 50% e ainda incorporação do RCV. A partir da adição de 100% de cerâmica vermelha é que a matiz deixa de ser vermelha e passa a ser alaranjada. Já na Figura 97, nota-se que as adições de RCV (20%, 30%, 40% e 50%) de maneira isolada apresentaram timidamente cor, sendo sua intensidade insuficiente para atender aos padrões estéticos dos pavers coloridos demandados pelo mercado.

Através de uma visão holística das formulações produzidas (Figura 98), é possível afirmar que o acabamento das peças se manteve inalterado ou melhorou com a incorporação do RCV (em suas duas formas, adição e substituição).

Assim, a incorporação do RCV foi positiva do ponto de vista de obtenção de cor e manutenção de textura da superfície das peças. Destacam-se as formulações de adição concomitante de pigmento e RCV como as que mais se aproximaram esteticamente do paver padrão colorido; sendo a de 50% que incorpora uma maior quantidade de resíduo.

Figura 98 – Cores e texturas – uma visão geral.



Fonte: Da Autora (2015).

É importante lembrar que o teor de argamassa ( ), definido pela Equação 8, de um concreto está intrinsecamente ligado ao seu aspecto superficial. Seguem na Tabela 40 os valores do teor de argamassa das diversas formulações testadas nesta seção, calculados através da Equação 8.

$$= (1 + a_m + a_g + rcv + pig) / (1 + a_m + a_g + rcv + pig + p) \quad (8)$$

Tabela 40 – Teores de argamassas dos traços produzidos.

Traços	Teor de argamassa
1:5	0,842
1:5 2%PIG	0,843
1:5 4%PIG	0,843
1:5 2%PIG50%RCVS	0,843
1:5 2%PIG75%RCVS	0,843
1:5 2%PIG100%RCVS	0,843
1:5 2%PIG20%RCVA	0,847
1:5 2%PIG30%RCVA	0,850
1:5 2%PIG40%RCVA	0,852
1:5 2%PIG50%RCVA	0,855
1:5 2%PIG100%RCVA	0,865
1:5 2%PIG150%RCVA	0,874
1:5 20%RCVA	0,847
1:5 30%RCVA	0,850
1:5 40%RCVA	0,852
1:5 50%RCVA	0,855

Fonte: Da Autora (2015).

Nota-se, através da análise da Tabela 40, que os teores de argamassa dos concretos produzidos são praticamente constantes perante as diversas incorporações. Tal fato, aliado à constância da relação água-materiais secos, explica a manutenção da textura das peças; como lembra Tango (1994, p. 22): “concretos de mesma proporção de argamassa, mas com teores agregado/cimento diferentes apresentam aproximadamente a mesma consistência quando se mantém constante o teor água-materiais secos.”.

## 7 CONCLUSÕES

Foi possível o desenvolvimento de blocos de concreto intertravados coloridos para pavimentação, utilizando RCV como matiz colorimétrica. Pavers adicionados apenas com pigmento apresentaram significativas perdas de propriedades relativamente ao paver padrão cinza (sem adições). Já nos pavers com adição de RCV de maneira isolada e concomitante com pigmento – reduzido seu teor pela metade – foram observadas melhorias nas propriedades comparativamente ao paver padrão colorido (4% de pigmento). Deste modo, adição de RCV é uma possibilidade técnica promissora, sustentável e economicamente viável na fabricação de pavers avermelhados.

Percebeu-se, através da comparação dos resultados dos testes com pastas de cimento bem hidratadas e dos testes com concreto vibroprensado de baixa relação água-cimento, que a adição de pigmento influencia de maneira diferente esses sistemas.

As seguintes conclusões pontuais respondem a cada um dos objetivos específicos propostos:

1. Quanto à caracterização física, química e microestrutural do pigmento vermelho: e do RCV – o pigmento foi identificado como óxido de ferro, de alta área superficial específica (maior do que a do RCV), com morfologia acicular e tendência à aglomeração em meio não alcalino. Possivelmente seu caráter magnético influenciou nas reações de hidratação da matriz cimentícia, bem como nas propriedades da água de adesão intercrystalina. Já o RCV foi identificado com morfologia densa, proveniente do sistema sinterizado; não pozolânico, porém apresentando uma certa reatividade; foram identificadas como fases cristalográficas quartzo, anortita e goetita, sem halo amorfo.
2. Quanto ao desenvolvimento de traços através da metodologia de dosagem de traços recomendada pela ABCP para blocos de concreto intertravados – o traço dosado apresentou consumo de cimento econômico e adequado a valores reportados na literatura. Foram atingidas resistência de até 35 MPa, conforme a NBR 9781:2013. O traço padrão foi 1:2,29:1,76:0,95 (cimento:areia média:areia muita grossa:pedrisco) com relação água/materiais secos 0,80.
3. Quanto à interferência das incorporações nas propriedades dos blocos endurecido – de uma maneira geral, adições de apenas pigmento (2% e 4%) reduziram em até 73% a resistência à compressão do paver padrão cinza (sem adições). As substituições de areia média pelo RCV também foram prejudiciais a esse sistema. Já as adições de

apenas RCV, bem como as de RCV concomitantemente com pigmento foram positivas em ganhos ou manutenção de propriedades (resistência à compressão, absorção de água e resistência à abrasão) em relação ao paver padrão colorido (4% de pigmento). Especificamente em relação aos testes de absorção de água, a adição de apenas pigmento prejudicou esta propriedade, bem como, de uma maneira geral, a adição de RCV. Entretanto, os pavers adicionados com o resíduo mantiveram a taxa de absorção de água próxima a do paver padrão colorido. Todos os sistemas com pigmento e/ou RCV, comparativamente ao padrão cinza, apresentam taxas de absorção superiores a 6% (limite máximo preconizado pela NRR 9781:2013); o que pode vir a ser corrigido com o uso de aditivos. Já especificamente em relação aos testes de resistência à abrasão, a adição de pigmento também prejudicou os sistemas. A adição de RCV, contrariamente, melhorou esta propriedade. Pavers adicionados com teores mais altos de RCV apresentaram valores de resistência à abrasão próximos ao do padrão cinza.

4. Quanto à avaliação das alterações microestruturais e cristalográficas dos sistemas produzidos – de uma maneira geral, a adição de pigmento interferiu negativamente nas reações de hidratação das pastas, conforme redução dos níveis de CH e C-S-H medidos através de picos de DRX, após 28 dias, bem como análise térmica. Os sistemas adicionados com pigmento apresentaram esqueleto microestrutural mais frágil, bem como preferencialmente formação de C-S-H II. Já a adição de RCV aumentou as fases C-S-H e CH comparativamente, inclusive, ao paver padrão cinza. O RCV atuando como *filler*, pontos de nucleação e ancoragem no sistema, proporcionou melhorias de propriedades aos compósitos.
5. Quanto à avaliação das alterações na coloração dos sistemas produzidos – a incorporação do RCV nos sistemas foi positiva do ponto de vista de obtenção de matiz colorimétrica. Colorações muito semelhantes a do paver padrão colorido foram atingidas com a redução do teor de pigmento pela metade concomitantemente à adição de resíduo no sistema. Segundo inspeção visual, o paver que mais se aproxima colorimetricamente do paver praticado no mercado é o de formulação 2%PIG50%RCVA; apesar das outras formulações apresentarem também alterações de cor que poderiam caracterizar um produto com identidade mercadológica sustentável.
6. O traço de formulação 2%PIG50%RCVA foi o que se destacou na manutenção ou melhoria de propriedades dos pavers, apresentando: melhoria da resistência à

compressão, manutenção da taxa de absorção de água, melhoria da resistência à abrasão e manutenção de matiz colorimétrica em relação ao paver padrão colorido.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomendam-se para trabalhos futuros, os itens que seguem:

- Desenvolver pavers através de várias metodologias de dosagens diferentes, a fim de comparar seus resultados;
- analisar a influência do tempo de compactação e vibração dos pavers no momento de sua moldagem nas propriedades de resistência à compressão, absorção de água e resistência à abrasão;
- desenvolver pavers com adição de RCV, incorporando este material no procedimento de dosagem, levando em conta sua granulometria e o melhor empacotamento entre os agregados mais o resíduo;
- estudar a correlação entre os pesos das peças logo após sua moldagem e a sua resistência à compressão;
- analisar a presença de água intercrystalina de adesão e suas propriedades nas pastas de cimento de natureza seca vibroprensada;
- estudar a adição de pigmento de óxido de ferro, em uma faixa maior de teores, em pastas de cimento de natureza seca vibroprensada, buscando entender a influência das propriedades magnéticas da hematita nas reações de hidratação.

## REFERÊNCIAS

ABREU, J. V. **Estudo de concreto de alta resistência compactado com rodo para pavimentação**. 2002. Dissertação (mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

ALCANTARA, P. S. X, NÓBREGA, A. C. V.; SILVA, G. A. Desenvolvimento de argamassas de revestimento utilizando resíduos de cerâmica vermelha e sua aplicabilidade no cotidiano de obras na construção civil. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 54°. Maceió. **Anais**. São Paulo: Instituto Brasileiro de Concreto, 2012.

ALENCAR, R. S. et al. A influência da adição de pigmentos na resistência à compressão e durabilidade de concretos com cimento branco e cinza. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 47°. **Anais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12042**: Materiais inorgânicos — Determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13818**: Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895** - Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método de Chapelle Modificado. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 248**: Agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da Resistência a Compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65**: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

AY, N.; ÜNAL, M. The use of waste ceramic tile in cement production. **Cement and Concret Research**. v. 30, 2000.

BAHIENSE, A.V. et al. Utilização do planejamento experimental na incorporação do resíduo da indústria cerâmica vermelha em argamassas para obtenção da capacidade de retenção de água. **Revista Cerâmica**. v. 54, 2008.

BEZERRA, U. T. **Compósitos Portland-biopolímero para cimentação de poços de petróleo**. 2006. Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN.

BRITO, J.; CORREIA, J.R.; PEREIRA, A.S. Mechanical behavior of non-structural concrete made with recycled cerâmica aggregates. **Cement & Concrete Composite**. 2005.

CERÂMICA no Brasil – Considerações Gerais. **Associação Brasileira de Cerâmica**, 2011. Disponível em < <http://www.abceram.org.br/site/?area=2>>. Acesso em: fev. 2015.

CHRISTÓFOLLI, J. L. **Estudo de argilas calcinadas para produção de cimento Portland pozolânico na região de Curitiba, Parana-Brasil**. (Dissertação). 2010. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia, UFPR. Curitiba/Paraná.

COELHO, F. C. A. **Variación del color y textura de hormigones vistos con adición de pigmentos inorgánicos, sometidos a distintos estados de exposición ambiental**. Tese (Doutorado em Ingeniero de Caminos Canales y Puertos). Universidad Politécnica de Madrid, U. P. MADRID. Espanha. 2001.

COSTA, A. C. et al. Propriedades mecânicas do concreto colorido de alta resistência. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 46°. Florianópolis. **Anais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2004.

COSTA, J. S.; MARTINS, C. A., BALDO, J. B. Análise da absorção de água por imersão em argamassa com reciclado da indústria cerâmica. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 17°, 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. **Anais**. p. 3661-3671.

CRUZ, L. O. M. **Pavimento intertravado de concreto: estudo dos elementos e métodos de dimensionamento**. 2003. Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro.

FERNANDES, I. **Blocos e Pavers**. Produção e Controle de Qualidade. São Paulo. 2013.

FIORITI, C. F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo**. Tese (doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Paulo, São Carlos.

FONSECA, A.D.P. **Estudo comparativo de concretos com agregado graúdo reciclado de telha cerâmica e agregado graúdo natural**. 2006. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

FÓRUM INTERCEMENT. Crescimento, Desafios e Soluções para o Mercado de Piso Intertravado de Concreto. **InterCement**, maio. 2013. Disponível em <<http://www.forumintercement.com/pisos-intertravados-de-concreto.html>>. Acesso em: Nov. 2014.

FRASSON JÚNIOR, A. **Proposta de metodologia de dosagem e controle no processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

GARCIA, E. et al. Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo. **Cerâmica**. v. 61, 2015.

GODINHO, D. P. **Pavimento intertravado: uma reflexão sob a ótica da durabilidade e sustentabilidade**. 2009. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, Escola de Arquitetura, UFMG, Belo Horizonte.

GONÇALVES, J. P. G. **Utilização do resíduo da indústria cerâmica para produção de concretos**. 2007. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672007000400009&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672007000400009&script=sci_arttext)> Acesso em: nov. de 2013.

GREGORIO, L. T. **Orientações para fabricação de blocos de concreto e pisos intertravados**. 2012. Projeto SHS – Solução Habitacional Simples / Simple Housing Solution. Rio de Janeiro / Cachoeira Paulista.

HELENE, P. L.; TIBÉRIO, A. Concreto de Cimento Portland. In: Isaia, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípio de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Instituto Brasileiro de Concreto - IBRACON, 2010. v.29, p.905-944.

HELENE, P. R. L.; GALANTE, R. Concreto colorido, São Paulo, 1999. In: Congresso Brasileiro do Cimento, **Anais**. São Paulo: Congresso Brasileiro de Cimento (CBO), 1999.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992.

HENDGES et al. Resistência à compressão, custo e coloração de concretos produzidos com pigmentos e cimentos Portland cinza e branco. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 46°. Florianópolis. **Anais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2004.

HOOD, R. S. S. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos para pavimentação**. 2006. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. Resíduos de cerâmica vermelha. **Band Cidade**, dez. 2013. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=GIPnMoAkPdI>>. Acesso em: Nov. 2014.

JACOBY, P. C. Utilização do resíduo do polimento de porcelanato na produção de materiais cimentícios, **Prêmio Odebrecht para o desenvolvimento sustentável: livro comemorativo 2011 : compilação dos melhores projetos**, Rio de Janeiro, , p. 31, 2012. Disponível em

<<http://www.premioodebrecht.com/livros/brasil/2011/files/assets/basic-html/page31.html>>. Acesso em Fev. 2014.

KANNO, W. M. **Propriedades mecânicas do gesso de alto desempenho**. 2009. Tese (doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo, São Carlos.

KIRCHHEIM et al. Concreto Branco. In: IBRACON. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. 2V. 1600P.

LANXESS ENERGIZING CHEMISTRY. Estudos de caso. **Fórum Colored Concrete Works**. Disponível em: <<http://www.forumcoloredconcreteworks.com/estudo-de-casos.asp?caso=capa>>. Acesso em: jan. 2014.

LEE, H. S.; LEE, J. Y.; YU, M. Y. Influence of iron pigments on the properties of concrete interlocking blocks. **Cement and Concret Research**, v. 33, 2003.

LEE, H. S.; LEE, J. Y.; YU, M. Y. Influence os inorganic pigments on the fluidity of cement mortars. **Cement and Concret Research**, v. 35, 2005.

LIMA, R. M. F.; QUIRINO, L. **Efeito da adsorção de amina no potencial zeta da hematita e do quartzo**. 2003.Revista Escola de Minas.

LINTZ, R. C.; GACHET-BARBOSA, L. A. **Avaliação do comportamento de concreto contendo borrada de pneus inservíveis para utilização em pisos intertravados**. 2010. Disponível em: <[http://www.civil.uminho.pt/revista/n37/Artigo%202%20\(pag17-26\).pdf](http://www.civil.uminho.pt/revista/n37/Artigo%202%20(pag17-26).pdf)> Acesso em: nov. de 2013.

MARCHIONI, M. L. **Desenvolvimento de técnicas para caracterização de concreto seco utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação intertravada**. 2012. Dissertação (mestrado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, EPUSP, São Paulo.

MARIANO, C. A. M.; LUCENA, C. A. **História, trabalho e educação: um estudo sobre a indústria de cerâmica em Monte Carmelo – MG**. 2008.

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

MOTA, M. H. A. **Concreto seco com incorporação de cinzas de madeira de algaroba (prosopisjuliflora) moldado sob pressão**. 2014. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru.

NACERI, A., HAMINA, M. C. Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar. **Waste Management**. v. 29, 2009.

NAKARUMA, J. Todas as cores do concreto. **Revista Técnica**, n. 81. Dez. 2003. Disponível em: <<http://technepini.com.br/engenharia-civil/81/artigo287289-1.aspx>>. Acesso em: jan. 2014.

PAGNUSSAT, D. T. **Utilização de Escória Granulada de Fundição (EGF) em blocos de concreto para pavimentação.** 2004. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

PIOVESAN, A. Z. **Estudo sobre a influência da adição de pigmentos em propriedades de durabilidade e na cromacidade do concreto de cimento Portland branco.** 2009. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

POON, C. S.; CHAN, D. Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. **Construction and Building Material**, v. 20, 2005.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). White concrete: New Avenues of Safety. **Concrete Information**. PCA R & D Serial N. 2618, 2002a.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. What is white concrete. **Concrete Technology Today**. 1999.

RONDON, O. C. **Atividade Pozolânica de Blocos Cerâmicos Produzidos em Laboratório.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2007. 260 p.

SANTOS, J. R. Betão com agregados grossos reciclados de betão. São Paulo, SP. **Revista Concreto**, ISSN 1806-9673, IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, 2005.

SILVA, C. V. **Contribuição ao estudo do desgaste superficial por abrasão em concretos empregados em pisos.** 2011. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

SIMIÉLI, D. et al. Utilização de agregados reciclados em pavimentos intertravados. São Paulo, Brasil. **Revista Exacta**. ISSN 1678-5428, Centro Universitário Nove de Julho, 2007.

SMITH, R. E. **Grand Entrances**, Interlocking Concrete Pavement Magazine, Vol. 10, Number 2, p. 4, May 2003.

SOUSA, J. G. G. **Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto:** aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado. 2001. Dissertação (mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, UnB, Brasília.

SOUTSOS, M. N.; TANG, K.; MILLARD, S. G. Use of recycled demolition aggregate in precast products, phase II: Concrete paving blocks. **Construction and Building Materials**, v. 25, jul 2011.

STORM water runoff solution: permeable interlocking concrete pavement. **Interlocking Concrete Pavement Institute – ICPI**, may. 2011. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=jKH4f6JmdO4>>. Acesso em: Nov. 2014.

TANGO, C. E. S. **Fundamentos de dosagem de concreto para blocos estruturais.** International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, 5., 1994, Florianópolis, SC/Brazil. São Paulo: 1994.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry.** 2<sup>nd</sup> edition. University of Aberdeen. 1997.

UYGUNOGLU, T. U.; TOPCU, I. B.; GENCEL, O. The effect of fly ash content and types of aggregates on the properties of pre-fabricated concrete interlocking blocks (PICBs). **Construction and Building Material**, v. 30, 2012.

VIEIRA, A. A. P. **Estudo do Reaproveitamento de Resíduo de Cerâmica Vermelha como Substituição Pozolânica em Argamassas e Concreto.** Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, 2005.