

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *EM ESTRUTURAS E*
CONSTRUÇÃO CIVIL

**PEÇAS PARA PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO:
ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA NA INCORPORAÇÃO DE
AGREGADO RECICLADO**

Cleber Eduardo Fernandes Leal

São Carlos
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

PEÇAS PARA PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO:
ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA NA INCORPORAÇÃO DE
AGREGADO RECICLADO

Cleber Eduardo Fernandes Leal

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Estruturas e Construção Civil.

Área de Concentração: Sistemas Construtivos

Orientador: Prof. Dr. José da Costa Marques Neto

Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian

São Carlos
2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Cleber Eduardo Fernandes Leal, realizada em 22/02/2018:

Prof. Dr. Jose da Costa Marques Neto
UFSCar

Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira
UFSCar

Prof. Dr. Valdir Schalch
USP

**AOS MEUS PAIS,
MINHA MAIOR RIQUEZA.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter guiado os meus passos, iluminado meus pensamentos, e permitindo que eu cumprisse mais essa importante etapa em minha vida.

Aos meus pais Eduardo e Sonia, meus dois maiores exemplos. Agradeço pela educação que me foi dada, por estarem sempre ao meu lado, incentivando minhas decisões e me fortalecendo nos momentos difíceis.

A todos os demais familiares que torceram por mim, obrigado pelo apoio.

Ao meu orientador José Neto, pelo respeito, pela amizade e por todos os conselhos recebidos durante a elaboração deste trabalho.

Ao meu coorientador Guilherme Parsekian pela amizade, pelo apoio, pela disponibilidade, e sobretudo, pelo intermédio com a Associação Brasileira de Cimento Portland e com a fábrica parceira da pesquisa.

À Ana Casagrande pelo apoio e contato com a Central de Reciclagem.

À Central de Reciclagem de Resíduos da Construção de São José do Rio Preto-SP pelo fornecimento de todos os materiais necessários.

À professora Fernanda Giannotti por ter cedido o Laboratório de Materiais e Componentes (LMC/ UFSCar) para realização dos meus ensaios de caracterização.

Ao técnico José Roberto pela amizade, pela disponibilidade e pela valiosa ajuda durante a caracterização dos materiais.

À GLASSER Pisos e Pré-moldados Ltda. pela fabricação das peças e grande contribuição ao meu trabalho. Em especial, agradeço ao Luciano Lima, sempre solícito e interessado em acompanhar o andamento da pesquisa. Obrigado por todas as importantes informações cedidas.

À Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) pela valorosa participação com a realização dos ensaios de avaliação das peças produzidas. Em especial, agradeço ao Cláudio Silva pela oportunidade, e ao Dayvid Guedes, Cícero Silva, Rubens Montanari e Marcelo Januário pelo carinho, respeito e comprometimento com o meu trabalho.

Ao professor André Christoforo por todos os esclarecimentos e auxílio durante a análise estatística dos resultados.

À todas as amizades estabelecidas durante o programa, em especial ao Raimundo Fagner, Adriana Baptista, Rosana Schmalz, Andre Maebara, Wallison Medeiros, Luciana Barros, Maiara Nicolau, Andréia Martins, Keyzo Totake, Christian Barboza e Fernando Pereira.

Aos amigos de São José do Rio Preto-SP, em especial à Flávia Ribeiro e Gabriel Paulani pela cumplicidade em todos os momentos.

Ao Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos (PPGECiv/UFSCar) por todo o suporte durante o meu mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento à minha pesquisa.

A todos, que direta ou indiretamente, contribuíram com a elaboração deste trabalho.

*“Não há acaso, sina, destino, que possa limitar, impedir
ou controlar a firme resolução de uma alma determinada.”*

(Ella Wheller Wilcox)

LEAL, Cleber E. F. **Peças para pavimento intertravado de concreto**: estudo de viabilidade técnica na incorporação de agregado reciclado. 2018. 153 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2018.

Como grande absorvedor de mão de obra e de insumos, o setor da construção civil é responsável por impulsionar de forma significativa a economia de um país. Por outro lado, em função dessa mesma magnitude, as quantidades de recursos naturais não renováveis consumidos e de resíduos gerados pela indústria da construção civil têm sido alarmantes. Com a crescente geração, as áreas para disposição se encontram sobrecarregadas, e quando não recebem uma destinação correta, os resíduos podem causar sérios danos ao meio ambiente, à saúde e à segurança pública. Tendo em vista essa preocupação, a presente pesquisa teve como principal objetivo analisar a viabilidade técnica em se produzir peças de concreto para pavimentação incorporando resíduos da construção sob a forma de agregados reciclados. Foram coletados agregados reciclados nas usinas de São Carlos-SP e São José do Rio Preto-SP. Ambos foram caracterizados quanto à granulometria, massa unitária, massa específica, absorção de água e teor de material pulverulentos. Para a fabricação das peças foi escolhida a areia reciclada de Rio Preto, por esta conter apenas resíduos de concreto e argamassa em sua composição. Definiu-se 4 traços distintos, contando com 0%, 10%, 20%, 30% de substituição em massa da areia natural pela areia reciclada. As peças foram produzidas em escala industrial e com o uso de máquina vibroprensa, em uma fábrica parceira do estudo. Após a produção, as peças foram levadas à Associação Brasileira de Cimento Portland, onde foram avaliadas, aos 7 e 28, dias segundo a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, abrasão e absorção de água. Aos 28 dias, os traços contendo agregados reciclados forneceram resultados satisfatórios e superiores ao concreto de referência. Para compressão e tração por compressão diametral, os melhores resultados foram obtidos com 20% de areia reciclada, atendendo aos limites mínimos exigidos pelas normas brasileira e britânica, respectivamente. Todos os traços atenderam aos limites de abrasão propostos pelas normas, sendo o menor desgaste superficial constatado nas peças com 10% de resíduo. Para a absorção de água, os melhores resultados foram fornecidos pelos traços com 10 e 20% de substituição. Somente o traço com 30% absorveu água além do limite proposto em norma. A análise estatística dos resultados comprovou que a substituição da areia natural pela areia reciclada, em todos os seus níveis, não alterou significativamente os valores das propriedades das peças. Desse modo, concluiu-se que a substituição de até 30% do teor de areia natural por areia reciclada é, de fato, viável tecnicamente, sendo que um possível teor ótimo de substituição esteja situado entre 20% e 30% ou próximo destes limites.

Palavras-chave: Resíduos da construção civil. Agregados reciclados. Pavimento intertravado de concreto. Peças de concreto para pavimentação.

LEAL, Cleber E. F. **Interlocking concrete paving blocks: technical feasibility on incorporation of recycled aggregate.** 2018. 153 p. Dissertation project (Masters in Structures and Civil Construction) - Federal University of São Carlos. São Carlos, 2018.

As a major absorber of labor and inputs, the construction sector is responsible for significantly boosting a country's economy. On the other hand, due to this magnitude, the quantities of non-renewable natural resources consumed and waste generated by the civil construction industry have been alarming. With increasing generation, disposal areas are overloaded, and when they are not properly disposed of, waste can cause serious damage to the environment, health and public safety. Considering this concern, the present research had as main goal to analyze the technical feasibility in producing concrete paving blocks incorporating construction waste in the form of recycled aggregates. Recycled aggregates were collected at the São Carlos-SP and São José do Rio Preto-SP plants. Both were characterized as granulometry, unit weight, density, water absorption and powdery material. For the pieces manufacture, the recycled sand from Rio Preto was chosen, because it only contained concrete and mortar residues in its composition. It was defined 4 different mixes, counting with 0%, 10%, 20%, 30% of mass substitution of the natural sand by the recycled sand. The pieces were produced on an industrial scale and with the use of vibropress machine, in a partner factory of the study. After the production, the pieces were taken to the Brazilian Portland Cement Association, where they were evaluated at 7 and 28 days according to the compressive strength, splitting tensile strength, abrasion and water absorption. At 28 days, the mixes containing recycled aggregates provided satisfactory results and superior to the reference concrete. For compressive strength and splitting tensile strength, the best results were obtained with 20% of recycled sand, meeting the minimum limits required by Brazilian and British standards, respectively. All mixes met the abrasion limits proposed by the standards, with the lowest surface wear observed in the pieces with 10% of residue. For water absorption, the best results were provided by 10 and 20% substitution mixes. Only the mix with 30% absorbed water beyond the limit proposed in standard. The statistical analysis of the results showed that the replacement of natural sand by recycled sand at all levels did not significantly change the values of the properties of the pieces. Thus, it was concluded that the substitution of up to 30% of the natural sand content by recycled sand is, in fact, technically feasible, with a possible optimal substitution content between 20% and 30% or near theses limits.

Keywords: Construction waste. Recycled aggregates. Interlocking concrete pavement. Concrete paving blocks.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ACR – Agregado de resíduo de concreto

ARM – Agregado de resíduo misto

PCP – Peças de Concreto para Pavimentação

PNRS – Política Nacional dos Resíduos Sólidos

RCC – Resíduos da Construção Civil

SSS – Saturado Superfície Seca

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Via Ápia hoje	22
Figura 2 - Execução do pavimento com paralelepípedos	24
Figura 3 - Pavimento com pedras tipo pé de moleque em Tiradentes-MG	24
Figura 4 - Pavimento revestido com peças de madeira.....	25
Figura 5 - Aplicações das PCP realizadas ultimamente	26
Figura 6 - Estrutura do pavimento intertravado	28
Figura 7 - Peças de concreto do tipo I	29
Figura 8 - Peças de concreto do tipo II	29
Figura 9 - Peças de concreto do tipo III	30
Figura 10 - Peças de concreto do tipo IV	30
Figura 11 - Peças do tipo grelha	31
Figura 12 - Tipos de assentamento mais utilizados	32
Figura 13 - Deslocamentos impedidos pelo intertravamento das peças.....	33
Figura 14 - Artefatos produzidos com concreto seco	34
Figura 15 - Resistência à compressão em função da elevação da relação água/cimento....	34
Figura 16 - Partes constituintes de uma vibroprensa	37
Figura 17 - Mecanismo de funcionamento da gaveta: a) gaveta recuada; b) gaveta sobre a fôrma.....	38
Figura 18 - Sistema de compressão	38
Figura 19 - Forma para produção de PCP	39
Figura 20 - Detalhe do sistema de mesa vibratória	40
Figura 21 - Valores ótimos para os parâmetros de vibração	41
Figura 22 - Influência da aferição do equipamento na resistência final das peças	42
Figura 23 - Ciclo produtivo de PCP em uma máquina vibroprensa; a) Posicionamento da forma e avanço da gaveta; b) Alimentação da forma; c) Retorno da gaveta à posição original; d) prensagem/compactação; e) Subida da sapata e da forma liberando as peças acabadas.....	43
Figura 24 - Ensaio de resistência à compressão em corpo de prova cilíndrico	48
Figura 25 - Ensaio de compressão em PCP	48
Figura 26 - Proposta de deslocamento para a Igreja de São Pedro.....	50
Figura 27 - Determinação da resistência à tração por compressão diametral	51
Figura 28 - Ensaio de tração por compressão diametral em PCP	52
Figura 29 - Exemplo de RCC	61
Figura 30 - Etapas do programa experimental	70
Figura 31 - Coleta dos agregados naturais: a) estoque; b) coleta da areia de rio; c) coleta do pó de pedra; d) coleta do pedrisco.	80
Figura 32 - Coleta de areia reciclada em São Carlos: a) resíduo misto; b) britador; c) pilha de areia reciclada; d) pilha após coleta.	81
Figura 33 - Usina de Reciclagem de RCC de Rio Preto: a) britador; b) resíduo cinza; c) fábrica de artefatos; d) artefatos produzidos com resíduos.	83
Figura 34 - Coleta de agregados reciclados em São José do Rio Preto: a) coleta da areia de resíduo cinza reciclado; b) coleta de pedrisco de resíduo cinza reciclado.	84
Figura 35 - Quarteamento do agregado miúdo: a) homogeneização; b) divisão; c) material dividido; d) final do quarteamento.	86
Figura 36 - Quarteamento do agregado graúdo: a) cone achatado; b) divisão; c) material dividido; d) final do quarteamento.	87
Figura 37 - Obtenção do teor de umidade total: a) pesagem inicial; b) secagem em estufa.	88
Figura 38 - Ensaio de análise granulométrica: a) misturador mecânico para agregados miúdos; b) frações retidas nas peneiras; c) misturador para agregado graúdo; d) frações retidas nas peneiras.	89
Figura 39 - Ensaio de massa unitária: a) preenchimento do recipiente; b) compactação da primeira camada; c) rasamento da superfície; d) pesagem.	91

Figura 40 - Determinação do teor de material pulverulento: a) amostra vertida sobre as peneiras; b) águas da primeira e última lavagem; c) retorno da amostra lavada em recipiente metálico.	92
Figura 41 - Determinação da massa específica para agregados miúdos: a) agregado na condição SSS; b) adição de água; c) banho térmico.	94
Figura 42 - Determinação da massa específica para agregados graúdos: a) extração da umidade superficial; b) pesagem no estado SSS; c) amostra submersa para pesagem.	95
Figura 43 - Ensaio de absorção de água: a) amostras imersas; b) secagem; c) agregado na condição SSS.	96
Figura 44 - Fabricação das PCP: a) vibroprensa; b) inserção da areia reciclada; c) regularização após desforma; d) peças prontas.	99
Figura 45 - Ensaio de avaliação das PCP	100
Figura 46 - Preparação das peças: a) amostras identificadas; b) imersão em água; c) medição; d) retífica; e) pintura da superfície para ensaio de abrasão.....	101
Figura 47 - Ensaio de absorção de água das PCP: a) pesagem da peça seca; b) peças submersas.	102
Figura 48 - Ensaio de resistência à abrasão: a) superfície da PCP pronta para o ensaio; b) posicionamento da PCP; c) peças após o ensaio.....	103
Figura 49 - Ensaio de resistência à compressão: a) prensa; b) posição da peça durante o ensaio; c) peça rompida.	103
Figura 50 - Ensaio de tração por compressão diametral: a) PCP posicionada; b) ensaio em andamento; c) PCP rompida.	104
Figura 51 - Curva granulométrica da areia natural	107
Figura 52 - Curva granulométrica do pó de pedra.....	108
Figura 53 - Curva granulométrica do pedrisco natural.....	109
Figura 54 - Curva granulométrica da areia de resíduo cinza	113
Figura 55 – Resistência à compressão dos 7 aos 28 dias	117
Figura 56 - Resistência à tração por compressão diametral.....	119
Figura 57 – Variação nos resultados das propriedades ensaiadas: (a) compressão, (b) tração por compressão diametral, (c) abrasão e (d) absorção de água.....	123
Figura 58 - Modelo geométrico utilizado na estimativa da ff em função da fc considerando os resultados de todos os tratamentos	126
Figura 59 - Comparação entre valores os valores experimentais e curvas de regressão... ..	128
Figura 60 - Comparação das regressões para o desgaste superficial.....	130
Figura 61 - Curvas granulométricas da areia de resíduo misto	150
Figura 62 - Curvas granulométricas do pedrisco reciclado.....	152

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos da ABNT NBR 9781: 2013.....	44
Tabela 2 - Requisitos da BS EN 1338: 2003.....	45
Tabela 3 - Requisitos nos Estados Unidos e Canadá	46
Tabela 4 – Comparação entre ensaios de resistência à compressão e tração por compressão diametral.....	53
Tabela 5 - Resistência à tração por compressão diametral estimada com base na literatura.	55
Tabela 6 - Propriedades químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado	78
Tabela 7 - Dados técnicos do plastificante CQ PRESS MIX TOP	85
Tabela 8 - Traços teóricos para fabricação das PCP	98
Tabela 9 - Traços efetivamente empregados.....	99
Tabela 10 - Informações adicionais sobre a produção das PCP	100
Tabela 11 - Tratamentos experimentais.....	105
Tabela 12 - Granulometria da areia de rio.....	108
Tabela 13 - Granulometria do pó de pedra	109
Tabela 14 - Granulometria do pedrisco.....	110
Tabela 15 - Demais propriedades dos agregados miúdos naturais.....	111
Tabela 16 - Demais propriedades do pedrisco natural.....	112
Tabela 17 - Granulometria da areia de resíduo cinza.....	113
Tabela 18 - Demais propriedades da areia de resíduo cinza	114
Tabela 19 - Resultados de resistência à compressão aos 7 dias.....	116
Tabela 20 - Resultados de resistência à compressão aos 28 dias.....	116
Tabela 21 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias.....	118
Tabela 22 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.....	119
Tabela 23 - Resultados de resistência à abrasão aos 7 dias	120
Tabela 24 - Resultados de resistência à abrasão aos 28 dias	120
Tabela 25 - Resultados de absorção de água aos 7 dias.....	121
Tabela 26 - Resultados de absorção de água aos 28 dias.....	122
Tabela 27 - Melhores ajustes das relações entre f_c e f_t por tratamento	125
Tabela 28 - Melhores ajustes das relações $AB=f(f_t)$, $AB=f(f_c)$, $AA=f(f_c)$ e $AA=f(f_t)$ considerando o conjunto com todos os tratamentos.....	129
Tabela 29 - Granulometria da areia de resíduo misto	150
Tabela 30 - Demais propriedades da areia de resíduo misto	151
Tabela 31 - Granulometria do pedrisco reciclado.....	152
Tabela 32 - Demais propriedades do pedrisco reciclado.....	153

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa.....	17
1.2	Objetivos.....	19
1.2.1	Geral	19
1.2.2	Específicos.....	19
1.3	Descrição dos Capítulos.....	20
2.	PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO	21
2.1	Breve Histórico da Pavimentação Intertravada.....	21
2.1.1	Blocos de argila.....	23
2.1.2	Pedras talhadas manualmente.....	23
2.1.3	Blocos de madeira.....	24
2.1.4	Peças pré-fabricadas de concreto.....	25
2.2	Estrutura Típica do Pavimento Intertravado de Concreto.....	27
2.3	Apectos Positivos	28
2.4	Formato das Peças.....	29
2.5	Tipos de Assentamento	31
2.6	O Princípio do Intertravamento	32
2.7	O Concreto Seco	34
2.8	Processo Produtivo das PCP	35
2.8.1	Processo dormido	36
2.8.2	Processo virado ou batido	36
2.8.3	Processo prensado.....	36
2.9	Requisitos e Normalização.....	44
2.9.1	Normas nacionais.....	44
2.9.2	Norma britânica.....	45
2.9.3	Normas norteamericana e canadense.....	45
2.9.4	Resistências exigidas em outros países.....	46
2.10	Avaliação das Propriedades Mecânicas.....	47
2.10.1	Determinação da resistência característica à compressão.....	47
2.10.2	Determinação da resistência à tração por compressão diametral.....	49
2.10.3	Comparação entre os ensaios.....	52
2.10.4	Correlação entre as principais propriedades mecânicas.....	54
3.	AGREGADOS PARA CONCRETO	56
3.1	Classificação dos Agregados.....	56
3.2	Influência dos Agregados nas Propriedades do Concreto	57
3.2.1	Dimensão máxima e composição granulométrica.....	58
3.2.2	Forma e textura das partículas	58
3.2.3	Porosidade, absorção de água e umidade superficial.....	58
3.2.4	Resistências mecânicas do agregado	59
3.3	Agregados Reciclados.....	59

3.4	Resíduos da Construção Civil (RCC)	60
3.5	A política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS)	63
3.5.1	O resíduo da construção civil sob a ótica da PNRS.....	64
3.5.2	Normas técnicas relacionadas ao manejo de RCC.....	66
3.6	Particularidades dos Agregados Reciclados de RCC	67
3.7	Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de RCC	69
3.7.1	Porosidade e massa específica.....	69
3.7.2	Resistência à compressão.....	70
3.7.3	Módulo de deformação e fluência.....	70
3.7.4	Retração.....	71
3.7.5	Outras propriedades.....	71
3.8	Demais Pesquisas Envolvendo o Uso de Resíduos na Fabricação de PCP	71
4.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	76
4.1	Materiais	78
4.1.1	Cimento portland.....	78
4.1.2	Agregados naturais	79
4.1.3	Agregados reciclados.....	80
4.1.4	Água.....	84
4.1.5	Aditivo	84
4.2	Ensaio de Caracterização dos Agregados	85
4.2.1	Preparação das amostras.....	85
4.2.2	Teor de umidade total.....	88
4.2.3	Ensaio de granulometria.....	89
4.2.4	Determinação da massa unitária e do volume de vazios	89
4.2.5	Teor de materiais pulverulentos.....	91
4.2.6	Determinação da massa específica.....	92
4.2.7	Determinação da absorção de água.....	95
4.3	Definição do Traço e dos Teores de Substituição	96
4.3.1	Escolha do traço de referência	96
4.3.2	Escolha do agregado a ser substituído.....	96
4.3.3	Definição dos teores de substituição	97
4.4	Fabricação das Peças de Concreto para Pavimentação	98
4.5	Ensaio com as Peças Produzidas	100
4.5.1	Preparação das peças para os ensaios.....	101
4.5.2	Determinação da absorção de água.....	101
4.5.3	Determinação da resistência à abrasão.....	102
4.5.4	Determinação da resistência à compressão	103
4.5.5	Determinação da resistência à tração por compressão diametral.....	104
4.6	Análise Estatística dos Resultados	104
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	107
5.1	Caracterização dos Agregados Naturais	107
5.1.1	Análise granulométrica	107
5.1.2	Demais propriedades dos agregados naturais.....	110
5.2	Caracterização do Agregado Reciclado	113

5.2.1	Análise granulométrica	113
5.2.2	Demais propriedades do agregado reciclado.....	114
5.3	Avaliação das Peças Produzidas	115
5.3.1	Determinação da resistência à compressão	115
5.3.2	Determinação da resistência à tração por compressão diametral.....	118
5.3.3	Determinação da resistência à abrasão.....	120
5.3.4	Determinação da absorção de água.....	121
5.4	Análise Estatística.....	122
5.4.1	Variação por tratamento obtida nos resultados dos ensaios.....	122
5.4.2	Influência do agregado reciclado e idade das peças nos valores das propriedades testadas	123
5.4.3	Estimativa das propriedades em função da idade das peças e da quantidade de agregado reciclado	124
5.4.4	Resistência à tração por compressão diametral em função da resistência à compressão.....	125
5.4.5	Absorção de água e abrasão em função das principais resistências mecânicas 129	
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	131
6.1	Avaliação das Propriedades Físicas e Mecânicas das Peças Segundo à Normalização	131
6.2	Relação entre Propriedades Físicas e Mecânicas das Peças	132
6.3	Viabilidade Técnica no Uso da Areia Reciclada.....	133
6.4	Sugestões para Pesquisas Futuras	134
	REFERÊNCIAS	136
	ANEXO.....	146
	Resultados de Resistência à Compressão Obtidos na Fábrica.....	146
	APÊNDICE	150
	Agregados não Empregados na Produção das Peças.....	150
	Areia reciclada de resíduo misto coletada em São Carlos-SP.....	150
	Pedrisco de resíduo cinza coletado em São José Do Rio Preto-SP	152

1. INTRODUÇÃO

Diante da facilidade na execução e manutenção, bem como das inúmeras aplicações possíveis, o uso de pavimentos intertravados tem aumentado significativamente ao longo dos últimos anos. Algo notado, sobretudo, a partir da década de 1980, quando a disponibilidade de equipamentos de grande produtividade e o elevado grau de precisão dimensional fizeram com que a indústria de pavimentos intertravados tomasse rapidamente grandes proporções, no Brasil e no mundo. O material que antes era utilizado apenas em áreas que demandavam efeitos arquitetônicos ou paisagísticos, se tornou algo único, extremamente versátil, e compatível com a harmonização de qualquer tipo de pavimento (GODINHO, 2009).

Como grande absorvedor de mão de obra e de insumos, o setor da construção civil possui importância significativa para a economia do país. De acordo com Samiele (2010), a geração de grandes investimentos anuais e participação expressiva no Produto Interno Bruto (PIB) conferem um efeito multiplicador à economia local, gerando receitas, empregos, potencializando a retomada de desenvolvimento e a superação de desigualdades econômicas e sociais no país.

Por outro lado, em função dessa mesma magnitude, a Indústria da Construção Civil é responsável por grandes impactos ao meio ambiente. As quantidades de recursos naturais consumidos e de resíduos gerados são alarmantes. Yanik (2016) afirma que a demanda mundial para o uso de agregados superará os 51 milhões de toneladas em 2019.

Nos países da União Europeia, cerca de 25 a 30% de todos os resíduos gerados são provenientes da indústria da construção civil (FISCHER; WERGE; REICHEL, 2009). No Brasil, no ano de 2016, a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) contabilizou a coleta de 45,12 milhões de toneladas de resíduos provenientes de construções e demolições em municípios das regiões Norte, Nordeste, Sul, Sudeste e Centro-Oeste. Um montante que exige atenção especial quanto ao destino final dado aos resíduos de construção e demolição, dado que a quantidade total gerada é ainda maior, já que os municípios, via de regra, coletam apenas os resíduos lançados nos logradouros públicos (ABRELPE, 2017).

Com a crescente geração dos resíduos, as áreas para disposição, a qual deveria ser a últimas das opções adotadas, também se encontram sobrecarregadas. Algo que, combinado à expansão dos grandes centros urbanos, pode representar grande perigo à

população. Como exemplo têm-se o caso de um deslizamento de cerca de $2,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ de solo em um aterro de Resíduos da Construção Civil (RCC), ocorrido em 20 de dezembro de 2015 na cidade de Shenzhen, ao sul da China, onde cerca de 73 pessoas morreram e 33 edifícios foram afetados. O incidente foi causado pela combinação de chuvas intensas, a precariedade dos sistemas de drenagem e, sobretudo pelo excesso de resíduo de construção e demolição contido no aterro. A licença para disposição de resíduos já havia expirado em fevereiro do mesmo ano, apesar disso, grandes volumes de RCC continuaram sendo dispostos no aterro (YANG et al., 2017).

Os autores afirmam ainda que, desde então, o incidente têm estimulado entre os pesquisadores chineses discussões acerca da necessidade não só de uma investigação minuciosa antes de se iniciar as atividade em aterros (com uma análise geotécnica, avaliação do solo, água e vegetação), bem como de contornar a falta de legislação chinesa voltada ao gerenciamento dos RCC, abordando formas de mitigação/prevenção de deslizamentos de terra em aterros da construção civil, promovendo a adoção da política dos 4 R's (reduzir, reutilizar, reciclar e recuperar) e incentivando a minimização na própria geração do resíduo.

Nesse sentido, Santos (2012) aponta o próprio setor da construção civil como possuidor de um alto potencial para incorporação dos resíduos gerados; em função da necessidade de materiais, da variedade de insumos utilizados, bem como da redução dos custos de produção promovida. Yanik (2016) declara que o uso do pó de pedra, do agregado reciclado de concreto, e de agregados alternativos como a cinza volante e a escória irá superar o consumo de areia e pedrisco em um curto prazo. Segundo o autor, isso ocorrerá sobretudo nos centros urbanos, onde a demanda por agregados é maior, e a extinção das jazidas próximas fornecerá altos preços aos agregados naturais.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os pavimentos intertravados destacam-se por suas características funcionais, as quais propiciam simplicidade, tanto no processo construtivo quanto de manutenção. Além disso, sua eficiência estética, facilidade de estocagem e a homogeneidade das peças são qualidades reconhecidas (SAMIELE, 2010). De acordo com Interpavi (2016), a pavimentação intertravada representa uma opção intermediária entre os pavimentos rígido (concreto) e flexível (asfalto), somando vantagens de ambos e se configurando como uma alternativa viável, técnica e economicamente. Vieira (2014) aponta ainda que essa tecnologia pode ser considerada ecologicamente correta, uma vez que os pavimentos intertravados facilitam a percolação da água, contribuindo com a diminuição do risco de enchentes e permitindo a reposição das reservas subterrâneas de água.

Segundo Cruz (2003), em função do crescimento no uso deste tipo de pavimentação, nota-se na maioria dos países uma grande revisão nos processos normativos, com o intuito de obter um consenso acerca dos tipos de ensaios a serem empregados na verificação de desempenho das peças de concreto para pavimentação, bem como estabelecer especificações de qualidade para controles de recebimento e das técnicas de execução.

No que se refere às resistências mecânicas das peças, ainda não há concordância sobre os ensaios adotados para simular as solicitações em serviço. Alguns países estipulam ensaios de compressão, outros de tração na flexão, outros ainda tração por compressão diametral. A geometria dos corpos de prova também varia. Alguns ensaios são realizados sobre peças inteiras, outros utilizam corpos de prova extraídos das mesmas, com formatos, ora cilíndricos, ora cúbicos. Outro questionamento que envolve a experimentação das peças de concreto para pavimentação consiste no fato de que embora o ensaio de Determinação de Resistência à Tração por Compressão Diametral (também conhecido por Ensaio de Tração Indireta) seja de origem brasileira, no Brasil, o mesmo ainda não é empregado como critério de avaliação e aceitação.

Existe ainda a necessidade em se correlacionar as propriedades físicas e mecânicas das peças. Trata-se de um assunto relevante, porém pouco abordado no âmbito nacional. Os poucos trabalhos existentes não deixam claro, por exemplo, de que maneira propriedades como resistência ao desgaste superficial (abrasão) e absorção de água são influenciadas pela resistência à compressão das peças. Assim, muitas das vezes, peças são produzidas com elevados consumos de cimento e resistências à compressão altas, visando atender indiretamente às demais propriedades, sem saber ao certo de que forma esse ganho ocorre.

Segundo Pinto (1999), os resíduos de construção e demolição são gerados em grandes volumes, e quando não recebem soluções adequadas acabam por impactar o ambiente urbano, comprometendo a paisagem local, o tráfego de pedestres e de veículos, promovendo a obstrução dos sistemas de drenagem urbana, de córregos e interferência na drenagem superficial. Além disso, uma disposição incorreta pode originar locais propícios à proliferação de vetores de doenças.

Para Nascimento (2016), as empresas estão se conscientizando de que a geração de grandes quantidades de resíduos gera custos, uma vez que requer seu tratamento e disposição em locais apropriados. Junto à redução dos custos, buscam também minimizar os impactos ambientais e ao mesmo passo promover o aumento da credibilidade perante o mercado consumidor. Dentre as possíveis ações a serem tomadas para desafogar as áreas de disposição final, a inserção dos RCC como matérias-primas na fabricação de concretos tem se mostrado uma estratégia bastante atrativa. O emprego de materiais alternativos como

substitutos do cimento ou dos agregados pode gerar concretos de qualidade satisfatória em função do uso, e ao mesmo passo, eliminar a necessidade de disposição, diminuindo a sobrecarga dos aterros já existentes e poupando as jazidas naturais (SANTOS, 2012).

Deste modo, a escolha do tema de pesquisa também se justifica pela necessidade em conciliar a grande quantidade de resíduos gerados pela indústria da construção civil e a possibilidade de incorporação dos mesmos no próprio setor, sob a forma de materiais reciclados (em especial, na produção de peças de concreto para pavimentação); designando ações sustentáveis, que visam contribuir com a minimização na geração de resíduos e ao mesmo passo com a conservação dos recursos naturais não renováveis.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 GERAL

Analisar a viabilidade técnica da substituição parcial de agregados naturais por agregados reciclados de RCC na produção de peças de concreto para pavimentação intertravada.

1.2.2 ESPECÍFICOS

- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas de peças produzidas com diferentes teores de adição do agregado reciclado de RCC com base na normalização nacional (ABNT NBR 9781: 2013) e internacional (BS EN 1338: 2003);
- Determinar um teor ótimo de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de RCC;
- Evidenciar a relação existente entre as resistências mecânicas: à compressão (segundo ABNT NBR 9781: 2013) e à tração por compressão diametral (segundo BS EN 1338: 2003), bem como as vantagens e desvantagens na realização de cada ensaio;
- Evidenciar a relação existente entre essas duas principais resistências mecânicas e a resistência à abrasão das peças produzidas;
- Evidenciar a relação existente entre as duas principais resistências mecânicas e a absorção de água das peças.

1.3 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Este trabalho é composto por sete capítulos, os quais se encontram organizados da seguinte maneira:

No primeiro capítulo foi introduzido de uma forma geral o assunto a ser abordado, ressaltando principalmente a expansão dos pavimentos intertravados ao longo dos últimos anos, a importância da construção civil como grande absorvedora de insumos e seu impacto na geração de resíduos. Este capítulo trouxe também os objetivos principais e específicos da pesquisa, bem como os principais pontos que justificaram o desenvolvimento da mesma.

O segundo e terceiro capítulos trarão uma revisão teórica, expondo conceitos e definições necessários ao entendimento deste trabalho e assimilados mediante o estudo de outros trabalhos relacionados ao tema. No segundo capítulo serão abordados os temas pavimento intertravado e peças de concreto para pavimentação, ressaltando sua origem, aspectos técnicos referentes à produção, uso e certificação. O terceiro capítulo versará sobre os agregados e sua influência nas propriedades do concreto. Em especial, os agregados reciclados de Resíduos da Construção Civil.

Todos os aspectos referentes ao programa experimental, compreendendo a execução dos ensaios, os materiais e o método utilizados, serão apresentados no quarto capítulo.

O quinto capítulo explicitará todos os resultados obtidos e a discussão pertinente.

Por fim, o sexto e último capítulo trará as considerações finais acerca do que foi constatado durante a análise dos resultados obtidos.

2. PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos relacionados às Peças de Concreto para Pavimentação (doravante designadas pela sigla PCP) e ao Pavimento Intertravado de Concreto como sendo sua principal forma de aplicação. O capítulo se inicia com um breve histórico, ressaltando a origem dos pavimentos intertravados e sua evolução ao longo dos anos. Em seguida, a estrutura típica do pavimento intertravado de concreto é ilustrada, bem como seu princípio de funcionamento. Por fim, o processo de fabricação das PCP é abordado, juntamente com ensaios de verificação e requisitos propostos pela normalização local e internacional.

2.1 BREVE HISTÓRICO DA PAVIMENTAÇÃO INTERTRAVADA

Segundo Fernandes (2016), a origem da pavimentação intertravada remete à 2500 a.C. quando os habitantes da ilha de Creta, na Grécia, já utilizavam pedras justapostas apoiadas sobre uma camada de areia visando facilitar a acomodação e fixação dos elementos na composição dos caminhos.

Para Knapton (1996), os primeiros povos a unirem locais distantes por grandes trechos pavimentados foram os Etruscos, que dominaram a maior parte da Itália durante o período de 800 a 350 a.C. Antes deles, o que existia eram apenas pequenas trilhas. As estradas Etruscas eram cortadas em meio ao solo rochoso, possuindo cerca de 3 m de largura e 2,5 m de profundidade. Suas vias urbanas eram revestidas com pedras-de-mão, visando garantir a segurança do tráfego quando a superfície do pavimento estivesse molhada. Possuíam barreiras artificiais para guiar os veículos, e seus 15 m de largura já eram concebidos para permitir ultrapassagens e que os mesmos fossem estacionados.

Em seguida vieram os povos Romanos, os quais receberam grande contribuição para a expansão de seu império, herdando muito dos conhecimentos dos Etruscos sobre pavimentação. À medida que conquistavam novas regiões surgia também a necessidade de estabelecer ligações entre estas e o restante do Império, com a finalidade de garantir o rápido deslocamento de tropas militares em caso de necessidade bem como transportar tesouros e riquezas obtidas até a capital (KNAPTON, 1996). Entre 400a.C e 200a.C, os romanos intensificaram a construção de seus caminhos compreendendo uma extensão de mais de

120.700 quilômetros. Cerca de vinte e nove estradas saíam de Roma e se conectavam a tantas outras (MULLER, 2005).

As vias romanas eram construídas de diferentes formas levando em conta a população local e demanda de tráfego, a disponibilidade de matéria-prima, condições climáticas e também de relevo. As vias mais solicitadas, como a dos centros urbanos eram revestidas com pedras talhadas manualmente em formas retangulares e poligonais, enquanto as demais recebiam cascalho (KNAPTON, 1996).

Um exemplo de via construída com essa tecnologia e que resiste até hoje é a via Ápia, nome atribuído em homenagem ao censor romano Appius Claudius que deu início à construção. Pavimentada com pequenas peças de pedras aparelhadas sob formas octogonais em grande parte dos seus 584 km de extensão, foi uma das ruas mais importantes do império romano por ligar a cidade de Roma até o sul da Itália, provendo mantimentos, tropas e armamentos (MULLER, 2005). A Figura 1 ilustra uma foto atual da Via Ápia.

Figura 1 - Via Ápia hoje



Fonte: Garza (2016)¹

Mesmo construídos há mais de 25 séculos, os caminhos romanos eram dotados de características inéditas. Alguns caminhos contavam com aterros construídos sobre o terreno natural, a fim de fornecer maior visibilidade contra os possíveis ataques de povos hostis. O material empregado nestes aterros provinha de escavações realizadas nos dois lados das vias, acompanhando paralelamente toda a sua extensão e dando origem a canais de drenagem natural. Escavações arqueológicas realizadas no final do século 19, em Londres, sob famosas ruas da época da Idade Média, também evidenciaram a presença de estruturas

¹ GARZA, S. **HISTORY HIKING THROUGH THE VIA APPIA ANTICA PART 1**. Disponível em: <<https://historyhiker.com/2014/08/15/history-hiking-through-the-via-appia-antica-part-1/>>. Acesso em: out. 2016.

compostas por três ou quatro camadas de materiais com diferentes espessuras e granulometrias. Naquela época, os romanos já reconheciam a importância de se classificar os tipos de areia utilizada na pavimentação de seus caminhos. As areias eram separadas entre as de rio, as extraídas dos canais e as advindas do solo natural. Também eram misturadas entre si e com a adição de cal ou calcário davam origem a um tipo de argamassa empregada no assentamento de seixo rolado ou mesmo pedras de mão espalhadas sobre o caminho. A minúcia dos procedimentos de execução evidencia a preocupação com a capacidade estrutural do pavimento por parte dos romanos (KNAPTON, 1996).

A partir desse momento, o processo evolutivo das peças empregadas de pavimentação segmentadas foi marcado basicamente pelo emprego de quatro tipos de materiais: os blocos de argila, as pedras talhadas e aparelhadas manualmente, os blocos de madeira e por fim as PCP. Todos serão apresentados a seguir com base nas informações extraídas do trabalho desenvolvido por Cruz (2003).

2.1.1 BLOCOS DE ARGILA

Começaram a ser utilizados há cerca de 5.000 anos, na Mesopotâmia. Eram aplicados sobre uma camada de betume buscando melhor aderência com o leito do terreno, no entanto, a durabilidade não era tão satisfatória devido ao excessivo desgaste superficial promovido pela ação do tráfego da época. Assim, sua utilização ficava restrita a regiões as quais não dispunham de outro material de maior resistência. No final do século XIX, apareceram os primeiros fornos que queimavam os blocos em altas temperaturas, gerando peças com um aumento significativo de resistência mecânica. Em 1926 os norte-americanos deram início às pesquisas experimentais em pavimentos revestidos com blocos de argila queimados.

2.1.2 PEDRAS TALHADAS MANUALMENTE

Conforme mencionado anteriormente, essa tecnologia foi amplamente utilizada pelos Romanos. As pedras talhadas manualmente eram preferidas para a construção de vias que exigiam grande resistência ao desgaste. Durante o século XVIII, já se notava grande preocupação em manter juntas estreitas entre blocos, o que demandava maiores esforços na obtenção de peças com dimensões homogêneas. Os blocos possuíam entre 90 e 180 mm de espessura. Ainda no mesmo século, surgiam os primeiros modelos de assentamento em fileiras e espinha de peixe. No século XX, a fim de diminuir o barulho proveniente do tráfego as juntas passaram a ser seladas com argamassa de cimento ou com uma mistura de asfalto e areia.

No Brasil, este tipo de pavimento é exemplificado pelos paralelepípedos (ou paralelos) e pelo pavimento pé de moleque. Os paralelepípedos têm dimensões em torno de 120 mm de

largura, 200 mm de comprimento e 200 mm de altura, sendo assentados sobre uma espessa camada de areia e com juntas de até 20 mm. Atualmente ainda são muito utilizados em cidades do interior do país e áreas como baias de ônibus nas grandes cidades. As pedras tipo pé de moleque, por sua vez, são mais antigas que os paralelepípedos. Foram trazidas pelos portugueses por volta de 1600 para construção de vias facilitassem o transporte do ouro explorado nas cidades mineiras de Tiradentes, São João Del Rey e Ouro Preto até a cidade de Paraty no Rio de Janeiro onde era embarcado nos navios que o levavam a Portugal. Tinham formatos irregulares, dimensões de até 500 mm e eram assentadas diretamente sobre o terreno natural. As Figuras 2 e 3 apresentam o pavimento com paralelepípedos e o tipo pé-de-moleque, respectivamente.

Figura 2 - Execução do pavimento com paralelepípedos



Fonte: EBRJ (2017)²

Figura 3 - Pavimento com pedras tipo pé de moleque em Tiradentes-MG



Fonte: Guri estradeiro (2016)³

2.1.3 BLOCOS DE MADEIRA

Os revestimentos compostos por blocos de madeira eram empregados no início do século XIX com o intuito de diminuir o ruído causado sobretudo pelo tráfego de carruagens equipadas com rodas de ferro. As peças possuíam em média 125 mm e 250 mm de comprimento por cerca de 75 e 100 mm de largura, e durante a execução do pavimento eram envolvidas por uma camada de mastiche betuminoso polvilhado com pequenos grãos de pedra a fim de auxiliar sua ancoragem à base. Embora eficientes na redução do barulho

² EBRJ - Empreiteira e distribuidora de paralelepípedos e pedras portuguesas (2017). Disponível em: <<http://www.paralelepipedorio.com.br/fotos/paralelepipedo>>. Acesso em: out. 2017.

³ Guri Estradeiro (2016). **Tiradentes – MG – Brasil**. Disponível em: <<https://guriestradeiro.blogspot.com.br/2014/03/tiradentes-mg-brasil-textos-e-fotos.html?q=tiradentes-MG>>. Acesso em: out. 2016.

causado pelo tráfego, os blocos de madeira deixavam a desejar quanto à segurança e por tornarem-se escorregadios quando molhados caíram totalmente em desuso após o aparecimento dos automóveis com pneus de borracha. A Figura 4 ilustra a rua South Camac, na cidade de Filadélfia, EUA, revestida em 1917 com blocos de madeira de carvalho.

Figura 4 - Pavimento revestido com peças de madeira



Fonte: Saffron (2015)⁴

2.1.4 PEÇAS PRÉ-FABRICADAS DE CONCRETO

O processo de evolução dos materiais até a chegada das peças de concreto para pavimentação aconteceu de forma natural. A primeira peça pré-fabricada foi produzida no final do século XIX tendo algumas patentes registradas já antes da primeira guerra mundial. Em pouco tempo foram reconhecidas por apresentarem maior uniformidade que as pedras naturais, excluindo a necessidade de tratamentos adicionais antes do assentamento. No início as peças imitavam os tijolos e pedras utilizadas na época, tendo como únicas vantagens os custos mais baixos e a homogeneidade dimensional. Posteriormente passaram a apresentar um refinamento maior, sendo disponibilizadas em novos modelos e com formatos dentados. Nesse contexto, o conceito de intertravamento e o controle de espessuras das juntas também começaram a ser implantados, trazendo inúmeros benefícios práticos para o assentamento bem como permitindo a utilização correta de mão de obra pouco especializada (CRUZ, 2003).

A primeira cidade pavimentada com as PCP foi Stuttgart, na Alemanha, em 1963 (FERNANDES, 2016). Em meados dos anos 60, as peças já eram comercializadas nas Américas Central, do Sul e África do Sul. Durante a década de 70 foi a vez dos Estados

⁴ SAFFRON, I. **Changing Skyline**: Philadelphia's only surviving wooden street embalmed in asphalt. 2015. Disponível em: http://www.philly.com/philly/living/20151225_Changing_Skyline__Philadelphia_s_only_surviving_wooden_street_embalmed_in_asphalt.html. Acesso em: out. 2016.

Unidos, Austrália, Nova Zelândia e Japão. No final da mesma década mais de 200 tipos de formas e diversos tipos de equipamentos de fabricação já eram comercializados por todo o mundo. A produção anual ultrapassou 45 milhões de metros quadrados no início da década de 80, com 66% das peças voltadas à aplicação em vias de tráfego urbano. No final da década de 90, a indústria mundial de fabricação de PCP chegou à marca de produção de 100 m² por segundo durante os dias úteis de trabalho (SMITH, 2003).

Atualmente a Alemanha é o maior produtor mundial, com mais de 200 milhões de metros quadrados por ano. Atribui-se também aos alemães o maior número de máquinas de grande porte empregadas na fabricação das PCP e a vanguarda em termos de desenhos, opções de cores e formatos das peças (FERNANDES, 2016). O pavimento intertravado, consolidado mundialmente enquanto tecnologia construtiva, já não busca atender somente às solicitações mecânicas advindas do tráfego, mas passou a incorporar conceitos de acessibilidade, sustentabilidade e conservação ambiental. As inúmeras opções disponíveis para as peças permitem aplicações na concepção de pavimentos permeáveis, táteis, coloridos e/ou dotados de sinalização horizontal. A Figura 5 apresenta a aplicação das PCP em três cidades brasileiras.

Figura 5 - Aplicações das PCP realizadas ultimamente



Fonte: ABCP (2005)⁵

De acordo com a NBR 9781: 2013 elaborada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, as peças de concreto correspondem a componentes pré-fabricados de concreto, utilizados como materiais de revestimento em pavimento intertravado.

⁵ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Praças, caminhos e pátios** – Obras brasileiras com pisos intertravados de concreto. 2. ed. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 2005. 112p

Quanto ao pavimento intertravado, principal forma de aplicação das PCP, segundo à mesma norma (p. 2) recebe a seguinte definição:

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.

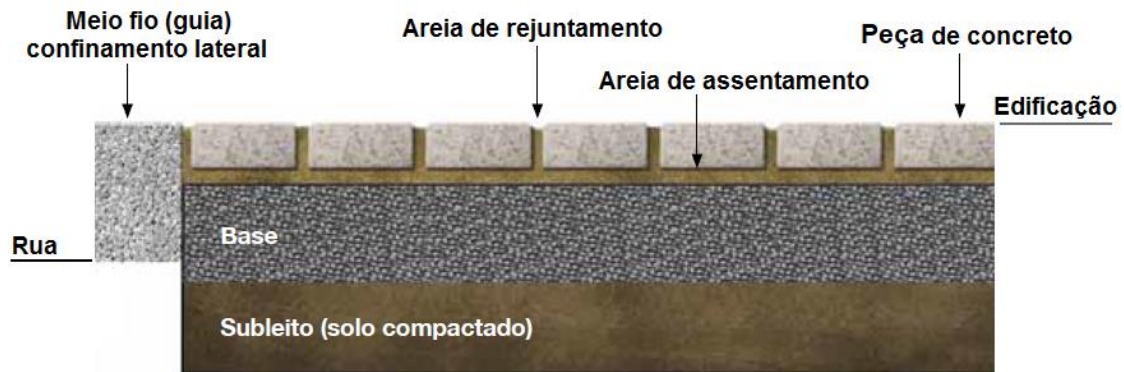
2.2 ESTRUTURA TÍPICA DO PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO

Segundo à ABNT NBR 15953: 2011 que aborda a execução do Pavimento Intertravado com peças de concreto, de uma maneira geral, a estrutura do pavimento intertravado é composta pelos seguintes itens, que serão apresentados segundo a ordem de execução:

- a) **Subleito:** Corresponde ao terreno de fundação do pavimento.
- b) **Leito:** Superfície obtida pela terraplanagem, estrutura ou obra de arte e conformada ao seu greide e perfis transversais.
- c) **Sub-base (quando necessário):** Camada corretiva do subleito, ou complementar à base, empregada quando por qualquer circunstância não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito.
- d) **Base:** Camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos e sobre a qual se constrói um revestimento.
- e) **Camada de assentamento:** Camada composta por material granular, com distribuição granulométrica definida, e que possui a função de acomodar as peças de concreto de modo a permitir a correta distribuição de carga bem como o nivelamento do pavimento.
Material de rejuntamento: Material granular, com distribuição granulométrica definida, empregado no preenchimento das juntas e com a função de transferir os esforços de cisalhamento para as peças adjacentes àquela que recebe o carregamento.
- f) **Revestimento:** Camada composta por peças de concreto e material de rejuntamento. Recebe diretamente a ação de rolamento dos veículos, tráfego de pedestres e/ou suporte de cargas.
- g) **Contenção:** Trata-se de uma estrutura ou dispositivo permanente ou provisório utilizado para manter as peças de concreto e o material de rejuntamento na posição adequada, proporcionando o intertravamento das peças.

A Figura 6 ilustra a configuração típica do pavimento intertravado.

Figura 6 - Estrutura do pavimento intertravado



Fonte: Maschio (2015)⁶

2.3 APECTOS POSITIVOS

De acordo ABCP (2010) e Fernandes (2016), o pavimento Intertravado possui as seguintes particularidades:

- **Conforto térmico** – a pigmentação clara das peças de concreto proporciona menor absorção de luz e calor, concebendo à área pavimentada um maior conforto térmico. Em função da presença de juntas entre as peças, o pavimento dissipa parte do calor absorvido com maior facilidade. Sua característica de ser parcialmente permeável e de absorver umidade do solo, do sereno e da chuva, liberando essa umidade aos poucos no ambiente, faz com que o pavimento executado com as peças de concreto apresente uma diferença de até 20°C em relação aos pavimentos asfálticos convencionais.
- **Superfície antiderrapante** - a rugosidade do concreto proporciona segurança aos pedestres, mesmo com o piso molhado.
- **Diversidade de cores** – as peças de concreto podem ser fabricadas em uma ampla variedade de cores e texturas.
- **Liberção imediata ao tráfego** – Logo após a compactação final do pavimento, o mesmo pode ser liberado.
- **Produtos passíveis de reciclagem/reaproveitamento** – Como sendo produtos à base de cimento, as peças de concreto podem ser totalmente recicladas ou reaproveitadas na produção de novos materiais, contribuindo com a preservação das jazidas e calcário e evitando ao mesmo tempo a saturação dos aterros.

⁶ MASCHIO, A; **Pavimento Intertravado**: Como executar bem. In: CONCRETE SHOW, 2015, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 2015.

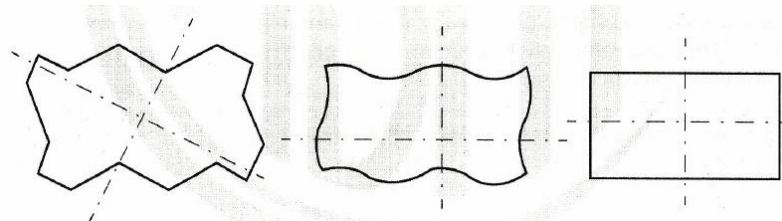
Assim como mencionado por Fernandes (2016), vale ressaltar que o termo “pavimento intertravado” define o sistema como um todo, ou seja, o piso acabado, constituído pelo arranjo das peças mais as camadas subjacentes mais areia de rejunte e o confinamento. O foco desta pesquisa estará voltado às peças de concreto para pavimentação, como sendo as unidades que compõem a camada de revestimento do pavimento.

2.4 FORMATO DAS PEÇAS

De acordo com a ABNT NBR 9781: 2013, as PCP, por vezes denominadas peças pré-fabricadas de concreto para pavimentação, blocos de concretos para pavimentação, pavers ou bloquetes, segundo o seu formato podem ser classificadas em quatro grupos, a saber:

- **Tipo I:** Peças 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 assentados nos arranjos de “fileiras” ou “espinha de peixe”. Suas dimensões são, usualmente, 20 cm de comprimento por 10 cm de largura, podendo ter faces laterais retas, curvilíneas ou poliédricas (ABCP, 2010). A Figura 7 ilustra melhor o formato das peças do tipo I.

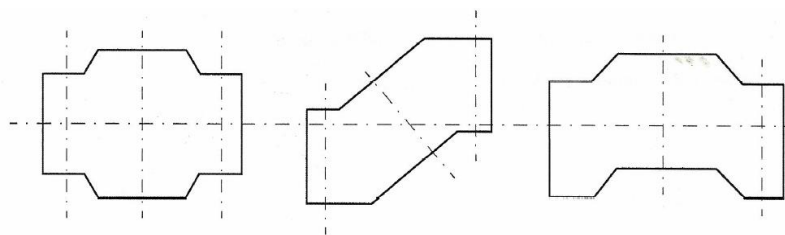
Figura 7 - Peças de concreto do tipo I



Fonte: ABNT NBR 9781 (2013)

- **Tipo II:** Peças de concreto com formato único, diferente do retangular que só podem ser assentadas em fileiras. Também possuem dimensões usuais de 20 cm de comprimento por 10 cm de largura e são montados somente em fileiras travadas (ABCP, 2010). As peças do tipo II são exemplificadas pela Figura 8.

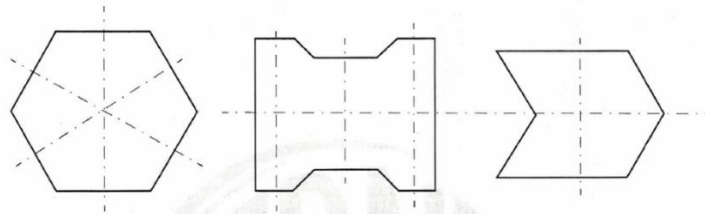
Figura 8 - Peças de concreto do tipo II



Fonte: ABNT NBR 9781 (2013)

- **Tipo III:** Peças de concreto com formatos geométricos característicos como trapézios, hexágonos, triedros e com pesos superiores à 4 kg. Suas dimensões que são pelo menos 20 por 20 cm (ABCP, 2010). O tipo III é apresentado pela Figura 9.

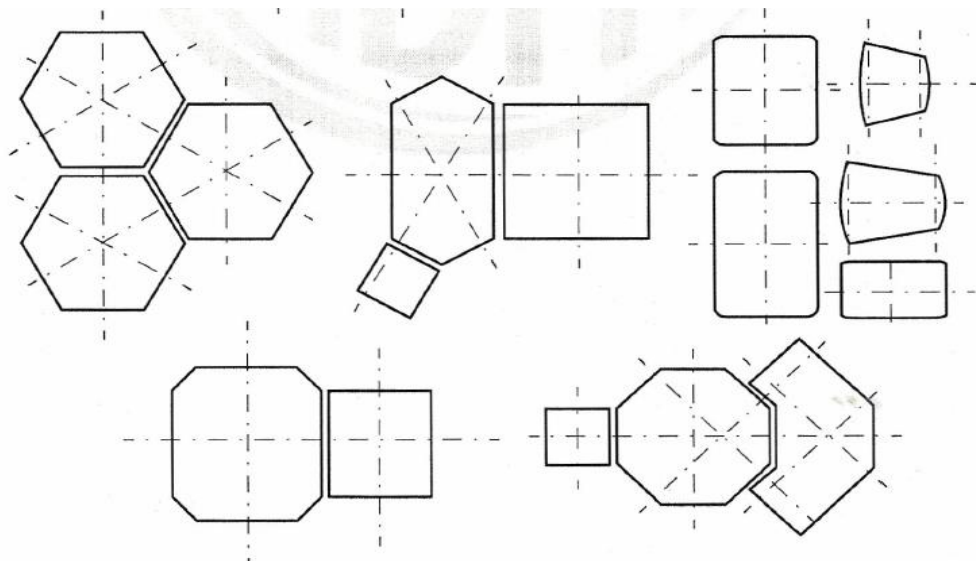
Figura 9 - Peças de concreto do tipo III



Fonte: ABNT NBR 9781 (2013)

- **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. A Figura 10 por sua vez apresenta as peças do tipo IV.

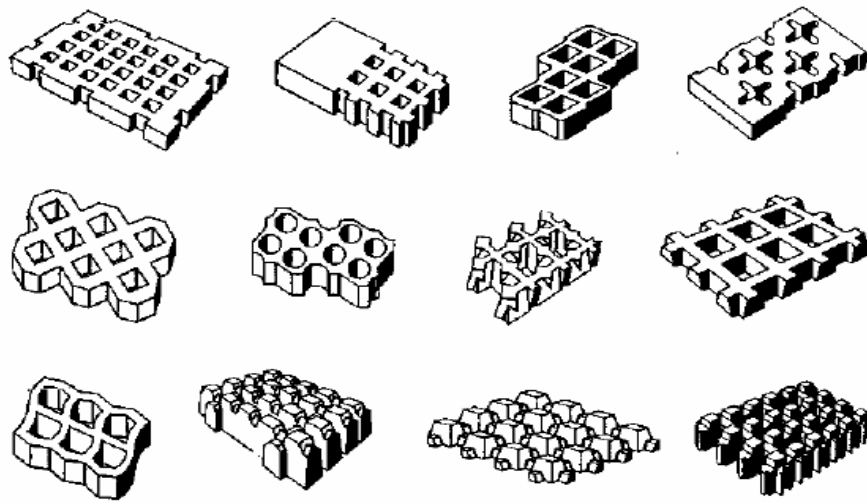
Figura 10 - Peças de concreto do tipo IV



Fonte: ABNT NBR 9781 (2013)

Um outro tipo de peças de concreto existente corresponde às peças em formato de “grelha”. Também conhecidas por “pisograma” são geralmente utilizadas em áreas gramadas, calçadas e entradas garagem, quando são requeridos efeitos arquitetônicos ou uma permeabilidade maior do pavimento (CRUZ, 2003). A Figura 11 exemplifica melhor este tipo de peça.

Figura 11 - Peças do tipo grelha



Fonte: Cruz (2003)

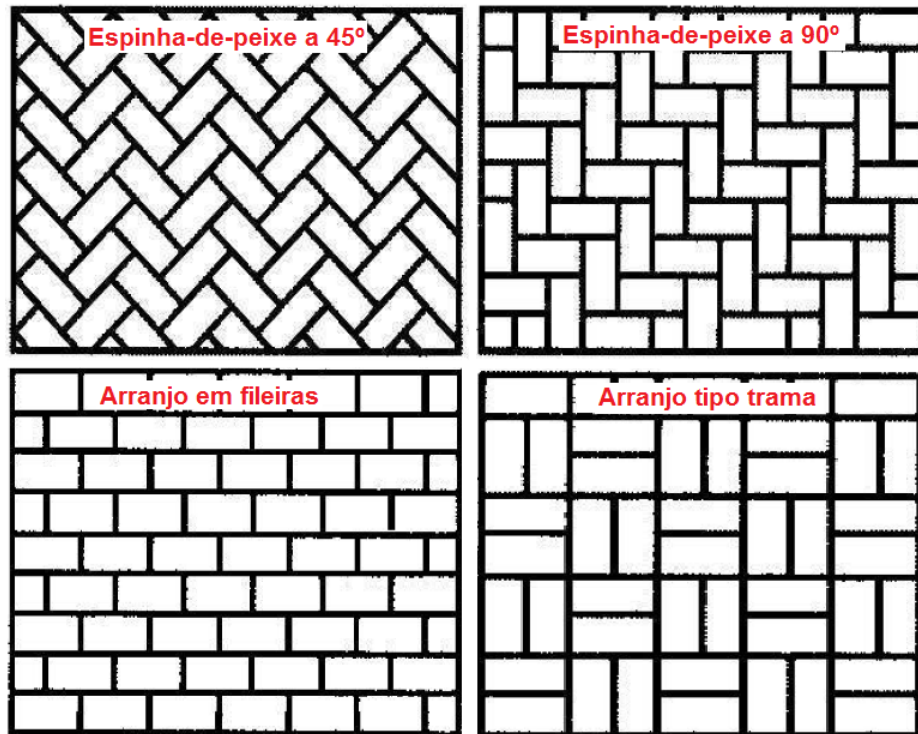
2.5 TIPOS DE ASSENTAMENTO

A variedade de formas e dimensões das peças disponíveis confere ao pavimento intertravado uma gama de possibilidades para os arranjos de assentamento, os quais estão intimamente ligados à estética final do pavimento.

De acordo com Cruz (2003), não existe um consenso entre os pesquisadores acerca da influência do formato das peças no desempenho do pavimento, no entanto há concordância sobre o fato de que a disposição das peças no assentamento interfere diretamente da durabilidade do mesmo.

Entre os modelos de assentamento mais utilizados, estão: espinha-de-peixe (a 45° e a 90°), em fileira e a trama. A Figura 12 apresenta os arranjos mais empregados na disposição das peças.

Figura 12 - Tipos de assentamento mais utilizados



Fonte: Adaptado de Cruz (2003)

2.6 O PRINCÍPIO DO INTERTRAVAMENTO

Segundo a ABNT NBR 15953: 2011, o termo “Intertravamento” pode ser definido como sendo a capacidade das peças de concreto de resistirem a deslocamentos individuais, sejam eles verticais, horizontais, de rotação ou giração, em relação às peças adjacentes.

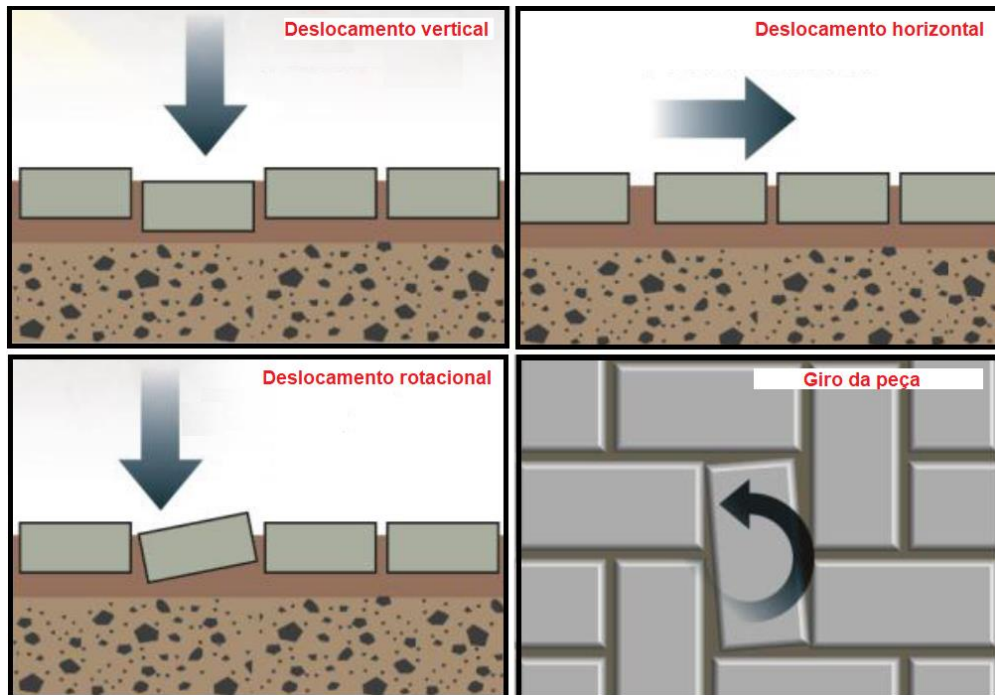
A mesma norma ainda classifica o intertravamento, de acordo com o tipo de movimento que ele impede:

- **Intertravamento vertical:** Trata-se da capacidade das peças de concreto em resistirem a esforços de cisalhamento entre as peças.
Se o conjunto de blocos do pavimento recebe uma carga bem no centro de uma das peças, a tendência desta é afundar, configurando um deslocamento vertical
- **Intertravamento horizontal:** Refere-se à capacidade do pavimento intertravado em resistir a esforços causados por forças de aceleração e frenagem das cargas sobre as peças (Ex.: solicitação pelo tráfego de veículos).
- **Intertravamento rotacional:** Capacidade do pavimento intertravado em resistir a esforços perpendiculares excêntricos aos eixos das peças.
Se a carga for aplicada na extremidade do bloco, a tendência é que o mesmo gire em torno do próprio eixo, o que configura o movimento de rotação.

- **Intertravamento contra o giro:** Consiste na capacidade do pavimento intertravado em resistir a esforços pontuais no eixo das peças.

A Figura 13 explicita os tipos de movimentos restringidos pelo intertravamento das peças.

Figura 13 - Deslocamentos impedidos pelo intertravamento das peças



Fonte: Adaptado de Maschio (2015)⁷

Segundo ABCP (2010), o intertravamento está intimamente ligado ao desempenho e à durabilidade do pavimento. Para que o mesmo seja alcançado, duas condições são indispensáveis:

- **Presença de contenção lateral:** Impedindo o deslocamento lateral das peças que compõem a camada de rolamento e promovendo desta maneira o intertravamento.
- **Juntas preenchidas com areia:** Responsáveis pela transferência de esforços entre as peças de concreto, permitindo que estas trabalhem em conjunto, suportando as cargas solicitantes.

⁷ MASCHIO, A; **Pavimento Intertravado:** Como executar bem. In: CONCRETE SHOW, 2015, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 2015.

2.7 O CONCRETO SECO

Entre os concretos ditos especiais, destaca-se o concreto seco, também conhecido por “concreto farofa”, “zero abatimento” ou ainda “sem abatimento”. Segundo Ott e Andreas (2006), o uso de produtos fabricados com concreto seco teve início há cerca de 70 anos, em um período pós Segunda Guerra Mundial marcado pela escassez e o pelo alto custo dos materiais de construção. Dentre os concretos secos podem ser citados o concreto projetado, empregado na contenção de túneis e encostas, e o concreto utilizado na confecção de blocos de alvenaria, tubos e concreto compactado a rolo (FRASSON JÚNIOR, 2000). A Figura 14 apresenta alguns exemplos de artefatos produzidos com o emprego de concretos secos.

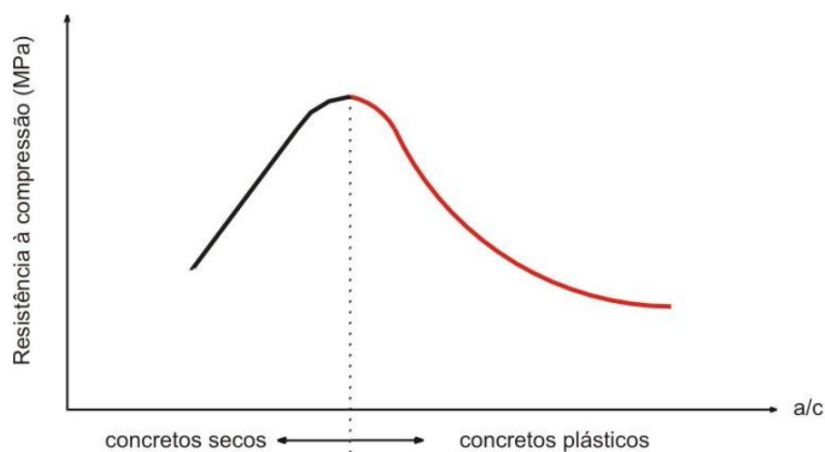
Geralmente, o concreto seco apresenta consistência inicial significativamente maior do que os concretos convencionais, obtida por meio da redução do teor de água utilizado (MARCHAND et al., 1996). De acordo com Rodrigues (1984), no concreto seco, as propriedades no estado endurecido estão relacionadas às do estado fresco, de forma muito mais pronunciada do que no concreto plástico. Ao contrário dos concretos ditos plásticos, concretos secos não seguem à risca a conhecida “lei de Abrams”. Esse comportamento pode ser melhor verificado na Figura 15, a qual compara o efeito na resistência à compressão em função da elevação do teor de água em ambos os tipos de concreto.

Figura 14 - Artefatos produzidos com concreto seco



Fonte: Marchioni (2012)

Figura 15 - Resistência à compressão em função da elevação da relação água/cimento



Fonte: Oliveira (2004)

Enquanto no concreto plástico a resistência é inversamente proporcional à relação água/cimento, no concreto seco a resistência cresce de acordo com o grau de compactação que o equipamento proporciona às peças (FERNANDES, 2016).

Segundo Marchioni (2012), tanto a propriedade de fluidez quanto a coesão do concreto seco estão intimamente ligadas à qualidade do processo produtivo. Não só as propriedades no estado endurecido, mas também no estado fresco dependem da eficiência da compactação durante a fabricação dos artefatos. Sendo sua coesão reduzida, a moldagem desse tipo de mistura passa então a depender de energia adicional, introduzida no processo de fabricação por meio das operações de compactação e vibração exercidas por equipamentos denominados vibrocompressores. Para Fernandes (2016), além de e um bom processo de mistura e adensamento, a coesão ou liga do concreto seco é fruto de uma combinação entre a distribuição granulométrica adequada dos agregados (sobretudo a presença de finos), umidade ótima da mistura e do consumo equilibrado de aglomerante.

Para se produzir artefatos com este tipo de concreto, requer-se que a mistura seja ao mesmo tempo rígida o suficiente para permitir a desmoldagem imediata e úmida o bastante para possibilitar uma distribuição adequada da pasta durante os processos de mistura e vibração (MARCHAND et al., 1996). O excesso de água pode comprometer a alimentação dos moldes. Da mesma maneira, água de menos pode fazer com que as peças percam até 60% de sua resistência por dificuldade de compactação, além de contribuírem com o desgaste do molde em função do atrito excessivo (MARCHIONI, 2012).

Via de regra, quanto maior a quantidade de água na mistura maior também será a resistência final das peças. Porém, este incremento de resistência ocasionado pela adição de água à mistura possui um limite. Tal limite corresponde à umidade ótima, na qual são alcançados um maior grau de compacidade e conseqüentemente, uma maior resistência. Para concretos secos, esse limite se encontra entre 6% e 8% (PIROLA, 2011).

Quanto ao consumo de cimento, para concretos secos o teor do aglomerante também se encontra diretamente relacionado à eficiência de compactação do equipamento, de tal forma que equipamentos mais eficientes demandam por menores teores de cimento, considerando-se uma mesma dosagem (MARCHIONI, 2012).

2.8 PROCESSO PRODUTIVO DAS PCP

Fernandes (2016) e Bittencourt (2012) apontam a existência de pelo menos três processos bem distintos de produção das PCP, identificados como: processo “dormido”, processo virado e o processo prensado (também chamado de “vibroprensado” por outros autores).

2.8.1 PROCESSO DORMIDO

Neste processo, o concreto que não chega a apresentar uma consistência plástica é inserido manualmente nas fôrmas e adensado com o auxílio de uma mesa vibratória. Como característica marcante deste processo, têm-se a desforma das peças apenas no dia seguinte, fato que dá origem ao termo “dormido” (BITTENCOURT, 2012).

Por serem geralmente constituídos de plástico, aço ou fibra, os moldes conferem às peças acabamentos superficiais extremamente lisos. Em função disso são preferencialmente empregados em áreas domésticas. Em contrapartida, este processo de fabricação apresenta baixa produtividade e requer uma base bem executada, uma vez que as peças não fornecem intertravamento suficiente por conta da superfície lateral lisa e do formato cônico das peças, necessário para a desforma do concreto depois de endurecido (FERNANDES, 2016).

2.8.2 PROCESSO VIRADO OU BATIDO

Neste processo, as fôrmas são preenchidas, adensadas com auxílio de mesa vibratória e logo em seguida desmoldadas, sendo viradas sobre uma superfície plana, lisa, geralmente untada com óleo ou fina camada de areia. O concreto empregado não pode estar muito seco, de forma a esfarelar nos cantos da peça, e nem muito fluido, o que acarretaria em deformações durante o desmolde. Um ponto negativo consiste na baixa produtividade. Estima-se que uma equipe de 6 pessoas bem habilitadas produza 50 m²/dia, contra 100 m² no sistema dormido e cerca de 400 a 1800 m²/dia no sistema prensado (FERNANDES, 2016).

2.8.3 PROCESSO PRENSADO

Trata-se do processo mais utilizado no mundo e o que proporciona maiores possibilidades de cores e formatos, além de resultar no melhor desempenho estético do produto aplicado. Ao contrário dos dois anteriores, esse processo é marcado pela produção mecânica das peças. O concreto, necessariamente de consistência mais seca, é adensado sob alta pressão e constante vibração em equipamentos de produção em escala denominados vibroprensas. O uso de tais máquinas, sobretudo das hidráulicas, permite maior controle durante a produção e conseqüente homogeneidade das peças (FERNANDES, 2016). De acordo com Marchioni (2012), o processo de compactação da mistura permite a obtenção de peças com menor consumo de cimento quando comparados ao concreto plástico.

Albero (2000) define prensagem como sendo a operação de conformação, baseada na compactação da massa contida no interior de uma matriz rígida ou de um molde flexível, e realizada pela aplicação de pressão. O propósito dessa operação consiste em se obter peças uniformes, em conformidade com geometrias e dimensões pré-estabelecidas, e ao mesmo

passo contribuir com a obtenção de uma microestrutura adequada às características finais almejadas.

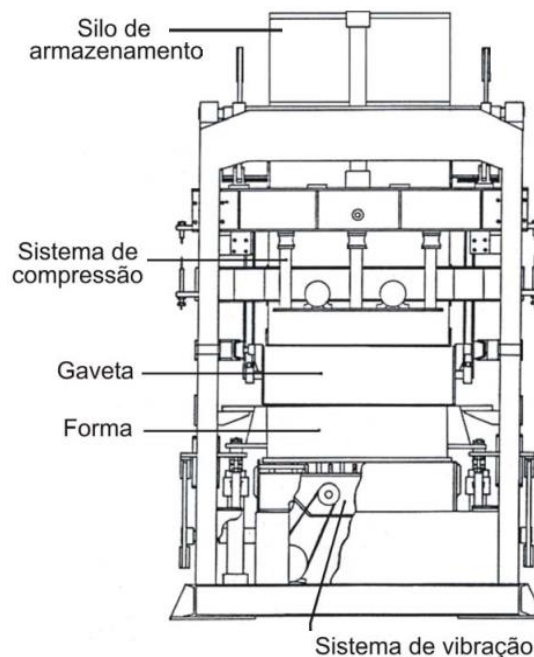
De acordo com Pirola (2011), o processo de produção vibroprensado envolve 5 etapas, a saber: a) Armazenamento de matérias primas; b) Proporcionamento dos materiais; c) Mistura; d) Moldagem das PCP (vibroprensagem); e) Cura das peças. Todas etapas são fundamentais para garantir a qualidade final do produto. No entanto, conforme afirma Oliveira (2004), a etapa de vibroprensagem é a que exerce maior influência nas propriedades finais das peças. As máquinas de vibrocompressão possuem grande importância, uma vez que são responsáveis por imprimir simultaneamente elevados graus de compactação e vibração aos concretos secos, o que interfere substancialmente nas principais características exigidas das peças, tais como resistência à compressão, textura, entre outras (PIROLA, 2011).

Esta pesquisa será conduzida com base no processo de fabricação vibroprensado por este ser o mais difundido atualmente e ser o método empregado pela empresa participante da pesquisa.

VIBROPRENSAS

Conforme Oliveira (2004), uma vibroprensa, constitui-se, basicamente pelo silo de armazenamento, gaveta, sistema de compressão, forma ou molde e sistema de vibração. A Figura 16 traz um exemplo de uma vibroprensa e suas partes constituintes.

Figura 16 - Partes constituintes de uma vibroprensa



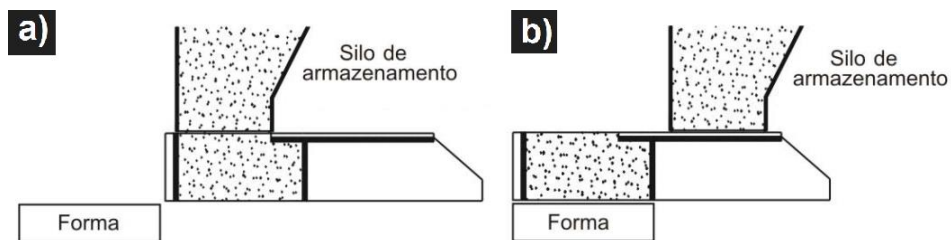
Fonte: Adaptado de Oliveira (2004)

- **Silo de armazenamento:** compartimento localizado na parte superior do equipamento de vibrocompressão, responsável pelo armazenamento do concreto seco já misturado

para posterior enchimento da gaveta;

- **Gaveta:** compartimento móvel, que transporta o concreto do silo até a forma das peças. As gavetas contam ainda com um conjunto de agitadores, que revolvem com concreto auxiliando no preenchimento dos moldes, e raspadores, responsáveis por remover o excesso de material do topo das formas e também da face da sapada que esteve em contato com o concreto. O funcionamento da gaveta pode ser melhor entendido pela Figura 17.

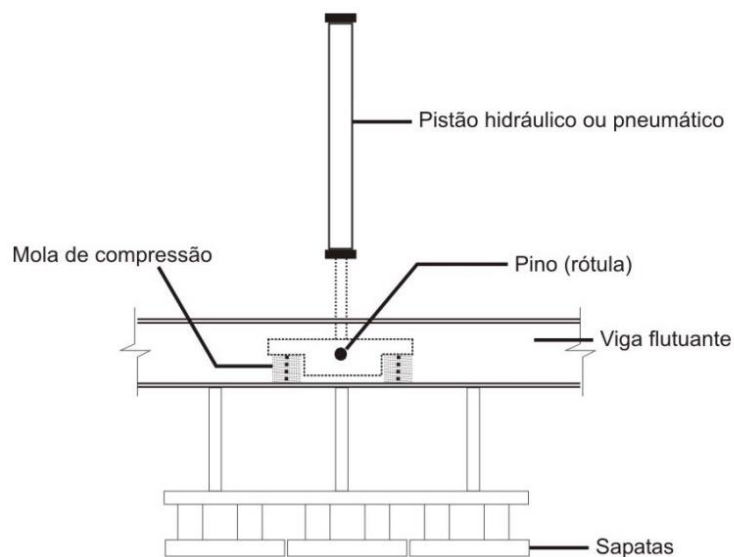
Figura 17 - Mecanismo de funcionamento da gaveta: a) gaveta recuada; b) gaveta sobre a fôrma



Fonte: Adaptado de Oliveira (2004)

- **Sistema de compressão:** sistema cuja função é a aplicação da carga de compressão no concreto durante a moldagem das peças. Geralmente é composto por um pistão hidráulico ou pneumático, conectado à uma viga flutuante a qual transfere carga à uma sapata e essa, por sua vez, comprime o material contido na forma. Em equipamentos mais modernos as sapatas são dotadas de sistemas de aquecimento, os quais evitam a aderência das mesmas às peças recém prensadas. O mecanismo de compressão é apresentado pela Figura 18.

Figura 18 - Sistema de compressão



Fonte: Oliveira (2004)

Entre os diversos tipos de equipamentos para produção tanto de PCP quanto de blocos de alvenaria, os mais eficientes são os hidráulicos, dotados de bomba e pistões a óleo. Em seguida vêm as pneumáticas, dotadas de pistões movidos a ar comprimido. Essas últimas, em geral, apresentam maior velocidade e um número maior de ciclos completos por minuto. Contudo, não proporcionam a mesma energia de compactação que as hidráulicas, resultando em consumos de cimento superiores. Por fim, têm-se as máquinas manuais, simples e que possibilitam uma fabricação quase artesanal. Nestes casos a falta de energia de prensagem provoca um alto consumo de cimento (FERNANDES, 2016).

- **Forma ou molde:** parte responsável pelo armazenamento do concreto trazido pela gaveta e conformação das peças, definindo sua geometria e fornecendo às mesmas a precisão dimensional necessária. A Figura 19 ilustra um dos tipos de formas empregados na produção vibroprensada.

Figura 19 - Forma para produção de PCP



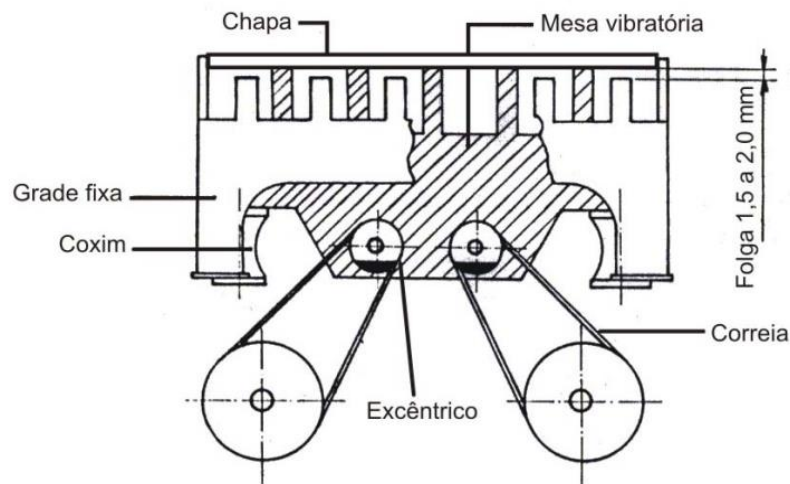
Fonte: Pirola (2011)

- **Sistema de vibração:** de acordo com Neville (2016), esse sistema tem a função de extinguir o ar aprisionado na mistura e fluidificá-la por meio da redução do atrito interno e acomodação dos agregados. Também consiste em uma etapa de grande importância por influenciar diretamente na qualidade dos artefatos e produtividade da máquina. Algo que pode ser explicado pelo fato de todas as máquinas empregarem a vibração como meio de adensamento da mistura e por ser este adensamento um dos principais responsáveis pela maior compacidade e, conseqüentemente, maior resistência das peças (OLIVEIRA, 2004).

Segundo Fiola e Tardini (1988), a vibração é caracterizada pelos parâmetros de direção, frequência, amplitude, velocidade e aceleração. Quanto à direção da vibração, existem diferentes tipos, que variam de acordo com as aplicações requeridas. Certos equipamentos possuem vibração unidirecional vertical, outros unidirecional horizontal, há ainda os que possuem movimentos circulares no plano

horizontal e circulares no plano vertical (PIROLA, 2011). Dentre os tipos existentes, a vibração unidirecional vertical corresponde ao caso mais frequente (FIOLA e TARDINI, 2011). Basicamente, funciona por meio de mesas vibratórias equipadas com dois eixos de massas excêntricas, os quais são movidos por motores elétricos que giram sincronizados e em sentidos inversos (OLIVEIRA, 2004). A Figura 20 ilustra uma mesa vibratória em detalhe.

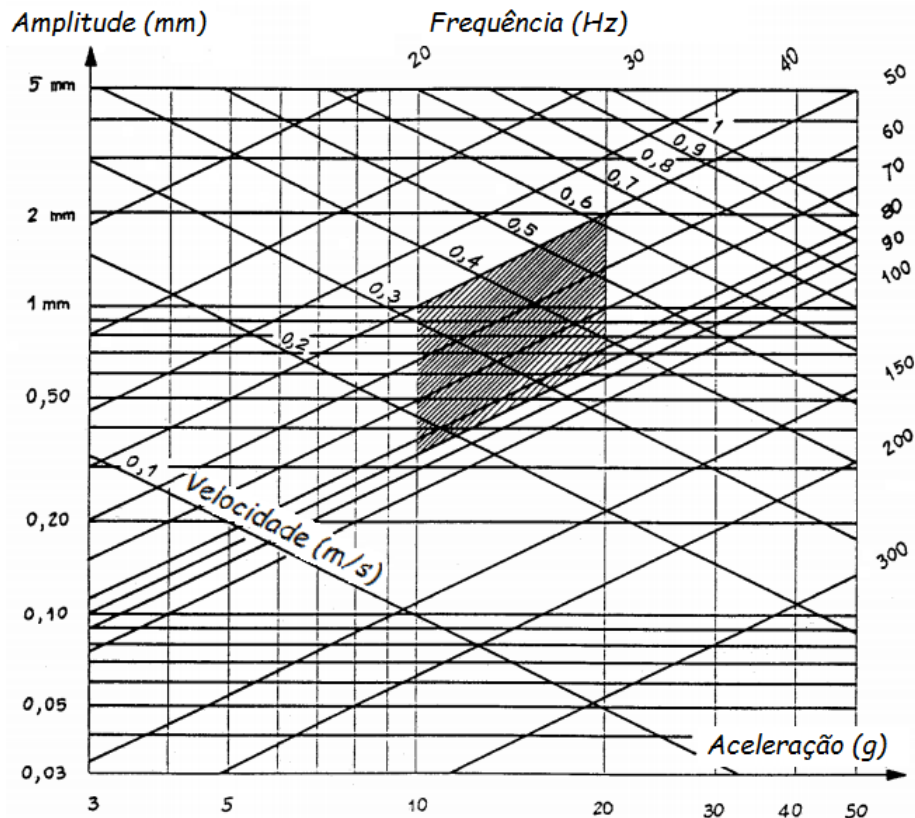
Figura 20 - Detalhe do sistema de mesa vibratória



Fonte: Oliveira (2004)

Quanto aos demais parâmetros, a frequência define o número de ciclos completos por segundo sendo indicada em Hertz. A amplitude corresponde ao máximo deslocamento entre um ponto da forma e sua posição de equilíbrio. A velocidade, por sua vez, traduz o quão rápido este deslocamento é realizado e a aceleração caracteriza a eficiência da vibração, sobretudo em relação às forças a serem colocadas em ação para criar tal efeito. (FIOLA e TARDINI, 2011). O programa experimental realizado por Oliveira (2004) indica que dentre estes parâmetros, a amplitude é o que governa o tempo de vibrocompressão, independente da frequência de vibração. Em outras palavras, constatou-se que quanto maior a amplitude de vibração, menor o tempo necessário para compactar as peças. O diagrama contigo na Figura 21 apresenta o que seriam os valores ótimos dos parâmetros mencionados para a produção de PCP.

Figura 21 - Valores ótimos para os parâmetros de vibração



Fonte: Adaptado de Fiola e Tardini (2011)

Dois outros fatores, relacionados ao próprio regime de funcionamento das máquinas vibroprensas, também são significativos para a obtenção de produtos finais de qualidade. São eles o tempo de alimentação e o tempo de vibrocompressão.

O tempo de alimentação define o quanto a gaveta permanece sobre a forma preenchendo-a com concreto, sendo acionado simultaneamente o sistema de vibração. Trata-se do único tempo regulável de uma máquina vibroprensa e o principal responsável pelo grau de compacidade dos artefatos produzidos. Quanto maior o tempo de alimentação, maior a quantidade de concreto na forma, diminuindo o volume de vazios nas peças e elevando, conseqüentemente à resistência à compressão das mesmas (PIROLA, 2011).

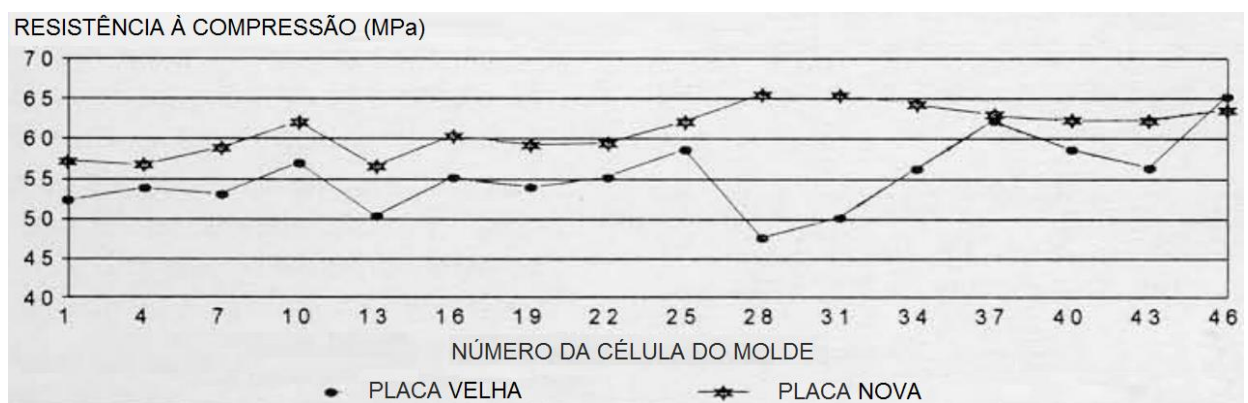
Quanto ao tempo de vibrocompressão, esse corresponde ao tempo de descida das sapatas com o sistema de vibração acionado, compreendendo desde o contato das mesmas com o concreto até o alcance da altura final das peças. Normalmente gira em torno de 3 a 6 segundos, variando em função dos materiais empregados, do tempo de alimentação adotado e, sobretudo, do equipamento empregado. O tempo de vibrocompressão é utilizado por muitas fábricas como parâmetro de controle de produção, acusando um bom ou mal enchimento de forma. No entanto, a melhor referência para tal controle é, sem dúvida, o peso dos artefatos recém produzidos, em função da facilidade de determinação e à boa correlação com a propriedade de resistência à compressão (OLIVEIRA, 2004).

Outro fator que merece atenção no processo de compactação consiste na recuperação elástica. Trata-se da expansão da mistura que ocorre após a retirada da carga devido a energia que permanece armazenada na peça. Essa expansão, cuja origem está relacionada principalmente à distribuição granulométrica dos compósitos, pode acarretar em tensões de tração na peça e conseqüentemente no aparecimento de fissuras. A velocidade com que a carga de compressão é aplicada durante o processo de prensagem influencia diretamente na recuperação elástica da peça, sendo o seu efeito amplificado com o aumento da pressão de prensagem. Uma menor velocidade na aplicação da carga reduz a recuperação elástica, fornecendo mais tempo para que as partículas se reordenem e alcancem posições mais estáveis. O teor de umidade também influencia neste fator, de modo que, uma mistura com maior plasticidade apresenta menor recuperação (ALBERO, 2001).

Cabe salientar que o controle de todos os parâmetros bem como dos tempos de alimentação e de vibrocompressão de nada adiantaria se o equipamento utilizado não possuir qualidade compatível com os fins que se deseja. De acordo com Fernandes (2016), na hora de escolher uma máquina é importante analisar não só o número de peças por ciclo e o número de ciclos por minuto, mas deve-se atentar também ao conjunto composto por energia de compactação (pressão + vibração), precisão e dureza dos moldes, robustez da estrutura, tradição, solidez e suporte técnico do fabricante.

Para ilustrar a quão significativa é a influência do equipamento e de sua aferição na qualidade final das PCP, o gráfico contido na Figura 22 e elaborado por Dowson (1980) compara resultados de resistência à compressão de peças produzidas com o uso de placas de contato novas e velhas.

Figura 22 - Influência da aferição do equipamento na resistência final das peças



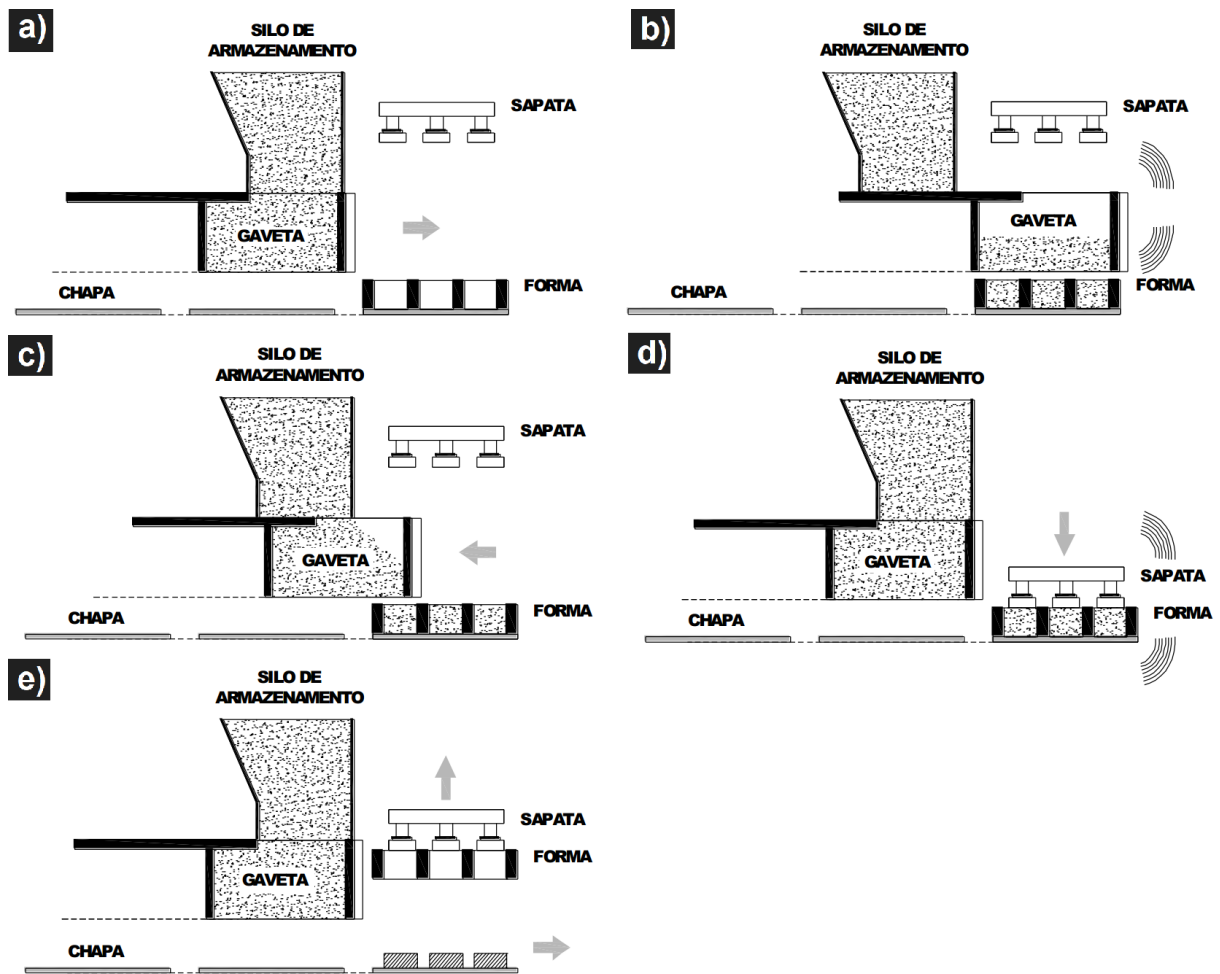
Fonte: Adaptado de Dowson (1980)

Assim como a necessidade de um bom equipamento, reforça-se a influência dos materiais que compõem a mistura (agregados e sua distribuição granulométrica, aglomerantes, água, aditivos) e estudos de dosagem na qualidade dos artefatos produzidos. De acordo com Marchioni (2012), alterações na formulação da dosagem visando a obtenção

de misturas dotadas de agregados bem caracterizados, com granulometria bem distribuída permitiriam um melhor empacotamento de partículas, menor atrito entre os componentes e maior mobilidade dentro do molde. Tais estratégias seriam capazes de reduzir a força necessária para compactação assim como a necessidade de vibração.

De um modo geral, as etapas que compõem o processo de vibroprensagem para produção das PCP pode ser sintetizado pela Figura 23.

Figura 23 - Ciclo produtivo de PCP em uma máquina vibroprensa; a) Posicionamento da forma e avanço da gaveta; b) Alimentação da forma; c) Retorno da gaveta à posição original; d) prensagem/compactação; e) Subida da sapata e da forma liberando as peças acabadas.



2.9 REQUISITOS E NORMALIZAÇÃO

A seguir serão apresentadas as principais normas nacionais relacionadas à avaliação de PCP e execução de pavimentos intertravados. Também serão abordadas algumas normas internacionais e seus respectivos requisitos para certificação e aceitação das peças.

2.9.1 NORMAS NACIONAIS

Atualmente, a principal norma vigente em território nacional e voltada especificamente à avaliação de PCP é a ABNT NBR 9781, de 2013. Sua função é estabelecer os requisitos e métodos de ensaio exigíveis para aceitação de peças. Além das dimensões e tolerâncias máximas permitidas, a norma traz ainda os valores limites exigidos para os ensaios de resistência à compressão, absorção de água, resistência à abrasão, critérios a serem observados durante a inspeção visual e processo de amostragem. Alguns desses parâmetros são apresentados pela Tabela 1.

Tabela 1 - Requisitos da ABNT NBR 9781: 2013

Requisitos	Limites aceitáveis	
Tolerâncias dimensionais (mm)	Comprimento	$\leq 250 \pm 3$
	Largura *	$\geq 97 \pm 3$
	Espessura	$\geq 60 \pm 3$
Resistência à compressão (MPa)	Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha	≥ 35
	Tráfego de veículos especiais e efeitos de abrasão acentuados	≥ 50
Absorção de água (%) **		≤ 6
Resistência à abrasão (largura da cavidade em mm)	Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha	≤ 23
	Tráfego de veículos especiais e efeitos de abrasão acentuados	≤ 20

* medida real da largura mínima na área da peça destinada à aplicação de carga no ensaio de resistência à compressão. As peças podem apresentar pontos com largura inferior a 100 mm, desde que possuam uma área plana isenta de rebaixos e juntas falsas onde possa ser inscrito um círculo de 85 mm de diâmetro.

** não são admitidos valores individuais maiores do que 7 %.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 9781 (2013)

Uma outra norma nacional relacionada às PCP é a ABNT NBR 15953: 2011. Esta, por sua vez, estabelece os principais requisitos para a execução do pavimento intertravado. A norma conta com a atribuição das responsabilidades do processo, passando pelas etapas de projeto, execução em si e fiscalização. Exigências na construção das camadas que compõem o pavimento (subleito, base e/ou sub-base, camada de assentamento), tais como: distribuição granulométrica recomendada, ferramentas e equipamentos necessários. Por fim também são apresentadas instruções para transporte e recebimento das peças, ajustes e arremates no

assentamento, inspeção final para liberação do tráfego bem como condições para boas práticas no cumprimento da limpeza e manutenção do pavimento.

2.9.2 NORMA BRITÂNICA

Instituída em maio de 2003 pela Instituição Britânica de Normalização (BSI) com o título “*concrete paving blocks requirements and test methods*”, a BS EN 1338: 2003 consta de definições gerais, requisitos de materiais e produtos fabricados, critérios para a avaliação da conformidade dos produtos produzidos e oito anexos voltados à descrição dos ensaios requeridos. Em função da sua credibilidade no cenário internacional, a norma britânica passou a ser adotada pelo Comitê Europeu de Normalização (CEN) sendo inserida no Eurocode e tornando-se a base para as versões de vários países europeus, países do Oriente Médio (entre eles a Turquia), e da África, como é o caso do Egito.

Como diferenças principais entre a norma brasileira e a norma britânica, têm-se por parte da segunda a exigência de ensaios de ciclos de gelo e degelo (que em função das condições climáticas não se aplicam ao Brasil), resistência à frenagem/escorregamento e o ensaio de tração por compressão diametral como forma de avaliação da resistência mecânica das peças. A Tabela 2 traz alguns dos principais requisitos propostos pela norma britânica.

Tabela 2 - Requisitos da BS EN 1338: 2003

Requisitos	Limites aceitáveis		
	Altura da peça	Comprimento	Largura Espessura
Tolerâncias dimensionais (mm)	< 100	± 2	± 2 ± 3
	> 100	± 3	± 3 ± 3
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Resultados individuais	> 3,6	
	Carga/comprimento da seção de ruptura (N/mm)	> 250	
Absorção de água (%)		≤ 6	
Resistência à abrasão (largura da cavidade em mm)		≤ 23	

Fonte: Adaptado de BS EN 1338: 2003

2.9.3 NORMAS NORTEAMERICANA E CANADENSE

Na Tabela 3 serão abordados alguns limites requeridos pela normalização dos Estados Unidos e do Canadá, no que se refere às dimensões, bem como às propriedades físicas e mecânicas das PCP.

Tabela 3 - Requisitos nos Estados Unidos e Canadá

Requisitos		Limites aceitáveis	
		Estados Unidos ASTM C936: 2016	Canadá CSA A231.2: 1995*
Tolerâncias dimensionais (mm)	Altura da peça	$\geq 60 \pm 3,2$	± 3
	Comprimento	$\pm 1,6$	-1/+2
	Largura	$\pm 1,6$	-1/+2
Resistência à compressão (MPa)	Média	≥ 55	≥ 50
	Valores individuais	≥ 50	≥ 45
	Geometria dos corpos de prova	Peça inteira	Cubo ou cilindro extraído da peça (diâmetro/altura=1/1)
Absorção de água (%)	Média	≤ 5	-
	Valores individuais	≤ 7	-
Resistência à abrasão	Perda de material em (massa ou volume)	$\leq 15 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$	-
	Perda na espessura (mm)	≤ 3	-

Fonte: Adaptado de ASTM C936: 2016 e Fioriti (2007)*

2.9.4 RESISTÊNCIAS EXIGIDAS EM OUTROS PAÍSES

Na África do Sul, a norma SANS 1058: 2009 adota o ensaio de resistência à compressão para avaliação das PCP e estipula como valores mínimos: de 25 MPa para peças submetidas ao tráfego de veículos leves e 35 MPa para o tráfego de veículos pesados. Enquanto isso, na Austrália e Nova Zelândia a norma AS/NZS 4456.4: 2003 exige que as peças tenham 15 MPa de resistência à compressão quando instaladas em ciclovias e estacionamentos, 25 MPa para o tráfego de veículos leves, e 60 MPa quando submetidas à circulação de veículos especiais (BITTENCOURT, 2012).

Segundo Fioriti (2007), os valores mínimos de 35 MPa e 50 MPa para resistência à compressão, exigidos pela normalização nacional, se mostram um tanto quanto elevados quando comparados ao que estabelecem países como Austrália e África do Sul. Algo que deveria fomentar discussões acerca da possível criação de novas classes de resistência. Classes que permitissem valores menores e compatíveis com a aplicação em calçadas, praças e demais locais tomados pelo trânsito leve. De acordo com o autor, tal decisão também permitiria a redução dos custos de produção, atendendo ao mesmo passo ao aspecto ambiental, uma vez que, peças com resistências menores demandariam por um menor consumo de cimento.

2.10 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Nesta seção, dois dos principais ensaios empregados na avaliação de propriedades mecânicas serão abordados. O primeiro, ensaio de resistência à compressão, por ser um dos mais, senão o mais empregado ao redor do mundo. E o segundo, o teste de resistência à tração por compressão diametral, justamente pelo fato de se tratar de um ensaio brasileiro, empregado em outros países para verificação de PCP, e ainda não exigido no Brasil para tal fim.

2.10.1 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO

Inicialmente, este ensaio foi proposto para avaliação de corpos de prova cilíndricos moldados ou extraídos de estruturas de concreto. Trata-se de um ensaio destrutivo cujo procedimento é regido e detalhado atualmente pela norma ABNT NBR 5739: 2007.

Quanto ao procedimento, este consiste basicamente em posicionar o corpo de prova de forma que seu eixo central, ao longo do comprimento, coincida com o eixo que passa pelo centro dos pratos da prensa e submetê-lo à um carregamento contínuo e taxa de incremento fixada até que a ruptura seja atingida. Após o rompimento, a resistência à compressão é então calculada pela Equação 2.1.

$$f_c = \frac{4 \times F}{\pi \times D^2} \quad (2.1)$$

Onde:

f_c = resistência à compressão, em megapascals (MPa);

F = força máxima alcançada, em newtons (N);

D = diâmetro do corpo de prova, em milímetros (mm).

Para corpos de prova com relação comprimento/diâmetro menor que 1,94 o valor da força F deve ser multiplicado por um fator de correção contido na Tabela 2 da norma referente, o qual varia entre 1,00 e 0,87 para as relações comprimento/diâmetro de 2,00 e 1,00 respectivamente. A execução do ensaio de compressão axial para corpos de prova cilíndricos é ilustrada pela Figura 24.

Figura 24 - Ensaio de resistência à compressão em corpo de prova cilíndrico



Fonte: Adaptado de Pirola (2011)

Para avaliar peças de concreto para pavimentação o procedimento descrito anteriormente foi adaptado em função da variação na seção transversal do corpo de prova e encontra-se detalhado na norma ABNT NBR 9781: 2013. As PCP são posicionadas na prensa tal como seriam assentadas no pavimento, ou seja, o carregamento é aplicado no eixo central de suas faces superior (de rolamento) e inferior, conforme pode ser observado na Figura 25.

Figura 25 - Ensaio de compressão em PCP



Fonte: Autor (2017)

Segundo à NBR 9781:2013, a resistência à compressão de uma PCP deve ser obtida por meio da Equação 2.2.

$$f_c = \frac{F}{A \times p} \quad (2.2)$$

Onde:

f_c = resistência à compressão de uma PCP, em megapascals (MPa);

F = força máxima alcançada, em newtons (N);

A = área de carregamento, em milímetros quadrados (mm²);

p = fator de correção em função da altura da peça (Tabela A.1 da norma. Igual à 0,95 para peças com 60mm de altura).

Admite-se que as resistências à compressão obedecem à distribuição normal. Sendo assim, com auxílio da estatística o valor característica estimado de resistência à compressão para PCP é estimado pelas Equações 2.3 e 2.4.

$$S = \sqrt{\frac{\sum(f_p - f_{pi})^2}{n - 1}} \quad (2.3)$$

$$f_{pk,est} = f_p - t \times S \quad (2.4)$$

Onde:

f_p = resistência média das peças (MPa);

f_{pi} = resistência individual das peças (MPa);

$f_{pk,est}$ = resistência característica estimada à compressão (MPa);

n = número de peças da amostra;

S = desvio padrão da amostra (MPa);

t = coeficiente de Student em função do tamanho da amostra (Tabela A.2 da norma. Igual a 0,896 e 0,883 para amostras com 8 e 10 peças, respectivamente).

2.10.2 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Também conhecido por Ensaio de tração indireta, esse ensaio foi elaborado pelo engenheiro civil brasileiro Fernando Luiz Lobo Barboza Carneiro em 1943, durante a abertura da Avenida Presidente Vargas, na cidade do Rio de Janeiro. Segundo Thomaz (2016), o que levou à criação do ensaio foi a necessidade em se avaliar o comportamento de rolos de concreto com 60 cm de diâmetro que na época seriam utilizados para deslocar a Igreja de São Pedro dos Clérigos, construída em 1732 e que obstruída a construção da nova avenida. A Figura 26 expõe a operação pretendida na época.

Figura 26 - Proposta de deslocamento para a Igreja de São Pedro



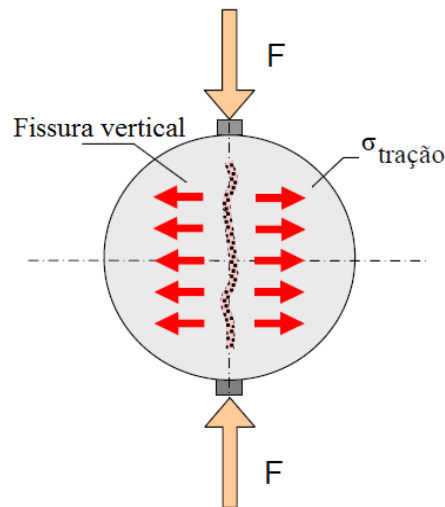
Fonte: Thomaz (2016)

Por fim, a igreja acabou sendo demolida ao invés de deslocada, no entanto, o ensaio se tornou uma herança de grande contribuição à engenharia estrutural. Em 1962, o procedimento foi aceito pela American Society for Testing and Materials - ASTM, passando a ser conhecido nos Estados Unidos como “Brazilian test”. Em 1980, foi adotado pela International Organization for Standardization – ISO (THOMAZ, 2016). Em função de sua simplicidade, este ensaio acabou sendo estendido a outros materiais como rochas e materiais cerâmicos (ROCCO, 1998).

Assim como o ensaio de compressão axial, o ensaio de tração por compressão diametral foi proposto em um primeiro momento para avaliação de corpos de prova cilíndricos de concreto e argamassa, sendo estabelecido atualmente pela norma ABNT NBR 7222: 2011. Neste ensaio, o corpo de prova é ensaiado na horizontal, e o carregamento é aplicado por meio de duas geratrizes dispostas sobre o eixo central, ao longo do comprimento do corpo de prova. Desse modo, a ruptura é ditada pelas tensões de tração geradas no interior da peça, e não mais pelos esforços de compressão.

Segundo ROCCO et al. (2001) a vantagem principal do ensaio de tração por compressão diametral é o fato de este requerer apenas uma carga de compressão. A seguir, a Figura 27 apresenta o funcionamento do ensaio para corpos de prova cilíndricos, como foi proposto originalmente.

Figura 27 - Determinação da resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Thomaz (2016)

De acordo com a ABNT NBR 7222: 2011, a resistência à tração por compressão diametral deve ser obtida segundo à Equação 2.5.

$$f_{t,D} = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (2.5)$$

Onde:

- $f_{t,D}$ = resistência à tração por compressão diametral (MPa);
- F = carga máxima alcançada no ensaio (N);
- D = diâmetro do corpo de prova (mm);
- L = comprimento do corpo de prova (mm).

Ao contrário do ensaio de compressão axial, atualmente o ensaio de tração por compressão diametral não é empregado no Brasil para a avaliação de PCP. Porém a norma britânica BS EN 1338:2003 adota tal procedimento como forma de atestar a conformidade das peças. No ensaio de tração por compressão diametral as peças também são ensaiadas na posição em que seriam assentadas, sendo o carregamento aplicando no eixo ao longo de seu comprimento, tal como ilustra a Figura 28.

Figura 28 - Ensaio de tração por compressão diametral em PCP



Fonte: Autor (2017)

De acordo com a norma britânica, a resistência à tração por compressão diametral para uma PCP pode ser calculada conforme a Equação 2.6.

$$T = 0,637 \times k \times \frac{P}{S} \quad (2.6)$$

Onde:

T = resistência à tração de uma PCP por compressão diametral (MPa);

k = fator de correção em função da altura da peça (Tabela F.1 da norma. Igual a 0,87 para 60mm de altura);

P = carga máxima alcançada no ensaio (N);

S = área do plano de falha, dada pelo produto da altura da peça pela média do comprimento da fissura (mm²).

2.10.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS

A Tabela 4 exhibe uma breve comparação entre os dois ensaios aqui abordados. Serão confrontados aspectos voltados tanto às exigências de normalização (tais como equipamentos necessários e modelo de cálculo) quanto ao procedimento em si (taxa de carregamento, forma de ruptura e interferência do operador).

Tabela 4 – Comparação entre ensaios de resistência à compressão e tração por compressão diametral

ASPECTO OBSERVADO	ENSAIO	
	Compressão axial ABNT NBR 9781: 2013	Tração por compressão diametral BS EN 1338: 2003
Materiais necessários	<p>Máquina de ensaio à compressão (prensa): atendendo à norma ABNT NBR NM ISO 7500-1 (classe 1 para ensaios em laboratórios e classe 2 para testes na própria fábrica);</p> <p>Placas auxiliares de ensaio: circulares com diâmetro de (85 ± 5) mm, espessura mínima de 20 mm, confeccionadas em aço de dureza superficial maior que 60RC.</p>	<p>Máquina de ensaio à compressão (prensa): capaz de elevar o carregamento a taxas especificadas;</p> <p>Vigas rígidas para aplicação do carregamento: circulares com diâmetro de (85 ± 5) mm, espessura mínima de 20 mm, confeccionadas em aço de dureza superficial maior que 60 RC;</p> <p>Fitas para contato entre a prensa e a peça: com largura de (15 ± 1) mm, espessura (4 ± 1) mm e comprimento de no mínimo 10 mm a mais que o plano de falha.</p>
Preparação	<p>Regularização: recomenda-se retífica. Outros tipos de capeamento são aceitos desde que não apresentem variação significativa em relação à primeira técnica;</p> <p>Saturação: em água à (23 ± 5) °C, por no mínimo 24 h;</p>	<p>Regularização: livre para escolha entre retífica ou capeamento;</p> <p>Saturação: em água à (20 ± 5) °C, por (24 ± 3) h;</p>
Execução	<p>Posicionamento do corpo de prova: entre as placas auxiliares, de modo que seu eixo vertical coincida com o eixo vertical passante pelo centro das placas.</p> <p>Interferência do operador: Mínima. Carregamento automatizado.</p> <p>Taxa de carregamento: (0,55 ± 0,2) MPa/s</p> <p>Forma de ruptura: esmagamento por compressão. Sob influência da taxa de deformação de Poisson, tem-se compressão no centro (área de aplicação da carga) e tração nas bordas. Ruptura em formato cônico causada pela influência do atrito entre o equipamento e a peça na deformação da mesma (PURWANTO, 2008).</p>	<p>Posicionamento do corpo de prova: com as fitas posicionadas na superfície de contato entre a peça e as vigas rígidas. Garantir e que as fitas e os eixos das vigas estejam alinhados com a seção de divisão do bloco.</p> <p>Interferência do operador: maior apenas durante o posicionamento da peça.</p> <p>Taxa de carregamento: (0,05 ± 0,01) MPa/s</p> <p>Forma de ruptura: falha por tração na região central da peça, caracterizada pela bipartição do corpo de prova em torno do plano de carregamento (ROCCO, 2001).</p>
Modelo de cálculo	<p>Simple. Semelhante ao de corpos de prova cilíndricos com exceção do fator de correção (p), em função da altura da peça. Resistência dada por meio da relação "carga de ruptura/área de aplicação". Valor característico leva em consideração variação dos resultados (desvio padrão).</p>	<p>Simple. Difere dos corpos de prova cilíndricos pelo fator de correção (k), em função da altura da peça e pela maneira como a área do plano de falha é calculada (segundo à geometria). Para o cálculo da resistência considera-se a área do plano de falha e não mais a área de aplicação do carregamento. Valor característico incorpora variação dos resultados (desvio padrão).</p>

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 9781: 2013 e BS EN 1338: 2003

De acordo com Neville (2016), o ensaio de tração por compressão diametral é de fácil realização e resulta em valores mais uniformes do que os demais ensaios à tração. No entanto, no caso de argamassas e de concretos normais, a presença de partículas grandes próximo à superfície de aplicação da carga pode influir no resultado.

2.10.4 CORRELAÇÃO ENTRE AS PRINCIPAIS PROPRIEDADES MECÂNICAS

MINDES e YOUNG (1981) citados por ZAIN et al. (2002) afirmam que de uma forma geral a relação entre a resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral não é algo tão simples uma vez que depende da idade do concreto, do tipo de cura, tipo de agregado e do grau de compactação. Segundo ZAIN et al. (2002), muitas fórmulas empíricas para correlacionar a **resistência à compressão** e **resistência à tração por compressão diametral** do concreto já foram propostas, e em sua maioria assumem a forma dada pela Equação 2.7.

$$f_t = k (f_c)^n \quad (2.7)$$

Onde:

f_t = resistência à tração por compressão diametral do concreto (MPa);

f_c = resistência à compressão do concreto (MPa);

(k, n) = coeficientes que podem ser obtidos por meio da análise de regressão. O valor de n geralmente se encontra entre 1/2 e 3/4.

A seguir, com base nos dados fornecidos por Nihal Arioglu, Girgin e Ergin Arioglu (2006); Ros e Shima (2013); Behnood, Verian e Gharehveran (2015) serão apresentados na Tabela 5 coeficientes distintos da Equação 2.7, encontrados por vários autores para se correlacionar as duas resistências mecânicas. Os estudos compreenderam concretos com diferentes composições (com adições ou não), idades, relações água cimento, temperaturas de cura, bem como diversas faixas de resistência à compressão.

Tabela 5 - Resistência à tração por compressão diametral estimada com base na literatura.

Autor	Coeficientes da equação		Faixa de resistência à compressão compreendida
	k	n	
Carino e Lew (1982)	0,272	0,71	-
Raphael (1984)	0,313	0,667	$f_c \leq 40$ MPa
Ahmad e Shah (1985)	0,462	0,55	$15 \text{ MPa} \leq f_c \leq 84$ MPa
Gardner et al. (1988)	0,47	0,59	$3 \text{ MPa} \leq f_c \leq 46$ MPa
	0,46	0,60	$13 \text{ MPa} \leq f_c \leq 72$ MPa
Gardner (1990)	0,34	0,66	$4 \text{ MPa} \leq f_c \leq 57$ MPa
	0,33	2/3	
CEB-FIP (1991)	0,3	2/3	$f_c < 83$ MPa
Oluokun et al. (1991)	0,294	0,69	$3,5 \text{ MPa} \leq f_c \leq 63$ MPa
ACI 363R (1992)	0,59	0,5	$21 \text{ MPa} \leq f_c \leq 83$ MPa
Arioglu (1995)	0,321	0,661	$15 \text{ MPa} \leq f_c \leq 120$ MPa
Mokhtarzadeh e Frech (2000)	0,56	0,5	$48 \text{ MPa} \leq f_c \leq 103$ MPa
	0,32	0,63	
Kim et al. (2002)	0,31	0,71	$2,2 \text{ MPa} \leq f_c \leq 51,3$ MPa
JSCE (2002)	0,44	0,5	-
Arioglu et al. (2006)	0,387	0,63	$4 \text{ MPa} \leq f_c \leq 120$ MPa
JSCE (2007)	0,23	2/3	-
JCI (2008)	0,13	0,85	-
AIJ (2008)	0,18	0,75	-
ACI (2011)	0,56	0,5	-

Fonte: Nihal Arioglu, Girgin e Ergin Arioglu (2006); Ros e Shima (2013); Behnood, Verian e Gharehveran (2015).

3. AGREGADOS PARA CONCRETO

De acordo com a ABNT NBR 9935: 2011, o termo agregado pode ser definido como: material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas à preparação de concretos e argamassas.

Segundo Sbrighi Neto (2011), no fim do século XIX e início do século XX, embora representassem cerca de 70% a 80% do volume dos concretos convencionais, os agregados eram tidos apenas como materiais granulares inertes, usados para preenchimento e com a finalidade de baratear a produção do concreto. Para serem considerados adequados, bastava apenas que possuíssem resistência mecânica. Hoje sabe-se que isso não é verdade. Após a ocorrência de alguns desastres relacionados à Reação Álcali-agregado (reação expansiva causada pela combinação entre o sódio e potássio presentes no cimento e alguns compostos reativos presentes nos agregados) a interferência das propriedades físicas e químicas dos agregados no desempenho estrutural do concreto passaram a ser levadas em consideração.

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que os agregados não só possuem um papel relevante na determinação do custo e trabalhabilidade do concreto, como exercem grande influência sobre a resistência, estabilidade dimensional e durabilidade do material no estado endurecido.

Recentemente, o esgotamento das jazidas de agregado natural de boa qualidade perto dos grandes centros consumidores, o aumento dos custos com transporte, acirramento da competição entre os produtores de concreto e a maior conscientização da sociedade acerca das leis de proteção ao meio ambiente, têm evidenciado o verdadeiro papel dos agregados bem como sua real importância técnica, econômica e social (SBRIGHI NETO, 2011).

3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS

Segundo Sbrighi Neto (2011), quanto à ORIGEM, os agregados podem ser classificados em:

- **Naturais** = encontrados na natureza aptos para o uso sem a necessidade de outro beneficiamento que não seja a lavagem. Como exemplo têm-se a areia de rio, o pedregulho, areia de cava, entre outros.
- **Britados** = necessitam ser submetidos ao processo de cominuição, geralmente por britagem, para que possam adequar-se ao uso como agregados para

concreto. Entre esses estão: a pedra britada, o pedrisco, pedregulho britado, entre outros.

- **Artificiais** = oriundos de processos industriais, como a argila expandida, o folhelho expandido por tratamento térmico e a vermiculita expandida.
- **Reciclados** = resíduos industriais granulares que possuem propriedades adequadas ao uso como agregado ou provenientes do beneficiamento de entulho de construção e/ou demolição. Exemplos: escória de alto-forno, entulho de construção/demolição.

Quanto ao TAMANHO DOS GRÃOS, a ABNT NBR 9935: 2011 classifica os agregados em:

- **Agregado graúdo** = agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.
- **Agregado miúdo** = agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha 150 μm .

No que se refere à MASSA UNITÁRIA, Mehta e Monteiro (2014) apontam que a maioria dos agregados minerais naturais apresentam valores entre 1520 kg/m³ e 1680 kg/m³. Os demais agregados, geralmente empregados para fins especiais, são classificados em:

- **Agregados leves** = agregados com massa unitária menor que 1120 kg/m³;
- **Agregados pesados** = com massa unitária maior que 2080 kg/m³.

3.2 INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Entre as características dos agregados relevantes para a composição do concreto estão: a porosidade, distribuição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial, módulo de elasticidade, resistência à compressão e o tipo de substâncias deletérias presentes. Todas são resultado da composição mineralógica da rocha fonte (a qual varia conforme o processo geológico de formação), das condições de exposição a que a mesma foi submetida no meio, e do tipo de equipamento utilizado na produção do agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

3.2.1 DIMENSÃO MÁXIMA E COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o principal motivo para se especificar os limites granulométricos e a dimensão máxima de um agregado é a sua influência sobre a trabalhabilidade e o custo do concreto. Quanto maior a dimensão máxima do agregado, menor será a área superficial por unidade de volume a ser coberta pela pasta de cimento (para uma mesma relação água/cimento), portanto menor o consumo de cimento. No entanto, areias muito grossas produzem misturas ásperas e não trabalháveis, enquanto as muito finas aumentam o consumo de água (e conseqüentemente, o consumo de cimento para uma dada relação água/cimento) se tornando antieconômicas. Assim, uma distribuição granulométrica equilibrada tenderá a produzir misturas mais trabalháveis e econômicas, além de reduzir o volume de vazios, dificultando a entrada de agentes agressivos (SBRIGHI NETO, 2011).

3.2.2 FORMA E TEXTURA DAS PARTÍCULAS

A forma e a textura dos grãos exercem maior influência sobre as propriedades do concreto no estado fresco, de tal forma que partículas de textura áspera, angulosas ou alongadas demandam por mais pasta de cimento para produzirem misturas trabalháveis (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Segundo Sbrighi Neto (2011), texturas muito lisas, sobretudo nos agregados graúdos, podem reduzir a aderência entre a pasta de cimento e a superfície do agregado, chegando, em alguns casos, a prejudicar a resistência à tração do concreto especialmente nas primeiras idades.

Neville (2016) afirma que o grau de empacotamento das partículas de mesmo tamanho, ou seja, a forma como os grãos se encaixam e se combinam reduzindo o volume de vazios, também depende de sua forma. Nesse sentido, agregados graúdos com formas equidimensionais são preferidos, uma vez que partículas com diferenças significativas entre suas dimensões empacotam-se de modo anisotrópico.

3.2.3 POROSIDADE, ABSORÇÃO DE ÁGUA E UMIDADE SUPERFICIAL

Os dados de absorção e de umidade superficial são necessários para correção da proporção de água no traço do concreto, que na maioria das vezes incorpora materiais estocados e sujeitos a variações climáticas, sobretudo a variações da umidade relativa do ar. (SBRIGHI NETO, 2011).

Neville (2016) aponta que a porosidade do agregado, bem como sua permeabilidade e absorção de água também influenciam em propriedades como sua aderência à pasta de cimento hidratada, estabilidade química e resistência à abrasão do concreto. Quanto mais poros um agregado possui, menor é sua massa específica. Segundo o autor, dependendo do

tamanho dos poros e de sua continuidade, maior e mais rápida também será a absorção de água.

3.2.4 RESISTÊNCIAS MECÂNICAS DO AGREGADO

A resistência à compressão, resistência à abrasão e o módulo de elasticidade do agregado são propriedades interligadas e muito influenciadas pela porosidade do agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Segundo Sbrighi Neto (2011), os agregados naturais, comumente utilizados na produção do concreto, apresentam resistência mecânica muito superior à do concreto, a qual raramente se constitui como o fator limitante. Os valores típicos de resistência à compressão para a maioria dos agregados de granito, basalto, rochas plutônicas, flint, arenito quartzítico e calcários variam de 210 a 310 MPa (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Além da resistência à compressão, e da tenacidade (resistência à ruptura por impacto), a dureza ou resistência ao desgaste é uma importante propriedade dos agregados empregados, sobretudo em pisos sujeitos ao tráfego intenso (NEVILLE, 2016).

3.3 AGREGADOS RECICLADOS

De acordo com Ângulo e Figueiredo (2011, p.1) “O concreto com agregados reciclados é aquele produzido com resíduos britados, em substituição parcial ou total aos agregados convencionais”.

Materiais de origens diversas têm sido incorporados na composição de concretos, seja sob a forma de adições ao Cimento Portland ou substituindo os agregados. Segundo Mehta e Monteiro (2014), as adições são geralmente utilizadas para melhorar a trabalhabilidade, acelerar ou retardar o tempo de pega, controlar o desenvolvimento da resistência, entre outras propriedades. Entre as adições mais utilizadas os autores destacam a sílica ativa, a cinza volante (cuja origem remete à combustão do carvão mineral) e a escória de alto forno, como sendo um resíduo da siderurgia, já dotado de grande aceitação e comercializado junto ao Cimento Portland em muitos países.

Materiais alternativos também são utilizados na substituição dos agregados naturais. Recentemente, com a exaustão das jazidas de agregados miúdos próximas aos grandes centros urbanos, o uso da areia de britagem (ou “pó de pedra”) para uso nos concretos tem crescido muito (SBRIGHI NETO, 2011).

Entre as possíveis fontes de obtenção para os agregados reciclados encontra-se o próprio setor da construção civil. De acordo com Ângulo e Figueiredo (2011), o beneficiamento do resíduo pode ocorrer já na fabricação do concreto, quando os agregados contidos na mistura que retorna ainda fresca à central são separados da pasta de cimento por meio da

lavagem e do atrito dentro de um tambor. Esse procedimento é contemplado pela ABNT NBR 12655: 2015 a qual permite a reutilização dos “agregados recuperados” em quantidades menores que 5% do total de agregados do concreto. Segundo à mesma norma, quantidades superiores a 5% podem ser adicionadas, desde que o agregado recuperado seja separado em diferentes frações, classificado e atenda aos requisitos propostos pela ABNT 7211: 2009.

Muitas centrais dosadoras possuem condições de reaproveitar o concreto retornado, no entanto, o aumento no custo da água e os próprios custos operacionais elevados têm feito com que essa técnica tenda ao desuso. O maior desafio passa a ser então o beneficiamento dos grandes volumes advindos das construções, reformas e demolições. Nesse caso, os agregados reciclados são compostos por fragmentos de concretos, argamassas, cerâmicas e outros materiais secundários, obtidos pela britagem e outras operações de descontaminação. Sua composição é bastante variável, podendo ser constituído quase exclusivamente por concreto ou misturado com cerâmica vermelha. No entanto, pequenos teores de madeira, aço e vidro são quase que inevitáveis (ÂNGULO e FIGUEIREDO, 2011).

O RCC foi reciclado pela primeira vez na Alemanha em função da necessidade de reconstruírem-se as cidades completamente destruídas pela 2ª Guerra Mundial. Por isso, a Europa é reconhecida como o continente precursor em reciclagem bem como o de maior experiência no assunto (LEVY, 2001). Durante a década de 1990, países como Holanda, Alemanha e Bélgica implementaram políticas severas que proibiam o uso de áreas de aterros para resíduos passíveis de reciclagem. Dessa forma os custos para aterramento se tornaram proibitivos e viabilizaram economicamente algumas alternativas de reciclagem. Desde então, algumas empresas de demolição passaram a investir na aquisição de usinas móveis, bem como na desmontagem das edificações, procurando triar o resíduo proveniente de estruturas de concreto e obter agregados reciclados (HENDRIKS, 2000).

Atualmente, a utilização de agregados reciclados representa uma necessidade primária para o setor da construção civil; maior consumidor de matérias-primas entre os setores industriais. Os constituintes do concreto, material industrial mais consumido pelo homem, embora abundantes no planeta, são matérias-primas não renováveis (ÂNGULO e FIGUEIREDO, 2011).

3.4 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC)

O Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, em 05 de julho de 2002, por meio da Resolução Nº 307, definiu Resíduos da Construção Civil como sendo resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, bem como os resultantes da preparação e da escavação de terrenos. Como exemplos de

RCC podem ser citados: tijolos, blocos cerâmicos, solos, rochas, concreto em geral, argamassa, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, calça ou metralha. A Figura 29 ilustra a composição típica do RCC.

Figura 29 - Exemplo de RCC



Fonte: Autor (2017)

Para tomada de quaisquer medidas de gestão e de gerenciamento dos resíduos da construção, é importante que se tenha ciência de que sua composição é diferente em cada país, em função da própria identidade cultural, dos recursos naturais disponíveis e das tecnologias construtivas distintas empregadas. A madeira, por exemplo, é muito presente na construção americana e japonesa, tendo presença menos significativa na Europa e no Brasil. Da mesma forma acontece com as obras de infraestrutura viária, havendo preponderância do uso de pavimentos rígidos em concreto nas regiões de clima frio (PINTO, 1999). Nesse sentido, identificar e classificar os resíduos gerados merece grande importância. Segundo à Resolução nº 307 do CONAMA, os RCC podem ser subdivididos em 4 classes:

Classe A = Resíduos reutilizáveis, ou recicláveis sob a forma de agregados. Entre estes estão: tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, argamassa, concreto, solos provenientes de terraplanagem;

Classe B = Resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, vidro, metais, madeiras, gesso e embalagens vazias de tintas imobiliárias;

O gesso foi inserido na Classe B em 24 de maio de 2011 por meio da Resolução Nº 431 do CONAMA. As embalagens vazias de tintas imobiliárias foram inseridas na mesma classe em 29 de julho de 2015 pela Resolução Nº 469 do CONAMA.

Classe C = Resíduos que ainda não possuem tecnologias viáveis de reciclagem ou recuperação.

Classe D = Resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos, resíduos oriundos de reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais, bem como telhas e demais objetos que contenham amianto.

O amianto foi inserido na Classe D em 16 de agosto de 2011 por meio da Resolução Nº 348 do CONAMA.

Em 19 de janeiro de 2012, a Resolução Nº 448 do CONAMA introduziu na Resolução Nº 307 o conceito de **aterro de reservação**. Desta maneira, as áreas de destinação antes denominadas “Aterros de resíduos da construção civil” passaram a ser “Aterros de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros”, cuja definição é a seguinte:

Área tecnicamente adequada onde serão empregadas técnicas de destinação de resíduos da construção civil classe A no solo, visando a reservação de materiais segregados de forma a possibilitar seu uso futuro ou futura utilização da área, utilizando princípios de engenharia para confiná-los ao menor volume possível, sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente e devidamente licenciado pelo órgão ambiental competente.

Além disso, a Resolução Nº 448 deixou clara a diferença entre as definições de **gestão** e de **gerenciamento** de resíduos sólidos. Sendo o primeiro termo referente conjunto de ações voltadas à busca de soluções para os resíduos sólidos, e tomadas nas esferas política, econômica, ambiental, cultural e social, sob a premissa do desenvolvimento sustentável. Quanto ao segundo termo, esse define o conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos, bem como a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Considerada como o primeiro marco regulatório de gestão e gerenciamento de RCC a resolução Nº 307, além de propor uma classificação específica para os resíduos provenientes da construção civil, instituiu a responsabilidade dos municípios em implementarem Planos Integrados de Gerenciamento de Resíduos de Construção Civil, os quais devem incorporar os Programas Municipais de Gerenciamento de Resíduos de Construção Civil e os Projetos de Gerenciamento de Resíduos de Construção Civil (CÓRDOBA, 2010). Ficou claro que a gestão dos resíduos gerados, para ser realizada de maneira eficiente, demanda pelo esforço mútuo, abrangendo geradores, gestores e transportadores. O incentivo à reutilização, reciclagem e reinserção dos resíduos reutilizados/reciclados na própria cadeia da construção, bem como às ações educativas e de fiscalização também são propostos na resolução.

3.5 A POLÍTICA NACIONAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS (PNRS)

Instituída em 02 de agosto de 2010, pela Lei Nº 12.305, e regulamentada pelo Decreto Nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010, a Política Nacional dos Resíduos Sólidos surge como um grande avanço na luta contra a disposição irregular e busca do gerenciamento integrado dos resíduos sólidos brasileiros. Após vinte e um anos sendo discutida no Congresso Nacional, sua aprovação marcou o início de uma forte articulação institucional, abrangendo a União, os Estados e Municípios, o setor produtivo e a sociedade em geral (Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2012)⁸.

Segundo o Portal do Ministério do Meio Ambiente (2017),⁹ de uma forma geral, a PNRS:

- Prevê a prevenção e a redução na geração de resíduos, propondo a adoção de hábitos de consumo sustentáveis, o aumento da reciclagem e reutilização, devendo a destinação ambientalmente adequada ser adotada apenas para os rejeitos, ou seja, os resíduos sólidos que não puderem ser reciclados ou reutilizados.
- Define a responsabilidade compartilhada dos geradores de resíduos: dos fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, o cidadão e titulares de serviços de manejo dos resíduos sólidos urbanos na Logística Reversa dos resíduos e embalagens pós-consumo.
- Cria metas importantes visando a eliminação dos lixões e institui instrumentos de planejamento nos níveis nacional, estadual, microrregional, intermunicipal, metropolitano e municipal; além de impor que os particulares elaborem seus Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos.
- Coloca o Brasil em patamar de igualdade aos principais países desenvolvidos no que concerne ao marco legal e inova com a inclusão de catadoras e catadores de materiais recicláveis e reutilizáveis, tanto na Logística Reversa quanto na Coleta Seletiva.

⁸ BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Política Nacional Resíduos Sólidos**. Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos. Disponível em: < <http://www.sinir.gov.br/web/guest/plano-nacional-de-residuos-solidos>>. Acesso em 05 jun. 2017.

⁹_____. Ministério do Meio Ambiente. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Cidades Sustentáveis: Brasília, DF, 2017. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos>>. Acesso em 05 jun. 2017.

3.5.1 O RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL SOB A ÓTICA DA PNRS

No que se refere especificamente aos Resíduos da Construção Civil, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2012), um dos principais instrumentos da PNRS, estabelece algumas diretrizes, bem como estratégias para que as mesmas sejam cumpridas em todo o território brasileiro. Ambas serão apresentadas a seguir.

1ª Diretriz: Eliminar as áreas irregulares de disposição final de RCC (“bota-fora”).

Estratégias: Estabelecer uma rede de monitoramento permanente coibindo a criação de novas áreas de descarte irregular; implantar um módulo do Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR) para gestão de RCC; fomentar ações e programas de apoio aos pequenos municípios; definir e apurar indicadores de gestão de RCC em nível nacional e regional, estabelecer metas com base nestas informações e divulgá-las em nível nacional.

2ª Diretriz: Implantar áreas de transbordo e triagem, de reciclagem e de reservação de RCC em todo o território nacional.

Estratégias: Disponibilizar recursos do Orçamento Geral da União e de linhas de financiamento para elaboração de projetos e implantação, ampliação e recuperação das Áreas de Triagem e Transbordo, de reciclagem e de reservação de RCC; Capacitação técnica de atores públicos, privados e da sociedade civil; Articulação junto aos órgãos licenciadores visando uniformizar e agilizar o licenciamento das áreas de manejo de RCC; Inserção da população de baixa renda na gestão de RCC.

3ª Diretriz: Realização de Inventário de Resíduos de Construção Civil.

Estratégias: Elaboração de questões orientadoras para levantamento de dados sobre RCC pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); levantamento de dados quantitativos e qualitativos relacionados à gestão de RCC em todo o território nacional.

4ª Diretriz: Incremento das atividades de reutilização e reciclagem dos RCC nos empreendimentos públicos e privados.

Estratégias: Fomento à pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico aliado à ampla divulgação do conhecimento adquirido; Articulação junto aos órgãos licenciadores para uniformizar e agilizar o licenciamento das unidades de reutilização e reciclagem de RCC; Implementação de ações de capacitação e difusão tecnológica; Incentivos para o emprego da reutilização e reciclagem nos empreendimentos; Priorização da reutilização e da reciclagem de RCC nas compras, obras e empreendimentos financiados com recursos públicos; busca de acordo setorial específico para os RCC.

5ª Diretriz: Fomento à redução da geração de rejeitos e RCC em empreendimentos.

Estratégias: Incentivo à pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico; criação de instrumentos econômicos e disponibilização de linhas de financiamento voltadas à redução da geração de rejeitos e de RCC; Induzir o setor da construção civil e o de infraestrutura a adotar práticas que melhorem o desempenho socioambiental desde o projeto até a construção efetiva, tais como: criteriosa seleção de materiais menos impactantes ao ambiente e à saúde humana, minimização da geração, segregação na fonte geradora, o reuso, a reciclagem, o tratamento e a destinação final ambientalmente adequada dos RCC; implementar iniciativas de construção sustentável em todas as esferas da administração pública, e atender a regulação nacional e internacional relativas a emissões de poluente, sobretudo, os poluentes orgânicos persistentes (POP's).

De acordo com a Lei Nº 12.305, as EMPRESAS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, bem como estabelecimentos comerciais e de prestação de serviços devem elaborar seu próprio Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos conforme as recomendações estabelecidas pelos órgãos do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama). Esse documento deve conter, entre outras informações:

- ✓ Descrição do empreendimento ou atividade;
- ✓ Diagnóstico dos resíduos sólidos gerados ou administrados, contendo a origem, o volume e a caracterização dos resíduos, incluindo os passivos ambientais a eles relacionados;
- ✓ Explicitação dos responsáveis por cada etapa do gerenciamento de resíduos sólidos;
- ✓ Definição dos procedimentos operacionais relativos às etapas do gerenciamento de resíduos sólidos sob responsabilidade do gerador;
- ✓ Identificação das soluções consorciadas ou compartilhadas com outros geradores;
- ✓ Ações preventivas e corretivas a serem executadas em situações de gerenciamento incorreto ou acidentes;
- ✓ Metas e procedimentos relacionados à minimização da geração, à reutilização e reciclagem de resíduos sólidos;
- ✓ Medidas saneadoras dos passivos ambientais relacionados aos resíduos sólidos;
- ✓ Periodicidade de sua revisão.

Segundo Córdoba (2014), a criação da PNRS também causou alterações significativas nas legislações voltadas à gestão dos RCC. Como exemplo, o autor cita a alteração da Resolução CONAMA Nº 307, de 2002, pela Resolução Nº 348, instituída pelo mesmo órgão em 12 de janeiro de 2012. A fim de adequar a legislação vigente até então à realidade da nova Política Nacional, as definições e prazos foram alterados, merecendo destaque a participação do RCC junto aos planos municipais de resíduos sólidos. Todos os municípios e também o Distrito Federal teriam agora prazo de 12 meses para elaborarem seus Planos Municipais de Gestão Resíduos Sólidos (PMGRS) e 6 meses para implantá-los.

Embora as metas de eliminar 100% das áreas de disposição irregular, implantar áreas de apoio, a reutilização, reciclagem e destinação de RCC aterros classe A em 100% dos municípios estabelecidas pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2012) até o ano de 2014 não tenham sido satisfeitas em sua totalidade, a definição das responsabilidades de cada setor bem como o estabelecimento de estratégias claras para o cumprimento das diretrizes postuladas trouxe uma nova visão acerca da gestão e do gerenciamento dos resíduos sólidos no país. De acordo com Sgorlon (2014), antes da PNRS a legislação ambiental brasileira tratava a questão dos resíduos genericamente, implícitos em outras normativas legais, sob a forma de conceitos de poluição.

Córdoba (2014) afirma que a existência de legislações em âmbito federal, tal como a PNRS, com metas estabelecidas e adaptadas à realidade atual, permitirá balizar a evolução dos sistemas de gerenciamento de RCC no país além de criar meios transparentes para sua fiscalização. Segundo o autor, o maior desafio da PNRS passa a ser garantir a continuidade dos planos e programas de resíduos sólidos, independente das divergências entre grupos políticos que venham a assumir o poder.

3.5.2 NORMAS TÉCNICAS RELACIONADAS AO MANEJO DE RCC

Além das resoluções do CONAMA, diretrizes para projeto, implantação e operação de áreas voltadas ao manejo, beneficiamento e destinação dos RCC, bem como reuso de agregados reciclados são fornecidas pelo seguinte conjunto de normas:

- **ABNT NBR 15112: 2004** - Apresenta as diretrizes para projeto, implantação e operação das áreas de transbordo e triagem;
- **ABNT NBR 15113: 2004** – Apresenta diretrizes para projeto, implantação e operação de aterros;
- **ABNT NBR 15114: 2004** – Aponta as diretrizes para projeto, implantação e operação das áreas de reciclagem;

- **ABNT NBR 15115: 2004** – Detalha os procedimentos para execução de camadas de pavimentação com o uso de agregados reciclados de RCC;
- **ABNT NBR 15116: 2004** – Apresenta os requisitos para a utilização de agregados reciclados de RCC na pavimentação e no preparo de concreto sem função estrutural.

3.6 PARTICULARIDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS DE RCC

Segundo Ângulo e Figueiredo (2011), a principal diferença entre um concreto convencional e um concreto com agregado reciclado remete à porosidade; não só da pasta de cimento, mas também do agregado, a qual facilmente ultrapassa os 10%.

Para contornar essa situação, uma alternativa, empregada nas pesquisas de Ângulo (2005) e Carrijo (2005), consiste em separar os agregados não pela sua composição, mas em faixas de densidade. Uma técnica tradicional, empregada no tratamento de minérios, e que permite separar o resíduo da construção de forma eficiente segundo sua porosidade, gerando concretos com comportamento mecânico e absorção de água similares (ÂNGULO, 2005). Após a britagem do resíduo, a separação por densidade pode ser realizada tanto via seca (por meio de um classificador com corrente de ar ascendente) ou via úmida, pelo aparelho conhecido por “jigüe”. Trata-se de um equipamento bipartido, em formato de tanque ou arca, que é capaz de estratificar os agregados em diferentes camadas por meio da pulsação intermitente de água no plano vertical, somada à movimentos de dilatação e contração SAMPAIO e TAVARES (2005), citados por ÂNGULO e FIGUEIREDO (2011).

Ângulo (2005) afirma que, após realizar a separação por densidade, agregados com massa específica aparente $d > 2,2 \text{ g/cm}^3$, por possuírem teores elevados de rochas e baixos teores de cerâmica vermelha, resultariam em concretos com comportamento mecânico semelhante ao dos agregados naturais. Utilizar agregados com $d > 1,9 \text{ g/cm}^3$ também garantiria que materiais muito porosos como cerâmica vermelha e contaminantes como cimento amianto, madeira, plásticos e betume não estivessem presentes. Carrijo (2005) reforça a eficácia da separação por densidade ao constatar em sua pesquisa que a absorção de água dos agregados variou apenas em função dos intervalos de separação e não da natureza do material. Maiores valores de absorção de água foram observados para as faixas de menor densidade, diminuindo à medida que os agregados ficaram mais densos.

De acordo com Ângulo e Figueiredo (2011), independente da porosidade do agregado reciclado de resíduos de construção e demolição, sua absorção de água nos primeiros 10 min equivale de 70% a 90% da absorção após 24 h. Em seu trabalho, Leite (2001) constatou que

o agregado de resíduo misto, tanto graúdo quanto miúdo absorveram mais de 50% da massa total de água nos primeiros 30 minutos, sendo maior a absorção de água a medida que a dimensão do agregado diminui.

A fim de minimizar os efeitos da alta porosidade do agregado de RCC, a pré-saturação (entre 80% e 90% da absorção de água) também tem sido recomendada por diversos pesquisadores e normas técnicas. Trata-se de uma abordagem clássica utilizada para contornar-se a perda de consistência do concreto, evitando-se o uso de aditivos, e melhorar o seu comportamento mecânico (ÂNGULO e FIGUEIREDO, 2011). A ABNT NBR 15116: 2004 propõe, para a produção de concretos sem função estrutural, a pré-molhagem dos agregados graúdos e miúdos reciclados por meio da adição de 80% do teor de absorção de água dos mesmos.

Porém na pesquisa realizada por Koenders, Pepe e Martinelli (2014), cujo principal objetivo foi investigar a correlação entre a hidratação e a resistência à compressão de 4 traços distintos produzidos com agregados reciclados de concreto foi observado o contrário. A substituição total do agregado graúdo natural e parcial dos agregados miúdos naturais pelos agregados reciclados, mantendo-se fixa no teor de 30% sobre a massa total de agregados forneceu melhores resultados para os agregados que foram misturados na condição seca (24 horas e estufa) do que os que foram saturados por imersão durante 24 horas. Os autores atribuem tal comportamento ao aumento na quantidade total de água presente na mistura (água do traço + água absorvida pelos agregados), que implica na redução de resistência à compressão de concretos plásticos convencionais.

Cabral et al. (2012) aponta a heterogeneidade como sendo umas das principais características do resíduo da construção civil. Para o autor, a composição do RCC depende de muitas variáveis, entre as quais se destacam: a área geográfica onde é produzido, época do ano, o tipo de construção, entre outros.

Segundo à ABNT NBR 15116:2004, quanto à ORIGEM, os agregados de RCC são classificados em:

- **Agregado de resíduo de concreto (ACR):** Obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à Classe A (Resolução CONAMA Nº 307), composto na sua fração graúda, de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de Cimento Portland e rochas.
- **Agregado de resíduo misto (ARM):** Também obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à Classe A, e cuja fração graúda é composta por menos de 90% em massa de fragmentos à base de Cimento Portland e de rochas.

De acordo com Ângulo e Figueiredo (2011), a cerâmica vermelha consiste no material mais poroso entre os que compõem o RCC. A absorção de água do material varia muito, podendo chegar a 24%. Os autores afirmam ainda que quanto mais porosos os agregados, menos resistentes a esforços mecânicos e ao desgaste superficial são os concretos produzidos. Agregados porosos são mais friáveis e geralmente possuem teores mais elevados de finos. Nesse sentido o concreto é apontado como o material que produz os agregados reciclados de melhor qualidade.

Na prática, a obtenção do ARC conforme os limites estabelecidos pela ABNT NBR 15116: 2004 raramente é alcançada. Exceto em casos nos quais o material reciclado provém de uma fonte de grande volume, como a demolição de um viaduto ou de um estádio de futebol, o material é geralmente contaminado com argila, fragmentos de tijolos, gesso, cal, bem como outras impurezas que diminuem sua qualidade eficiência no concreto (FERNANDES, 2016).

Por conta da dificuldade em se obter resíduos quase que exclusivamente compostos por concreto, nesta pesquisa, será levada em conta a mesma classificação utilizada por Moretti (2014), que define o **agregado de resíduo cinza** como sendo aquele proveniente de concreto e argamassa e **agregado de resíduo vermelho**, aquele que contém porções de solo e materiais cerâmicos. O **agregado de resíduo misto**, por sua vez, possui tanto resíduo cinza quanto resíduo vermelho em sua composição.

3.7 CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE RCC

3.7.1 POROSIDADE E MASSA ESPECÍFICA

Dada uma mesma relação água/cimento efetiva, ou seja, não considerando a água de pré-saturação, a porosidade total do concreto produzido com agregados reciclados sempre será maior que a do concreto com agregado natural, uma vez que os agregados reciclados são mais porosos (ÂNGULO e FIGUEIREDO, 2011). Essa informação condiz com os resultados obtidos por Cabral et al. (2007), que apontam o aumento no volume de vazios para todos os concretos produzidos com agregados reciclados, sejam eles compostos por concreto, argamassa ou cerâmica vermelha. Os autores também afirmam que a substituição dos agregados grãos naturais por agregados grãos reciclados influencia mais no volume de vazios do que a substituição dos agregados miúdos. A inserção de agregados grãos de cerâmica vermelha deu origem ao concreto mais poroso. Para uma mesma relação água/cimento, os aumentos no índice de vazios foram de 32% e 64% para 50% e 100% de substituição, respectivamente.

Devido à maior porosidade dos agregados reciclados, a massa específica dos concretos obtidos com o seu uso tende a ser menor (LEITE, 2001). Com base em seus

resultados experimentais, o autor afirma ainda que o agregado graúdo reciclado diminui a massa específica em maior proporção que o agregado graúdo natural. Informação que também condiz com os resultados obtidos no trabalho de Cabral et al. (2009), piores para a inserção do agregado reciclado graúdo de cerâmica vermelha.

3.7.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

De um modo geral, a maioria dos trabalhos desenvolvidos aponta uma redução nos valores da resistência à compressão com a substituição dos agregados naturais por agregados reciclados (LOTFI et al., 2015; KUMAR, 2017). No entanto, valores satisfatórios têm sido obtidos, tal como no trabalho desenvolvido por Cabral et al (2012). O mesmo trabalho também evidencia que a substituição de agregados graúdos reduz mais resistência à compressão dos concretos do que a substituição dos agregados miúdos, sendo que a substituição de ambos representa o pior caso.

De acordo com Ângulo e Figueiredo (2011), quando se utilizam agregados reciclados com absorção de água inferior a 7,0%, a substituição do agregado natural por este pode ser realizada em até 20%, reduzindo-se em apenas 10% da resistência à compressão do concreto.

3.7.3 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO E FLUÊNCIA

O módulo de deformação de concretos produzidos com agregados reciclados é fortemente influenciado pela sua porosidade, de tal forma que quanto maior o teor de substituição dos agregados naturais, menor o valor obtido para a propriedade (ÂNGULO e FIGUEIREDO, 2011). Essa informação foi confirmada por Cabral et al. (2008), que ao analisarem 50 traços distintos, contendo agregados reciclados de concreto, de argamassa e cerâmica vermelha, constataram redução do módulo de deformação em todas as substituições, independentemente do material incorporado. Segundo os autores, a maior redução nos valores da propriedade foi causada pela substituição dos agregados graúdos, e entre os substitutos, o agregado graúdo de cerâmica vermelha exerceu a maior influência (redução de 22% em relação ao concreto de referência com 50% de substituição do agregado graúdo natural). Os melhores valores foram obtidos com o agregado miúdo reciclado de concreto, cuja redução foi de apenas 5% com a substituição 50% de do agregado miúdo natural. A redução no módulo de deformação de concretos com agregados reciclados de RCC também foi confirmada pelo trabalho de Cabral et al. (2009).

De acordo com Ângulo e Figueiredo (2011), concretos com agregados reciclados, de uma forma geral, também apresentam aumentos consideráveis na fluência, ou seja, são mais deformáveis ao longo do tempo.

3.7.4 RETRAÇÃO

Nos concretos que contém agregados provenientes de resíduos da construção e demolição a presença de água ocorre tanto nos poros da pasta quanto nos poros dos próprios agregados. Isto sempre implicará em um maior volume de água evaporada diante da exposição às condições de maior ventilação e temperatura, e conseqüentemente, em uma maior retração. O fato de o módulo de elasticidade do agregado ser menor também contribui para a movimentação da pasta (ÂNGULO e FIGUEIREDO, 2011).

3.7.5 OUTRAS PROPRIEDADES

No estudo experimental desenvolvido por Kumar (2017) decréscimos foram observados tanto nos valores da **resistência à tração por flexão** (redução similar à da resistência à compressão) quanto na **resistência à abrasão** (redução de 18% a 22%) em concretos produzidos com a substituição do agregado graúdo natural por agregados graúdos reciclados de concreto. A maior influência na resistência à flexão foi verificada com a inserção de agregados pertencentes à faixa granulométrica 4,75 mm - 10 mm (mais de 20%), sendo que a fração pertencente à faixa 10 mm – 20 mm exerceu pouca influência. Algo que, segundo o autor, pode ser explicado pela maior demanda de pasta proporcionada pelos agregados menores.

3.8 DEMAIS PESQUISAS ENVOLVENDO O USO DE RESÍDUOS NA FABRICAÇÃO DE PCP

Muitos estudos relacionados à produção de peças de concreto para pavimentação com incorporação de resíduos vêm sendo realizados no Brasil e no mundo. Todos compartilham de um mesmo propósito, o qual consiste em encontrar formas eficazes para o reaproveitamento dos materiais descartados, reservando-lhes um destino que não seja os aterros já sobrecarregados ou o descarte ilegal.

A gama de materiais empregados é vasta e sua procedência remete aos múltiplos setores da indústria. A atividade que dá origem ao resíduo (além, é claro, do seu processo de beneficiamento) dita suas propriedades. Da mesma forma, os volumes gerados no país/região de desenvolvimento das pesquisas refletem na maior ou menor demanda pela reciclagem e influenciam na escolha do material. Como exemplo, têm-se os países onde os corpos hídricos não são abundantes como no Brasil e se faz necessária a obtenção de energia por meio de usinas termelétricas. Nesses países, é notável a quantidade de trabalhos relacionados ao reaproveitamento de resíduos provenientes da queima do carvão mineral, geralmente empregados sob a forma de cinzas volantes na produção dos artefatos de concreto. Além de resíduos do carvão mineral, borracha proveniente da recauchutagem de pneus, resíduos de

galvanoplastia, areia de fundição e até mesmo sedimentos marinhos obtidos na dragagem de portos e/ou canais têm sido empregados.

Nota-se na maioria dos trabalhos, a existência de duas tendências centrais. A primeira consiste na substituição dos agregados naturais por agregados reciclados, motivada, sobretudo, pela escassez de jazidas nos locais de pesquisa, e conseqüente necessidade de poupar as reservas de recursos naturais não renováveis.

A segunda tendência corresponde à substituição do aglomerante. O cimento é parcial ou totalmente substituído por cinzas volantes, sílica-ativa ou outros materiais com propriedades pozolânicas. Estes últimos consistem em materiais que por si só não possuem propriedades cimentícias, mas que durante as reações de hidratação do concreto dão origem à compostos aglomerantes. Tal procedimento tem como principal justificativa a emissão volumosa de gases de efeito-estufa e os enormes consumos energético e de recursos naturais ligados à produção do cimento, conforme aponta Maury e Blumenschein (2012). Vale ressaltar que certos trabalhos contam ainda com a substituição tanto dos agregados quanto do aglomerante, de forma combinada.

Além de valiosas por seu caráter de sustentabilidade, de uma forma geral, as pesquisas evidenciam a quão satisfatória e promissora pode se mostrar a substituição de agregados naturais por materiais reciclados. Na maioria dos estudos, foram obtidos resultados satisfatórios e compatíveis com a normas locais. Sendo que alguns apresentaram, para determinadas propriedades, valores até superiores para os concretos contendo resíduos do que para o concreto de referência.

Com o objetivo de inserir este trabalho no contexto atual de desenvolvimento das pesquisas relacionadas ao tema, serão apresentados nos Quadros 1, 2 e 3, alguns dos estudos levantados e suas respectivas características.

Quadro 1 – Outras pesquisas envolvendo o emprego de resíduos na produção de PCP

Autor da pesquisa	Fioriti, Ino e Akasaki (2010)	Marchioni et al. (2012)	Tavares e Franco (2012)	Uygunoglu et al. (2012)	Santos et al. (2013)
Origem do resíduo	Resíduos de borracha obtidos na recauchutagem de pneus.	Areia de fundição	Lodo e pó gerados no processo de galvanoplastia	Queima de carvão mineral (cinza volante), mármore e concreto.	Extração de carvão mineral
Tipo de moagem	Agregado miúdo	Agregado miúdo	Agregado miúdo	Agregado miúdo (bastante fino)	Agregado miúdo
Teores de adição/substituição	Substituição de 8%, 10%, 12%, 15% e 20% sobre a massa de areia natural.	Substituição de 18%, 25%, 30% e 40% sobre a massa de areia	Substituição de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% e 30% da massa de cimento por pó de galvanoplastia. Substituição de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% do cimento por lodo de galvanoplastia.	Substituição de 10%, 20%, 30% e 40% da massa de cimento por cinza volante. Substituição total do pó de pedra pelos resíduos de mármore e de concreto alternadamente; mantida a proporção de 40% de agregados graúdos e 60% de agregados miúdos.	Substituição de 25%, 50%, 75% e 100% da massa da areia natural por rejeitos de carvão.
Traço de referência (em massa)	1: 2,88: 1,44: 0,44 (cimento, areia, pedrisco, água). Traço em volume.	Não informado no trabalho.	1: 2,5: 1,3: 0,40 (cimento, areia, pedrisco, água).	1: 4,04: 2,75: 0,45 (cimento, pó-de-pedra, pedrisco, água).	1: 2,64: 1,17: 0,39 (cimento, areia, pedrisco, água)
Tipo de cimento	CP V ARI	CP V ARI	CP V ARI	CEM I 42.5R classificado conforme a norma turca TS EN 197-1: 2005	CP V ARI RS
Aditivo utilizado	Aditivo plastificante à base de lignosulfonatos (0,22% sobre a massa de cimento para o concreto de referência).	Nenhum	Nenhum	Nenhum	Nenhum
Geometria dos corpos de prova	Peças do tipo "16 faces" nas dimensões 12x24x6 (cm) e 11x22x6 (cm). Confeccionadas em vibroprensa semiautomática pneumática.	Peças retangulares, produzidas em vibroprensa hidráulica. Dimensões não especificadas.	Peças retangulares nas dimensões (10x20cx8)cm, produzidas com vibroprensa pneumática semi-automática.	Peças do tipo "osso", dimensões 20x20x8 (cm). Reentrâncias de 2,5cm e 4cm. Produção em vibroprensa pequena.	Peças do tipo "16 faces", dimensões 22,5x12x8 (cm). Confeccionados em vibroprensa manual de baixa produção.
Ensaio	Compressão conforme ABNT NBR 9780: 1987 (28 dias); absorção de água conforme ABNT NBR 12118: 1991 e abrasão profunda conforme ABNT NBR 13818: 1997.	Compressão conforme ABNT NBR 9780: 1987 (28 dias); abrasão e absorção de água conforme CSN EN 1338: 2003,	Compressão conforme ABNT NBR 9780: 1987 (77, 14, 28 e 60 dias) e absorção de água conforme ABNT NBR 12118: 2010.	Compressão conforme TS EN 12390-3: 2010 (28 dias); tração por compressão diametral (3, 7 e 28 dias) e abrasão (28 dias) conforme TS 2824 EN 1338: 2009; e absorção de água conforme o Princípio de Arquimedes e a mensuração das massas: saturada ao ar livre, saturada imersa, e seca a 105°C (28 dias).	Compressão conforme ABNT NBR 9780:1987 (7, 28 e 90 dias); abrasão conforme ABNT NBR 12042: 1992 (28 dias); absorção de água conforme ABNT NBR 9778:2005 (28 dias) e avaliação dos padrões colorimétricos via espectrômetro de reflexão.
Resultados (aos 28 dias)	Compressão: Melhor resultado obtido com 8% de substituição (15,4 MPa contra 19,4 MPa do concreto de referência). Absorção de água: Melhor resultado com 8% de resíduo (5,9% contra 6,5% para concreto de referência). Abrasão: Melhor resultado com 10% de substituição (25,95mm contra 36,34mm para concreto de referência).	Compressão: Melhor resultado obtido com 18% de substituição (35,7 MPa contra 43,8 MPa do concreto de referência). Absorção de água: Melhor resultado com 18% de resíduo (3,0% contra 3,4% para concreto de referência). Abrasão: Melhor resultado também com 18% de substituição (18,35mm contra 18,25mm para concreto de referência).	Compressão: Melhor resultado obtido com 5% de substituição da areia natural pelo resíduo na forma de pó (cerca** de 42,0MPa contra 37,4MPa do concreto de referência). Absorção de água: Melhor resultado obtido com 5% de substituição da areia natural pelo resíduo na forma de pó (cerca** de 3,0% contra cerca** de 4,5% do concreto de referência).	Compressão: Melhor resultado obtido com apenas 10% de cinza volante (32,1 MPa contra 29,53MPa do concreto de referência). Absorção de água: Melhor resultado com apenas resíduo de mármore (3,5% contra 4,4% para concreto de referência). Pior resultado com 40% de cinza volante e resíduo de concreto (16,6%). Abrasão: Melhor resultado com 10% de cinza volante e resíduo de concreto (cerca de 18,00mm contra cerca de 23,00mm para concreto de referência).	Compressão: Melhor resultado obtido com 25% de rejeito de carvão (37,6 MPa contra 39,5 MPa do concreto de referência). Absorção de água: Melhor resultado com 25% de rejeito de carvão (5,3% contra 4,9% para concreto de referência). Abrasão: Melhor resultado também com 25% de resíduo de carvão (7,5mm contra 6,6mm para concreto de referência).

**Valor extraído de gráfico

Quadro 2 – Outras pesquisas envolvendo o emprego de resíduos na produção de PCP (continuação)

Autor da pesquisa	Sadek e El Nouhy (2013)	Mashaly et al. (2015)	Alcântara e Nóbrega (2015)	Said, Missaoui e Lafhaj (2015)
Origem do resíduo	Resíduos de cerâmica	Lodo proveniente do beneficiamento do mármore.	Cerâmica vermelha	Sedimentos marinhos obtidos na dragagem de portos.
Tipo de moagem	Agregado miúdo e agregado graúdo	Agregado miúdo (bastante fino)	Agregado miúdo	Agregado miúdo
Teores de adição/substituição	Peças produzidas em duas camadas. Na camada superior: Substituição de 50% e 100% da massa de areia natural por resíduo de cerâmica. Para a camada inferior: Substituição de 50% e 100% da massa de pedrisco por resíduo de cerâmica; Substituição de 50% e 100% da massa de areia natural por resíduo; Substituição simultânea de 50% da massa de pedrisco e 50% da massa de areia por resíduo de cerâmica.	Substituição de 10%, 20%, 30% e 40% da massa de cimento por resíduo de mármore.	Adição de 20%,30%,40%, 50%, 100% e 150%. Porcentagem sobre a massa de cimento. Todos com 2% de pigmento (óxido férrico).	Substituição de 19% sobre a massa de areia natural.
Traço de referência (em massa)	Para camada superior: 1: 3,0: 0,22 (cimento: areia: água). Para a camada inferior: 1: 1,88: 1,12: 0,19 (cimento: areia: pedrisco: água).	1: 2,0: 3,37: 0,48 (cimento: areia: pedrisco: água).	1: 2,29: 1,76: 0,95 (cimento: areia média: areia muito grossa: pedrisco). Relação água/materiais secos igual à 0,80. Traço de referência com 4% de pigmento (óxido férrico) sobre a massa de cimento.	1: 3,0: 2,1: 0,27 (cimento: areia fina: areia grossa: água).
Tipo de cimento	CEM I 52.5N classificado conforme a norma egípcia ESS 4756-1: 2007	CEM I 32.5N	CP II Z 32	CEM I 42.5R
Aditivo utilizado	Nenhum	Nenhum	Nenhum	Nenhum
Geometria dos corpos de prova	Peças hexagonais com 315 cm ² de área na superfície de rolamento e produzidas em duas camadas. Camada inferior com cerca de 7cm e camada superior (0,8-1) cm, totalizando 8cm de altura. Produção realizada em máquina vibroprensa não especificada.	Ensaio de Compressão e Tração na flexão realizados em peças retangulares nas dimensões (10x20cx6)cm. Fôrmas preenchidas manualmente e adensamento com auxílio de vibrador mecânico. Ensaio de Absorção de água realizado em cubos de 5x5x5(cm). Abrasão realizada em peças com dimensões (7x7cx6)cm.	Peças retangulares nas dimensões (10x20cx6)cm, produzidas com vibroprensa hidráulica semi-automática	Peças retangulares nas dimensões (16,3x19,8cx6)cm, produzidas com vibroprensa semi-automática de escala industrial
Ensaio	Compressão e absorção de água conforme ASTM C140: 2003; tração por compressão diametral conforme BS EN 1338: 2003; abrasão conforme ESS 4382: 2008, BS EN 1338: 2003 e ASTM C418: 2005. Todos ensaios realizados aos 28 dias.	Compressão e Tração na flexão conforme ASTM C140: 2003; absorção de água conforme BS EN 1338: 2003 e ASTM C140: 2003; abrasão pelo Método de Böhme. Todos ensaios realizados aos 28 dias.	Compressão e absorção de água, ambos conforme ABNT NBR 9781:2013. Todos realizados aos 7 e 28 dias.	Tração por compressão diametral, abrasão e absorção de água, ambos conforme norma francesa NF EN 1338: 2010. Todos realizados aos 7, 28 e 90 dias.
Resultados (aos 28 dias)	Compressão: Melhor resultado com 100% de substituição da massa de areia natural por resíduo de cerâmica na camada superior das peças (52,4MPa contra 38,8MPa do concreto de referência). Tração por compressão diametral: Melhor resultado com 50% de substituição da areia natural na camada inferior das peças (3,67MPa contra 3,23MPa do concreto de referência). Absorção de água: Melhor resultado para as substituições de 50% e 100% da areia na camada superior das peças (3,8% contra 5,2% do concreto de referência). Abrasão conforme BS EN 1338: Melhor resultado com 50% de substituição da areia natural por resíduo de cerâmica na camada superior das peças (21,5mm contra 26,5mm do concreto de referência).	Compressão: Melhor resultado com 20% de resíduo de mármore (36,6MPa contra 33,4MPa do concreto de referência). Tração na flexão: Melhor resultado com 20% de resíduo (4,38MPa contra 3,61MPa do concreto de referência). Absorção de água: Melhor resultado também com 20% de resíduo de mármore (7,8% contra 8,07% do concreto de referência). Abrasão: Melhor resultado com 20% de resíduo (0,09cm ³ /cm ² de desgaste superficial contra 0,11cm ³ /cm ² do concreto de referência).	Compressão: Melhor resultado com 50% de resíduo de cerâmica (16,84 MPa contra 35,05 MPa do concreto de referência). Piores resultados obtidos com 150% (4,93 MPa). Absorção de água: Melhor resultado com 20% de resíduo (11,58% contra 5,88% para concreto de referência).	Tração por compressão diametral: 3,56MPa com 19% de sedimento marinho contra 2,7MPa do concreto de referência. Abrasão: 22mm com 19% de resíduo contra 24mm do concreto de referência. Absorção de água: 4,05% com 19% de resíduo contra 5,03% do concreto de referência.

Quadro 3 – Outras pesquisas envolvendo o emprego de resíduos na produção de PCP (continuação 2)

Autor da pesquisa	Dimitrioglou et al. (2015)	Penteado, Carvalho e Lintz (2016)	Özalp et al. (2016)	Sadek, El-Attar e Ali (2017)
Origem do resíduo	Escória de ferroníquel obtida no tratamento pirometalúrgico da laterita.	Resíduo de porcelanato, cerâmica semi-grês e cerâmica porosa obtidos na retífica de revestimentos.	Resíduos de concreto provenientes da demolição de edifícios	Pó de forno de cimento (removido dos gases de escape de fornos empregados na produção do aglomerante)
Tipo de moagem	Agregado miúdo (4mm)	Agregado miúdo (bastante fino)	Agregado miúdo (0-5)mm e agregado graúdo (5-12)mm	Agregado miúdo (bastante fino)
Teores de adição/substituição	Substituição de 10% e 20% sobre a massa total de calcário britado.	Substituição de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% da areia natural por resíduo de polimento. Substituição de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% do cimento por resíduo de polimento.	Substituição simultânea de 20% da massa de areia e de 20% da massa de brita por resíduos de concreto (40% de substituição sobre a massa total de agregados).	Substituição de 10%, 20%, 30% e 60% sobre a massa de cimento. Adição de 20% sobre a massa de cimento.
Traço de referência (em massa)	1: 8,97: 0,45 (cimento: calcário britado: água).	1: 0,77: 2,33: 1,1: 0,48 (cimento: areia: pó-de-pedra: pedrisco: água).	1: 1,44: 1,4: 2,88: 0,40 (cimento: areia: pó-de-pedra: pedrisco: brita: água).	1: 1,88: 1,12: 0,19 (cimento: areia: dolomita britada: água).
Tipo de cimento	CEM I 52.5	CP V ARI	CEM I 42.5R	CEM I 42.5N classificado conforme a norma britânica BS EN 197-1: 2011
Aditivo utilizado	Superplastificante na proporção 1kg/m ³ de concreto.	Glenium 51® à base de policarboxilato (teor de 0,7% sobre a massa do cimento)	Superplastificante à base de policarboxilato (teor de 1,8% sobre a massa do cimento)	Nenhum
Geometria dos corpos de prova	Peças retangulares nas dimensões (10x20x6)cm, produzidas com vibroprensa semiautomática de escala industrial.	Peças retangulares nas dimensões 20x10x6(cm). Concreto produzido em betoneira, peças moldadas em formas plásticas e adensadas em mesa vibratória.	Peças do tipo "osso", dimensões não especificadas. Produção em vibroprensa de escala industrial.	Peças hexagonais com lados de 11,5cm e altura 8cm, produzidas com vibroprensa semiautomática.
Ensaios	Compressão conforme ASTM C936: 2001; Tração por compressão diametral, abrasão e absorção de água conforme BS EN 1338:2013. Todos os ensaios realizados aos 28 dias.	Compressão conforme ABNT NBR 9781: 2013 (7 e 28 dias) e absorção de água conforme ABNT NBR 9778:2005 (28 dias).	Tração por compressão diametral, abrasão e absorção de água conforme EN 1338: 2005. Todos ensaios realizados aos 28 dias.	Compressão e absorção de água conforme ASTM C140/C140M: 2015; tração por compressão diametral e abrasão conforme BS EN 1338: 2003. Todos ensaios realizados aos 28 dias.
Resultados (aos 28 dias)	Compressão: Melhor resultado com 10% de escória (62,5 MPa contra 53,9MPa do concreto de referência). Tração por compressão diametral: Melhor resultado com 10% de escória (3,83MPa contra 4,13MPa do concreto de referência). Absorção de água: Melhor resultado também com 10% de resíduo (5,6% contra 5,3% do concreto de referência). Abrasão: Melhor resultado com 10% de resíduo (21,5mm contra 21,0mm do concreto de referência).	Compressão: Melhor resultado com 30% de substituição da areia natural por resíduo de porcelanato (70,2 MPa contra 62,4 MPa do concreto de referência). Absorção de água: Melhor resultado com 30% de substituição da areia natural por resíduo de porcelanato (4,7% contra 5,22% para concreto de referência).	Tração por compressão diametral: 2,4MPa com 40% de resíduo de concreto contra 4,2MPa do concreto de referência. Abrasão: 25mm com 40% de resíduo contra 23mm do concreto de referência. Absorção de água: 8,7% com 40% de resíduo contra 5,4% do concreto de referência.	Compressão: Melhor resultado com 20% de adição do pó de forno (65,9 MPa contra 62,3 MPa do concreto de referência). Melhor substituição com 10% do resíduo (58,4MPa). Tração por compressão diametral: Melhor resultado com 20% de adição do pó de forno (5,11MPa contra 4,71MPa do concreto de referência). Melhor substituição com 10% do resíduo (4,63MPa). Absorção de água: Melhor resultado com 20% de adição do pó de forno (2,29% contra 2,39% do concreto de referência). Melhor substituição com 10% do resíduo (2,6%). Abrasão: Melhor resultado com 20% de adição do pó de forno (19,5mm contra 19,74mm do concreto de referência). Melhor substituição com 10% do resíduo (20,88mm).

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Um dos pontos principais do programa experimental consistiu no envolvimento de uma empresa tradicional na fabricação das peças de concreto para pavimentação. A participação da GLASSER Pisos e Pré-moldados Ltda., atuante há mais de 46 anos no setor de blocos e de PCP, forneceu grande valor à pesquisa, por permitir o emprego de equipamentos de qualidade, eficiência e compatíveis com a produção em escala industrial. Conforme abordado no Capítulo 2, o emprego de máquinas vibroprensas na produção das peças exerce grande influência, tanto no aspecto quanto nas propriedades físicas e mecânicas dos artefatos. Além disso, a parceria estabelecida neste trabalho com uma indústria do setor permitiu uma maior aproximação entre o estudo desenvolvido e a realidade praticada no mercado atual.

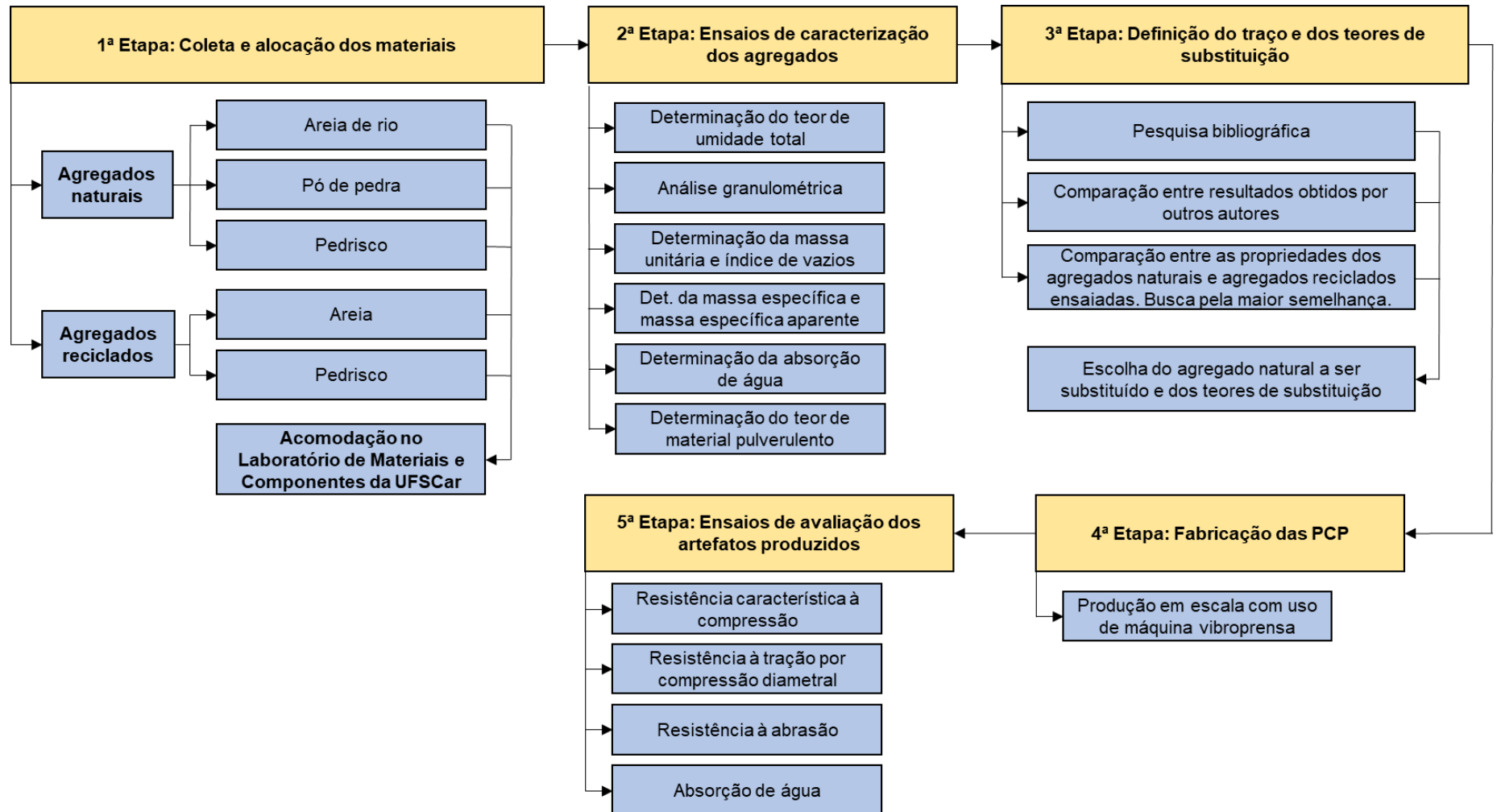
Também merece destaque a realização dos ensaios de avaliação das peças produzidas no Laboratório de Concreto da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). A execução de ensaios em um laboratório conceituado e certificado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), bem como a atuação de técnicos especializados foram de grande valia para a pesquisa, estando diretamente relacionadas à credibilidade dos resultados alcançados.

De uma forma geral, o programa experimental dessa pesquisa foi dividido em 5 etapas principais, sendo elas:

- 1) Coleta e alocação dos agregados naturais e reciclados;
- 2) Caracterização em laboratório;
- 3) Definição dos traços e teores de substituição;
- 4) Fabricação das peças de concreto para pavimentação;
- 5) Avaliação das peças produzidas.

Toda a sequência do programa experimental pode ser melhor entendida por meio do organograma contido na Figura 30.

Figura 30 - Etapas do programa experimental



Fonte: Autor (2017)

4.1 MATERIAIS

Segundo Fernandes (2016), além dos equipamentos de produção, instalações e acessórios, é fundamental conhecer as características dos materiais empregados na fabricação das peças de concreto para pavimentação e levá-las em conta durante a definição dos traços. A ausência de tais informações pode levar a práticas inadequadas, marcadas pela baixa produtividade, o consumo elevado de cimento e o alto custo de produção. Nesta seção cada um dos materiais empregados na fabricação das PCP e suas respectivas características serão apresentados.

4.1.1 CIMENTO PORTLAND

O Cimento Portland utilizado foi o do tipo V de Alta Resistência Inicial (CP V ARI), comumente adotado pela fábrica participante da pesquisa. Como o próprio nome sugere, esse tipo de cimento desenvolve resistência mais rapidamente. Isso se deve ao seu teor mais elevado de silicato tri-cálcico - C_3S (mais alto do que 55%, chegando à 70%) e à maior finura dos grãos, resultado de uma moagem mais intensa (NEVILLE, 2016).

As principais propriedades químicas, físicas e mecânicas do lote de cimento utilizado foram ensaiadas segundo a norma ABNT NBR 5733 e fornecidas à empresa participante da pesquisa pelo fabricante. Seus valores médios encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado

Limites ABNT NBR 5733		Valores médios obtidos	
Teores (%)	Perda ao fogo (PF)	≤ 4,5	3,33
	Óxido de magnésio (MgO)	≤ 6,5	5,81
	Trióxido de enxofre (SO_3) p/ Aluminato de cálcio (C_3A) ≥ 8	≤ 4,5	3,36
	Resíduo insolúvel (RI)	≤ 1,0	0,49
	Anidrido carbônico (CO_2)	≤ 3,0	2,69
Finura (%)	#200	≤ 6,0	0,00
	#400	N/A	0,55
	Blaine (cm^2/g)	≥ 3000	4992
	Água de consist. (%)	N/A	30,4
Tempo de pega	Início (min)	≥ 60	179
	Fim (min)	≤ 600	242
	Expansibilidade a quente (mm)	≤ 5,0	-
Resistência à compressão (MPa)	1 Dia	≥ 14,0	29,3
	3 Dias	≥ 24,0	40,5
	7 Dias	≥ 34,0	47,7
	28 Dias	N/A	-

Com maiores resistências já nas primeiras idades, os artefatos produzidos com CP V ARI podem ser manuseados já no dia seguinte à fabricação, além de apresentarem menores índices de quebra durante a fase de paletização. Desta forma, o CP V ARI é um dos mais indicados para a produção de blocos e pavers (FERNANDES, 2016).

4.1.2 AGREGADOS NATURAIS

4.1.2.1 Areia Natural

A areia natural empregada foi cedida pela GLASSER e consiste no mesmo agregado miúdo comumente utilizado na fabricação de seus produtos. Trata-se de uma areia de rio média, extraída na região de Guararema-SP e fornecida pelo Grupo Sargon com o nome de “Itaquareia”.

4.1.2.2 Pó de pedra

O segundo agregado miúdo utilizado consiste em uma areia industrializada, obtida durante o próprio processo de britagem dos agregados graúdos, e popularmente conhecida como “Pó de Pedra”. Embora alguns autores considerem o pó de pedra um agregado reciclado, tendo-o como resíduo do processo de britagem, nesta pesquisa ele será classificado como agregado natural. Para este trabalho, o pó de pedra também foi cedido pela fábrica, cujo fornecimento é realizado pela Pedreira Polimix, unidade de Guarulhos-SP.

Fernandes (2016) afirma que o uso do pó de pedra é interessante por apresentar ao mesmo tempo grãos finos que fornecem coesão à mistura, grãos médios que dão volume à argamassa, e graúdos os quais contribuem com a resistência da peça. O autor afirma ainda que quando a quantidade de finos no pó de pedra é balanceada, o mesmo atua como uma areia artificial que se combina muito bem com o pedrisco ou com a areia grossa, ajudando a alcançar o que seria uma curva granulométrica ideal para a produção de blocos e pavers.

Para o pó de pedra utilizado nesta pesquisa, especificamente, notou-se a presença de uma grande quantidade de finos, já no momento da coleta.

4.1.2.3 Pedrisco

O agregado graúdo comumente empregado pela fábrica é um pedrisco, com dimensão máxima característica 12,5 mm, conhecido anteriormente no mercado como brita nº0. É composto em sua maioria por granito e sua origem também remete à Pedreira Polimix de Guarulhos-SP.

4.1.2.4 Coleta e alocação dos agregados naturais

Durante uma visita à GLASSER foram coletados cerca de 200 kg de material, incluindo areia de rio, pó de pedra e pedrisco. No momento da coleta, os materiais se encontravam

dispostos em pilhas. Desta maneira foram extraídas amostras em pontos aleatórios (no topo, na base e no meio das pilhas de agregados) tal como exigem as normas para amostragem de agregados ABNT NM 26: 2001 e ABNT NM 27: 2000. Nos pontos onde a segregação do material era visível a camada superficial também foi removida antes que o material fosse extraído. Na sequência, as amostras coletadas foram colocadas em sacos plásticos limpos e presas com cintas plásticas abraçadeiras (também conhecidas por fitas Hellerman ou “enforca-gatos”) para que a água presente nas amostras não se extinguisse e fosse possível descobrir o quão úmido o material se encontrava na usina. A coleta dos agregados naturais realizada na empresa é ilustrada pela Figura 31.

Figura 31 - Coleta dos agregados naturais: a) estoque; b) coleta da areia de rio; c) coleta do pó de pedra; d) coleta do pedrisco.



Fonte: Autor (2017)

Após a coleta, os agregados naturais coletados foram levados ao Laboratório de Materiais e Componentes (LMC) da UFSCar, onde foram devidamente armazenados para posterior realização dos ensaios.

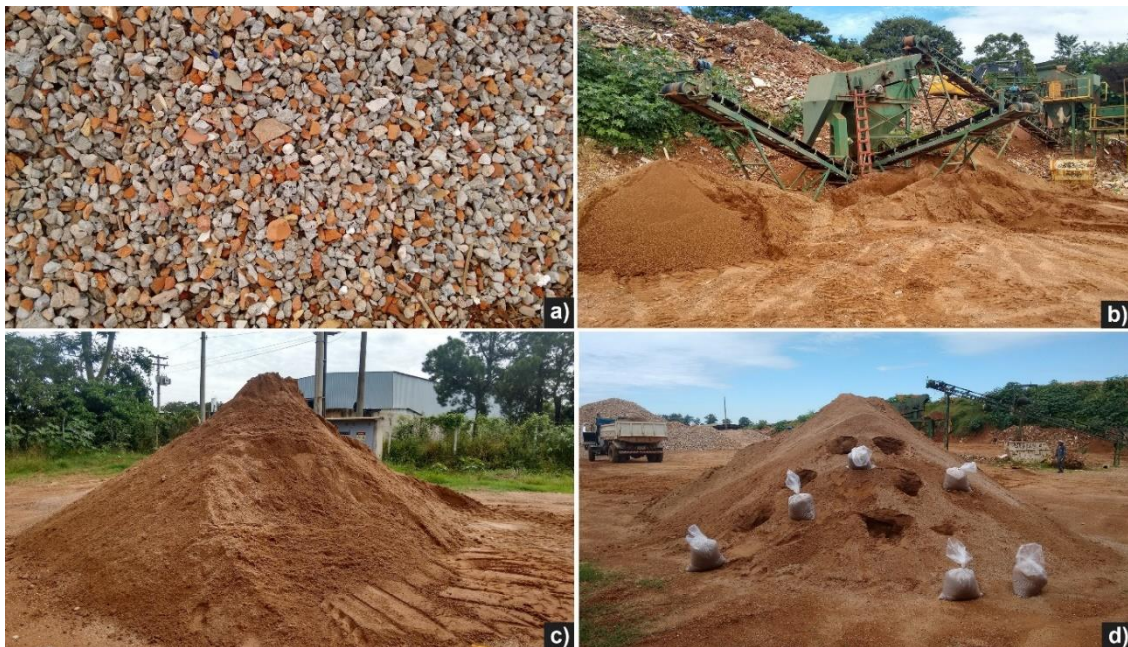
4.1.3 AGREGADOS RECICLADOS

Assim como na coleta dos agregados naturais, a extração de amostras de todos os agregados reciclados a serem apresentados foi realizada com base nas normas ABNT NBR NM 26: 2001 e ABNT NM 27: 2000.

4.1.3.1 Areia reciclada

Inicialmente, por conta da logística facilitada, a areia reciclada foi obtida no próprio município de São Carlos-SP. Para tal, contou-se com a colaboração de uma das duas usinas de reciclagem de RCC do município, denominada AMX Ambiental. No momento da coleta, o agregado encontrava-se bastante úmido por conta da chuva que havia ocorrido no dia anterior. Foram enchidos dez sacos plásticos, cada um contendo cerca de 27 kg de material. Em seguida, os sacos foram lacrados com cintas plásticas abraçadeiras e transportados até o Laboratório LMC da UFSCar. O procedimento de coleta dos agregados reciclados no município de São Carlos está representado na Figura 32.

Figura 32 - Coleta de areia reciclada em São Carlos: a) resíduo misto; b) britador; c) pilha de areia reciclada; d) pilha após coleta.



Fonte: Autor (2017)

Durante a realização dos primeiros ensaios de caracterização com o material de São Carlos-SP (cujos resultados serão apresentados no Apêndice, ao final deste trabalho), notou-se no mesmo a presença acentuada de partículas finas, de tal forma que, após a secagem em estufa o agregado reciclado adquiria a aparência de um solo, e seu processo de homogeneização, bem como sua manipulação durante os próprios ensaios eram bastante dificultados pela grande quantidade de partículas em suspensão.

Segundo Sbrighi Neto (2011), a presença excessiva de material pulverulento, termo que segundo a NBR 7211 define partículas com dimensão inferior à $75\mu\text{m}$, pode afetar a trabalhabilidade e provocar fissuração no concreto, além de elevar o consumo de água por metro cúbico. Fernandes (2016) afirma que quando aderidos à superfície do agregado graúdo,

os finos formam uma camada isolante na interface pasta/cimento, prejudicando a aderência e diminuindo a resistência do concreto, sobretudo aos esforços de tração.

O agregado obtido em São Carlos-SP também advinha de um resíduo misto, ou seja, possuía não só concreto e argamassa, mas similarmente uma grande quantidade de cerâmica vermelha, que conforme apresentado no Capítulo 4, corresponde ao material mais poroso presente no RCC. Das duas empresas contatadas na cidade, uma declarou nunca ter realizado a segregação entre resíduo cinza (argamassa e concreto) e resíduo vermelho (cerâmica vermelha, solo), e a outra alegou ter deixado de realizar essa separação por não haver retorno financeiro que pagasse o esforço adicional.

Além da menor porosidade, a ideia de se empregar apenas o resíduo cinza na composição de novos concretos se justifica pelo fato deste conter alguns grãos anidros de cimento, ou seja, grãos que ainda não passaram pelo processo de hidratação. Isso, mesmo que pouco, poderia auxiliar no ganho de resistência do concreto (KATZ, 2003).

Acreditando que melhores resultados pudessem ser obtidos com a utilização de agregados advindos somente de resíduos de concreto e argamassa, buscou-se então uma segunda opção. Após uma visita e conhecimento dos trabalhos realizados na Central de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil da cidade de São José do Rio Preto-SP, a mesma foi então escolhida para o fornecimento dos agregados reciclados da pesquisa.

Vale ressaltar que embora a areia reciclada de São Carlos-SP não tenha sido encarada como melhor opção para fabricação de PCP, isto não descarta a possibilidade de reuso do material para outras finalidades. Um exemplo disso é o fornecimento frequente de areia reciclada pela AMX Ambiental às obras do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) do município para o preenchimento de valas feitas para passagem de tubulação. Para essa finalidade, a grande quantidade de cerâmica vermelha presente e a semelhança do resíduo com solo podem ser desejáveis.

4.1.3.2 A central de reciclagem de São José do Rio Preto-SP

As informações sobre a Central de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil de São José do Rio Preto apresentadas a seguir foram extraídas do trabalho desenvolvido por Marques Neto (2009).

O município de São José do Rio Preto foi dos primeiros a implantarem um plano de gestão de RCC no Brasil, demonstrando interesse em gerenciar seus entulhos de forma mais eficiente desde 2000. Além de pontos de apoio espalhados pela cidade e voltados à coleta de pequenos volumes de resíduos, em setembro de 2005, após um investimento inicial em torno de R\$ 1 milhão, Rio Preto passou a contar com a Central de Reciclagem para fazer frente às quantidades geradas no município. No projeto da central, constam as seguintes instalações:

- Guarita para inspeção e liberação da carga;

- Escritório da administração;
- Equipamento de reciclagem composto por um britador de mandíbula, um conjunto de esteiras rolantes, eletroímã para retirada de metais e um conjunto de peneiras;
- Áreas para estocagem de resíduos provenientes dos pontos de apoio;
- Áreas para estocagem de resíduos classe A provenientes das empresas de coleta pertencentes à Associação dos Transportadores de Entulho;
- Fábrica de artefatos de cimento;
- Área para atividades de educação ambiental.

A capacidade de produção diária é de 35,00 t/hora e o expediente de segunda à sexta das 7h00 às 17h00. O britador empregado é de impacto, dotado de martelos tipo estrela e fabricado pela Maqbrit Comércio e Indústria de Máquinas Ltda.

Quanto à separação entre resíduos cinzas e resíduos vermelhos, essa ocorre de fato. Uma medida que se justifica pelo próprio interesse da usina em incorporar seus resíduos na fabricação de artefatos de concreto direcionados ao uso público. São fabricados na central de reciclagem: guias de rua, postes de alambrado, bancos para praça, tampas para caixas de luz, tampas para bocas de lobo e até mesmo peças de concreto para pavimentação. Nenhum desses artefatos é comercializado, sendo seu uso voltado apenas à manutenção da infraestrutura de locais públicos bem como obras de interesse social. A usina também cede agregados reciclados para pavimentação de vias rurais. A Figura 33 apresenta a central de reciclagem de Rio Preto em funcionamento.

Figura 33 - Usina de Reciclagem de RCC de Rio Preto: a) britador; b) resíduo cinza; c) fábrica de artefatos; d) artefatos produzidos com resíduos.



Fonte: Autor (2016)

Na usina de São José do Rio Preto-SP foram coletados cerca de 260 kg de areia de resíduo cinza reciclada e 260 kg de pedrisco de resíduo cinza reciclado. No momento da coleta, percebeu-se que o material também apresentava elevada umidade. Sobre a areia, a qual foi coletada no interior de uma pilha que aparentemente estava encharcada. A Figura 34 ilustra o procedimento.

Figura 34 - Coleta de agregados reciclados em São José do Rio Preto: a) coleta da areia de resíduo cinza reciclado; b) coleta de pedrisco de resíduo cinza reciclado.



Fonte: Autor (2017)

A estratégia de se coletar os materiais reciclados tanto na granulometria de pedrisco quanto de areia justifica-se pelo seguinte: após os ensaios de caracterização, a maior semelhança encontrada entre as propriedades dos agregados naturais e dos agregados reciclados, aliada ao estudo da bibliografia, subsidiaria a escolha do material a ser substituído na produção das PCP. Os resultados dos ensaios de caracterização do material coletado em São José do Rio Preto-SP e não utilizado na produção das peças serão apresentados no Apêndice, ao final deste trabalho.

4.1.4 ÁGUA

A água utilizada na fabricação das peças foi proveniente de um poço artesiano localizado nas proximidades da GLASSER.

4.1.5 ADITIVO

O aditivo empregado na produção dos artefatos foi o plastificante densificador CQ PRESS MIX TOP®, produzido pela Camargo Distribuidora de Produtos Químicos Ltda. e recomendado para produção de produtos com concreto seco. Trata-se de um líquido amarelo e viscoso, com aparência semelhante à de um detergente de uso convencional. Na Tabela 7 são apresentadas algumas propriedades obtidas na ficha técnica disponível no site do fabricante.

Tabela 7 - Dados técnicos do plastificante CQ PRESS MIX TOP

Função	Plastificante
Densidade (g/cm ³)	1,03 -1,07
Viscosidade (cSt)	500 -1500
pH	12 -13

De acordo com o fabricante, o produto é isento de cloretos e seu uso proporciona as seguintes vantagens:

- Aumento na resistência do concreto pela redução de água na mistura;
- Melhora no acabamento da peça pela facilitação do deslizamento durante a desforma;
- Aumento no grau de compactação das peças, elevando a impermeabilidade das mesmas;
- Melhora a lubrificidade da massa, reduzindo o desgaste das formas e roscas;
- Melhora na coesão da massa, reduzindo a quebra durante a produção dos artefatos;
- Redução no consumo de cimento;
- Aumento da produtividade.

Quanto à quantidade a ser utilizada, o fabricante recomenda a adição de 100 ml a 150 ml do aditivo para cada 100 kg de cimento.

4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

4.2.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

4.2.1.1 Secagem inicial em estufa

Com exceção do ensaio de umidade total, todos os demais ensaios foram precedidos por uma secagem inicial do material em estufa durante pelo menos 24 horas a cerca de $105 \pm 5^\circ\text{C}$.

4.2.1.2 Quarteamento do material

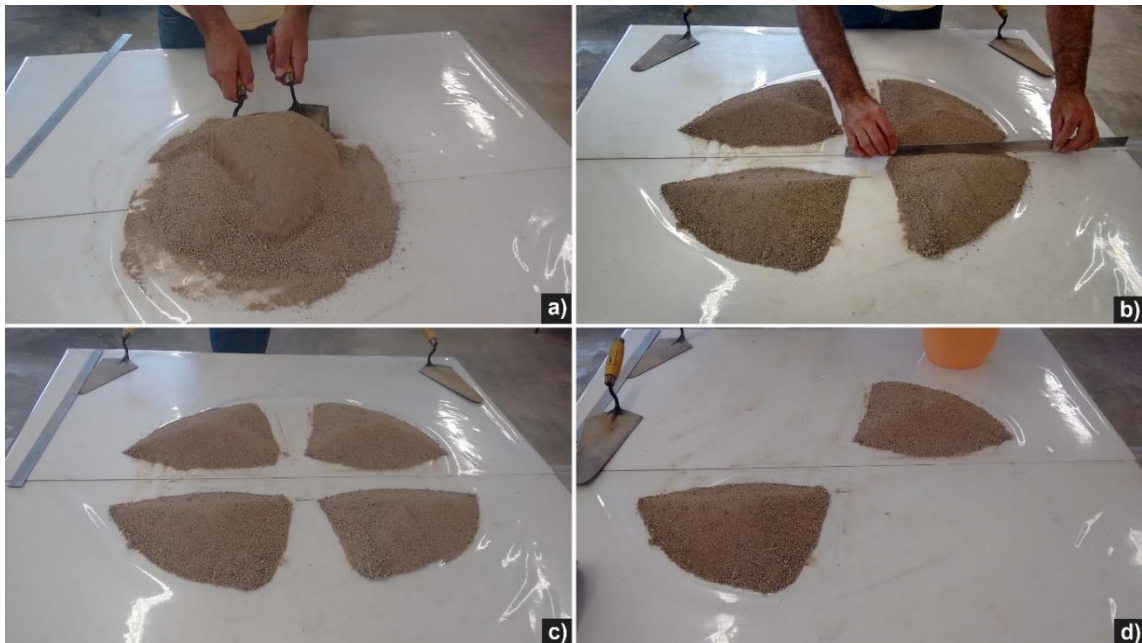
Um segundo procedimento que precedeu a realização dos ensaios foi o quarteamento dos agregados. Realizado com base na ABNT NBR NM 27: 2000, trata-se de um processo mecânico de homogeneização e redução da amostra de campo. Para os agregados miúdos, a execução do quarteamento se dá da seguinte maneira:

- a) A amostra de campo (já seca) é colocada sobre uma superfície rígida, limpa e plana;

- b) A amostra é revolvida por no mínimo três vezes e reunida na forma de um cone;
- c) O cone é achatado cuidadosamente com a ajuda de uma pá, formando um tronco cuja base deve ter diâmetro de 4 a 8 vezes o valor de sua altura;
- d) A massa achatada é dividida em 4 partes iguais;
- e) Elimina-se duas partes e agrupa-se as outras duas, em sentido diagonal;
- f) Os passos acima são repetidos com o material remanescente, até que a quantidade necessária de material para o ensaio seja obtida.

O quarteamento realizado para a areia reciclada é apresentado pela Figura 35.

Figura 35 - Quarteamento do agregado miúdo: a) homogeneização; b) divisão; c) material dividido; d) final do quarteamento.



Fonte: Autor (2017)

Em função da dificuldade em manusear os agregados graúdos, maiores e mais pesados, seu processo de quarteamento pode ser realizado sobre o piso do ambiente, conforme os seguintes passos:

- a) A amostra de campo (já seca) é colocada sobre uma lona plástica limpa e também seca, estendida sobre o piso;
- b) A homogeneização da amostra é realizada levantando-se alternadamente, cada ponta da lona, puxando sobre a amostra as pontas diagonalmente opostas, fazendo com que o material seja rolado;
- c) O cone é cuidadosamente achatado e dividido tal como para os agregados miúdos.

Caso a superfície do piso seja irregular, a divisão deve ser feita introduzindo-se uma haste rígida por baixo da lona, de forma que passe pelo centro do cone, levantando-o e seccionando-o em duas partes. Retira-se a haste e a introduz novamente sob a lona, passando pelo centro do cone, dessa vez formando um ângulo reto com a primeira divisão. Levanta-se então a haste, obtendo-se ao final, quatro partes iguais.

- d) Elimina-se duas partes e agrupa-se as outras duas, em sentido diagonal;
- e) Os passos anteriores são repetidos com o material remanescente, até que a quantidade necessária de material para o ensaio seja obtida.

O quarteamento de um dos agregados graúdos (pedrisco) realizado na pesquisa é ilustrado pela Figura 36.

Figura 36 - Quarteamento do agregado graúdo: a) cone achatado; b) divisão; c) material dividido; d) final do quarteamento.



Fonte: Autor (2017)

Nesta pesquisa, para todos os ensaios o processo de quarteamento foi realizado por duas vezes consecutivas até que o tamanho requerido para as amostras fosse alcançado. Durante o programa experimental, constatou-se que a realização do processo de quarteamento é determinante para a qualidade da amostra obtida. Sobretudo para os agregados reciclados, cuja heterogeneidade é evidente; quando executado corretamente

permite melhor controle sobre as disparidades entre valores de ensaios fornecidos por duas ou mais amostras distintas.

4.2.2 TEOR DE UMIDADE TOTAL

O ensaio de obtenção do teor de umidade total dos agregados é de fácil execução. Consiste basicamente em medir a massa de uma amostra pré-definida de material em seu estado úmido natural, secá-lo em estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ e após a secagem, medir a massa novamente. A relação em porcentagem entre a diferença de massa nas duas condições e a massa na condição seca fornece o teor de umidade total do agregado, conforme pode ser verificado na Equação 5.1:

$$U_t = \left[\frac{mu - m}{m} \right] \times 100 \quad (5.1)$$

Onde:

U_t = teor de umidade total do agregado (%);

mu = massa do agregado em seu estado natural (g);

m = massa do agregado seco em estufa (g).

Para a determinação do teor de umidade total foram utilizadas duas amostras de cada material, todas com massas iguais a 1 kg. A Figura 37 apresenta a execução do ensaio em questão para alguns dos materiais analisados.

Figura 37 - Obtenção do teor de umidade total: a) pesagem inicial; b) secagem em estufa.



Fonte: Autor (2017)

4.2.3 ENSAIO DE GRANULOMETRIA

A análise granulométrica de todos os agregados foi executada com base na norma ABNT NBR NM 248: 2003, sendo os parâmetros de aceitação e classificação dos agregados fornecidos pela ABNT NBR 7211: 2009. O ensaio se resume em colocar uma amostra de massa pré-estabelecida sobre um conjunto de peneiras e agitá-las mecânica ou manualmente durante um tempo razoável para permitir a separação dos diferentes tamanhos de grãos. Após a agitação, a massa retida em cada peneira é verificada.

Para cada um dos agregados miúdos foram ensaiadas duas amostras secas de massa igual a 500 g, e para cada agregado graúdo duas amostras secas de 5 kg. Todas as amostras foram agitadas mecanicamente durante 10 minutos. A Figura 38 ilustra o ensaio de granulometria para os agregados miúdos e graúdos.

Figura 38 - Ensaio de análise granulométrica: a) misturador mecânico para agregados miúdos; b) frações retidas nas peneiras; c) misturador para agregado graúdo; d) frações retidas nas peneiras.



Fonte: Autor (2017)

4.2.4 DETERMINAÇÃO DA MASSA UNITÁRIA E DO VOLUME DE VAZIOS

Tanto para os agregados graúdos (pedriscos) quanto para os agregados miúdos (areias e pó de pedra), naturais e reciclados, o procedimento do ensaio de massa unitária foi realizado com base na norma ABNT NM 45: 2006. De acordo com essa mesma norma, o

termo “massa unitária” define a relação entre a massa do agregado lançado em um recipiente e o seu volume, considerando-se também os vazios entre os grãos.

Quanto ao ensaio, este consiste em encher um recipiente de volume pré-estabelecido com agregado, de duas maneiras: a) apenas despejando o agregado até completar a capacidade do recipiente; e b) inserindo o material em três camadas e compactando-o com uma haste metálica ao final de cada camada. Após o recipiente ser preenchido, a massa do conjunto é medida, e por meio da Equação 5.2 e da Equação 5.3 calcula-se o valor massa unitária do agregado nos estados solto (a) e compactado (b), bem como o volume de vazios contidos no material.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (5.2)$$

Onde:

ρ_{ap} = massa unitária do agregado (kg/m³);

m_{ar} = massa do recipiente mais o agregado (kg);

m_r = massa do recipiente vazio (kg);

V = volume do recipiente (m³).

$$E_v = \frac{100[(d_1\rho_w) - \rho_{ap}]}{d_1\rho_w} \quad (5.3)$$

Onde:

E_v = índice de volume de vazios no agregado (%);

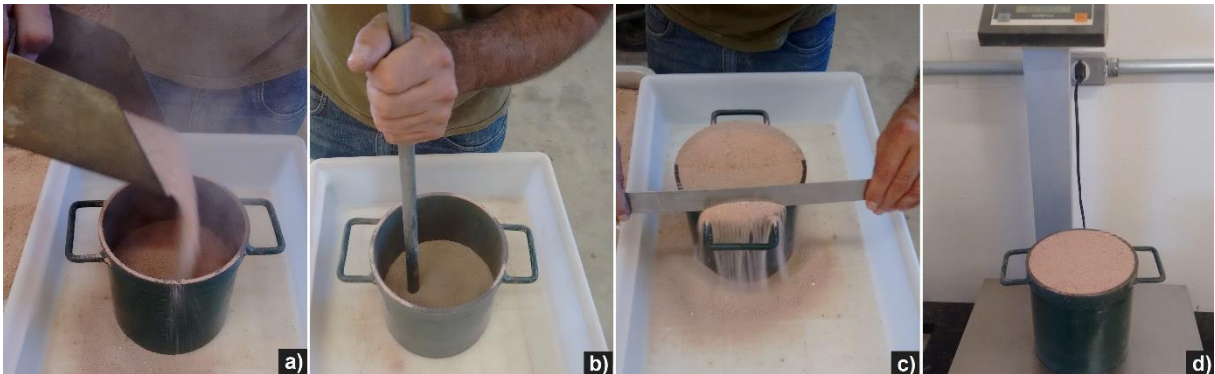
d_1 = massa específica relativa do agregado seco calculada conforme normas ABNT NBR NM 52 e ABNT NBR NM 53 (kg/m³);

ρ_w = massa específica da água (kg/m³);

ρ_{ap} = massa unitária média do agregado (kg/m³).

Para a determinação da massa unitária foram utilizadas entre duas e três amostras (quando os limites de variabilidade eram excedidos), cujo tamanho correspondeu a aproximadamente 1,5 vezes a capacidade volumétrica do recipiente. A Figura 39 elucida melhor o ensaio de massa unitária realizado para a areia natural.

Figura 39 - Ensaio de massa unitária: a) preenchimento do recipiente; b) compactação da primeira camada; c) rasamento da superfície; d) pesagem.



Fonte: Autor (2017)

4.2.5 TEOR DE MATERIAIS PULVERULENTOS

O ensaio de determinação do teor de materiais finos ou pulverulentos foi realizado com base na norma ABNT NBR NM 46: 2003. O procedimento consiste em adicionar uma certa quantidade de água à amostra, agitá-la e despejá-la sobre um par de peneiras (com aberturas de 1,18mm e 0,075mm) até que a água de lavagem saia límpida. Por meio da lavagem, as partículas que passam na peneira menor (materiais pulverulentos) são extraídas. Uma vez lavado, o material é retornado à um recipiente metálico, seco em estufa, e tem sua massa medida ao final do processo. O teor de material pulverulento é então calculado pela equação 5.4.

$$p = \left[\frac{m_i - m_f}{m_i} \right] \times 100 \quad (5.4)$$

Onde:

p = teor de material pulverulento (%);

m_i = massa inicial da amostra seca (g);

m_f = massa da amostra seca após lavagem (g).

De acordo com a ABNT NBR 7211: 2009, agregados miúdos utilizados na composição de concretos submetidos ao desgaste superficial devem conter no máximo um teor de finos igual à 3% sobre a massa total do agregado. Quanto aos agregados utilizados na fabricação de concretos protegidos do desgaste superficial, esses devem conter no máximo 5% de finos. Em situações onde os agregados miúdos sejam obtidos pela britagem de rochas, permite-se o aumento dos limites de 5% para 12% e de 3% para 10%, desde que uma análise petrográfica seja realizada pela ABNT NBR 7389-1: 2009, garantindo que os grãos acima de 150 μm não gerem finos que venham a interferir nas propriedades do concreto. Para os agregados graúdos, o teor de finos não deve ultrapassar 1%.

A ABNT NBR 15116: 2004, propõe para os agregados miúdos reciclados de concreto um teor máximo de finos igual à 15%; para os agregados miúdos de resíduo misto admite-se um teor de até 20%. Tanto para os agregados graúdos reciclados de concreto quanto para agregados graúdos reciclados de resíduo misto o limite para o teor de finos é de 10%.

Para medir o teor de finos dos agregados miúdos foram utilizadas de duas a três amostras (quando os limites de variabilidade eram excedidos) contendo cada uma pelo menos 500 g de material seco. A massa de cada amostra correspondeu ao produto direto do quarteamento e não a um valor exato pré-determinado, algo exigido pela NM 46. A amostragem para agregados graúdos foi realizada de forma semelhante, no entanto cada amostra contou com pelo menos 2,5 kg de material seco. O ensaio de materiais pulverulentos realizado pode ser melhor entendido segundo à Figura 40.

Figura 40 - Determinação do teor de material pulverulento: a) amostra vertida sobre as peneiras; b) águas da primeira e última lavagem; c) retorno da amostra lavada em recipiente metálico.



Fonte: Autor (2017)

4.2.6 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA

A massa específica dos agregados miúdos foi determinada com base nas recomendações fornecidas pela norma ABNT NBR NM 52: 2002. Cada material contou com duas amostras, cada uma contendo 1 kg de material seco.

O procedimento se inicia cobrindo as amostras com água e as colocando em repouso por 24 horas. Em seguida as amostras são estendidas sobre uma superfície plana, e secas uniformemente (permite-se o uso de uma leve corrente de ar quente) até que toda a umidade superficial seja extinta. Para verificar essa condição, uma parcela de material é colocada dentro de um molde de tronco cônico e aplica-se suavemente 25 golpes. O desmoronamento do agregado durante a retirada do cone denota a ausência de umidade superficial e o alcance

da condição Saturado Superfície Seca – SSS. Atingida a condição desejada, reserva-se 500 g do material, coloca-se em um frasco de vidro com capacidade de 500 ml e adiciona-se água. O conjunto (agregado + água + frasco) é levado a um banho mantido à temperatura de $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$. Após uma hora a água no frasco é completada e a massa do conjunto é medida. O material contido no frasco é então retornado a um recipiente metálico e levado para secagem em estufa. O ensaio termina com a pesagem do material seco.

Após a realização do ensaio, a massa específica dos agregados miúdos foi calculada pelas Equações 5.5 e 5.6.

$$d = \frac{m}{(m - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (5.5)$$

Onde:

d = massa específica do agregado (g/cm^3);

m = massa da amostra seca em estufa (g);

V = volume do frasco (cm^3);

V_a = volume de água adicionado ao frasco (cm^3);

m_s = massa da amostra na condição SSS (g);

ρ_a = massa específica da água (g/cm^3).

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (5.6)$$

Onde:

V_a = volume de água adicionado ao frasco (cm^3);

m_1 = massa do frasco + agregado (g);

m_2 = massa do conjunto (frasco + agregado + água) (g);

ρ_a = massa específica da água (g/cm^3).

Por meio das demais fórmulas contidas na norma referente também foram calculadas a massa específica aparente do agregado seco e a massa específica do agregado na condição SSS. O ensaio de determinação da massa específica para agregados miúdos é ilustrado pela Figura 41.

Figura 41 - Determinação da massa específica para agregados miúdos: a) agregado na condição SSS; b) adição de água; c) banho térmico.



Fonte: Autor (2017)

Para os agregados graúdos, a massa específica foi determinada segundo à norma ABNT NBR NM 53: 2009. Inicialmente todas as partículas passantes na peneira de abertura 4,75mm foram descartadas. Em seguida, o material foi lavado e seco em estufa. Duas amostras contendo 3 kg cada foram separadas. Cada amostra foi submersa em água durante 24 horas. Após esse tempo, a umidade superficial dos agregados foi extraída por meio de um pano seco, fazendo com que os agregados atingissem a condição SSS. A massa dos agregados na condição SSS foi determinada. Em seguida foram medidas as massas submersas das amostras. O material foi então retornado em recipientes metálicos e levado para secagem em estufa. O ensaio foi concluído com a pesagem das amostras secas.

Após a execução do ensaio, a massa específica para os agregados graúdos foi calculada pela Equação 5.7.

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad (5.7)$$

Onde:

d = massa específica do agregado seco (g/cm^3);

m = massa ao ar da amostra seca (g);

m_a = massa da amostra submersa (g).

Com as demais equações contidas na ABNT NBR NM 53, a massa específica aparente e a massa específica do agregado na condição SSS também foram calculadas. O procedimento de determinação da massa específica para agregados graúdos pode ser melhor entendido segundo à Figura 42.

Figura 42 - Determinação da massa específica para agregados graúdos: a) extração da umidade superficial; b) pesagem no estado SSS; c) amostra submersa para pesagem.



Fonte: Autor (2017)

4.2.7 DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

A absorção de água dos agregados miúdos foi obtida conforme estabelece a norma ABNT NBR NM 30: 2001. Cada material foi ensaiado com duas amostras secas de massa igual a 1 kg. Após secagem em estufa, as amostras foram cobertas com água e deixadas em descanso por 24 horas. Em seguida foram colocadas em uma superfície plana e secas com uma leve corrente de ar quente até que a condição SSS fosse alcançada. Por fim, a massa do material na condição SSS foi medida e o teor de absorção de água pôde ser então determinado por meio da Equação 5.8.

$$A = \left(\frac{m - m_a}{m} \right) \times 100 \quad (5.8)$$

Onde:

A = absorção de água (%);

m_s = massa da amostra na condição SSS (g);

m = massa da amostra seca em estufa (g).

De acordo com a ABNT NBR 15116: 2004, agregados miúdos reciclados de concreto não devem apresentar valores para absorção de água maiores que 12%; para os agregados miúdos reciclados de RCC misto este limite é de 17%.

O ensaio de determinação da absorção de água realizado para o pó de pedra pode ser verificado na Figura 43.

Figura 43 - Ensaio de absorção de água: a) amostras imersas; b) secagem; c) agregado na condição SSS.



Fonte: Autor (2017)

Para agregados graúdos, a absorção de água foi determinada juntamente com a massa específica pela norma ABNT NBR NM 53: 2009. Para os agregados graúdos reciclados de concreto a ABNT NBR 15116: 2004 limita a absorção de água em 7% e no que se refere aos agregados graúdos reciclados de resíduo misto esse limite é de 12%.

4.3 DEFINIÇÃO DO TRAÇO E DOS TEORES DE SUBSTITUIÇÃO

4.3.1 ESCOLHA DO TRAÇO DE REFERÊNCIA

Com o intuito de alinhar a pesquisa com a realidade praticada no mercado e, sobretudo da empresa participante da pesquisa, optou-se por adotar o seu traço convencional como o traço de referência. Tal escolha justifica-se pelo fato de a empresa possuir um procedimento já consolidado (há mais de 46 anos na produção de PCP) e contar com um controle de qualidade interno, voltado à avaliação e certificação das peças. Além disso, a ideia de tornar a execução do programa experimental o mais palpável possível à empresa vai ao encontro da busca na viabilidade técnica em substituir agregados naturais por reciclados, e ao mesmo tempo, permite incentivar a adoção de tal prática pelas demais empresas do ramo.

4.3.2 ESCOLHA DO AGREGADO A SER SUBSTITUÍDO

O agregado natural escolhido para ser substituído foi a AREIA DE RIO, para tomada desta decisão foram levados em conta os seguintes aspectos:

- Com base em trabalhos realizados por outros autores, concluiu-se que a substituição dos agregados miúdos naturais por reciclados tem sido preferível quando comparada à substituição dos agregados graúdos. Na composição de novos concretos, propriedades tais como volume de vazios (Cabral et al., 2007), massa específica (Leite, 2001), resistência à compressão (Cabral et al., 2012) e módulo de deformação (Cabral et al., 2008) são influenciadas negativamente e de forma muito mais pronunciada quando a substituição ocorre na porção graúda dos agregados.

- A partir da caracterização dos agregados, verificou-se que as propriedades dos agregados miúdos (areia natural e areia reciclada) apresentaram maior semelhança entre si do que entre os agregados graúdos (pedrisco natural e pedrisco reciclado). Tal informação pode ser verificado no Capítulo 6.

Dessa maneira, definiu-se que a AREIA DE RIO presente no traço de referência seria substituída pela AREIA RECICLADA DE RESÍDUO CINZA, coletada em São José do Rio Preto-SP. Os resultados obtidos na caracterização do pedrisco reciclado de resíduo cinza, também coletado em São José do Rio Preto-SP, mas não utilizado na fabricação das peças, estão contidos no Apêndice, ao final deste trabalho.

4.3.3 DEFINIÇÃO DOS TEORES DE SUBSTITUIÇÃO

Os teores de substituição foram definidos em 10%, 20% e 30% sobre a massa do agregado miúdo natural (areia de rio), uma vez que a dosagem na fábrica participante da pesquisa também é realizada em massa. Conforme pôde ser observado nas pesquisas desenvolvidas por Hood (2006), Taveira (2010), Bittencourt (2012), Uygunoglu et al. (2012) e Santos (2014), os melhores resultados obtidos para PCP produzidas com a substituição de agregados miúdos naturais por reciclados de RCC encontraram-se dentro desse mesmo intervalo (entre 10% e 30%). Ângulo e Figueiredo (2011) também recomendam para a produção de concretos de 25-45 MPa teores de substituição de agregados naturais por agregados de concreto entre 10% e 20%.

Durante o estudo de outras pesquisas que trataram da fabricação de PCP com incorporação de resíduos, observou-se que para combater a já esperada perda de resistência do concreto, causada pela maior porosidade do agregado reciclado, alguns autores optaram por elevar o teor de cimento no traço. Porém essa atitude, mesmo que compensadora, contraria a ideia de sustentabilidade que envolve o a reciclagem do RCC, pois é sabido que a produção do cimento demanda por um grande consumo energético, de recursos naturais, além de estar ligada à emissão de gases de efeito-estufa (MAURY e BLUMENSCHHEIN, 2012).

Nesse sentido, nenhuma correção na quantidade do aglomerante foi realizada em conjunto com a substituição dos agregados para este trabalho. Com isso, é possível averiguar a real interferência do material reciclado nas propriedades das peças, e ao mesmo passo contribuir de certa forma com a viabilidade econômica do processo. Embora a viabilidade econômica não tenha sido objeto de estudo deste trabalho, sabe-se que o valor de venda por unidade de massa do cimento é bem maior que o dos agregados, geralmente comercializados em volume. A Tabela 8 apresenta todos os traços definidos para a produção das PCP.

Tabela 8 - Traços teóricos para fabricação das PCP

Traço	Cimento (kg)	Aditivo (L)	Pedrisco (kg)	Areia de rio (kg)	Areia reciclada (kg)	Pó de pedra (kg)	Água (L)	Relação A/C
Referência	220	1,98	292	700	-	595	137,33	0,62
10% RCC	220	1,98	292	630	70	595	137,33	0,62
20% RCC	220	1,98	292	560	140	595	137,33	0,62
30% RCC	220	1,98	292	490	210	595	137,33	0,62

4.4 FABRICAÇÃO DAS PEÇAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO

Para a produção das PCP cerca de 250 kg de areia de resíduo cinza foram levados até GLASSER, situada em Guarulhos - SP. A máquina responsável pela confecção das peças foi da marca Besser® (americana), modelo Vibropac 4312J. Todas as peças produzidas foram pertencentes à classe de 35 MPa de resistência à compressão e dotadas das dimensões 10 cm x 20 cm x 6 cm. Tais características foram escolhidas, pois consistem nas mais requeridas pelo mercado.

Em função da dificuldade em transportar grandes quantidades de agregado reciclado até a fábrica, optou-se pelo uso do “meio traço”, ou seja, a quantidade de cada material contido no traço convencionalmente empregado foi reduzida à metade. Sabendo-se que cada traço produz cerca de 780 peças (segundo à própria fábrica), este poderia ser fracionado ainda mais. No entanto, isto não ocorreu por conta do tamanho do misturador utilizado. Como o misturador possuía grande capacidade em volume, adotar quantidades muito reduzidas para os materiais poderia causar seu acúmulo no fundo do equipamento, o que não garantiria a homogeneidade da massa e, conseqüentemente, influenciaria nos resultados dos ensaios.

Algumas etapas registradas durante a fabricação das peças são apresentadas pela Figura 44.

Figura 44 - Fabricação das PCP: a) vibroprensa; b) inserção da areia reciclada; c) regularização após desforma; d) peças prontas.



Fonte: Autor (2017)

Outro ponto que merece atenção consiste no modo como a inserção dos materiais foi realizada. Por meio do acionamento de botões, de dentro de uma cabine de comando o funcionário abria e fechava a saída de cada silo. Como grandes quantidades de material caíam dos silos de uma única vez e o fechamento dos mesmos não ocorria no momento exato em que os botões eram acionados, o traço efetivamente empregado diferiu do traço teórico, indicando pequenas alterações nas frações dos agregados naturais. No entanto, a quantidade efetivamente utilizada foi mensurada e a porcentagem real de substituição foi calculada. Os traços reais da fabricação das peças são apresentados pela Tabela 9.

Tabela 9 - Traços efetivamente empregados

Traço	Cimento (kg)	Aditivo (L)	Pedrisco (kg)	Areia de rio (kg)	Areia reciclada (kg)	Pó de pedra (kg)	Água (L)	Relação A/C
Meio traço	110	0,99	146	350	0	297,5	69	0,63
10% RCC	112,5	0,99	144	317	35	307	69	0,61
20% RCC	112	0,99	161	274	70	301	69	0,62
30% RCC	111	0,99	149	245	105	303	69	0,62

Algumas informações adicionais sobre a produção das peças, tais como: teor corrigido de substituição dos agregados, umidade das misturas e parâmetros relacionados à cura das peças estão contidos na Tabela 10.

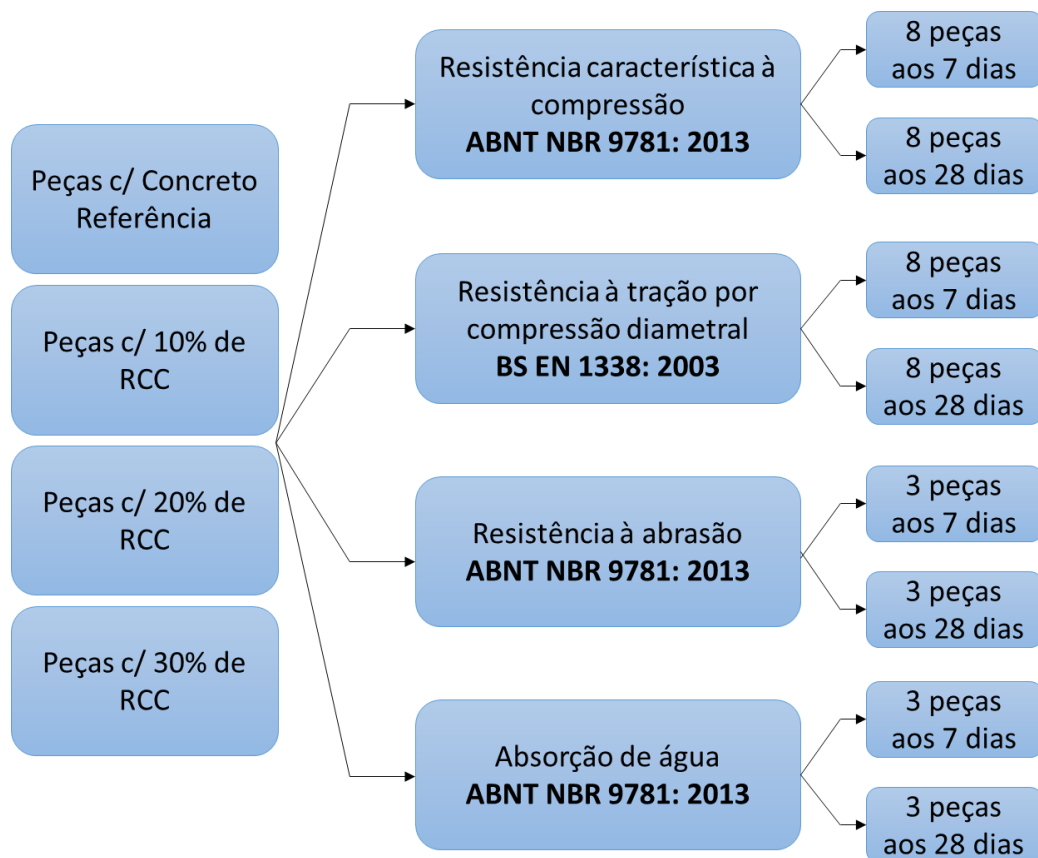
Tabela 10 - Informações adicionais sobre a produção das PCP

Traço	Teor real de substituição por RCC (%)	Cimento/agregados (%)	Umidade (%)	Cura das peças		
				Tempo de descanso	Temperatura	Tempo de cura
Referência	0	13,86%	7,60	2h e 30m	35°C	20 min
10% RCC	9,94%	14,01%	7,76	2h e 30m	35°C	20 min
20% RCC	20,35%	13,90%	7,76	2h e 30m	35°C	20 min
30% RCC	30,00%	13,84%	7,76	2h e 30m	35°C	20 min

4.5 ENSAIOS COM AS PEÇAS PRODUZIDAS

Após a produção, algumas peças foram enviadas ao laboratório de concreto da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), situado na cidade de São Paulo-SP, onde tiveram suas propriedades físicas e mecânicas avaliadas. As principais informações acerca dos ensaios realizados na ABCP, tais como: idade do concreto e tamanho das amostras para cada ensaio são sintetizadas pelo organograma contido na Figura 45.

Figura 45 - Ensaios de avaliação das PCP



Fonte: Autor (2017)

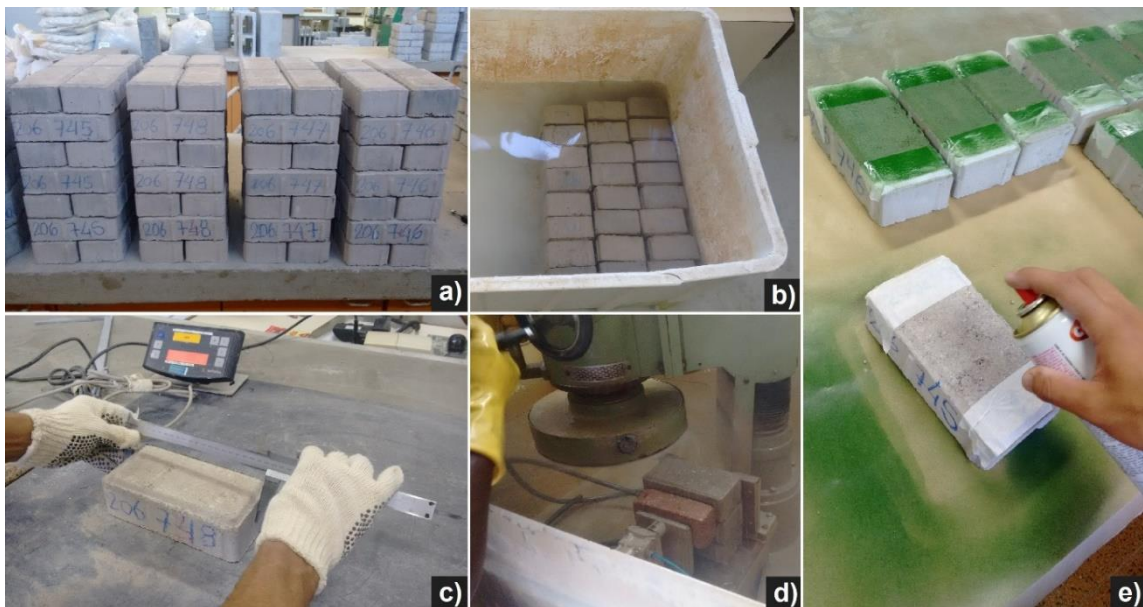
Conforme observado na Figura 45, para cada traço foram ensaiadas 44 peças, totalizando 176 corpos de prova avaliados. Para os ensaios de tração por compressão diametral, abrasão e absorção de água, foram empregadas as quantidades mínimas de

exemplares exigidas em norma. Para resistência à compressão, a amostra mínima representativa contém 6 elementos.

4.5.1 PREPARAÇÃO DAS PEÇAS PARA OS ENSAIOS

Na véspera da primeira rodada de ensaios, todas as peças foram identificadas, medidas e pesadas. As peças que posteriormente seriam submetidas aos ensaios de compressão foram retificadas e submersas em água por 24 horas. As peças que seriam ensaiadas à abrasão foram pintadas para facilitar a identificação do desgaste obtido durante o ensaio. A preparação para os ensaios é apresentada na Figura 46.

Figura 46 - Preparação das peças: a) amostras identificadas; b) imersão em água; c) medição; d) retífica; e) pintura da superfície para ensaio de abrasão.



Fonte: Autor (2017)

4.5.2 DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

Também regido pela ABNT NBR 9781:2013, este ensaio consiste basicamente na obtenção de uma relação (em porcentagem) entre o incremento de massa causado pela penetração de água em um corpo de prova submerso por 24 horas e sua massa medida na condição seca. O cálculo da absorção de água é realizado com base na Equação 5.9.

$$A = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1} \right) \times 100 \quad (5.9)$$

Onde:

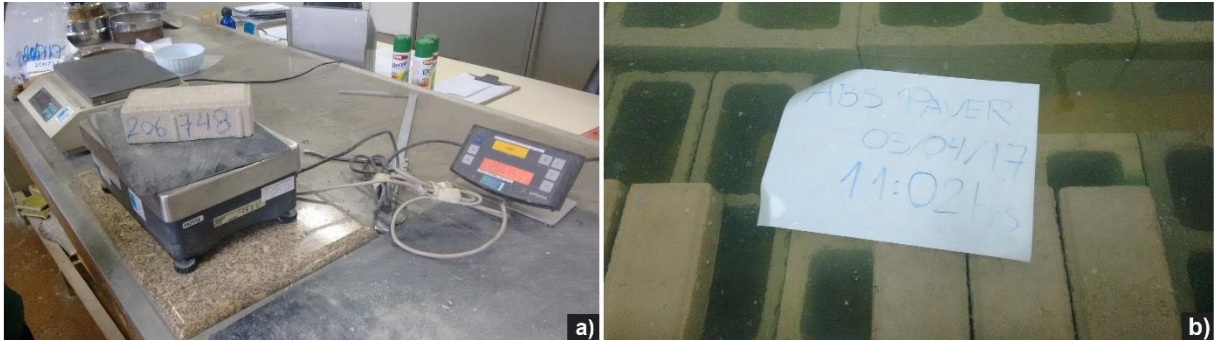
A = absorção de água (%);

m_1 = massa da PCP seca (g);

m_2 = massa da PCP saturada (g).

O ensaio de determinação da absorção de água para as PCP está representado pela Figura 47.

Figura 47 - Ensaio de absorção de água das PCP: a) pesagem da peça seca; b) peças submersas.



Fonte: Autor (2017)

4.5.3 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO

Neste ensaio, o corpo de prova é submetido ao desgaste superficial de uma de suas faces pelo contato com um disco rotativo de aço com diâmetro de 200 mm e espessura de 70 mm. Durante o ensaio, um funil ainda escoava material abrasivo (óxido de alumínio fundido) na interface entre o corpo de prova e o disco, e um contrapeso é fixado ao suporte que contém o corpo de prova pressionando-o contra o disco. Após 75 revoluções do disco, o comprimento da cavidade impressa no corpo de prova é medido com auxílio de um paquímetro. Quanto menor o valor obtido mais satisfatório este se torna, em outras palavras, quanto menor a cavidade maior a resistência à abrasão da peça ensaiada. O ensaio de resistência à abrasão também foi direcionado pela ABNT NBR 9781:2013, e sua execução pode ser visualizada na Figura 48.

Figura 48 - Ensaio de resistência à abrasão: a) superfície da PCP pronta para o ensaio; b) posicionamento da PCP; c) peças após o ensaio.



Fonte: Autor (2017)

4.5.4 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Todo o procedimento relacionado à execução deste ensaio para as PCP foi realizado com base na norma ABNT NBR 9781:2013. A Figura 49 ilustra o ensaio à compressão das peças fabricadas.

Figura 49 - Ensaio de resistência à compressão: a) prensa; b) posição da peça durante o ensaio; c) peça rompida.



Fonte: Autor (2017)

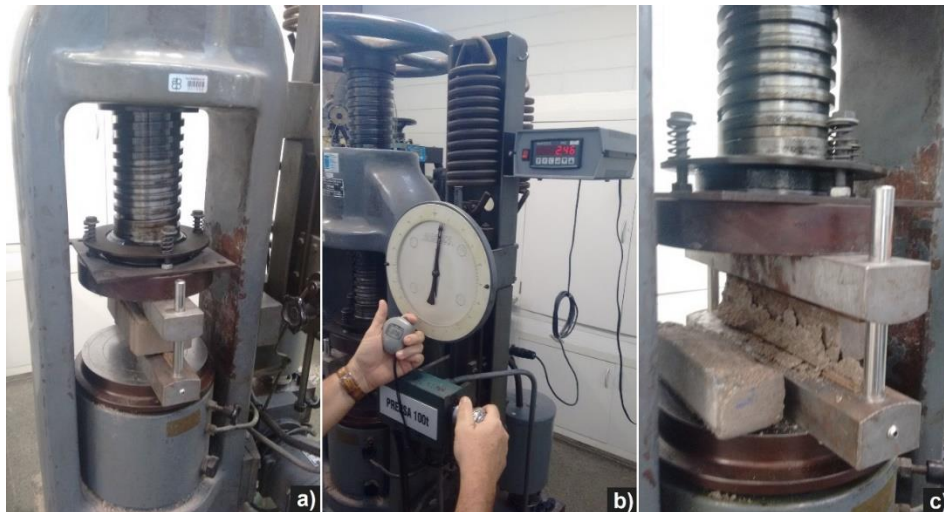
O ensaio de resistência à compressão com peças pertencentes ao mesmo lote de fabricação também foi realizado no próprio laboratório da GLASSER aos 2, 3 e 28 dias de idade das peças, e seus resultados serão disponibilizados no Anexo deste trabalho. No

entanto, toda a análise estatística e as discussões pertinentes foram realizadas sobre os ensaios realizados na ABCP.

4.5.5 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A execução do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, ou tração por compressão diametral, foi baseada nas diretrizes fornecidas pela norma britânica BS EN 1338: 2003, uma vez que a normalização brasileira ainda não contempla a avaliação de PCP por meio de tal procedimento. A Figura 50 ilustra a realização do ensaio para as peças produzidas.

Figura 50 - Ensaio de tração por compressão diametral: a) PCP posicionada; b) ensaio em andamento; c) PCP rompida.



Fonte: Autor (2017)

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

A substituição (frações em massa) de agregados naturais comumente utilizados na fabricação de blocos de pavimento intertravados por frações de areia reciclada de RCC (0%, 10%, 20% e 30%) e a Idade de Ensaio (IE) dos corpos de prova fabricados (7, 28 dias) consistiram nos dois fatores investigados nesta pesquisa. A combinação dos níveis desses dois fatores resultou num planejamento fatorial completo composto de oito Tratamentos (Tr) distintos, os quais são explicitados na Tabela 11.

Tabela 11 - Tratamentos experimentais

Tr	Fração de RCC (%)	IE (dias)
1	0	7
2	0	28
3	10	7
4	10	28
5	20	7
6	20	28
7	30	7
8	30	28

As propriedades avaliadas foram a Absorção de Água (AA), a Abrasão (AB), resistência na compressão (f_c) e resistência à tração por compressão diametral (f_t). Por tratamento, foram considerados os oito corpos de prova para obtenção das propriedades de resistência à tração e à compressão, e os três corpos de prova para determinação da absorção de água e abrasão, compreendendo as 176 determinações experimentais.

Modelos de regressão (Equação 5.10) fundamentados em análise de variância (ANOVA) foram utilizados para relacionar e interpretar os efeitos dos fatores (RCC, IE) e da interação entre ambos ($RCC \cdot IE$) nas propriedades de interesse.

$$y = a_0 + a_1 \cdot RCC + a_2 \cdot IE + a_3 \cdot RCC \cdot IE + \varepsilon \quad (5.10)$$

Da Equação 5.10, y denota as propriedades estimadas, a_i são os coeficientes obtidos do Método dos Mínimos Quadrados e ε é o erro aleatório, ressaltando ser a qualidade do ajuste obtido avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2).

A análise de variância dos modelos de regressão foi avaliada ao nível de 5% de significância, considerando a não significância ($P\text{-valor} < 0,05$) dos modelos e dos coeficientes como hipótese nula, e da significância como hipótese alternativa. Para validação dos modelos de regressão testou-se a normalidade dos resíduos gerados com o auxílio do teste de normalidade de Anderson-Darling, também ao nível de 5% de significância, e pelas hipóteses formuladas, de tal forma que $P\text{-valor}$ maior ou igual a 0,05 implicaria na normalidade da distribuição dos resíduos, validando o modelo da ANOVA.

Modelos de regressão a dois parâmetros (a_0 e a_1) fundamentados em análise de variância (5% de significância) foram utilizados para relacionar a resistência à tração por compressão diametral (f_t) como função da resistência à compressão [$f_t = f(f_c)$], consistindo nos ajustes: linear [Lin] (Equação 5.11), exponencial [Exp] (Equação 5.12), logarítmico [Log] (Equação 5.13) e geométrico [Geo] (Equação 5.14).

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X + \varepsilon \quad (5.11)$$

$$Y = \alpha_0 \cdot e^{\alpha_1 \cdot X} + \varepsilon \quad (5.12)$$

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \ln(X) + \varepsilon \quad (5.13)$$

$$Y = \alpha_0 \cdot X^{\alpha_1} + \varepsilon \quad (5.14)$$

As Equações de 5.11 a 5.14 foram utilizadas em cada um dos oito tratamentos idealizados e também no conjunto envolvendo todos os tratamentos, e o melhor modelo por estudo foi eleito pelo coeficiente de determinação (R^2).

A abrasão [$AB = f(f_c); AB = f(f_t)$] e a absorção de água [$AA = f(f_c); AA = f(f_t)$] foram relacionadas com a resistência à compressão e com a resistência à tração por compressão diametral. Cabe destacar que a regressão exige pareamento nos dados, e por serem apenas três determinações para a AB e para a AA e oito determinações para f_c e f_t por tratamento, foram eleitos três de oito resultados por tratamento da f_c e da f_t , mas mantendo-se próximo o valor do coeficiente de variação do conjunto com oito resultados. As Equações de 5.11 a 5.14 foram utilizadas considerando os resultados dos oito tratamentos conjuntamente, e o melhor modelo de cada relação foi definido pelo maior valor do R^2 .

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

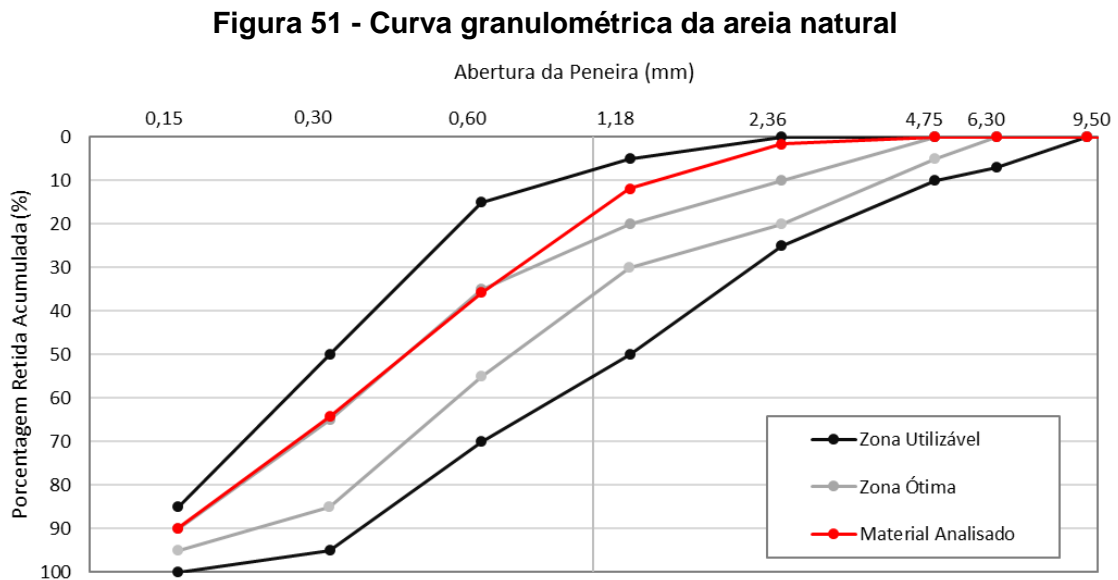
Neste capítulo serão apresentados todos os resultados obtidos no processo de caracterização dos agregados coletados bem como nos ensaios de avaliação das PCP produzidas. Também serão realizadas discussões pertinentes, baseadas na comparação dos resultados alcançados com requisitos estabelecidos em normas e valores fornecidos por outros autores.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS

5.1.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

5.1.1.1 Agregados miúdos

A curva granulométrica obtida para a **areia natural** (coletada na fábrica), juntamente com os limites aceitáveis e limites ótimos de utilização propostos pela ABNT NBR 7211: 2009, são apresentados pela Figura 51. Os demais dados do ensaio de granulometria, realizado com base na ABNT NBR 248: 2003, estão contidos na Tabela 12.



Fonte: Autor (2017)

Tabela 12 - Granulometria da areia de rio

Abertura da peneira (mm)	Massa retida média (%)	Massa retida acumulada média (%)
4,75	0	0
2,36	2	2
1,18	10	12
0,6	24	36
0,3	29	64
0,15	26	90
Fundo	10	100
DMC *(mm)		2,36
MF **		2,03

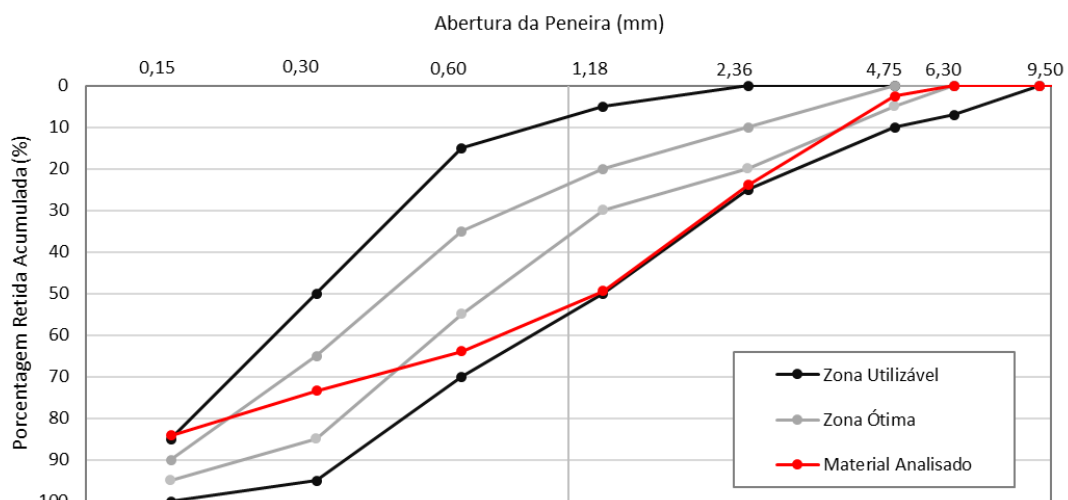
* Dimensão máxima característica

** Módulo de finura

Segundo à ABNT NBR 7211: 2009, a zona utilizável inferior para agregados miúdos compreende valores do módulo de finura entre 1,55 e 2,20. Dessa maneira, a areia natural utilizada no trabalho se enquadra na **zona utilizável inferior**.

Areias naturais com a mesma Dimensão Máxima Característica (DMC = 2,36 mm) foram utilizadas nos trabalhos de Tavares e Franco (2012), Santos (2012), Moosher (2013), Santos (2014) e Alcântara (2015), sendo seus valores para o Módulo de Finura iguais à 1,73; 2,21; 1,9; 1,6 e 2,9, respectivamente.

Para o **pó de pedra utilizado** nesta pesquisa, a curva granulométrica obtida está contida na Figura 52, e os demais resultados da análise, com base na ABNT NBR 248: 2003, são apresentados pela Tabela 13.

Figura 52 - Curva granulométrica do pó de pedra

Fonte: Autor (2017)

Tabela 13 - Granulometria do pó de pedra

Abertura da peneira (mm)	Massa retida média (%)	Massa retida acumulada média (%)
4,75	3	3
2,36	21	24
1,18	26	49
0,6	14	64
0,3	9	73
0,15	11	84
Fundo	16	100
DMC *(mm)		4,75
MF **		2,97

* Dimensão máxima característica

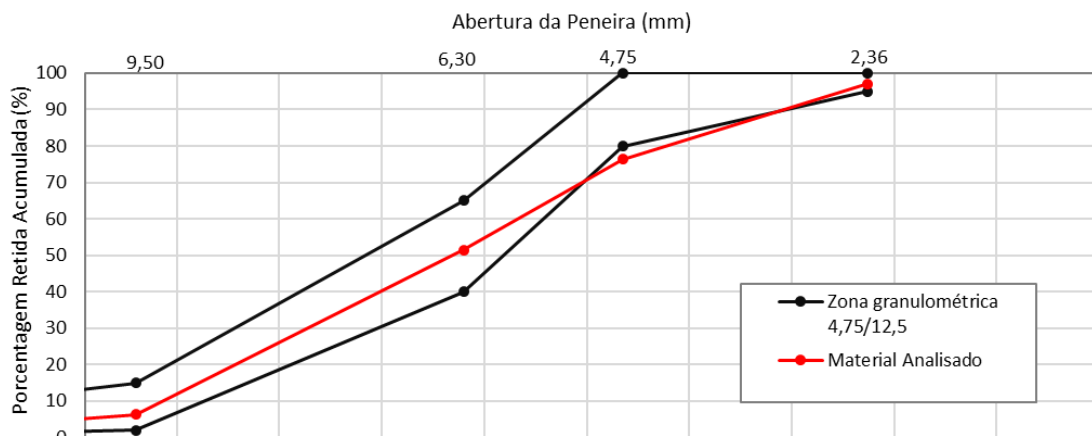
** Módulo de finura

A ABNT NBR 7211: 2009 define a zona utilizável superior para agregados miúdos para valores de módulo de finura entre 2,90 a 3,50. Sendo assim, o pó de pedra utilizado pertence à **zona utilizável superior**.

Carvalho (2013) e Santos (2014) também utilizaram pó de pedra com DMC igual a 4,75 mm, e valores de MF iguais à 3,32 e 3,07, respectivamente. Özalp et al. (2016) empregaram pó de pedra com diâmetros pertencentes à faixa (0 – 5) mm e MF igual a 3,51 mm. Bittencourt (2012), por sua vez, utilizou pó de pedra com DMC de 6,3 mm e MF igual à 3,15.

5.1.1.2 Agregado graúdo

A curva granulométrica do pedrisco natural é apresentada pela Figura 53. Os resultados da análise com base na ABNT NBR 248: 2003 são apresentados pela Tabela 14.

Figura 53 - Curva granulométrica do pedrisco natural

Fonte: Autor (2017)

Tabela 14 - Granulometria do pedrisco

Abertura da peneira (mm)	Massa retida média (%)	Massa retida acumulada média (%)
12,5	0	0
9,5	6	6
6,3	45	52
4,75	25	76
2,36	21	97
1,18	0	97
Fundo	3	100
DMC *(mm)		12,5
MF **		6,2

* Dimensão máxima característica

** Módulo de finura

De acordo com a ABNT NBR 7211: 2009, o pedrisco natural utilizado se enquadra na **Zona granulométrica 4,75/12,5**.

Nas pesquisas de Tavares e Franco (2012), Santos (2012), Carvalho (2013), Sgorlon (2014), Santos (2014) e Alcântara (2015), foram utilizados pedriscos com DMC de 9,5 mm e MF iguais a 5,89; 5,82; 5,58; 5,79; 5,36 e 6,65, respectivamente. Verifica-se que o pedrisco empregado nesta pesquisa apresentou valor de DMC superior ao que foi constatado nos trabalhos relacionados, contudo, o valor do MF encontra-se dentro do intervalo compreendido pelos resultados dos demais outros autores.

5.1.2 DEMAIS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS NATURAIS

5.1.2.1 Agregados miúdos

Os valores obtidos nos ensaios de determinação do teor de umidade total, da massa unitária, absorção de água, massa específica e do teor de material pulverulento para a areia de rio e o pó de pedra são apresentados na Tabela 15.

Vale ressaltar que embora o teor de umidade total dos agregados tenha sido medido, este não foi tomado como parâmetro para quaisquer correções na quantidade de água adicionada ao concreto no momento da fabricação das peças; e muito menos para a pré-saturação dos agregados reciclados, visto que esta não foi realizada.

Tabela 15 - Demais propriedades dos agregados miúdos naturais

Norma ABNT	Propriedade avaliada	Areia de rio	Pó de pedra
-	Teor de umidade total (%)	4,33	2,35
NBR NM 45: 2006	Massa unitária (kg/m ³)	Estado solto	1408,74
		Estado compactado	1549,37
	Volume de vazios (%)	Estado solto	31,61
		Estado compactado	24,79
NBR NM 30: 2001	Absorção de água (%)	0,19	0,78
NBR NM 52: 2002	Massa específica aparente no estado seco (g/cm ³)	2,43	2,42
	Massa específica na condição SSS * (g/cm ³)	2,44	2,44
	Massa específica do agregado (g/cm ³)	2,46	2,46
NBR NM 46: 2003	Teor de material pulverulento (%)	2,42	10,4

* Saturado superfície seca

A ABNT NBR 7211: 2009 estabelece como limites para o teor de material pulverulento de agregados miúdos: 5% para agregados utilizados na fabricação de concretos protegidos do desgaste superficial e 3% para fabricação de concretos submetidos ao desgaste superficial. Considerando que as PCP são submetidas à abrasão tanto pelo tráfego de veículos quanto de pedestres, o valor de 2,42% obtido para a areia natural desta pesquisa atende ao limite proposto pela norma, enquanto que o pó de pedra, com porcentagem de finos igual à 10,4%, excede de forma expressiva o limite estipulado. Outros autores como, Taveira (2010), Mashaly et al. (2015) e Özalp et al. (2016) utilizaram areias com teor de material pulverulento iguais à 1,40; 1,13 e 0,6%, respectivamente. Todos inferiores ao que foi obtido aqui.

As areias naturais utilizadas nas pesquisas de El Nouhy (2012), Mashaly et al. (2015), e Sadek, El-Attar e Ali (2017) forneceram valores de massa específica iguais à 2,56 g/cm³. Moosher (2013), Sadek e El Nouhy (2014), e Alcântara (2015) empregaram areias naturais com massas específicas iguais à 2,49; 2,5 e 2,54 g/cm³, respectivamente. Nota-se que o valor da massa específica da areia natural desta pesquisa (2,46 g/cm³) encontra-se um pouco abaixo do que foi constatado pelos demais autores. Para o pó de pedra, Carvalho (2013) e Santos (2014) obtiveram valores de massa específica iguais à 2,64 g/cm³ e 2,76 g/cm³, respectivamente. Ambos os valores também são superiores à massa específica do pó de pedra coletado na fábrica para esta pesquisa.

Para a massa unitária da areia natural no estado solto, Tavares e Franco (2012), Sgorlon (2014), Alcântara (2015) e Sadek, El-Attar e Ali (2017) encontraram valores iguais à 1,64; 1,52; 1,44; 1,52 g/cm³, respectivamente. Quanto ao pó de pedra, valores iguais à 1,67; 1,58 e 1,56 g/cm³; foram obtidos por Bittencourt (2012), Carvalho (2013) e Santos (2014),

respectivamente. Verifica-se que tanto a areia natural quanto o pó de pedra empregados nesta pesquisa apresentaram valores próximos aos fornecidos por outros trabalhos.

No que se refere à absorção de água, os agregados miúdos naturais utilizados nesta pesquisa apresentaram valores bem abaixo do que foi encontrado na literatura. Tal informação é confirmada, por exemplo, pelo trabalho de Santos (2014) o qual obteve valores iguais à 0,44% e 2,67% para absorção de água da areia e do pó de pedra, respectivamente.

5.1.2.2 Agregado graúdo

A Tabela 16 apresenta os valores médios obtidos nos ensaios de determinação do teor de umidade total, da massa unitária, absorção de água, massa específica e do teor de material pulverulento para o pedrisco natural, coletado na fábrica.

Tabela 16 - Demais propriedades do pedrisco natural

Norma ABNT	Propriedade avaliada	Valor médio	
-	Teor de umidade total (%)	0,68	
NBR NM 45: 2006	Massa unitária (kg/m ³)	Estado solto	1428,38
		Estado compactado	1537,59
	Volume de vazios (%)	Estado solto	47,49
		Estado compactado	43,47
	Absorção de água (%)	0,72	
NBR NM 53: 2009	Massa específica aparente no estado seco (g/cm ³)	2,67	
	Massa específica na condição SSS * (g/cm ³)	2,64	
	Massa específica do agregado (g/cm ³)	2,62	
NBR NM 46: 2003	Teor de material pulverulento (%)	1,38	

* Saturado superfície seca

De acordo com a ABNT NBR 7211: 2009, o teor de material pulverulento para os agregados graúdos não deve ser maior do que 1% sobre a massa da amostra ensaiada. Sendo assim, o pedrisco natural utilizado na pesquisa excede o limite em 0,38%.

Quanto ao valor de massa específica, os valores de 2,90; 2,96; 2,0 e 2,70 g/cm³ foram encontrados por Tavares e Franco (2012), Santos (2014), Sgorlon (2014) e Alcântara (2015), respectivamente. Verifica-se que a massa específica do pedrisco usado nesta pesquisa (2,62 g/cm³) encontra-se dentro do intervalo compreendido pelos resultados de outros autores.

O teor de absorção de água igual à 0,72% para o agregado graúdo natural também foi obtido no estudo de Taveira (2010). El Nouhy (2012) encontrou o valor de 0,6%, Özalp et al. (2016) encontraram 0,8% e Sadek, El-Attar e Ali (2017) obtiveram 0,7%.

Para massa unitária no estado solto, o valor encontrado para o pedrisco neste trabalho (1,43 g/cm³) encontra-se próximo do que foi constatado nas outras pesquisas. O pedrisco de Sgorlon (2014) forneceu massa unitária no estado solto de 1,47 g/cm³ e Santos (2014) obteve

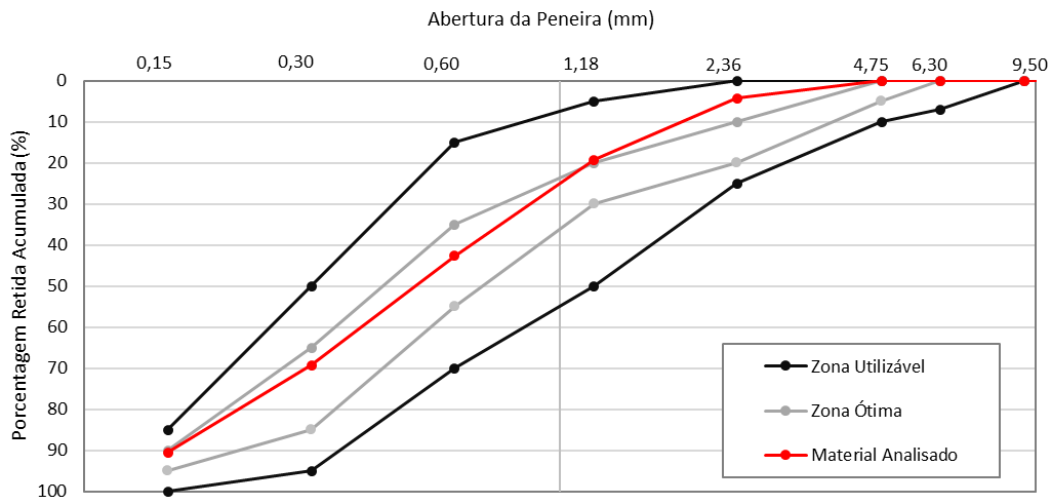
1,5 g/cm³ para a mesma propriedade. Alcântara (2015), por sua vez, utilizou um pedrisco com massa unitária igual à 1,29 g/cm³.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO RECICLADO

5.2.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

As curvas granulométricas obtidas para a areia reciclada de resíduo cinza coletada em São José do Rio Preto-SP, assim como os limites aceitáveis e limites ótimos de utilização propostos pela ABNT NBR 7211: 2009, são apresentados pela Figura 54. Os resultados do ensaio realizado com base na ABNT NBR 248: 2003 serão expostos pela Tabela 17.

Figura 54 - Curva granulométrica da areia de resíduo cinza



Fonte: Autor (2017)

Tabela 17 - Granulometria da areia de resíduo cinza

Abertura da peneira (mm)	Massa retida média (%)	Massa retida acumulada média (%)
4,75	0	0
2,36	4	4
1,18	15	19
0,6	23	43
0,3	27	69
0,15	21	91
Fundo	9	100
DMC*(mm)		2,36
MF**		2,26

* Dimensão máxima característica

** Módulo de finura

A ABNT NBR 7211: 2009 define que os valores ótimos para o MF de agregados miúdos estão entre 2,20 g/cm³ e 2,90 g/cm³. Dessa maneira a areia reciclada cinza de São José do Rio Preto-SP se enquadra na **zona ótima de utilização**.

Bittencourt (2012) também utilizou uma areia reciclada de resíduo cinza pertencente à zona ótima de utilização, com valores de MF e de DMC iguais a 2,56 e 4,8 mm, respectivamente. A areia de resíduo misto empregada no trabalho de Santos (2014) também foi enquadrada na zona ótima de utilização da NBR 7211, apresentando MF igual à 2,37 e DMC de 4,8 mm. Embora os valores da DMC obtidos nos outros dois trabalhos tenham sido maiores, de uma geral, conclui-se que a areia reciclada de São José do Rio Preto-SP possui uma distribuição granulométrica contínua e bem classificada. Cabe a observação de que suas características foram até superiores às da areia natural, que foi enquadrada na zona utilizável inferior.

5.2.2 DEMAIS PROPRIEDADES DO AGREGADO RECICLADO

Os valores médios obtidos nos ensaios de determinação do teor de umidade total, da massa unitária, absorção de água, massa específica e do teor de material pulverulento para a areia reciclada de resíduo cinza serão apresentados pela Tabela 18.

Tabela 18 - Demais propriedades da areia de resíduo cinza

Norma ABNT	Propriedade avaliada		Areia de São J. R. Preto
-	Teor de umidade total (%)		11,73
NBR NM 45: 2006	Massa unitária (kg/m ³)	Estado solto	1246,80
		Estado compactado	1365,62
	Volume de vazios (%)	Estado solto	39,48
		Estado compactado	33,71
NBR NM 30: 2001	Absorção de água (%)		7,84
NBR NM 52: 2002	Massa específica aparente no estado seco (g/cm ³)		2,06
	Massa específica na condição SSS * (g/cm ³)		2,20
	Massa específica do agregado (g/cm ³)		2,39
NBR NM 46: 2003	Teor de material pulverulento (%)		6,77

Quanto ao teor de material pulverulento, a areia de resíduo cinza utilizada nesta pesquisa apresentou valor bem superior ao limite de 3% proposto pela ABNT NBR 7211: 2009. No entanto, quando comparado ao limite de 15% estabelecido pela ABNT NBR 15116: 2004 para produção de concretos sem função estrutural, esse mesmo teor (6,77%) é considerado satisfatório.

Para a massa específica, o valor obtido encontra-se dentro do limite fornecido pelos trabalhos de outros autores. A areia de resíduo cinza utilizada por Bittencourt (2012)

apresentou massa específica de 1,45 g/cm³. Santos (2014) encontrou para sua areia de resíduo misto o valor de 2,53 g/cm³. Nota-se que a massa específica da areia de resíduo cinza utilizada neste trabalho, embora tenha sido menor que o valor fornecido pela areia natural (o que já era esperado, por conta da maior porosidade do resíduo), ambos estão bem próximos.

A massa unitária no estado solto encontrada aqui também foi condizente com valores dos demais trabalhos. A areia de resíduo cinza de Bittencourt (2012) apresentou massa unitária de 1,27 g/cm³. Ao utilizarem areia reciclada de resíduo misto, Santos (2014) obteve 1,16 g/cm³ e Özalp et al. (2016) obteve 1,30 g/cm³.

Os valores para a absorção de água das areias de resíduo misto de Santos (2014) e de Özalp et al. (2016) foram iguais à 15,32% e 10,8%, respectivamente. Verifica-se que o valor obtido nesta pesquisa para absorção de água da areia reciclada encontra-se bem abaixo do que foi fornecido pelos outros dois autores. Algo que pode ser explicado pela própria composição do resíduo, uma vez que os dois utilizaram agregados provenientes de resíduos mistos, via de regra, mais porosos. Vale ressaltar que a absorção da areia de resíduo cinza aqui empregada de (7,84%) satisfaz o limite de 12% proposto pela ABNT NBR 15116: 2004, para uso de agregados reciclados na composição de concretos sem função estrutural.

5.3 AVALIAÇÃO DAS PEÇAS PRODUZIDAS

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água e resistência à abrasão das PCP fabricadas.

5.3.1 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Tabela 19 e a Tabela 20 trazem os resultados do ensaio de resistência à compressão realizados na ABCP aos 7 e aos 28 dias de idade das peças, respectivamente.

Tabela 19 - Resultados de resistência à compressão aos 7 dias

Corpo de prova nº	Resistência à compressão (MPa)			
	Concreto referência	10% RCC	20% RCC	30% RCC
1	31,7	36,6	34,7	35
2	33,4	39,2	34,2	32,3
3	31,4	33,9	33,8	35,3
4	34,5	35,3	37,0	30,8
5	33,9	34,8	33,5	34,2
6	26,6	29,9	34,8	31,6
7	33,8	38,3	35,2	34,2
8	36,7	33,4	37,2	33,8
Média amostral	32,8	35,2	35,1	33,4
Desvio padrão	3,0	2,9	1,4	1,6
fck (MPa)*	30,1	32,6	33,8	32,0

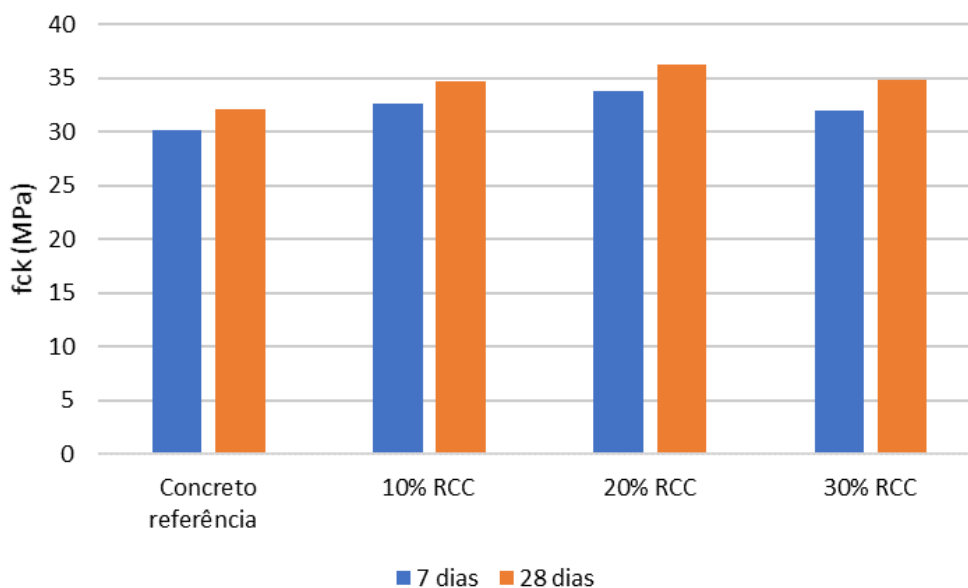
* Resistência característica à compressão

Tabela 20 - Resultados de resistência à compressão aos 28 dias

Corpo de prova nº	Resistência à compressão (MPa)			
	Concreto referência	10% RCC	20% RCC	30% RCC
1	37,7	38,3	38,8	37,0
2	31,3	38,5	37,8	36,3
3	37,0	37,0	39,2	36,0
4	38,3	39,5	44,5	34,8
5	39,5	38,2	36,7	34,3
6	32,0	32,5	39,2	36,2
7	32,3	34,5	34,3	35,3
8	32,6	36,2	39,8	35,2
Média amostral	35,1	36,8	38,8	35,6
Desvio padrão	3,3	2,3	2,9	0,90
fck (MPa)*	32,1	34,7	36,2	34,8

* Resistência característica à compressão

O gráfico contido na Figura 55 ilustra o incremento de resistência à compressão das peças dos 7 aos 28 dias de idade. Com base no gráfico, nota-se que o maior ganho de resistência ocorreu para as peças produzidas com 30% de substituição do agregado natural pelo reciclado, sendo este igual à 8,75%.

Figura 55 – Resistência à compressão dos 7 aos 28 dias

Fonte: Autor (2017)

Diante dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias de idade das peças, observou-se um comportamento curioso. O maior valor para a propriedade não foi fornecido pelo traço de referência e tampouco pelo traço contendo 10%, como era esperado. A maior resistência à compressão foi obtida com 20% de RCC, sendo também este, o único traço a fornecer resistência média maior do que 35 MPa aos 28 dias. A substituição de 30% da areia natural, por sua vez, forneceu resistência levemente maior do que a substituição de 10%. Embora ambas não tenham atingido os 35 MPa, foram alcançados valores muito próximos entre si, e próximos da resistência mínima requerida.

Para explicar tais resultados, algumas hipóteses foram levantadas. A primeira, de que a pressão aplicada durante a moldagem das peças teria sido diferente entre os traços, foi logo descartada, ao se confirmar que todos os parâmetros da vibroprensa foram mantidos constantes durante a rodagem dos quatro traços.

A segunda hipótese corresponde à presença dos grãos anidros de cimento no agregado reciclado. Acredita-se que esses tenham contribuído com o ganho da resistência do traço contendo agregado reciclado em relação ao concreto de referência.

Outra hipótese válida se refere ao empacotamento das partículas e um possível teor ótimo de substituição. Assim como constatado na presente pesquisa, Bittencourt (2012) obteve os maiores valores para a resistência à compressão das PCP por meio da substituição de 20% da areia natural pela areia de resíduo cinza. Hood (2006) e Taveira (2010), ao substituírem a areia natural pela areia de resíduo misto e pelo agregado reciclado de concreto, respectivamente, encontraram melhores resultados com teores de substituição iguais à 25%.

No trabalho de Santos (2014), também foi verificado, aos 28 dias, um aumento da resistência à compressão à medida que os teores de substituição da areia natural por areia

reciclada de resíduo misto foram elevados, até o teor de 25% de substituição. O autor atribuiu a esse aumento, o efeito fíler, ou seja, o efeito de preenchimento da parcela fina presente no agregado reciclado, o qual seria responsável por fornecer melhor empacotamento das partículas de cimento, conferindo maior compacidade à microestrutura da pasta cimentícia e, conseqüentemente, maiores valores para as resistências mecânicas das peças.

Nesse sentido, os resultados obtidos no presente trabalho, assim como os fornecidos por Hood (2006), Taveira (2010), Bittencourt (2012) e Santos (2014) suscitam a ideia de que exista um “teor ótimo de substituição” para areia reciclada e que o mesmo esteja situado entre 20% e 25%. Assim, concretos que contam com teores de areia reciclada dentro desse intervalo (ou próximo desses dois valores) seriam beneficiados pelo efeito fíler de maneira mais acentuada. Nesta pesquisa, a maior compacidade do concreto produzido com 20% de areia reciclada também pôde ser evidenciada pela massa das peças. Como possuem praticamente as mesmas dimensões, o maior valor obtido para a massa média das peças produzidas com 20% de substituição (2,62 kg contra 2,58 kg para o concreto de referência) denota a existência de um concreto mais compacto, com menor volume de vazios.

5.3.2 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A Tabela 21 e a Tabela 22 apresentam os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral realizados na ABCP aos 7 e aos 28 dias de idade das peças, respectivamente.

Tabela 21 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias

Corpo de prova nº	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)			
	Concreto referência	10% RCC	20% RCC	30% RCC
1	3,4	3,1	3,2	3,1
2	3,5	3,4	3,5	3,3
3	2,6	3,5	3,1	3,5
4	3,6	3,1	3,3	3,5
5	3,2	3,6	3,2	3,3
6	2,5	3,5	3,6	3,1
7	3,1	2,7	3,4	3,4
8	2,8	3,4	3,7	3,5
Desvio padrão	0,4	0,3	0,2	0,2
T (MPa)*	3,1	3,4	3,4	3,3
F (N/mm)**	335	353	363	362

* Resistência média à tração por compressão diametral

** Carga média de ruptura por unidade de comprimento

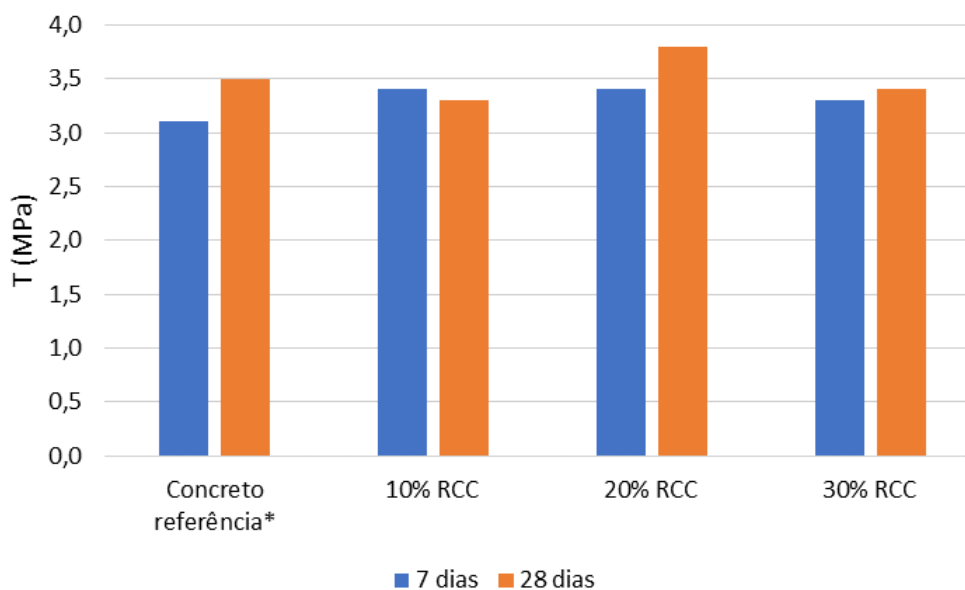
Tabela 22 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias

Corpo de prova nº	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)			
	Concreto referência	10% RCC	20% RCC	30% RCC
1	3,8	3,9	4,0	3,7
2	3,5	2,9	3,6	3,8
3	3,6	3,1	4,2	3,3
4	2,9	3,0	3,7	3,6
5	3,5	3,5	3,7	3,3
6	3,6	3,4	3,6	3,4
7	3,6	3,0	4,0	3,3
8	3,7	3,3	3,4	3,4
Desvio padrão	0,3	0,3	0,3	0,2
T (MPa)*	3,5	3,3	3,8	3,4
F (N/mm)**	382	352	407	378

*Resistência média à tração por compressão diametral

**Carga média de ruptura por unidade de comprimento

O ganho de resistência à tração por compressão diametral dos 7 aos 28 dias de idade das peças pode ser verificado no gráfico contido na Figura 56.

Figura 56 - Resistência à tração por compressão diametral

Fonte: Autor (2017)

Diferentemente da resistência à compressão, verificou-se que o ganho de resistência à tração por compressão diametral dos 7 aos 28 dias de idade das peças foi maior para o concreto de referência (12,9%), enquanto isso, o traço com 10% de areia reciclada sofreu uma pequena regressão no valor da propriedade.

Aos 28 dias, verificou-se algo semelhante ao ocorrido na compressão. O único traço que forneceu, aos 28 dias, uma resistência à tração por compressão diametral maior do que os 3,6 MPa exigidos BS EN 1338: 2003 foi o com 20% de substituição. Embora não tenham sido maiores, os traços de referência e com 30% de areia reciclada também se apresentaram

resultados satisfatórios, estando bem próximos do valor mínimo exigido. Quanto à carga média de ruptura por unidade de comprimento, todos os traços forneceram valores superiores ao mínimo de 350 N/mm exigido pela norma britânica.

O comportamento das peças quanto à resistência à tração por compressão diametral também pode ser atribuído ao melhor empacotamento de partículas proporcionado pela parcela de finos da areia reciclada, bem como ao ganho fornecido pela presença de grãos anidros de cimento no agregado reciclado.

5.3.3 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO

A Tabela 23 e a Tabela 24 apresentam os resultados dos ensaios de resistência à abrasão aos 7 e aos 28 dias de idade das peças, respectivamente.

Tabela 23 - Resultados de resistência à abrasão aos 7 dias

Corpo de prova nº	Abrasão individual (mm)			
	Concreto referência	10% RCC	20% RCC	30% RCC
1	21,4	22,4	22,4	22,4
2	22,4	21,4	22,4	21,4
3	21,4	22,4	22,4	20,4
Desvio padrão	0,6	0,6	0,0	1,0
Abrasão média (mm)	21,7	22,1	22,4	21,4
Abrasão média corrigida (mm)	21,5	22,0	22,5	21,5

Tabela 24 - Resultados de resistência à abrasão aos 28 dias

Corpo de prova nº	Abrasão individual (mm)			
	Concreto referência	10% RCC	20% RCC	30% RCC
1	22,4	22,2	22,4	22,7
2	22,4	21,9	22,9	22,4
3	22,6	22,4	22,9	22,4
Desvio padrão	0,1	0,3	0,3	0,2
Abrasão média (mm)	22,5	22,2	22,7	22,5
Abrasão média corrigida (mm)	22,5	22,0	22,5	22,5

Observou-se que todos os traços atenderam ao limite de 23 mm, proposto tanto pela ABNT NBR 9781: 2013 quanto pela BS EN 1338: 2003. Vale ressaltar que além de atenderem à normalização, aos 28 dias, os resultados de abrasão foram praticamente iguais para todos os traços, ao considerar a diferença de 0,5 mm entre o maior e o menor valor obtido. A substituição realizada no teor de 30% apresentou média dos valores de desgaste idêntica à

do concreto de referência, sendo o menor desgaste, ou seja, o melhor valor, fornecido pelo traço com 10% de areia reciclada.

O comportamento verificado nos ensaios de resistência à abrasão, pode estar ligado a outros fatores que interferem na propriedade. Em seu estudo, Humpola et al. (1996) concluíram que a resistência à abrasão não depende diretamente da resistência à compressão, mas que provavelmente é afetada por variáveis ligadas às condições da camada superficial das peças, entre estas: a quantidade de cimento presente na mistura, o regime de cura e a carbonatação, que, de maneira simplificada, consiste em uma reação entre a o dióxido de carbono (CO_2) e a água presente nos poros da mistura, a qual tem como consequências, a redução do pH e o aumento da dureza superficial. Vale ressaltar que o efeito da carbonatação é melhor percebido a longo prazo, e provavelmente não tenha ocorrido a ponto de influenciar os resultados dos ensaios realizados aos 28 dias.

Sobre a cura do concreto, Humpola (1996) afirma que quando essa ocorre de maneira desigual, uma mesma peça pode fornecer valores distintos de resistência à abrasão. O autor também abordou a forma como diferentes modos de cura influenciam na propriedade em questão, afirmando por exemplo, que a cura por aspersão se mostra muito mais eficiente quando comparada à cura ao ar livre (esse primeiro corresponde ao método utilizado pela fábrica parceira desta pesquisa). No que se refere à quantidade de aglomerante, Ghafoori e Sukandar (1995) afirmam que alterações na relação cimento/agregados exercem influência muito maior na resistência à abrasão do que a resistência à compressão ou resistência à tração por compressão diametral.

5.3.4 DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

A Tabela 25 e a Tabela 26 apresentam os resultados dos ensaios de absorção de água aos 7 e aos 28 dias de idade das peças, respectivamente.

Tabela 25 - Resultados de absorção de água aos 7 dias

Corpo de prova nº	Absorção (%)			
	Concreto referência	10% RCC	20% RCC	30% RCC
1	5,5	5,7	5,3	5,9
2	5,3	5,3	5,3	6,2
3	5,5	5,5	5,5	6,3
Desvio padrão	0,1	0,2	0,1	0,2
Absorção média (%)	5,4	5,5	5,4	6,1

Tabela 26 - Resultados de absorção de água aos 28 dias

Corpo de prova nº	Absorção (%)			
	Concreto referência	10% RCC	20% RCC	30% RCC
1	5,4	5,3	5,8	6,1
2	5,8	5,7	5,5	6,6
3	6,0	5,8	5,5	5,8
Desvio padrão	0,3	0,3	0,2	0,4
Absorção média (%)	5,7	5,6	5,6	6,2

Nos ensaios de absorção de água, observou-se que apenas o traço com 30% de substituição excedeu o limite de 6%, proposto tanto pela ABNT NBR 9781: 2013 quanto pela BS EN 1338: 2003. Mesmo assim, o resultado pode ser considerado satisfatório, uma vez que o limite foi superado em apenas 0,02%. Os traços com 10% e 20% de substituição apresentaram o menor valor, que também foi praticamente igual ao valor fornecido pelo concreto de referência (diferença de 0,1%).

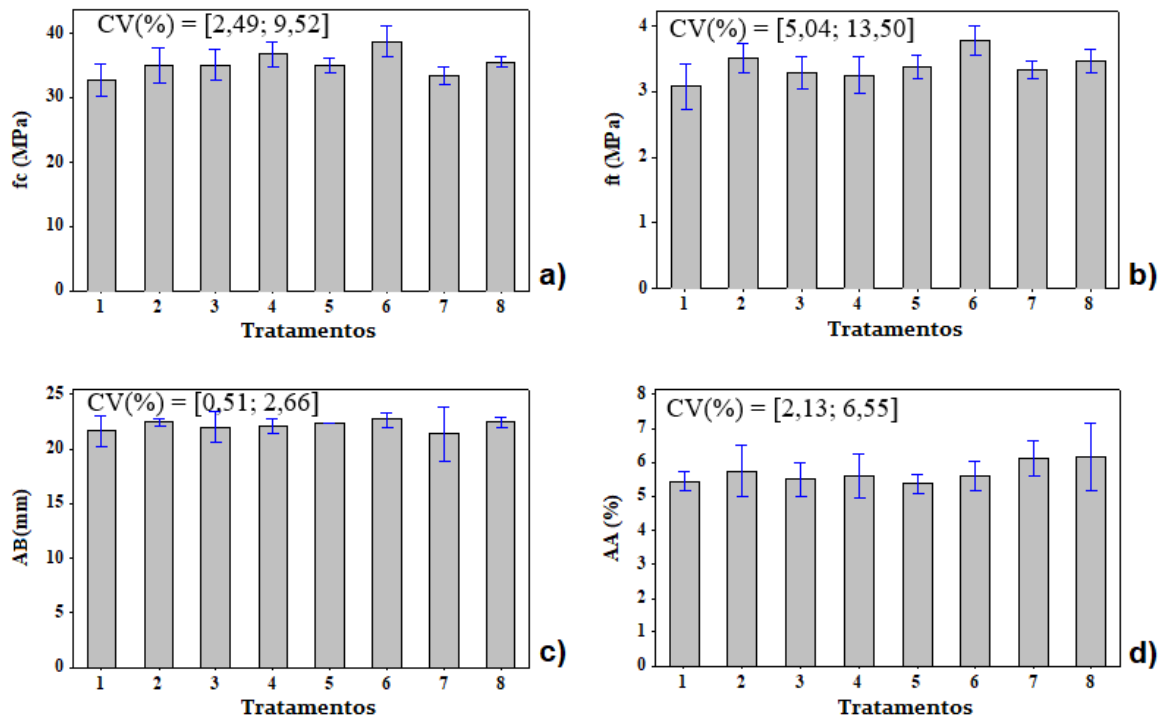
Acredita-se que a absorção de água esteja diretamente relacionada ao melhor empacotamento de partículas proporcionado pela parcela de finos presente na areia reciclada. Uma microestrutura mais compacta causada pelo efeito fíler, se traduz em um menor volume de vazios a serem ocupados pela água, e conseqüentemente, em menores valores de absorção de água.

5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

5.4.1 VARIAÇÃO POR TRATAMENTO OBTIDA NOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

A Figura 57 ilustra os valores médios, os intervalos de confiança da média (95% de confiabilidade) e os intervalos dos coeficientes de variação (CV) para as propriedades avaliadas nas peças fabricadas, de acordo com os oito tratamentos experimentais delineados.

Figura 57 – Variação nos resultados das propriedades ensaiadas: (a) compressão, (b) tração por compressão diametral, (c) abrasão e (d) absorção de água.



Fonte: Autor (2017)

Com base nas tabelas contidas na Figura 57, conclui-se que os ensaios de determinação das resistências à compressão e à tração por compressão diametral apresentaram a maior dispersão entre os resultados, seguidos pela absorção de água e pela resistência à abrasão.

5.4.2 INFLUÊNCIA DO AGREGADO RECICLADO E IDADE DAS PEÇAS NOS VALORES DAS PROPRIEDADES TESTADAS

Tanto para a resistência à compressão (f_c), quanto para a resistência à tração por compressão diametral (f_t) das peças, apenas o fator idade de ensaio (IE) foi considerado significativo. Isso implica que a alteração de 7 para 28 dias na idade dos ensaios promove aumento significativo nos valores da f_c e da f_t . Tais propriedades dos artefatos fabricados não foram afetadas nem pelas frações de areia de RCC e nem pela interação entre ambos.

Nenhum fator isolado ou interação entre ambos afetou de forma significativa os valores da resistência à abrasão (RA) e da absorção de água (AA), ou seja, tais propriedades não foram afetadas pelas variações dos níveis de RCC e da IE.

De uma forma geral, verificou-se que a presença do agregado reciclado (em todos os seus 4 níveis) no traço de produção das peças não reduziu significativamente suas propriedades, ou seja, os resultados obtidos aqui denotam que é possível substituir a massa

de areia natural pela areia de resíduo cinza, nos teores de 10% a 30%, sem perder a qualidade das peças. Nesse sentido, comprova-se a viabilidade técnica do procedimento.

5.4.3 ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES EM FUNÇÃO DA IDADE DAS PEÇAS E DA QUANTIDADE DE AGREGADO RECICLADO

As Equações 6.1 e 6.2 expressam os resultados dos modelos de regressão para a estimativa dos valores da resistência à compressão e à tração, respectivamente, juntamente com os fatores considerados significativos pela ANOVA.

$$f_c = 33,0775 + 0,0123333 \cdot RCC + 0,106071 \cdot IE + 0,000845238 \cdot RCC \cdot IE \quad R^2 = 19,79\% \quad (6.1)$$

$$f_t = 3,04333 + 0,00995833 \cdot RCC + 0,0147024 \cdot IE - 0,00022619 \cdot RCC \cdot IE \quad R^2 = 18,24\% \quad (6.2)$$

Onde:

f_t = resistência à tração por compressão diametral do concreto (MPa);

f_c = resistência à compressão do concreto (MPa);

RCC = teores de substituição de agregado miúdo natural por reciclado (%);

IE = idade de ensaio das peças (dias).

Os P-valores dos testes de normalidade (Anderson-Darling) dos resíduos da ANOVA dos modelos de regressão para a f_c e f_t foram ambos superiores ao nível de significância (0,05), validando os modelos da análise de variância. Mesmo não sendo tão expressivos os valores dos coeficientes de determinação obtidos com as Equações 6.1 e 6.2, a ANOVA acusou significância desses ajustes.

Segundo às Equações 6.1 e 6.2, o aumento nos valores de RCC, IE, bem como da interação entre eles também refletem em maiores valores de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral das peças. Algo que na prática foi verificado até o teor de 20%, uma vez que os valores das propriedades começaram a reduzir com 30% substituição.

As Equações 6.3 e 6.4, por sua vez, expressam os resultados dos modelos de regressão que estimam a resistência à abrasão e absorção de água em função dos teores de substituição por areia reciclada e idade de ensaio das peças.

$$RA = 21,8778 - 0,0111111 \cdot RCC + 0,0174603 \cdot IE + 0,000634921 \cdot RCC \cdot IE \quad R^2 = 26,43\% \quad (6.3)$$

$$AA = 5,22444 + 0,0218889 \cdot RCC + 0,0126984 \cdot IE - 0,00031746 \cdot RCC \cdot IE \quad R^2 = 34,75\% \quad (6.4)$$

Onde:

RA = abrasão do concreto (MPa);

AA = absorção de água do concreto (MPa);

RCC = teores de substituição de agregado miúdo natural por reciclado (%);
 IE = idade de ensaio das peças (dias).

Os P-valores dos testes de normalidade dos resíduos da ANOVA dos modelos de regressão para a RA e AA foram ambos superiores ao nível de significância, validando os modelos da análise de variância. Mesmo sendo pouco expressivos os valores dos coeficientes de determinação obtidos com as Equações 6.3 e 6.4, a ANOVA acusou significância de ambos os ajustes.

As Equações 6.3 e 6.4 apontam que, para os intervalos de resistências e os teores de RCC compreendidos, o aumento no teor de agregado, de forma isolada, refletiu negativamente na resistência à abrasão das peças. Porém tanto a interação entre os níveis de RCC e a IE, bem como a IE de forma isolada, contribuíram para os ganhos da propriedade. No que é referente à absorção de água, essa foi afetada negativamente somente pela interação entre os níveis de RCC e a IE, tendo os dois fatores, de forma isolada, contribuído para o ganho da propriedade.

Acredita-se que os valores baixos para o coeficiente de determinação (R^2) nas Equações de 6.1 a 6.4 sejam justificados pelo curto intervalo das propriedades compreendido pelos ensaios, e utilizado para estabelecer as regressões.

5.4.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Tabela 27 expressa os melhores ajustes por tratamento das relações entre f_c e f_t , ressaltando serem significativos os modelos pela ANOVA para P-valor inferior ao nível de significância adotado (0,05).

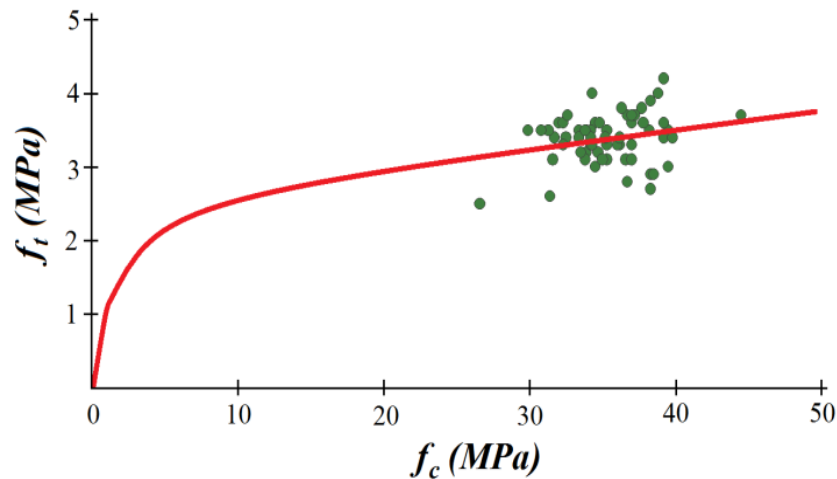
Tabela 27 - Melhores ajustes das relações entre f_c e f_t por tratamento

Tr	Modelo	R^2 (%)	P-valor (ANOVA)
1	$f_t = 0,2212 \cdot f_c^{0,7541}$	27,46	0,182
2	$f_t = 4,6840 \cdot e^{-0,0082 \cdot f_c}$	11,02	0,422
3	$f_t = 6,1017 \cdot e^{-0,01777 \cdot f_c}$	29,76	0,162
4	$f_t = 3,4429 \cdot e^{-0,0016 \cdot f_c}$	0,14	0,930
5	$f_t = 0,1676 \cdot f_c^{0,8439}$	27,61	0,181
6	$f_t = 9,3894 \cdot f_c^{-0,2498}$	7,02	0,526
7	$f_t = 3,2247 \cdot e^{0,0010 \cdot f_c}$	0,10	0,940
8	$f_t = 1,0884 \cdot e^{0,0325 \cdot f_c}$	26,50	0,192

Da Tabela 27 nota-se que nenhum modelo foi considerado significativo pela ANOVA, e isso implica que para o intervalo de resistências avaliado e os teores de RCC compreendidos, variações na f_c não promoveram alterações significativas na f_t .

Considerando os resultados de todos os tratamentos conjuntamente, o modelo de regressão resulta em $f_t = 1,0945 \cdot f_c^{0,3161}$ (Figura 58), com coeficiente de determinação $R^2=6,97\%$ e P-valor da ANOVA igual a 0,035. Mesmo sendo pouco expressivo o valor do coeficiente de determinação, fica constatada a influência da f_c na estimativa da f_t , o que implica que aumentos nos valores da resistência na compressão também geram aumentos nos valores da resistência à tração.

Figura 58 - Modelo geométrico utilizado na estimativa da f_t em função da f_c considerando os resultados de todos os tratamentos



Fonte: Autor (2017)

Da mesma forma, a não-significância das Equações contidas na Tabela 27 pode ser justificada pela faixa estreita de valores de f_c compreendidos pelos ensaios. Quando comparado, por exemplo, aos trechos de f_c válidos para as Equações contidas na Tabela 5 e fornecidas pelos demais autores, o intervalo de (30,1 a 36,2) MPa varrido por esta pesquisa se mostra um tanto quanto reduzido, algo que dificulta o estabelecimento de um padrão para o comportamento das propriedades analisadas.

O tamanho do espaço amostral, ou seja, a quantidade de elementos testados também está diretamente relacionada à representatividade dos modelos obtidos. Segundo Ghafoori e Smith (1992), para se estimar de forma convincente as propriedades de PCP por meio de análise estatística, seriam necessários ao menos 100 corpos de prova para cada variável avaliada.

Ghafoori e Smith (1992) também ensaiaram PCP retangulares, nas dimensões (10x20x6) cm e (10x20x8) cm. Dezesete empresas norte-americanas participaram da

pesquisa, tendo cada uma fornecido uma quantidade mínima de 100 exemplares de cada altura, de forma a conceber um espaço amostral com mais de 3000 corpos de prova. O melhor ajuste encontrado pelos autores para estimar f_t em função de f_c , considerando somente as peças com 6 cm de altura (mesma analisada na presente pesquisa) e rompidas aos 28 ± 2 dias, foi linear (Equação 6.5). O coeficiente de determinação (R^2) obtido foi igual à 50,5%.

$$f_t = 534,56 + 0.034 \cdot f_c \quad (6.5)$$

Onde:

f_t = resistência à tração por compressão diametral do concreto (Psi);

f_c = resistência à compressão do concreto (Psi);

Em seu estudo experimental, Purwanto (2008), relacionou as resistências à compressão e à tração por compressão diametral de PCP por meio da Equação 6.6.

$$f_t = 0,086 \cdot f_c^{1,096} \quad (6.6)$$

Onde:

f_c = resistência à compressão das peças (MPa);

f_t = resistência à tração por compressão diametral (MPa).

Sadek, El-Attar e Ali (2017), por sua vez, expressaram por meio da Equação 6.7, f_t em função de f_c para PCP hexagonais produzidas com resíduos de fornos empregados na produção de cimento. Os autores obtiveram um R^2 de 97,15%.

$$f_t = 0,0979 \cdot f_c^{0,9414} \quad (6.7)$$

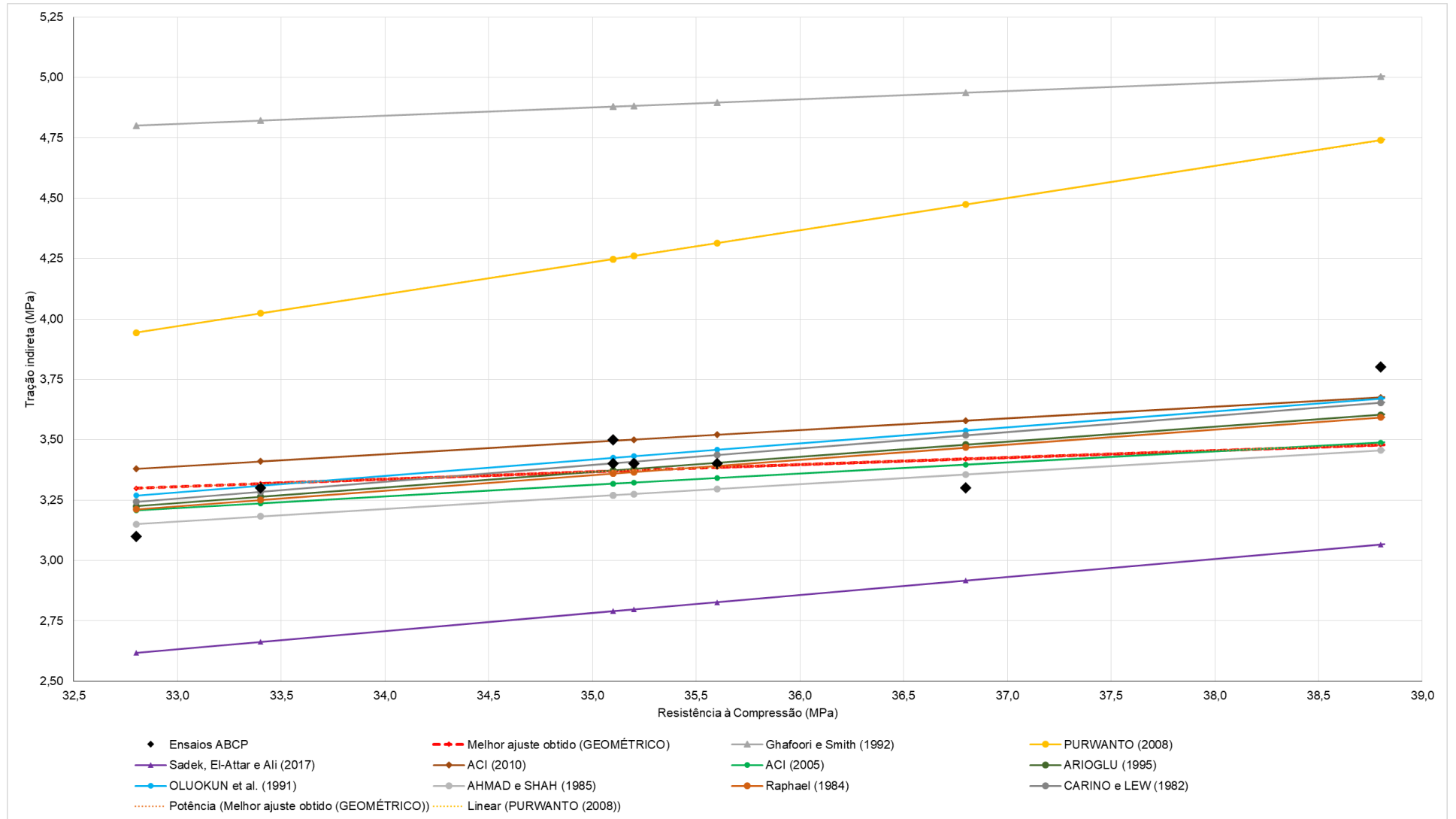
Onde:

f_c = resistência à compressão das peças (MPa);

f_t = resistência à tração por compressão diametral (MPa).

A seguir, o gráfico contido na Figura 59 apresenta as médias dos valores experimentais de f_c e f_t para os 8 traços empregados nesta pesquisa, o melhor modelo de regressão obtido (geométrico, considerando todos os traços), as curvas de Ghafoori e Smith (1992), Purwanto (2008), Sadek, El-Attar e Ali (2017), bem como as curvas propostas para estimar f_t de concretos em geral (Tabela 5) que apresentaram maior proximidade com o modelo de regressão aqui adotado.

Figura 59 - Comparação entre valores os valores experimentais e curvas de regressão



Fonte: Autor (2017)

Mesmo não sendo considerado significativo pela ANOVA, o modelo encontrado neste trabalho para estimar a resistência à tração por compressão diametral forneceu valores semelhantes aos das curvas propostas por outros autores. Entre esses, destacam-se Carino e Lew (1982), Raphael (1984), Oluokun et al. (1991) e Arioglu (1995). Todos apresentaram valores de média e desvio padrão iguais, e iguais ao modelo geométrico de regressão encontrado na presente pesquisa. As curvas de ACI (2005) e ACI (2010) forneceram a melhor correlação de com o modelo geométrico, com R de Pearson = 0,95. Quanto às curvas elaboradas especificamente para estimar as propriedades das PCP, a curva de Sadek, El-Attar e Ali (2017) apresentou os valores mais próximos, porém todos se situam abaixo dos dados experimentais e do que foi estimado pela regressão geométrica. A curva de Purwanto (2008), por sua vez, forneceu a maior correlação com os valores dos ensaios de tração (R=0,83).

5.4.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA E ABRASÃO EM FUNÇÃO DAS PRINCIPAIS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

Na Tabela 28 são apresentados os melhores ajustes das relações $RA=f(f_t)$, $RA=f(f_c)$, $AA=f(f_c)$ e $AA=f(f_t)$ obtidos com base nos ensaios desta pesquisa.

Tabela 28 - Melhores ajustes das relações $AB=f(f_t)$, $AB=f(f_c)$, $AA=f(f_c)$ e $AA=f(f_t)$ considerando o conjunto com todos os tratamentos

Modelo	R ² (%)	P-valor (ANOVA)
$AB = 12,9493 + 2,5849 \cdot \ln(f_c)$	10,04	0,131
$AB = 20,2740 + 0,5548 \cdot f_t$	12,08	0,096
$AA = 5,9309 - 0,0670 \cdot f_c$	0,02	0,950
$AA = 5,3763 + 0,2563 \cdot \ln(f_t)$	0,61	0,716

Da Tabela 28 nota-se que nenhum dos ajustes obtidos foi considerado significativo pela ANOVA (P-valor>0,05), e o modelo linear foi o que forneceu os melhores resultados (R²=12,08%).

Com um coeficiente de determinação (R²) igual à 66,07%, Aslantas (2004) estimou o volume de desgaste à abrasão em função da resistência à compressão das PCP, por meio da Equação 6.8.

$$AB = -0,4008 \cdot f_c + 41,923 \quad (6.8)$$

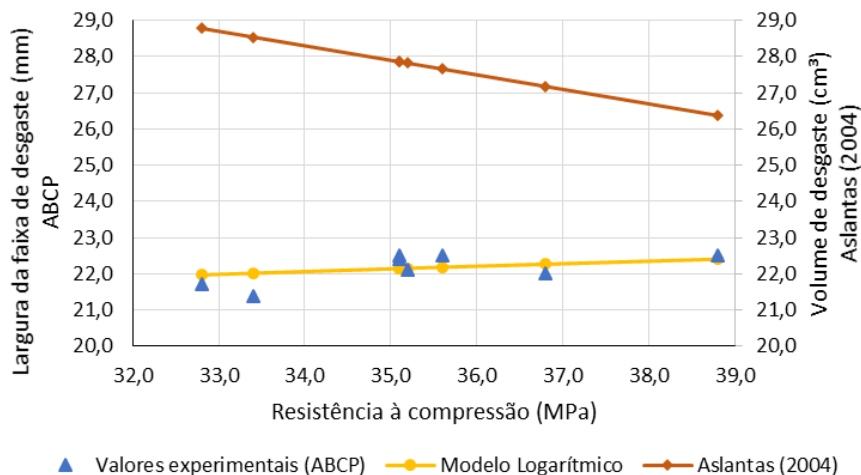
Onde:

AB = volume do desgaste superficial (cm³).

f_c = resistência à compressão da PCP (MPa);

Na Figura 60 são plotados os valores experimentais de f_c (eixo x) e da largura da faixa de desgaste (eixo y) obtida no ensaio de abrasão; a largura da faixa estimada pelo melhor modelo de regressão escolhido (logarítmico); e também o volume de desgaste superficial (cm^3) em função de f_c , estimado, encontrado por Aslantas (2004).

Figura 60 - Comparação das regressões para o desgaste superficial



Fonte: Autor (2017)

Apesar de se tratarem de variáveis diferentes empregadas na medida do desgaste superficial (uma, largura da faixa e outra, volume) a intenção aqui é comparar os comportamentos verificados nos ensaios e expressos pelos dois modelos de regressão. Mesmo o modelo logarítmico para estimativa da abrasão não sendo considerado significativo pela ANOVA, com base no gráfico contido na Figura 60, nota-se que esse forneceu valores próximos aos resultados experimentais. No entanto, o comportamento que a regressão forneceu nesta pesquisa para a relação entre f_c e AB contradiz o que, via de regra, é observado na prática, bem como o que diz o trabalho de Aslantas (2004). Dentro do intervalo contemplado, o modelo de regressão logarítmico supõe que aumentos na resistência à compressão implicariam em pequenos aumentos no desgaste superficial das peças, sendo que, de uma forma geral, espera-se que peças dotadas de uma resistência à compressão maior tendam a apresentar menores desgastes superficiais.

Assim como na tração por compressão diametral, acredita-se que as faixas estreitas de resultados compreendidos pelos ensaios de compressão (30,1 a 36,2) MPa, abrasão (21,5 a 22,5) mm e absorção de água (5,4 a 6,2) %, bem como a provável necessidade de uma quantidade maior de corpos de prova para essas propriedades (apenas 3 peças por traço) não permitiram estabelecer, segundo à ANOVA, um comportamento significativo por meio da regressão. Algo que também é evidenciado pelos baixos valores de R^2 .

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho estudou-se a viabilidade técnica em se produzir peças de concreto para pavimentação substituindo parcialmente a massa de agregado miúdo natural (areia de rio) por areia reciclada de resíduo cinza, obtida a partir do beneficiamento do RCC. Nesta seção serão apresentadas as conclusões e recomendações tomadas diante dos resultados obtidos na pesquisa e de suas respectivas análises. As considerações serão feitas separadamente retomando o que foi proposto pelos objetivos do trabalho.

6.1 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DAS PEÇAS SEGUNDO À NORMALIZAÇÃO

6.1.1.1 Resistência à compressão

Com base nos ensaios de determinação da resistência à compressão, concluiu-se que a adição do agregado reciclado, em todos os seus teores (10%, 20% e 30%) implicou em aumento no valor da propriedade em relação ao concreto de referência. O maior aumento foi verificado para as peças contendo 20% de areia reciclada de resíduo cinza, cuja resistência média característica superou o mínimo de 35 MPa exigido pela norma brasileira. Embora não tenham ultrapassado os 35 MPa, os traços com 10% e 30% de substituição apresentaram valores muito próximos entre si, e próximos da resistência mínima requerida. Segundo a análise estatística, nenhum dos teores de substituição interferiu significativamente na resistência à compressão das peças. Apenas a idade e ensaio das peças foi considerada significativa. Desta forma, de acordo com a normalização local, consideram-se satisfatórios os resultados de resistência à compressão aqui obtidos.

6.1.1.2 Resistência à tração por compressão diametral

Aos 28 dias, o comportamento verificado nos resultados de tração por compressão diametral foi semelhante ao exibido pelos ensaios de compressão, de modo que a incorporação da areia reciclada refletiu em aumentos de resistência à tração em relação ao concreto de referência. O maior aumento foi fornecido pela substituição de 20% do agregado natural, atendendo ao limite mínimo proposto pela norma britânica. As demais substituições forneceram valores próximos entre si, e pouco abaixo dos 3,6 MPa exigidos em norma.

Quanto ao limite para carga mínima de ruptura por unidade de comprimento, este foi atendido por todos os traços. Segundo a análise estatística, nenhum dos teores de substituição interferiu significativamente na resistência à tração por compressão diametral das peças. Apenas a idade e ensaio das peças foi considerada significativa. Conclui-se que, segundo os parâmetros da norma britânica, todas as peças produzidas apresentaram valores satisfatórios para resistência à tração por compressão diametral.

6.1.1.3 Abrasão

Todos os traços (contendo ou não resíduo) forneceram valores menores que o limite máximo de 23 mm proposto pelas normas brasileira e britânica. Para essa propriedade, os aumentos não foram tão perceptíveis diante da adição do agregado reciclado. Os valores de desgaste superficial obtidos pelos 4 traços foram praticamente iguais, ao considerar uma diferença de 0,5 mm entre o maior e menor valor. Segundo a análise estatística, nenhum dos teores de substituição e nem a idade e ensaio interferiram significativamente na abrasão das peças. Conclui-se para a resistência à abrasão, que as peças produzidas com areia reciclada forneceram bons resultados perante a normalização.

6.1.1.4 Absorção de água

Diante dos resultados obtidos nos ensaios de absorção de água, conclui-se que as substituições da areia natural pela areia de RCC, em sua maioria, forneceram valores satisfatórios para a propriedade, uma vez que, o limite de 6%, proposto pelas normas brasileira e britânica, foi excedido apenas pelo traço contendo 30% do agregado reciclado. Mesmo assim, o limite foi superado em apenas 0,02%. Segundo a análise estatística, conclui-se que nenhum dos teores de substituição e nem a idade e ensaio interferiram significativamente na absorção de água das peças.

6.2 RELAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DAS PEÇAS

Em função das faixas estreitas de resultados compreendidos pelos ensaios, bem como a provável necessidade de uma quantidade maior de corpos de prova, não foi possível estabelecer, segundo à ANOVA, um modelo que expressasse de forma significativa a relação entre as propriedades mecânicas, e destas com as propriedades físicas das peças.

Apesar de não ser considerado significativo perante a ANOVA e apresentar um coeficiente de determinação (R^2) baixo, os valores de resistência à tração por compressão diametral estimados pelo modelo de regressão geométrico aqui encontrado estiveram muito

próximos dos obtidos pelas curvas propostas por outros autores, fornecendo uma correlação forte, e para alguns casos, até os mesmos valores de média e de desvio padrão. Para as propriedades de absorção de água e abrasão, os comportamentos expressos pelos modelos de regressão obtidos se distanciaram do que foi proposto pelas curvas de outros autores.

Para que modelos representativos sejam obtidos, ou seja, modelos que permitam expressar de maneira confiável as interações entre propriedades físicas e mecânicas de PCP, sugere-se que uma quantidade maior de exemplares seja testada, varrendo também um intervalo maior de valores para as propriedades, iniciando com resistências mínimas e chegando até valores bem acima dos limites propostos em norma.

6.3 VIABILIDADE TÉCNICA NO USO DA AREIA RECICLADA

Com base nos ensaios de caracterização dos agregados, conclui-se que a areia reciclada de resíduo cinza apresentou uma distribuição granulométrica contínua e bem classificada, sendo enquadrada na **zona ótima de utilização** segundo à ABNT NBR 7211: 2009. Nesse aspecto, suas características foram até superiores às da areia natural, pertencente à zona utilizável inferior. Os teores de absorção de água e de materiais pulverulentos também atenderam aos limites propostos pela ABNT NBR 15116: 2004. Quanto aos valores das massas unitária e específica, esses foram levemente inferiores aos da areia, como já se era esperado em função da maior porosidade.

No que se refere ao processo produtivo das peças, merece atenção o fato de que a substituição da areia natural pela areia reciclada não foi associada à nenhuma correção/compensação da quantidade de aglomerante, o que destoaria do conceito de sustentabilidade, tendo em vista os grandes impactos ambientais relacionados à produção do cimento. Este trabalho contou com a simples substituição em massa do agregado miúdo natural, o que permitiu avaliar a real interferência do material reciclado nas propriedades das peças. Com base nessa informação e nos ensaios realizados, verifica-se os quão satisfatórios foram os resultados alcançados.

Ainda sobre a produção, os bons resultados obtidos evidenciaram o quão importante foi a utilização das máquinas vibroprensas industriais. Além de inserir o estudo na realidade praticada pelo mercado, acredita-se a constante vibração e ao alto grau de compactação conferido às misturas durante a moldagem, tenham contribuído de forma significativa para que as peças produzidas com agregado reciclado apresentassem propriedades similares (e até superiores) às do traço convencional. Também merecem destaque, as contribuições dos

grãos anidros de cimento presentes na areia de resíduo cinza, e o melhor empacotamento da mistura, proporcionado pela parcela fina contida do agregado reciclado.

Ao comparar os resultados obtidos nesta pesquisa com os fornecidos por outros trabalhos, conclui-se ainda que um possível teor ótimo de substituição, ou seja, aquele que forneça o melhor arranjo entre as partículas e, conseqüentemente, os melhores valores para as resistências, esteja situado entre 20% e 25%, ou próximo desses dois valores.

Por meio da análise estatística, baseada nos resultados de avaliação das PCP, a viabilidade técnica na incorporação do agregado reciclado foi comprovada. De uma forma geral, verificou-se que a presença da areia de resíduo cinza (em todos os seus 4 níveis) não interferiu significativamente nas propriedades avaliadas, ou seja, os valores obtidos aqui denotam que é possível substituir a massa de areia natural pela areia reciclada de resíduo cinza, nos teores de 10% a 30%, e permitir que as peças continuem atendendo às solicitações de compressão, tração, abrasão e absorção de água da mesma forma.

6.4 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como proposta de continuidade para o estudo desenvolvido, de aprofundamento nos conceitos abordados, e de sanar alguns dos questionamentos levantados nesta pesquisa, sugere-se para trabalhos futuros:

- Realizar a separação de agregados reciclados por faixa de densidade bem como sua pré-saturação como formas de compensar a heterogeneidade do material e combater a variabilidade dos resultados;
- Produzir traços de concreto seco com e sem a pré-saturação dos agregados reciclados a fim de avaliar a influência do procedimento nas propriedades dos artefatos;
- Estudar melhor o empacotamento do concreto seco com a presença de resíduos;
- Investigar mais a fundo a mudança na normalização britânica ocorrida em 2003, onde o ensaio de tração por compressão diametral passou a ser utilizado para certificação das PCP em substituição ao ensaio de compressão. Descobrir os motivos que levaram a tal mudança bem como suas etapas;
- Testar mais teores de substituição a fim de comprovar a existência de um intervalo ótimo. Produzir mais traços com teores de substituição entre 20% e 30% e também acima de 30%;

- Estabelecer relações que estimem as resistências mecânicas e as propriedades físicas em função da densidade das peças, por esta ser uma propriedade de fácil obtenção, de forma a incorporar a verificação da densidade ao dia-a-dia das empresas produtoras de PCP;
- Realizar um estudo exaustivo, abrangendo uma quantidade maior de exemplares e varrendo também um intervalo maior para os valores das propriedades, a fim de estabelecer de forma confiável relações entre as propriedades físicas e mecânicas das PCP, com e sem a presença de agregados reciclados.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais.

ALBERO A. J. L., A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial – Parte I – O preenchimento das cavidades do molde. **Cerâmica Industrial**, São Carlos, v.5, n.1, p. 23, set./out. 2000.

ALBERO A. J. L., A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial – Parte III: Variáveis do Processo de Compactação. **Cerâmica Industrial**, São Carlos, v. 6, n. 1, p. 26-27. mai./jun. 2001.

ALCÂNTARA, P. S. Xavier de. **Blocos intertravados coloridos para pavimentação com incorporação de resíduos de cerâmica vermelha em prol da redução de pigmentos**. 2015. 179 f. Dissertação (Mestrado) – Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2015.

ALCÂNTARA, P. S. Xavier de; NÓBREGA, A. C. Colored Concrete Interlocking Blocks with Addition of Red Ceramic Waste for Iron Oxide Pigments Reduction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NON-CONVENTIONAL MATERIALS AND TECHNOLOGIES, 16., 2015, Winnipeg, Canada. **Proceedings...** Winnipeg, 2015.

American Concrete Institute (ACI) **363R-92**. State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete. ACI Committee Report 363. Detroit, 1992.

ÂNGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico de concretos**. 2005. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ÂNGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. Concreto com agregados reciclados. In: _____. **Concreto: ciência e tecnologia**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011. Editor Geraldo C. Isaia, v. 2. p. 1731-1767.

ARIOGLU, Nihal.; GIRGIN, Z. C.; ARIOGLU, Ergin. Evaluation of ratio between splitting tensile strength and compressive strength for concretes up to 120 MPa and its application in strength criterion. **ACI Materials Journal**. v. 103, n. 1, p 18–24, jan/feb. 2006.

ASLANTAS, O. **A study on abrasion resistance of concrete paving blocks**. 2004. 109 p. Dissertation (Masters in Civil Engineering) – Middle East Technical University, Ankara, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 5p.

_____. **NBR 7389**: Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto – Parte 1: Agregado miúdo. Rio de Janeiro, 2009. 5p.

_____. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987. 3p.

_____. **NBR 9780:** Peças de concreto para pavimentação - determinação da resistência à compressão - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987. 3p.

_____. **NBR 9781:** Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013. 26p.

_____. **NBR 9935:** Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro, 2011. 16p.

_____. **NBR 10004:** Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71p.

_____. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015. 29p.

_____. **NBR 15112:** Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de trasbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004. 11p.

_____. **NBR 15113:** Resíduos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004. 16p.

_____. **NBR 15114:** Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004. 11p.

_____. **NBR 15115:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004. 14p.

_____. **NBR 15116:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004. 18p.

_____. **NBR 15953:** Pavimento intertravado com peças de concreto - Execução. Rio de Janeiro, 2011. 13p.

_____. **NBR 16416:** Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015. 25p.

_____. **NBR NM 26:** Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2009. 10p.

_____. **NBR NM 27:** Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001. 7p.

_____. **NBR NM 30:** Agregado miúdo - determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001. 3p.

_____. **NBR NM 45:** Agregados - determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8p.

_____. **NBR NM 46:** Agregados - determinação do material fino que passa na peneira de 75 micrometros por lavagem. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

_____. **NBR NM 49:** Agregado miúdo - determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001. 3p.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6p.

_____. **NBR NM 248:** Agregados -determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Manual de Pavimento Intertravado:** Passeio Público. São Paulo, 2010. 36p.

American Society for Testing and Materials (ASTM). **ASTM C140:** Test methods for sampling and testing concrete masonry units and related units. West Conshohocken, PA, 2003.

American Society for Testing and Materials (ASTM). **ASTM C418:** Standard test method for abrasion resistance of concrete by sandblasting. West Conshohocken, PA, 2005.

BITTENCOURT, S. F. **Avaliação da resistência à compressão de pavers produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição e areia de fundição.** 2012. 124 f. Dissertação (Mestrado Tecnologia) – Faculdade de Tecnologia – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

BEHNOOD, A.; VERIAN, K. P.; GHAREHVERAN, M. M. Evaluation of the splitting tensile strength in plain and Steel fiber-reinforced concrete based on the compressive strength. **Construction and Building Materials.** v. 98, p 519–529. 2015.

BRASIL, Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Brasília, DF, 2010. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em 02 jun. 2017.

_____. Decreto nº 7.404/2010, de 23 de dezembro de 2010. **Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências.** Brasília, DF, 2010. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm>. Acesso em 02 jun. 2017.

_____. Ministério do Meio Ambiente, Resolução Nº 307 – **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.** Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF, 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em 01 jun. 2017.

_____. Ministério do Meio Ambiente, Resolução Nº 348 – **Altera a Resolução CONAMA Nº 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos.** Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF, 2004. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=449>>. Acesso em 01 jun. 2017.

_____. Ministério do Meio Ambiente, Resolução Nº 431 – **Altera o art. 3 da Resolução CONAMA Nº 307, de 5 de julho de 2002, estabelecendo nova classificação para o gesso.** Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF, 2011. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=649>>. Acesso em 01 jun. 2017.

_____. Ministério do Meio Ambiente, Resolução Nº 448 – **Altera os arts. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 10 e 11 da Resolução CONAMA Nº 307, de 5 de julho de 2002.** Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF, 2012. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=672>>. Acesso em 01/ jun. 2017.

_____. Ministério do Meio Ambiente, Resolução Nº 469 – **Altera a Resolução CONAMA Nº 307, de 5 de julho de 2002.** Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF, 2015. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=714>>. Acesso em 02 jun. 2017.

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D.; RAVINDRARAJAH, R. S. Volume of permeable voids modeling of recycled aggregate concrete. In: PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment, 2007. **Proceedings...**, Hat Yai, Songkla, Thailand, 2007.

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D. Determinação da influência do tipo de agregado reciclado de resíduo de construção e demolição sobre o módulo de deformação de concretos produzidos com agregados reciclados. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 1, n. 2, p. 171-192, 2008.

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D.; RAVINDRARAJAH, R. S. Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 55, n. 336, p. 448-460, 2009.

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D. Performance estimation for concretes made with recycled aggregates of construction and demolition waste of some Brazilian cities. **Materials Research**, v. 15, n. 6, p. 1037-1044, 2012.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto.** 2005. 145 f. Tese (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CARVALHO, E. V. **Utilização do resíduo da retífica de cerâmica de revestimento na produção de concreto para pavimento intertravado.** 2013. 160 f. Dissertação (Mestrado Tecnologia) – Faculdade de Tecnologia – Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2013.

Committee Euro-International du Beton (CEB-PIP). **CEB-PIP Model Code 1990**, Thomas Telford, London, 1993.

CÓRDOBA, R. E. **Estudo do Sistema de Gerenciamento Integrado de Resíduos de Construção e Demolição do Município de São Carlos.** 2010. 372 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

CÓRDOBA, R. E. **Estudo do potencial de contaminação de lixiviados gerados em aterros de resíduos da construção civil por meio de simulações em colunas de lixiviação.** 2014. 339 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

CRUZ, L. O. M. **Pavimento Intertravado de Concreto: Estudo dos Elementos e Métodos de Dimensionamento.** 2013. 281f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

DIMITRIOGLOU, N.; TSAKIRIDIS, P. E.; KATSIOTIS, K. S.; KATSIOTIS, M. S.; PERDIKIS, P.; BEAZI, M. Production and Characterization of Concrete Paving Blocks Containing Ferronickel Slag as a Substitute for Aggregates. **Waste and Biomass Valorization**, v. 7, n. 4 p. 941-951, 2016.

DOWSON, A. Mix Design for Concrete Block Paving. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CBP, 1., 1980. p. 121-127. **Proceedings...**, 1980.

Egyptian Organization for Standards & Quality (OES). **ESS 4382: Concrete paving blocks - Requirements and test methods**. Cairo, 2008.

Egyptian Organization for Standards & Quality (OES). **ESS 4756-1: Cement - Composition, specifications and conformity criteria for common cements**. Cairo, 2007.

European Committee for Standardization (CEN). **BS EN 1338: Concrete Paving Blocks - Requirements and Test Methods**. Brussels, 2003.

FERNANDES, I. **Blocos e Pavers – Produção e Controle de Qualidade**. 7 ed. Ribeirão Preto, Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda., 2016. 200p.

FIOLA, C.; TARDINI, B. Concrete quality versus mixing time. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE BLOCK PAVING, 3., may 1988, Rome, Italy. **Proceedings...**, Rome, 1988, p. 252-272.

FIORITI, C. F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo**. 2007. 218 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FIORITI, C. F.; INO, A.; AKASAKI, J. L. Análise experimental de blocos intertravados de concreto com adição de resíduos do processo de recauchutagem de pneus. **Acta Scientiarum Technology**. Maringá, v. 32, n. 3, p. 237–244. 2010.

FISCHER, C.; WERGE, M.; REICHEL, A. EU as a Recycling Society. Present Recycling Levels of Municipal Waste and Construction & Demolition Waste in the EU European Topic Centre on Resource and Waste Management. 2009. 73 p.

GHAFOORI, N.; SMITH, D. R. Splitting tensile and compressive strength relationship of concrete paving blocks. **The Masonry Society Journal**. n.451, p. 37-46. 1992.

GHAFOORI, N.; SUKANDAR, B. M. Abrasion Resistance of Concrete Block Pavers. **ACI Materials Journal**. v. 92, n.1, p. 25-36. 1995.

GODINHO, D. P. **Pavimento intertravado: uma reflexão na ótica da durabilidade e sustentabilidade**. 2009. 157 f. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) – Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

HENDRIKS, C. F. **The building cycle**. Holanda: Aeneas, 2000. 231 p.

HOOD, R. S. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. 2006. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

HUMPOLA, B. Some Aspects of CBP Quality, In: THE FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE BLOCK PAVING. **Proceedings...** Tel-Aviv, Israel, pp. 103-113, 1996

HUMPOLA, B., BULLEN, F., KNAPTON, J. Quick Quality Control of Concrete Block Pavers In Australia. In: THE FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE BLOCK PAVING. **Proceedings...** Tel-Aviv, Israel, pp. 55-64, 1996

INTERPAVI, Pavimentação Intertravada. **Conteúdo Técnico**. Disponível em: <<http://www.interpavi.com.br/brazil/tecnico.htm>>. Acesso em: 23 set. 2016.

JÚNIOR, A. F. **Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural**. 2000. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 703-711. 2003.

KOENDERS, E. A. B.; PEPE, M.; MARTINELLI, E. Compressive strength and hydration processes of concrete with recycled aggregates. **Cement and Concrete Research**. v. 56, p 203–212. 2014.

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

KUMAR, R. Influence of recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste (CDW) on abrasion resistance of pavement concrete. **Construction and Building Materials**. v. 142, p 248–255. 2017.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados resíduos de construção e demolição**. 2001. 289 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

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

LOTFI, S.; EGGIMANN, M.; WAGNER, E.; MRÓZ, R.; DEJA, J. Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology. **Construction and Building Materials**. v. 95, p 243–256. 2015.

LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L, M. Normas técnicas e caracterização tecnológica dos agregados. In: _____. **Manual de Agregados para Construção Civil**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. p. 83-99.

MAURY, M. B.; BLUMENSCHNEIN, R, N. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília, v. 3, n.1, p. 75-96, jan./jun. 2012.

MARCHAND, J.; HORNAIN, H.; DIAMOND, S.; PIGEON, M.; GUIRAUD, H. The microstructure of dry concrete products. **Cement and Concrete Research**. v. 26, n. 3, p 427–438. 1996.

MARCHIONI, M. L.; SILVA, C. O. **Pavimento Intertravado Permeável** - Melhores Práticas. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 2010. 24p.

MARCHIONI, M. L. **Desenvolvimento de técnicas para caracterização de concreto seco para peças de concreto para pavimentação intertravada**. 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

MARCHIONI, M. L.; LYRA, J.; PILEGGI, R.; PEREIRA, R. L.; OLIVEIRA, C. Foundry Sand for Manufacturing Paving Units. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE BLOCK PAVING, 10., 2012, Shanghai. **Proceedings...** Shanghai, 2012. p. 24-26.

MARQUES NETO, J. C. **Estudo da Gestão Municipal dos Resíduos de Construção e Demolição na Bacia Hidrográfica do Turvo Grande (UGRHI-15)**. 2009. 629 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MASHALY, A. O.; EL-KALIOUBY, B. A.; SHALABY, B. N.; EL-GOHALY, A. M.; RASHWAN, M. A. Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks. **Journal of Cleaner Production**, v. 112. 2015. p. 731-741.

MEHTA P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO**. Microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo, IBRACON, 2014.

MINDES, S.; YOUNG, J. F. **Concrete**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1981.

MOOSHER, L. **Utilização de resíduos sólidos de fundição como matérias-primas para fabricação de blocos de concreto para pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

MORETTI, J. P. **Estudo de viabilidade técnica da utilização da ACBC e do RCC na composição de concretos**. 2014. 158 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

MOTA, M. H. A. **Concreto seco com incorporação de cinzas de madeira de algaroba (prosopis juliflora) moldado sobre pressão**. 2014, 122p. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), UFPE, Caruaru, 2014.

MULLER, R. M. **Avaliação de Transmissão de Esforços em Pavimentos Intertravados de Blocos de Concreto**. 2005. 234f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

NASCIMENTO, M. V. A. **Estudo de blocos intertravados de concreto para pavimentação com incorporação de resíduo do polimento do porcelanato**. 2016. 96 f. Dissertação (Mestrado em Materiais e Componentes da Construção Civil) – Centro Acadêmico do Agreste – Núcleo de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2016.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p. Tradução: Ruy Alberto Cremoni.

EI NOUHY, H. A. Properties of paving units incorporating slag cement. **Housing and Building National Research Center**. v. 9, p 41–48. 2013.

OLIVEIRA, A. L. **Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação**. 2004. 296 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

OTT, J.; ANDREAS, A. B. Hi-Tec Solutions to Molding Problems Encountered in the Manufacture of "Zero Slump" Concrete Products. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE BLOCK PAVING, 8., 2006, San Francisco. **Proceedings...** San Francisco, 2006.

ÖZALP, F.; YILMAZ, H. D.; KARA, M.; KAYA, Ö.; SAHIN, A. Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes. **Construction and Building Materials**, v. 110. 2016. p. 17-23.

PENTEADO, C. S. G.; CARVALHO, E. Viviane de; LINTZ, R. C. C. LAFHAJ, Z. Reusing ceramic tile polishing waste in paving block manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 112. 2016. p. 514-520.

PINTO, T. P. **Metodologia para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana**. 1999. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

PIROLA, F. C. **Contribuição para o estudo de concreto seco utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação de 50MPa**. 2011. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

PURWANTO, Y. A. P. Testing of Concrete Paving Blocks: the BS EN 1338:2003. **British and European Standard Code**. Tahun, v. 29 n. 3. 2008.

ROCCO, C.; GUINEA, G. V.; PLANAS, J.; ELICES, M. Experimental analysis of rupture mechanisms in the Brazilian test. **Proceedings FRAMCOS**, p. 121-130. 1998.

ROCCO, C.; GUINEA, G. V.; PLANAS, J.; ELICES, M. Review of the splitting test standards from a fracture mechanics point of view. **Cement and Concrete Research**. v. 31, n. 3, p. 73–82. 2001.

RODRIGUES, P. P. F. **Fabricação de blocos pré-moldados de concreto para pavimentação** – Prática recomendada. 2ª ed. São Paulo, ABCP, 1995a, 15p.

ROS, S.; SHIMA, H. Relationship between splitting tensile strength and compressive strength of concrete at early age with different types of cements and curing temperature histories. **Concrete engineering annual paper**. v. 35, n. 1, p 427–432. 2013.

SADEK, D. M.; EL NOUGHY, H. A. Properties of paving units incorporating crushed ceramic. **HBRC Journal**, v. 10, p. 198-205, 2014.

SADEK, D. M.; EL-ATTAR, M. M.; ALI, A. M. Physico-mechanical and durability characteristics of concrete paving blocks incorporating cement kiln dust. **Construction and Building Materials**, v. 157. 2017. p. 300-312.

SAID, I.; MISSAOUI, A.; LAFHAJ, Z. Reuse of Tunisian marine sediments in paving blocks: factory scale experiment. **Journal of Cleaner Production**, v. 102, p. 66-77, 2015.

SANTOS, C. Rossi dos. **Estudo da utilização de rejeitos de carvão na fabricação de blocos de concreto para pavimentação em substituição ao agregado miúdo natural**.

2012. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SANTOS, C. R.; AMARAL FILHO, J. R.; TUBINO, R. M. C.; SCHNEIDER, I. A. H. Use of Coal Waste as Fine Aggregates in Concrete Paving Blocks. **Geomaterials**, v. 3, n. 2, p. 54-59, 2013.

SANTOS, V. R. Ferreira dos. **Análise do desempenho de pisos táteis, intertravados, produzidos com agregados de resíduos de construção civil – RCC e fibras de aço**. 2014. 116 f. Dissertação (Mestrado Tecnologia) – Faculdade de Tecnologia – Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2014.

SAMIELE, D. **Aproveitamento de resíduos de concreto na confecção de peças para pavimento intertravado de concreto**. 2010. 119 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

SBRIGHI NETO, C. Agregados naturais, britados e artificiais para concreto. In: _____. **CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011. Editor Geraldo C. Isaia, v. 1, p. 233-260.

SGORLON, J. G. **Utilização de resíduos da indústria galvanotécnica no desenvolvimento e fabricação de blocos de concreto para pavimentação**. 2014. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2014.

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

TAVARES, C. R. G.; FRANCO, J. Production of Concrete Paving Blocks (CPB) Utilising Electroplating Residues – Evaluation of Mechanical and Micro-Structural Properties. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 90, p. 1092–1101. 2012.

TAVEIRA, A. F. S. **Avaliação da utilização do agregado de concreto reciclado (ACR) em substituição ao agregado miúdo na fabricação de argamassas e peças de concreto para pavimentação**. 2010. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2010.

THOMAZ, E. C. S. **Notas de aula: Ensaio de compressão diametral**. Disponível em: <<http://aquarius.ime.ub.br/~webde2/prof/ethomaz/>>. Acesso em: 1 outubro 2016.

Turkish Standards Institution (TSE). **TS EN 197-1: Cement Part 1 - Compositions and conformity criteria for common cements**. Ankara, Turkey; 2005. 27p.

Turkish Standards Institution (TSE). **TS 2824 EN 1338: Concrete paving blocks – Requirements and test methods**. Ankara, Turkey, 2009. 62p.

UYGUNOGLU, T.; TOPCU, I. B.; GENCEL, O.; BROSTOW, W. The effect of fly ash content and types of aggregates on the properties of pre-fabricated concrete interlocking blocks (PCIBs). **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 180-187, 2012.

VIEIRA, A. P. N. B. **Viabilidade técnica da fabricação de compósito utilizando fibra de pneu na fabricação de blocos intertravado**. 2014. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

YANG, H.; XIA, J.; THOMPSON, J. R.; FLOWER, R. J. Urban construction and demolition waste and landfill failure in Shenzhen, China. **Waste Management**. v. 63, p 393–396. 2017.

YANIK, K. **Report: global demand for aggregates to rise**. Disponível em: <http://www.pitandquarry.com/report-global-demand-for-aggregates-to-rise/>. Acesso em 12 dez. 2016.

ZAIN, M. F. M.; MAHMUD, H. B.; ILHAM, A.; FAIZAL, M. Prediction of splitting tensile strength of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 32, n. 8, p 1251–1258. 2002.

ANEXO

RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO OBTIDOS NA FÁBRICA

Empresa GLASSER PISOS E PRE MOLDADOS LTDA

RGRelEP2

Data 08/06/17

Relatório de Ensaio

Uop 1

Lote 33094

Data 28/03/2017

Hora 10:39:58

Máquina J

Piso LOTE 33094
PADRÃO

TIPC I			IF
NOMINAL(mm)			
c	l	e	
200,0	100,0	60,0	3,3

Produto SQ-6 SP-NAT PISO SQ 06 CM NATURAL SPACE 35 MPA Total Produzido 122,200

fpk (MPa)	0,0	AREIA	0,700	PO DE PEDRA	0,595
Traço:	TRACO SQ-6	CIMENTO	0,220		
		PEDRISCO	0,292		

Data Ruptura 30/03/2017 Idade 2 dias

Seq	Medida Real(mm)	Índice de Forma (mm)	Carga (N)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)	Fator Multip. "p" 0,95
	c l e	c/e				
1	200,0 100,0 58,0	3,4	180442,36	5657,000	30,3	Coef. Student 0,883
2	200,0 101,0 59,0	3,4	186326,35	5657,000	31,3	
3	200,0 100,0 58,0	3,4	172597,04	5657,000	29,0	Fpm 29,4 (MPa)
4	200,0 100,0 60,0	3,3	186326,35	5657,000	31,3	Sd 1,458
5	200,0 100,0 60,0	3,3	178481,03	5657,000	30,0	Fpk 28,1 (MPa)
6	200,0 101,0 59,0	3,4	158867,73	5657,000	26,7	
7	200,0 101,0 60,0	3,3	168674,38	5657,000	28,3	
8	200,0 101,0 60,0	3,3	176519,70	5657,000	29,6	
9	200,0 100,0 60,0	3,3	168674,38	5657,000	28,3	
10	199,0 100,0 58,0	3,4	172597,04	5657,000	29,0	
Media	2,576					

Data Ruptura 25/04/2017 Idade 28 dias

Seq	Medida Real(mm)	Índice de Forma (mm)	Carga (N)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)	Fator Multip. "p" 0,95
	c l e	c/e				
1	200,0 100,0 59,0	3,4	253011,57	5657,000	42,5	Coef. Student 0,883
2	200,0 100,0 59,0	3,4	223591,62	5657,000	37,5	
3	199,0 100,0 60,0	3,3	243204,92	5657,000	40,8	Fpm 39,3 (MPa)
4	198,0 100,0 60,0	3,3	225552,95	5657,000	37,9	Sd 1,682
5	199,0 100,0 60,0	3,3	239282,26	5657,000	40,2	Fpk 37,8 (MPa)
6	200,0 101,0 58,0	3,4	227514,28	5657,000	38,2	
7	200,0 101,0 58,0	3,4	223591,62	5657,000	37,5	
8	200,0 100,0 59,0	3,4	227514,28	5657,000	38,2	
9	200,0 100,0 59,0	3,4	237320,93	5657,000	39,9	
10	199,0 100,0 60,0	3,3	237320,93	5657,000	39,9	
Media	2,524					

Legenda:

(IF) Índice de Forma => Relação entre o comprimento e a espessura da peça de concreto

(c) Comprimento

(l) Largura

(e) Espessura

(MPa) Megapascals

Empresa GLASSER PISOS E PRE MOLDADOS

Relatório de Ensaio

Uop 1

Lote 33095

RGRRelEP2

Data 08/06/17

Máquina J

Data 03/04/2017

Hora 10:32:47

Piso 33095 TESTE 10 %
--

TIPC I			
NOMINAL(mm)			
c	l	e	IF
200,0	100,0	60,0	3,3

Produto SQ-6 SP-NAT **PISO** SQ 06 CM NATURAL SPACE 35 MPA **Total Produzido** 7,200

fpk (MPa)	0,0	AREIA	0,317	PO DE PEDRA	0,307
Traço:	TRACO DIGITADO	CIMENTO	0,112		
		PEDRISCO	0,144		

Data Ruptura 06/04/2017 Idade 3 dias

Seq	Medida Real(mm)	Índice de Forma (mm)	Carga (N)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)	Fator Multip. "p" 0,95
	c l e	c/e				
1	198,0 100,0 59,0	3,4	205939,65	5657,000	34,6	Coef. Student 0,883 Fpm 32,0 (MPa) Sd 2,653 Fpk 29,7 (MPa)
2	199,0 101,0 60,0	3,3	170635,71	5657,000	28,7	
3	200,0 100,0 60,0	3,3	168674,38	5657,000	28,3	
4	200,0 101,0 61,0	3,3	176519,70	5657,000	29,6	
5	200,0 100,0 59,0	3,4	186326,35	5657,000	31,3	
6	200,0 100,0 61,0	3,3	196133,00	5657,000	32,9	
7	200,0 100,0 60,0	3,3	192210,34	5657,000	32,3	
8	199,0 100,0 60,0	3,3	196133,00	5657,000	32,9	
9	198,0 101,0 60,0	3,3	196133,00	5657,000	32,9	
10	199,0 100,0 60,0	3,3	217707,63	5657,000	36,6	
Media		2,622				

Data Ruptura 01/05/2017 Idade 28 dias

Seq	Medida Real(mm)	Índice de Forma (mm)	Carga (N)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)	Fator Multip. "p" 0,95
	c l e	c/e				
1	200,0 99,0 59,0	3,4	209862,31	5657,000	35,2	Coef. Student 0,883 Fpm 35,8 (MPa) Sd 0,827 Fpk 35,1 (MPa)
2	200,0 100,0 59,0	3,4	210842,98	5657,000	35,4	
3	200,0 100,0 60,0	3,3	208881,65	5657,000	35,1	
4	200,0 100,0 60,0	3,3	207900,98	5657,000	34,9	
5	199,0 99,0 60,0	3,3	219668,96	5657,000	36,9	
6	199,0 98,0 59,0	3,4	221630,29	5657,000	37,2	
7	200,0 100,0 61,0	3,3	209862,31	5657,000	35,2	
8	200,0 100,0 61,0	3,3	211823,64	5657,000	35,6	
9	199,0 100,0 60,0	3,3	213784,97	5657,000	35,9	
10	200,0 100,0 61,0	3,3	217707,63	5657,000	36,6	
Media		2,609				

Legenda:

(IF) Índice de Forma => Relação entre o comprimento e a espessura da peça de concreto

(c) Comprimento

(l) Largura

(e) Espessura

(MPa) Megapascals

Empresa GLASSER PISOS E PRE MOLDADOS

RGRreIEP2

Data 08/06/17

Relatório de EnsaioUop 1
Máquina J

Lote 33096

Data 03/04/2017

Hora 10:30:08

Piso 33096 TESTE 20 %

TIPC I		
NOMINAL(mm)		
c	l	e
200,0	100,0	60,0
IF		
3,3		

Produto SQ-6 SP-NAT PISO SQ 06 CM NATURAL SPACE 35 MPA Total Produzido 7,000

fpk (MPa)	0,0	AREIA	0,274	PO DE PEDRA	0,301
Traço:	TRACO DIGITADO	CIMENTO	0,112		
		PEDRISCO	0,161		

Data Ruptura 06/04/2017 Idade 3 dias

Seq	Medida Real(mm) c l e	Índice de Forma (mm) c/e	Carga (N)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)	Fator Multip. "p" 0,95
1	200,0 100,0 60,0	3,3	207900,98	5657,000	34,9	Coef. Student 0,883 Fpm 31,3 (MPa) Sd 3,050 Fpk 28,6 (MPa)
2	200,0 100,0 61,0	3,3	166713,05	5657,000	28,0	
3	200,0 101,0 60,0	3,3	164751,72	5657,000	27,7	
4	200,0 100,0 60,0	3,3	176519,70	5657,000	29,6	
5	200,0 100,0 61,0	3,3	215746,30	5657,000	36,2	
6	200,0 100,0 59,0	3,4	178481,03	5657,000	30,0	
7	200,0 101,0 61,0	3,3	174558,37	5657,000	29,3	
8	200,0 100,0 60,0	3,3	196133,00	5657,000	32,9	
9	200,0 100,0 60,0	3,3	180442,36	5657,000	30,3	
10	200,0 100,0 60,0	3,3	202016,99	5657,000	33,9	
Media		2,641				

Data Ruptura 01/05/2017 Idade 28 dias

Seq	Medida Real(mm) c l e	Índice de Forma (mm) c/e	Carga (N)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)	Fator Multip. "p" 0,95
1	200,0 100,0 60,0	3,3	217707,63	5657,000	36,6	Coef. Student 0,883 Fpm 36,7 (MPa) Sd 1,121 Fpk 35,7 (MPa)
2	200,0 100,0 60,0	3,3	210842,98	5657,000	35,4	
3	200,0 100,0 59,0	3,4	209862,31	5657,000	35,2	
4	200,0 100,0 58,0	3,4	211823,64	5657,000	35,6	
5	199,0 100,0 61,0	3,3	223591,62	5657,000	37,5	
6	200,0 99,0 61,0	3,3	219668,96	5657,000	36,9	
7	199,0 100,0 61,0	3,3	221630,29	5657,000	37,2	
8	199,0 99,0 60,0	3,3	219668,96	5657,000	36,9	
9	199,0 99,0 60,0	3,3	219668,96	5657,000	36,9	
10	200,0 100,0 61,0	3,3	231436,94	5657,000	38,9	
Media		2,622				

Legenda:

(IF) Índice de Forma => Relação entre o comprimento e a espessura da peça de concreto

(c) Comprimento

(l) Largura

(e) Espessura

(MPa) Megapascals

Empresa GLASSER PISOS E PRE MOLDADOS LTDA

RGRRelEP2

Data 08/06/17

Relatório de EnsaioUop 1
Máquina J

Lote 33097

Data 03/04/2017

Hora 10:39:11

Piso 33097 TESTE 30 %

TIPC I			I
NOMINAL(mm)			IF
c	l	e	IF
200,0	100,0	60,0	3,3

Produto SQ-6 SP-NAT PISO SQ 06 CM NATURAL SPACE 35 MPA Total Produzido 7,200

fpk (MPa)	0,0	AREIA	0,245	PO DE PEDRA	0,303
Traço:	TRACO DIGITADO	CIMENTO	0,111		
		PEDRISCO	0,149		

Data Ruptura 06/04/2017 Idade 3 dias

Seq	Medida Real(mm)	Indice de Forma (mm)	Carga (N)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)	Fator Multip. "p" 0,95
	c l e	c/e				
1	200,0 100,0 61,0	3,3	192210,34	5657,000	32,3	Coef. Student 0,883 Fpm 31,3 (MPa) Sd 1,481 Fpk 29,9 (MPa)
2	200,0 100,0 61,0	3,3	176519,70	5657,000	29,6	
3	200,0 100,0 60,0	3,3	180442,36	5657,000	30,3	
4	200,0 100,0 60,0	3,3	172597,04	5657,000	29,0	
5	200,0 100,0 62,0	3,2	186326,35	5657,000	31,3	
6	200,0 100,0 61,0	3,3	194171,67	5657,000	32,6	
7	200,0 100,0 60,0	3,3	188287,68	5657,000	31,6	
8	200,0 100,0 59,0	3,4	196133,00	5657,000	32,9	
9	200,0 100,0 60,0	3,3	178481,03	5657,000	30,0	
10	200,0 100,0 60,0	3,3	196133,00	5657,000	32,9	
Media		2,655				

Data Ruptura 01/05/2017 Idade 28 dias

Seq	Medida Real(mm)	Indice de Forma (mm)	Carga (N)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)	Fator Multip. "p" 0,95
	c l e	c/e				
1	200,0 99,0 60,0	3,3	209862,31	5657,000	35,2	Coef. Student 0,883 Fpm 34,6 (MPa) Sd 0,715 Fpk 34,0 (MPa)
2	200,0 99,0 59,0	3,4	203978,32	5657,000	34,3	
3	200,0 100,0 59,0	3,4	202016,99	5657,000	33,9	
4	200,0 100,0 61,0	3,3	208881,65	5657,000	35,1	
5	199,0 100,0 59,0	3,4	199075,00	5657,000	33,4	
6	198,0 99,0 61,0	3,2	202997,66	5657,000	34,1	
7	199,0 100,0 60,0	3,3	209862,31	5657,000	35,2	
8	200,0 100,0 60,0	3,3	207900,98	5657,000	34,9	
9	200,0 100,0 61,0	3,3	203978,32	5657,000	34,3	
10	198,0 100,0 61,0	3,2	211823,64	5657,000	35,6	
Media		2,645				

Legenda:

(IF) Índice de Forma => Relação entre o comprimento e a espessura da peça de concreto

(c) Comprimento

(l) Largura

(e) Espessura

(MPa) Megapascals

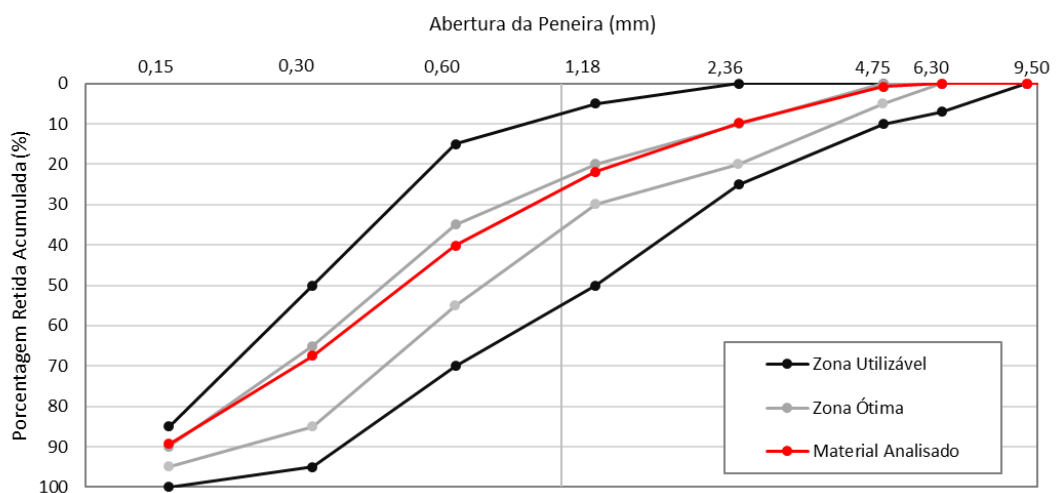
APÊNDICE

AGREGADOS NÃO EMPREGADOS NA PRODUÇÃO DAS PEÇAS

AREIA RECICLADA DE RESÍDUO MISTO COLETADA EM SÃO CARLOS-SP

As curvas granulométricas obtidas para a areia reciclada coletada em São Carlos-SP, assim como os limites aceitáveis e limites ótimos de utilização propostos pela ABNT NBR 7211: 2009, são apresentados pela Figura 61. Os resultados dos ensaios realizados com base na ABNT NBR 248: 2003 são apresentados na Tabela 29.

Figura 61 - Curvas granulométricas da areia de resíduo misto



Fonte: Autor (2017)

Tabela 29 - Granulometria da areia de resíduo misto

Abertura da peneira (mm)	Massa retida média (%)	Massa retida acumulada média (%)
4,75	1	1
2,36	9	10
1,18	12	22
0,6	18	40
0,3	27	67
0,15	22	89
Fundo	11	100
DMC *(mm)		2,36
MF **		2,29

* Dimensão máxima característica

** Módulo de finura

De acordo com a ABNT NBR 7211: 2009, a areia reciclada obtida em São Carlos-SP foi enquadrada na **zona ótima de utilização**.

Os valores médios obtidos nos ensaios de determinação do teor de umidade total, da massa unitária, da absorção de água, massa específica e teor de material pulverulento para a areia de resíduo misto serão expostos na Tabela 30.

Tabela 30 - Demais propriedades da areia de resíduo misto

Norma ABNT	Propriedade avaliada		Areia de São Carlos
-	Teor de umidade total (%)		8,87
NBR NM 45: 2006	Massa unitária (kg/m ³)	Estado solto	1291,50
		Estado compactado	1416,93
	Volume de vazios (%)	Estado solto	38,92
		Estado compactado	32,99
NBR NM 30: 2001	Absorção de água (%)		7,55
NBR NM 52: 2002	Massa específica aparente no estado seco (g/cm ³)		2,09
	Massa específica na condição SSS * (g/cm ³)		2,23
	Massa específica absoluta (g/cm ³)		2,43
NBR NM 46: 2003	Teor de material pulverulento (%)		7,58

Quanto ao teor de material pulverulento, ambas as areias recicladas apresentam valores bem superiores ao limite de 3% proposto pela ABNT NBR 7211: 2009. Porém, quando comparado ao limite de 20% estabelecido pela ABNT NBR 15116: 2004 para produção de concretos sem função estrutural, esse mesmo teor (7,58%) é considerado satisfatório. Além disso, após os ensaios realizados com a segunda areia reciclada, verificou-se que a quantidade de finos presentes na areia mista de São Carlos-SP não foi tão superior, como era esperado. Quanto à absorção de água, essa também atendeu ao limite de 17% proposto pela ABNT NBR 15116: 2004.

Para a massa específica, o valor obtido apresentou-se maior que o da areia de resíduo cinza utilizada neste trabalho. O mesmo aconteceu para a massa unitária. Embora seja sabido que a presença de cerâmica vermelha no agregado reciclado o torna mais poroso, tal como explicado no Capítulo 4, os resultados obtidos para a areia reciclada mista coletada em São Carlos não indicaram tal comportamento. Quando comparada à areia de resíduo cinza de São José do Rio Preto-SP, os maiores valores para massa unitária, massa específica, e também absorção de água, indicam um material bem caracterizado e que se fosse empregado na fabricação das PCP poderia sim fornecer resultados tão satisfatórios quanto o material composto predominantemente por resíduos de argamassa e concreto.

O argumento relacionado à maior presença de grãos anidros de cimento no resíduo cinza (que também justificou a mudança do agregado reciclado) continua sendo válido. No

entanto, para descobrir se areia de resíduo misto influenciaria positiva ou negativamente nas propriedades das peças e se essa influência seria maior ou menor que a da areia cinza, sugere-se para trabalhos futuros que ambas sejam utilizadas e seus resultados comparados.

PEDRISCO DE RESÍDUO CINZA COLETADO EM SÃO JOSÉ DO RIO PRETO-SP

A curva granulométrica do pedrisco reciclado coletado em São José do Rio Preto-SP é apresentada pela Figura 62. Os resultados da análise com base na ABNT NBR 248: 2003 são apresentados pela Tabela 31.

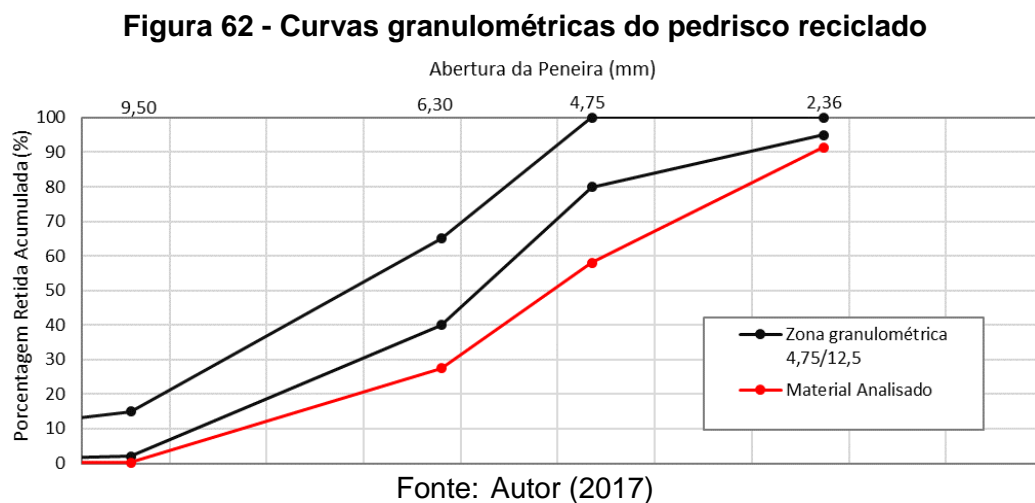


Tabela 31 - Granulometria do pedrisco reciclado

Abertura da peneira (mm)	Massa retida média (%)	Massa retida acumulada média (%)
12,5	0	0
9,5	0	0
6,3	27	27
4,75	31	58
2,36	33	91
1,18	0	91
Fundo	9	100
DMC *		9,5
MF **		5,43

* Dimensão máxima característica

** Módulo de finura

Segundo à ABNT NBR 7211: 2009, o pedrisco reciclado não se enquadra na Zona granulométrica 4,75/12,5 estando abaixo da mesma.

A Tabela 32 traz os valores médios obtidos nos ensaios de determinação do teor de umidade total, da massa unitária, absorção de água, massa específica e do teor de material pulverulento para o pedrisco reciclado coletado em São José do Rio Preto-SP.

Tabela 32 - Demais propriedades do pedrisco reciclado

Norma ABNT	Propriedade avaliada		Valor médio
-	Teor de umidade total (%)		5,32
NBR NM 45: 2006	Massa unitária (kg/m ³)	Estado solto	1212,20
		Estado compactado	1304,71
	Volume de vazios (%)	Estado solto	55,43
		Estado compactado	52,03
NBR NM 53: 2009	Absorção de água (%)		6,09
	Massa específica aparente no estado seco (g/cm ³)		2,72
	Massa específica na condição SSS * (g/cm ³)		2,48
	Massa específica aparente (g/cm ³)		2,33
NBR NM 46: 2003	Teor de material pulverulento (%)		2,03

* Saturado superfície seca

O teor de material fino ou pulverulento obtido para o pedrisco reciclado corresponde a cerca do dobro do limite estipulado pela ABNT NBR 7211: 2009 para agregados graúdos (1%). Mas diante do limite de 10% estabelecido pela ABNT NBR 15116: 2004 para produção de concretos sem função estrutural, esse mesmo teor (2,03%) é considerado satisfatório.

Sua absorção de água também atendeu ao limite de 7% proposto pela ABNT NBR 15116: 2004.