

Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

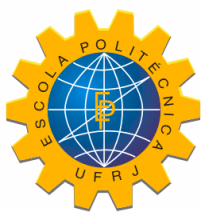
ANÁLISE TÉCNICA DO USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) NA PRODUÇÃO DE CONCRETO SECO PARA PISO INTERTRAVADO

Clarice Sipres

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, com parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Oscar A. Mendoza Reales

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2019



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

ANÁLISE TÉCNICA DO USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) NA PRODUÇÃO DE CONCRETO SECO PARA PISO INTERTRAVADO

Clarice Sipres

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, com parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Oscar A. Mendoza Reales

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2019

**ANÁLISE TÉCNICA DO USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO (RCD) NA PRODUÇÃO DE CONCRETO SECO PARA PISO
INTERTRAVADO**

Clarice Sipres

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

Prof. Oscar A. Mendoza Reales, D.Sc.,
Orientador

Prof. Sandra Oda, D.Sc.

Prof. Elaine Garrido Vazquez, D.Sc.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2019

Sipres, Clarice

Análise Técnica do Uso de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) na Produção de Concreto Seco para Piso Intertravado / Clarice Sipres, – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2019.

x, 56 p.: 29,7 cm.

Orientador: Oscar Aurelio Mendoza Reales

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Engenharia Civil, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 53-56

1. Introdução. 2. Resíduos de Construção e Demolição. 3. Pavimento Intertravado. 4. Materiais e Métodos. 5. Apresentação e Discussão de Resultados. 6. Considerações Finais.

I. Aurelio Mendoza Reales, Oscar; II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Título

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica - UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

ANÁLISE TÉCNICA DO USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) NA PRODUÇÃO DE CONCRETO SECO PARA PISO INTERTRAVADO

Clarice Sipres

Fevereiro de 2019

Orientador: Oscar A. Mendoza Reales

Curso: Engenharia Civil

A cadeia produtiva da construção civil é uma das principais consumidoras de recursos naturais e matérias primas na economia. Além disso, é também responsável pela geração e deposição irregular de uma grande parcela dos resíduos sólidos urbanos no meio ambiente, causando por um enorme impacto ambiental. Nesse contexto, a reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) aparece como uma possibilidade de redução dos impactos causados pela construção civil, apresentando diversos benefícios tais como a redução do uso de recursos naturais, de áreas voltadas para o descarte e a diminuição da poluição. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a utilização de RCD na produção de concreto seco para pisos intertravados. Analisou-se a granulometria, massa específica e absorção dos agregados e, em seguida, três traços foram elaborados: um traço de referência, com areia e pó de pedra, e outros dois traços contendo RCD em substituição ao pó de pedra. A influência do uso do RCD foi avaliada através de ensaios de resistência à compressão e de absorção de água no concreto endurecido para a idade de 28 dias. Os resultados mostraram que a substituição de agregado miúdo por RCD em blocos de concreto para piso intertravado constitui uma alternativa tecnicamente viável e benéfica ao meio ambiente.

Palavras-chave: Resíduos de Construção e Demolição, Blocos de concreto, Pavimento Intertravado, Agregados Reciclados, Sustentabilidade.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer

TECHNICAL ANALYSIS OF THE USE OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE (CDW) IN THE PRODUCTION OF DRY CONCRETE FOR INTERLOCKING PAVEMENT

Clarice Sipres

February/2019

Advisor: Oscar A. Reales Mendoza

Course: Civil Engineering

The productive chain of construction is one of the main consumers of natural resources and raw materials in the economy. In addition, it is also responsible for the generation and irregular disposal of a large amount of urban solid waste in the environment, causing a huge environmental impact. In this context, recycling of construction and demolition waste (CDW) appears as a possibility to reduce the impacts caused by the construction industry, presenting several benefits such as reduction of the use of natural resources, areas for disposal and pollution. The present study aims to evaluate the use of CDW in the production of dry concrete for interlocking blocks. The aggregate particle size distribution, apparent specific gravity and absorption were analyzed and afterwards three concrete mixtures of dry concrete were produced: a reference mixture, with natural sand and powdered stone, and two other traces containing CDW in substitution of the powdered stone. The influence of CDW was evaluated through tests of compressive strength and water absorption in the hardened concrete at the age of 28 days. The results showed that the substitution of fine aggregates by CDW in concrete blocks for interlocking pavement is a technically viable and environmentally beneficial alternative.

Keywords: Construction and Demolition Waste, Concrete blocks; Interlocking Pavement; Recycled Aggregates, Sustainability.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	<i>APRESENTAÇÃO DO TEMA</i>	1
1.2	<i>JUSTIFICATIVA</i>	2
1.3	<i>OBJETIVO</i>	2
1.4	<i>METODOLOGIA</i>	3
1.5	<i>ESTRUTURA DA MONOGRAFIA</i>	3
2	RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	5
2.1	<i>DEFINIÇÃO</i>	5
2.2	<i>CLASSIFICAÇÃO</i>	5
2.3	<i>GERAÇÃO DE RESÍDUOS</i>	7
2.4	<i>COMPOSIÇÃO DOS RCD</i>	9
2.5	<i>IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELO RCD</i>	10
2.6	<i>PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS DE RCD</i>	12
3	PAVIMENTO INTERTRAVADO	14
3.1	<i>DEFINIÇÃO</i>	14
3.2	<i>DOSAGEM</i>	15
3.3	<i>PROCESSO PRODUTIVO</i>	17
3.4	<i>PROPRIEDADES REQUERIDAS</i>	19
3.5	<i>USO DE RCD EM BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO</i>	20
4	MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1	<i>PROGRAMA EXPERIMENTAL</i>	23
4.2	<i>MATERIAIS</i>	24
4.3	<i>CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS</i>	26
4.4	<i>DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA DO CONCRETO SECO</i>	31
4.4	<i>CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO</i>	34
5	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	37
5.1	<i>CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS</i>	37
5.2	<i>DOSAGEM DO CONCRETO SECO</i>	41
5.3	<i>CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO</i>	42
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PARTICIPAÇÃO DAS REGIÕES DO PAÍS NO TOTAL DE RSU COLETADO (ABRELPE, 2017)	7
FIGURA 2 - COLETA DE RCD NAS CINCO REGIÕES DO PAÍS (ADAPTADO DE ABRELPE, 2017).....	9
FIGURA 3 - SEÇÃO TÍPICA - PAVIMENTOS INTERTRAVADOS (ACERVO ABCP APUD MARCHIONI, 2012)	14
FIGURA 4 - SEQUÊNCIA BÁSICA DE FUNCIONAMENTO DE UMA VIBRO-PRENSA AUTOMÁTICA (SOUSA, 2001 APUD MEDEIROS, 1993).....	18
FIGURA 5 - PROGRAMA EXPERIMENTAL	23
FIGURA 6 - IMPLOÇÃO DA ALA SUL DO HOSPITAL UNIVERSITÁRIO CLEMENTINO FRAGA FILHO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (HUCFF/UFRJ) (HTTP://FARM6.STATIC.FLICKR.COM/5088/5274130177_42140E45A0_Z.JPG,%202010.)	25
FIGURA 7 - RESÍDUOS ORIUNDOS DA IMPLOÇÃO DO HOSPITAL UNIVERSITÁRIO CLEMENTINO FRAGA FILHO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (HUCFF/UFRJ) (HTTPS://OGLOBO.GLOBO.COM/RIO/ESCOMBROS-DE-PREDIO-IMPLODIDO-NO-HOSPITAL-DA-UFRJ-AINDA-NAO-FORAM-RECOLHIDOS-NA-ILHA-DO-FUNDAO-2801119).....	25
FIGURA 8 - AGITADOR MECÂNICO DE PENEIRAS – LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA MINERAL (LTM).....	27
FIGURA 9 – (A) AMOSTRA DE AGREGADO APÓS SER DEIXADA COBERTA COM ÁGUA POR 24 HORAS E (B) AMOSTRA DE AGREGADO SENDO SUBMETIDA À AÇÃO DE UMA SUAVE CORRENTE DE AR QUENTE.....	27
FIGURA 10 – (A) E (B) AMOSTRA DE AGREGADO APÓS A RETIRADA DO MOLDE METÁLICO, ANTES DE ATINGIR A CONDIÇÃO DE SATURADO SUPERFÍCIE SECA	28
FIGURA 11 - AGREGADO NA CONDIÇÃO DE SATURADO SUPERFÍCIE SECA	28
FIGURA 12 – (A) PESO DO FRASCO, (B) REALIZAÇÃO DA TARA DO FRASCO E (C) MEDIÇÃO DA MASSA m_1 - CONJUNTO FRASCO + AGREGADO.	29
FIGURA 13 - FRASCO PREENCHIDO COM SOLO E ÁGUA E MANTIDO SUBMERSO EM ÁGUA À TEMPERATURA AMBIENTE	30
FIGURA 14 - CONSISTÊNCIA ADEQUADA DA MISTURA DE CONCRETO SECO - PONTO DE PELOTA.....	32
FIGURA 15 - MISTURADOR PLANETÁRIO	33
FIGURA 16 – BLOCOS DE CONCRETO PRODUZIDOS NA VIBRO PRENSA (20 X 10 X 6 CM).	33
FIGURA 17 – (A) LANÇAMENTO DO CONCRETO SECO, (B) VIBRO-COMPRESSÃO DO CONCRETO E (C) DESMOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA.....	34
FIGURA 18 - ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL COM DESTAQUE PARA O USO DE PLACAS AUXILIARES.....	35
FIGURA 19 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS MÉDIAS DOS AGREGADOS NATURAIS.	37
FIGURA 20 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS MÉDIAS DOS AGREGADOS RECICLADOS.....	38
FIGURA 21 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS MÉDIAS DE TODOS OS AGREGADOS UTILIZADOS.	39
FIGURA 22 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA COMBINAÇÃO DOS AGREGADOS.	41
FIGURA 23 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO CARACTERÍSTICA ESTIMADA - FAMÍLIA DE TRAÇOS 1.	43
FIGURA 24 - ABSORÇÃO DE ÁGUA - FAMÍLIA DE TRAÇOS 1.	44

FIGURA 25 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO CARACTERÍSTICA ESTIMADA - FAMÍLIA DE TRAÇOS 2.	45
FIGURA 26 - ABSORÇÃO DE ÁGUA - FAMÍLIA DE TRAÇOS 2.	45
FIGURA 27 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO CARACTERÍSTICA ESTIMADA - FAMÍLIA DE TRAÇOS 3.	46
FIGURA 28 - ABSORÇÃO DE ÁGUA - FAMÍLIA DE TRAÇOS 3.	46
FIGURA 29 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO CARACTERÍSTICA ESTIMADA – TRAÇOS COM PÓ DE PEDRA.	47
FIGURA 30 - ABSORÇÃO DE ÁGUA – TRAÇOS COM PÓ DE PEDRA.	47
FIGURA 31 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO CARACTERÍSTICA ESTIMADA – TRAÇOS COM RCDV.	48
FIGURA 32 - ABSORÇÃO DE ÁGUA – TRAÇOS COM RCDV.	49
FIGURA 33 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO CARACTERÍSTICA ESTIMADA – TRAÇOS COM RCDC.	49
FIGURA 34 - ABSORÇÃO DE ÁGUA – TRAÇOS COM RCDC.	50

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE RCD EM ALGUNS PAÍSES (IPEA, 2012)	8
TABELA 2 - QUANTIDADE DE RCD COLETADA EM 2016 (SNIS, 2016)	9
TABELA 3 - COMPARATIVO DA COMPOSIÇÃO DOS RCD (VIEIRA; MOLIN, 2004).	10
TABELA 4 - PORCENTAGENS MÍNIMA E MÁXIMA PASSANTES NAS PENEIRAS DE ACORDO COM A NBR 7211 (ADAPTADO DE ABNT, 2009A)	31
TABELA 5 – PARÂMETROS GRANULOMÉTRICOS DOS AGREGADOS NATURAIS (DMC: DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA, MF: MÓDULO DE FINURA).	37
TABELA 6 – PARÂMETROS GRANULOMÉTRICOS DOS AGREGADOS RECICLADOS (DMC: DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA, MF: MÓDULO DE FINURA).	38
TABELA 7 – PARÂMETROS GRANULOMÉTRICOS DE TODOS AGREGADOS UTILIZADOS (DMC: DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA, MF: MÓDULO DE FINURA).....	39
TABELA 8 – ABSORÇÃO DOS AGREGADOS	40
TABELA 9 – MASSA ESPECÍFICA APARENTE DOS AGREGADOS.....	40
TABELA 10 – COMBINAÇÕES DOS AGREGADOS EM CADA MISTURA.	41
TABELA 11 – MISTURAS DE CONCRETO SECO ESTUDADAS	42

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA

O acelerado processo de industrialização e ocupação urbana tem contribuindo substancialmente para o desenvolvimento da construção civil e, conseqüentemente, para o aumento do consumo de recursos naturais e matérias primas e crescimento da geração de resíduos sólidos. Concomitantemente a isso, a disposição inadequada desses resíduos, muitas vezes depositados no meio ambiente sem nenhum tipo de tratamento prévio, tem provocado contaminações e agravado consideravelmente os problemas ambientais, sobretudo nos grandes centros urbanos (JOHN, 2000; LIMA, 2005).

A demanda por materiais no mercado da construção civil exige uma quantidade de extração de matérias primas naturais ainda maior, tendo em vista as perdas e os resíduos gerados durante o processo. Estima-se que, no Brasil, o consumo anual de agregados na produção de concretos e argamassas ultrapasse 210 milhões de toneladas. Desse modo, não é de se espantar que as reservas de muitos materiais já começaram a ficar escassas, principalmente junto aos grandes centros (JOHN, 2000). No Rio de Janeiro, por exemplo, a crescente ocupação urbana, a restrição ambiental e a disponibilidade geológica resultaram no deslocamento dos mineradores para locais cada vez mais distantes, dificultando a obtenção desses materiais (DRM/RJ, 2012; FERREIRA; SILVA, 2004).

Outro grave problema socioambiental associado à indústria da construção civil é a geração e destinação dos resíduos gerados durante o processo produtivo, os chamados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD). De modo geral, os RCD são considerados de baixa periculosidade, sendo o impacto causado sobretudo pelo grande volume gerado. Embora tenha se observado a introdução de novos modelos de gestão, novas tecnologias e novos materiais visando reduzir a geração dos RCD, eles ainda representam de 13 a 67% em massa dos resíduos sólidos urbanos (ANGULO, 2005; JOHN, 2000). No Brasil, foram coletadas cerca de 45 milhões de toneladas de RCD no ano de 2016, constituindo aproximadamente 57 % da massa total de resíduos sólidos urbanos (ABRELPE, 2017). De modo geral, os resíduos gerados na construção são decorrentes de deficiências no processo construtivo, como falhas na elaboração de projetos e na sua execução, má qualidade dos materiais empregados e desperdício durante a estocagem e o transporte (LIMA, 2005).

Todavia, apesar de não constituírem resíduos de alta periculosidade, o acúmulo de RCD em locais inadequados ao seu descarte pode levar a problemas de ordem estética, ambiental e saúde pública. Segundo a Abrelpe (2017), quase metade dos resíduos coletados em 2016

no país não foram coletados ou foram despejados em locais inadequados, totalizando mais de 29 milhões de toneladas de resíduos em lixões, aterros controlados ou que não foram recolhidos. Nenhuma dessas alternativas é aceitável, pois não possuem as medidas necessárias para o correto tratamento desses resíduos, podendo levar a problemas como a proliferação de vetores de doenças, obstrução das vias públicas e o bloqueio do tráfego de pedestres e veículos (IPEA, 2012).

1.2 JUSTIFICATIVA

Inúmeras políticas e incentivos têm sido adotados nos últimos anos para discutir a gestão dos resíduos gerados pelo setor da construção civil. Em 05 de Julho de 2002, iniciou-se a vigência da Resolução nº 307 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), a qual estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos oriundo das atividades da construção civil. Segundo a mesma, “os geradores deverão ter como objetivo prioritário a não geração de resíduos e, secundariamente, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento dos resíduos sólidos e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”.

Em meio a um cenário de crescente consumo de matérias primas, geração de resíduos e disposição inadequada dos mesmos; a reciclagem e reuso dos RCD se tornam cada vez mais relevantes no cenário socioeconômico brasileiro, já sendo confirmado o potencial de reaproveitamento e as vantagens advindas da incorporação desses resíduos em determinados produtos (SANTOS, 2008). Os trabalhos desenvolvidos por Hood (2006), Simieli *et. al.* (2007), Amadei (2011), e outros pesquisadores comprovaram a viabilidade do uso de agregados reciclados provenientes de RCD para a produção concreto para piso intertravado, mostrando que as substituições parciais dos agregados naturais pelos reciclados podem apresentar um desempenho satisfatório.

1.3 OBJETIVO

O presente trabalho tem como principal objetivo analisar a viabilidade técnica do uso de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) como agregado miúdo reciclado na substituição do pó de pedra utilizado na fabricação de concreto seco para pavimento intertravado. Para alcançar a meta central do trabalho, foram desenvolvidos objetivos secundários que contribuirão para o resultado final, como a caracterização da composição

dos resíduos de demolição provenientes de concreto, argamassas e materiais cerâmicos; o desenvolvimento de traços de concreto seco utilizando tais resíduos como agregado miúdo reciclado e, por fim, a verificação da influência da substituição do agregado miúdo comumente utilizado na indústria brasileira por agregados miúdos reciclados de RCD em ensaios de resistência à compressão e de absorção de água dos blocos de concreto para pavimentação intertravada.

1.4 METODOLOGIA

A metodologia aplicada ao presente trabalho foi dividida em três etapas: fundamentação teórica, análise experimental e apresentação e análise dos resultados.

A fundamentação teórica foi baseada em pesquisas bibliográficas, que abrangeram trabalhos acadêmicos, livros e artigos científicos considerados relevantes para a contextualização e desenvolvimento da pesquisa em questão.

A análise experimental contemplou a caracterização dos materiais, através de ensaios de composição granulométrica, massa específica aparente e absorção dos agregados; a dosagem de concretos secos produzidos com agregados convencionais e agregados miúdos proveniente de resíduos de construção e demolição, com diferentes consumos de cimento; e a caracterização do concreto no estado endurecido. A influência dos agregados reciclados foi avaliada através de ensaios de resistência à compressão e de absorção de água, observando as exigências estabelecidas nas normas brasileiras.

Por fim, a apresentação e análise dos resultados obtidos contempla comparações entre os concretos com diferentes agregados e discussão acerca da influência da substituição do agregado miúdo convencional por RCD. Dependendo dos resultados obtidos, sugestões para trabalhos futuros serão realizadas com o objetivo de contribuir para ampliar o conhecimento acerca do uso de resíduos de construção e demolição na produção de concreto para piso intertravado.

1.5 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

O presente trabalho será estruturado em 6 capítulos, que são descritos a seguir.

O primeiro capítulo consiste na introdução do tema proposto, sendo apresentadas a importância e justificativa do tema, o objetivo, a metodologia aplicada e a estrutura, com uma breve descrição de cada capítulo.

O segundo capítulo compreende uma fundamentação teórica sobre os Resíduos de Construção e Demolição, contemplando itens como sua definição, classificação, geração, composição, impactos ambientais e beneficiamento do resíduo, a fim de que este prévio conhecimento possa subsidiar o desenvolvimento da pesquisa.

O terceiro capítulo apresenta um levantamento bibliográfico acerca dos pisos intertravados de concreto, de maneira que a base teórica para a confecção do produto seja satisfatória. Desse modo, serão abordados aspectos como as características das peças de concreto, os materiais empregados na produção, a dosagem do concreto, o processo produtivo e os ensaios de controle tecnológico a serem realizados com as mesmas.

O quarto capítulo contempla o programa experimental adotado. Neste capítulo são descritos os materiais escolhidos, os métodos utilizados e os ensaios realizados para a determinação das propriedades físicas e mecânicas dos agregados e dos concretos, juntamente as normas correspondentes.

O quinto capítulo engloba os resultados obtidos no procedimento experimental e a análise dos mesmos. Inicialmente, foi realizada uma análise das características granulométricas, massa específica e absorção dos agregados. Em seguida, foi feita a análise da resistência à compressão e da capacidade de absorção de água nos concretos no estado endurecido. Esses resultados são apresentados de forma gráfica ou em tabelas de modo a facilitar a comparações dos resultados obtidos para o concreto com agregados reciclados oriundos dos RCD em relação ao concreto de referência, analisando o efeito da substituição no comportamento mecânico e na absorção dos concretos estudados.

No sexto capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho e os aspectos mais relevantes do trabalho, avaliando se o objetivo foi atingido, além de serem abordadas as propostas para trabalhos futuros e as limitações do estudo.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas que foram utilizadas para fornecer subsídios ao trabalho da autora.

2 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

2.1 DEFINIÇÃO

Segundo a resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), define-se Resíduos de Construção e Demolição (RCD) como o material

(...) proveniente de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações e fiação elétrica, comumente chamados de entulho de obra, calça ou metralha.

(CONAMA, 2002, p. 1)

De forma mais simplificada, RCD pode ser considerado todo material oriundo de atividades de construção, reformas e demolições de obras civis (VIEIRA; MOLIN, 2004).

2.2 CLASSIFICAÇÃO

Os resíduos, independentemente de sua natureza, necessitam ser classificados para que tenham o correto destino e o manuseio adequado (LEITE, 2001). No Brasil, a norma que estabelece os critérios de classificação dos resíduos sólidos é a NBR 10.004 – “Resíduos Sólidos – Classificação” (ABNT, 2004), que separa os resíduos de acordo com os seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. Segundo esta, os resíduos devem obedecer a classificação presente no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos resíduos sólidos segundo a NBR 10.004 (Adaptado de ABNT, 2004)

Classificação	Descrição
Classe I - Perigosos	Resíduos que apresentam risco à saúde pública devido as suas propriedades de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade
Classe II – Não perigosos	Classe IIA – Não inertes: resíduos que podem apresentar biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água, não se enquadrando em nenhuma nas demais classificações desta Norma.
	Classe IIB – Inertes: resíduos cujos constituintes não são solubilizados em água destilada ou deionizada a concentrações maiores que os padrões de potabilidade de água.

Os resíduos de construção e demolição constituem o material mais heterogêneo dos resíduos industriais, dificultando sua especificação. Em geral, os resíduos de construção são considerados como resíduos inertes e não perigosos, isto é, pertencentes à Classe II B segundo a NBR 10004:2004 (HOOD, 2006).

Além da NBR, também existe uma classificação definida pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), que é um órgão do governo federal de caráter consultivo e deliberativo do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) (AMADEI, 2011).

Esse Conselho estabelece critérios e normas visando a proteção ao meio ambiente, através de atos como resoluções, moções, recomendações, proposições e decisões. Foi aprovada pelo CONAMA, no dia 5 de julho de 2002, a Resolução nº 307, a qual classifica os Resíduos de Construção e Demolição e estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos mesmos, entrando em vigor no início de 2003 (AMADEI, 2011).

O RCD pode ser classificado de acordo com a Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), que divide os resíduos da construção civil em 4 classes distintas, conforme mostrado no Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação dos resíduos de construção segundo a Resolução nº 307
(Adaptado de CONAMA, 2002).

Classificação	Descrição
Classe A	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como resíduos de construção, demolição, reformas de edificações, componentes cerâmicos (blocos, tijolos, telhas, etc.), argamassa, concreto, solos provenientes de terraplanagem, entre outros.
Classe B	Resíduos recicláveis para outras finalidades, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, etc.
Classe C	Resíduos para os quais não foram criadas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que possibilite a sua reciclagem e recuperação.
Classe D	Resíduos perigosos provenientes do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleo, etc. ou materiais oriundos de demolições, reformas e reparos de locais radiológicos e instalação industriais que possam estar contaminados ou serem prejudiciais à saúde.

Outra classificação, muito usada em usinas de reciclagem, consiste na divisão dos resíduos em dois grandes grupos, de acordo com a sua cor: cinza e vermelho. Segundo Ângulo (2005), a parcela de cor cinza consiste em produtos com predominância visual de materiais à base de cimento, que podem ser empregados em calçadas, blocos de concreto e em mobiliários urbanos à base de cimento. Já a parcela de cor vermelha contempla os

materiais de construção de natureza cerâmica e podem ser empregados em atividades de pavimentação.

2.3 GERAÇÃO DE RESÍDUOS

2.3.1 Resíduos Sólidos Urbanos

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2017) divulgou uma estimativa do total de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) coletado no Brasil em seu Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil. No ano de 2017, quando a população brasileira era de 207,6 milhões de habitantes (IBGE, 2017), a geração de RSU atingiu um total anual de 78,4 milhões de toneladas no país. Em comparação com o ano anterior, observou-se um aumento de cerca de 1% na geração total de RSU no país, enquanto o crescimento populacional foi de apenas 0,77%.

A quantidade de RSU produzida no Brasil é um dado de difícil estimativa tendo em vista que existem diversas variáveis a serem consideradas, como o crescimento econômico e o populacional. Quanto mais próspero é o cenário econômico, maior será o consumo de produtos industrializados, conseqüentemente aumentando a produção de resíduos urbanos (CARVALHO, 2017). Assim, em função do maior desenvolvimento econômico e urbano, a região Sudeste configura a maior produtora de RSU do país (Figura 1), gerando 105.794 toneladas por dia no ano de 2017 (ABRELPE, 2017).

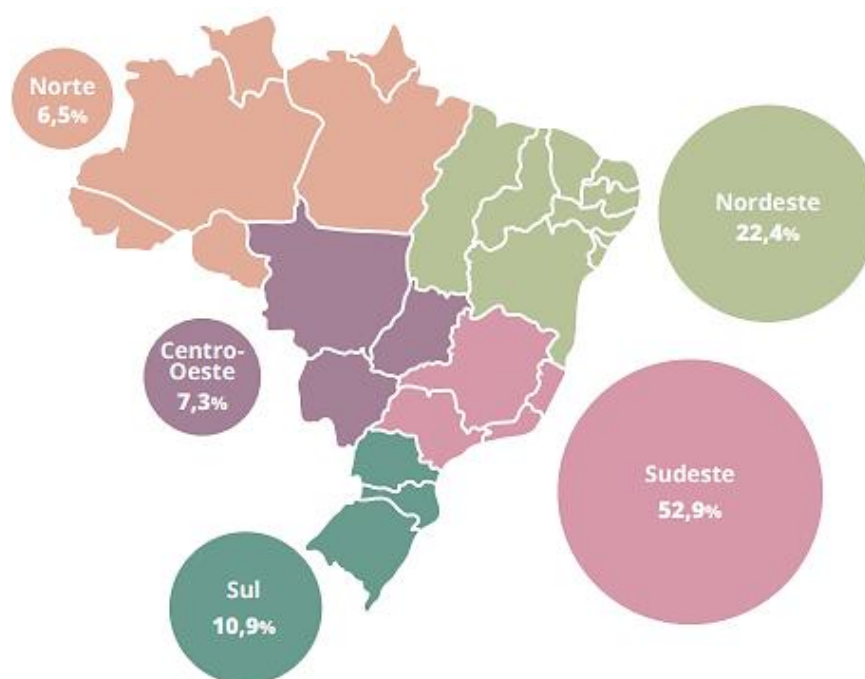


Figura 1 - Participação das regiões do país no total de RSU coletado (ABRELPE, 2017)

2.3.2 Resíduos de Construção e Demolição

No que tange a geração de resíduos de construção e demolição, é interessante, inicialmente, uma comparação entre a geração no Brasil e em outros países, como mostra a Tabela 1. Conforme discutido no item anterior, a geração de resíduos acompanha o desenvolvimento econômico e o crescimento populacional, motivo pelo qual pode-se entender porque o Brasil apresenta uma geração de resíduos de construção civil muito abaixo da de outros países como Japão, Estados Unidos, Itália e Alemanha.

Tabela 1 - Estimativa de geração de RCD em alguns países (IPEA, 2012)

Local	Quantidade anual	
	Em milhões de t/ano	Em kg/habitante/ano
Suécia	1,2 – 6	136 – 680
Holanda	12,8 – 20,2	820 – 1.300
Estados Unidos	136 – 171	463 – 584
Reino Unido	50 – 70	880 – 1.120
Bélgica	7,5 – 34,7	735 – 3.359
Dinamarca	2,3 – 10,7	440 – 2.010
Itália	35 – 40	600 – 690
Alemanha	79 – 300	963 – 3.658
Japão	99	785
Portugal	3,2 – 4,4	325 – 447
Brasil	31	230 – 760

Vale ressaltar que a variação de datas dos dados obtidos e apresentados na tabela acima é uma ressalva para sua avaliação. A geração de RCD de outros países seria sem dúvida maior em 2011, ano em que se coletou a estimativa de geração do Brasil.

Segundo a ABRELPE (2017), foram coletados cerca de 45 milhões de toneladas de RCD no país em 2017, representando em torno de 57% da massa total de resíduos sólidos urbanos gerados neste ano. A coleta de RCD nas cinco regiões do Brasil está mostrada na Figura 2, onde constata-se que a maior geradora de RCD em 2017 foi a região Sudeste, que apresentou uma média de produção diária de 64.063 toneladas de RCD.

Há de se salientar que todos os dados fornecidos pela Abrelpe (2017) abordam somente a coleta realizada pelas empresas governamentais, limitando-se aos resíduos recolhidos em logradouros públicos, tendo em vista que a coleta e disposição final destes resíduos é de responsabilidade de seu gerador (ABRELPE, 2017; BRASILEIRO; MATOS, 2015).

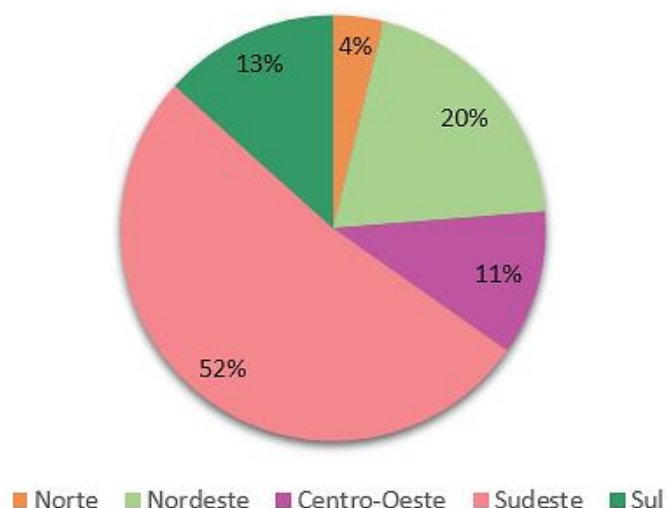


Figura 2 - Coleta de RCD nas cinco regiões do país (Adaptado de ABRELPE, 2017)

Assim, para a estimativa de geração de RCD oriundo de demolições e construções coletados por serviços privados, consultou-se o Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos, divulgado anualmente pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS (2016). No ano de 2016, 3.679 municípios participaram do diagnóstico, representando um percentual de mais de 80% da população urbana e a estimativa de coleta de RCD por origem é apresentada na Tabela 2. É importante esclarecer que estas quantidades não correspondem ao total de RCD gerados, mas apenas aos coletados.

Tabela 2 - Quantidade de RCD coletada em 2016 (SNIS, 2016)

	Pref. ou contratado por ela	Caçambeiros e autônomos contratados pelo gerador	Próprio gerador	Total
Toneladas	8.556.036	8.105.334	815.026	17.476.396
%	49%	46%	5%	100%

2.4 COMPOSIÇÃO DOS RCD

O RCD é, talvez, o mais heterogêneo dentre os resíduos industriais. A cadeia produtiva da construção civil engloba diversas atividades dentro do canteiro de obras e, conseqüentemente, o resíduo gerado no decorrer dessas atividades pode ter em sua composição diversos materiais, tais como plásticos, papel, madeiras, metais, concretos, argamassas, areia, blocos, cerâmicas, gesso, tintas, dentre outros (AMADEI, 2011; LEITE, 2001; ZORDAN, 2000). A proporção desses materiais apresenta grande variabilidade e heterogeneidade de amostra para amostra, sendo a sua separação total praticamente

impossível (LEITE, 2001). Por isso, o uso de agregados reciclados ainda é pequeno (VIEIRA; MOLIN, 2004).

Analisando a composição do RCD proveniente de diversas cidades brasileiras, observa-se que este é majoritariamente de origem mineral. Assim, a parcela composta por concretos, argamassas, blocos, tijolos, telhas, solos, gesso, representa aproximadamente 90%, da massa de RCD no Brasil (ÂNGULO, 2005). A Tabela 3 apresenta uma comparação entre as composições dos resíduos para diferentes regiões do Brasil e do mundo.

Tabela 3 - Comparativo da composição dos RCD (VIEIRA; MOLIN, 2004).

Local	Materiais (%)			
	Concreto	Argamassa	Material cerâmico	Outros
Porto Alegre	15	28	26	31
Campinas	21	37	21	21
Salvador	20	33	15	33
Maceió	19	28	48	5
Itatiba (SP)	13	35	47	5
Holanda	42	6	32	20
Taiwan	43	12	35	10

A composição do RCD depende de diversos fatores, tais como a qualidade da mão-de-obra empregada, das técnicas construtivas utilizadas, da presença ou não de programas de gestão da qualidade, dos tipos de materiais aplicados, dos locais de geração entre outros (AMADEI, 2011; ANGULO, 2005; HOOD, 2006). O momento de coleta da amostra também é relevante, uma vez que a construção civil produz diferentes resíduos de acordo com as atividades desenvolvidas dentro do canteiro de obras (ZORDAN, 2000).

2.5 IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELO RCD

A construção civil consiste em uma das atividades mais relevantes para o desenvolvimento econômico e social, mas, em contrapartida, revela-se uma grande geradora de impactos ao meio ambiente (KARPINSKI et al., 2009).

A Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002) expõe que “os geradores deverão ter como objetivo prioritário a não geração de resíduos e, secundariamente, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento dos resíduos sólidos e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”. Contudo, mesmo diante das disposições legais e orientações para que ações de reaproveitamento e reciclagem sejam

priorizadas, os resíduos descartados no Brasil seguem, quase que na totalidade, para unidades de disposição final (ABRELPE, 2017).

Segundo a ABRELPE (2017), a geração de RSU em 2017 atingiu um total anual de 78,4 milhões de toneladas no país, dos quais 71,6 milhões de toneladas foram coletadas e, conseqüentemente, cerca de 6,9 milhões de toneladas tiveram destino impróprio. Dos resíduos coletados, 59,1% foi disposto adequadamente em aterros sanitários, enquanto o restante foi despejado em lixões e aterros controlados, que não possuem o conjunto de técnicas fundamentais para preservar o meio ambiente, além de causar danos diretos à saúde de milhões de pessoas.

Os resíduos não coletados são, muitas vezes, dispostos em bota-foras clandestinos ou em áreas de deposições irregulares, colocando em risco a estabilidade de encostas e comprometendo a drenagem urbana, colaborando para enchentes. As conseqüências também podem incluir impactos nas vias e logradouros públicos, dificultando o tráfego de pedestres e veículos, e a proliferação de vetores (mosquitos e outros insetos, animais peçonhentos, roedores), afetando a qualidade de vida da sociedade como um todo. Além disso, os resíduos podem conter materiais perigosos oriundos de pinturas e tratamentos químicos, etc., que podem percolar pelo solo, contaminando-o. A remoção desses resíduos irregularmente acumulados aumenta os custos municipais e sobrecarrega os sistemas de limpeza pública das prefeituras. Assim, é possível observar que os impactos causados pelos RCD permeiam as esferas sociais, econômicas e ambientais (KARPINSKI et al., 2009; LIMA, 2005; PINTO; GONZÁLES, 2005).

Diante desse cenário, uma das soluções é a reciclagem de resíduos, que pode acarretar em diversos benefícios, como a diminuição na demanda de recursos naturais não-renováveis (JOHN, 2000; MORALES; ANGULO; CECILIATO, 2000); diminuição das áreas exigidas para a construção de aterros em função da reciclagem de resíduos, reduzindo o volume que chega aos aterros sanitários, aumentando a vida útil dos mesmos (LEITE, 2001; MORALES; ANGULO; CECILIATO, 2000; PINTO, 1999); minimização da despesa com energia durante as etapas produtivas, de transporte para deposição do resíduo e na gestão de aterros (JOHN, 2000; MORALES; ANGULO; CECILIATO, 2000); redução da poluição, gerada pelo processo produtivo do cimento, que diminui a emissão de gás carbônico (JOHN, 1999 apud ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2001) e redução de custos, tendo em vista que o custo estimado da reciclagem é cerca de 25% do curso da administração municipal para a correção da deposição e controle de doenças para o entulho depositado clandestinamente (LIMA, 2005).

Leite (2001) afirma que a reciclagem de resíduos tem se apresentado como uma alternativa viável e, a partir da década de 80, o estudo da utilização dos RCD teve grandes avanços. Nos últimos anos, tem se buscado incorporar esses resíduos na produção de concreto, o que é visto por muitos cientistas como o modo mais eficiente de fechar o ciclo de vida dos insumos usados na construção civil.

2.6 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS DE RCD

A necessidade da obtenção de concretos com maior durabilidade e resistência têm levado ao desenvolvimento de pesquisas mais detalhadas acerca das características dos agregados. Os agregados deixam, então, de ter uma função somente econômica na produção do concreto, influenciando em propriedades físicas, mecânicas e na durabilidade (LEITE, 2001).

De acordo com Lima (2005), as características dos agregados reciclados dependem das particularidades dos resíduos em sua composição, dos aparelhos utilizados para a reciclagem, tais como: tipo de britadores, dispositivos para a extração de impurezas, entre outros. Além disso, ao se utilizar os agregados reciclados é necessário considerar as diferenças em relação aos agregados convencionais, que são: maior absorção de água, heterogeneidade na composição e menor resistência dos agregados.

Para os agregados convencionais, a taxa absorção de água exerce pouca influência nos traços de concreto uma vez que os agregados apresentam uma porosidade desprezível. Contudo, quando são utilizados agregados reciclados para a produção de concretos, essa propriedade deve ser considerada, uma vez que irá interferir diretamente na água de amassamento da mistura e, conseqüentemente, na relação água e cimento (a/c) final da mistura (LEITE, 2001; MORALES; ANGULO; CECILIATO, 2000).

Os agregados reciclados apresentam valores de absorção bem superiores aos agregados naturais comumente utilizados (LEITE, 2001; LIMA, 2005). Portanto, ao se produzir concretos com agregados reciclados, a possibilidade do agregado retirar água por absorção da mistura deve ser levada em consideração, pois pode acabar influenciando negativamente na hidratação do cimento. A determinação da relação a/c é, então, determinada com base na taxa de absorção do reciclado, que pode ser obtida na condição “saturada com superfície seca”, e na sua umidade no momento da mistura. A água total a ser adicionada na mistura é igual a soma da parcela que se será absorvida pelo agregado reciclado e quantidade de água total necessária à hidratação do cimento (LIMA, 1999).

A heterogeneidade dos agregados reciclados, abordada no item 2.4 deste documento, pode ser observada através da distribuição granulométrica dos agregados reciclados. Ela depende de diversos fatores, tais como o tipo de resíduo utilizado, os equipamentos empregados, a distribuição granulométrica do resíduo antes do processamento, etc., sendo característica específica de cada tipo de resíduo. A granulometria influencia na trabalhabilidade, resistência mecânica, consumo de aglomerantes, absorção de água, entre outras propriedades das misturas de concreto. Por isso, deve-se atentar à granulometria dos agregados reciclados visando a produção de misturas com trabalhabilidade adequada, com grau de compactação satisfatório e que possibilitem o desempenho técnico desejado e uma redução nos custos envolvidos (LEITE, 2001; LIMA, 1999).

Em relação à resistência dos resíduos, esta varia com o tipo de reciclado - resíduos reciclados oriundos de alvenaria normalmente apresentam menor resistência e maior porosidade quando comparados aos resíduos de concreto, e por isto levam a perdas de resistência mais significativas no novo concreto (LIMA, 1999).

No presente trabalho, agregados reciclados de resíduos de construção e demolição foram utilizados na fabricação de peças de concreto para pavimento intertravado em função das suas diversas vantagens, a serem apresentadas no próximo capítulo.

3 PAVIMENTO INTERTRAVADO

3.1 DEFINIÇÃO

O pavimento intertravado consiste em um pavimento flexível cuja estrutura é formada por uma camada de base (ou base e sub-base) subsequente a uma camada de revestimento composta por peças de concreto, comumente chamadas de *pavers*. Estas são sobrepostas em uma camada de assentamento e as juntas entre as peças são preenchidas por material de rejuntamento, conforme especificado pelas NBR 15953 (ABNT, 2011) e NBR 9781 (ABNT, 2013).

O intertravamento consiste na capacidade dos blocos de resistir a deslocamentos individuais em relação às peças adjacentes e é fundamental para a resistência e durabilidade do pavimento (ABNT, 2011). Segundo o Manual de Pavimento Intertravado (ABCP, 2010), o intertravamento entre as peças de concreto é fruto de duas condições: contenção lateral e junta preenchida com areia. A contenção lateral (como meios-fios) impede o desvio lateral dos blocos, proporcionando o intertravamento; e a areia de selagem (rejuntamento) promove a transferência de esforços entre os pavers, permitindo que eles trabalhem unidos e resistam às cargas solicitantes.

A estrutura típica dos pavimentos intertravados é mostrada na Figura 3.

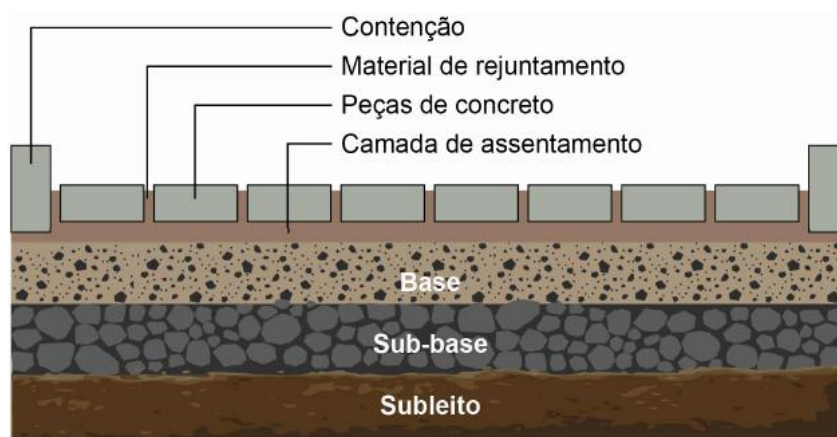


Figura 3 - Seção típica - Pavimentos intertravados (Acervo ABCP apud MARCHIONI, 2012)

Esse tipo de pavimento têm conquistado cada vez mais espaço nas áreas urbanas do país em função das suas diversas vantagens. Dentre elas, pode-se destacar a facilidade de execução, com equipamentos de pequeno porte, a liberação rápida ao tráfego e a facilidade de manutenção e reutilização. Além disso, blocos com pigmentação clara podem proporcionar menor absorção de calor e maior reflexão, contribuindo para o conforto

térmico das calçadas e para uma economia na iluminação pública (ABCP, 2010; AMADEI, 2011; MARCHIONI, 2012; SIMIELI et al., 2007).

Segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013), os materiais a serem usados na fabricação de pavimentos intertravados são, fundamentalmente, aglomerante, agregados e água, sendo permitido o uso de aditivos e pigmentos. Dessa forma, o concreto utilizado na produção de pavers é constituído pelos mesmos insumos do concreto convencional, apresentando como principal diferença o teor de umidade da mistura (MARCHIONI, 2012).

3.2 DOSAGEM

Recena (2002) define dosagem como:

(...) processo através do qual são escolhidos os materiais, dentre os disponíveis, e determinado o melhor proporcionamento entre cimento, agregados, aditivos e adições, com o objetivo de obter-se um material que atenda a determinados requisitos físicos (...)

(RECENA, 2002, p.16)

O concreto usado na confecção de blocos para pavimentação intertravada é conhecido como "concreto seco" ou sem abatimento (no-slump) por apresentar baixa relação água-materiais secos, com alta consistência e coesão. Desse modo, a quantidade de água adicionada a mistura é menor do que no caso de concretos plásticos por causa da necessidade da desforma imediata (OLIVEIRA, 2004), a qual leva a redução dos custos tendo em vista que não exige o uso de grandes quantidades de moldes durante tempos longos de cura. Esse tipo de concreto apresenta, então, uma consistência de terra úmida e conta com a presença de ar em volume expressivo na mistura (HOOD, 2006).

Ao contrário dos concretos usualmente empregados na construção civil, o concreto seco não segue a "Lei de Abrams" uma vez que diminuições na relação água/cimento não aumentam a resistência à compressão. Até um certo limite, quanto mais água é colocada na mistura, maior será a resistência alcançada, tendo em vista que maiores quantidades de água reduzem o atrito entre os grãos, melhorando a trabalhabilidade da mistura. No entanto, se esta quantidade for exagerada, podem ocorrer problemas durante a desforma e deformações nas peças durante o transporte para a cura. Por isso, o correto proporcionamento da água também é fundamental no processo (FRASSON, 2000). Assim, a quantidade de água deve ser a maior possível, contanto que as peças não exponham dificuldades para desforma por estarem aderidas ao molde, ou problemas de perda de

formato por excesso de água (OLIVEIRA, 2004). A água em excesso dificulta a alimentação dos moldes – deve ser utilizado um teor de umidade ótimo para atender a duas condições: facilidade de alimentação e prensagem, sem afetar a trabalhabilidade da mistura (MARCHIONI, 2012).

Segundo Hood (2006), não existe uma metodologia consagrada para a dosagem do concreto seco. Diversos autores desenvolveram metodologias para a obtenção de concretos secos baseados em recomendações de fabricantes e em processos de tentativa e erro. Entretanto, o sucesso da mistura está intimamente ligado com as granulometrias de seus componentes e com o tipo e a regulagem do equipamento utilizado (HOOD, 2006; MARCHIONI, 2012). Os agregados devem respeitar os limites de distribuição granulométrica estabelecidos na NBR 7211 (ABNT, 2009a). Além disso, suas propriedades devem ser determinadas através dos métodos descritos nas normas presentes no Quadro 3 e no Quadro 4 para agregados miúdos e graúdos, respectivamente.

Quadro 3 - Ensaio para agregados miúdos (Adaptado de ABNT, 2009a).

Propriedades físicas	Método
Composição granulométrica	ABNT NBR NM 248
Massa específica	ABNT NBR NM 52
Massa unitária	ABNT NBR 7251
Absorção de água	ABNT NBR NM 30
Inchamento	ABNT NBR 6467
Teor de partículas leves	ABNT NBR 9936
Umidade superficial	ABNT NBR 9775

Quadro 4 - Ensaio para caracterização dos agregados graúdos (Adaptado de ABNT, 2009a).

	Determinação	Método
Propriedades físicas	Composição granulométrica	ABNT NBR NM 248
	Massas específicas e absorção de água	ABNT NBR NM 53
	Ciclagem natural	ABNT NBR 12695
	Ciclagem artificial água-estufa	ABNT NBR NM 12696
	Ciclagem com etilenoglicol	ABNT NBR 12697
	Teor de partículas leves	ABNT NBR 9936
	Umidade total	ABNT NBR 9939
Propriedades mecânicas	Módulo de deformação estático	ABNT NBR 10341
	Coefficiente de Poisson de rochas	ABNT NBR 10341
	Resistência ao esmagamento	ABNT NBR 9938
	Desgaste por abrasão	ABNT NBR 12042
	Resistência à compressão da rocha	ABNT NBR 6953

Desse modo, a escolha de um método de dosagem para produção de concreto para fabricação de pavers é difícil e deve ser continuamente ajustada de acordo com o instrumento empregado.

3.3 PROCESSO PRODUTIVO

O processo produtivo consiste, inicialmente, na mensuração dos materiais presentes no traço, já determinados anteriormente pela dosagem do concreto dos blocos. Esse procedimento pode ser realizado em massa ou em volume, sendo mais adequado fazê-lo em massa para evitar grandes variações, com exceção de água e dos aditivos, que podem ser dosados em volume com precisão (MARCHIONI, 2012; SOUSA, 2001). Segundo Tango (1994), as principais causas de variações no proporcionamento dos materiais são falhas na mensuração da água de amassamento, ocasionados pela desconsideração da umidade dos agregados; imprecisões causadas pelo inchamento da areia, levando a alterações no volume; e descuidos causados pela falta de precisão na quantidade de cimento, quando o proporcionamento é baseado no saco de cimento.

Além disso, outra causa para um proporcionamento irregular são as imprecisões dos equipamentos, que prejudicam os traços dosados anteriormente e podem influenciar as características finais dos blocos (FRASSON, 2000).

Após a mensuração dos materiais constituintes do traço, é realizada a mistura dos mesmos de modo a garantir perfeita homogeneização (MARCHIONI, 2012). Essa etapa é de extrema importância para a uniformidade da produção e, assim, define-se a ordem de colocação dos materiais e o tempo de mistura apropriado conforme o tipo de equipamento usado no procedimento (SOUSA, 2001). Desse modo, a escolha do tipo e da capacidade do misturador é fundamental, tendo em vista que o processo de mistura seja ineficiente pode acabar provocando heterogeneidade do produto final (FRASSON, 2000).

Finalmente, o concreto homogeneizado é levado a equipamentos chamados vibroprensas, que recebem esta designação por causa da técnica de funcionamento aplicada durante a moldagem dos blocos – vibração acompanhada de prensagem. A vibração é encarregada de preencher e adensar a mistura, enquanto a prensagem influencia o adensamento e o controle da altura dos blocos (SOUSA, 2001). A moldagem do concreto seco em equipamentos desse tipo se faz necessária para que retirada de ar aprisionado seja feita, proporcionando alta compacidade às misturas e aumentando a sua resistência e

durabilidade (ABCP, 2010). Além disso, a moldagem em vibro-prensas permite a desforma imediata, garantindo alta produtividade e conseqüente redução dos custos de produção.

A seqüência de funcionamento das vibro-prensas para a moldagem dos pavers compreende as etapas ilustradas na Figura 4 (MEDEIROS, 1993). Inicialmente, a gaveta alimentadora é preenchida com a mistura destinada a moldagem dos blocos (Figura 4a). Em seguida, como mostrado nas Figura 4b e 4c, ocorre o enchimento do molde metálico, acompanhado pela vibração do molde e compactação dos blocos através dos extratores. Depois, o molde sofre novamente uma vibração até atingir a altura desejada para os blocos. Os blocos são então desformados (Figura 4d), permanecendo sobre o “palet” onde foram moldados. O “palet” com os blocos moldados recentemente segue para frente e um novo “palet” vazio ocupa seu lugar (Figura 4e). Então, ocorre a descida do molde metálico para sua posição original ao mesmo tempo em que acontece a ascensão dos extratores, ajustando-se para iniciar um novo ciclo (Figura 4f).

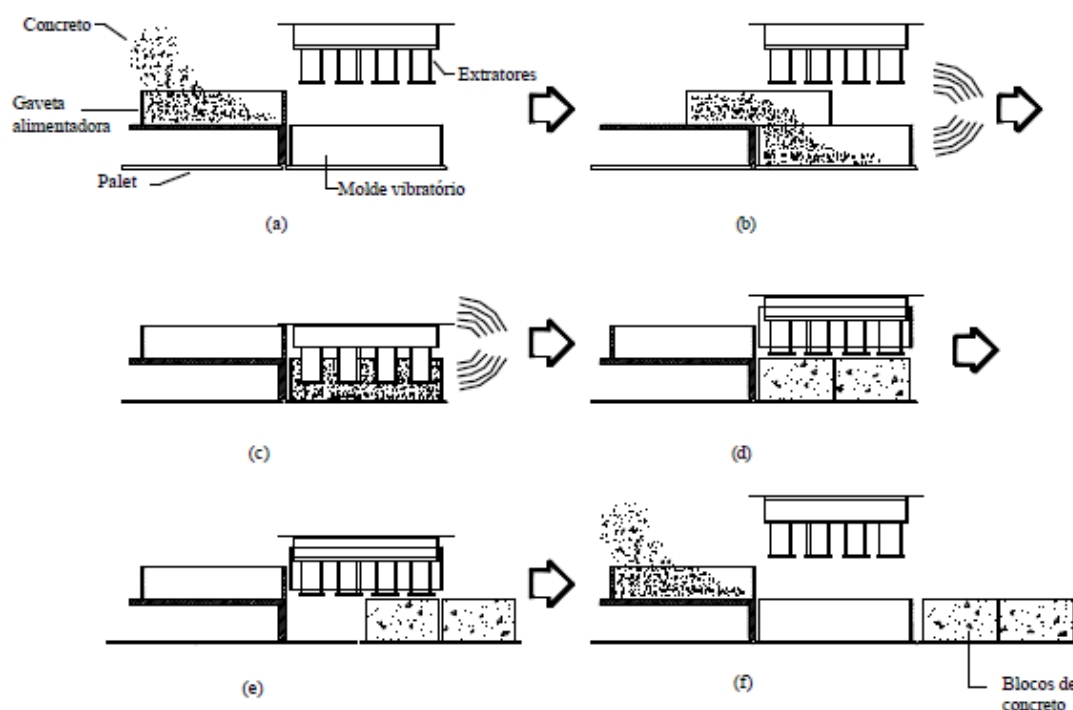


Figura 4 - Sequência básica de funcionamento de uma vibro-prensa automática (SOUSA, 2001 apud MEDEIROS, 1993)

Nessa fase de produção, é definido o tempo de vibro-compressão, que consiste em medir o tempo em que o contramolde leva para concluir a prensagem do bloco, indicando se o enchimento da forma foi bom ou não. Tempos abaixo do ideal acarretarão em peças com alta porosidade e de baixa resistência, ao passo que tempos de vibro-compressão acima

do adequado aumentarão a duração do ciclo produtivo e o desgaste do equipamento (FRASSON, 2000).

Após a moldagem nas vibro-prensas, as peças passam pelo processo de cura, que é o responsável pelo ganho de resistência das peças e a diminuição de sua retração potencial (SOUZA, 2000). Os blocos são curados em câmaras que mantêm constante a umidade relativa acima dos 95%, garantindo a hidratação do cimento e proporcionando menos absorção de água da peça, que deve ser menor ou igual a 6% (ABCP, 2010).

Após a cura, as peças devem ser paletizadas e armazenadas de modo a facilitar a identificação, o carregamento e o transporte dos blocos e minimizar as quebras do produto, reduzindo os custos de reposição (FRASSON, 2000).

3.4 PROPRIEDADES REQUERIDAS

No Brasil, há duas normas que referenciam os pavimentos intertravados de concreto: a NBR 15953 - Pavimento intertravado com peças de concreto — Execução (ABNT, 2011) e a NBR 9781 - Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013). A primeira determina os requisitos para a execução da pavimentação intertravada, enquanto a segunda estabelece as exigências e métodos de ensaio exigidos para a conformidade dos blocos de concreto para pavimentação intertravada submetidas ao tráfego de pedestres. Em função do objetivo do trabalho, serão abordadas apenas as exigências dos ensaios de resistência à compressão e de absorção de água descritas na NBR 9781 (ABNT, 2013).

3.4.1 Resistência à compressão

A NBR 9781 (ABNT, 2013) estipula que a resistência estimada à compressão das peças para solicitações de veículos comerciais de linha deve ser de 35 MPa ou, em casos de tráfego de veículos especiais ou solicitações capazes de gerar significativa abrasão, as peças devem apresentar resistência de 50 MPa.

O ensaio de resistência à compressão consiste em acoplar duas placas auxiliares na prensa de laboratório de modo que fiquem alinhadas e então posicionar a peça centralizada nestas placas. Inicia-se então o carregamento continuamente até a ruptura completa por compressão.

Segundo Simieli *et al.* (2007), a utilização do pavimento leva a uma melhor distribuição de cargas, gerando um travamento total. Com o tempo, a camada superior atinge maior rigidez e os blocos de concreto passam a se comportar como uma camada estrutural.

As peças de concreto para pavimentação intertravada devem possuir propriedades capazes de resistir às solicitações de serviço, sobretudo quando submetidas ao tráfego de veículos e pedestres, que causa esforços de compressão sobre o pavimento. Além disso, deve-se observar a absorção de água, uma vez que esta pode prejudicar o aspecto visual e diminuir a vida útil dos blocos no que diz respeito à estética (HOOD, 2006).

3.4.2 Absorção de água

A NBR 9781 (ABNT, 2013) determina que a absorção de água em amostras de peças de concreto deve apresentar valor médio menor ou igual a 6%, não sendo admitido nenhum valor individual maior do que 7%.

A absorção de água consiste no incremento de massa de um corpo sólido poroso devido a entrada de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa no estado seco. Desse modo, a determinação de absorção de água na peça de concreto consiste na razão da massa seca e da massa saturada. O transporte de água se dá por capilaridade e preenche apenas parte dos poros abertos, interconectados e permeáveis (MARCHIONI, 2012).

3.5 USO DE RCD EM BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO

Poon *et al.* (2006) estudou blocos de pavimentação substituindo agregados reciclados por resíduos de cerâmica. Apesar do resíduo do tijolo cerâmico prejudicar algumas qualidades do concreto, como a diminuição da resistência à compressão e o aumento da absorção com o aumento da utilização do agregado reciclado, os blocos com substituição de até 50% atenderam aos requisitos estabelecidos pelas normas vigentes locais para o trânsito de pedestres, atingindo valores acima dos 30 MPa.

Simieli *et al.* (2007) concluiu que blocos de concreto produzidos com os agregados reciclados de concreto apresentaram trabalhabilidade adequada e um acabamento excelente. O estudo aponta que a substituição de 40% da areia por agregados miúdos reciclados acarretaram em valores de resistência à compressão simples superiores a 35MPa, conforme recomendado pela normalização brasileira.

Hood (2006) observou a diminuição da resistência à compressão dos blocos para pavimentação com o crescimento do teor de substituição do agregado miúdo natural pelo reciclado, sendo este constituído por resíduos de argamassa, concreto, material cerâmico e rocha natural. Os teores de 50%, 75% e 100% apresentaram resultados insatisfatórios, com resistência à compressão muito abaixo dos 25 MPa almejados aos 28 dias. Contudo, para a substituição de 25% com agregados reciclados a resistência a compressão aos 28 dias superou os 25 MPa, mostrando que é possível utilizar o agregado miúdo reciclado em substituição ao natural em pavers submetidos a menores sollicitação de tráfego de veículos ou trânsito de pedestres, apesar de não se enquadrarem na norma brasileira. O autor também observou que a absorção de água aumenta com o acréscimo de agregado miúdo reciclado nos blocos de concreto, mas o teor de 25% apresentou resultados satisfatórios.

Amadei (2011) analisou blocos de concreto para pavimentação produzidos com diferentes teores de substituição dos agregados naturais por agregados miúdos reciclados, compostos por argamassa, concreto e materiais cerâmicos. Os resultados dos ensaios de Resistência à Compressão mostraram que a resistência diminuía conforme se aumentava o teor de substituição de agregado miúdo natural por reciclado. Os índices de 30% e 35% obtiveram resistência acima de 25 MPa aos 28 dias, viabilizando o uso desses blocos em situações de menor sollicitação de tráfego de veículos ou pedestres, porém em desacordo com a norma brasileira. Somente a substituição de 25% de agregados miúdos naturais por reciclados atingiu valores acima de 35 MPa aos 28 dias, como determinava a NBR 9780 de 1987, que foi substituída pela NBR 9781 (ABNT, 2013).

Em relação à absorção de água, os maiores teores de substituição, 45% e 50%, apresentaram os maiores índices de absorção em função da presença de grande quantidade de RCD. Os teores de 30%, 35% e 40% apresentaram os menores índices, ficando muito próximos do valor obtido pelo concreto de referência. Todavia, todos os traços confeccionados apresentaram valores inferiores a 6%, como é determinado pela maioria das normas internacionais e pela NBR 9781 (ABNT, 2013).

A partir dos resultados obtidos por Amadei (2011), é possível concluir que os blocos de concreto com teor de substituição de até 25% encontram-se de acordo com os parâmetros estabelecidos pela NBR 9780 de 1987 e pela NBR 9781 (ABNT, 2013), sendo sua aplicação tecnicamente viável. Os traços com 30% e 35% de substituição, apesar de não se enquadrarem na norma brasileira, apresentaram índices satisfatórios para serem empregados em locais que exijam baixas sollicitações de tráfego, além de consumirem uma maior quantidade de resíduo.

Apesar de ser objeto de pesquisa em várias universidades, a bibliografia sobre o uso de agregados reciclados oriundos de resíduos de construção e demolição em peças de concreto para pavimentação ainda é muito recente. Os resíduos de construção e demolição devem ser valorizados, sendo primordial o desenvolvimento de pesquisas para que o seu aproveitamento seja eficiente e seguro. (HOOD, 2006; SIMIELI et al., 2007).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental adotado visando atingir os objetivos estabelecidos no presente estudo encontra-se na Figura 5. Foram estudados dois tipos de RCD: resíduos provenientes de estruturas à base de cimento, denominados RCD cinza (RCDc), e resíduos oriundos da demolição de materiais de natureza cerâmica, nomeados RCD vermelho (RCDv).

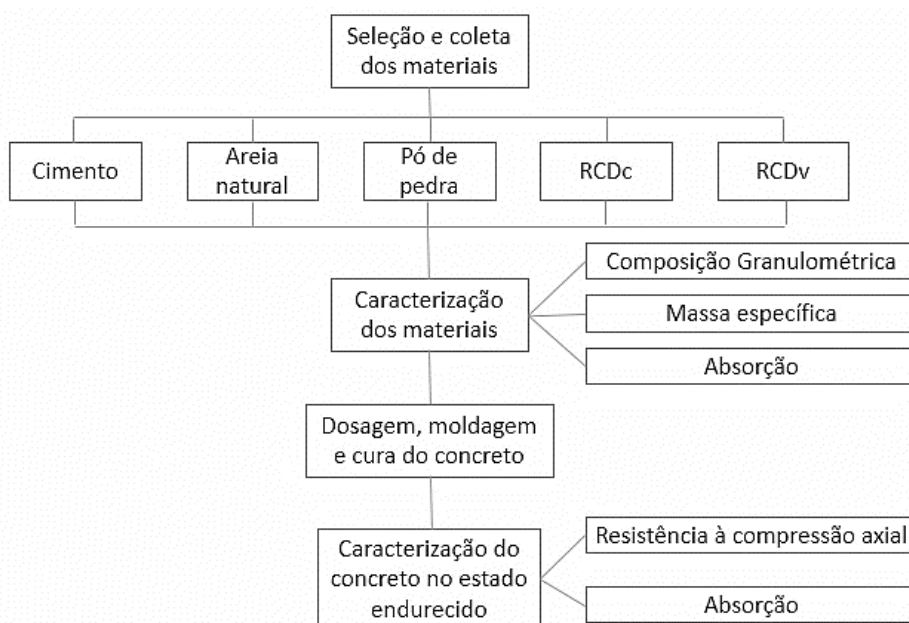


Figura 5 - Programa experimental

Inicialmente, foram definidos os materiais que seriam usados para a produção de concreto para pavimento intertravado. Em seguida, realizaram-se ensaios de caracterização dos agregados naturais e reciclados com o objetivo de obter suas propriedades físicas. São eles: composição granulométrica, massa específica e absorção.

Depois, adotou-se um método de dosagem e foram definidos traços com agregados distintos para a produção do concreto seco, sendo um traço de referência, com areia e pó de pedra, e outros dois traços contendo RCD em substituição ao pó de pedra com o objetivo de avaliar a viabilidade do uso do resíduo de construção e demolição como agregado miúdo no concreto seco. Após a moldagem dos corpos de prova, avaliaram-se as propriedades mecânicas e físicas no estado endurecido aos 28 dias. As propriedades mecânicas foram obtidas através do ensaio de resistência à compressão axial e as propriedades físicas, por meio do ensaio de absorção por imersão.

4.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados na produção de concreto para piso intertravado foram: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP-V ARI), areia natural de quartzo, pó de pedra natural, água, aditivo superplastificante (Glenium 51) e resíduos de construção e demolição.

O cimento escolhido o Cimento Portland de Alta Resistência inicial – CPV ARI – da Lafarge Holcim. Essa escolha foi norteada pela velocidade com que o esse tipo de cimento ganha resistência inicial, favorecendo o processo de produção. Ademais, esse tipo de cimento é facilmente encontrado no comércio e possui uma elevada resistência contra agentes agressivos do meio ambiente, sendo muito vantajoso para peças de concreto expostas à intempéries e em contato com o solo.

A areia natural de quartzo é proveniente do leito do Rio Guandu, localizado no estado do Rio de Janeiro, por se tratar de um material de fácil obtenção e com disponibilidade no laboratório onde a pesquisa foi realizada.

O pó de pedra usado no concreto em questão foi obtido através de resíduos de britas localmente disponíveis. Este agregado foi adquirido junto à Pedreira Vigné, localizada no Município de Nova Iguaçu/RJ.

A água utilizada foi obtida do sistema de abastecimento público da cidade do Rio de Janeiro.

O aditivo superplastificante usado foi o Glenium 51 de terceira geração, a base de éter policarboxílico, produzido pela BASF Chemicals Brazil.

Utilizou-se, também, dois tipos de resíduos de construção e demolição na produção do concreto em questão: o RCD cinza (RCDc), proveniente dos resíduos de concretos e argamassas da demolição parcial do Hospital Universitário Clementino Fraga Filho da Universidade Federal do Rio de Janeiro (HUCFF), como apresentado nas Figura 6 e Figura 7; e o RCD vermelho (RCDv), oriundo da britagem de tijolos cerâmicos maciços, no Laboratório de Materiais de Construção (LAMAC) da Escola Politécnica da UFRJ.



Figura 6 - Implosão da ala sul do Hospital Universitário Clementino Fraga Filho da Universidade Federal do Rio de Janeiro (HUCFF/UFRJ)

(http://farm6.static.flickr.com/5088/5274130177_42140e45a0_z.jpg,%202010.)



Figura 7 - Resíduos oriundos da implosão do Hospital Universitário Clementino Fraga Filho da Universidade Federal do Rio de Janeiro (HUCFF/UFRJ)

(<https://oglobo.globo.com/rio/escombros-de-predio-implodido-no-hospital-da-ufrj-ainda-nao-foram-recolhidos-na-ilha-do-fundao-2801119>)

O RCD cinza foi obtido a partir do procedimento descrito por Julião (2016), contemplando as etapas descritas a seguir. Inicialmente, foi realizada a separação visual do resíduo proveniente do HUCFF por cores, isolando os resíduos de cor cinza, provenientes de concretos e argamassas, dos resíduos de cor vermelha, oriundos de materiais cerâmicos como alvenarias de tijolo, telhas, revestimento, entre outros. Em seguida, homogeneizou-se os resíduos de cor cinza (RCDc) através de pilhas. Este processo consiste em espalhar o material sobre uma lona plástica, em camadas homogêneas, e subdividir a pilha em diversas seções baseadas no tamanho das partículas. Os resíduos foram então fragmentados

em um britador de mandíbulas móvel, que tritura o material por compressão. Depois, o material foi novamente homogeneizado através do procedimento de pilha e submetido à secagem em estufa a 100 ± 5 °C até atingir massa constante. Finalmente, foi realizado o peneiramento a seco para atingir a granulometria desejada. Foram usados apenas os grãos passantes pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e retidos na peneira com abertura de malha de 150 μ m, sendo classificados como agregados miúdos conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

A produção de RCD vermelho foi realizada conforme descrito por Amario (2013). Assim como no caso do RCDc, o RCDv foi submetido ao processo de moagem através do britador de mandíbulas móvel, gerando as seguintes frações de agregados: graúdo e miúdo. Com o objetivo de atingir a granulometria desejada, o agregado graúdo foi peneirado na peneira com abertura de malha de 12,5 mm e o material retido foi novamente colocado no equipamento. Esse procedimento realizado repetidamente até a quantidade retida na peneira ser considerada desprezível. Em seguida, o material fino foi lavado e peneirado na peneira com abertura de malha de 150 μ m, sendo então classificado como agregado miúdo conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste item são descritos os procedimentos e ensaios adotados para a determinação das propriedades físicas dos agregados usados na produção de concreto para piso intertravado.

4.3.1 Composição Granulométrica

A distribuição granulométrica dos agregados foi determinada por peneiramento à seco, com a utilização de um conjunto de peneiras (com aberturas entre 75 μ m e 9,5 mm) acopladas a um agitador mecânico (Figura 8). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) do PEMM/COPPE/UFRJ, de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) – “Agregados – Determinação da Composição Granulométrica”. O resultado final é dado pela média de duas amostras de aproximadamente 0,300 kg homogeneizadas e quarteadas, que foram previamente secas em estufa à $105^{\circ} \text{C} \pm 5^{\circ} \text{C}$ por 24 horas.

De acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), através desse ensaio é possível determinar a dimensão máxima característica e o módulo de finura dos agregados. A dimensão máxima característica corresponde à abertura nominal da malha da peneira da

série normal ou intermediária na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. O módulo de finura consiste na soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado nas peneiras da série normal dividida por 100.



Figura 8 - Agitador mecânico de peneiras – Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM)

4.3.2 Absorção

A absorção dos agregados foi determinada conforme a NBR NM 30 (ABNT, 2001) – “Determinação da absorção de água”. Os ensaios foram realizados no Núcleo de Materiais e Tecnologias Sustentáveis (NUMATS) da COPPE/UFRJ e consistiram na utilização de duas amostras de 0,500 kg de agregado homogeneizadas e quarteadas, que foram anteriormente submetidas a secagem em estufa à $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas, quando atingiram massa constante. Em seguida, a amostra foi coberta com água e deixada por 24 horas. Após esse período, a amostra é espalhada em uma superfície plana e então submetida à ação de uma suave corrente de ar quente (Figura 9 (a) e (b)).



Figura 9 – (a) Amostra de agregado após ser deixada coberta com água por 24 horas e (b) Amostra de agregado sendo submetida à ação de uma suave corrente de ar quente.

Depois disso, o agregado é colocado no molde tronco-cônico metálico, sem comprimi-lo, aplicando suavemente 25 golpes em sua superfície com uma haste de compactação, e o molde é então retirado verticalmente. Enquanto existir umidade superficial, o agregado se conserva com a forma do molde (Figura 10 (a) e (b)). Nesse caso, é necessário continuar a secagem até que o cone de agregado desmorone ao ser retirado do molde (Figura 11). Neste momento, o agregado terá chegado à condição de saturado superfície seca, que ocorre quando as partículas do agregados culminaram suas possibilidades de absorver água e mantém a superfície seca.



Figura 10 – (a) e (b) Amostra de agregado após a retirada do molde metálico, antes de atingir a condição de saturado superfície seca



Figura 11 - Agregado na condição de saturado superfície seca

A absorção de água é dada segundo a fórmula:

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

A → Absorção de água, em porcentagem.

m_s → Massa da amostra na condição saturado com superfície seca, em gramas.

m → Massa da amostra seca em estufa, em gramas.

4.3.3 Massa Específica Aparente

A determinação da massa específica aparente dos agregados foi realizada conforme as especificações da NBR NM 52 (ABNT, 2009b) – “Determinação da massa específica e massa específica aparente”. Ela consiste na relação entre a massa do agregado seco e seu volume, incluindo poros permeáveis.

Os ensaios de determinação de massa específica aparente foram realizados no Núcleo de Materiais e Tecnologias Sustentáveis (NUMATS) da COPPE/UFRJ, utilizando as mesmas amostras do ensaio de absorção, que já constituía um agregado saturado superfície seca. As amostras foram colocadas em um frasco e foi registrada a massa (m_1) do conjunto (Figura 12).

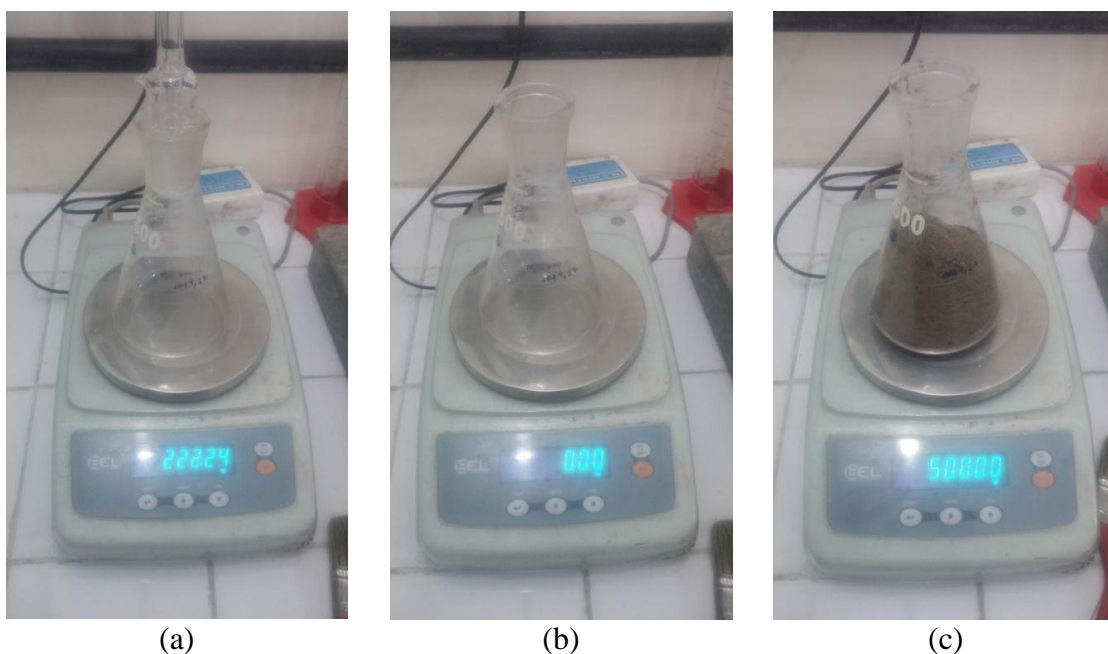


Figura 12 – (a) Peso do frasco, (b) Realização da tara do frasco e (c) Medição da massa m_1 - Conjunto frasco + agregado.

Em seguida, o frasco foi preenchido com água até próximo à marca de 500 ml e mexido de modo a eliminar as bolhas de ar. Ele foi então colocado em recipiente com água e mantido à temperatura ambiente (Figura 13).



Figura 13 - Frasco preenchido com solo e água e mantido submerso em água à temperatura ambiente

Após aproximadamente 1 hora, completou-se o tubo até a marca de 500 ml e determinou-se a massa total (m_2). O agregado foi então retirado do tubo e submetido à secagem em estufa à $105^\circ \text{C} \pm 5^\circ \text{C}$ até atingir massa constante. Depois de esfriado, o agregado foi pesado, determinando-se o parâmetro m . A massa específica aparente do agregado é determinada pela fórmula:

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

d_1 → Massa específica aparente do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico.

m → Massa da amostra seca em estufa, em gramas.

V → Volume do frasco, em centímetros cúbicos.

V_a → Volume de água adicionada ao frasco, em centímetros cúbicos, dado pela seguinte fórmula:

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

m_1 → Massa do conjunto (frasco + agregado), em gramas.

m_2 → Massa total (frasco + agregado + água), em gramas.

ρ_a → Massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico.

4.4 DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA DO CONCRETO SECO

Os concretos foram dosados a partir do método de Füller e Thompson (1907), que se baseia na granulometria contínua da mistura, avaliando a influência da distribuição granulométrica sobre o empacotamento das partículas. Esse método foi desenvolvido a partir de trabalhos empíricos de correção da granulometria dos agregados para a produção de concretos e argamassas.

A curva granulométrica dos agregados deve atender às especificações da NBR 7211 (ABNT, 2009a). Assim, a granulometria contínua da combinação dos agregados é delimitada pelas porcentagens mínima e máxima passantes apresentadas a seguir.

Tabela 4 - Porcentagens mínima e máxima passantes nas peneiras de acordo com a NBR 7211 (Adaptado de ABNT, 2009a).

Peneira	Abertura (mm)	Min (%)	Max (%)
3/4"	19,05	100	100
1/2"	12,7	100	100
3/8"	9,52	100	100
Nº 4	4,76	95	100
Nº 8	2,36	80	100
Nº 16	1,18	50	85
Nº 30	0,6	25	60
Nº 50	0,3	10	30
Nº 100	0,15	2	10

A partir disso, foram desenvolvidas três misturas de concreto seco, cada uma combinando areia natural com outro agregado. A primeira delas consistiu na combinação de areia natural e pó de pedra (TPP) e foi considerada a mistura de referência tendo em vista que o pó de pedra já é comumente utilizado na indústria de peças pré-fabricadas no Brasil. A segunda mistura foi a combinação de areia natural e RCDc (TRCDc) e a terceira, areia natural e RCDv (TRCDv). Cada mistura foi produzida com três diferentes consumos de cimento e, conseqüentemente, diferentes relações de água/cimento para avaliar a influência desses parâmetros nas propriedades do concreto endurecido.

As dosagens seguiram uma matriz de variáveis relacionando os agregados utilizados em cada traço com o respectivo consumo de cimento e o fator água-cimento, conforme mostrado no Quadro 5. Todas as dosagens foram nomeadas de forma que as letras antes do ponto representassem o agregado utilizado junto com a areia em cada traço e o número depois do ponto se referisse à família do traço, considerando o consumo de cimento e o fator água-cimento. Assim, o Traço TPP.1 se refere a um concreto produzido com pó de

pedra e pertencente à família 1, cujo consumo de cimento é de A kg/m³ e o fator água-cimento é D, e assim sucessivamente para as demais dosagens.

Quadro 5 - Matriz de traços

		Família		
		1	2	3
Cimento (kg/m ³)		A	B	C
Fator a/c		D	E	F
Agreg.	Pó de pedra	TPP.1	TPP.2	TPP.3
	RCDv	TRCDv.1	TRCDv.2	TRCDv.3
	RCDc	TRCDc.1	TRCDc.2	TRCDc.3

O uso de aditivo superplastificante fez-se necessário para favorecer a trabalhabilidade e reduzir o fator água/cimento da mistura. A quantidade de superplastificante adicionada a cada mistura foi baseada no Método do Ponto de Pelota, citado por diversos autores (HOOD, 2006; PAGNUSSAT, 2004; TANGO, 1994). O superplastificante foi adicionado em quantidade suficiente para que fosse possível moldar uma pelota de concreto nas palmas das mãos sem que esta desmanche (falta de água) ou suje excessivamente as mãos (excesso de água), como pode ser observado na Figura 14.



Figura 14 - Consistência adequada da mistura de concreto seco - Ponto de Pelota

A pesagem dos materiais e a produção do concreto seco foram realizadas no Núcleo de Materiais e Tecnologias Sustentáveis (NUMATS) da COPPE/UFRJ. O concreto seco foi produzido em um misturador planetário (Figura 15) com velocidade de rotação de 167 rpm e capacidade volumétrica de 20 litros. Inicialmente, o cimento e os agregados foram adicionados ao misturador e mantidos durante 3 minutos de modo a garantir uma homogeneização dos materiais secos. Em seguida, água e superplastificante foram acrescentados e misturados por mais 10 minutos, e a mistura foi levada à vibro prensa.



Figura 15 - Misturador Planetário

Os blocos de concreto para piso intertravado foram produzidos em uma vibro prensa da Saara Brasil, com uma pressão de compactação pneumática de 130 psi e frequência de vibração de 10 ciclos por segundo. A vibro prensa é equipada com moldes com capacidade para produzir 3 unidades com dimensões 20 x 10 x 6 cm ao mesmo tempo (Figura 16). O molde foi coberto com óleo antes do preenchimento com concreto para facilitar a desmoldagem e retirada dos corpos-de-prova. O concreto foi então colocado sobre os moldes e vibrado a 130 psi por 30 segundos e, em seguida, desmoldado por um pistão pneumático, conforme mostrado na Figura 17. Foram produzidos 6 corpos-de-prova para cada traço, totalizando 54 corpos-de-prova, que foram curados durante 28 dias em uma câmara úmida, que mantém a umidade relativa em cerca de 99%.



Figura 16 – Blocos de concreto produzidos na vibro prensa (20 x 10 x 6 cm).



Figura 17 – (a) Lançamento do concreto seco, (b) Vibro-compressão do concreto e (c) Desmoldagem dos corpos-de-prova.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

A caracterização do concreto no estado endurecido contemplou os ensaios de resistência à compressão axial e de absorção total. Ambas características são de extrema importância para a avaliação do comportamento dos blocos mediante a adição de agregados reciclados.

4.6.1 Resistência à Compressão

O ensaio de Resistência à Compressão foi realizado aos 28 dias no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Foram ensaiados 3 corpos de prova de cada traço, totalizando 27 ensaios com blocos de concreto para piso intertravado. Os corpos de prova foram saturados por no mínimo 24 horas antes do ensaio e capeados com pasta de enxofre de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015). Os blocos foram então dispostos sobre placas auxiliares de ensaio, de modo que o eixo vertical que passa pelo centro da peça coincidissem com o eixo vertical de atuação da carga, conforme mostrado na Figura 18. Após esse procedimento, ocorreu o rompimento dos blocos na prensa servo-controladora Shimadzu, modelo UH-F1000kN, conforme a norma NBR 9781 (ABNT, 2013).



Figura 18 - Ensaio de compressão axial com destaque para o uso de placas auxiliares.

A resistência à compressão dos blocos foi obtida dividindo-se a carga de ruptura pela área de carregamento, multiplicando-se o resultado pelo fator p , definido na NBR 9781 (ABNT, 2013) de acordo com a altura da peça. Como a altura dos blocos era de 60 milímetros, o fator multiplicativo p é igual a 0,95.

Admitindo-se que as resistências à compressão obedecem à distribuição normal, o valor de resistência característica pode ser estimado pela expressão:

$$f_{pk,est} = f_p - t \times s \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

$f_{pk,est}$ → Resistência característica estimada à compressão, em megapascals (MPa).

f_p → Resistência média das peças, em megapascals (MPa).

t → Coeficiente de Student, que é função do tamanho da amostra. Considerando uma amostra com 6 peças, t é igual a 0,92.

s → Desvio-padrão da amostra, em megapascals (MPa), dado por:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(f_p - f_{pi})^2}{n - 1}} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

n → Número de peças da amostra.

f_{pi} → Resistência individual das peças, em megapascals (MPa).

Segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013), blocos de concreto para pavimentação submetidos à solicitações de veículos leves devem apresentar resistência à compressão característica estimada (f_{pk}) mínima de 35 MPa.

4.6.2 Absorção

O ensaio de Absorção foi realizado aos 28 dias no Núcleo de Materiais e Tecnologias Sustentáveis (NUMATS) da COPPE/UFRJ. Foram ensaiados 3 corpos de prova de cada traço, totalizando 27 ensaios de absorção com blocos de concreto para piso intertravado.

Após atingir 28 dias de cura, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e imersos em água à temperatura de 23 ± 5 °C durante pelo menos 24 horas até atingir a saturação. Depois, removeu-se a água superficial e pesou-se os blocos na condição saturada com superfície seca, até que não fosse registrada uma diferença maior do que 0,5% entre duas pesagens sucessivas, realizadas com intervalos de 2 horas. Determinou-se, então, a massa saturada das amostras (m_2).

Em seguida, os blocos foram encaminhados para uma estufa a temperatura de 110 ± 5 °C até atingirem a constância de massa. Eles foram então pesados para determinar a massa seca (m_1).

A absorção de cada corpo de prova foi obtida através da seguinte equação:

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad \text{Eq. 6}$$

Segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013), blocos de concreto para pavimentação devem apresentar absorção de água com valor médio menor ou igual a 6%, não sendo admitido nenhum valor individual maior do que 7%.

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados dos diversos ensaios propostos no programa experimental descrito no item 4.1, avaliando a substituição do agregado miúdo natural por reciclado de RCD.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.1.1 Composição Granulométrica

As distribuições granulométricas obtidas para os agregados naturais utilizados na produção do concreto são mostradas na Figura 19. A dimensão máxima característica e o módulo de finura dos mesmos encontram-se apresentados na Tabela 5.

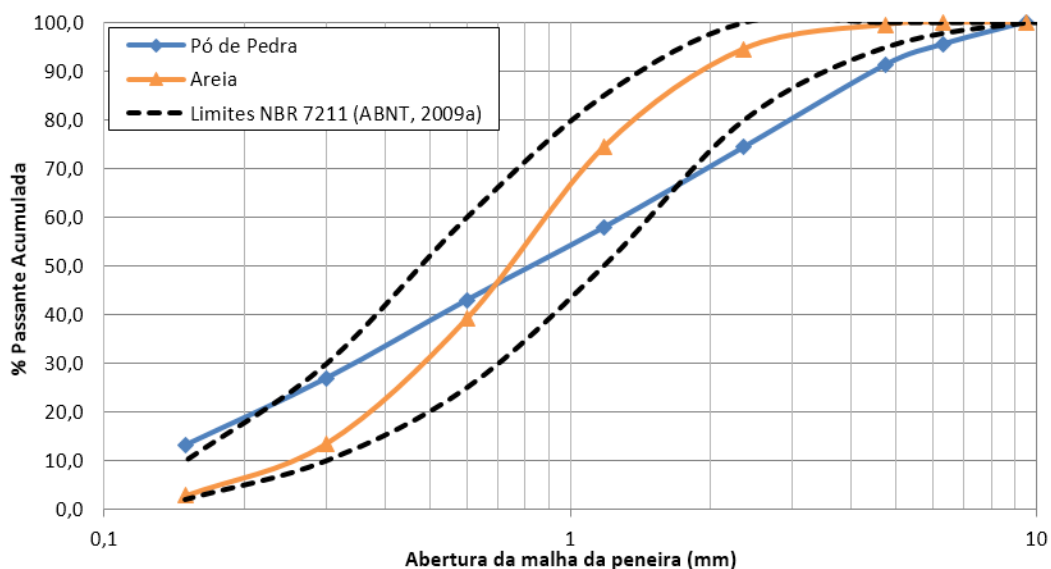


Figura 19 - Curvas granulométricas médias dos agregados naturais.

Tabela 5 – Parâmetros granulométricos dos agregados naturais (DMC: Dimensão máxima característica, MF: Módulo de finura).

	Pó de pedra	Areia
DMC (mm)	6,3	2,36
MF	3,98	3,76

Comparando as curvas granulométricas médias da areia e do pó de pedra (Figura 19), observa-se que até aproximadamente 0,80 mm o pó de pedra possui maior quantidade de grãos finos que a areia, mas a partir deste tamanho o mesmo passa a apresentar grãos mais grossos. Além disso, é possível constatar que a granulometria do pó de pedra encontra-se ligeiramente fora dos limites da NBR 7211 (ABNT, 2009a) nas aberturas de malha

inferiores a aproximadamente 0,25 mm e superiores a cerca de 1,8 mm, enquanto a distribuição granulométrica da areia situa-se inteiramente dentro dos limites estabelecidos em norma.

Nota-se também que o módulo de finura do pó de pedra é superior ao da areia. Ambos se encontram acima dos limites do módulo de finura da zona utilizável superior estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009a), que varia de 2,90 a 3,50. Quanto à dimensão máxima característica, o pó de pedra apresenta um valor maior do que a da areia, mas os dois agregados se encontram compatíveis com os limites da zona utilizável dos agregados miúdos definidos na NBR 7211 (ABNT, 2009a).

Em relação aos agregados reciclados, suas curvas granulométricas são apresentadas na Figura 20. A dimensão máxima característica e o módulo de finura dos mesmos encontram-se na Tabela 6.

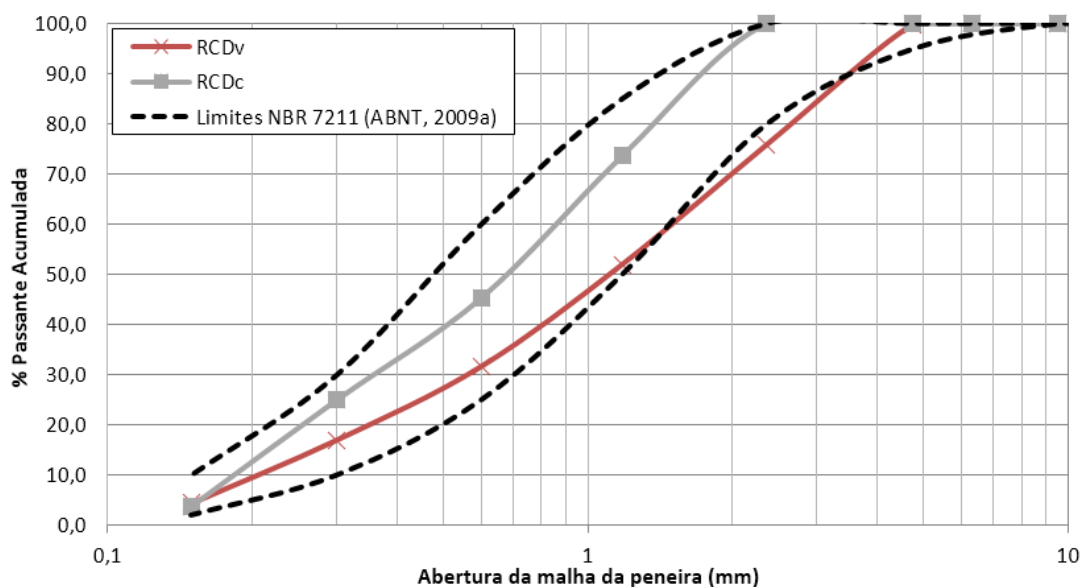


Figura 20 - Curvas granulométricas médias dos agregados reciclados

Tabela 6 – Parâmetros granulométricos dos agregados reciclados (DMC: Dimensão máxima característica, MF: Módulo de finura).

	RCDv	RCDc
DMC (mm)	2,36	2,36
MF	4,20	3,53

Considerando as distribuições granulométricas obtidas para os resíduos de construção e demolição usados no presente projeto, observa-se que os resíduos provenientes de estruturas de concreto (RCDc) são mais finos do que o resíduo originado de materiais cerâmicos (RCDv). É possível notar, também, que a curva granulométrica do

RCDv sai parcialmente das fronteiras definidas na NBR 7211 (ABNT, 2009a) ao passo que a distribuição granulométrica do RCDc encontra-se totalmente dentro dos limites da norma.

Além disso, o RCDc apresentou um módulo de finura inferior ao do RCDv, se mostrando mais fino que o RCDv, estando de acordo com as curvas granulométricas obtidas. Contudo, tanto o RCDc quanto o RCDv apresentaram um módulo de finura superior aos limites da zona utilizável superior estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009a). A dimensão máxima característica de ambos os agregados é equivalente e encontra-se de acordo com os limites da zona utilizável dos agregados miúdos definidos na NBR 7211 (ABNT, 2009a).

Uma comparação da distribuição granulométrica e os parâmetro obtidos no ensaio de granulometria dos quatro agregados encontram-se na Figura 21 e na Tabela 7, a seguir.

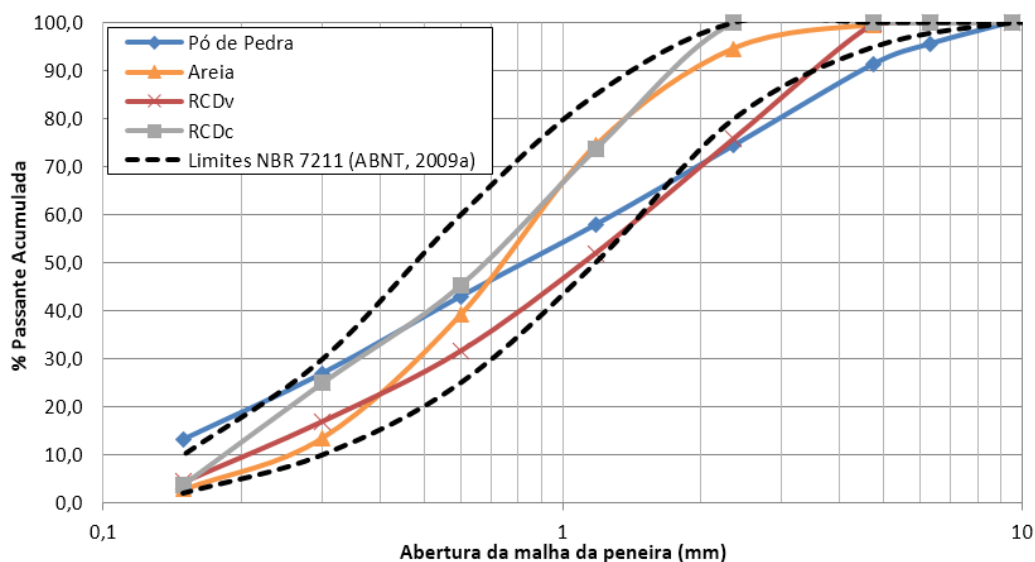


Figura 21 - Curvas granulométricas médias de todos os agregados utilizados.

Tabela 7 – Parâmetros granulométricos de todos agregados utilizados (DMC: Dimensão máxima característica, MF: Módulo de finura).

	Pó de pedra	Areia	RCDv	RCDc
DMC (mm)	6,3	2,36	2,36	2,36
MF	3,98	3,76	4,20	3,53

Comparando as curvas granulométricas médias da areia e a dos agregados reciclados, observa-se que até aproximadamente 0,40 mm o RCDv possui maior quantidade de grãos finos que a areia, mas a partir deste tamanho esse tipo de resíduo passa a apresentar grãos mais grossos. Em relação ao RCDc, constata-se que o mesmo apresenta grãos mais finos que a areia em toda a sua distribuição. Nota-se também que o módulo de finura do RCDv é superior ao da areia, que por sua vez é superior ao do RCDc e que as dimensões máximas

características dos três agregados em questão apresentaram o mesmo valor, sendo uma vantagem uma vez que acarreta em menos uma influência nos ensaios realizados posteriormente.

Em relação à distribuição granulométricas do pó de pedra e dos resíduos de construção e demolição, nota-se que o RCDv é mais grosso que o pó de pedra até cerca de 2 mm, mas após este tamanho há a presença de grãos mais finos no RCDv. Já o RCDc mostra-se mais grosso que o mesmo até cerca de 0,45 mm, mas a partir deste tamanho o RCDc passa a apresentar grãos mais finos. Assim como no caso da areia, o módulo de finura do RCDv é maior do que o do pó de pedra, que por sua vez é maior do que o do RCDc. Além disso, ambos os resíduos de construção e demolição apresentaram dimensão máxima característica inferior à do pó de pedra.

5.1.2 Absorção

A absorção de água obtida para todos os agregados está mostrada na Tabela 8.

Tabela 8 – Absorção dos agregados.

	Pó de pedra	Areia	RCDv	RCDc
Absorção (%)	2,91	1,66	22,96	20,95

A partir da Tabela 8, observa-se uma diferença discrepante entre os resíduos natural e reciclado - o valor da absorção dos resíduos de construção e demolição é cerca de sete a oito vezes maior que a absorção do pó de pedra e aproximadamente treze vezes maior do que a absorção da areia. Os resultados confirmam a maior absorção do material reciclado apontada pela bibliografia. Uma explicação para essa divergência é o fato dos RCD serem provenientes de materiais cerâmicos e de concretos e argamassas, que possuem alto teor de absorção de água (AMADEI, 2011; HOOD, 2006). Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009a), os limites de absorção dos agregados miúdos ficam a critério do consumidor.

5.1.3 Massa Específica Aparente

Os resultados dos ensaios de massa específica aparente encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 – Massa Específica Aparente dos agregados.

	Pó de pedra	Areia	RCDv	RCDc
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2,45	2,32	1,90	1,88

Nota-se que os resíduos de construção e demolição apresentam massa específica cerca de 20% inferior ao agregado natural, o que permite concluir que os resíduos de

construção e demolição apresentam uma densidade menor do que o agregado natural. Esses resultados corroboram os resultados encontrados no item anterior, tendo em vista que materiais capazes de absorver mais água são mais porosos e, desse modo, apresentam menor massa específica. Os resultados obtidos para o ensaio de massa específica aparente dos agregados naturais e reciclados estão conforme as conclusões obtidas por Hood (2006), Amadei (2011), Calçado (2015) e Julião (2016). Conforme descrito na NBR 7211 (ABNT, 2009a), os limites de massa específica dos agregados miúdos ficam a critério do consumidor.

5.2 DOSAGEM DO CONCRETO SECO

A partir dos resultados da caracterização dos materiais, foi possível desenvolver as misturas para a produção de concreto seco para piso intertravado. As proporções em massa de cada agregado foram determinadas com base na distribuição granulométrica contínua da combinação desses agregados, sendo balizada pelos limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009a) para agregados miúdos. O percentual dos agregados usados em cada combinação e a curva granulométrica de cada combinação são apresentados na Tabela 10 e na Figura 22, respectivamente.

Tabela 10 – Combinações dos agregados em cada mistura.

	AN+PP	AN+RCDv	AN+RCDc
Areia Natural - AN (%)	65	75	65
Pó de pedra - PP (%)	35	0	0
RCDv (%)	0	25	0
RCDc (%)	0	0	35

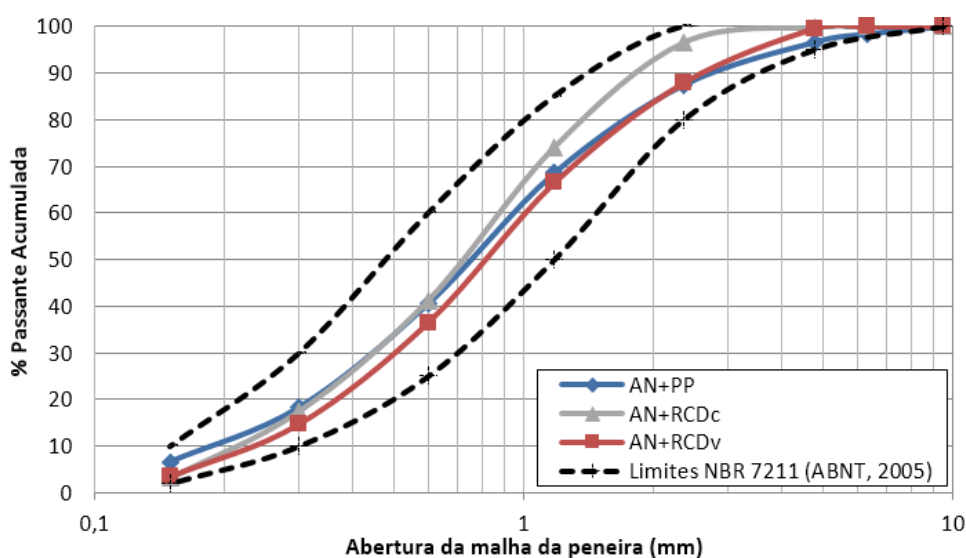


Figura 22 – Distribuição granulométrica da combinação dos agregados.

Cada combinação de agregados foi utilizada para a produção de concretos com três consumos diferentes de cimento e, conseqüentemente, três razões de água/cimento. A matriz de traços adotada na pesquisa encontra-se mostrada no Quadro 6, sendo obtida a partir de observações empíricas e dados da literatura.

Quadro 6 - Matriz de traços

		Família		
		1	2	3
Cimento (kg/m ³)		262,5	250,0	350,0
Fator a/c		0,49	0,24	0,21
Agreg.	AN+PP	TPP.1	TPP.2	TPP.3
	AN+RCDv	TRCDv.1	TRCDv.2	TRCDv.3
	AN+RCDc	TRCDc.1	TRCDc.2	TRCDc.3

O fator água/cimento e a quantidade de superplastificante - expressa em relação à massa de cimento - em cada traço baseou-se na observação empírica do Ponto de Pelota, de modo a garantir a consistência adequada para a vibro prensagem (Figura 14). Como a quantidade de água e de cimento são fixas, a massa total dos agregados em cada concreto foi calculada considerando as diferentes massas específicas de modo que o volume unitário da mistura fosse mantido. A proporção final de cada mistura é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 – Misturas de concreto seco estudadas

Nomenclatura	Cimento (kg/m ³)	a/c	SP (%)	Agregados (kg/m ³)			
				Areia natural	Pó de pedra	RCDc	RCDv
TPP.1	262,5	0,49	0,05	1208,8	650,9		
TPP.2	250,0	0,24		1234,0	664,5		
TPP.3	350,0	0,21		1168,3	629,1		
TRCDc.1	262,5	0,49		1293,2		431,3	
TRCDc.2	250,0	0,24		1323,0		441,0	
TRCDc.3	350,0	0,21		1252,8		417,6	
TRCDv.1	262,5	0,49		1101,1			592,9
TRCDv.2	250,0	0,24		1126,5			539,3
TRCDv.3	350,0	0,21		1066,8			478,1

5.3 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Esta seção objetiva apresentar os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e absorção nos blocos de concreto para pavimentação intertravada, avaliando a substituição do pó de pedra pelo agregado miúdo reciclado de RCD. Os resultados desses

ensaios serão analisados em dois conjuntos: o primeiro consiste na avaliação dos resultados de acordo com a família do traço (definida a partir do consumo de cimento e do fator água-cimento) e o segundo, conforme com o tipo de agregado utilizado junto à areia (pó de pedra, RCDc e RCDv).

Os ensaios de resistência à compressão e de absorção foram realizados conforme descrito no item 4.4. Os resultados obtidos para o ensaio de resistência à compressão e para o ensaio de absorção dos blocos de pavimento intertravado, apresentados nos itens a seguir, são correspondentes à idade de 28 dias. A resistência característica estimada foi determinada conforme o Anexo A da NBR 9781 (ABNT, 2013) e absorção de água foi calculada de acordo com o Anexo B da mesma norma. Todos os dados são apresentados com barras de erros de \pm desvio padrão.

Os resultados dos nove traços serão apresentados a seguir agrupados primeiro por família de traço e depois por tipo de agregado. Vale ressaltar que os dados analisados são os mesmos, sendo apenas agrupados de formas diferentes para facilitar a interpretação.

5.3.1 Resultados por família do traço

Considerando a divisão dos resultados por família de traços, observa-se que, para os traços da Família 1 (Figura 23), os blocos produzidos com RCD (TRCDv.1 e TRCDc.1) apresentaram resistência característica à compressão similar à mistura contendo pó de pedra (TPP.1). O traço TRCDv.1 apresentou resistência superior aos demais traços, sendo capaz de resistir a cerca de 21 MPa. Contudo, nenhuma das misturas da Família 1 atingiu resistência característica à compressão superior a 35 MPa aos 28 dias, conforme determinado pela NBR 9781 (ABNT, 2013) para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha.

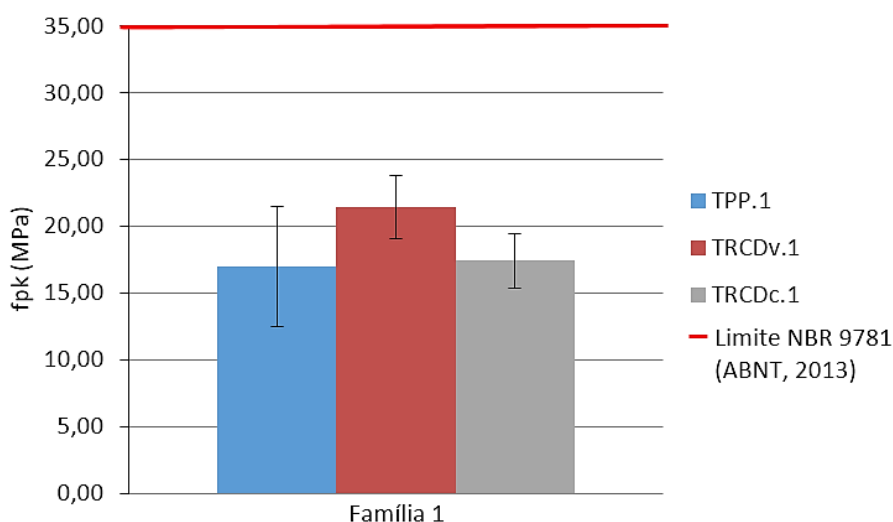


Figura 23 - Resistência à compressão característica estimada - Família de traços 1.

Em relação à absorção de água dos traços da Família 1 (Figura 24), nota-se que o traço TRCDv.1 apresentou o maior resultado, chegando a apresentar até cerca de 8,0% de absorção. As absorções obtidas para blocos com pó de pedra e RCDc foram equivalentes. De acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013), os blocos para pavimento intertravado para baixas solicitações devem apresentar uma absorção máxima de 6% para garantir durabilidade e a performance adequada, não sendo admitido nenhum valor individual superior a 7,0%. Diante dos resultados, verificou-se que os blocos produzidos com traços da Família 1 não apresentaram resultados satisfatórios com relação aos limites de absorção da norma brasileira.

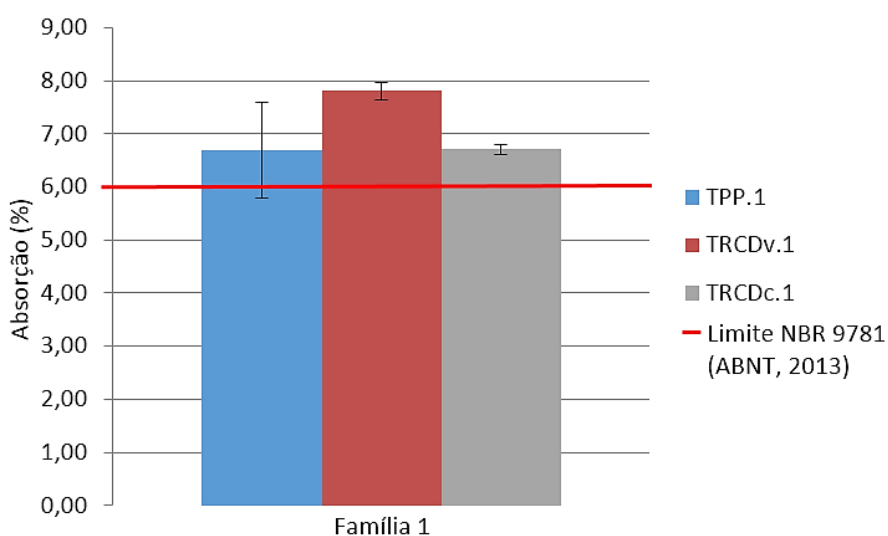


Figura 24 - Absorção de água - Família de traços 1.

A partir da avaliação dos resultados do ensaio de resistência à compressão dos blocos produzidos com os traços pertencentes à Família 2 (Figura 25), observa-se que os concretos com resíduos de construção e demolição (TRCDv.2 e TRCDc.2) não apresentaram diferenças significativas entre si, mas suas resistências foram maiores do que o concreto produzido com areia natural e pó de pedra (TPP.2). Os traços com RCD apresentaram resistência média de aproximadamente 25 MPa o que, segundo Hood (2006), os torna tecnicamente viáveis para serem usados em situações com baixas solicitações de tráfego. No entanto, independentemente do agregado utilizado, as misturas da Família 2 não satisfazem a resistência característica mínima de 35 MPa especificada pela norma brasileira.

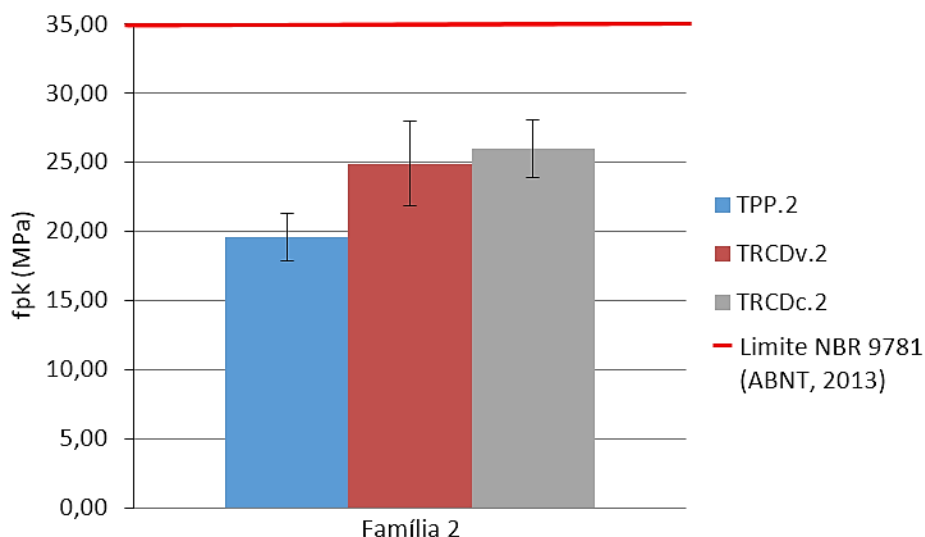


Figura 25 - Resistência à compressão característica estimada - Família de traços 2.

Analisando a absorção dos blocos da Família 2 (Figura 26), pode-se constatar que os traços contendo pó de pedra (TPP.2) e RCDc (TRCDc.2) foram praticamente equivalentes, enquanto o traço contendo RCDv foi o que apresentou o maior resultado, com absorção média próxima de 9,5%. Todas as misturas pertencentes à Família 2 apresentaram valores médios acima dos 7,0 %, estando em desacordo com os requisitos presentes na NBR 9781 (ABNT, 2013).

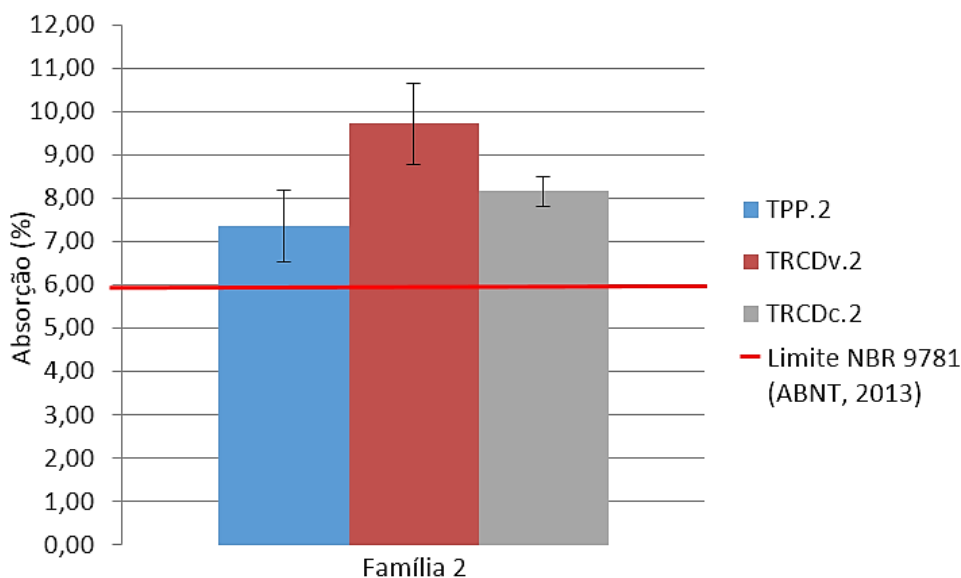


Figura 26 - Absorção de água - Família de traços 2.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão obtidos para as misturas da Família 3 (Figura 27) mostram que o concreto de referência, produzido com pó de pedra (TPP.3), apresentou resistência característica à compressão muito inferior aos traços contendo resíduos de construção e demolição (TRCDv.3 e TRCDc.3). Os traços com RCD

não apresentaram diferenças significativas entre si, obtendo uma resistência média próxima dos 35 MPa, sendo este o limite determinado pela NBR 9781 (ABNT, 2013).

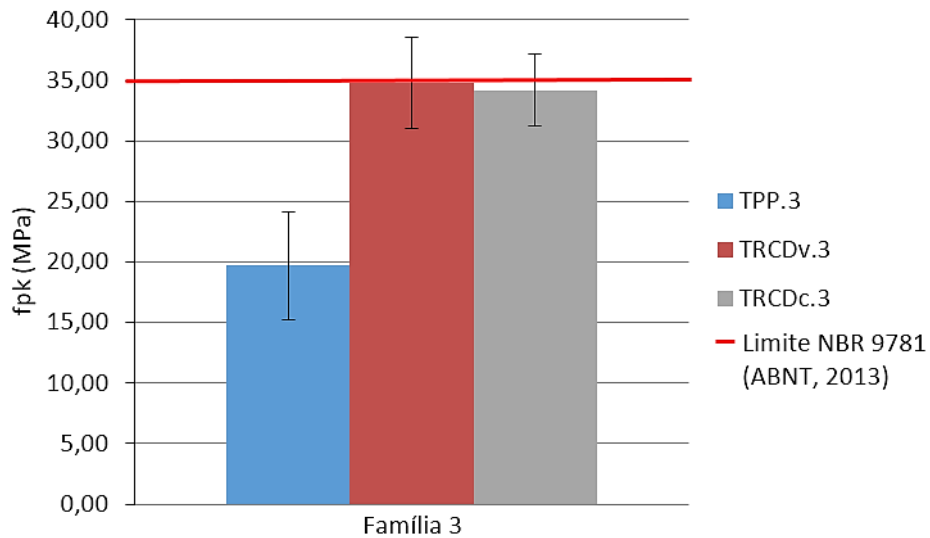


Figura 27 - Resistência à compressão característica estimada - Família de traços 3.

No que se refere à absorção das misturas da Família 3 (Figura 28), os concretos TPP.3 e TRCDc.3 apresentaram uma absorção muito elevada, chegando a apresentar resultados iguais ou superiores aos 9,0%. Já o concreto produzido com RCDv obteve absorção média de 6%, sendo o menor resultado encontrado para a família em questão. Destaca-se que o TRCDv.3 foi o único traço a apresentar valores de absorção compatíveis com o exigido na NBR 9781 (ABNT, 2013).

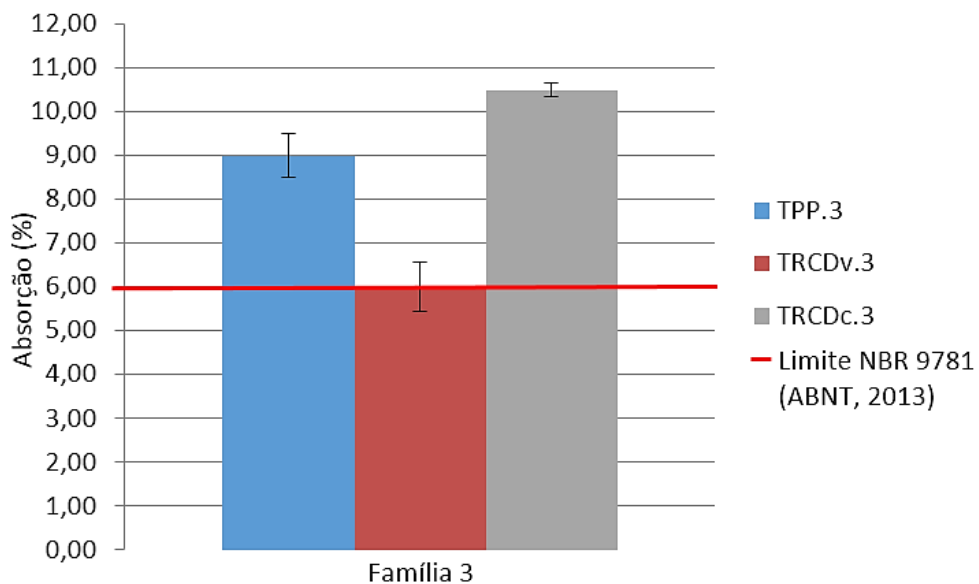


Figura 28 - Absorção de água - Família de traços 3.

5.3.2 Resultados por tipo de agregado

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão para os traços de referência (AN+PP) são mostrados na Figura 29. Observa-se que a resistência característica à compressão das misturas contendo pó de pedra não apresentou mudanças significativas com a alteração do fator água-cimento e a quantidade de cimento, sendo todas inferiores a 20 MPa. Desse modo, os blocos produzidos com pó de pedra não atingiram o valor determinado pela norma brasileira, isto é, acima de 35 MPa para a idade de 28 dias.

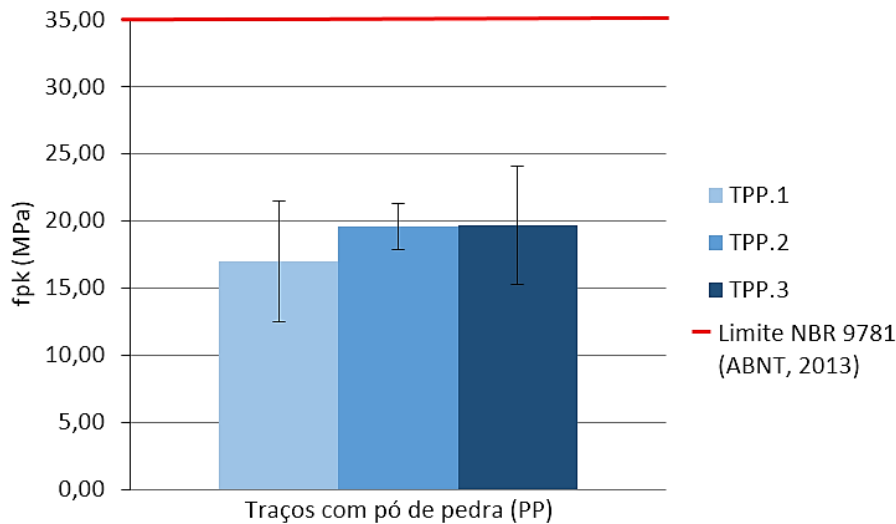


Figura 29 - Resistência à compressão característica estimada – Traços com pó de pedra.

Em relação à absorção dos blocos produzidos com os traços de referência Figura 30 nota-se que o traço relativo à Família 3, cuja relação água-cimento é a mais baixa, levou aos maiores valores de absorção. As misturas pertencentes às famílias 1 e 2 não apresentaram resultados muito diferentes entre si. Contudo, todos os traços apresentaram valores de absorção acima dos 6,0%, não se enquadrando nas exigências da norma brasileira.

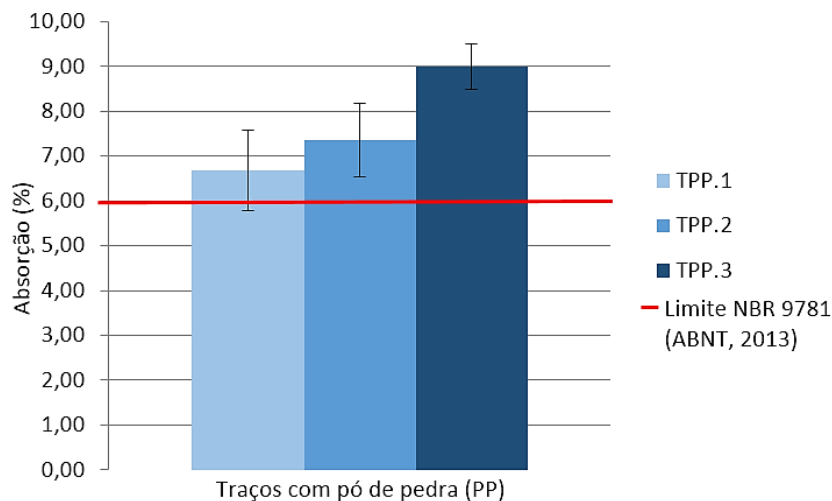


Figura 30 - Absorção de água – Traços com pó de pedra.

Analisando os resultados dos blocos produzidos com RCDv (Figura 31), verifica-se que, quanto menor a relação água-cimento da mistura, maior a resistência característica média obtida. Além disso, é possível constatar não que houve diferença significativa entre os resultados obtidos para os traços das Famílias 1 e 2. Já a Família 3 apresentou resistência característica de cerca de 35 MPa, valor muito superior aos alcançado pelas demais famílias e tecnicamente aceitável segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013).

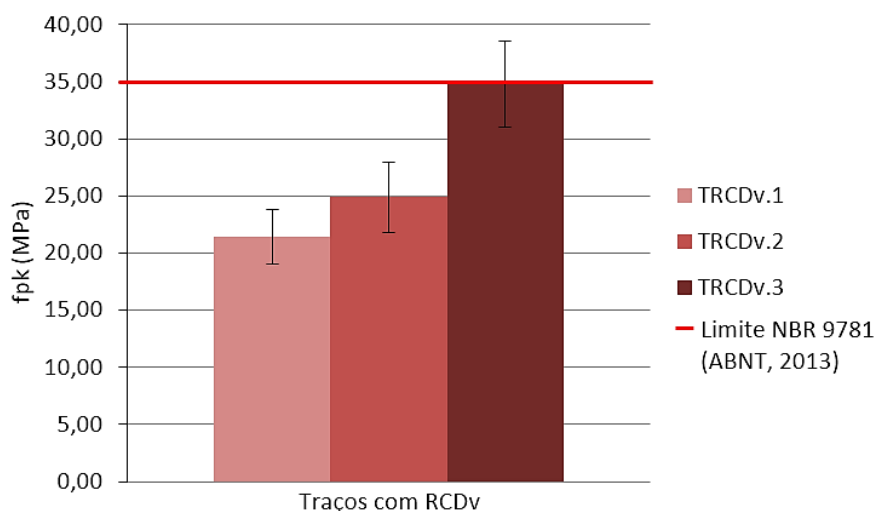


Figura 31 - Resistência à compressão característica estimada – Traços com RCDv.

No que diz respeito à absorção dos traços com RCDv (Figura 32), nota-se que a absorção do TRCDv.2 foi a maior de todas, com valor médio de aproximadamente 9,5%; seguida do TRCDv.1, cuja absorção alcançou cerca de 8%. A mistura que apresentou a menor absorção foi o TRCDv.3, que apresenta a menor relação água-cimento. A elevada absorção de água dos blocos com RCDv presumivelmente está relacionado à alta absorção apresentada pelo agregado reciclado utilizado.

A NBR 9781 (ABNT, 2013) exige uma absorção máxima de 6% dos blocos para pavimentos intertravados em situações de baixas solicitações. Desse modo, apenas o concreto TRCDv.3 apresentou resultados de absorção satisfatórios.

Os resultados de resistência à compressão dos traços contendo RCDc são mostrados na Figura 33. É possível observar que a resistência característica à compressão cresce com a redução do fator água-cimento. Desse modo, o TRCDc.3 foi o que apresentou o maior resultado, sendo capaz de resistir à, em média, cerca de 34 MPa. Apesar disso, os blocos com RCDc não atingiram os 35 MPa definidos em norma, sendo o TRCDc.3 o traço com maior possibilidade de alcançar esse valor.

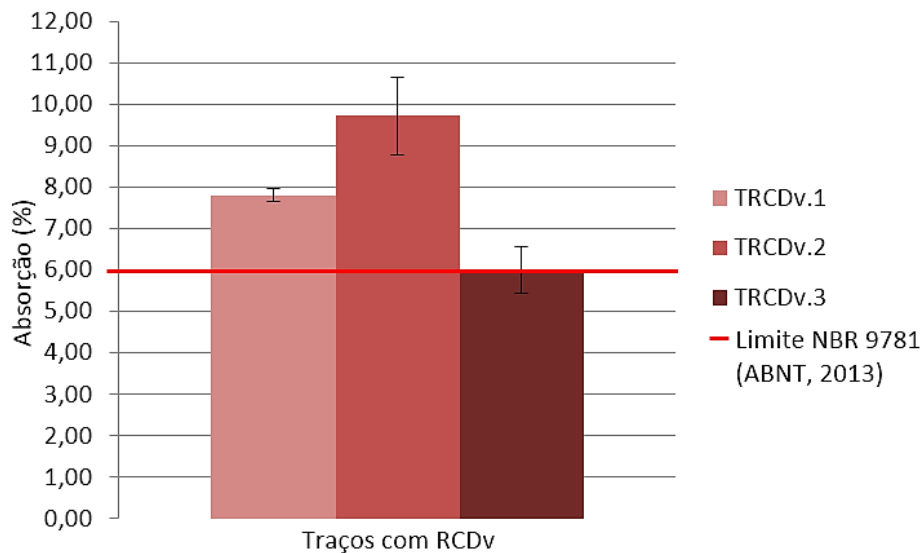


Figura 32 - Absorção de água – Traços com RCDv.

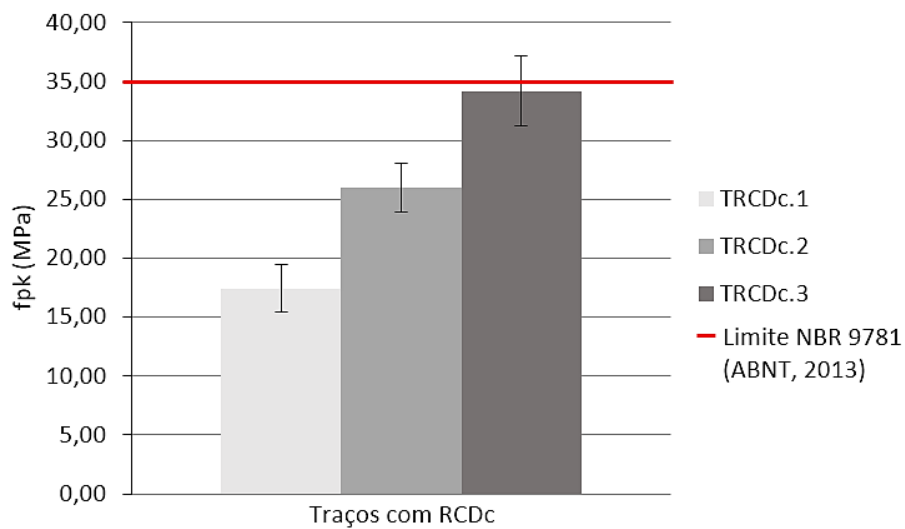


Figura 33 - Resistência à compressão característica estimada – Traços com RCDc.

A partir da avaliação dos resultados do ensaio de absorção dos blocos produzidos com resíduos provenientes de estruturas de concreto (RCDc), nota-se que, assim como na resistência à compressão, a absorção dos blocos aumenta com a diminuição do fator água-cimento das misturas. Todos traços com RCDc apresentaram resultados insatisfatórios, com valores de absorção superiores aos 6% exigidos na NBR 9781 (ABNT, 2013) para garantir a durabilidade e o desempenho adequado dos blocos para pavimento intertravado submetidos a baixas solicitações. A alta absorção de água dos blocos com RCDc possivelmente está associada à elevada absorção apresentada pelo agregado reciclado utilizado.

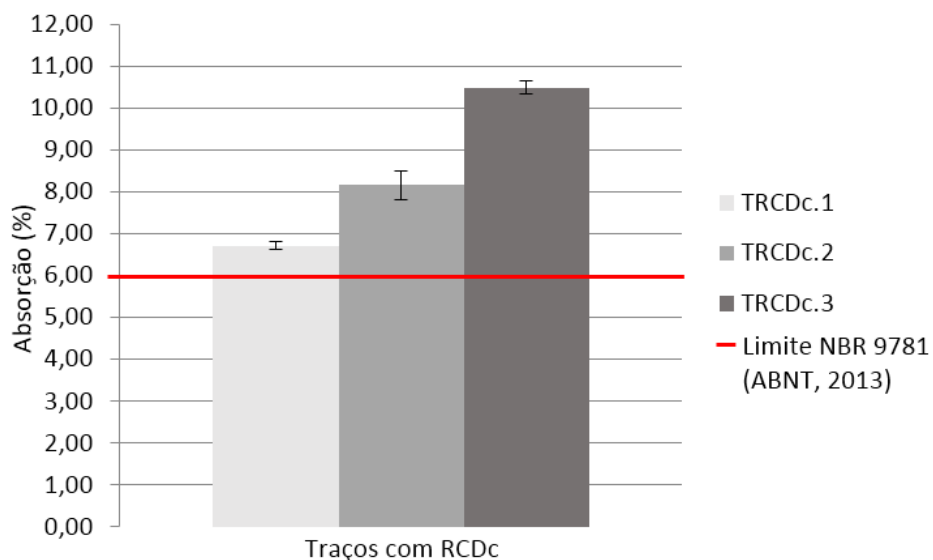


Figura 34 - Absorção de água – Traços com RCDc.

Diante dos resultados expostos nesse capítulo, cabe ressaltar que os blocos de concreto para pavimento intertravado foram moldados em uma vibro prensa pneumática, o que pode ter levado a valores de resistência à compressão abaixo das exigências da NBR 9781 (ABNT, 2013), mesmo com o aumento do consumo de cimento. A prática industrial é fabricar esses blocos em vibro prensas hidráulicas, que são consideradas mais eficientes na compactação do material (MARCHIONI, 2012).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo a análise da viabilidade técnica do uso de Resíduos de Construção e Demolição como agregado miúdo reciclado na fabricação de concreto seco para piso intertravado. Levou-se em consideração a influência dos diferentes agregados utilizados e a variação do consumo de cimento e dos fatores água-cimento sobre as propriedades do concreto no estado endurecido.

A pesquisa na literatura acerca dos Resíduos de Construção e Demolição, presente no Capítulo 2, evidenciou os impactos causados pela disposição inadequada dos mesmos, que constituem a parcela majoritária dos resíduos sólidos urbanos do país. A reutilização e a reciclagem dos RCD se apresentam como soluções capazes de minimizar esses danos, diminuindo a extração de recursos naturais e reduzindo o volume de resíduos que chega aos aterros sanitários.

O reaproveitamento dos Resíduos de Construção e Demolição na fabricação de peças de concreto para piso intertravado baseou-se nas diversas vantagens apresentadas por esse tipo de pavimento, expostas no Capítulo 3. No entanto, não existe uma metodologia consagrada para a dosagem de concreto seco, sendo utilizado, no presente trabalho, o método proposto por Füller e Thompson (1907) associado ao Método do Ponto de Pelota (HOOD, 2006; PAGNUSSAT, 2004; TANGO, 1994).

O programa experimental, apresentado no Capítulo 4, guiou a pesquisa aqui desenvolvida. Alguns procedimentos foram adotados visando minimizar a influência de variáveis externas nos resultados, entre eles a separação dos resíduos de acordo com a cor predominante (cinza e vermelho), a homogeneização do material e o peneiramento do mesmo, resultando em agregados reciclados com dimensões máximas próximas a dos agregados naturais.

Em relação à caracterização dos agregados, observou-se que as granulometrias dos agregados naturais e reciclados se encontram majoritariamente dentro dos limites estabelecidos em norma. A absorção de água apresentada pelos agregados reciclados foi muito superior à dos agregados naturais, enquanto a massa específica dos RCD se mostrou inferior à dos agregados naturais. Esses resultados estão coerentes tendo em vista que materiais capazes de absorver mais água são mais porosos e, desse modo, apresentam menor massa específica.

No concreto endurecido foram estudados os ensaios de resistência à compressão e de absorção de água dos blocos na idade de 28 dias. Na análise dos resultados, ficou

evidenciado que apenas a mistura TRCDv.3 apresentou valores de resistência à compressão e de absorção compatíveis com as exigências da NBR 9781 (ABNT, 2013). Vale ressaltar que os blocos de concreto produzidos no presente trabalho foram moldados em uma vibro prensa pneumática, cuja pressão de trabalho costuma ser inferior quando comparada às vibro prensas hidráulicas, muito utilizadas industrialmente. Isso pode ter levado a valores de resistência à compressão inferiores ao que se poderia obter caso fosse utilizada a vibro prensa hidráulica, considerada mais eficiente na vibro-compactação dos blocos.

Além disso, a mistura que apresentou resultados de resistência à compressão e de absorção satisfatórios pertence à família de traços 3, cujo consumo de cimento é de 350 kg/m³ de concreto, o que pode acabar por inviabilizar o produto em função do alto custo associado ao elevado consumo de cimento.

Com base nas informações apresentadas no presente trabalho, é possível concluir que a reciclagem de resíduos de construção e demolição em blocos de concreto para piso intertravado constitui uma alternativa viável tecnicamente para minimizar o impacto ambiental gerado pelo RCD, uma vez que a substituição do pó de pedra pelo agregado reciclado fornece uma destinação adequada a um rejeito que usualmente não seria mais aproveitado.

Outras variáveis podem ser estudadas no sentido de contribuir para ampliar o conhecimento acerca do uso de resíduos de construção e demolição e dos blocos de concreto seco. Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se citar o desenvolvimento de métodos para a dosagem de concretos secos com agregados reciclados considerando a alta absorção do mesmo; o estudo acerca do desgaste por abrasão dos blocos de concreto para pavimento intertravado produzidos com RCD; a avaliação da influência do superplastificante na dosagem dos concretos secos e a viabilidade econômica dos pavers produzidos com agregados reciclados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP. Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público. **Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público**, p. 36, 2010.

ABNT. **NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água**, 2001.

ABNT. **NBR NM 248: Determinação da composição granulométrica**, 2003.

ABNT. **NBR 10.004: Resíduos Sólidos - Classificação**, 2004.

ABNT. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**, 2009a.

ABNT. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**, 2009b.

ABNT. **NBR 15953: Pavimento intertravado com peças de concreto — Execução**, 2011.

ABNT. **NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio**, 2013.

ABNT. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 8, 2015.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017**. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf>. Acesso em: 30 set. 2018.

AMADEI, D. I. B. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição do município de Juranda/PR**. Universidade Estadual de Maringá, 2011.

AMARIO, M. **Caracterização física e mecânica de concreto leve estrutural contendo agregados de tijolos cerâmicos**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. Universidade de São Paulo, 2005.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S.; JOHN, V. **Desenvolvimento sustentável e reciclagem de resíduos na construção civil**. São Paulo, 2001.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. **Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil**. Cerâmica, 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132015000200178&lng=pt&tlng=pt>

CALCADO, G. C. DA S. **Influência da adição de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho de argamassas de cimento Portland**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

CARVALHO, G. M. **Levantamento de Resíduos Gerados pela Construção Civil na Cidade do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

CONAMA. **Resolução nº 307**, 2002.

DEPARTAMENTO DE RECURSOS MINERAIS - DRM - RJ. **Panorama Mineral do Estado do Rio de Janeiro**. Niterói, 2012. Disponível em: <<http://www.drm.rj.gov.br/index.php/downloads/category/79-panorama-mineral-2014?download=295%3Apanorama-mineral-do-estado-do-rio-de-janeiro-2012>>

FERREIRA, G. E.; SILVA, V. S. S. **Mercado Brasileiro de Agregados Minerais e o Estudo do CETEM para obtenção de Areia ManufaturadaIV Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción**. Tegucigalpa. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/images/congressos/2004/CAC01440004.pdf>>.

FRASSON JUNIOR, A. **Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

FULLER, W. B.; THOMPSON, S. E. **The law of proportioning concrete**. Vol. 23, 1907.

HOOD, R. DA S. 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**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas da população residente no Brasil e Unidades da Federação**. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2017/estimativa_dou_2017.pdf>. Acesso em: 14 out. 2018.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil 2012**. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120911_relatorio_construcao_civil.pdf>. Acesso em: 30 set. 2018.

JOHN, V. M. **Reciclagem de Resíduos na Construção Civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Universidade de São Paulo, 2000.

KARPINSKI, L. A. et al. **Gestão diferenciada de resíduos da construção civil** (EDIPUCRS, Ed.), Porto Alegre, 2009.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

LIMA, F. S. N. S. **Aproveitamento de resíduos de construção na fabricação de argamassas**. João Pessoa, PB, Brasil - Centro de Tecnologia/UFPB, 2005.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. Universidade de São Paulo, 1999.

MARCHIONI, M. L. **Desenvolvimento de técnicas para caracterização de concreto seco utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação intertravada.** Universidade de São Paulo, 2012.

MEDEIROS, J. S. **Alvenaria Estrutural não Armada de Blocos de Concreto: Produção de Componentes e Parâmetros de Projeto,** São Paulo, Escola Politécnica, 1993.

MORALES, G.; ANGULO, S. C.; CECILIATO, A. C. M. **Produção de concreto de cimento Portland utilizando entulho de obra reciclado.** Materiais de Construção, 2000.

OLIVEIRA, A. L. **Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação.** Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

PAGNUSSAT, D. T. **Utilização de Escória Granulada de Fundição (EGF) em Blocos de Concreto para Pavimentação.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

PINTO, T. DE P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, 1999.

PINTO, T. DE P.; GONZÁLES, J. L. R. **Manejo e Gestão de Resíduos da Construção Civil.** Brasília, 2005.

POON, C. S.; CHAN, D. Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 8, p. 569–577, 2006.

R. JULIÃO, N. **Comportamento reológico e mecânico de argamassas contendo resíduos de demolição como agregado miúdo.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

RECENA, F. A. P. **Dosagem empírica e controle de qualidade de concretos convencionais de cimento Portland.** EDIPUCRS ed. Porto Alegre.

SANTOS, A. DO N. DOS. **Diagnóstico da Situação dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) no Município de Petrolina (PE).** Recife, 2008.

SIMIÉLI, D. et al. Utilização de agregados reciclados em pavimentos intertravados. **Exacta**, v. 5, p. 231–241, 2007.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico do manejo de Resíduos Sólidos Urbanos.** Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos/diagnostico-rs-2016>>. Acesso em: 14 out. 2018.

SOUSA, J. **Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto-Aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado.** Universidade de Brasília, 2001.

TANGO, C. E. DE S. Fundamentos de dosagem de concreto para blocos estruturais. **5th International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries**, 1994.

VIEIRA, G. L.; MOLIN, D. C. C. D. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Sinduscon Premium 2003**,

v. 4, p. 47–63, 2004.

ZORDAN, S. E. **Entulho da Indústria da Construção Civil**. São Paulo: Universidade de São Paulo (USP), 2000.