



FUNDAÇÃO OSVALDO ARANHA
Centro Universitário de Volta Redonda
Pró-Reitora de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Mestrado Profissional em Materiais



Programa de Mestrado Profissional em Materiais

Dissertação de Mestrado

**PRODUÇÃO DE PAVER A PARTIR DO COMPÓSITO
DE CONCRETO COM REAPROVEITAMENTO DE
RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS NA CONSTRUÇÃO
CIVIL**

Aluno: Carlos Rogério de Oliveira Coutinho
Orientador: Ricardo de Freitas Cabral

Dezembro de 2016
Volta Redonda / RJ



FUNDAÇÃO OSVALDO ARANHA
Centro Universitário de Volta Redonda
Pró-Reitora de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Mestrado Profissional em Materiais



PRODUÇÃO DE PAVER A PARTIR DO COMPÓSITO DE CONCRETO COM REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Carlos Rogério de Oliveira Coutinho

Dissertação apresentada no Centro Universitário de Volta Redonda, para obtenção do título de Mestre em Materiais, sob a orientação do prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral, na área de concentração de processamentos e caracterização de materiais, linha de pesquisa de materiais cerâmicos.

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tação Wagner - CRB 7/RJ 4316

C871p Coutinho, Carlos Rogério de Oliveira.
Produção de paver a partir do compósito de concreto com
reaproveitamento de resíduos sólidos gerados na construção civil. / Carlos
Rogério de Oliveira Coutinho - Volta Redonda: UniFOA, 2016.

72 p. : II

Orientador(a): Ricardo de Freitas Cabral

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em
Materiais, 2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

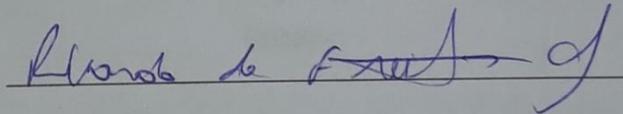
Aluno: Carlos Rogério de Oliveira Coutinho

**PRODUÇÃO DE PAVER A PARTIR DO COMPÓSITO DE CONCRETO COM
REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS NA
CONSTRUÇÃO CIVIL**

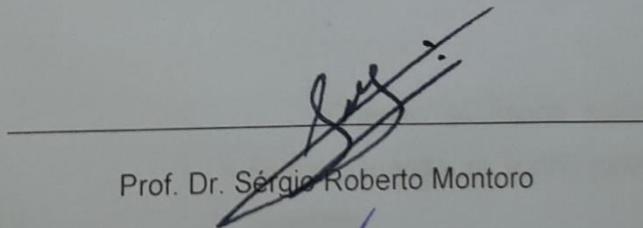
Orientador:

Prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral

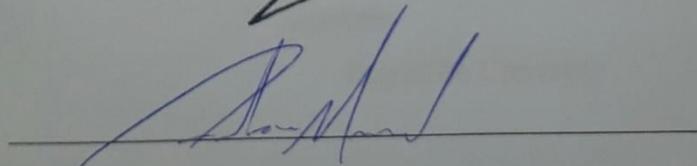
Banca Examinadora



Prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral



Prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro



Prof. Dr. Rubens Lincoln Santana Blazutti Marçal

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus.

Agradeço a minha família pelo apoio e dedicação.

E ao meu Orientador Professor Dr. Ricardo de Freitas Cabral, pelos ensinamentos e dedicação dispensados no auxílio à concretização desse trabalho.

Muito obrigado!

“Quando se sonha sozinho é apenas um sonho. Quando se sonha juntos é o começo da realidade”

Miguel de Cervantes

RESUMO

A preocupação com o meio ambiente tem levado a sociedade à uma busca de alternativas de um crescimento mais sustentável. Dentro desse cenário, a reciclagem de resíduos surge como uma possibilidade promissora na diminuição dos impactos ambientais. Neste contexto se englobam os resíduos de construção civil. Um grande desafio do setor é transformar em uma fonte alternativa de matéria prima. Deste modo tem-se tentado incorporar o uso do concreto reciclado com substituição dos agregados naturais por agregados reciclados oriundos do beneficiamento do resíduo de construção. A utilização de resíduos de construção apresenta-se como uma alternativa de reciclagem, de redução de custos e de matéria prima. A Resolução 307 do CONAMA determina que todos os municípios devem dar uma destinação ambientalmente correta aos resíduos gerados nas construções. Nesta pesquisa foram realizadas análises das propriedades mecânicas do compósito de concreto, objetivando seu emprego na produção de paver de concreto. Com substituição dos agregados graúdos naturais pelos agregados graúdos de mesma granulometria provenientes de reciclagem de resíduos de construção civil em porcentagens crescentes. Foram realizados ensaios de concreto fresco de trabalhabilidade, Slump Teste NBR 7233, teor de absorção NBR 9728, resistência à compressão segundo a NBR 12118:2007, aos 07, 14 e 28 dias de idade e resistência a tração aos 28 dias. Os valores apresentados pelo ensaio de resistência à compressão foram influenciados pelas porcentagens crescentes na substituição de resíduo de construção de demolição (RCD) na mistura de 40%, 60% 100%. Também foram realizados ensaio de MEV, microscópico eletrônico de varredura por elétrons secundários. Esta pesquisa aponta o grande potencial do aproveitamento desse material em substituição aos agregados naturais utilizados na produção de paver. Obtendo-se os resultados de resistência à compressão aos 28 dias 37,18 MPa para o agregado 100% natural, 32,47 MPa para o agregado 40% de adição de RCD, 27,08 MPa para o agregado 60% de adição de RCD e 19,13 MPa para o agregado 100% de adição de RCD.

Palavras-Chave: Concreto Reciclado, Resíduo Sólidos, Produção de Paver.

ABSTRACT

Concern for the environment has led society to seek alternatives for more sustainable growth. Within this scenario, the recycling of waste appears as a promising possibility in the reduction of environmental impacts. In this context, construction waste is included. A major challenge for the industry is to transform into an alternative source of raw materials. In this way we have tried to incorporate the use of the recycled concrete with substitution of the natural aggregates by recycled aggregates from the beneficiation of the construction residue. The use of construction waste presents itself as an alternative of recycling, cost reduction and raw material. Resolution 307 of CONAMA establishes that all municipalities must give an environmentally correct destination to the residues generated in the constructions. In this research were carried out analyzes of the mechanical properties of the concrete composite, aiming its use in the production of concrete paver. With replacement of the natural aggregates by the large aggregates of the same granulometry coming from recycling of construction waste in increasing percentages. The tests were carried out on fresh concrete of workability, Slump Test NBR 7233, absorption content NBR 9728, compressive strength according to NBR 12118: 2007, at 07, 14 and 28 days of age and tensile strength at 28 days. The values presented by the compressive strength test were influenced by the increasing percentages in the substitution of demolition construction residue (RCD) in the 40%, 60% 100% mixture. Also performed SEM test, scanning electron microscopy by secondary electrons. This research indicates the great potential of the use of this material in substitution of the natural aggregates used in the production of paver.

The results were obtained at 28 days 37.18 MPa compressive strength for the 100% natural aggregate, 32.47 MPa for the aggregate 40% RCD addition, 27.08 MPa for the aggregate 60% RCD addition and 19.13 MPa for the 100% addition of RCD aggregate.

Keywords: Recycled Concrete, Solid Waste, Paver Production.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01:	Exemplo de pavimentação de urbanismo e sistema de drenagem.....	12
Figura 02:	Resíduo de construção civil descartado inadequadamente em via pública. Barra da Tijuca – RJ	14
Figura 03:	Tipo de pavimento em paver, utilizados em passeio público. Recreio dos Bandeirantes – RJ	15
Figura 04:	Modelo de paver, bloco de concreto pré-Moldado	19
Figura 05:	Via Appia em Roma.	20
Figura 06:	Pavimento de paver de concreto em execução no shopping Outlet Premium no município de Duque de Caxias – RJ	21
Figura 07:	Cortes esquemáticos dos tipos de seções estruturais usados para pavimentação com blocos de paver de concreto.	22
Figura 08:	Corte esquemático de pavimentação paver semipermeável com tubos drenagem junto ao meio-fio.	22
Figura 09:	Etapa de assentamento dos blocos paver de concreto shopping Outlet Premium no município de Duque de Caxias – RJ	23
Figura 10:	Pavimentação de acesso ao Condomínio residencial Bom Jardim Recreio dos Bandeirantes – RJ	23
Figura 11:	Pavimentação com blocos vazados de concreto.	24
Figura 12:	Corte esquemático do Pisograma.	25
Figura 13:	Chanfro das peças de paver	31
Figura 14:	Aspecto das arestas das peças de paver	32
Figura 15:	Ângulo de inclinação	32
Figura 16:	Agregado Miúdo Natural	35
Figura 17:	Agregado Graúdo Natural	35
Figura 18:	Agregado Graúdo Reciclado	36
Figura 19:	Fluxograma do método aplicado	37
Figura 20:	Peneiramento em Malha de 4,8 a 19 mm	38
Figura 21:	Ensaio de Slump Test	39
Figura 22:	Ensaio de Slump Test	39
Figura 23:	Moldagem de corpos de Prova	40
Figura 24:	Cura úmida do corpo de prova	40
Figura 25:	Ensaio de Resistencia à Compressão	41
Figura 26:	Ensaio de Resistencia à Tração	41
Figura 27:	Estufa utilizada para aquecimento dos corpos de prova	44
Figura 28:	Balança para medição dos corpos de prova	44
Figura 29:	MEV HITACHI TM 3.000	49
Figura 30:	Ensaio de Compressão, Média e Desvio Padrão de 7 dias	51
Figura 31:	Ensaio de Compressão, Média e Desvio Padrão de 14 dias	52
Figura 32:	Ensaio de Compressão, Média e Desvio Padrão de 28 dias	53
Figura 33:	Gráfico de evolução ao longo das idades dos CPs	53
Figura 34:	Ensaio de Tração, Média e Desvio Padrão de 28 dias	54
Figura 35:	Cálculo de Absorção de Água, Média e Desvio Padrão	56
Figura 36:	MEV 28 dias 100% natural, 100%RCD, 40%RCD e 60% RCD (300x)...	57
Figura 37:	MEV 28 dias 100% natural, 100%RCD, 40%RCD e 60% RCD (500x) ..	58
Figura 38:	MEV 28 dias 100% natural, 100%RCD, 40%RCD e 60% RCD (1000x)	59
Figura 39:	MEV 28 dias 100% natural, 100%RCD, 40%RCD e 60% RCD (2000x).	60
Figura 40:	MEV 28 dias 100% natural, 100%RCD, 40%RCD e 60% RCD (3000x).	61
Figura 41:	MEV 28 dias 100% natural, 100%RCD, 40%RCD e 60% RCD (5000x).	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Ensaio Físicos do Cimento CII32	30
Tabela 2:	Ensaio Químicos do Cimento CII32	30
Tabela 3:	Resistencia característica à compressão	33
Tabela 4:	Ensaio de Compressão 7 dias	50
Tabela 5:	Ensaio de Compressão 14 dias	51
Tabela 6:	Ensaio de Compressão 28 dias	52
Tabela 7	Ensaio de Tração 28 dias	54
Tabela 8:	Ensaio de Absorção de Água	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Areia.

a.C. - Antes de Cristo.

a/c – Relação água/cimento.

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

C – Cascalho.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente.

CP – Corpo de Prova.

ICPI – Interlocking Concrete Pavement Institute.

kg/m³ - Quilograma por metro cúbico.

km – Quilometro.

MEV – Microscópico eletrônico de Varredura

MPa – Megapascal.

MPa/s – Megapascal por segundo.

NBR – Norma Brasileira de Regulamentação.

°C – Grau Celsius

PP – Pó de Pedra.

RCC – Resíduo de Construção Civil.

RCD – Resíduo de Construção de Demolição.

INDICE

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVO.....	16
3. JUSTIFICATIVA.....	17
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1 Histórico do paver	21
4.2 Índice de impermeabilização do solo urbano	27
4.3 Estrutura e propriedade do concreto	29
4.4 Cimento portland composto com escória (CP II - E 32)	32
4.5 Peças de concreto	34
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
5.1 Materiais	36
5.1.1. Aglomerante.....	36
5.1.2 Agregados.....	37
5.2 Métodos	39
5.2.1 Composição dos Traços	40
5.2.2 Ensaio de Slump Test	41
5.2.3 Moldagem	41
5.2.4 Cura	42
5.2.5 Ensaio de Resistência à Compressão - CP Cilíndrico 10x20.....	43
5.2.6 Ensaio de Resistência à Tração - CP Cilíndrico 10x20.....	44
5.2.7 Absorção por Imersão	46
5.2.8 Índice de vazios	46
5.2.9 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	50
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
6.1 Resistência à Compressão	51
6.1.1 Ensaio de Compressão para Idade de 7 dias	51
6.1.2 Ensaio de Compressão para idade de 14 dias	52
6.1.3 Ensaio de Compressão para idade de 28 dias	53
6.2 Resistência à Tração	55
6.2.1 Ensaio de Tração para Idade de 28 dias	55
6.3 Absorção de Água por Imersão	56
6.4 Eletrônica de Varredura	58
7. CONCLUSÕES.....	64
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável se tornou uma grande preocupação para a Indústria de Construção Civil, uma vez que, o setor é responsável pelo consumo de uma grande quantidade de recursos naturais e por grande parte dos impactos ambientais devido às suas atividades.

Presume-se que são geradas cerca de 2 a 3 bilhões de toneladas de entulho de obra por ano em todo o mundo. No Brasil, as estimativas pontuais mostram uma geração de 220 a 670 quilos de entulho de obra por habitante. Só a indústria de construção civil gera na cidade de São Paulo 90.000 metros cúbicos de entulho por mês, sendo que esse valor corresponde somente ao material que chega em aterros oficiais. Uma das alternativas promissoras para diminuição dos impactos ambientais, do grande consumo de recursos naturais gerados pela construção civil e dos problemas urbanos atuais gerados por demolições, é o uso de concreto reciclado, com substituição dos agregados naturais por agregados reciclados oriundo do beneficiamento do resíduo de construção e demolição (LEITE, 2011).

A construção civil é uma das atividades mais antigas que se tem conhecimento e desde os primórdios da humanidade foi executada de forma artesanal, gerando como subproduto grande quantidade de resíduos de diversas naturezas. É também responsável pelo consumo excessivo de recursos naturais provenientes de fontes não renováveis. Entretanto este é um dos setores que apresenta maior potencial para absorver os resíduos sólidos (LEITE, 2011).

A reciclagem dos resíduos de construção na forma de agregados é uma importante alternativa para a redução do impacto ambiental e para sua preservação.

A Resolução nº 307 do CONAMA (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE) estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, visando proporcionar benefícios de ordem social, econômica e ambiental. Em 16 de agosto de 2004, entrou em vigor a Resolução nº 348 do CONAMA que altera o art. 3º, item IV, da Resolução CONAMA nº 307.

Considerando-se que os resíduos dessa natureza representam um significativo percentual dos resíduos sólidos produzidos nas áreas urbanas e que a disposição de resíduos da construção civil em locais inadequados contribui para a degradação da qualidade ambiental, os municípios são os responsáveis pela gestão e destinação ambientalmente correta de tais resíduos buscando a efetiva redução dos impactos ambientais.

Segundo as Resoluções nº 307 e nº 348 os resíduos da construção civil são classificados em quatro classes:

I - Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;

b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;

III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;

IV - Classe D - são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros bens como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

No Brasil, as empresas de reciclagem separam dos resíduos de construção, os seus contaminantes como madeira, plásticos e metais não ferrosos manualmente e empregam o agregado reciclado geralmente na construção de base para pavimentação. Um desses produtos, utilizados em larga escala, é o concreto. Presente na maioria das construções, o mesmo oferece a versatilidade de permitir a incorporação de diferentes materiais para a melhoria de suas características físicas, bem como a inclusão de resíduos industriais em sua mistura. Neste último caso, a sua destinação deve ser controlada, devido às mudanças de suas características físicas convencionais. Os pavimentos utilizando Paver de Concreto são executados com uso de blocos de concreto pré-fabricados, aplicados sobre uma estrutura de bases e leitos, previamente dimensionados, de acordo com as solicitações impostas pelo seu futuro uso. Além disso, é um pavimento considerado semipermeável, porque permite que parte das águas pluviais sejam absorvidas pelo solo, conforme figura 1, atuando em conjunto com o sistema de drenagem urbana (IBRACOM, 2012).

Figura 1: Exemplo de pavimentação de urbanismo e sistema de drenagem.



Fonte: http://aconstrutoravion.blogspot.com.br/2015_10_01_archive.html

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho teve como objetivo produzir o paver a partir do compósito de concreto oriundo da reciclagem dos resíduos sólidos (RCD), e assim, verificar a sua viabilidade obtidos por processos de britagem e peneiramento de modo a adequá-lo para a substituição de agregados graúdos naturais do concreto.

Para a análise da viabilidade, teve como objetivos principais:

- ✓ Desenvolver o paver a partir do RCD como agregado graúdo.
- ✓ Caracterizar o paver desenvolvido;
- ✓ Avaliar as alterações nas propriedades do concreto em estado fresco (trabalhabilidade);
- ✓ Avaliar as alterações nas propriedades físicas do concreto endurecido. (Resistência mecânica à compressão e a tração e teor de absorção de água).
- ✓ Comparar os resultados do paver desenvolvido ao traço de agregado graúdo natural.
- ✓ Caracterizar a microestrutura por meio de técnica de MEV, por elétrons secundários.

1.2 JUSTIFICATIVA

Com a crescente necessidade de tornar as atividades econômicas cada vez mais sustentáveis e proporcionar maior reaproveitamento de materiais oriundos de processos construtivos, o presente projeto vem como uma possível alternativa para suprir essas necessidades dentro da problemática do desperdício na construção civil.

A possível reutilização de entulhos e rejeitos, que seriam descartados em locais onde poderiam agredir o meio ambiente, como agregados para concreto torna-se uma alternativa muito viável para o problema em questão, bem como para suprir a demanda de agregados existente no mercado, tornando o setor da construção civil menos danoso ao meio ambiente. Com a falta de políticas eficientes de coleta e tratamentos adequados de rejeitos gerados pela construção civil, figura 2. A utilização dos resíduos sólidos gerados na construção civil, vem aumentar as principais alternativas, devido ao grande número de obras e indústrias que utilizam esse material.

Figura 2: Resíduo de construção civil descartado inadequadamente em via pública. Barra da Tijuca – RJ



Fonte: (AUTOR 2016).

Portanto, observa-se um ótimo potencial para o uso deste resíduo em qualquer componente de concreto pré-moldado que não tenha funções estruturais, como pisos

para pedestres, alvenarias de vedação, elementos vazados, elementos para tratamento acústico etc.

Pode-se, então, citar algumas contribuições, no âmbito da Engenharia Urbana, que valorizam os blocos de paver de concreto, figura 3. Inicialmente verifica-se a possibilidade deste produto de incorporar o RCD em sua composição, respeitando algumas condições, quanto ao seu uso final. Em segundo plano, trata-se de um sistema construtivo que ameniza impactos causados ao meio ambiente, por ser caracterizado como um pavimento semipermeável. Os mesmos permitem a absorção das águas pluviais pelo solo, através das juntas dos blocos, e contribuem para o bom funcionamento do sistema de drenagem urbana, resultando em pavimentações semipermeáveis figura 3. Sendo assim, pode-se estudar o uso destes blocos para a pavimentação de calçadas e de passeios públicos, tentando atender requisitos das normas brasileiras (IBRACOM, 2012).

Figura 3: Tipo de pavimento em paver, utilizados em passeio público. Recreio dos Bandeirantes – RJ



Fonte: (AUTOR 2016).

Destacam-se, aqui, a originalidade e a relevância da presente pesquisa, que está inserida na área de Gerenciamento e Reutilização de Resíduos, sendo o resultado esperado uma contribuição ao avanço do conhecimento sobre o potencial de aproveitamento dos resíduos de RCD, bem como sobre o comportamento do produto proposto.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa bibliográfica foi realizada objetivando um maior número possível de informações sobre o tema, principalmente relacionados às propriedades estudadas (resistência à compressão e módulo de elasticidade). Também foram apresentados alguns tópicos referentes à influência do tipo de agregado nas características do concreto (LORENZI, 2009).

A indústria da construção civil tem sido responsável por cerca de 20% dos recursos naturais e, nesse contexto, a utilização de resíduos como substituição das matérias primas pode reduzir a quantidade dessa extração, substituindo, em grande parte, os agregados naturais empregados em concretos, argamassas, blocos, paver, barreiras de contenção e bases para pavimentação (MOTTA, 2005).

Os agregados para concretos são classificados como artificiais ou naturais, sendo artificiais as areias e pedras provenientes da britagem de rochas. Como exemplos de naturais, podem ser citados as areias extraídas de rios ou barrancos e os seixos rolados (MOTTA, 2005).

Outro fator que define a classificação dos agregados é sua massa unitária (ou massa específica aparente), podendo ser divididos em leves (argila expandida, pedraposes, vermiculita), normais (pedras britadas, areias, seixos) e pesados (hematita, magnetita, barita). Agregados que pesam menos que 1.120 kg/m^3 são geralmente considerados leves e encontram aplicação na produção de vários tipos de concretos leves. Os normais possuem densidade de 1.520 a 1.680 kg/m^3 e produzem o “concreto normal” com aproximadamente 2.400 kg/m^3 de peso unitário. Comparado ao agregado de peso normal, o concreto pesado varia de 2.900 a 6.100 kg/m^3 . Entretanto, como agregado na produção do concreto para elementos de pavimentação e outras aplicações diretamente sobre o terreno, além das vantagens de ordem ecológica, contribuiria também para maior estabilidade da pavimentação, na medida em que constituiria pavimentos com peso próprio pouco maior e menos sujeitos a deformações decorrentes das solicitações externas (LEVY, 2010).

Embora os resíduos industriais possuam diversas aplicações em construções de estradas e pavimentos, as vantagens de suas aplicações não são frequentemente entendidas, uma vez que a maioria dos resíduos não são regulamentados e os

mesmos, geralmente, são aplicados de acordo com soluções individuais (LEVY, 2010).

Os pavimentos intertravados são compostos por peças pré-moldadas de concreto e constituem eficaz solução para uso em ruas, calçadas, calçadões e praças, estando esse mercado em crescimento no Brasil, tanto na construção como na reconstrução e reabilitação desse tipo de instalação urbana, quando adequadamente instalados, os pavimentos resistem à sua movimentação, afundamento ou quebra, possibilitando, dessa forma, que se tenha uma excelente superfície para caminhar, andar de bicicleta, promover trânsito de carros, caminhões, e até mesmo de empilhadeiras industriais (OLIVEIRA, 2007).

O emprego de peças furadas é ecologicamente correto, pois os furos permitem o retorno das águas de chuva para o solo, evitando sua perda com o escoamento. Quando pigmentados favorecem marcações permanentes em estacionamentos, em cruzamentos de pedestres, pistas de tráfegos e outras áreas que necessitam de identificação. Possuem manutenção simplificada, pois as peças do pavimento são recolocadas nos seus locais originais após o reparo, sem necessidade de outras adicionais. (LEVY, 2001).

No Brasil, a técnica de pavimentos intertravados surgiu nos anos 70, mas sua aplicação muitas vezes não obedeceu aos critérios técnicos mínimos necessários recomendáveis, prejudicando a imagem dos elementos de concreto para a pavimentação. Enquanto isso, em diversos outros países, cresceu o emprego do pavimento com peças pré-moldadas de concreto, notando-se grande desenvolvimento nas técnicas de dimensionamento, construção, materiais e também na normalização. Segundo Copel (2016) os principais benefícios da aplicação do pavimento com pavers de concreto tanto para o tráfego de pessoas como para veículos pesados são: permeabilidade e conforto térmico; utilização imediata com liberação do tráfego logo após sua aplicação; facilidade de manutenção, remoção e reutilização; segurança, uma vez que sua superfície é antiderrapante; versatilidade arquitetônica, apresentando vários tipos, cores e combinações; fácil assentamento e alta durabilidade.

A inexistência de limitações quanto à capacidade de suporte do pavimento, aliada às muitas opções de formato, padrões, cores e matizes disponíveis para permitir infindáveis possibilidades estéticas assegura à pavimentação êxito absoluto em praças, parques, jardins, calçadas, estacionamentos, vias urbanas, pátios,

depósitos, galpões industriais, estradas, acostamentos, entre outros. Conforme Piorottil (2005), a vida útil do pavimento pré-moldado de concreto é bastante elevada.

Considerando projetos apropriados para sub-base, elementos de boa qualidade e adequado assentamento, pode-se ter uma pavimentação com vida útil de pelo menos 25 anos. Os blocos para pavimentos (também chamados de pavers ou pavimentos intertravados de concreto) apresentam deformação vertical inferior aos pavimentos flexíveis (asfálticos) de mesma espessura. A norma brasileira NBR 9781 define características, dimensões e outros requisitos a serem observados relativamente a este material (FIORIT, 2011).

4.1 Histórico do paver

Entre os materiais utilizados na pavimentação urbana, industrial ou rodoviária estão os solos com maior capacidade de suporte, os materiais rochosos, como pedras britadas ou calçamento, o concreto de cimento Portland e o concreto asfáltico (LEITE, 2011).

Uma das primeiras formas de pavimentação foi a calçada romana, construída em várias camadas. Esta grande obra de engenharia permitiu a que vários trechos tenham resistido durante séculos e se encontrem ainda hoje (LEITE, 2011).

As principais funções de pavimento segundo a NBR 7207 “Terminologia e classificação de pavimentação” (ABNT-1992) são:

- ✓ Resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais provenientes do tráfego;
- ✓ Melhorar as condições de rolamento quanto a comodidade e segurança;
- ✓ Resistir aos esforços horizontais tornando mais durável, possível a superfície de rolamento.

Pode-se classificar os pavimentos em:

- ✓ Pavimentos Flexíveis;
- ✓ Pavimentos Rígidos;
- ✓ Pavimentos semiflexíveis.

Este breve histórico é retirado dos estudos apresentados por (LEITE, 2011). Trata-se da evolução deste sistema de construção durante os anos.

A invenção da roda ocorreu na Mesopotâmia, há mais de 5000 anos e gerou a necessidade da utilização de materiais mais resistentes para a construção de estradas e caminhos, devido ao aumento de cargas transportadas. Uma das mais antigas que ainda encontram vestígios está na Grécia, que foi revestida com pedra e construída provavelmente, 1.500 antes de Cristo.

Os Etruscos (800 a 350 a.C.) são creditados por transportes de pessoas e produtos entre colônias. Estes povos tinham a preocupação de garantir resistência e conforto entre as viagens e assim começaram a utilizar no revestimento pedras de mão e areia para preenchimento das juntas, materiais disponíveis e conhecidos na época (FIORIT, 2011).

Os Romanos herdaram várias técnicas e conhecimentos sobre a construção de pavimentos dos Etruscos. Com a necessidade de construir ligações entre o Império Romano e principalmente para garantir o deslocamento rápido das tropas militares, os caminhos Romanos foram utilizados diversas técnicas, de acordo com a importância, materiais disponíveis, clima e topografia. Geralmente eram constituídos por solos arenosos misturados a pedras naturais do tipo seixo rolado, já os caminhos mais utilizados eram revestidos por pedras talhadas em formato retangular. O revestimento de pedras talhadas retangular era a preferida dos Romanos, mas dependia da disponibilidade de materiais na região (FIORIT, 2011).

Durante 200 anos em um período que se estendeu de 400 a 200 a.C., os Romanos intensificaram a construção de um abrangente sistema de caminhos compreendendo uma extensão de 120.700 km em vinte e nove caminhos que irradiavam de Roma e conectavam a numerosas cidades. Já os Espanhóis no século XVI, quando invadiram o Império Inca, ficaram maravilhados com o sistema de pavimentação encontrado, que é creditado um total de 40.000 km de estradas construídas entre Colômbia, Chile e Argentina e outros caminhos na longitudinal, conhecidos como caminho Andino e o Costeiro (FIORIT, 2011).

Os caminhos durante a evolução foram utilizados basicamente entre 4 tipos de materiais: blocos de tijolos, pedra talhadas, blocos de madeira e peças de concreto visto na figura 4.

Figura 4: Modelo de paver, bloco de concreto pré-moldado.



Fonte: <http://kiblocos.com.br/produtos/pisos-intertravados/pisos-em-geral/piso-intertravado-paviess> - acessado em 13/02/2016.

O uso de paver para revestimento de estradas originou-se nas atividades das civilizações Européias, ainda na idade antiga. O objetivo era facilitar o comércio entre as cidades existentes, além de facilitar o deslocamento de exércitos, através de territórios conquistados, como foi o caso da civilização romana. Os romanos foram os primeiros a construir estradas cientificamente, tendo seus avanços tecnológicos permanecido sofisticados até o advento das técnicas modernas de pavimentação no final do séc. XVIII". A construção dessas estradas encontrava várias características, dependendo da disponibilidade de material, no local onde as mesmas estavam sendo construídas. Em paralelo, observamos também que o desenvolvimento da tecnologia de pavimentação compreendia, não apenas, o revestimento, mas também as camadas que formavam a base do pavimento, proporcionando maior durabilidade. Essas camadas, hoje chamadas de base e sub-base, eram constituídas com pedras e areias de diferentes tamanhos compactadas manualmente (QUARESMA, 2010). O revestimento era geralmente em pedra, sendo, em alguns casos mais específicos, composta por pedras talhadas como na Via Appia em Roma conforme visto na figura 5.

Figura 5: Via Appia em Roma. Fonte: Paul Vlaar (2006).



Fonte: Enciclopédia Britânica (Micropaedia, p. 10:99:1b)

Através do tempo, essas técnicas foram aperfeiçoadas pela incorporação de novos materiais de revestimento, como tijolos de cerâmica e madeira. O espaço entre os blocos também diminuiu, aumentando a durabilidade dos pavimentos (QUARESMA, 2010).

Após a Segunda Guerra Mundial, os blocos de concreto para piso foram amplamente utilizados para a reconstrução de cidades, tanto na Holanda, quanto na Alemanha. O uso dos blocos de paver de concreto reunia as características de resistência do concreto, facilidade de execução, apesar de ser um pavimento flexível, como o asfalto. Outro aspecto importante é a correção das áreas desgastadas, substituindo apenas os blocos danificados, proporcionando rapidez e baixos custos de manutenção (figura 6).

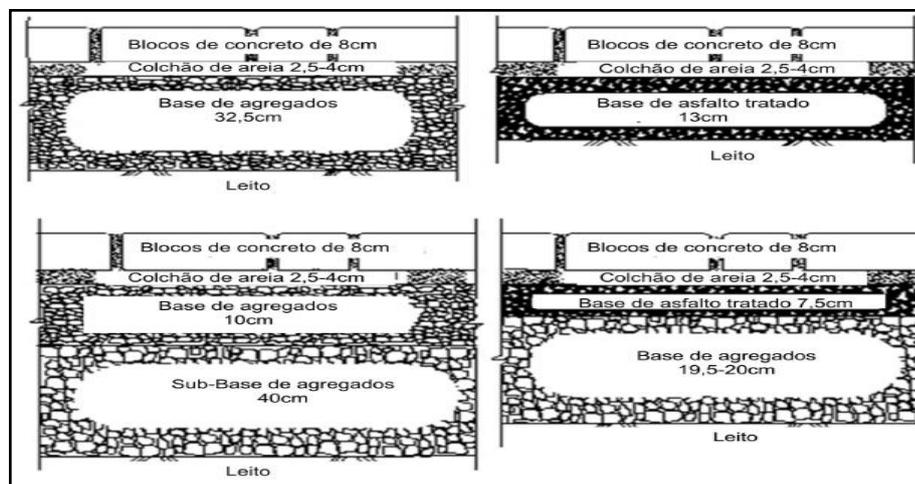
Figura 6: Pavimento de paver de concreto em execução no shopping Outlet Premium no município de Duque de Caxias – RJ



Fonte: (AUTOR 2016).

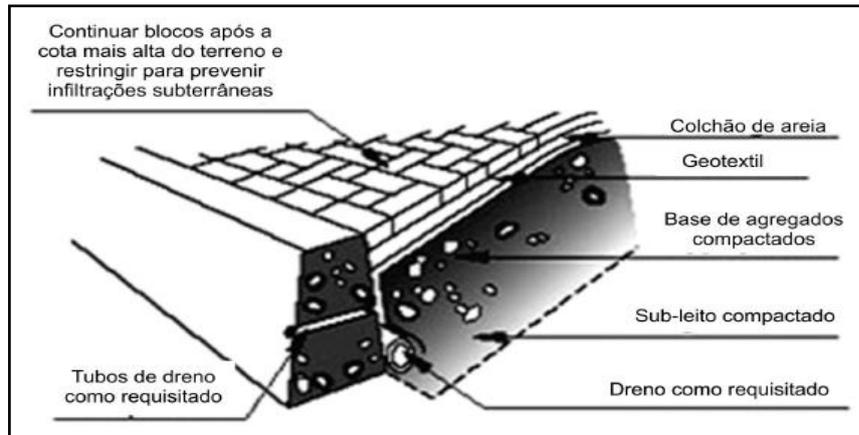
O ICPI – *Interlocking Concrete Pavement Institute* – cita, na Tech Spec nº4/2003, que seu rígido processo de fabricação garante a durabilidade dos blocos, desde que as normas exigem altas taxas de resistência à compressão, e a padronização das dimensões físicas dos elementos. Ao seguir essas normas, alguns parâmetros podem ser controlados, como, por exemplo, a espessura do rejuntamento entre os blocos e o nivelamento da superfície pavimentada, conforme mostra a figuras 7 e 8.

Figura 7: Cortes esquemáticos dos tipos de seções estruturais usados para pavimentação com blocos de paver de concreto.



Fonte: ICPI (2016).

Figura 8: Corte esquemático de pavimentação paver semipermeável com tubos drenagem junto ao meio-fio.



Fonte: ICPI (2016).

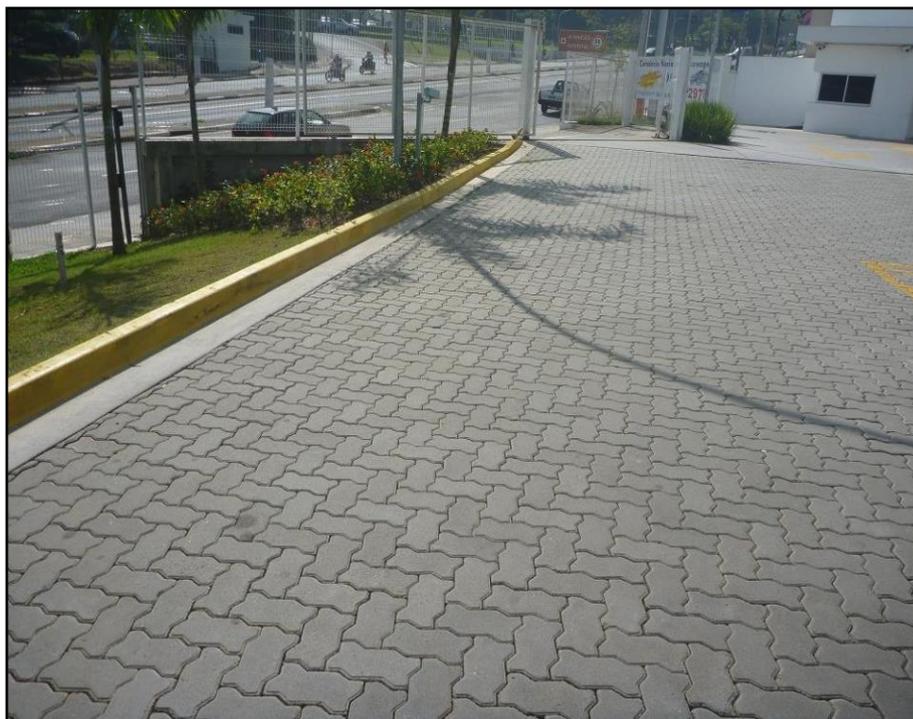
Após a execução do trecho, não existe tempo de cura, permitindo o uso imediato da estrada ou calçada, conforme pode ser vista nas figuras 9 e figura 10. Os blocos formam uma banda de rodagem com aspereza suficiente, para permitir bom atrito, pouco desgaste e a absorção de águas pluviais, através das juntas (ICPI, 2003).

Figura 9: Etapa de assentamento dos blocos paver de concreto shopping Outlet Premium no município de Duque de Caxias - RJ.



Fonte: (AUTOR 2016).

Figura 10: Pavimentação de acesso ao Condomínio residencial Bom Jardim Recreio dos Bandeirantes - RJ.



Fonte: (AUTOR 2016).

4.2 Índice de impermeabilização do solo urbano

Ultimamente existe uma discussão, em determinados segmentos políticos e científicos da sociedade, sobre a necessidade de preservação dos recursos naturais e da aplicação correta do dinheiro público nas obras de infraestrutura. A atenção dos gestores está voltada para a obrigação, através de leis, dos projetos levarem em consideração os fatores ambientais que podem causar problemas urbanos. Temos, portanto, o desenvolvimento de uma filosofia de ocupação urbana baseada em medidas preventivas, que são economicamente mais viáveis do que as medidas estruturais destinadas a remediar os erros cometidos pela falta de planejamento (COPEL, 2016).

Observamos, paralelamente, um forte interesse por parte de pesquisadores em desenvolver materiais que atenuem estes efeitos causados pela nossa sociedade.

Neste âmbito, têm sido criadas leis que determinam a taxa de impermeabilização nos loteamentos urbanos e impõem o cumprimento das diretrizes através de fiscalização e punições aos responsáveis pela obra. Municípios como

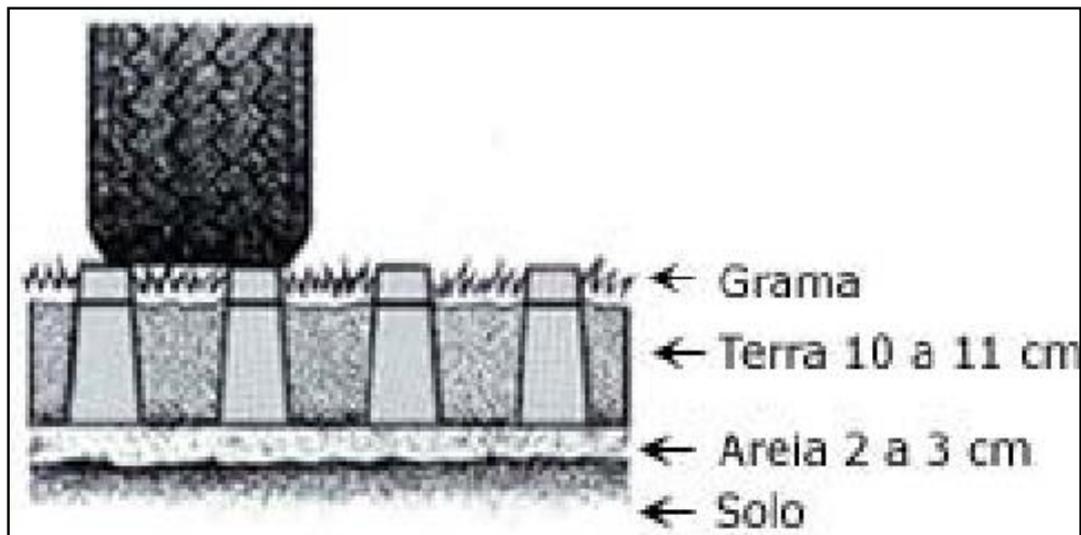
Niterói, no Rio de Janeiro, e Caxias do Sul, no Rio Grande do Sul, já incluíram, nos seus Planos Diretores, os índices de impermeabilização permitidos para cada tipo de terreno e edificação. No caso de Caxias do Sul, verificamos também que a Prefeitura indica, em seu Plano Diretor, os tipos de pavimentação que permitem a absorção das águas pluviais pelo solo como, por exemplo, blocos de paver de concreto e lajotas porosas ou vazadas, como nas figuras 11 e figura 12 (PISOGRAMA 2016).

Figura 11: Pavimentação com blocos vazados de concreto



. Fonte: Pisograma (2016).

Figura 12: Corte esquemático do Pisograma.



Fonte: Pisograma (2016).

4.3 Estrutura e propriedade do concreto

O concreto é constituído de uma mistura de agregados, aglomerantes, água e, de acordo com necessidade e tipo de aplicação, pode apresentar aditivos e adições minerais. A união destes constituintes deve apresentar coesão suficiente para manuseio seja em operações manuais ou em máquinas produtoras de pré-fabricados. A resistência do concreto aumenta com o tempo e o endurecimento é devido às reações do cimento com água (hidratação), oferecendo forte ligação com os agregados (FELIPE, 2010).

A combinação dos constituintes do concreto, bem como as características do processo como o grau de compactação da mistura e as condições de cura, definirá a qualidade final do bloco e os custos envolvidos. Em função de sua consistência, o concreto pode ser classificado em seco ou plástico. Na produção de artefatos de concreto, utiliza-se do concreto seco devido à necessidade de desformar o produto após a moldagem para a reutilização do molde para produzir as peças seguintes. A consistência do tipo de concreto é do tipo “farofa” o que diferencia do concreto plástico que, devido à grande quantidade de água, necessita permanecer no molde até o dia seguinte (FERNANDES, 2010).

A estrutura interna do concreto consiste de um meio contínuo aglomerante dentro do qual estão mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados (MEHTA, 2010).

Por apresentar uma estrutura altamente complexa e heterogênea, a compreensão se torna bastante difícil. No entanto, o entendimento da relação entre os materiais constituintes da estrutura possibilita o conhecimento das propriedades dos vários tipos de concreto.

O concreto pode ser dividido em três constituintes:

- ✓ agregado;
- ✓ pasta de cimento hidratada;
- ✓ zona de transição na interface entre a pasta de cimento e o agregado.

De acordo com Monteiro (2010), a fase agregado é a principal responsável pela massa unitária do concreto, pelo módulo de elasticidade e pela estabilidade dimensional.

As características químicas dos agregados não apresentam influência significativa nas propriedades do concreto.

As características físicas, tais como volume, textura, forma, tamanho, entre outras são capazes de exercer mudanças significativas no comportamento do concreto. A pasta de cimento resulta de reações complexas de cimento Portland e água. A reação de hidratação do cimento é um processo exotérmico que evolui com o tempo e que resulta em diferentes fases sólidas, vários tipos de vazios e água em diferentes formas (MEHTA 2010), apresenta as seguintes classificações:

As quatro principais fases sólidas são:

- ✓ silicato de cálcio hidratado (C-S-H), parte resistente da pasta;
- ✓ hidróxido de cálcio (CH), parte frágil da pasta;
- ✓ sulfoaluminato de cálcio e
- ✓ grão de clínquer não hidratado.

A hidratação dos silicatos e aluminatos presentes no cimento formam a ligação C-S-H (silicato de cálcio hidratado). No início do processo de hidratação do cimento, ocorre a formação de cristais de etringita com formato de agulhas que são responsáveis pelo início da pega e desenvolvimento da resistência inicial (LAGUNA, 2009).

Depois de poucas horas, cristais prismáticos grandes de hidróxido de cálcio e pequenos cristais de fibras de silicato de cálcio hidratado começam a preencher os espaços vazios ocupados por água e dissolvem as partículas de cimento. Depois de alguns dias, dependendo da fração de sulfoaluminato do cimento Portland, cristais de etringita se tornam instáveis e se decompõem na forma de monosulfoaluminato hidratado, cuja morfologia é hexagonal plana (MEHTA, 2010).

Os vazios presentes na pasta de cimento hidratada são classificados de acordo com o tamanho:

- ✓ Espaço interlamelar no C-S-H, que são os menores vazios;
- ✓ Vazios capilares, espaço entre os componentes sólidos da pasta;
- ✓ Ar incorporado, que são os maiores vazios, só superados pelos relativos ao
- ✓ Ar aprisionado, que ocupam os maiores vazios.

A classificação da água presente na pasta de cimento hidratada é baseada no grau de dificuldade ou de facilidade com que pode ser removida. São elas, na ordem crescente de dificuldade de remoção:

- ✓ Água capilar ou água livre;
- ✓ Água absorvida;
- ✓ Água interlamelar e
- ✓ Água quimicamente combinada.

Os agregados por serem matérias primas relativamente baratas, principalmente quando comparados ao cimento, e por não reagirem quimicamente com o mesmo, os agregados são considerados componentes inertes do concreto. Apesar disso, tem-se o conhecimento de que as características dos agregados influenciam decisivamente nas propriedades dos blocos de concreto (MEHTA, 2010).

De acordo com Medeiros (2012), a qualidade dos agregados é fundamental para obtenção das propriedades dos blocos de concreto.

As características desses materiais podem interferir na aderência com a pasta de cimento, alterando a homogeneidade e a resistência do concreto obtido.

Algumas características dos agregados influem decisivamente nas propriedades finais do concreto obtido como a porosidade, forma, textura, módulo de elasticidade, resistência à compressão, absorção de água, distribuição granulométrica, entre outras.

A relação entre essas características e as propriedades finais do concreto podem ser descritas em três categorias definidas por (MEHTA, 2010):

1. Características dependentes da porosidade: massa específica, absorção de água, resistência à compressão.
2. Características dependentes das condições prévias de exposição e condicionantes de fabricação: tamanho, forma e textura das partículas;
3. Características dependentes da composição química e mineralógica: resistência à compressão, dureza, módulo de elasticidade e substâncias deletérias (são

substâncias que estão presentes como constituintes minoritários, tanto nos agregados graúdos, quanto nos agregados miúdos).

4.4 Cimento portland composto com escória (CP II - E 32)

Os cimentos CP II são ditos compostos pois apresentam, além da sua composição básica (clínquer+gesso), a adição de outro material. O CP II-E, contém adição de escória granulada de alto-forno, o que lhe confere a propriedade de baixo calor de hidratação. O CP II-E é composto de 94% à 56% de clínquer+gesso e 6% à 34% de escória, podendo ou não ter adição de material carbonático no limite máximo de 10% em massa. O CP II-E, é recomendado para estruturas que exijam um desprendimento de calor moderadamente lento. A norma brasileira que trata deste tipo de cimento é a NBR 11578. O CP II gera calor numa velocidade menor do que o gerado pelo Cimento Portland Comum (CP I). Seu uso, portanto, é mais indicado em lançamentos maciços de concreto, onde o grande volume da concretagem e a superfície relativamente pequena reduzem a capacidade de resfriamento da massa.

Este cimento também apresenta melhor resistência ao ataque dos sulfatos contidos no solo. Recomendado para obras correntes de engenharia civil sob a forma de argamassa, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento. A aceitação e o uso desse tipo de cimento expandiu-se nos últimos anos e nos dias atuais, cerca de 58% de todo o cimento consumido no Brasil é do tipo composto, seja ele E, F ou Z (FERNANDES, 2010). A tabela 1 apresenta ensaios físicos do cimento CII E 32 e a tabela 2 mostra os ensaios químicos do cimento CP II E32.

Tabela 1 - Ensaio Físicos do Cimento CII32

Blaine (cm ² /g)	>2600	NBR NM 76
Tempo de início de pega (h:min)	>1	NBR NM 65
Tempo de fim de pega (h:min)	<10	NBR NM 65
Finura na peneira # 200 (%)	<12,0	NBR 11579
Finura na peneira # 325 (%)	–	NBR 9202
Expansibilidade a quente (mm)	<5,0	NBR 11582
Consistência normal (%)	–	NBR NM 43
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	–	NBR 7215
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	>10,0	NBR 7215
Resistência à compressão 14 dias (MPa)	>20,0	NBR 7215
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	>35,0	NBR 7215

Fonte: <http://cimento.org/cp-ii-e-32-cimento-portland-composto-com-escoria/> acessado em 10/11/2016

Tabela 2 - Ensaio Químicos do Cimento CII32

Perda ao fogo (%)	<6,5	NBR 5743
Resíduo insolúvel (%)	<2,5	NBR 5744
Trióxido de enxofre – SO ₃ (%)	<4,0	NBR 5745
Óxido de cálcio livre – CaO Livre (%)	–	NBR 7227
Óxido de magnésio – MgO (%)	<6,5	NBR 9203
Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃ (%)	–	NBR 9203
Óxido de silício – SiO ₂ (%)	–	NBR 9203
Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃ (%)	–	NBR 9203
Óxido de cálcio – CaO (%)	–	NBR 9203

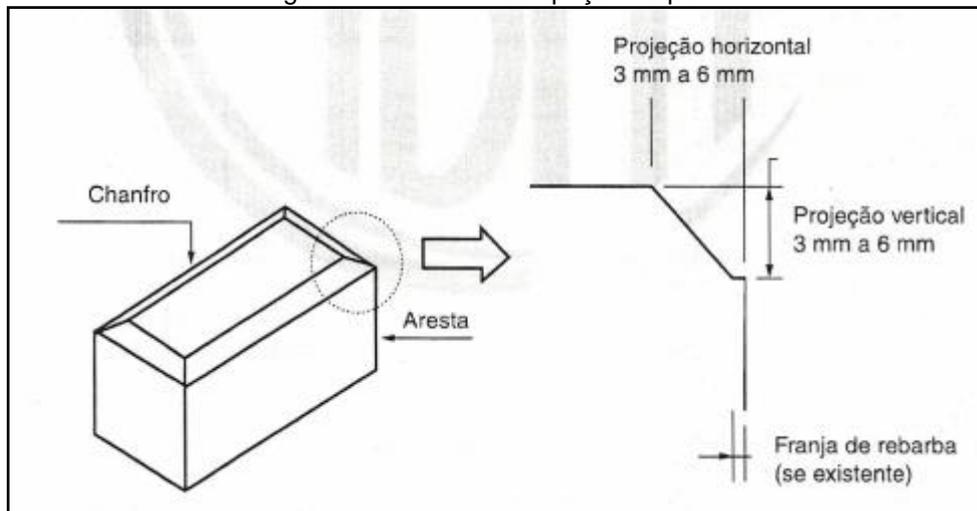
Fonte: <http://cimento.org/cp-ii-e-32-cimento-portland-composto-com-escoria/> acessado em 10/11/2016.

4.5 Peças de concreto

As peças de concreto devem obrigatoriamente ter espaçador incorporado, devendo atender aos requisitos da ABNT NBR 9781:2013.

A especificação do chanfro nas peças de concreto depende de aspectos construtivos, da capacidade estrutural e do conforto de rolamento, podendo ser utilizadas peças sem chanfros nos casos específicos. Nas peças de concreto chanfradas, o chanfro deve apresentar, tanto na projeção horizontal como na projeção vertical, no mínimo 3 mm e no máximo 6 mm, conforme figura 13. O chanfro da peça de concreto pode ser reto ou baleado (NBR 9781:2013).

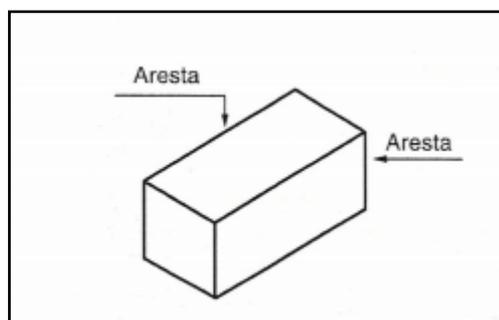
Figura 13 - Chanfro das peças de paver



Fonte, (NBR 9781:2013)

As peças de concreto devem apresentar arestas regulares nas paredes laterais e nas faces superior e inferior, como representado na Figura 14 (NBR 9781:2013).

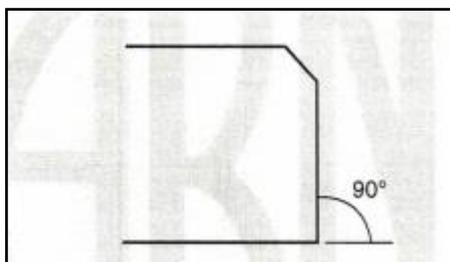
Figura 14 - Aspecto das arestas das peças de paver



Fonte, (NBR 9781:2013)

O ângulo de inclinação das peças de concreto deve ser igual a 90°, ser avaliado com esquadro, devendo a peça ser apoiada em uma superfície plana, como mostra a Figura 15 (NBR 9781:2013).

Figura 15 - Ângulo de inclinação



Fonte, (NBR 9781:2013)

A resistência característica à compressão deve atender às especificações da Tabela 3 (NBR 9781:2013).

Tabela 3 – Resistência característica à compressão

Solicitação	Referência característica à compressão aos 28 dias MPa
Tráfego de pedestre	≥ 25
Tráfego de veículos leves e veículos comerciais de linha	≥ 35
Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados.	≥ 50

Fonte: (NBR 9781:2013)

Os lotes de peças de concreto entregues ao cliente com idade inferior a 28 dias devem apresentar no mínimo 80% do MPa especificado na Tabela 3, no momento de sua instalação, sendo que aos 28 dias ou mais de idade de cura, o MPa deve ser igual ou superior ao especificado na Tabela 3 (NBR 9781:2013).

A amostra de peças de concreto deve apresentar absorção de água com valor médio menor ou igual a 6 %, não sendo admitido nenhum valor individual maior do que 7 %, a partir de ensaios realizados (NBR 9781:2013).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais

Os materiais utilizados para o traço de concreto foram os seguintes:

5.1.1. Aglomerante

Foi usado o Cimento CP II E32, marca Alvorada.

Devido a finalidade do projeto, que foi avaliar as alterações causadas pela substituição do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado, o desenvolvimento de uma dosagem experimental não foi realizado, utilizando assim uma dosagem empírica proposta por Silva R. G, em seu livro Manual de Traços de Concreto (2005).

Para a realização deste projeto utilizou-se um traço para obtenção de resistências de 35 MPa com abatimento de 10 ± 2 cm, conforme a NBR NM 245/2008.

Neste trabalho foi utilizado um concreto com uma consistência mais plástica, permitindo a utilização de formas injetadas em plástico, evitando assim a necessidade da utilização das vibro-mesas e vibro-prensas (equipamentos muito usados nas indústrias de artefatos de concreto).

Estas formas plásticas foram utilizadas, objetivando uma maneira mais barata e fácil de desenvolver o processo de fabricação das peças, e tornando o custo do processo mais acessível para as pessoas, para pequenas empresas, ou até mesmo para o próprio poder público, para aplicação efetiva na municipalidade.

5.1.2 Agregados

Agregado Miúdo Natural: Utilizou-se areia quartzosa proveniente do Rio Branco Macaé/RJ conforme visto na figura 16. Todo o material foi previamente seco ao ar.

Figura 16 – Agregado Miúdo Natural.



Fonte: (AUTOR 2016)

Agregado Graúdo Natural: Utilizou-se brita de origem basáltica, proveniente da pedreira Imboassica Macaé/RJ. Com diâmetro máximo adotado foi de 19 mm. Este agregado foi lavado para retirada de todo material pulverulento ou qualquer outra impureza que o mesmo pudesse conter e colocado ao ar para secar (figura 17).

Figura 17 – Agregado Graúdo Natural.



Fonte: (AUTOR 2016).

Agregado Graúdo Reciclado: Este material foi obtido com a britagem e peneiramento do resíduo de construção coletado na **usina de reciclagem de resíduos da construção civil do município de Guarulhos/SP**. A faixa granulométrica foi a do material que passava pela peneira de malha # 19 mm e ficava retido a malha de # 4,8 mm. Este agregado foi lavado para retirada de todo material pulverulento, ou qualquer outra impureza que o mesmo pudesse conter, e colocado ao ar para secar (figura 18).

Figura 18 – Agregado Graúdo Reciclado



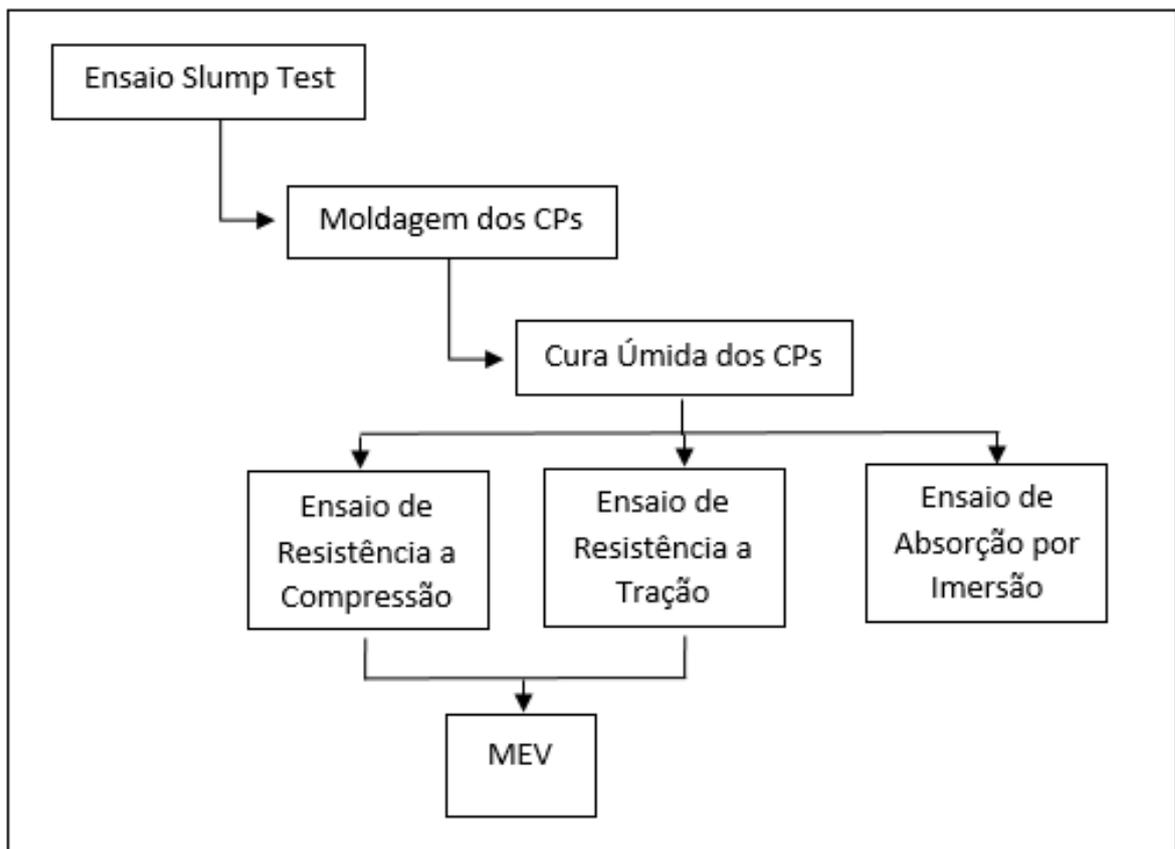
Fonte: (AUTOR 2016).

Água: Fornecida pelo sistema de abastecimento SAAE do município de Volta Redonda – RJ.

5.2 Métodos

Metodologia desse trabalho foi desenvolvida conforme o fluxograma apresentado na figura 18.

Figura 18 –Fluxograma do método aplicado.



Fonte: (AUTOR 2016).

Para o desenvolvimento desse projeto experimental foram realizadas avaliações nas propriedades físicas e mecânicas do concreto tendo como agregado graúdo, RCD. Foram estudadas possíveis alterações, quanto à resistência, à compressão, segundo NBR 5739. Os coeficientes de absorção de água e Slump test, um dos métodos mais utilizados para determinar a consistência e o ensaio de abatimento do concreto, segundo a NBR NM 245/2008. Todos os testes tiveram como comparação as propriedades de corpos de provas feitos com agregado natural comum.

O RCD foi utilizado para os concretos em análise, após passar pela triagem e ser processado pela britagem em triturador mecânico para concreto.

O material resultante foi peneirado em malha 19 mm e a parte do RCD retida na peneira foi descartada, a passante foi repeneirada na malha de 4,8 mm, separando os agregados graúdos dos miúdos, conforme mostra a figura 20. A fração retida nesta última parte foi utilizada nesse experimento e a passante descartada. Após a preparação e homogeneização do RCD para deixá-lo com frações características de granometria de um agregado graúdo para concreto, os materiais obtidos foram submetidos aos mesmos ensaios competentes dos agregados, onde se obteve o diâmetro máximo de 19 mm.

Figura 20 Peneiramento em Malha de 4,8 a 19 mm



Fonte: (AUTOR 2016).

5.2.1 Composição dos Traços

O traço adotado foi 1: 2: 3 (uma parte de cimento por duas partes de agregado miúdo e três partes de agregado graúdo). Sem adição de aditivo, na forma convencional.

Os traços foram realizados nas seguintes composições de adição de RCD 40%, 60% e 100%.

A realização das misturas dos materiais para a produção do concreto seguiu a ordem, ou seja, primeiro foi colocado o agregado graúdo, em segundo o aglomerante (cimento), seguindo com adição da água e por final o agregado miúdo. O traço de

concreto foi realizado em betoneira marca Monegoti, modelo Premium capacidade de 150 litros, sendo realizado 8 traços.

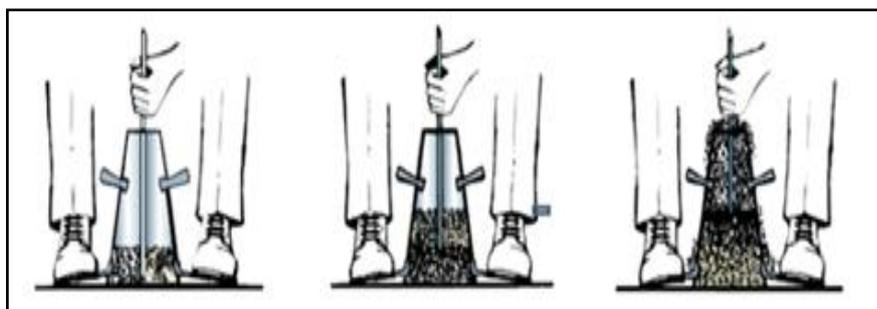
5.2.2 Ensaio de Slump Test

Muito utilizado em todo o mundo devido sua simplicidade, o ensaio de slump test define o grau de utilização e consistência do concreto para trabalhabilidade em seu estado fresco. Esse teste demonstra o efeito direto da resistência à compressão do concreto e sua relação água cimento. A verificação do abatimento foi realizada após a completa mistura dos materiais na betoneira. Coletando a amostra do concreto logo após a mistura do traço.

Para que cumpra este importante papel, deve ser executado corretamente. Colocado o cone sobre a placa metálica bem nivelada e apoiada os pés sobre as abas inferiores do cone.

Preenchido o cone em 3 camadas iguais e aplicado 25 golpes uniformemente distribuídos em cada camada (figura 21).

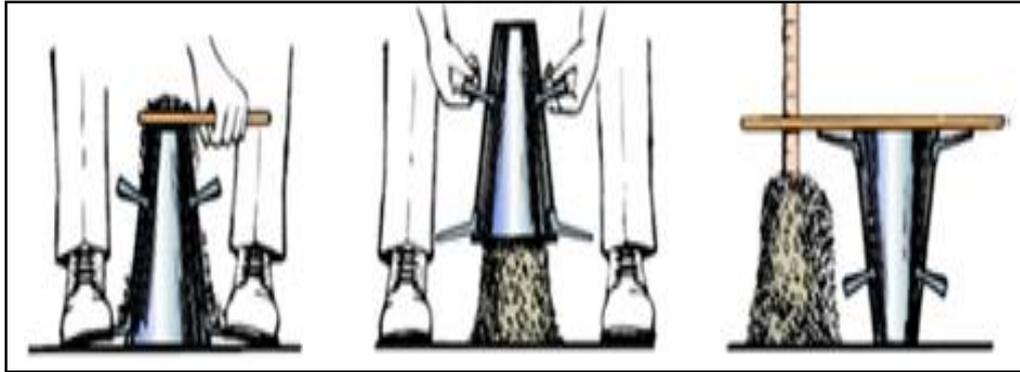
Figura 21 – Ensaio de Slump Test.



Fonte: Manual de Traços de Concreto, Gildásio R. da Silva, 2005

Após a compactação da última camada, foi retirado o excesso de concreto. Sacando o cone, com auxílio de uma régua e uma trena, mediu-se a distância do abatimento de concreto (figura 22).

Figura 22 – Ensaio de Slump Test.



Fonte: Manual de Traços de Concreto, Gildásio R. da Silva, 2005.

Conforme descrito no manual de traços para o traço 1;2;3 - 35 MPa o abatimento deve ser de 10 ± 2 cm, conforme a NBR NM 245/2008. Obtendo como resultado no ensaio abatimento de 8 cm a 11cm atendendo a norma.

5.2.3 Moldagem

Para a moldagem dos corpos de prova, a superfície interna e o fundo do molde receberam uma leve camada de óleo. A moldagem foi feita com duas camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes uniformes utilizando o soquete mostrado na figura 23. Foram moldados para cada traço de concreto, 4 corpos de prova para a idade de 7, 14 e 28 dias para o ensaio de resistência a compressão, 4 corpos de prova para a idade de 28 dias para ensaio de resistência a tração e 3 corpos de prova para a idade de 28 dias para ensaio de absorção, totalizando 76 corpos de prova.

Figura 23- Moldagem de corpos de Prova.



Fonte: (AUTOR 2016).

5.2.4 Cura

A cura dos corpos de prova foi feita ao ar, nas primeiras 24 horas. Após a desforma, os corpos de prova foram identificados e armazenados em um tanque de água saturada de cal se deu até a idade de cura, de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996). As idades de cura definidas para os corpos de prova foram de 7 dias, 14 dias e 28 dias (figura 24).

Figura 24 – Cura úmida do corpo de prova.



Fonte: (AUTOR 2016).

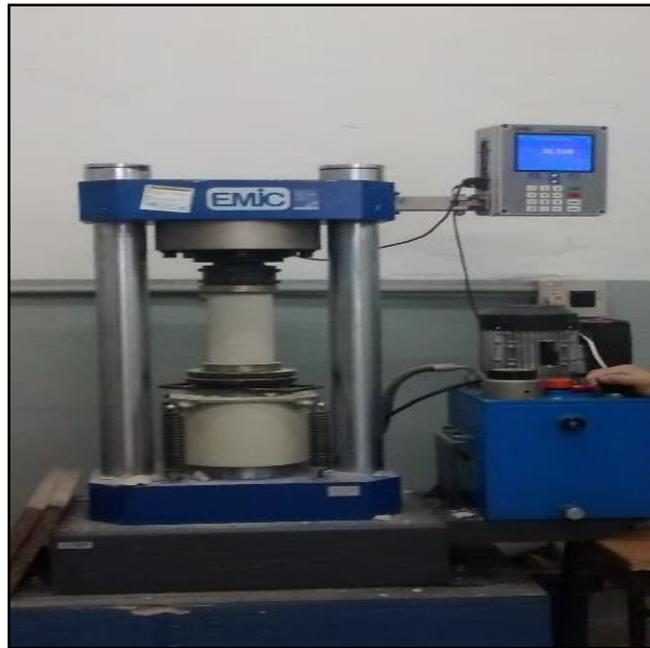
5.2.5 Ensaio de Resistência à Compressão - CP Cilíndrico 10x20

O ensaio foi realizado em uma prensa hidráulica de acionamento elétrico marca EMIC e modelo PCE 100 C, capacidade 100 tf (100.000 kgf) instalada no laboratório da engenharia civil do UniFOA.

Este ensaio, segundo norma NBR 7215 (ABNT, 1982) consistiu em determinar a resistência à compressão dos corpos de prova de concreto.

Para cada corpo de prova foi submetido a uma prensa hidráulica de carga contínua e sem choque e com acréscimo constante de tensão a uma velocidade de $(0,05 \pm 0,02)$ MPa/s até a ruptura do mesmo, na idade de 7 dias, 14 dias e 28 dias (figura 25).

Figura 25 – Ensaio de Resistência à Compressão.



Fonte: (AUTOR 2016).

A resistência à compressão foi calculada através da equação 1:

$$f_c = \frac{4.F}{\pi.D^2} \quad (1)$$

Onde:

f_c = Resistência à compressão; (MPa)

F = Força máxima alcançada (kN).

D = Diâmetro do corpo de prova (m).

5.2.6 Ensaio de Resistência à Tração - CP Cilíndrico 10x20

O ensaio de resistência foi realizado em uma prensa hidráulica de acionamento elétrico marca EMIC e modelo PCE 100 C, capacidade 100 tf (100.000 kgf) instalada no laboratório da engenharia civil do UniFOA.

Determinação da resistência à tração por compressão axial de corpos de prova cilíndricos, segundo a NRB 7222 (ABNT, 1994).

Este ensaio, segundo norma NBR 7222 (ABNT, 1994) prescreve o método para determinação da resistência à tração por compressão axial de corpos de prova cilíndricos de concreto.

Para cada corpo de prova foi submetido a uma prensa hidráulica de carga contínua e sem choque e com acréscimo constante de tensão a uma velocidade de $(0,05 \pm 0,02)$ MPa/s até a ruptura do mesmo (figura 26).

Figura 26 – Ensaio de Resistência à Tração.



Fonte: (AUTOR 2016).

O ensaio é determinado pela ação de duas forças de compressão distribuídas linearmente e diametralmente opostas. Essas ações são fornecidas por uma prensa mecânica, gerando ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares ao diâmetro do corpo de prova. As forças são aplicadas até que ocorra à ruptura do corpo de prova por tração indireta.

Anota-se que, a resistência à tração por compressão diametral é calculada segundo a norma pela equação 2:

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

Onde:

$f_{t,D}$ = Resistência à tração por compressão diametral (MPa).

F = Carga Máxima Obtida no Ensaio (κN).

D = Diâmetro do corpo de prova (m).

L = Altura do corpo de prova (m).

5.2.7 Absorção por Imersão

Para determinar a absorção de água por imersão, utilizou-se como referência a NBR 9778:2013 – Determinação da absorção de água por Imersão.

A amostra de peças de concreto deve apresentar absorção de água com valor médio menor ou igual a 6 %, não sendo admitido nenhum valor individual maior do que 7 %, a partir de ensaios realizados.

O ensaio foi realizado em uma estufa da marca Odontobrás, modelo EL 15 com potência de 1100 W e uma balança da marca Welmy, modelo W6 com capacidade de 8 kg. Instaladas no laboratório da engenharia civil do UniFOA.

Atingida a idade, os corpos de prova foram submetidos ao aquecimento em estufa a temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$; (figura 27). Foram feitas medições às 24 horas 48 horas e 72 horas. Após as 72 horas foram resfriados e medidos a massa.

As amostras foram submetidas a imersão. Após as 24 horas, foram medidas as massas e também as 48 horas e 72 horas (figura 28). Após as mesmas foram submetidas à água em ebulição por 5 horas, após deixou-se a água esfriar, pela perda natural de calor, por 14 horas, até a temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, quando foi retirada amostra, enxugadas e pesadas.

Definida pela seguinte equação 3:

$$\frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_{\text{sat}}} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

M_{Sat} = Massa do corpo de prova saturado (g).

M_s = Massa do corpo de prova seco em estufa (g).

5.2.8 Índice de vazios

Relação entre os volumes de poros permeáveis e o volume total, sendo calculada pela seguinte expressão 4.

$$\frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_{\text{sat}} - M_i} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

M_i = Massa do corpo de prova saturado, imerso em água (g).

M_{Sat} = Massa do corpo de prova saturado (g).

M_s = Massa do corpo de prova seco em estufa (g).

Os resultados da absorção após a imersão em água usando as massas determinadas e fazer os seguintes cálculos através de três amostras de corpo de prova.

Absorção após imersão em água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, em porcentagem sendo calculada pela seguinte expressão 5.

$$\frac{B - A}{A} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

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

B = massa da amostra saturada em água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ com superfície seca (g).

Absorção após imersão e fervura em porcentagem sendo calculada pela seguinte expressão 6.

$$\frac{C - A}{A} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

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

C = massa da amostra com superfície seca, após saturação em água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, e fervura em água em ebulição durante 5 hs (g).

Índice de vazios após saturação em água em porcentagem, sendo calculada pela seguinte expressão 7.

$$\frac{B - A}{B - D} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

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

B = massa da amostra saturada em água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ com superfície seca (g).

D = massa da amostra após saturação em água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ (g).

Índice de vazios após saturação e fervura em porcentagem, sendo calculada pela seguinte expressão 8.

$$\frac{C - A}{A} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

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

C = massa da amostra com superfície seca, após saturação em água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, e fervura em água em ebulição durante 5 hs (g).

9. Massa específica da amostra seca, sendo calculada pela seguinte expressão

$$\frac{A}{C - D} \quad (9)$$

Onde:

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

C = massa da amostra com superfície seca, após saturação em água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, e fervura em água em ebulição durante 5 horas (g).

D = massa da amostra após saturação em água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ (g).

10. Massa específica da amostra após saturação, sendo calculada pela seguinte expressão

$$\frac{B}{C - D} \quad (10)$$

Onde:

B = massa da amostra saturada em água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ com superfície seca (g).

C = massa da amostra com superfície seca, após saturação em água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, e fervura em água em ebulição durante 5 horas (g).

D = massa da amostra após saturação em água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ (g).

Massa específica da amostra após saturação e fervura, sendo calculada pela seguinte expressão 11.

$$\frac{C}{C-D} \quad (11)$$

Onde:

C = massa amostra com superfície seca, após saturação em água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, e fervura em água em ebulição durante 5 horas (g).

D = massa da amostra após saturação em água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ (g).

Massa específica real, sendo calculada pela seguinte expressão 12.

$$\frac{A}{A-D} \quad (12)$$

Onde:

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

D = massa da amostra após saturação em água à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ (g)

5.2.9 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Os fragmentos dos corpos de prova recuperados do ensaio de resistência à compressão foram submetidos a um estudo de caracterização da microestrutura por meio de técnica de MEV, por elétrons secundários. As micrografias foram obtidas em um microscópio eletrônico de varredura HITACHI TM 3.000, disponível no laboratório do prédio 12 do UNIFOA Volta Redonda - RJ

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Resistência à Compressão

6.1.1 Ensaio de Compressão para Idade de 7 dias

Conforme NBR 7215, (2008) foi determinada a resistência à compressão dos corpos de prova e obtiveram-se os seguintes resultados descritos nas tabelas 4, tabela 5 e 6 e figura 30.

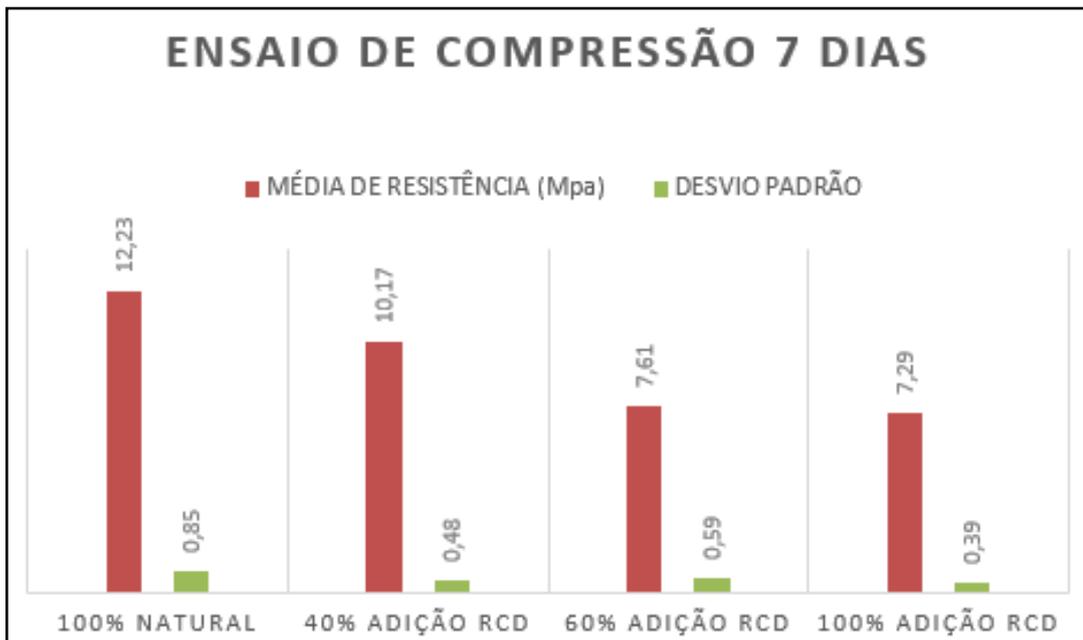
Pode-se observar uma diminuição nos resultados de resistência à compressão, à medida que aumentou a adição do RCD, variando em média de 12,23 MPa até 7,29 MPa, conforme NBR 7215:2008 deverá atingir 10 MPa em 7 dias. Foi verificada uma variação 0,32 MPa na resistência média das amostras com 60% de adição de RCD para a amostra com 100% de adição de RCD, não apresentando variação significativa entre as amostras, conforme visto na tabela 4. O desvio padrão das amostras foi satisfatório, apresentando 0,85 para a amostra 100% natural, 0,48 para a amostra 40% adição RCD, 0,59 para a amostra 60% de adição RCD e 0,39 para a amostra com 100% de adição RCD.

Tabela 4 – Ensaio de Compressão 7 dias.

ENSAIO DE COMPRESSÃO						
TRAÇO	CORPO DE PROVA	IDADE	RESISTÊNCIA NORMA (MPa)	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa)	MÉDIA DE RESISTÊNCIA (MPa)	DESVIO PADRÃO
100% NATURAL	1	7 DIAS	10,00	12,26	12,23	0,85
	2			13,46		
	3			11,32		
	4			11,89		
40% ADIÇÃO RCD	1			10,37	10,17	0,48
	2			11,05		
	3			9,93		
	4			9,31		
60% ADIÇÃO RCD	1			8,25	7,61	0,59
	2			7,42		
	3			7,79		
	4			6,98		
100% ADIÇÃO RCD	1			6,93	7,29	0,39
	2			6,38		
	3			7,72		
	4			8,12		

Fonte (AUTOR 2016).

Figura 30 – Ensaio de Compressão, Média e Desvio Padrão de 7 dias



Fonte“(AUTOR 2016).

6.1.2 Ensaio de Compressão para idade de 14 dias

Pode-se observar uma diminuição nos resultados de resistência à compressão, à medida que aumentou a adição do RCD, variando em média de 27,97 MPa até 17,95 MPa, conforme NBR 7215:2008 deverá atingir 20 MPa em 14 dias conforme tabela 5 e figura 31.

.Foi verificada uma variação 0,45 MPa na resistência média das amostras com 100% de adição de RCD para a amostra com 60% de adição de RCD, não apresentando variação significativa entre as amostras, conforme visto na (tabela 5).

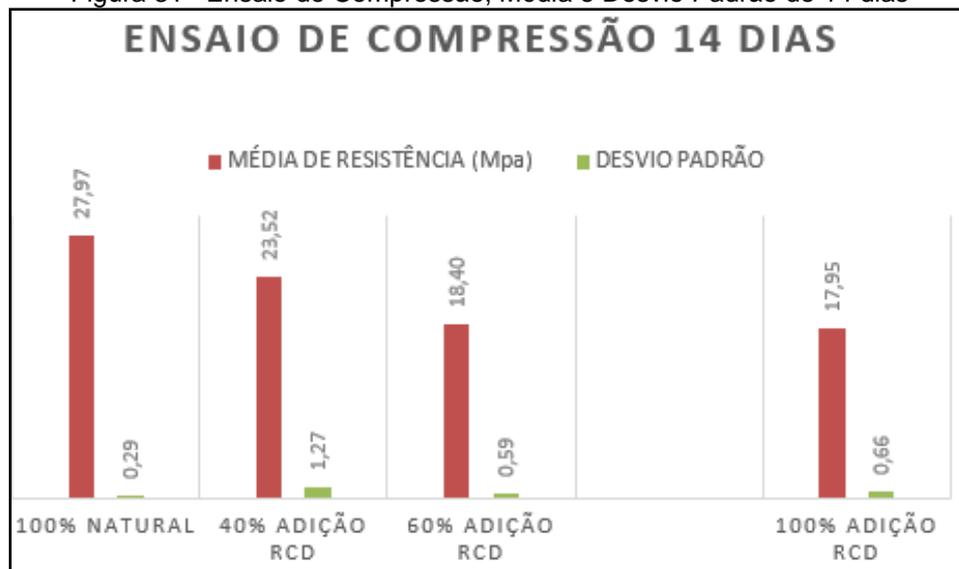
O desvio padrão das amostras foi satisfatório, apresentando 0,29 para a amostra 100% natural, 1,27 para a amostra 40% adição RCD, 0,59 para a amostra 60% de adição RCD e 0,66 para a amostra com 100% de adição RCD.

Tabela 5 – Ensaio de Compressão 14 dias.

ENSAIO DE COMPRESSÃO						
TRAÇO	CORPO DE PROVA	IDADE	RESISTÊNCIA NORMA (MPa)	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa)	MÉDIA DE RESISTÊNCIA (MPa)	DESVIO PADRÃO
100% NATURAL	1	7 DIAS	10,00	12,26	12,23	0,85
	2			13,46		
	3			11,32		
	4			11,89		
40% ADIÇÃO RCD	1			10,37	10,17	0,48
	2			11,05		
	3			9,93		
	4			9,31		
60% ADIÇÃO RCD	1			8,25	7,61	0,59
	2			7,42		
	3			7,79		
	4			6,98		
100% ADIÇÃO RCD	1			6,93	7,29	0,39
	2			6,38		
	3			7,72		
	4			8,12		

Fonte“(AUTOR 2016).

Figura 31– Ensaio de Compressão, Média e Desvio Padrão de 14 dias



Fonte (AUTOR 2016).

Foi verificada uma boa evolução no comportamento das resistências das amostras comparada a idade de 7 dias, com a idade de 14 dias.

6.1.3 Ensaio de Compressão para idade de 28 dias

Pode-se observar na tabela 6 uma diminuição nos resultados de resistência à compressão, à medida que aumentou a adição do RCD, variando em média de 37,18 MPa até 19,13 MPa, conforme NBR 7215:2008 deverá atingir 35 MPa em 28 dias conforme tabela 6 e figura 32 e 33.

Verificou significativa queda de resistência final entre as amostras de 100% adição RCD.

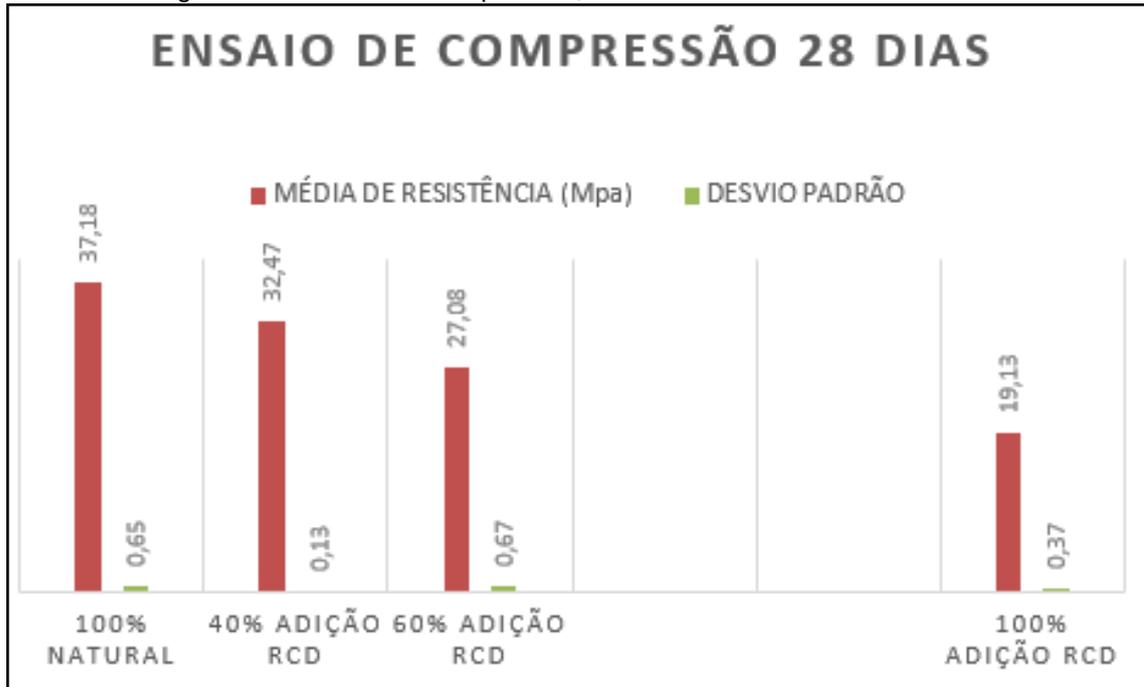
O desvio padrão das amostras foi satisfatório, apresentando 0,65 para a amostra 100% natural, 0,13 para a amostra 40% adição RCD, 0,67 para a amostra 60% de adição RCD e 0,37 para a amostra com 100% de adição RCD.

Tabela 6 – Ensaio de Compressão 28 dias.

ENSAIO DE COMPRESSÃO						
TRAÇO	CORPO DE PROVA	IDADE	RESISTÊNCIA NORMA (MPa)	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa)	MÉDIA DE RESISTÊNCIA (MPa)	DESVIO PADRÃO
100% NATURAL	1	28 DIAS	35,00	37,41	37,18	0,65
	2			38,33		
	3			36,11		
	4			36,85		
40% ADIÇÃO RCD	1			32,93	32,47	0,13
	2			33,12		
	3			32,63		
	4			31,18		
60% ADIÇÃO RCD	1			26,16	27,08	0,67
	2			27,11		
	3			26,73		
	4			28,33		
100% ADIÇÃO RCD	1			19,47	19,13	0,37
	2			18,95		
	3			19,77		
	4			18,34		

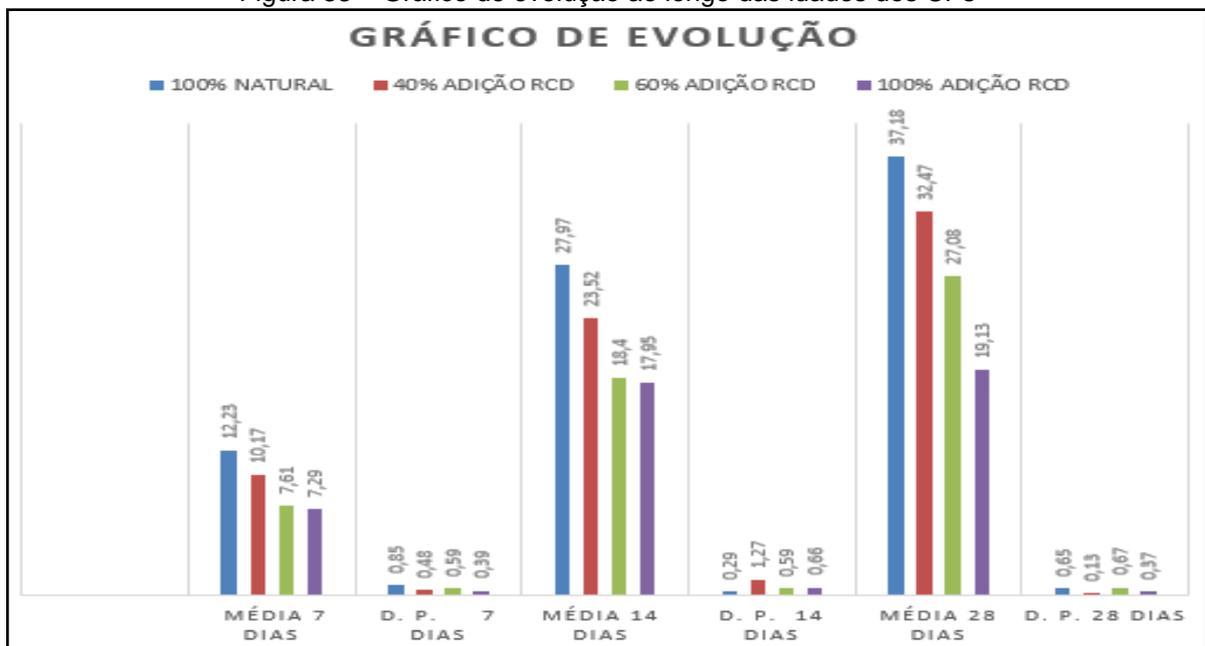
Fonte (AUTOR 2016).

Figura 32 – Ensaio de Compressão, Média e Desvio Padrão de 28 dias



Fonte (AUTOR 2016).

Figura 33 – Gráfico de evolução ao longo das idades dos CPs



Fonte (AUTOR 2016).

Pode-se verificar uma boa evolução no comportamento das resistências das amostras comparada a idade de 7 dias, 14 dias e 28 dias.

6.2 Resistência à Tração

Conforme NBR 7222 (2014). Foi determinada a resistência à tração dos corpos de prova e obteve-se os seguintes resultados descritos na tabela 7.

6.2.1 Ensaio de Tração para Idade de 28 dias

Pode-se observar na tabela 7 e figura 34 uma diminuição nos resultados à tração, à medida que aumenta a adição do RCD, variando em média de 13,10 MPa até 6,89 MPa, conforme NBR 7222:2014 deverá atingir 12 MPa em 28 dias.

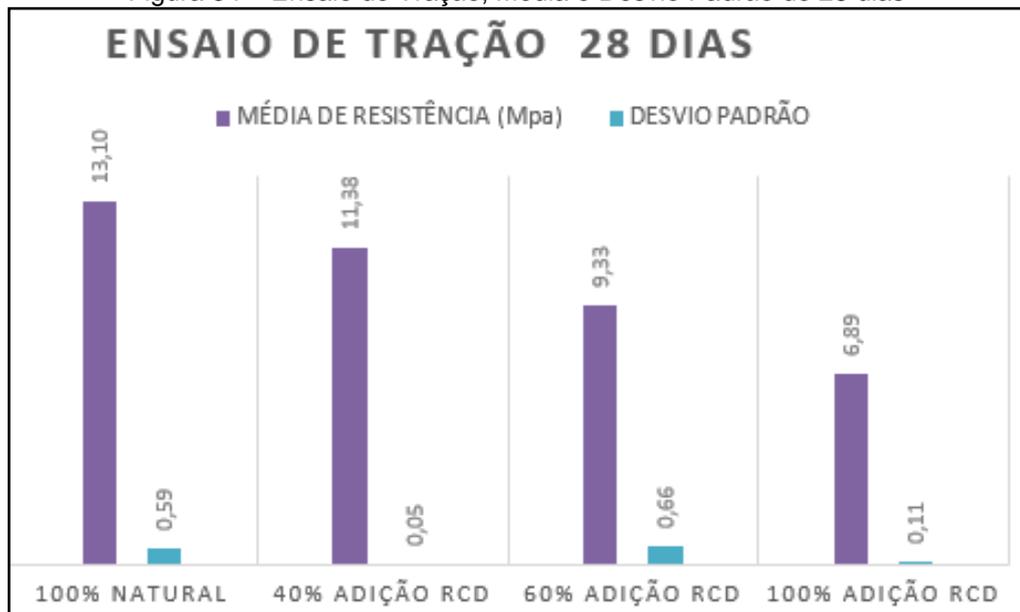
O desvio padrão das amostras foi satisfatório, apresentando 0,59 para a amostra 100% natural, 0,05 para a amostra 40% adição RCD, 0,66 para a amostra 60% de adição RCD 0,11% para a amostra com 100% de adição RCD

Tabela 7 – Ensaio de tração 28 dias.

ENSAIO DE TRAÇÃO						
TRAÇÃO	CORPO DE PROVA	IDADE	RESISTÊNCIA NORMA (MPa)	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (MPa)	MÉDIA DE RESISTÊNCIA (MPa)	DESVIO PADRÃO
100% NATURAL	1	28 DIAS	10,00	13,13	13,10	0,59
	2			13,96		
	3			12,38		
	4			12,94		
40% ADIÇÃO RCD	1			11,56	11,38	0,05
	2			11,63		
	3			11,46		
	4			10,88		
60% ADIÇÃO RCD	1			9,18	9,33	0,66
	2			10,11		
	3			9,03		
	4			8,98		
100% ADIÇÃO RCD	1			6,84	6,89	0,11
	2			6,68		
	3			6,94		
	4			7,09		

Fonte (AUTOR 2016).

Figura 34 – Ensaio de Tração, Média e Desvio Padrão de 28 dias



Fonte: (AUTOR 2016).

6.3 Absorção de Água por Imersão

Para determinar a absorção de água por imersão, utilizou-se como referência a NBR 9778 – Determinação da absorção de água por Imersão.

Pode-se observar na tabela 8 e figura 35, que a adição de RCD a absorção de água é insignificante a retenção de água nos corpos de prova.

A diferença de absorção entre os corpos de prova 100% natural foi de 1,18 % e o desvio padrão das amostras foram 0,06 %.

As amostras 40% adição de RCD, apresentaram diferença de absorção entre os corpos de prova de 0,96 % e o desvio padrão de 0,07 %.

As amostras 60% adição de RCD, apresentaram diferença de absorção entre os corpos de prova de 1,29 % e o desvio padrão de 0,35 %.

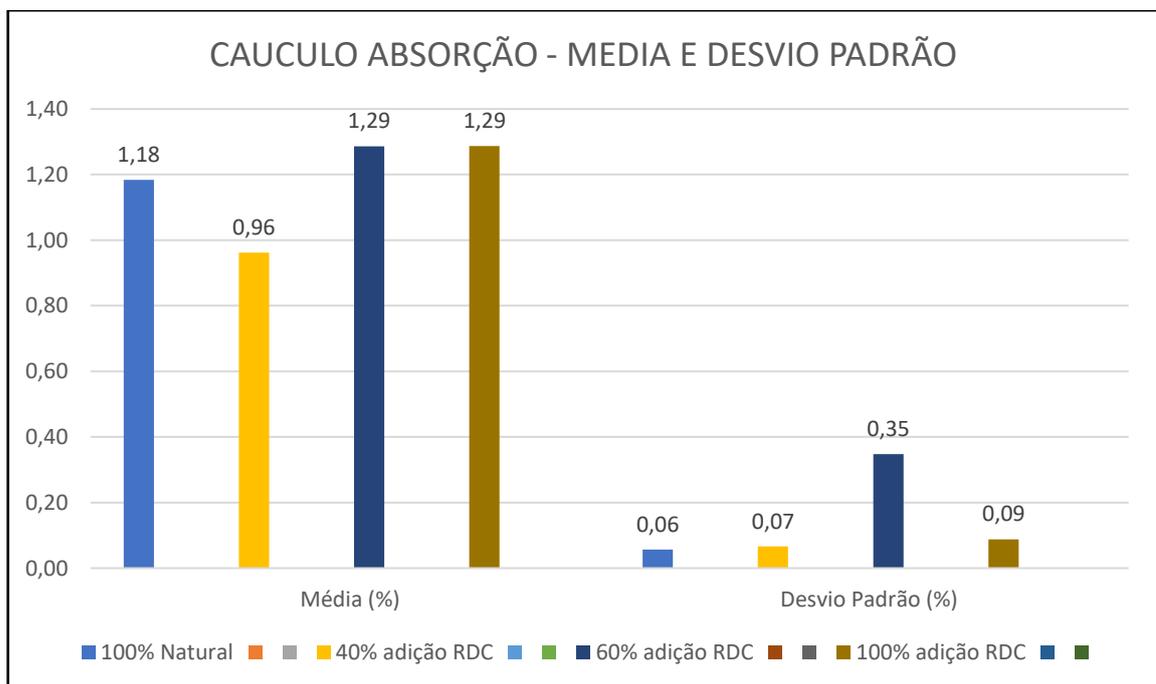
As amostras 100% adição de RCD, apresentaram diferença de absorção entre os corpos de prova de 1,29 % e o desvio padrão de 0,09 %.

Tabela 8 – Ensaio de Absorção de Água.

ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA												
	CP	Idade	Massa Inicial (g)	ESTUFA			IMERSÃO			Calculo absorção por Imersão	Média (%)	Desvio Padrão (%)
				24 hs (g)	48 hs (g)	72 hs (g)	24 hs (g)	48 hs (g)	72 hs (g)			
100% Natural	1	28 dias	449,67	446,54	445,98	445,23	449,75	450,08	450,35	1,14	1,18	0,06
	2		444,23	441,97	440,63	440,41	444,83	445,35	445,97	1,25		
	3		452,78	449,78	448,12	448,07	451,97	452,94	453,36	1,17		
40% adição RDC	1	28 dias	438,54	435,99	435,21	435,05	437,85	438,93	439,05	0,91	0,96	0,07
	2		442,76	439,71	438,95	438,34	441,86	442,58	442,93	1,04		
	3		441,29	438,44	437,93	437,47	440,48	441,02	441,61	0,94		
60% adição RDC	1	28 dias	440,65	437,96	437,18	437,03	439,87	440,58	441,15	0,93	1,29	0,35
	2		442,65	438,59	438,08	437,94	440,37	442,76	445,19	1,63		
	3		440,23	437,63	437,07	436,84	439,32	440,84	442,58	1,30		
100% adição RDC	1	28 dias	438,98	435,74	434,99	434,38	438,48	439,64	440,17	1,32	1,29	0,09
	2		440,21	437,22	436,48	436,04	439,33	440,95	442,04	1,36		
	3		441,56	438,73	438,02	437,86	440,46	441,83	443,13	1,19		

Fonte: (AUTOR 2016).

Figura 35 – Cálculo de Absorção de Água, Média e Desvio Padrão



Fonte: (AUTOR 2016).

Com base nos resultados é possível comprovar que existe uma tendência do concreto com agregado reciclado, apresentar perda de resistência à compressão e à tração conforme aumenta a adição de RCD.

De acordo com ARANTES, 2010 quanto maior o teor de substituição do agregado reciclado, menor será a resistência final do concreto.

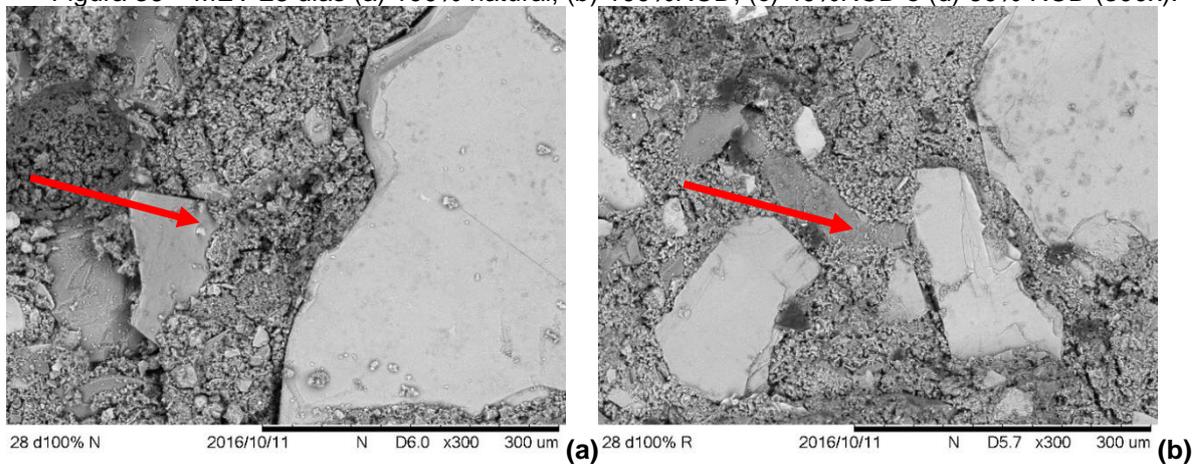
6.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

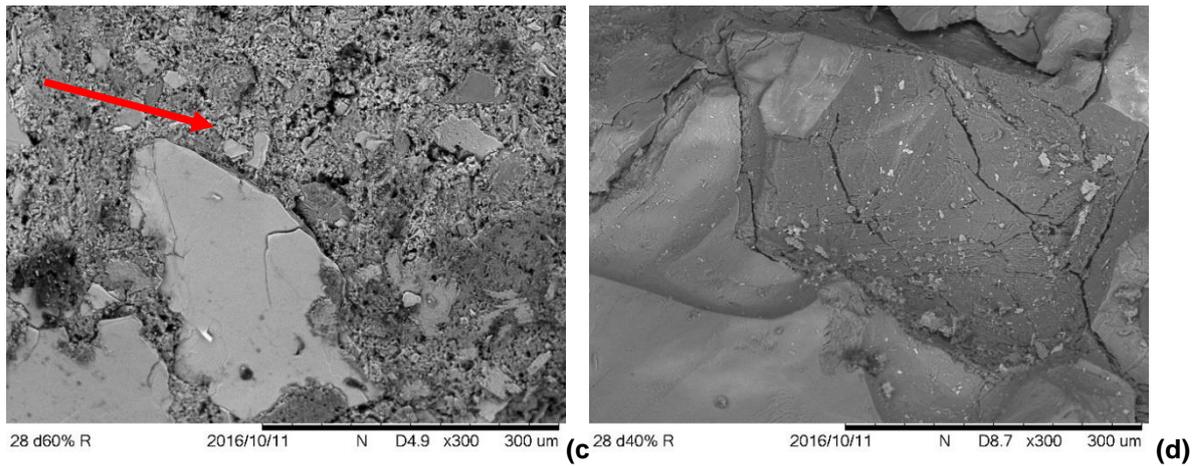
A micrografia da figura 36 apresenta uma vista das ampliações 300X. Pode-se observar com detalhe a aderência entre a pasta e os componentes do agregado.

Constatou-se que realmente ocorreu a formação de produtos de hidratação na superfície porosa e rugosa do agregado, devido à absorção da pasta de cimento pelo material reciclado, fato que contribuiu para aumentar a aderência pasta/cimento.

De acordo com Leite (2010) o agregado graúdo reciclado aumenta a aderência existentes entre o agregado e a pasta, devido o efeito físico de preenchimento dos espaços vazios que torna a matriz mais densa.

Figura 36 – MEV 28 dias (a) 100% natural, (b) 100%RCD, (c) 40%RCD e (d) 60% RCD (300x).





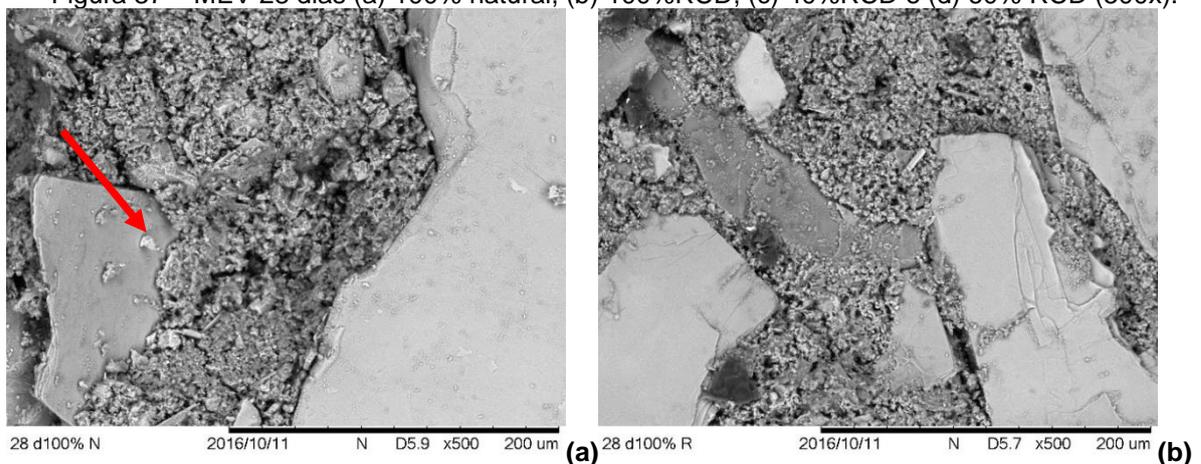
Fonte: (AUTOR, 2016).

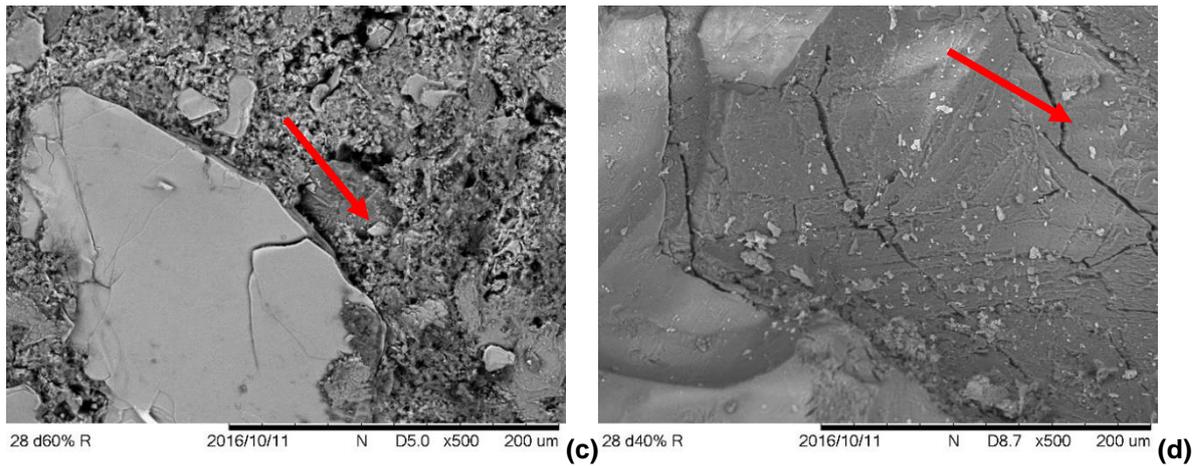
A figura 37 apresenta uma vista das ampliações 500X. A micrografia 37 (a) e (c) constatou-se que as partículas mais finas sofreram a formação mineralógica clássica e a interface entre os grãos aglutinados pelo ligante.

A micrografia da figura 37 (d) apresenta micro trincas na argamassa de cimento. Segundo Leite (2011)

“ As micrografias obtidas com microscópio eletrônico de varredura, apresentadas na sua tese de doutorado. O fator a/c e a adição de microssílica agem, causando formação mineralógica na interface dos grãos”.

Figura 37 – MEV 28 dias (a) 100% natural, (b) 100%RCD, (c) 40%RCD e (d) 60% RCD (500x).

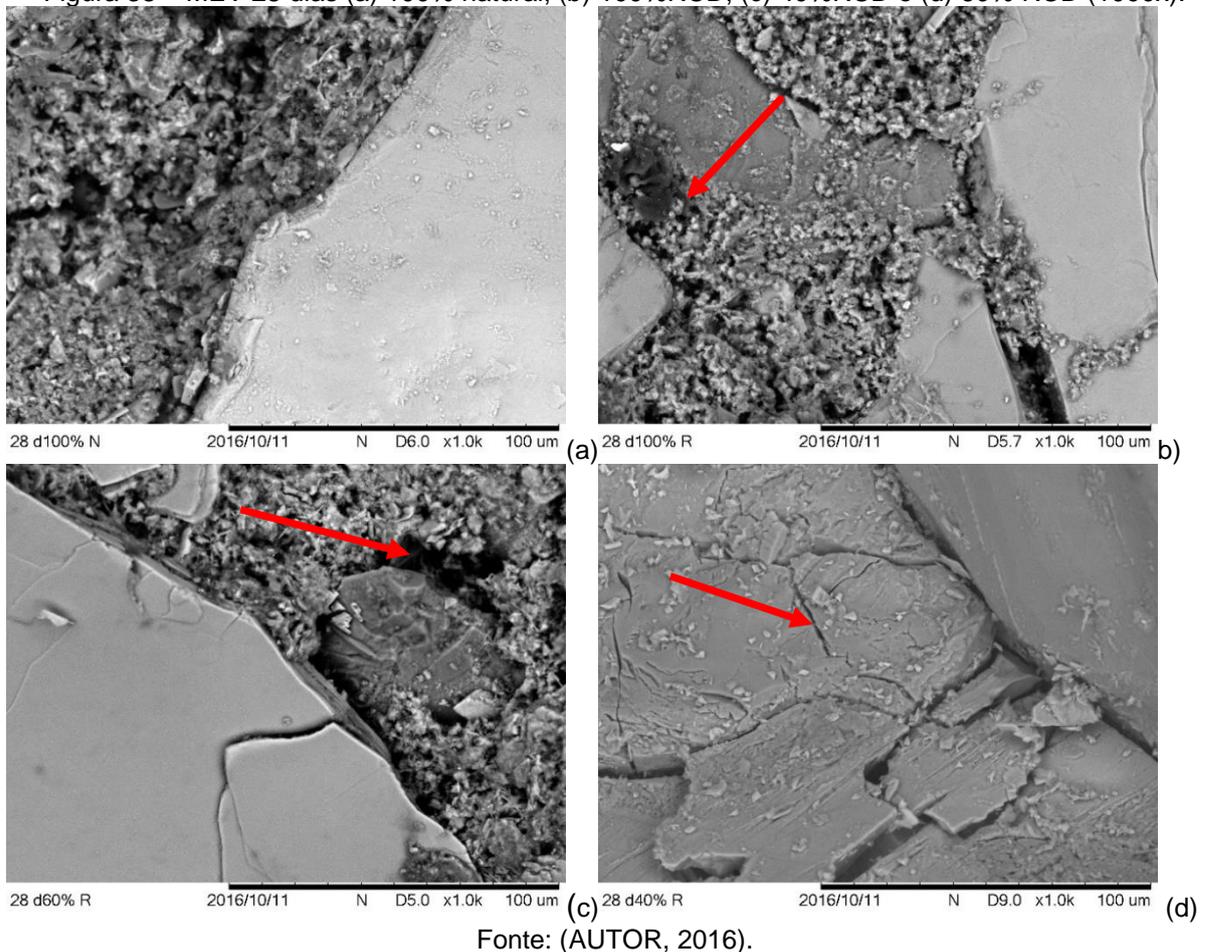




Fonte: (AUTOR, 2016).

As micrografias da figura 38 apresentam uma vista das ampliações 1000X. Na figura 38 (c) foi possível identificar a existência de vazios, a interface contribuindo para a perda de resistência mecânica do concreto. Contudo, salienta-se que as micro trincas e os vazios existentes na amostra, também podem ter sua origem na preparação das amostras. A figura 38 (d) apresenta micro trincas na argamassa de cimento.

Figura 38 – MEV 28 dias (a) 100% natural, (b) 100%RCD, (c) 40%RCD e (d) 60% RCD (1000x).



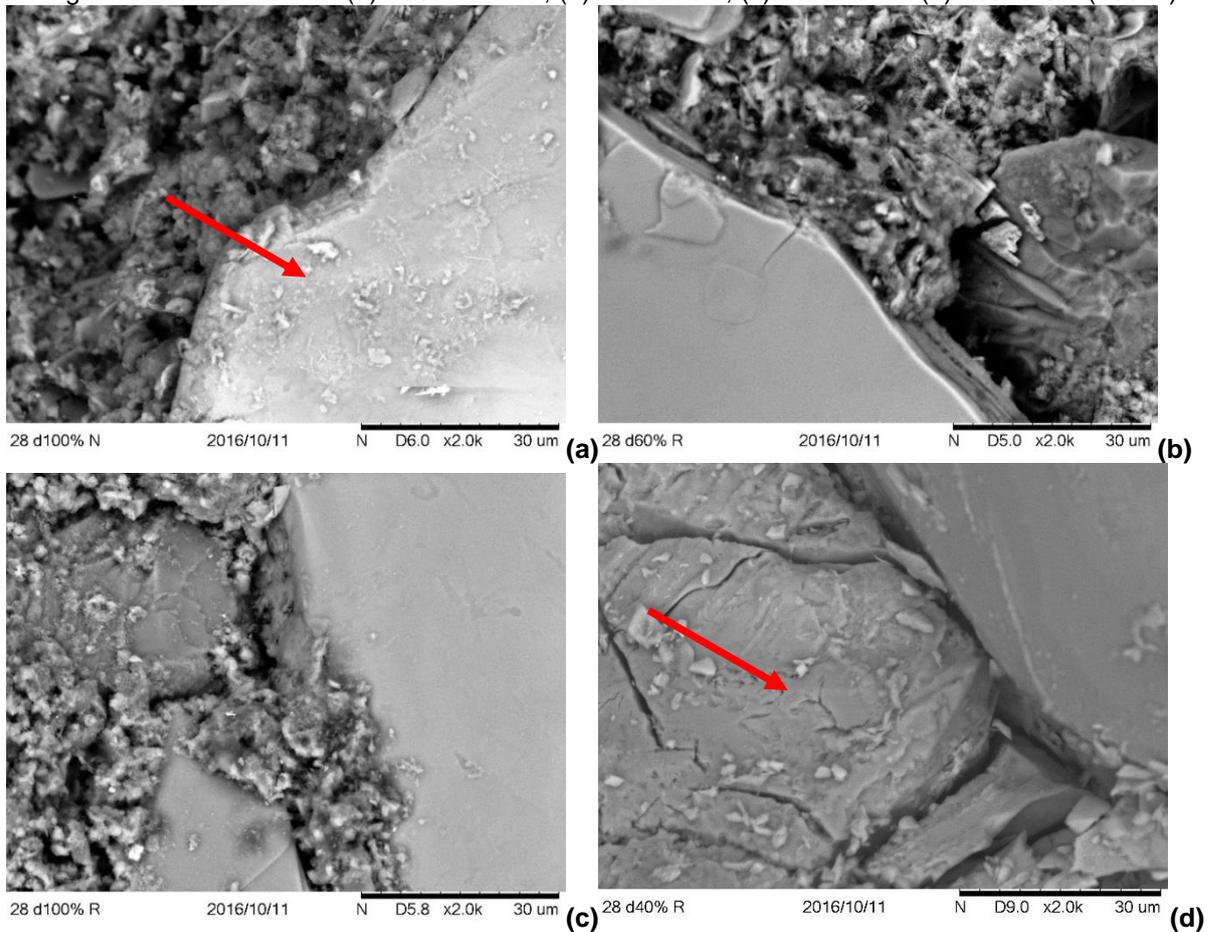
Fonte: (AUTOR, 2016).

Na figura 39 com ampliações de 2000X. Observou-se cristais aderidos às interfaces dos contornos dos grãos, em face de possível concentração de energia em seu contorno.

Segundo Monteiro (2010)

“As estruturas cristalinas do cimento Portland apresentam grandes vazios estruturais que são responsáveis pela alta energia e reatividade dos cimentos. Os cimentos apresentam também impurezas (magnésio, sódio, potássio e sílica) na estrutura cristalina”.

Figura 39 – MEV 28 dias (a) 100% natural, (b) 100%RCD, (c) 40%RCD e (d) 60% RCD (2000x).



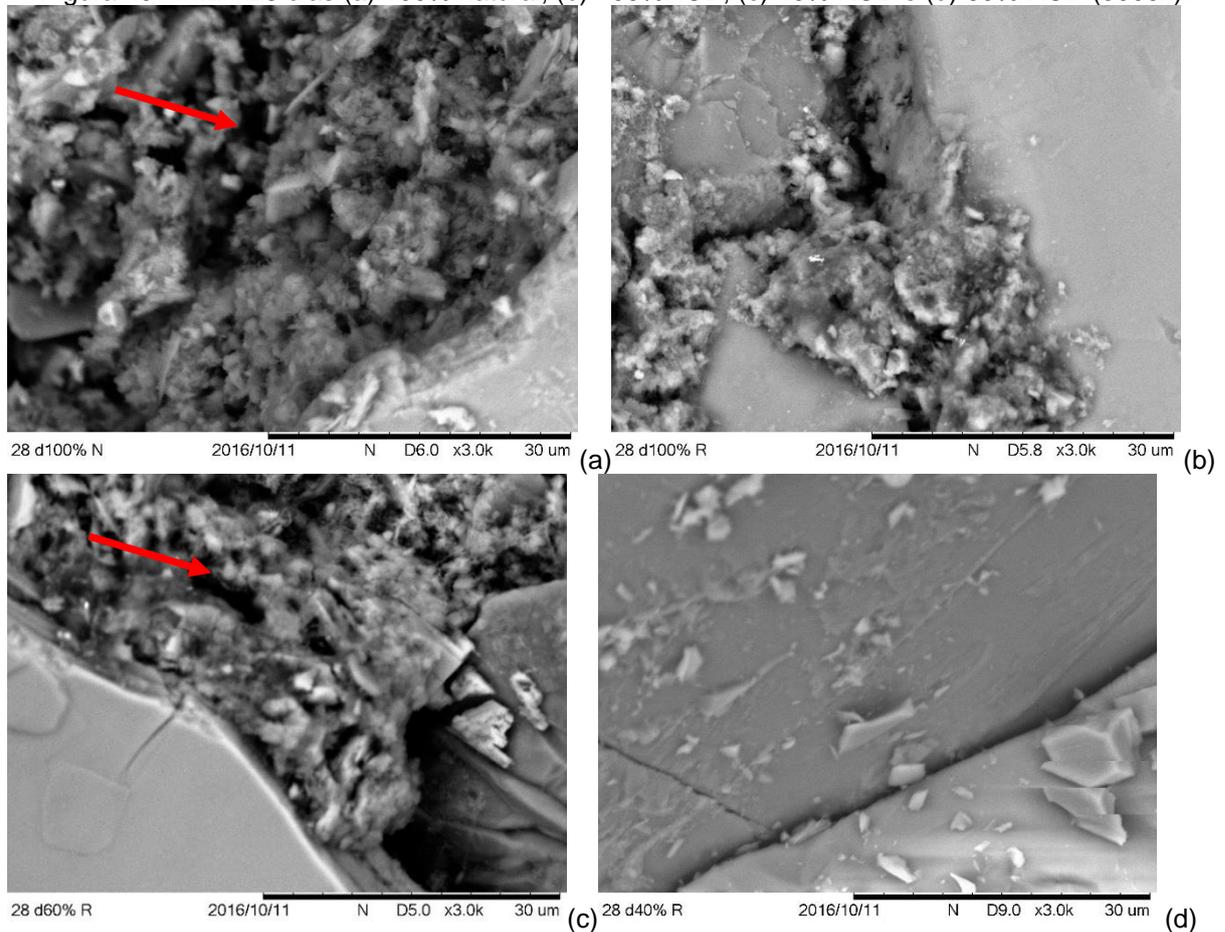
Fonte: (AUTOR, 2016).

Já na figura 40 com ampliações de 3000X. Pode-se observar a porosidade do agregado miúdo. Também houve uma interface entre o agregado natural e o RCD.

As amostras de concreto com agregado natural e as com adição de RCD, apresentaram boa aderência entre os componentes.

De acordo Leite (2010). Quanto maior o grau de hidratação do concreto, maior será a porosidade da matriz para as primeiras horas de idade do concreto.

Figura 40 – MEV 28 dias (a) 100% natural, (b) 100%RCD, (c) 40% RCD e (d) 60% RCD (3000x).



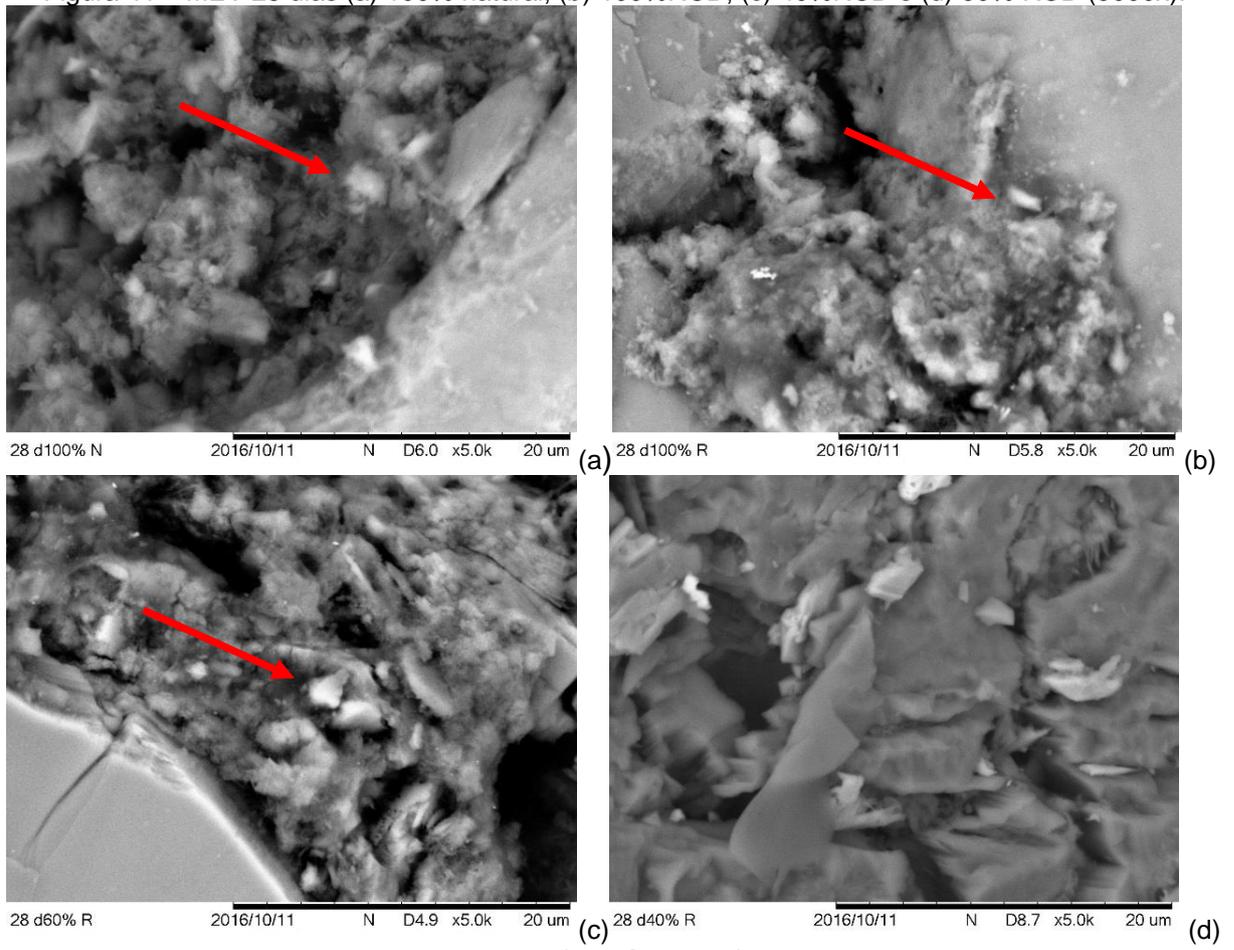
Fonte: (AUTOR, 2016).

A micrografia da figura 41 com ampliações de 5000X. Mostraram partículas de sílica (areia) envolvida pela argamassa de cimento.

Segundo Monteiro (2010).

“Cada uma das fases é de natureza multifásica. Toda partícula de agregado pode conter vários minerais, (sílica). Analogamente, tanto a matriz da pasta como a zona de transição contêm geralmente uma distribuição heterogênea, de diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e microfissuras, acrescentando-se ainda o fato de estarem sujeitas a modificações com o tempo, umidade ambiente e temperatura, o que torna o concreto, diferentemente de outros materiais de engenharia, um material com características parcialmente intrínsecas ao material”.

Figura 41 – MEV 28 dias (a) 100% natural, (b) 100%RCD, (c) 40%RCD e (d) 60% RCD (5000x).



Fonte: (AUTOR, 2016).

7. CONCLUSÕES

Os RDC de demolição apresentam características apropriadas para serem reutilizados para produção de paver, apresentando-se como um bom substituto do agregado natural para a produção de concreto não estrutural. Objetivando reduzir os impactos ambientais e econômicos causados pelos índices de entulho da construção civil.

Pelos ensaios realizados, no que tange a resistência à compressão em corpos de prova de concreto, pode-se observar que com adição de RCD, apresentou uma queda na resistência, 32,47 MPa para 40% adição de RCD, 27,08 MPa para adição de 60% de RCD e 19,13 MPa para 100% de adição de RCD.

Nos ensaios da absorção de água por imersão, não apresentaram variação nos resultados, o que mostrou que o RCD apresentou característica similar ao agregado natural, obtendo de desvio padrão 0,06 %, para o agregado natural e obtendo até 0,35 % para o RCD. Onde a NBR 9781:2013 admite absorção de até 6% para o agregado natural.

Foi observado nas micrografias que ocorre uma formação de produtos de hidratação na superfície porosa e rugosa do agregado, fato que contribuiu para aumentar a aderência da pasta/cimento. Também houve uma boa interface entre o agregado natural e o RCD, apresentando boa aderência entre os componentes.

Por se tratar de um concreto sem finalidade estrutural, a sua utilização é para fabricação de paver para utilização em calçadas, ruas de baixo movimento e jardins, não deverá ser influenciado pelos testes de compressão que não apresentou a resistência mínima de 35 MPa indicada na norma NBR 9781:2013.

O traço ideal para a produção de paver para utilização de calçadas, ruas e praças, é com adição de 60% de RCD, atingindo 27,08 MPa aos 28 dias, de acordo com a NBR 9781:2013 a resistência mínima necessária é de 25 MPa.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como uma única pesquisa é impossível vencer todos os estudos sobre o comportamento de um material, assim são feitas sugestões para trabalhos futuros.

- ✓ Avaliações dos paver quanto a resistência à abrasão;
- ✓ Avaliação de desempenho frente a elevadas cargas;
- ✓ Estudo de viabilidade econômica;
- ✓ Análise para produção em escala industrial;
- ✓ Verificação de resistência à compressão através da introdução de aditivos;
- ✓ Avaliar a influência dos agregados reciclados na retração térmica e hidráulica do concreto.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas; NBR NM 245: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. (Procedimento). Rio de Janeiro, fevereiro de 2008.

ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas (2006). *NBR. 5738- Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto*. Rio de Janeiro.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7211. Agregados para o concreto – Especificação. Rio de Janeiro (2012).

ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas *NBR.7233- Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro (2015).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004 – Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro (2011).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10005 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro (2010).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro (2004).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10007. Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro (2004).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12.042. Rochas para revestimento; materiais inorgânicos, determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro (2001).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12.118. Bloco vazado de concreto simples para alvenaria – Método de ensaio. Rio de Janeiro (2008).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15116: Agregados Reciclados de Construção Civil – Utilização em Pavimentação e Preparo de Concreto sem Função Estrutural – Requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2004. Rio de Janeiro (2009).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7207. Terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro (2011).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7215. Determinação da resistência à compressão de cimento Portland. Rio de Janeiro (2008).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7216. Amostragem de agregados. Rio de Janeiro (2012).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7217. Determinação da composição granulométrica do agregado. Rio de Janeiro (2012).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7218. Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro (2013).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7219. Determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro (2010).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7220. Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo. Rio de Janeiro (2012).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7221. Ensaio de qualidade de agregado miúdo. Rio de Janeiro (2014).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7222. Determina da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova e testemunhos cilíndricos. Rio de Janeiro (2014).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7251. Agregado em estado solto – determinação da massa unitária. Rio de Janeiro (2014).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9776. Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman. Rio de Janeiro (2009).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9780. Peças de concreto para pavimentação – Ensaio de compressão. Rio de Janeiro (2013).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9781. Peças de concreto para pavimentação. Rio de Janeiro (2013).

ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR 9833- Concreto Fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico*. Rio de Janeiro (2006).

ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR 9937- Agregados – Determinação da absorção de água e da massa específica do agregado graúdo*. Rio de Janeiro (2003).

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 53: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. (Procedimento). Rio de Janeiro (2009).

ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR. 5739- Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro (2007).

ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR. 7212- Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro (2013).

ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR. 9778- Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro (2005).

ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR.7223- Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro (2015).

ARANTES, Paulo Tadeu Leite *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. Rio de Janeiro (2010).

ARAÚJO, H.N. *Intervenção em obra para implantação do processo construtivo em alvenaria estrutural: um estudo de caso*. Florianópolis, UFSC, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, (2007).

COPEL. Pavimentos intertravados. Disponível em <http://www.tuboscopel.com.br/pavimentos-intertravados.php>. Acesso em 22 jun. 2016.

FELIPE, A. S., *Contribuição para a otimização de traços de concreto utilizados na produção de blocos estruturais*. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, da Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, (2010).

FERNANDES, I. D. *Blocos & Pavers: Produção e Controle de Qualidade*. Ribeirão Preto, São Paulo: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda (2010).

FIORITI, César Fabiano, et al. *Pavers de concreto com adição de resíduos da recauchutagem de pneus*. Artigo apresentado para Universidade de São Paulo–USP, PG. Ilha Solteira-SP (2015).

FIORITI, César Fabiano; AKASAKI, Jorge Luis; INO, Akemi. *Fabricação de pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de recauchutagem de pneus*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, USP, 2006. Disponível em <<http://www.ppgec.feis.unesp.br/producao2006/36.pdf>> Acesso em 06 jul. 2016.

GILDÁSIO R. DA SILVA, em seu livro *Manual de Traços de Concreto* (2005, p. 36).

IBRACOM Estrut. Mater. Vol. 5 n 2 São Paulo. Estudo do reaproveitamento de

resíduos de construção em concretos empregados na fabricação de blocos (2012).

ICPI – Interlocking Concrete Pavement Institute – cita, na Tech Spec nº4 (2003).

ISMAIL, Z.Z.; AL-HASHMI, E.A. Reuse of waste iron as a partial replacement of sand in concrete. *Waste Management*, 28, 2048-2053.(2008).

ISMAIL, Z.Z.; AL-HASHMI, E.A. Validation of using mixed iron and plastic wastes in concrete. In: *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*. Ancona, jun., Tarun R. Naik, UWM Center for By-Products Utilization, Milwaukee, USA. (2010).

Kamal, M.A.; JAMIL, T.; HUGHES, D.A.B. The effects of varying aggregate gradation on voids in mineral aggregates in hot mix asphalt paving mixtures. In: *Modern Methods and Advances in Structural Engineering and Construction*. Cingapore: Research Publishing Services, (2011).

KURANCHIE, F.A.; SHUKLA, S.K.; HABIBI, D. Study on mine wastes as potential resource for brick manufacturing in Western Australia. In: *Research, Development, and Practice in Structural Engineering and Construction*. Cingapore: Research Publishing Services, (2013).

LAGUNA, L. A., & IKEMATSU, P. A influência da temperatura na desforma do concreto. *Revista Técnica*, (2009).

LEITE, M. B. Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos Com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição. Porto Alegre. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, (2011).

LEVY, Salomon Mony. *Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria*. Diss. Universidade de São Paulo, (2010).

LIMA, RS. Aproveitamento de Resíduos de Construção na Fabricação de Argamassas. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, PB (2005).

LORENZI, Alexandre. "Aplicação de redes neurais artificiais para estimativa da resistência à compressão do concreto a partir da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico." (2009).

MEDEIROS, Jonas Silvestre. Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: produção de componentes e parâmetros de projeto. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, (2012).

METHA, P. K. e MONTEIRO, P.J.M. Concreto: Estruturas, Propriedades e Materiais. Editora Pini, São Paulo, (2010).

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. Editora IBRACON. São Paulo, (2007).

MOTTA, Rosângela dos Santos. *Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego*. Diss. Universidade de São Paulo, (2005).

OLIVEIRA E SOUZA, Eduardo Bezerra. Escórias de aciaria e resíduos de concretos refratários em componentes de pavimentação. [Dissertação. Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais. 128p.]. Belo Horizonte: UFMG, (2007).

PAVERTECH. Pisos de concreto. Disponível em < <http://www.pavertech.com.br/pisos.html>>. Acesso em 30 ago. 2016.

PIOROTTI, J. L. Pavimentação intertravada. Rio de Janeiro: Montana S.A., 1985. 64p.

QUARESMA, G. L. F. da F. Otimização de misturas binárias de agregados graúdos para produção de concreto. In: 9º Simpósio Internacional de Iniciação Científica. São Paulo. 9º SIICUSP-CD ROM (2010).

RIBEIRO, S., RIBEIRO, D. C., DIAS, M.B.S., GARCIA, G.C.R., SANTOS, E.M.B., Study of the Fracture Behavior of Mortar and Concretes with Crushed Rock or Pebble Aggregates. Materials Research (2011).

SYBILSKI, D.; MIRSKI, K.; KRASZEWSKI, C. Use of industrial waste materials in Road construction in Poland. In: International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures, Barcelona, Spain, Proceedings PRO 40, Bagnex, France: RILEM Publications S.A.R.L., v. 1, (2004).