



UFC

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CAMPUS RUSSAS

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

CAIO SILVA DIÓGENES

**USO DE AGREGADO RECICLADO EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO
AGREGADO GRAÚDO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO PARA PAVIMENTO
INTERTRAVADO**

RUSSAS

2021

CAIO SILVA DIÓGENES

USO DE AGREGADO RECICLADO EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO
GRAÚDO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO PARA PAVIMENTO INTERTRAVADO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal
do Ceará – Campus Russas, como
requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Ms. Camila Lima
Maia.

RUSSAS
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- D622u Diógenes, Caio Silva.
Uso de agregado reciclado em substituição parcial do agregado graúdo na produção de concreto
parapavimento intertravado / Caio Silva Diógenes. – 2021.
84 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de
Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2021.
Orientação: Prof. Me. Camila Lima Maia.
1. Concreto. 2. Resíduos de Construção e Demolição (RCD). 3. Agregado Reciclado. 4.
Resistência a Compressão. 5. Absorção. I. Título.

CDD 620

CAIO SILVA DIÓGENES

**USO DE AGREGADO RECICLADO EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO
AGREGADO GRAÚDO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO PARA PAVIMENTO
INTERTRAVADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará – Campus Russas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Msc. Camila Lima Maia (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Dr^a. Mylene de Melo Vieira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

A minha mãe e minha tia, Cacau e Zenaide.

Aos meus familiares, professores e amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceber e por sempre me acompanhar diante as dificuldades a alegrias.

A minha mãe Cacau, por ter me dado a vida, por ter me ensinado a ser um cidadão de bem, por me amar e sempre está comigo, ser a minha vida toda, ela que me ensinou tudo que eu sou e aprendi durante a vida, pelo apoio incondicional, carinho e amor que me depositou sempre.

A minha tia Zenaide, minha segunda mãe, que me inspira todos os dias a ser alguém melhor, por ter me ensinado a gostar de aprender, por ser a inspiração de toda a minha família, por me ajudar nos momentos que precisei e sempre me apoiar em tudo.

A minha avó materna, Raimunda, por todo o apoio e amor em mim depositado.

A minha avó paterna, Edevi, por todo o apoio e amor ao seu único neto.

Aos meus avôs, Floriano e Nilton que hoje não estão mais comigo, mais foram quem me inspiraram a seguir o meu curso dos sonhos.

Aos meus Tios que também não estão mais comigo, Alex, por ser também uma inspiração nos seus estudos, e Claudio que foi quem me ensinou a escrever e meus primeiros passos rumo a minha formação.

A minha Orientadora Camila que esteve sempre disposta a me ajudar, que estava sempre à disposição abdicando do seu tempo, pela paciência e pelo apoio sempre.

A Myckelle técnica do laboratório da UFC, por sempre ter me ajudado, muitas vezes fazendo os ensaios juntos comigo e pelo apoio quando precisei.

A todos os meus professores que me ensinaram vários aprendizados não só do meu curso, mas da vida.

Ao coordenador do curso Esequiel que foi peça fundamental para que eu me formasse pelo fato de ser transferido.

Aos meus colegas de curso, e futuros colegas de profissão, que sempre estiveram me ajudando.

Aos meus amigos, eu queria citar todos mas são bastantes, então a todos vocês o meu muito obrigado, pela amizade, pelos momentos bons e ruins, por tudo que vocês fazem e fizeram por mim.

E a minha família Bessa, que sempre me apoia, e me ensina todos os dias.

“Deus nunca disse que a jornada seria fácil, mas ele disse que a chegada valeria a pena”

Max Lucado

RESUMO

A questão ambiental é uma das principais preocupações da sociedade contemporânea. Todos os dias uma grande quantidade de rejeitos e resíduos são depositados a céu aberto, o que ocasiona poluição ambiental, como é o caso dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) de obras de engenharia, que equivalem a cerca de 75% dos resíduos sólidos urbanos brasileiros. Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a viabilidade técnica do uso de agregado reciclado de RCD como agregado graúdo para substituição parcial da brita utilizada na fabricação de concreto seco para pavimento intertravado. A metodologia adotada nesta pesquisa consistiu na caracterização de agregados reciclados, formulação de dosagens com substituição parcial da brita por agregado reciclado e características físicas e mecânicas dos concretos estudados como a absorção e resistência a compressão. Os resultados obtidos mostram que para uma substituição parcial da brita por 20% de agregado reciclado de RCD os resultados foram positivos. Ao se aumentar a porcentagem de RCD na mistura para produção do concreto, observou-se uma menor resistência a compressão se comparado ao concreto de referência. Em relação a absorção do concreto, todas as dosagens estudadas apresentaram valores de absorção de água dentro dos parâmetros exigidos por norma. Dessa forma, em função dos resultados obtidos conclui-se que é possível substituir até 50% da brita por agregado reciclado de RCD.

Palavras-chave: Concreto. Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Agregado Reciclado. Resistência a Compressão. Absorção.

ABSTRACT

The environmental issue is one of the main concerns of contemporary society. Every day a large amount of waste and waste is deposited in the open, which causes environmental pollution, as is the case of Construction and Demolition Waste (RCD) from engineering works, which is equivalent to about 75% of solid waste Brazilian urban areas. Thus, the present work has as main objective to evaluate the technical viability of the use of recycled aggregate of RCD as coarse aggregate for partial replacement of the gravel used in the manufacture of dry concrete for interlocked pavement. The methodology adopted in this research consists of the characterization of recycled aggregates, supply of dosages with partial replacement of the gravel by recycled aggregate and physical and mechanical characteristics of the studied concretes such as absorption and resistance to compression. The results found show that for a partial replacement of the gravel by 20% of recycled aggregate of RCD the positive results. When increasing the percentage of RCD in the mixture for the production of concrete, a lower compressive strength was observed when compared to reference concrete. In relation to the absorption of concrete, all of the doses studied were water absorption values within the parameters required by the standard. Thus, depending on the results obtained, it is concluded that it is possible to replace up to 50% of the gravel with recycled aggregate from RCD.

Keywords: Concrete. Construction and Demolition Waste (RCD). Recycled aggregate.
Compression resistance. Absorption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Geração total.	26
Figura 2: Geração per capita.....	26
Figura 3: Quantidade de RSU coletada nas regiões do Brasil.	27
Figura 4: Total de RSU coletados nas regiões.....	27
Figura 5: Dados da quantidade total de RCD coletados pelos municípios no brasil.....	31
Figura 6: estrutura dos pavimentos - Pavimentos intertravados.....	34
Figura 7: Blocos de concreto intertravado com 16 peças.....	35
Figura 8: Pavimento Intertravado.	37
Figura 9: Sequência de funcionamento de uma vibro-prensa.	41
Figura 10: Estrutura do pavimento intertravado.....	42
Figura 11: <i>Pavers</i> para pavimentação.	43
Figura 12: Programa experimental.	46
Figura 13: RCD depois de serem separados pelas peneiras.	48
Figura 14: Frascos Chapman.	50
Figura 15: Amostra seca.	51
Figura 16: Amostra submersa na água.	52
Figura 17: Corpos de provas em submersão.....	53
Figura 18: Recipiente com material.....	54
Figura 19: Recipiente preenchido com água.	55
Figura 20: Fabricação do concreto.	57
Figura 21: <i>Slump test</i>	58
Figura 22: <i>Slump test</i>	58
Figura 23: Moldagem do corpo de prova cilíndrico.....	59
Figura 24: Moldagem do corpo de prova 16 faces.	60
Figura 25: Rompimento do corpo de prova.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos Resíduos.....	23
Tabela 2: Composição média dos materiais de RCC de obras no Brasil.	29
Tabela 3: Fonte geradora e componentes dos RCC.....	29
Tabela 4: Resíduos gerados na construção civil.....	30
Tabela 5: Ensaios para agregados miúdos.....	38
Tabela 6: Ensaios para caracterização dos agregados graúdos.....	39
Tabela 7: Porcentagens passantes no ensaio de granulometria.	56
Tabela 8: Parâmetros granulométricos dos agregados miúdos (DMC: Dimensão máxima característica, MF: Módulo de finura).....	62
Tabela 9: Parâmetros granulométricos dos agregados graúdos naturais e reciclados (DMC: Dimensão máxima característica, MF: Módulo de finura).....	66
Tabela 10: absorção dos agregados.	66
Tabela 11: Resultados da massa específica e massa unitária.	67
Tabela 12: Porcentagem dos materiais por combinação.	68
Tabela 13: Traço dos componentes do concreto seco.	68
Tabela 14: Combinações dos agregados graúdos.....	69
Tabela 15: Combinações dos agregados.....	70
Tabela 16: Teor de absorção de água.	72

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Composição do RCD na cidade de São Paulo.....	32
Gráfico 2: Composição de RCD na cidade de Recife.	33
Gráfico 3: Curva granulométrica do agregado miúdo.	61
Gráfico 4: Zonas da curva granulométrica dos agregados miúdos.....	62
Gráfico 5: Curva granulométrica do agregado graúdo natural.	63
Gráfico 6: Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado.	64
Gráfico 7: Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado.	64
Gráfico 8: Limites da curva granulométrica do agregado graúdo natural e reciclado.	65
Gráfico 9: Curva granulométrica dos agregados combinados.....	69
Gráfico 10: Curva granulométrica dos agregados graúdos combinados.	70
Gráfico 11: Curva granulométrica com 50% de RCD.....	71
Gráfico 12: Absorção do concreto convencional.	72
Gráfico 13: Absorção do concreto com 20% de RCD.....	73
Gráfico 14: Absorção do concreto com 40% de RCD.....	74
Gráfico 15: Média das absorções.....	74
Gráfico 16: Resistência à compressão - Concreto Convencional.....	76
Gráfico 17: Resistência à compressão - Concreto com RCD 20%.....	76
Gráfico 18: Resistência à compressão - Concreto com RCD 40%.....	77
Gráfico 19: Resistência à compressão - todos os corpos de provas.	78
Gráfico 20: Resistência Média de cada traço.	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANEPAC	Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção
ARC	Agregado de Resíduo de Concreto
ARM	Agregado de Resíduo Misto
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria de Construção
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COOPERCON- CE	Cooperativa de Construção Civil do Ceará.
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
PIB	Produto Interno Bruto
RCD	Resíduo de construção e Demolição
RCS	Resistência à Compressão Simples
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente

LISTA DE SIMBOLOS

CO_2 Gás Carbônico

ρ_{ap} é a massa unitária do agregado

m_{ar} é a massa do recipiente mais o agregado

m_r é a massa do recipiente vazio

V é o volume do recipiente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Considerações Iniciais	17
1.2	Problema de Pesquisa	18
1.3	Justificativa	19
1.4	Objetivos	20
1.4.1	Objetivo Geral	20
1.4.2	Objetivos específicos.....	20
1.5	Estrutura do Trabalho	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1	Definição de Resíduos de Construção e Demolição (RCD).....	21
2.1.1	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil.....	21
2.2	Classificação e Legislação	22
2.3	Geração de Resíduos	25
2.3.1	Resíduos Sólidos Urbanos.....	25
2.4	Origem e Composição do RCD	28
2.5	Impacto Ambiental do RCD	30
2.6	Composição do RCD	31
2.7	Pavimento Intertravado	33
2.7.1	Definição	33
2.8	Blocos de Concreto Intertravado	35
2.9	Dosagem.....	37
2.10	Processo Produtivo	39
2.11	Assentamento e Intertravamento.....	42
2.12	O Uso do RCD em Blocos de Concreto Intertravado.....	43
2.13	Propriedades Requeridas	44
2.13.1	Resistência à Compressão	45
2.13.2	Absorção de água	46
3	MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1	Programa Experimental.....	46
3.2	Materiais Utilizados.....	47
3.3	Caracterização dos Materiais	48
3.3.1	Granulometria	48
3.3.2	Massa Específica - Agregados Miúdos	49
3.3.3	Massa Específica dos agregados graúdos.....	50

3.3.4 Absorção de água	52
3.3.5 Massa Unitária	54
3.3.6 Dosagem e Moldagem.....	55
3.3.7 Resistência à Compressão	59
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	61
4.1 Caracterização dos Agregados	61
4.1.1 Granulometria do agregado miúdo.....	61
4.1.2. Granulometria do agregado graúdo.....	63
4.1.3 Absorção de água	66
4.1.4 Massa específica aparente e massa unitária	67
4.2. Caracterização do Concreto Seco.....	68
4.3. Absorção de água do Concreto Seco.....	71
4.4. Resistência à Compressão	75
4.4.1 Resultado por tipo de agregado utilizado	75
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	80
REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O mundo vem trabalhando nos últimos anos com uma enorme preocupação: a questão ambiental. Ou seja, em tudo que é estudado, feito, trabalhado, deve ser observada a preocupante questão sustentável, e todos os dias procuram-se novas formas de incluí-la. Sendo assim, ser sustentável significa dizer que foi adotada uma visão que já não se encaixa mais em uma estratégia empresarial, mas que representa hoje em dia um desejo pessoal de garantir uma vida com melhor qualidade para as gerações do futuro, assegurando a manutenção de recursos naturais e um ambiente de qualidade satisfatória (IACKS, 2019).

São muitos os objetivos relacionados a questões ambientais, visto que uma grande quantidade de rejeitos é depositada a céu aberto, o que ocasiona poluição, como os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) de obras de engenharia. Deste modo, com a grande quantidade de RCD que é produzido por ano e a grande quantidade de rejeitos sendo descartados, começaram os estudos que buscam dar um devido uso a esses resíduos. Nesse sentido, surgiram os estudos que buscam o reaproveitamento do RCD em obras de engenharia.

Devido ao crescimento da população mundial, conseqüentemente aumentando o número de construções e também o acréscimo de demolições devido a novas formas de construções, percebe-se a necessidade de reaproveitamento do RCD, bem como o uso consciente destes materiais, transformando-os posteriormente em materiais de amplo valor comercial, proporcionando não apenas uma qualidade sustentável, como também uma mudança no cenário econômico (MACEDO, 2009).

São muitos os usos do RCD em obras de engenharia, inclusive em obras de pavimentação. No entanto, para poderem ser utilizados, esses materiais precisam atender às exigências físicas e mecânicas de acordo com as normas sobre o assunto, como: ser resistentes, duráveis e trabalháveis, dentre outras características importantes, já que os resíduos devem apresentar resultados semelhantes ou superiores aos produtos que já existem no mercado (LIMA & ROSSIGNOLO, 2010).

Essas exigências devem ser cumpridas pois a pavimentação tem de oferecer ao mercado, as obras e ao cliente, produtos de adequada qualidade e vida útil superior aos existentes (BEZERRA, et al, 2011). Portanto, devido ao RCD ser um resíduo de materiais já utilizados

em construções, os mesmos apresentam todos os requisitos necessários para uma boa trabalhabilidade, resistência, durabilidade, entre outros aspectos necessários.

Segundo estimativas desenvolvidas pela ANEPAC (2014) o consumo de agregados para a construção de concretos e argamassas no Brasil alcançou a marca de 741 milhões de toneladas por ano, e já deve ter aumentado no decorrer dos anos posteriores. Então, percebe-se que uma alternativa para o problema dos resíduos seria a sua reutilização ou reciclagem em obras de engenharia, que conseqüentemente traria a redução no descarte incorreto desse material, possibilitando assim a conservação de recursos naturais e economia de energia, sobretudo na área da construção civil, que é um dos setores que mais consomem recursos naturais.

O pavimento intertravado vem ganhando força e importância em obras no mundo todo, e particularmente no Brasil. Por isso surgiu a busca por materiais alternativos que possam ajudar a melhorar a composição do pavimento intertravado, levando em consideração também os aspectos ambientais, econômicos e tecnológicos, que possam ser confiáveis e tragam uma melhor qualidade nas peças de concreto intertravado, ou que pelo menos possam substituir algumas de suas características. A vida útil do pavimento intertravado pode chegar até 25 anos, desde que seja bem desenvolvido, tenham projetos apropriados para a sub-base, blocos de ótima qualidade e que estes estejam bem assentados.

Segundo ALMEIDA et al (2018) a construção e manutenção das vias urbanas tem originado um imenso consumo de matéria-prima que será extraído de jazidas naturais. Portanto, algumas restrições colocadas pela legislação ambiental acerca da exploração de recursos naturais provocaram escassez e custos excessivos na aquisição de matérias-primas. O impacto é sentido com força pelo departamento de pavimentação, que utiliza grandes volumes de recursos naturais, de tal modo que torna viável a procura por materiais alternativos.

Contudo, o presente trabalho tem como objetivo investigar a substituição parcial da brita convencional por agregado reciclado de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) na fabricação de peças de concreto intertravado, visto que toneladas de RCD são despejados de formas incorretas por todo o país, buscando assim, uma nova forma de uso desses materiais, sendo eles reciclados, renovados e reutilizados na pavimentação.

1.2 Problema de Pesquisa

A construção civil é responsável pelo descarte de uma enorme quantidade de Resíduos de Construção e Demolição, e grande parte desses resíduos são descartados de forma

inadequada, causando um impacto ambiental. Segundo FAGURY et al (2007) a geração de Resíduos de Construção e Demolição (RCDs) pode alcançar até duas toneladas para cada tonelada de lixo domiciliar.

A produção de RCD no Brasil chegou a cerca de 45 milhões de toneladas no ano de 2016, compondo aproximadamente 57% da massa total de resíduos sólidos urbanos (ABRELPE, 2017). Por outro lado, a pavimentação consome uma enorme quantidade de materiais, e, em alguns locais é possível perceber uma escassez de materiais naturais para uso em obras de infraestrutura viária. Nesse sentido, o reaproveitamento do RCD em obras de pavimentação poderia ser vantajoso.

1.3 Justificativa

Devido à grande quantidade e ao descarte inadequado do RCD, procura-se com essa pesquisa um reaproveitamento destes resíduos em obras de pavimentação. Deste modo, é possível diminuir o impacto ambiental causado e, conseqüentemente, resultar na procura por demandas mais econômicas, diminuindo os custos com materiais.

A Resolução nº 307 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA 2002), estabelece diretrizes, critérios e metodologias para a gestão dos resíduos provenientes das atividades da construção civil. Segundo a Resolução “Considerando que os resíduos da construção civil representam um significativo percentual dos resíduos sólidos produzidos nas áreas urbanas” deve-se então conceder aos rejeitos a sua devida reutilização, para garantir assim um menor impacto ambiental e também econômico. Deste modo, surgiu a motivação para utilizar o agregado reciclado de RCD como forma de substituir o agregado graúdo na confecção de blocos de concreto para pavimento intertravado.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é avaliar a viabilidade técnica do uso de agregado reciclado de RCD como agregado graúdo em substituição parcial da brita convencional utilizada na fabricação de peças de concreto para pavimento intertravado.

1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar a caracterização física e mecânica do agregado reciclado de RCD provenientes de concreto, argamassas e materiais cerâmicos, e a brita convencional;
- Desenvolver dosagens para concreto intertravado utilizando os agregados convencionais e o agregado reciclado (RCD);
- Analisar as características mecânicas do concreto convencional e do concreto com agregado reciclado de RCD através da resistência a compressão simples;
- Determinar a absorção de água em peças de concreto para pavimento intertravado;
- Analisar a substituição parcial do agregado britado pelo agregado reciclado de RCD.

1.5 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho será estruturado em 5 capítulos, descritos a seguir.

O primeiro capítulo consiste na introdução do tema proposto, sendo apresentadas as considerações iniciais, o problema de pesquisa, a justificativa do tema, o objetivo geral, os objetivos específicos e a estrutura da monografia, com uma definição de cada capítulo.

O segundo capítulo compreende uma revisão bibliográfica sobre os Resíduos de Construção e Demolição, contendo alguns tópicos, como sua definição, classificação, geração, composição, impactos ambientais e beneficiamento do resíduo, a fim de uma revisão de literatura.

No terceiro capítulo são abordados os materiais e métodos utilizados para a produção do concreto intertravado com adição de RCD, contendo detalhadamente quais materiais e quantidades escolhidas para o estudo, bem como o método utilizado no experimento.

O quarto capítulo será seguido pelos resultados e discussões após o estudo feito em laboratório. Será discutido o procedimento experimental utilizado, os resultados serão mostrados em tabelas comparativas para uma melhor visualização, observando assim o efeito na substituição da brita pelo RCD e também a viabilidade dessa substituição.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho, mostrando se os objetivos iniciais foram atingidos, explicando-os e direcionando para trabalhos futuros, assim como as limitações dessa pesquisa. Por fim, são mostradas as referências bibliográficas utilizadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Definição de Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002) define o resíduo de construção civil (RCD) como sendo todo o material que provém de construções, reformas, reparos e demolições, oriundos de qualquer tipo de obras da construção civil, como as edificações, estradas, barragens, entre outros tipos.

2.1.1 Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil

“Os agregados reciclados são provenientes 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, solo, rocha, madeira, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha (NBR 15116, p2, 2004)”.

De acordo com a norma NBR 15116 (ABNT, 2004), o agregado reciclado é todo e qualquer material granular derivado do proveito de resíduos de construção ou demolição de obras civis, que apresenta características técnicas para a aplicação em obras de edificação e infraestrutura.

Ainda segundo a NBR 15116 (ABNT, 2004), o agregado reciclado pode ser classificado como Agregado de Resíduo de Concreto – ARC, que é o agregado reciclado obtido do proveito de resíduo, composto na sua fração graúda, de pelo menos 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas. Sua composição deve determinado a atender aos requisitos das aplicações específicas. Sendo classificado também como Agregado de Resíduo Misto – ARM, que são os resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento e outros), argamassas e concretos conforme determinados por norma.

Nesse trabalho, discute-se as propriedades físicas e mecânicas do Agregado de Resíduo Misto – ARM, pois trata-se de uma mistura do agregado natural, com o resíduo de argamassas, concretos e cerâmicas vermelhas, caracterizando assim o agregado utilizado como misto.

2.2 Classificação e Legislação

O RCD é o mais heterogêneo de todos os resíduos industriais, o que acarreta uma certa dificuldade na sua classificação, pois ele é constituído praticamente de quase todos os materiais da construção, sendo estes, argamassa, areia, cerâmicas, aços, concretos, entre outros. Sendo assim, sua constituição química está vinculada a cada um destes materiais. Porém, grande parte da sua composição é estruturada por material não mineral (madeira, papel, plásticos, metais e matéria orgânica) (ZORDAN, 2000).

Segundo Leite (2001) todo e qualquer tipo de resíduo sólido precisa ser classificado para saber quais os riscos que oferecem ao meio ambiente, para que possam ter um adequado manuseio e destino. A norma que conduz os critérios dos resíduos sólidos no Brasil é a NBR 10.004 (2004). Esta norma classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente. Assim, de

acordo com a referida norma, os resíduos podem ser classificados em duas categorias, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Classificação dos Resíduos.

Classificação	Descrição
Classe I – Perigosos	Resíduos que expõem risco à saúde pública devido algumas das suas propriedades de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.
Classe II – Não Perigosos	Classe IIA – Não inertes: São resíduos que não se apresentam como inflamáveis, corrosivos, tóxicos, patogênicos, e nem possuem tendência a sofrer uma reação química.
	Classe IIB - inertes: não são solúveis, nem inflamáveis, não sofrem qualquer tipo de reação física ou química, nem afetam negativamente outras substâncias que entrem em contato com esse tipo de resíduo.

Fonte: Conama (2002).

Zaharieva et al. (2002) acreditam que a característica de inerte não pode ser atribuída ao agregado reciclado de RCD devido este não ser um material inerte, pois possui grandes teores de impurezas, entre eles metais pesados, que conseqüentemente podem vir a lixiviar e também afetar a durabilidade dos concretos feitos com desse material. Contudo, ZORDAN (2000) o contradiz ao argumentar que o RCD pode encaixar-se em qualquer uma das classes, seja ela a classe IIA ou a Classe IIB, dependendo apenas da sua origem e constituição.

Além da classificação elaborada e citada por PINTO (1999), também existe uma classificação mais atualizada, 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).

O CONAMA estabelece parâmetros e normas para a proteção ao meio ambiente, por meio de atos como resoluções, moções, recomendações, proposições e decisões. A Resolução do CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002 qualifica os Resíduos de Construção e Demolição

e instituiu diretrizes, parâmetros e procedimentos para a gestão dos mesmos, entrando em vigor no início de 2003 (AMADEI, 2011).

Sendo assim, de acordo com a Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), os resíduos da construção civil são divididos em 4 classes distintas, conforme mostrado abaixo:

- a) 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;
- b) Classe B: são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;
- c) Classe C: são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
- d) Classe D: Resíduos perigosos derivados do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleo, etc. ou materiais provenientes de demolições, reformas e reparos de locais radiológicos e instalações industriais que possam estar contaminados ou serem nocivos à saúde.

Além disso, segundo Hood (2006), a própria resolução instituiu que os geradores incluíssem os Projetos de Gerenciamento de Resíduos na Construção Civil nos projetos de obras a serem colocados para aprovação ou licenciamento nos órgãos competentes. Também definiu que todos os municípios e o Distrito Federal criassem programas de gerenciamento de resíduos na construção civil.

De acordo com Sipres (2019) existe outra classificação, que é bastante utilizada em usinas de reciclagem, que consiste na divisão do RCD em outros dois grupos classificados de acordo com sua cor: cinza e vermelho. Segundo Ângulo (2005) o grupo de cor cinza, contém produtos com base material de cimento, que são utilizados em calçadas, blocos de concreto e em mobiliários urbanos à base de cimento. Enquanto o grupo de cor vermelha considera os 7 materiais de construção de natureza cerâmica e podem ser empregados em atividades de pavimentação.

2.3 Geração de Resíduos

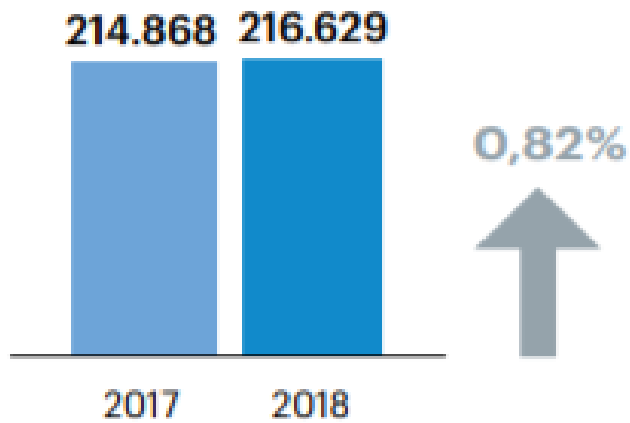
2.3.1 Resíduos Sólidos Urbanos

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2019) divulgou que no ano de 2018 foram geradas no Brasil 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, um aumento de pouco menos de 1% em relação ao ano anterior. Desse montante, 92% (72,7 milhões) foram coletados. Por um lado, isso significa uma alta de 1,66% em comparação a 2017, ou seja, a coleta aumentou num ritmo um pouco maior que a geração. Por outro, evidencia que 6,3 milhões de toneladas de resíduos não foram recolhidas junto aos locais de geração.

Ainda segundo a Abrelpe (2019) a destinação apropriada em aterros sanitários foi de apenas 59,5% dos resíduos sólidos urbanos coletados, ou seja, 43,3 milhões de toneladas, um pequeno avanço em relação ao cenário do ano anterior. O que restou (40,5%) foi despejado em locais impróprios por 3.001 municípios. Ou seja, 29,5 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) acabaram indo parar em lixões ou aterros controlados, que não contam com os procedimentos e com sistemas e medidas necessários para proteger a saúde das pessoas e o meio ambiente contra danos e degradações.

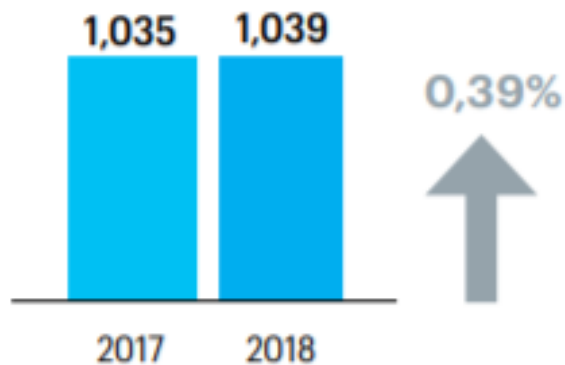
A Abrelpe (2019) publicou que entre os anos de 2017 e 2018 ocorreu um aumento na geração de RSU no Brasil de quase 1%, chegando a cerca de 216.629 toneladas diárias. Como o aumento de 0,40% da população brasileira a geração per capita teve um crescimento menor, de 0,39%, mostrando que cada cidadão gerou por dia cerca de 1kg de resíduo, como mostrado nas Figuras 1 e 2.

Figura 1: Geração total.



Fonte: Abrelpe/IBGE (2019).

Figura 2: Geração per capita.



Fonte: Abrelpe/ IBGE (2019).

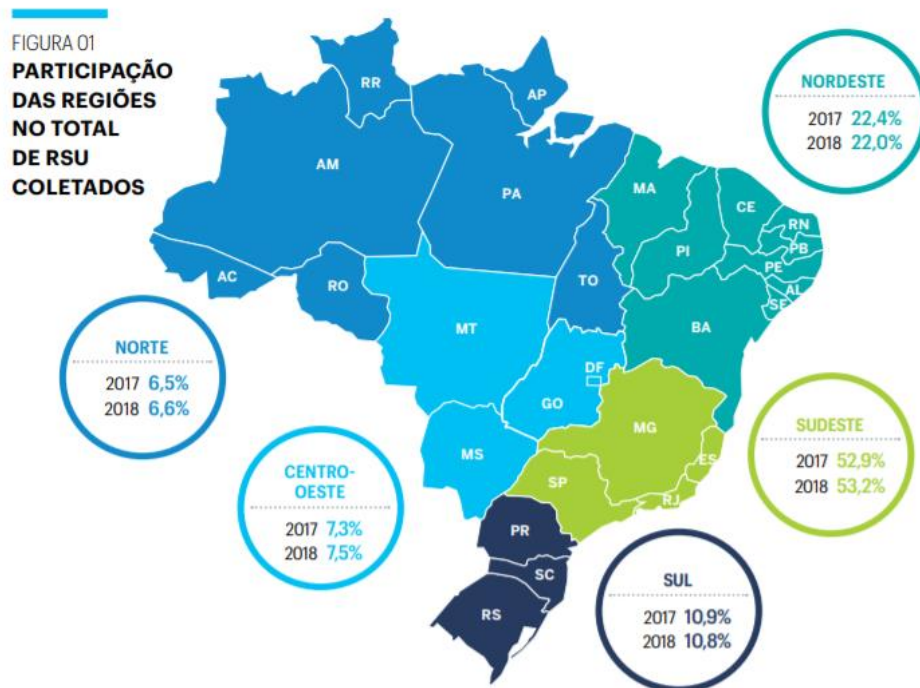
O volume que foi destinado a coleta em todas as regiões do Brasil teve uma expansão, exceto na região nordeste como mostrado na Figura 3, sendo o Nordeste a única região que teve diminuição da sua população nos anos citados, justificando assim a queda no volume de resíduos, onde mostrou que o volume de resíduos foi maior que a geração, chegando a um total de 199.311 toneladas/dia. Comparado ao ano de 2017, teve um aumento de mais de 1%, como exposto na Figura 4 (Abrelpe, 2019).

Figura 3: Quantidade de RSU coletada nas regiões do Brasil.

Regiões	2017	População 2018	2018
	RSU Total (toneladas/dia)		RSU Total (toneladas/dia)
Norte	12.705	18.182.253	13.069
Nordeste	43.871	56.760.780	43.763
Centro-Oeste	14.406	16.085.885	14.941
Sudeste	103.741	87.711.946	105.977
Sul	21.327	29.754.036	21.561
BRASIL	196.050	208.494.900	199.311

Fonte: Abrelpe/IBGE (2019).

Figura 4: Total de RSU coletados nas regiões.



Fonte: Abrelpe/IBGE (2019).

2.4 Origem e Composição do RCD

Segundo Levy (1997) o RCD tem sua origem de três formas, sendo elas:

- Catástrofes naturais ou artificiais: bombardeios, desabamentos, incêndios, entre outros;
- Demolições: pavimentos rodoviários de concreto ou de obras que chegaram ao final de sua vida útil;
- Deficiência inerente ao processo construtivo empregado e à baixa qualificação da mão de obra.

Já a Resolução do CONAMA nº 307 (2002) definiu a composição do RCD em função de seus elementos constituintes (tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, entre outros) e das atividades que os originam (construção, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, além da preparação e da escavação de terrenos).

O RCD é o material mais heterogêneo entre os resíduos industriais. A construção civil incorpora muitas atividades no canteiro de obras e, portanto, os resíduos gerados nessas atividades conseguem estar na composição dos materiais constituintes, como por exemplo, plásticos, papel, madeiras, metais, concretos, argamassas, areia, blocos, cerâmicas, gesso, tintas e muitos outros (AMADEI, 2011; LEITE, 2001; ZORDAN, 2000).

Como observado, os materiais que compõem o RCD são diversos e para demonstrar isso o IPEA (2012) fez um estudo e apresentou nas Tabelas 2 e 3 a porcentagem de cada material na composição do RCD.

Tabela 2: Composição média dos materiais de RCC de obras no Brasil.

COMPONENTES	PORCENTAGEM
ARGAMASSA	63
CONCRETO E BLOCOS	29
OUTROS	7
ORGÂNICOS	1
TOTAL	100

Fonte: IPEA (2012 apud SILVA FILHO 2005).

Tabela 3: Fonte geradora e componentes dos RCC.

COMPONENTES	TRABALHOS RODOVIÁRIOS	ESCAVAÇÕES	SOBRAS DE DEMOLIÇÕES	OBRAS DIVERSAS	SOBRAS DE LIMPEZAS
CONCRETO	48	6,1	54,3	17,5	18,4
TIJOLO	0	0,3	6,3	12	5
AREIA	4,6	9,6	1,4	3,3	1,7
SOLO, POEIRA, LAMA	16,8	48,9	11,9	16,1	30,5
ROCHA	7	32,5	11,4	23,1	23,9
ASFALTO	23,6	0	1,6	1	0,1
METAIS	0	0,5	3,4	6,1	4,4
MADEIRA	0,1	1,1	1,6	2,7	3,5
PAPEL/MATERIAL ORGÂNICO	0	1	1,6	2,7	3,5
OUTROS	0	0	0,9	0,9	2

Fonte: IPEA (2012 apud LEVY 1997).

Segundo a COOPERCON-CE (2008) – Cooperativa da Construção Civil do Estado do Ceará - a composição e a quantidade gerada de resíduos estão ligadas ao grau de aumento da indústria da construção civil de cada estado ou município que começa desde a fase da obra, técnicas construtivas e mão-de-obra qualificada. A COOPERCON (2008) mostra em suas pesquisas quais os principais resíduos que são gerados na construção civil, conforme Tabela 4.

Tabela 4: Resíduos gerados na construção civil.

ITEM	RESIDUO	MATERIAL	CLASSE
1	ARGAMASSA	ENTULHO	A
2	DEMOLIÇÃO DE ALVENARIAS	ENTULHO	A
3	PISOS CERÂMICOS	ENTULHO	A
4	CONCRETO	ENTULHO	A
5	PISO DE GRANITO	ENTULHO	A
6	SOLO	ENTULHO	A
7	TIJOLOS QUEBRADOS	ENTULHO	A
8	FOLHAS DE MADERIT	MADEIRA	B
9	FORRAMENTO	MADEIRA	B
10	LINHAS, CAIBROS E RIPAS DE COBERTA	MADEIRA	B
11	TABUA DE FORMA	MADEIRA	B
12	APARAS DE PERFIS DE AÇO	METAL	B
13	EMBALAGENS DE TINTAS, SOLVENTES	METAL	B
14	SOBRAS DE FIAÇÃO	METAL	B
15	EMBALAGENS DE PAPEL/PAPELÃO	PAPEL	B
16	SOBRAS DE PERFIS DE ALUMINIO	METAL	B
17	APARAS DE ELETRODUTO	PLASTICO	B
18	APARAS DE TUBOS DE PVC	PLASTICO	B
19	EMBALAGENS DE ÁGUA E REFRIGERANTES	PLASTICO	B

Fonte: COOPERCON-CE (2008).

2.5 Impacto Ambiental do RCD

De acordo com estimativas apresentadas pela Câmara Brasileira da Indústria de Construção (CBIC, 2010), o setor da construção civil vem aumentando significativamente, onde se pode observar um acréscimo superior entre os anos de 2003 e 2010. Pelo desenvolvimento do setor da construção civil no decorrer dos anos, alguns impactos ganharam

mais força no país. No ponto positivo, teve um impacto no PIB, que, de acordo com Amorim (2015), a alta na Construção (1,6%) certamente contribuiu para alavancar o PIB nacional e o PIB industrial (0,5%). No ponto negativo, ocorreu um grande impacto ambiental onde pode ser observado que a construção civil se tornou um dos principais setores a emitir CO₂ para a atmosfera, causando grandes preocupações para a sociedade.

A Abrelpe (2019) mostra que os serviços de limpeza dos municípios coletaram em 2018 122.012 toneladas desse tipo de resíduo por dia, um aumento pequeno em comparação ao ano de 2017, cerca de 3,5%. Ressalta-se que esses dados se referem à quantidade colhida pelos municípios. Como o responsável por recolher os resíduos é o gestor da obra, os números expostos refletem, em sua grande parte, apenas aquilo que foi deixado em vias e logradouros públicos, como mostrado na Figura 5.

Figura 5: Dados da quantidade total de RCD coletados pelos municípios no Brasil.

2017		2018	
Total (toneladas/dia)	Per capita (kg/habitante/dia)	Total (toneladas/dia)	Per capita (kg/habitante/dia)
123.421	0,594	122.012	0,585

Fonte: Abrelpe/IBGE (2019).

2.6 Composição do RCD

Na análise da composição do RCD precisam ser examinados alguns fatores, tais como, as técnicas construtivas empregadas, todos os materiais disponíveis nos locais e também os índices de perdas de materiais mais consideráveis, visto que esses fatores estão ligados a variabilidade da estrutura do entulho. Algumas características dos materiais que constituem o RCD podem ser conhecidas de modo que este resíduo possa ser empregado de maneira correta no processo de reciclagem (AMADEI, 2011).

Sapata (2002) descreve que a constituição do RCD acontece em função das características geográficas do local da construção, do tipo da construção, dos hábitos e dos costumes locais. Para reconhecer o material, o procedimento de discriminação dos resíduos contém uma análise química inteira do produto, como também a umidade e natureza dos

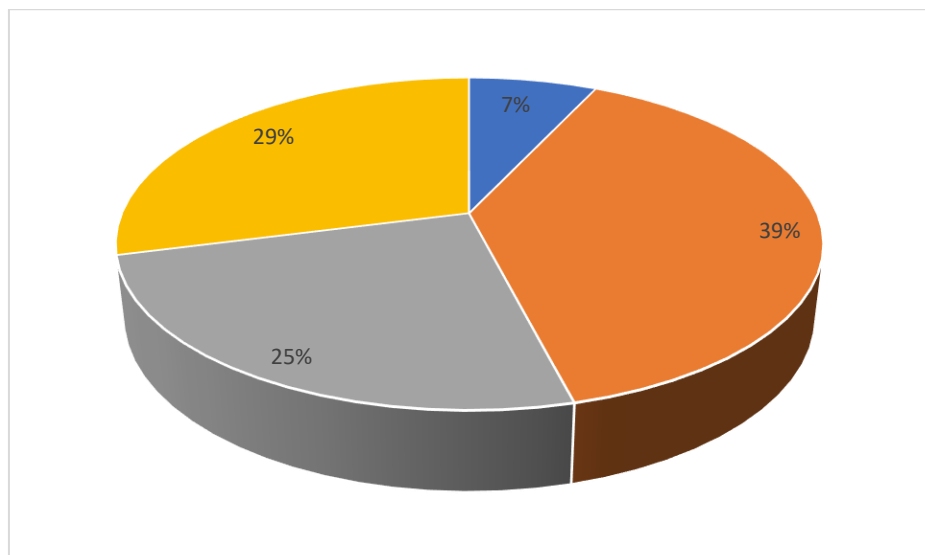
materiais voláteis, reconhecimento da microestrutura, mineralogia e porosidade, investigação física, como densidade, ponto de fusão e granulometria e estudo ambiental, para que possa enquadrar na normalização vigente (KOHLER, 2013).

John (2000) propôs uma separação por tipo de material, sendo:

- Solos;
- Materiais cerâmicos: compostos por rochas naturais, concreto, argamassa, a base de cimento e cal, resíduos de cerâmica vermelha, como tijolos e telhas, diversos tipos de cerâmicas e outros materiais em menor quantidade;
- Materiais metálicos: compostos por aço provenientes de concreto armado, alumínio e ferros;
- Materiais orgânicos: madeira natural ou industrializada, plásticos, materiais betuminosos, tintas e papel de embalagem.

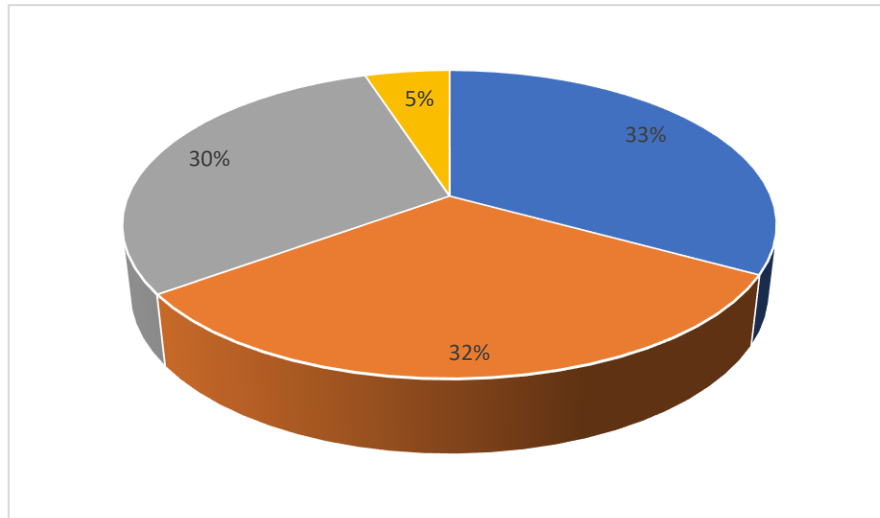
Carneiro (2005) fez um levantamento da composição do entulho da cidade de São Paulo e da cidade de Recife para fazer um estudo comparativo por se tratar de duas capitais distantes fisicamente e com culturas e métodos construtivos divergentes. O Gráfico 1 mostra a composição do RCD de São Paulo e o Gráfico 2 de Recife.

Gráfico 1: Composição do RCD na cidade de São Paulo.



Fonte: Adaptado de (Carneiro, 2005).

Gráfico 2: Composição de RCD na cidade de Recife.



Fonte: Adaptado de (Carneiro, 2005).

Percebe-se que na cidade de São Paulo a constituição do RCD tem uma grande predominância de material proveniente de concreto e argamassa, tendo quase o dobro dos outros materiais. Já na cidade de Recife os materiais são bem mais distribuídos, mesmo tendo um maior teor de material advindo de argamassas e concretos.

Segundo JHON (2000), tecnicamente, a reciclagem do entulho vai variar conforme a sua composição e por esse motivo é importante a sua discriminação. A parte do material cerâmico, por exemplo, é provável que seja beneficiada como agregado em concretos estruturais, sendo ela composta predominantemente de concretos e rochas naturais. Já o material com mais porosidade e com menor resistência mecânica, tais como as argamassas e os produtos de cerâmica vermelha, tem sua aplicação restrita a concretos de menor resistência, pois estes possuem menor resistência e uma maior absorção de água.

2.7 Pavimento Intertravado

2.7.1. Definição

O pavimento intertravado é um pavimento rígido e tem sua estrutura composta por uma camada de base ou base e sub-base, continuada pelo revestimento construído com peças de concreto sobrepostas em uma camada de assentamento. As juntas no meio das peças são

preenchidas com material de rejuntamento e o intertravamento do sistema é realizado pela contenção, segundo especificado nas normas NBR 15953 (ABNT, 2011) e NBR 9781 (ABNT, 2013).

O intertravamento baseia-se na habilidade dos blocos de resistir a deslocamentos individuais em relação às peças adjacentes e é essencial para uma boa resistência e durabilidade do pavimento, segundo a NBR 15953 (ABNT, 2011). Conforme o manual de Pavimentos Intertravados (ABCP, 2010), o intertravamento no meio das peças de concreto é consequência de algumas condições: contenção lateral e junta preenchida com areia. A contenção lateral (como meios-fios) proíbe o desvio lateral de blocos, adequando o intertravamento; a areia de selagem (rejuntamento) proporciona a transferência de esforços entre os *pavers*, possibilitando que eles trabalhem unidos e resistam às cargas solicitantes. A estrutura do pavimento é mostrada na Figura 6.

Figura 6: estrutura dos pavimentos - Pavimentos intertravados.



Fonte: Acervo ABCP apud MARCHIONI (2012).

O pavimento intertravado vem conquistando seu espaço com passar dos anos, principalmente nos centros urbanos do país, em função das suas inúmeras vantagens. Dentre elas, pode-se realçar a facilidade na execução, com uso de equipamentos de pequeno porte, a facilidade de manutenção e reutilização e a liberação rápida ao tráfego. Além de tudo, blocos com a cor mais clara podem propiciar baixa absorção de calor e alta reflexão, ajudando no conforto térmico de calçadas e economizando na iluminação pública. (ABCP, 2010; AMADEI, 2011; MARCHIONI, 2012; SIMIELI et al., 2007).

De acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013) os materiais que deverão ser usados na produção de pavimentos intertravados são, essencialmente, aglomerantes, agregados e água, sendo permitido o uso de aditivos e pigmentos. Dessa maneira, o concreto usado na fabricação

de *pavers* é constituído pelos mesmos insumos do concreto convencional, mostrando como principal diferença o teor de umidade da mistura (MARCHIONI, 2012).

2.8 Blocos de Concreto Intertravado

Segundo Amadei (2011) os blocos de concreto intertravado usados em pavimentação são chamados *pavers* e estão representados na Figura 7. Esses blocos são pré-fabricados, maciços e conseguem pavimentar por completo uma superfície. De acordo com Fioriti (2007) o intertravamento dos concretos é a aptidão que o material tem de resistir aos movimentos e deslocamentos individuais, seja vertical, horizontal, de rotação ou giração em relação às peças adjacentes.

Figura 7: Blocos de concreto intertravado com 16 peças.



Fonte: Iara Praude (2021).

Os *pavers* vêm conquistando lugar nos pavimentos urbanos do Brasil, com o acréscimo de sua produção motivado por empresas do ramo devido as vantagens técnicas que o sistema apresenta. Entre algumas vantagens, pode-se destacar a simplicidade para realizar o assentamento, a liberação para o tráfego de maneira mais rápida, a acessibilidade às redes subterrâneas e a facilidade na manutenção (AMADEI, 2011).

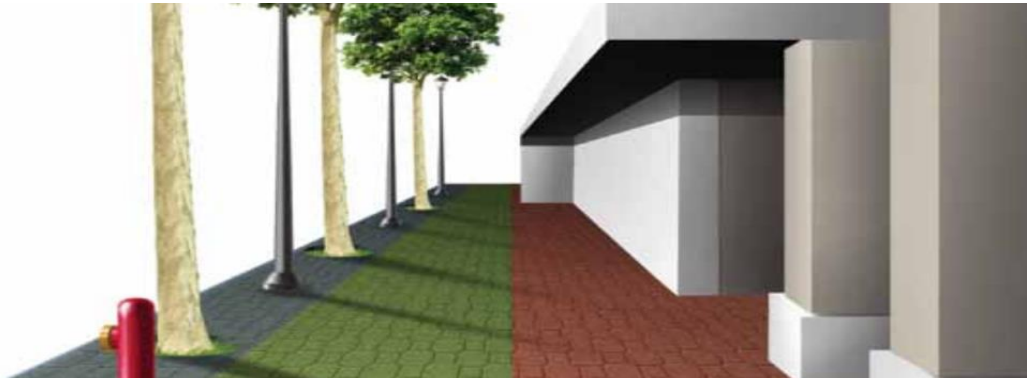
Pavimentos de concreto pré-moldado podem atingir até 25 anos de vida útil, contanto que atendam a alguns requisitos mínimos, como uma sub-base executada corretamente, blocos de boa qualidade e assentamento apropriado (FIORITI, 2007). Amadei (2011) explica que inúmeros fatores no decorrer da fabricação são capazes de interferir na qualidade dos blocos de concreto, como o tipo de máquinas e equipamentos utilizados, os materiais manuseados, a dosagem adotada, entre outros. Conforme Hood (2006) conhecer as propriedades solicitadas, os materiais constituintes, a execução na hora da dosagem e o método de produção é imprescindível para obter um bom resultado na fabricação dos *pavers*.

Não são apenas vantagens técnicas que o bloco intertravado proporciona, estes *pavers* tem se afirmado progressivamente no mercado também pela sua competência ambiental. Além disso, abre oportunidades para usar novos materiais em sua composição, como os resíduos. Além disso, o bloco é semipermeável, sendo capaz de colaborar sobremaneira na drenagem urbana.

Observando aspectos estéticos, hoje em dia é possível encontrar uma série de modelos, tamanhos e cores de blocos. Desde a década de 90, o *paver*, que até então era mais comum na Europa, passou a ser extensivamente usado no Brasil, tanto em vias quanto em calçamentos (AMADEI, 2011). Fioriti (2007) afirma que a moderação entre aspectos ambientais, tecnológicos e econômicos é o principal fator para o grande desenvolvimento deste sistema prático e confiável.

A utilização de pavimentos intertravados é mais apropriado em calçadas, praças, parques, vias públicas, estacionamentos, entre outros. As principais características que permitem isso são a fácil execução, uso de equipamentos de menor porte, rápida liberação ao tráfego, não requerendo tempo de cura ou de secagem, além de proporcionar manutenção pontual (HALLACK, 1998). Na figura 8 está apresentado um exemplo da aplicação do pavimento intertravado.

Figura 8: Pavimento Intertravado.



Fonte: (ABCP, 2010).

2.9 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 utilizado na fabricação de blocos para pavimentação intertravada é denominado “concreto seco” ou sem abatimento (*no-slump*) por apresentar baixa relação água-materiais secos, com elevada consistência e coesão. Dessa maneira, a quantidade de água colocada na mistura é menor que a adicionada em concretos plásticos devido a necessidade da desforma imediata (OLIVEIRA, 2004). Isso leva ao abatimento dos custos já que não exige o uso de grandes quantidades de moldes no decorrer dos longos tempos de cura. Esse tipo de concreto apresenta uma consistência de terra úmida e conta com a existência de ar em volume elevado na mistura (HOOD, 2006).

Em oposição aos concretos frequentemente usados na construção civil, o concreto seco não segue a “Lei de Abrams” uma vez que baixar na relação água/cimento não eleva a resistência à compressão. Até um certo limite, quanto mais água é utilizada na mistura, maior será a resistência proporcionada, considerando que maiores quantidades de água diminuem o atrito entre os grãos, melhorando a trabalhabilidade da mistura.

Entretanto, se a quantidade de água for excessiva, podem ocorrer problemas na desforma e deformações durante o transporte e cura. Por esse motivo, a correta proporção da água também é fundamental no processo (FRANSSON, 2000). Desse modo, a quantidade de água tem que ser a mais elevada possível, contanto que as peças não apresentem problemas na hora da desforma por estarem aderidas ao molde, ou dificuldades de perda de formato por exagero de água (OLIVEIRA, 2004). A água excedente dificulta também a alimentação dos moldes, portanto, é necessário utilizar um teor de umidade ótimo para satisfazer a duas condições: facilidade de alimentação e prensagem, mas sem danificar a trabalhabilidade da mistura (MARCHIONI, 2012).

Conforme Hood (2006), não existe um método consagrado na dosagem do concreto seco. Inúmeros autores produziram metodologias para a obtenção de concretos secos fundamentados em recomendações de fabricantes e em procedimentos de tentativa e erro. No entanto, o êxito da mistura está ligado a granulometria dos materiais constituintes e ao tipo e regulagem do equipamento utilizado (MARCHIONI, 2012). Os agregados precisam respeitar as limitações da distribuição granulométrica determinada na NBR 7211 (ABNT, 2009). Segundo SCRIPES (2019), suas propriedades podem ser determinadas através das metodologias descritas nas normas presentes nas Tabelas 5 e 6, para agregados miúdos e graúdos, respectivamente.

Tabela 5: Ensaio para agregados miúdos.

Propriedades Físicas	Métodos
Composição Granulométrica	ABNT NBR NM 248
Massa Específica	ABNT NBR NM 52
Massa Unitária	ABNT NBR NM 7251
Absorção de Água	ABNT NBR NM 30
Inchamento	ABNT NBR NM 6467
Teor de Partículas Leves	ABNT NBR NM 9936
Umidade Superficial	ABNT NBR NM 9775

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2009a)

Tabela 6: Ensaio para caracterização dos agregados graúdos.

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 brasão	ABNT NBR 12042
	Resistência a compressão da rocha	ABNT NBR 6953

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2009a).

2.10 Processo Produtivo

A produção do bloco de concreto intertravado inicia-se pela determinação dos materiais presentes no traço, já definidos previamente pela dosagem do concreto. Este método é capaz de ser executado em massa ou em volume, tornando-se mais apropriado fazê-lo em massa para impedir altas variações, com exceção da água e dos aditivos, que podem ser dosados em volume com precisão (MARCHIONI, 2012, SOUSA, 2001).

De acordo com Tango (1994) as mais relevantes causas de variações na proporção dos materiais geralmente são falhas na mensuração da água de amassamento, determinados pela desconsideração da umidade dos agregados, imprecisões provocadas pelo inchamento da areia, acarretando alterações no volume e descuidos motivados pela falta de precisão na quantidade

de cimento, quando a proporção é fundamentada no saco de cimento. Além disso, Frasson (2000) afirma que outro motivo para proporções irregulares são as imprecisões dos equipamentos, que prejudicam os traços dosados e conseguem interferir nas características finais dos blocos.

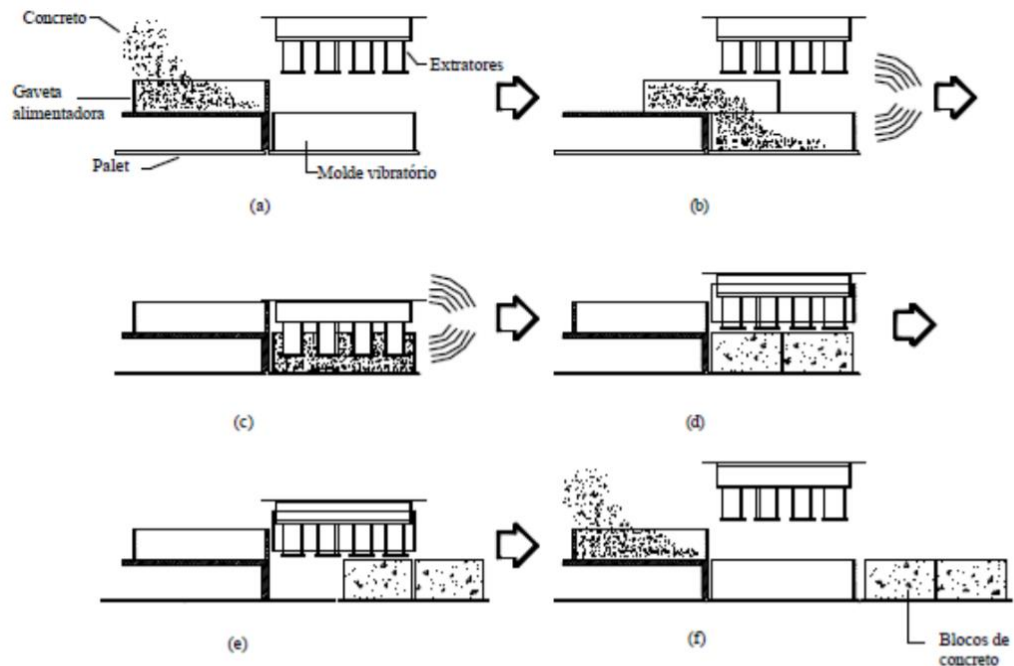
Depois da determinação dos materiais que constituem o traço, é executada a mistura de forma que garanta a perfeita homogeneização (MARCHIONI, 2012). Essa etapa é de extrema importância para a uniformidade da produção. Deste modo, determina-se a ordem de aplicação dos materiais e o tempo de mistura adequado de acordo com o tipo de equipamento utilizado no procedimento (SOUSA, 2001). Assim, a seleção do tipo de misturador é fundamental, tendo em vista que se o método de mistura for inadequado, pode ocasionar heterogeneidade do produto final (FRASSON, 2000).

As peças de concreto são produzidas industrialmente em vibroprensas que possibilitam alta compactação das peças, elevando sua resistência mecânica e durabilidade. Depois disso, as peças são curadas em câmaras que mantêm constante a umidade relativa acima dos 95%. Isto assegura a hidratação do cimento e facilita menor absorção de água da peça, que deve ser menor ou igual a 6%.

O período de cura na câmara leva em torno de 24 horas e a cura final no pátio depende de algumas condições industriais, permanecendo entre 7 e 28 dias. Logo, as peças já chegam prontas à obra e o processo industrializado assegura ainda a uniformidade de cor, textura e das dimensões das peças (ABCP, 2010).

O funcionamento das vibroprensas para a moldagem dos *pavers* contém as etapas ilustradas na Figura 9 (MEDEIROS, 1993). Primeiramente, a gaveta alimentadora deve ser ocupada com a mistura designada para a moldagem dos blocos (Figura 9a). Logo após, como exibido nas Figuras 9b e 9c, ocorre o preenchimento do molde metálico, conduzido pela vibração do molde e pela compactação dos blocos por meio dos extratores. Em seguida, o molde sofre outra vez uma vibração até que atinja a altura pretendida para os blocos. Os blocos são então deformados (Figura 9d), continuando sobre o *pallet* em que foram moldados. O *pallet* com os blocos moldados segue para frente dando lugar a um novo *pallet* que estará vazio e ocupará o seu lugar (Figura 9e). Por último, ocorre a descida do molde metálico para sua colocação inicial ao mesmo tempo em que ocorre a ascensão dos extratores, ajustando-se para começar um novo ciclo (Figura 9f).

Figura 9: Sequência de funcionamento de uma vibro-prensa.



Fonte: (SOUSA, 2001 apud MEDEIROS, 1993).

Nesta etapa de produção, é determinado o tempo de vibro-compressão, que se baseia em verificar o tempo em que o contramolde leva para finalizar a prensagem do bloco, mostrando se o preenchimento da forma foi apropriado ou não. Tempos menores que o ideal acarretará em peças com elevada porosidade e de menor resistência, ao passo em que tempos de vibro-compressão acima do compatível aumentarão a duração do ciclo produtivo e o desgaste do equipamento (FRASSON, 2000).

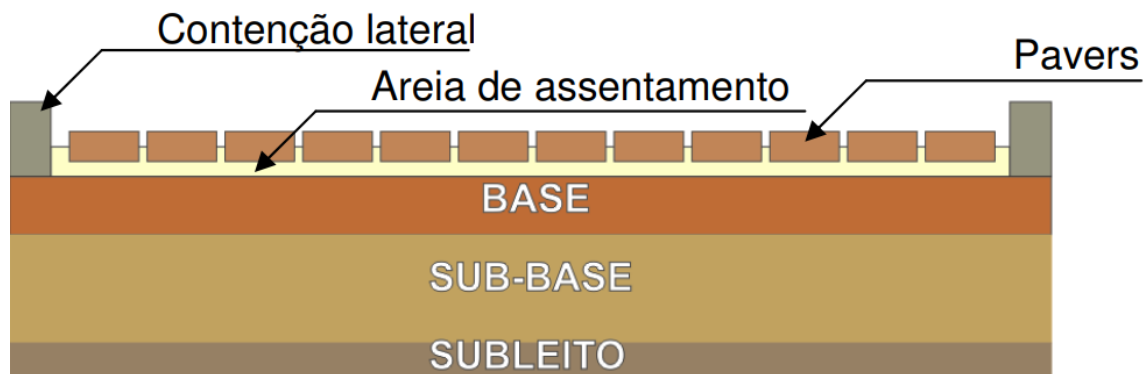
Em seguida a moldagem nas vibroprensas, as peças passam pelo procedimento de cura, que é o encarregado pelo ganho de resistência das peças e o encolhimento de sua retração potencial (SOUZA, 2000). Depois da cura, as peças precisam ser paletizadas e armazenadas de modo a favorecer a identificação, o carregamento e o transporte dos blocos e diminuir as quebras do produto, minimizando os custos com reposição (FRASSON, 2000).

2.11 Assentamento e Intertravamento

Conforme Hallack (1998) o pavimento intertravado é formado por uma camada de blocos de concreto que formam um revestimento de alta durabilidade e resistência, aplicados sobre uma camada de areia. A camada superior deve sustentar as cargas e tensões geradas pelo tráfego, de maneira que consiga proteger a camada inferior do desgaste por abrasão, objetivando a melhor estabilidade possível.

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) exhibe a estrutura final do pavimento intertravado mostrado na Figura 10.

Figura 10: Estrutura do pavimento intertravado.



Fonte: ABCP, 2001.

Como mostrado na Figura 10, existem quatro camadas para o assentamento dos *pavers*. O subleito é a camada do terreno após a execução da terraplanagem, devendo estar regularizado e compactado na cota do projeto. É indispensável uma prévia avaliação topográfica do local e, ao término do preparo desta camada, deve-se conceber uma plataforma de trabalho firme o bastante para receber camadas acima (AMADEI, 2011).

A sub-base deve ser de solo-brita ou granular, alcançando a espessura da camada previamente definida em projeto para suportar o tráfego esperado. Já a base é a camada estrutural necessária para proteger o subleito das cargas externas aplicadas, recebendo as tensões provenientes das camadas de revestimentos de forma a impedir as deformações. (CRUZ, 2003).

Acima da base está a camada de assentamento, que deve possibilitar que a superfície regular acomode os blocos de concreto e suas eventuais dilatações. A última camada é

constituída pelos *pavers*. Após serem assentados os blocos e efetuado o acabamento das bordas, é executada a vibração na área pronta (FIORITI, 2007).

2.12 O Uso do RCD em Blocos de Concreto Intertravado

Atualmente têm-se observado a realização de diversas pesquisas para a aplicação Resíduos de Construção e Demolição (RCD) nos mais inúmeros tipos de produtos, como concretos com e sem fins estruturais, argamassas, bases de pavimentos, dentre outros. Conforme Poon et al. (2002), o uso do RCD como material na confecção dos blocos de concreto para pavimentação (Figura 11) têm a vantagem de que na sua fabricação são utilizadas máquinas de moldagem mecanizadas, assim os materiais são misturados e passam por um procedimento combinado de vibração e compactação, que irá reverberar de modo direto na qualidade do produto final.

Figura 11: *Pavers* para pavimentação.



Fonte: Autor (2021).

Alguns pré-requisitos devem ser determinados para a aplicação de resíduos em blocos de concreto, como a trabalhabilidade apropriada, sem modificar as propriedades mecânicas; tecnologia envolvida de fácil assimilação; e investimento mínimo (PAGNUSSAT, 2004).

Poon e Lam (2008) reconheceram que a trabalhabilidade do concreto é perturbada pela existência de agregado reciclado, sendo este fenômeno atribuído ao formato angular e a textura rugosa dos agregados. A absorção de água é mais elevada devido à existência da argamassa

antiga aderida no agregado reciclado, o que diminui ainda mais a trabalhabilidade do concreto fresco.

Ao analisar blocos de pavimento substituindo agregados reciclados por resíduos de cerâmica, Poon et al. (2006) indicaram ainda que o resíduo do tijolo cerâmico pode prejudicar certas qualidades do concreto. Os blocos com substituição de até 50% atendem os requisitos definidos pelas normas.

Nas pesquisas de Poon et al. (2009), foram obtidos resultados que confirmam que uma pequena quantidade de agregados reciclados provenientes de usinas de triagem de resíduos de construção tem potencial para serem aplicados como agregados para blocos de concreto pré-moldados, onde o percentual ideal pode ser de até 50%, utilizados para substituir os agregados naturais. Por fim, Simieli et al. (2007) efetuaram testes em pavimentos de blocos intertravados de concreto fabricados com 40% de agregados miúdos reciclados, isto é, como substituição parcial da areia, obtendo resultados suficientes tanto em termos de resistência mecânica quanto em módulo de elasticidade.

Ainda que seja objeto de pesquisa em várias universidades, a bibliografia sobre a utilização de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em peças de concreto para pavimentação ainda é bastante 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).

2.13 Propriedades Requeridas

Os *pavers* são fabricados com um concreto de características diferentes daquele geralmente utilizado nas obras. As particularidades aparecem tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Isso porque o procedimento de confecção e utilização destoa do concreto plástico de uso consagrado na construção civil (AMADEI, 2011).

De acordo com SOUSA (2001) apud AMADEI (2011) as propriedades do concreto no estado fresco são determinadas pelo manuseio no decorrer da produção, pela trabalhabilidade da mistura e pelo acabamento, de maneira que o molde, o adensamento e a desmoldagem influenciam diretamente na qualidade do produto. Como o método de desmolde é feito no estado fresco, a consistência é aspecto determinante para o manuseio e varia de acordo com o equipamento usado. Hood (2006) também menciona o acabamento, que está de modo direto relacionado com a relação água/cimento.

No Brasil existem 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 norma aplica-se a pavimentação intertravada com peças de concreto que estão sujeitas a tráfego de pedestres, de veículos dotados de pneumáticos e áreas de armazenamento de produtos, e estabelece os requisitos de execução do pavimento. A segunda norma determina as exigências e procedimentos de ensaios exigidos para a conformidade dos blocos de concreto para pavimentação intertravada que são submetidas ao tráfego de pedestres. Portanto, de acordo com o objetivo do trabalho, serão abordadas apenas as exigências dos ensaios de resistência à compressão e absorção de água descritas na NBR 9781 (ABNT, 2013).

2.13.1 Resistência à Compressão

A NBR 9781 (ABNT, 2013) estima que a resistência estipulada 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 manifestar resistência de 35 MPa.

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

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

As peças de concreto para pavimentação intertravada precisam ter propriedades capazes de resistir às solicitações de serviço, especialmente quando submetidas ao tráfego de veículos e pedestres, que causam esforços de compressão sobre o pavimento. Além disso, é necessário analisar a absorção de água, uma vez que esta pode atrapalhar o aspecto visual e diminuir a vida útil dos blocos no que diz respeito à estética (HOOD, 2006).

2.13.2 Absorção de água

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

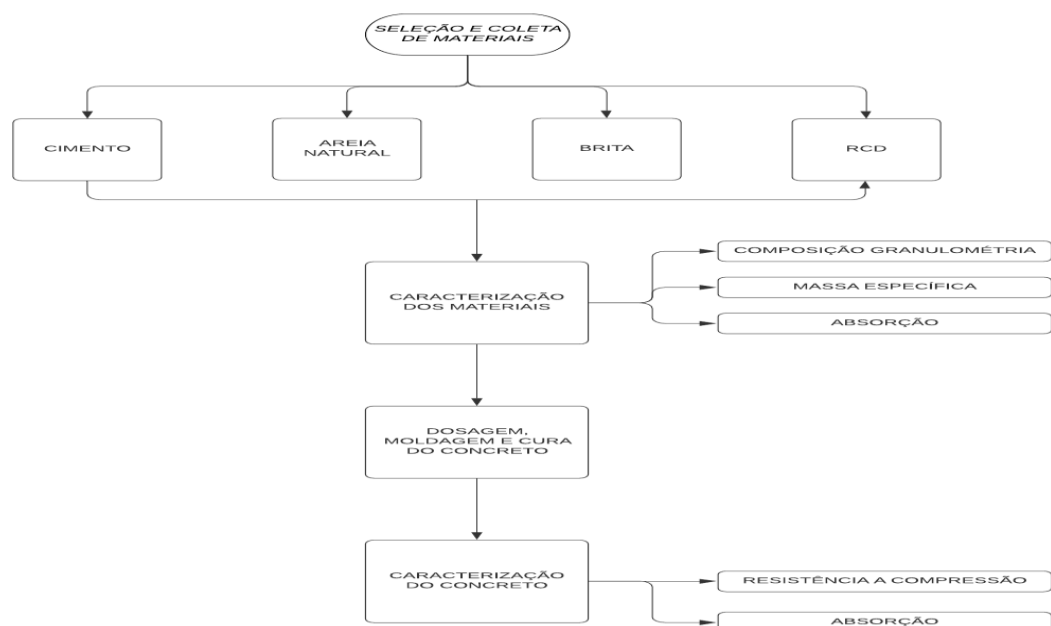
A absorção de água consiste no acréscimo de massa de um corpo sólido poroso devido à entrada de água nos poros permeáveis, em relação à sua massa no estado seco. Dessa forma, a caracterização da absorção de água na peça de concreto baseia-se na razão da massa seca e da massa saturada. O carregamento de água se dá por capilaridade e preenche apenas parte dos poros abertos, interconectados e permeáveis (MARCHIONI, 2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Programa Experimental

O programa experimental adotado nesta pesquisa está apresentado na figura 12. Foi utilizado o ARM, sendo esse a junção de alguns materiais que são descartados da construção, como blocos de concretos e blocos cerâmicos, denominando-se de RCD misto.

Figura 12: Programa experimental.



Fonte: Autor (2021).

Primeiramente foi escolhida a porcentagem de brita que seria substituída na dosagem do concreto intertravado pelo agregado reciclado de RCD, em seguida, foi iniciada a coleta de materiais, para só então começar a realização dos ensaios de caracterização dos agregados, tanto os naturais quanto os reciclados, com o principal objetivo de obter as suas propriedades físicas, sendo realizados os ensaios de granulometria, massa específica e absorção.

Depois, adotou-se um método de dosagem e foram definidos traços com porcentagens de agregados distintos para a produção do concreto seco, sendo um traço de referência, com areia e brita, e outros dois traços contendo o agregado reciclado de RCD em substituição à brita, sendo um com 20% de RCD e outro com 40% de RCD, tendo o objetivo de avaliar a viabilidade do uso do resíduo de construção e demolição como agregado graúdo no concreto seco. Após a moldagem dos corpos de prova, depois de 28 dias de cura, foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas do concreto convencional e do concreto com agregado reciclado. As propriedades mecânicas foram adquiridas através do ensaio de resistência à compressão axial e as propriedades físicas, pelo ensaio de absorção por imersão.

3.2 Materiais Utilizados

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram:

- Cimento Portland CP II E. Esse cimento contém adição de escória granulada de alto-forno, o que lhe confere a propriedade de baixo calor de hidratação, 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. Ele foi escolhido para essa pesquisa pela menor quantidade de CO₂ emitido para a atmosfera.
- A areia média natural de quartzo, tem grãos de diâmetro entre 0,42 e dois milímetros. É muito utilizada na fabricação do concreto e argamassas de assentamento de blocos e tijolos.
- A brita 0 ou pedrisco também possui malha pequena, com granulometria variando de 4,8 mm a 9,5 mm.
- RCD misto que foi coletado em obras localizadas em um bairro da cidade de Russas-CE. A britagem ocorreu de forma manual, onde foram utilizados os materiais que estavam entre as peneiras 19 mm e 4,75 mm.

3.3 Caracterização dos Materiais

Neste tópico serão descritos os procedimentos adotados para a determinação das propriedades físicas e mecânicas dos agregados utilizados na produção do concreto para piso intertravado.

3.3.1 Granulometria

A distribuição granulométrica dos agregados foi determinada por peneiramento a seco, com a utilização de um conjunto de peneiras com aberturas entre 75 μm e 9,5 mm para o agregado miúdo, e peneiras com aberturas entre 75 μm e 75 mm para o agregado graúdo. O procedimento foi feito de forma manual, no laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará (UFC), campus Russas, de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) – “Agregados – Determinação da Composição Granulométrica”. Foram utilizadas amostras de aproximadamente 0,300 kg e 2kg, para o ensaio com o agregado miúdo e agregado graúdo, respectivamente. As amostras foram previamente secas em estufa à 105° C \pm 5° C por 24 horas e depois separadas pelas peneiras como mostrado na Figura 13.

Figura 13: RCD depois de serem separados pelas peneiras.



Fonte: Autor (2021).

De acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), para cada uma das amostras de ensaio, calcula-se a porcentagem retida, em massa, em todas as peneiras, com proximidade de 0,1%. Todas as amostras devem conter necessariamente a mesma dimensão característica, e nas peneiras restantes, os valores apresentados não podem diferir mais que 4% entre si. Caso aconteça, deverá ser repetido o procedimento, até que se encontre o resultado desejado.

Através desse ensaio é possível definir a dimensão máxima característica (DMC) de um agregado, corresponde à abertura nominal, em milímetros, 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 ou outro valor a que se venha adotar. O módulo de finura consiste na soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado nas peneiras da série normal dividida por 100, como mostrado na Equação 1.

$$Mf = \frac{\sum (p*n)}{100} \text{ (Eq. 1)}$$

Onde:

Mf → Módulo de finura

P → Porcentagem retida em cada peneira

n → Número de peneiras

3.3.2 Massa Específica - Agregados Miúdos

A massa específica dos agregados miúdos foi determinada conforme a NBR 9776 (ABNT, 1988) – “Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman”. Os ensaios foram realizados no laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará (UFC), campus Russas. A amostra do material foi colhida de acordo com os parâmetros estabelecidos na NBR 7216. O frasco usado no ensaio deve ser de vidro e composto por dois bulbos e com um gargalo graduado, conforme a Figura 14. No estrangulamento que há entre os dois bulbos deve conter um traço que corresponde a 200 cm³, e acima dos mesmos deve conter o tubo graduado de 375 cm³ a 450 cm³. A amostra deverá ser seca em estufa entre 105° C e 110° C.

Figura 14: Frascos Chapman.



Fonte: Autor (2021).

A massa específica do agregado miúdo é calculada pela Equação 2.

$$\gamma = \frac{500}{L-200} \text{ (Eq. 2)}$$

Onde:

γ → Massa específica do agregado miúdo, deve ser expressa em g/cm³.

L → Leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto de água-agregado miúdo).

3.3.3 Massa Específica dos agregados graúdos

A massa específica dos agregados graúdos foi determinada conforme a NBR NM 53 (ABNT, 2003) – “Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água”. Os ensaios foram realizados no laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará (UFC), campus Russas.

O material que foi submetido a esse ensaio, foi o material retido na peneira com abertura de malha de 4,75 mm. Utilizou-se uma balança com capacidade de 10 kg e resolução de 1g

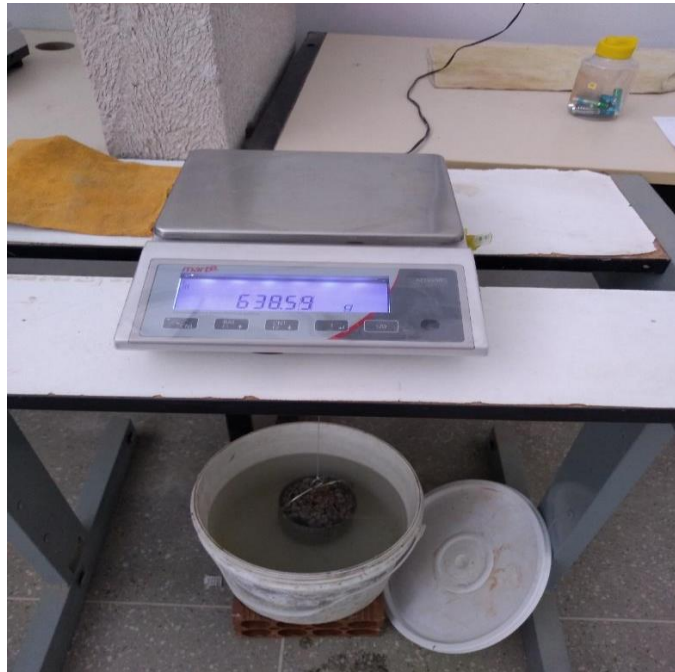
equipada com um dispositivo para manter o recipiente que contém a amostra suspenso na água, sendo este constituído de arame, conforme mostrado na Figura 15, com abertura de malha igual ou superior a 3,35 mm e capacidade para 4 dm³ a 7 dm³. Em seguida, o recipiente com a amostra foi submerso em água, como mostrado na Figura 16. Após, foi eliminado todo material que passou na peneira 4,75 mm, e lavou-se completamente o agregado graúdo para remover todo o pó ou outro material. Secou a amostra de ensaio até a constância da massa a uma temperatura de 105° C ± 5°C e deixou esfriar por cerca de 1h a 3h, e, por fim, pesou-se o material.

Figura 15: Amostra seca.



Fonte: Autor (2021).

Figura 16: Amostra submersa na água.



Fonte: Autor (2021).

A massa específica é dada segundo a equação 3.

$$d = \frac{m}{m_s - m_a} \text{ (Eq. 3)}$$

Onde:

d → é a massa específica do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico.

m → é a massa ao ar da amostra seca, em gramas.

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

m_a → é a massa em água da amostra, em gramas.

3.3.4 Absorção de água

A absorção dos agregados graúdos foi determinada conforme NBR NM 53 (ABNT, 2009) – "Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e

absorção de água”. Este é um processo no qual um líquido é conduzido e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso.

Foi utilizada uma balança com capacidade mínima de 1kg e precisão de 0,1g e uma amostra separada de acordo com a norma NM 26. A amostra foi colocada em uma bandeja metálica e depositada na estufa capaz de manter a temperatura no intervalo de $105 \pm 5^\circ\text{C}$. Depois disto, a amostra foi colocada dentro de um recipiente submerso em água por 24h, conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17: Corpos de provas em submersão.



Fonte: Autor (2021).

A absorção de água, é dada segundo a Equação 4.

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \text{ (Eq. 4)}$$

Onde:

$A \rightarrow$ é a absorção de água, em porcentagem;

$m_s \rightarrow$ é a massa ao ar da amostra na condição saturado e de superfície seca, em gramas;

$m \rightarrow$ é a massa da amostra seca em estufa, em gramas.

3.3.5 Massa Unitária

A massa unitária foi determinada de acordo com a norma NBR NM 45 (ABNT, 2006) “Agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios”. O ensaio foi realizado no laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará (UFC), campus Russas.

A norma possui três métodos de ensaio, sendo considerado mais apropriado o procedimento C para definir a massa unitária de material no estado solto. Sendo assim, foi medida a massa do recipiente vazio. Em seguida, o recipiente foi preenchido com o agregado até que transbordasse e utilizou-se uma pá para despejar todo o material que estivesse até 50 mm acima da borda superior do recipiente para nivelar a camada superficial do material. Logo após, fez-se o registro da massa do recipiente junto com o agregado, como na Figura 18. Para calcular o volume do V do recipiente, encheu-se o recipiente com água a temperatura entre 18°C e 25°C, definiu-se a massa de água no recipiente da forma mostrada na Figura 19, e mediu-se a massa do recipiente vazio.

Figura 18: Recipiente com material.



Fonte: Autor (2021).

Figura 19: Recipiente preenchido com água.



Fonte: Autor (2021).

A massa unitária é calculada conforme Equação 5.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \text{ (Eq. 5)}$$

Onde:

ρ_{ap} → é a massa unitária do agregado, em quilograma por metro cúbico;

m_{ar} → é a massa do recipiente mais o agregado, em quilogramas;

m_r → é a massa do recipiente vazio, em quilogramas;

V → é o volume do recipiente, em metros cúbicos.

3.3.6 Dosagem e Moldagem

Para a dosagem e moldagem do concreto utilizado nessa pesquisa preparou-se corpos de prova com cimento Portland CP II E e traço especificado após os resultados de caracterização dos agregados. Moldaram-se 24 corpos de prova, sendo estes subdivididos em: 6 de referência,

9 com adição de 20% de RCD misto em substituição parcial à brita, e 9 com 40% de adição de RCD misto em substituição à brita. Dos 24 corpos de provas 16 foram utilizados para o ensaio de resistência à compressão e outros 8 para o teste de absorção.

A dosagem foi realizada de acordo com o método de Fuller e Thompson (1907), que é fundamentado na granulometria ininterrupta da mistura, ponderando a influência da distribuição granulométrica sobre o empacotamento das partículas. O 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 tem que atender as especificações da NBR 7211 (ABNT, 2009a). Assim, a granulometria contínua da combinação dos agregados é restrita pelas porcentagens mínima e máxima passantes apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7: Porcentagens passantes no ensaio de granulometria.

Peneira	Abertura (mm)	Min %	Max %
3/4"	19 mm	100	100
3/8"	9,5 mm	100	100
Nº 4	4,75 mm	95	100
Nº 8	2,4 mm	80	100
Nº 16	1,2 mm	50	85
Nº 30	600µm	25	60
Nº 50	300µm	10	30
Nº 100	150µm	2	10

Fonte: (Adaptado da ABNT, 2009)

Após os resultados do ensaio de granulometria, foram elaborados três traços diferentes de concreto seco, cada um combinando a brita natural com certa porcentagem do agregado proveniente de resíduos de construção e demolição – RCD. O primeiro traço teve a sua constituição feita de 100% de brita natural do tipo a0 e foi considerada a combinação de referência, visto que a brita é comumente utilizada na indústria de peças de pavimentação no Brasil. A segunda mistura foi elaborada com a combinação de brita natural a0 e adição de 20% do agregado reciclado de RCD, já a terceira mistura foi elaborada com brita natural a0 e com substituição de brita por 40% de agregado reciclado de RCD. Cada combinação foi produzida com o mesmo consumo de cimento, visto que, o resultado almejado necessita do mesmo traço para a avaliação.

Depois de elaborar os três traços, foi feito o preparo do concreto na betoneira, como mostrado na Figura 20. Após o concreto concluído realizou-se o *slump test* de acordo com a NBR NM 67 Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT,1998). No procedimento de ensaio, foram umedecidos o molde e a base, e durante o preenchimento do molde com o concreto, o operador posicionou-se com os pés sobre as aletas, de forma a mantê-lo estável, conforme mostrado na Figura 21.

Em seguida começou o preenchimento do molde com 3 camadas compactadas com 25 golpes utilizando a haste de socamento. Após isso, retirou-se o molde e verificou-se que o concreto não tinha desmoronado, e estava de acordo com a norma, como mostrado na Figura 22.

Figura 20: Fabricação do concreto.



Fonte: Autor (2021).

Figura 21: *Slump test*.



Fonte: Autor (2021).

Figura 22: *Slump test*.



Fonte: Autor (2021).

3.3.7 Resistência à Compressão

O ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS) foi realizado aos 28 dias de cura, no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, campus Russas. O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 9781 (ABNT, 2013). Foram ensaiados 3 (três) tipos diferentes de corpos de prova de cada traço, totalizando 24 ensaios com blocos de concreto para piso intertravado. Foram moldados 6 corpos de provas do concreto convencional, onde 4 foram usados para o ensaio de compressão e 2 para o ensaio de absorção; 9 com substituição parcial da brita por de 20% de agregado reciclado de RCD, onde 6 foram utilizados para o ensaio de RCS e 3 para o ensaio de absorção; e 9 corpos de prova com a substituição de 40% do agregado graúdo pelo agregado reciclado de RCD.

Foram moldados corpos de provas cilíndricos apresentados na Figura 23 e corpos de provas de 16 faces, conforme Figura 24. Foram rompidos os corpos de provas, como mostrado na Figura 25 e também colocados em imersão em água por 24 horas, para o ensaio de absorção.

Figura 23: Moldagem do corpo de prova cilíndrico.



Fonte: Autor (2021).

Figura 24: Moldagem do corpo de prova 16 faces.



Fonte: Autor (2021).

Figura 25: Rompimento do corpo de prova.



Fonte: Autor (2021).

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados no programa experimental.

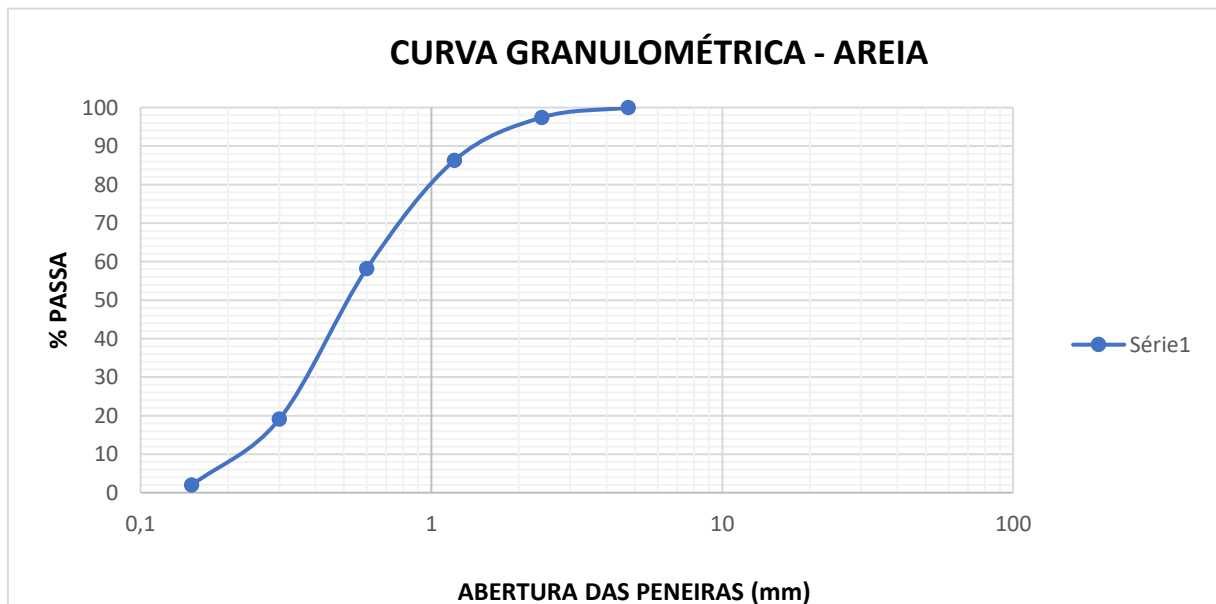
4.1 Caracterização dos Agregados

4.1.1 Granulometria do agregado miúdo

O agregado miúdo natural utilizado nesta pesquisa foi a areia média. A análise da distribuição granulométrica foi executada conforme as indicações da NBR 7211 (ABNT, 2009) – Determinação da Composição Granulométrica do Agregado.

A curva granulométrica da areia está apresentada no Gráfico 3. A dimensão máxima e o módulo de finura da areia são encontrados na Tabela 8.

Gráfico 3: Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: Autor (2021).

Tabela 8: Parâmetros granulométricos dos agregados miúdos (DMC: Dimensão máxima característica, MF: Módulo de finura).

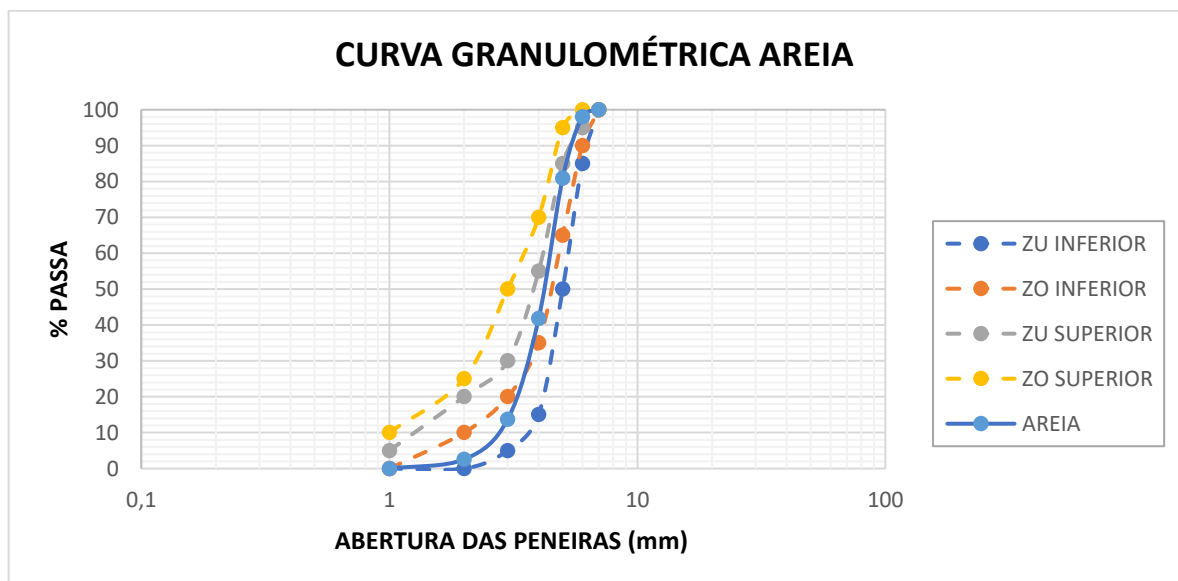
AREIA	
DMÁX (mm)	2,4
MF	2,36

Fonte: Autor (2021).

O resultado mostra que o Diâmetro Máximo Característico da areia é de 2,4 mm, levando em consideração que o percentual retido acumulado nessa peneira foi inferior a 5%. Contudo, a maior parte do material ficou retido nas peneiras #0,60 mm e #0,30 mm.

Percebe-se que o módulo de finura caracteriza a areia utilizada como areia média, pois encontra-se nos limites do módulo de finura da zona ótima mostrado no Gráfico 4, determinado pela NBR 7211 (ABNT, 2009a) que varia entre 2,20 e 2,90. Já a dimensão máxima característica da areia encontra-se compatível com os limites da zona utilizável dos agregados miúdos definidos na NBR 7211 (ABNT, 2009a).

Gráfico 4: Zonas da curva granulométrica dos agregados miúdos.



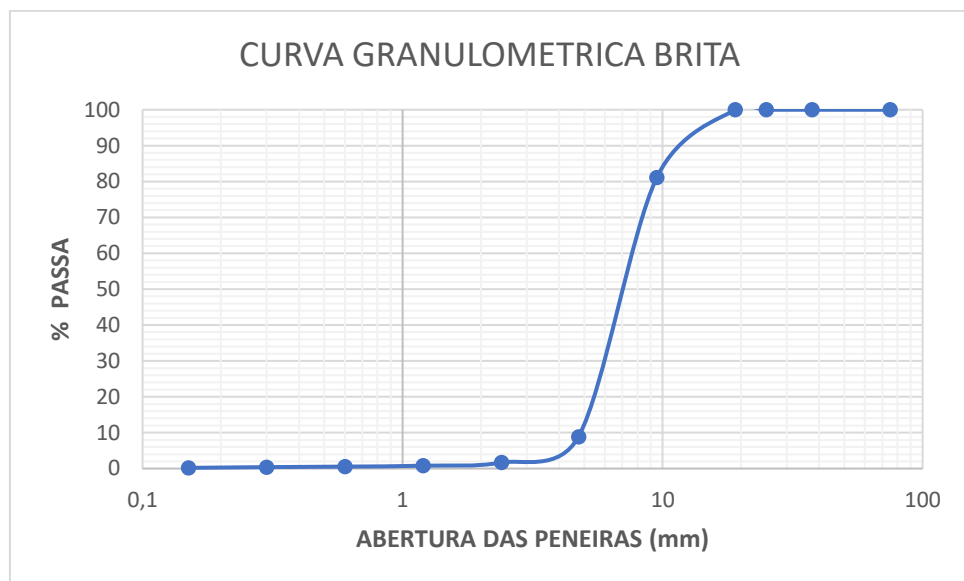
Fonte: Autor (2021).

4.1.2. Granulometria do agregado graúdo

O agregado graúdo natural utilizado nesta pesquisa foi a brita 0 disponibilizada pelo laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará (UFC), campus Russas. O agregado reciclado de construção e demolição foi coletado em obras da cidade de Russas- CE e em seguida foi ajustado para que fosse utilizado de acordo com as normas estabelecidas.

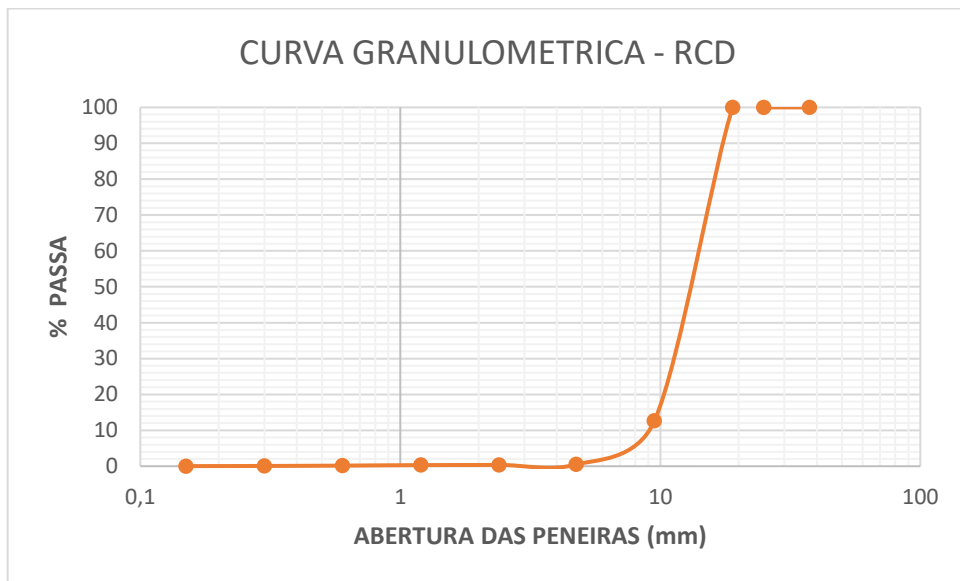
A análise da distribuição granulométrica foi executada conforme as indicações a NBR NM 248 (ABNT, 2003) – “Agregados – Determinação da Composição Granulométrica”. A distribuição da granulometria do agregado graúdo natural aplicado na produção do concreto está apresentada no Gráfico 5 e a curva granulométrica do agregado graúdo reciclado está apresentada no Gráfico 6.

Gráfico 5: Curva granulométrica do agregado graúdo natural.



Fonte: Autor (2021).

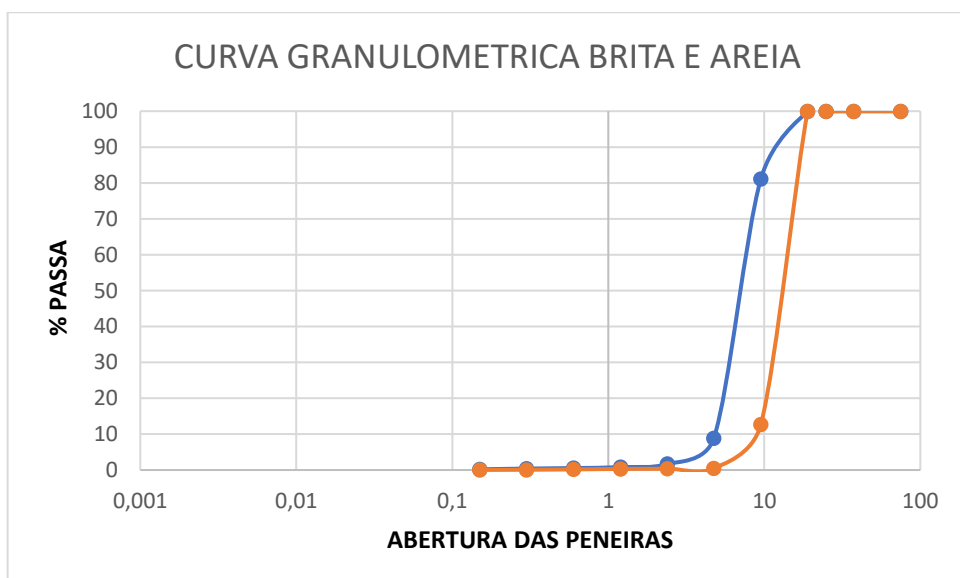
Gráfico 6: Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado.



Fonte: Autor (2021).

Analisando as curvas granulométricas dos agregados graúdos, tanto o natural como o reciclado, percebe-se que até a peneira de 2,4 mm os seus grãos têm o mesmo diâmetro, mas com o aumento da abertura da malha das peneiras começa a mudança de comportamento do gráfico, como mostrado no Gráfico 7.

Gráfico 7: Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado.

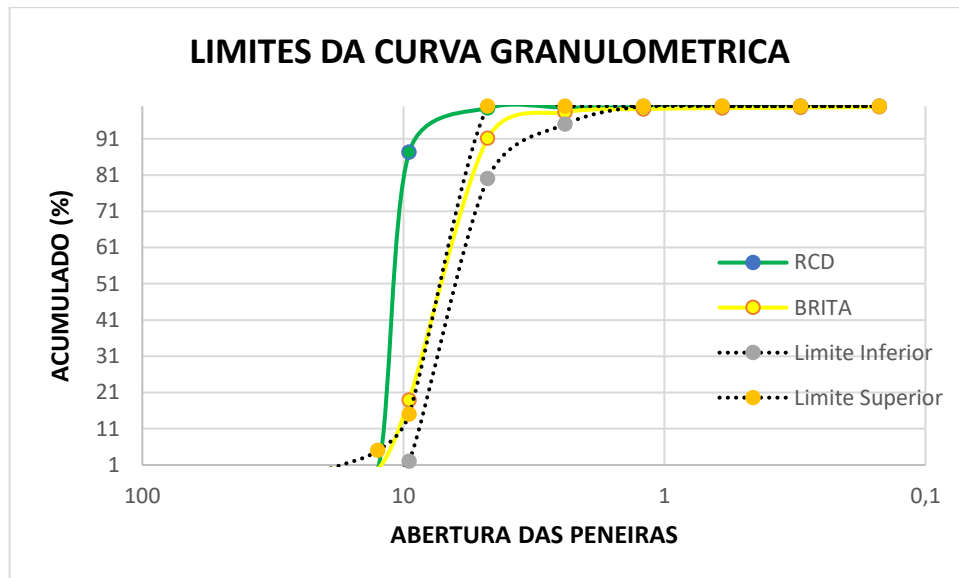


Fonte: Autor (2021).

Além disso, é possível perceber que a granulometria do agregado reciclado se encontra ligeiramente fora dos limites da NBR 7211 (ABNT, 2009a), enquanto a distribuição

granulométrica da brita situa-se inteiramente dentro dos limites estabelecidos em norma, conforme mostrado no Gráfico 8.

Gráfico 8: Limites da curva granulométrica do agregado graúdo natural e reciclado.



Fonte: Autor (2021).

Considerando as características da curva granulométrica do RCD observa-se que os resíduos oriundos de estruturas de concreto e materiais cerâmicos são mais grossos que os agregados naturais. É possível notar, também, que a curva granulométrica do agregado reciclado, está fora dos limites definidos na NBR 7211 (ABNT, 2009a) ao passo que a distribuição granulométrica do agregado natural se encontra dentro dos limites da norma. A NBR 15116 (ABNT, 2004) diz que o agregado reciclado deve ter curva granulométrica não uniforme e bem graduada com coeficiente de uniformidade maior do que 10. O RCD usado nessa pesquisa não se enquadrava nesse requisito da norma, isso por que a britagem do RCD ocorreu de forma manual e foram selecionadas para a pesquisa apenas as frações entre as peneiras 19 mm e 4,75 mm.

A dimensão máxima característica e o módulo de finura dos agregados graúdos encontram-se apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Parâmetros granulométricos dos agregados graúdos naturais e reciclados (DMC: Dimensão máxima característica, MF: Módulo de finura).

	BRITA	RCD
DMÁX (mm)	19	19
MF	6,06	6,86

Fonte: Autor (2021).

Observando a Tabela 9 é possível perceber que o módulo de finura do agregado reciclado de RCD é superior ao da brita. Ambos se encontram dentro dos limites do módulo de finura da zona utilizável superior estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009a), que caracteriza entre 4,8 mm e 9,5 mm como brita 0. Quanto à dimensão máxima característica, o agregado reciclado de RCD e a brita apresentam o mesmo diâmetro máximo característico. Os dois agregados se encontram compatíveis com os limites da zona utilizável dos agregados miúdos definidos na NBR 7211 (ABNT, 2009a). O agregado reciclado teve resultados superiores de módulo de finura em comparação ao agregado natural, sendo mais graúdo que a brita, mesmo com pouca diferença entre eles. A NBR 151116 (ABNT, 2004) diz que a dimensão máxima característica do agregado reciclado deve ser menor ou igual a 63 mm. O agregado reciclado de RCD utilizado nessa pesquisa atende a esse requisito da norma.

4.1.3 Absorção de água

A absorção de água obtida para os agregados está apresentada na Tabela 10.

Tabela 10: absorção dos agregados.

	BRITA	AGREGADO RECYCLADO	AREIA
ABSORÇÃO	1,88	10,19	2,6

Fonte: Autor (2021).

Conforme mostrado na Tabela 10, percebe-se uma discrepância elevada entre os agregados reciclados e os agregados naturais, sendo que a absorção dos agregados reciclados é cerca de dez vezes maior que os agregados naturais. Uma possível explicação para isso é o fato do RCD ser oriundo de materiais cerâmicos e de concretos, que possuem elevado teor de absorção (SIPRES, 2019 apud. AMADEI 2011). De acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2004) a absorção do agregado reciclado misto deve ser menor ou igual a 12%, sendo assim, o agregado reciclado de RCD utilizado nessa pesquisa atende a esse requisito da norma.

4.1.4 Massa específica aparente e massa unitária

Os resultados de massa específica aparente e massa unitária dos agregados encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11: Resultados da massa específica e massa unitária.

ENSAIOS			
	Agregado Graúdo	Agregado reciclado	Agregado Miúdo
Mespc	2,875g/cm ³	1,701g/cm ³	2,601g/cm ³
Munitaria	1,417kg/cm ³	1,019kg/cm ³	1,602kg/cm ³

Fonte: Autor (2021).

Diante dos resultados encontrados, pode-se notar que a massa específica do agregado reciclado é em torno de sessenta por cento menor que o agregado natural, concluindo assim que o RCD demonstra ter uma densidade menor do que o agregado natural. Estes resultados corroboram com os resultados de absorção, levando em consideração que materiais capazes de absorver mais água, são necessariamente mais porosos, dessa forma, apresentam menores massas específicas. Os resultados encontrados estão de acordo com as conclusões obtidas por Sipres (2019), Hood (2006), Amadei (2011), Calcado (2015) e Julião (2016). Conforme descrito na NBR 7211 (ABNT, 2009a), os limites de massa específica dos agregados miúdos ficam a critério do consumidor.

As massas unitárias dos agregados são razoavelmente diferentes. Os agregados miúdos por terem grãos bem menores que os graúdos preenchem os espaços dos vazios com maior facilidade, o que aumenta a sua massa unitária. Para as britas e o RCD, quanto maior o tamanho dos grãos, menor a massa unitária, chegando à conclusão de que os grãos de RCD tem tamanhos superiores aos do agregado natural. A massa unitária aproximada dos agregados comumente usados em concreto varia de 1300 a 1750 kg/m³, o que mostra que a massa unitária do agregado reciclado está um pouco abaixo do comumente utilizado nos concretos convencionais.

A massa específica fundamenta-se no fato da massa dos grãos ser mensurada sem contabilizar os espaços vazios, em contrapartida, a massa unitária consiste em mensurar a quantidade de um agregado de acordo com o volume que ele ocupará, junto com os espaços dos vazios.

4.2. Caracterização do Concreto Seco

Fundamentado nos resultados obtidos da caracterização dos agregados, é seguro desenvolver as misturas usadas na produção do concreto seco para pisos intertravados. As equivalências em massa de cada agregado foram definidas com base na distribuição granulométrica contínua da combinação dos agregados, sendo determinada pelos limites impostos pela NBR 7211 (ABNT, 2009a) para agregados graúdos. A porcentagem escolhida dos agregados a serem utilizados nas combinações são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Porcentagem dos materiais por combinação.

	BRITA	BRITA+RCD	BRITA+RCD
BRITA - (%)	100	80	60
RCD 20 - (%)	0	20	0
RCD 40 - (%)	0	0	40

Fonte: Autor (2021).

Para as combinações dos agregados foi utilizado apenas um traço na produção de concreto seco, com as mesmas quantidades de materiais, diferenciando apenas pela substituição parcial dos agregados graúdos, como mostrado na Tabela 13. O traço usado nessa pesquisa foi 1:1,7:2,2 e 0,45 do fator água/cimento, obtido na etapa metodológica de dosagem do concreto.

Tabela 13: Traço dos componentes do concreto seco.

	TRAÇO		
	1	2	3
Cimento (kg/m ³)	15,75	15,75	15,75
Fator a/c	0,45	0,45	0,45
AREIA NATURAL	26,75	26,75	26,75
BRITA	34,72	27,77	20,83
BRITA + RCD 20	0	6,94	0
BRITA + RCD 40	0	0	13,89

Fonte: Autor (2021).

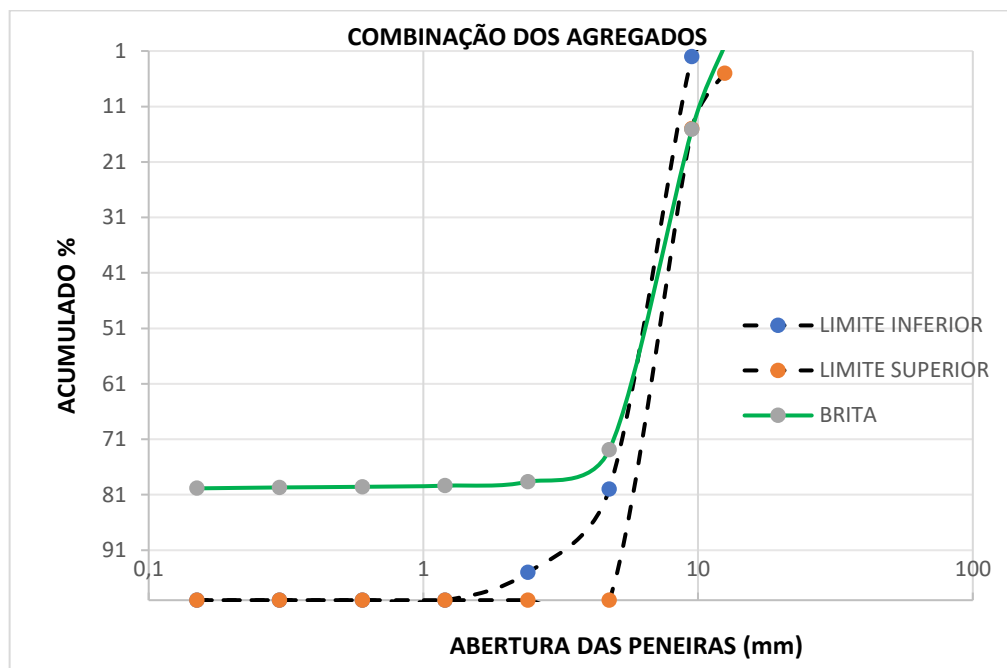
Foi feita uma combinação da quantidade de cada agregado, para poder analisar a quantidade que poderia ser substituída. A curva granulométrica do agregado natural encontra-se dentro dos limites utilizáveis, já a curva granulométrica do material reciclado está fora dos limites permitidos. Sendo assim, montou-se uma combinação dos materiais, conforme a Tabela 14 e o Gráfico 9.

Tabela 14: Combinações dos agregados graúdos.

COMBINAÇÃO DOS AGREGADOS			
PENEIRA (mm)	BRITA	RCD	ACUMULADO
	80	20	100
19	0	0	0
12,5	0	0	0
9,5	15,12	17,45	32,57
4,75	72,88	19,89	92,77
2,4	78,64	19,92	98,56
1,2	79,36	19,93	99,29
0,6	79,56	19,96	99,52
0,3	79,68	19,98	99,66
0,15	79,84	19,99	99,83

Fonte: Autor (2021).

Gráfico 9: Curva granulométrica dos agregados combinados.



Fonte: Autor (2021).

O Gráfico 9 e a Tabela 14 mostram a combinação de 80% de brita com 20% de RCD, obtendo assim um resultado satisfatório dentro dos limites utilizáveis, já que a combinação destes agregados faz com que suas curvas granulométrias se ajustem dentro dos limites estabelecidos pela norma.

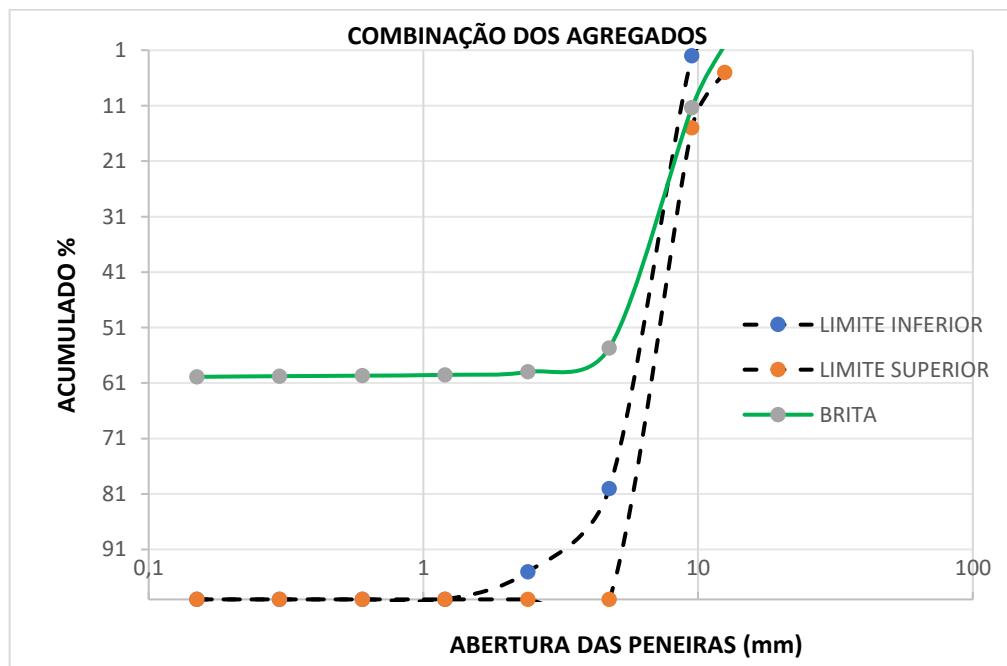
A outra combinação de agregados realizada utilizou 60% de brita e 40% de RCD, como apresentados na Tabela 15 e no Gráfico 10.

Tabela 15: Combinações dos agregados.

COMBINAÇÃO DOS AGREGADOS			
PENEIRA (mm)	BRITA	RCD	ACUMULADO
	60	40	100
19	0	0	0
12,5	0	0	0
9,5	11,34	34,91	46,25
4,75	54,66	39,79	94,45
2,4	58,98	39,85	98,83
1,2	59,52	39,87	99,39
0,6	59,67	39,92	99,59
0,3	59,76	39,97	99,73
0,15	59,88	39,98	99,86

Fonte: Autor (2021).

Gráfico 10: Curva granulométrica dos agregados graúdos combinados.

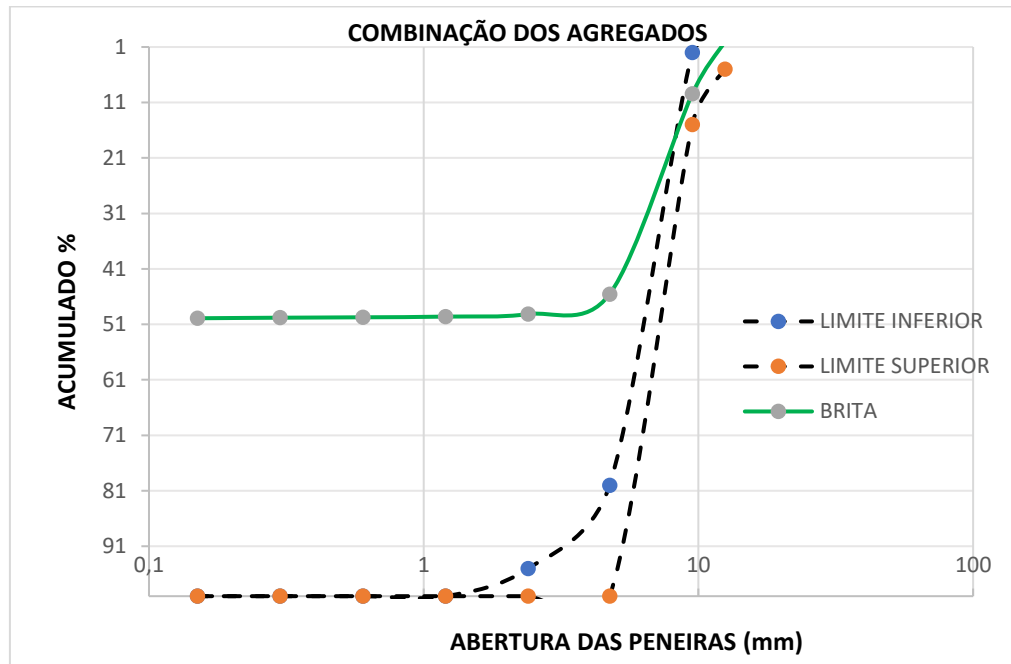


Fonte: Autor (2021).

Observa-se que a proporção de 60% de brita com 40% de RCD apresenta uma curva granulométrica fora dos limites utilizáveis, mas ainda assim mais ajustada quando comparada a curva granulométrica com 100% de RCD, mostrando que a brita só pode ser substituída parcialmente por RCD, como exemplificado na revisão bibliográfica, onde mostra que a

substituição só é eficiente até cerca de 50%. O Gráfico 11 mostra a curva granulométrica de 50% do agregado natural e 50% do agregado reciclado, ficando quase que totalmente fora dos limites utilizáveis estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009a) para agregados graúdos.

Gráfico 11: Curva granulométrica com 50% de RCD.



Fonte: Autor (2021).

A NBR 15116 (ABNT, 2004) diz que a composição granulométrica do agregado final a ser utilizado no concreto pode ser corrigida pela adição de agregado convencionais. Sendo assim, optou-se nessa pesquisa pela substituição parcial de 20% e 40% de brita por agregado reciclado de RCD, respectivamente.

4.3. Absorção de água do Concreto Seco

Neste tópico serão expostos os resultados dos ensaios de absorção para cada traço elaborado. A absorção de água foi calculada conforme estipulado no Anexo B da 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, e não deve ser admitido nenhum valor individual acima de 7,0%, como mostrado na Tabela 16.

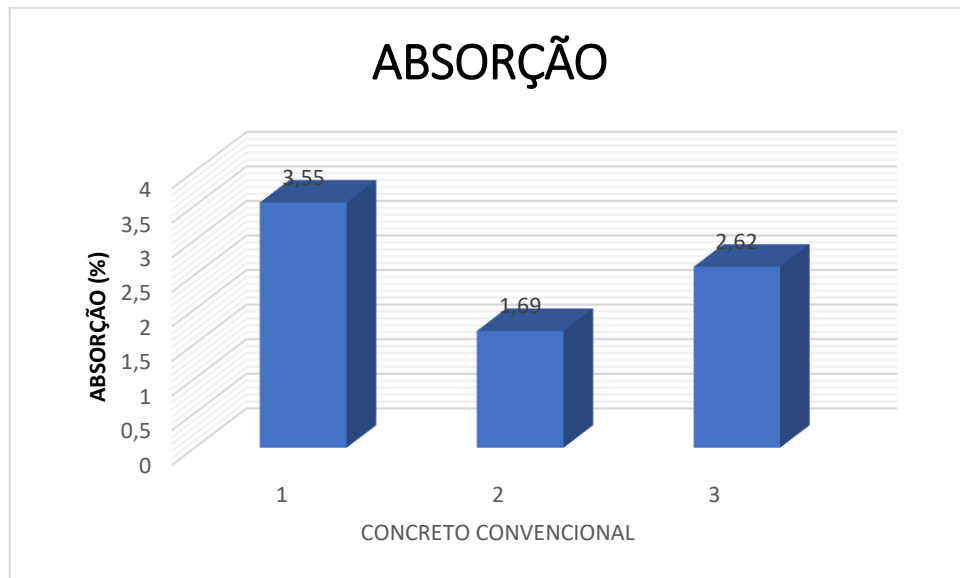
Tabela 16: Teor de absorção de água.

CLASSIFICAÇÃO DO CONCRETO	TEOR DE ABSORÇÃO DE ÁGUA (a)
Durável - Alto Desempenho	$\leq 4,2\%$
Convencional	$4,2\% \leq a \leq 6,2\%$
Deficiente	$\geq 6,2\%$

Fonte: Adaptado da NBR 9778 (2005).

Os resultados de absorção do concreto convencional estão apresentados no Gráfico 12.

Gráfico 12: Absorção do concreto convencional.

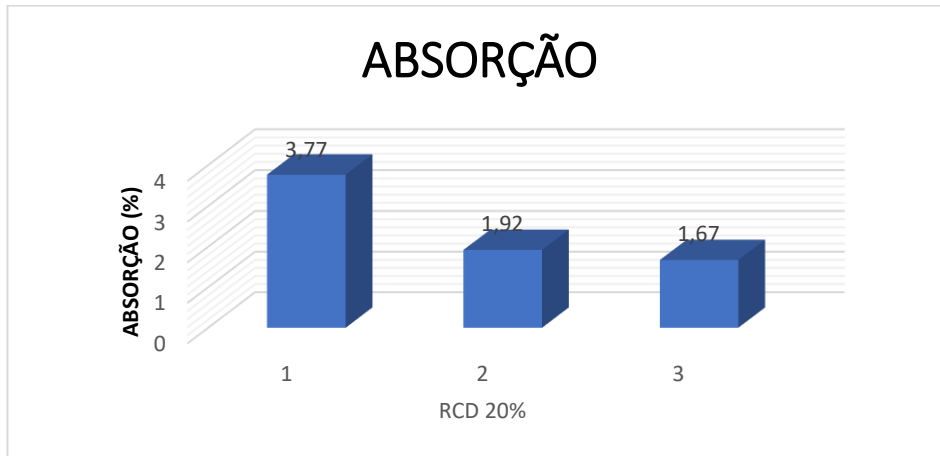


Fonte: Autor (2021).

Observando o Gráfico 12, é possível perceber que o concreto convencional apresentou absorção média de 2,62%, o que pode ser considerado um concreto de alto desempenho segundo a NBR 9778 (ABNT, 2005).

Os resultados de absorção do concreto com 20% de RCD estão apresentados no Gráfico 13.

Gráfico 13: Absorção do concreto com 20% de RCD.

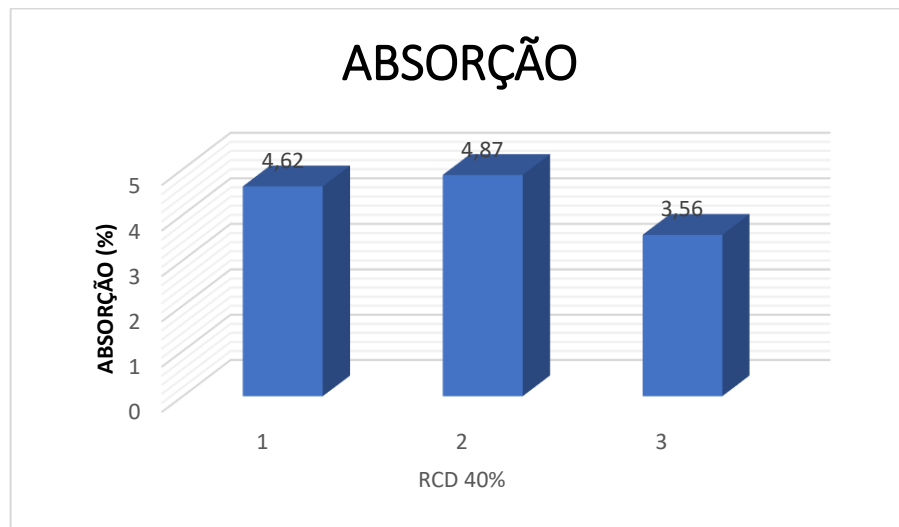


Fonte: Autor (2021).

Analisando a absorção do concreto com 20% de agregado reciclado de RCD, este teve o melhor desempenho no ensaio de absorção, pois manteve uma média de absorção em torno de 2,45%, como mostrado no Gráfico 13, tendo um desempenho superior ao concreto convencional, um resultado inesperado, já que o agregado reciclado é mais poroso que o agregado natural. Esperava-se um comportamento um pouco maior, mas devido ao pequeno percentual de substituição, pode-se explicar o resultado quase semelhante entre os dois concretos, que obtiveram resultados mais próximos.

Os resultados de absorção do concreto com 40% de agregado reciclado de RCD estão apresentados no Gráfico 14.

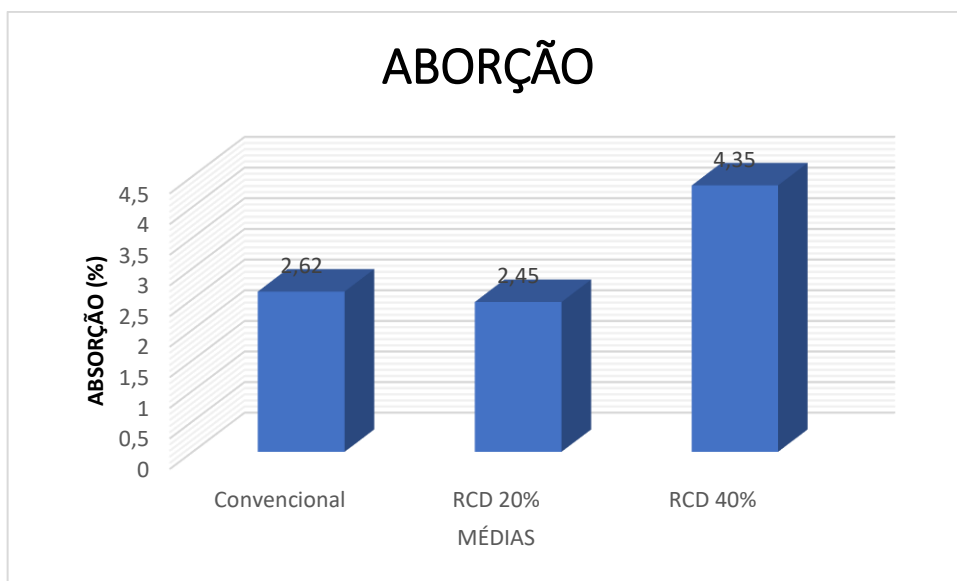
Gráfico 14: Absorção do concreto com 40% de RCD.



Fonte: Autor (2021).

O concreto com 40% de agregado reciclado obteve o pior desempenho no ensaio de absorção com uma média em torno de 4,35%, conforme mostrado no Gráfico 14, o que ainda é satisfatório já que o máximo permitido pela norma é 6%. Esse resultado enquadra o concreto na classificação de concreto convencional, enquanto o concreto de referência e o concreto com 20% de RCD se enquadram na classificação de concreto durável. A absorção do concreto com 40% de RCD foi quase sessenta por cento superior se comparado aos outros dois concretos, como apresentado no Gráfico 15.

Gráfico 15: Média das absorções.



Fonte: Autor (2021).

Percebe-se que o concreto com agregado convencional e com substituição parcial de 20% de RCD tem desempenho melhores neste ensaio, o que pode ser atribuído a pequena quantidade de substituição do agregado reciclado, quando comparado ao concreto com substituição parcial de 40% de brita por RCD.

4.4. Resistência à Compressão

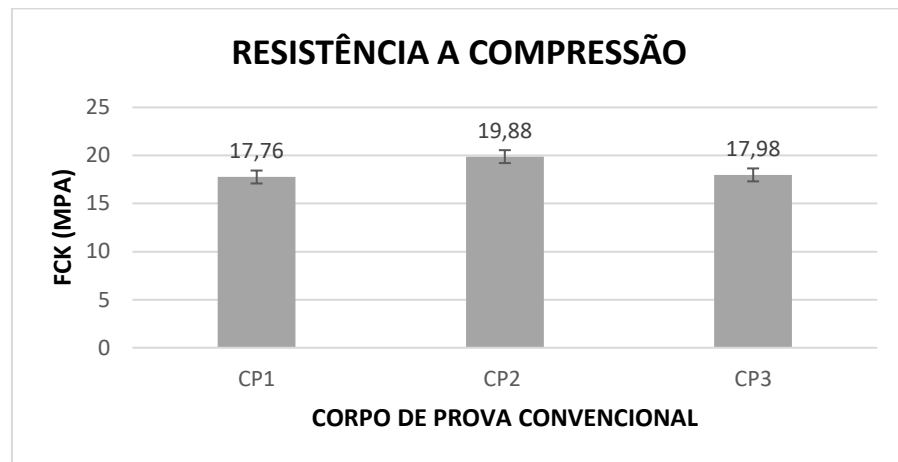
A resistência a compressão esperada para os blocos de concreto intertravado é de 35 MPa, conforme determina a norma NBR 9781 (ABNT, 2013), porém, os ensaios realizados neste estudo foram feitos no laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará (UFC), campus Russas, e a máquina utilizada no ensaio de compressão tem capacidade de romper corpos de prova apenas até 20 MPa. Sendo assim, foi elaborado um traço para concreto de 20 MPa, devido a capacidade máxima do equipamento.

Os resultados obtidos para os 14 corpos de provas ensaiados no ensaio de resistência a compressão serão apresentados a seguir, agrupados por tipo de agregado. Os resultados serão apresentados primeiro separadamente e em seguida, será apresentada a média de cada grupo para que se possa ter uma melhor observação dos resultados obtidos.

4.4.1 Resultado por tipo de agregado utilizado

O resultado de resistência à compressão para o concreto de referência está apresentado no Gráfico 16.

Gráfico 16: Resistência à compressão - Concreto Convencional.

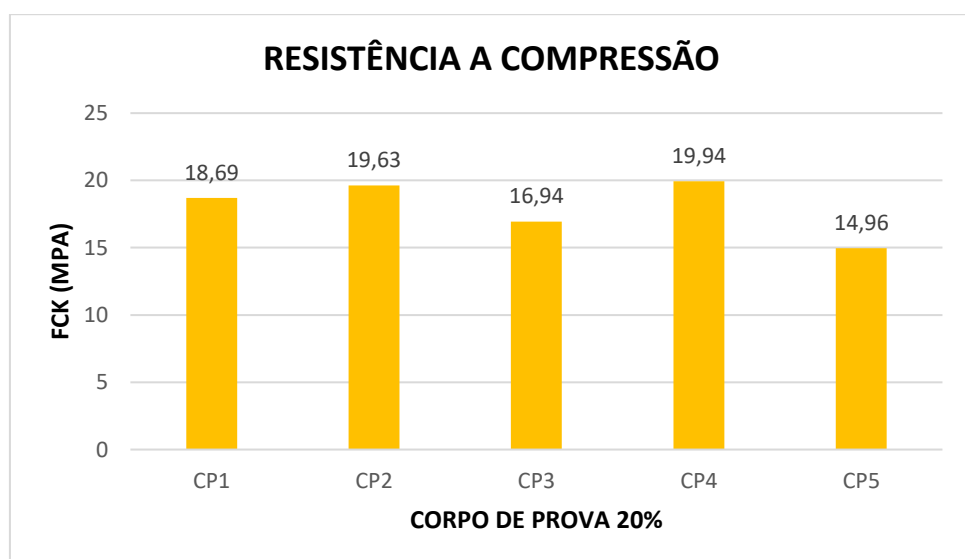


Fonte: Próprio autor (2021).

Esse concreto apresentou resistência à compressão média de 18,5 MPa. Pode-se observar também que os valores de resistência variaram pouco. Contudo, o resultado não atingiu a resistência característica à compressão superior a 35 MPa aos 28 dias requerida pela NBR 9781 (ABNT, 2013) para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha devido às limitações do equipamento usado no ensaio.

O resultado de resistência à compressão para o concreto com 20% de RCD está apresentado no Gráfico 17.

Gráfico 17: Resistência à compressão - Concreto com RCD 20%.

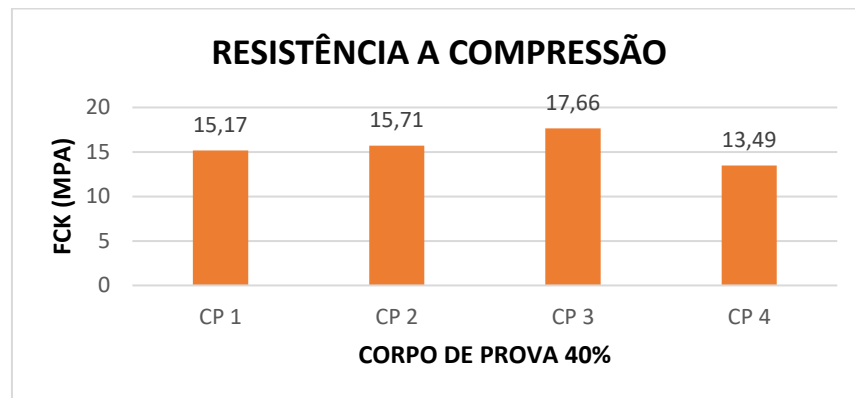


Fonte: Autor (2021).

Avaliando os resultados encontrados no ensaio de resistência à compressão dos blocos de concreto com 20% de RCD, obteve-se resistência média próxima de 18 Mpa, sendo ligeiramente inferior ao concreto de referência. Isso indica que a substituição do agregado convencional por agregado reciclado interfere na resistência a compressão do concreto. No entanto, os resultados ficaram muito próximos, indicando que uma pequena substituição de agregado convencional por RCD é possível. Este concreto também não atingiu a 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 devido às limitações do equipamento usado no ensaio.

O resultado de resistência à compressão para o concreto com 40% de RCD está apresentado no Gráfico 18.

Gráfico 18: Resistência à compressão - Concreto com RCD 40%.

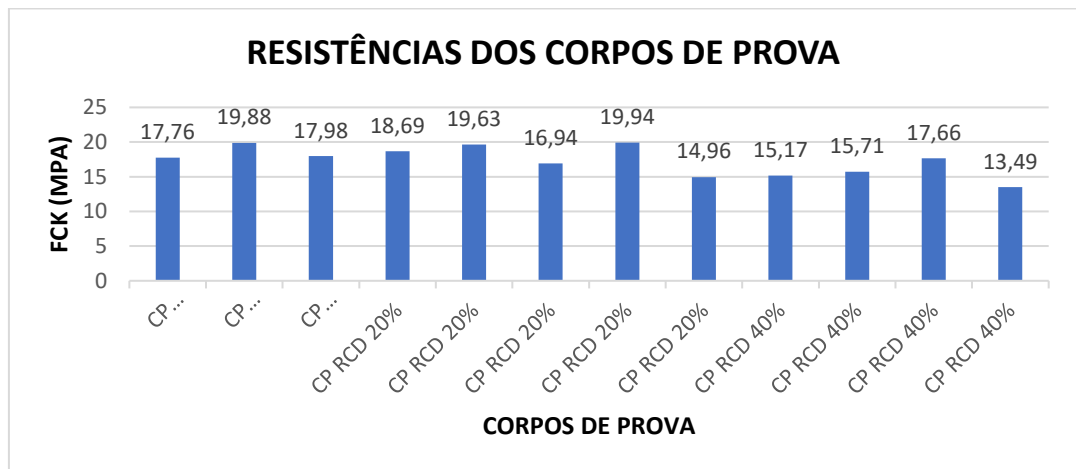


Fonte: Autor (2021).

Os resultados do ensaio de resistência à compressão para o concreto com 40% de agregado reciclado apresentaram resistência característica à compressão em torno de 15,5 MPa. Pode-se observar com isso que ao aumentar a porcentagem de agregado convencional substituída por agregado reciclado, causa maiores prejuízos para a resistência a compressão do concreto. Este concreto também não atingiu a resistência característica à compressão superior a 35 MPa aos 28 dias, conforme determinado pela NBR 9781 (ABNT, 2013) para o tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha devido às limitações do equipamento usado no ensaio.

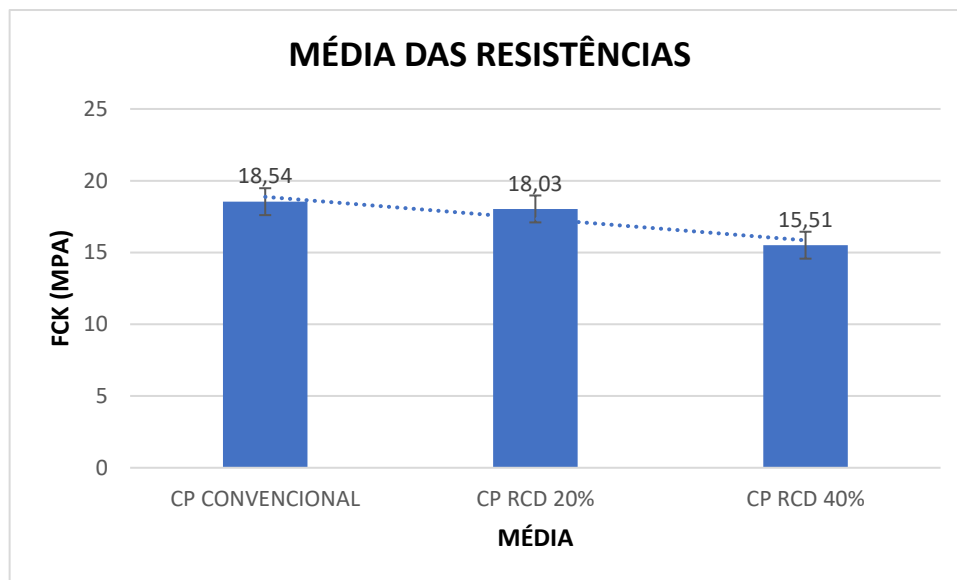
Os Gráficos 19 e 20 apresentam um resumo dos resultados de resistência à compressão.

Gráfico 19: Resistência à compressão - todos os corpos de provas.



Fonte: Autor (2021).

Gráfico 20: Resistência Média de cada traço.



Fonte: Autor (2021).

A partir dos Gráficos 19 e 20, pode-se observar a partir da linha de tendência que a resistência a compressão dos corpos de provas com substituição parcial de 20% de RCD, são em sua maioria próximos às resistências do concreto com agregado convencional e superior ao com concreto com 40% de agregado reciclado, como era esperado de acordo com a bibliografia e os resultados iniciais.

Poon et al. (2009) afirma que é possível substituir até 50% do agregado convencional por agregado reciclado. Além disso, a curva granulométrica dos materiais combinados, com

20% de RCD, está quase que totalmente dentro dos limites determinados pela NBR 7211 (ABNT, 2009a) para agregados graúdos, ao passo que ao aumentar a porcentagem de agregado reciclado na mistura, a curva granulométrica sai dos limites determinados pela norma, conforme mostrado anteriormente.

Em relação a absorção de água dos corpos de prova, o concreto com 20% de RCD foi o que apresentou menor absorção, seguido do concreto convencional e por último o concreto com 40% de RCD, corroborando também com os resultados esperados para resistência à compressão.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo principal avaliar a viabilidade técnica do uso de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) como substituição parcial do agregado graúdo para fabricação de concreto seco utilizado em pavimento intertravado, considerando a influência dos diversos materiais presentes nele e também as propriedades do concreto endurecido.

De acordo com os resultados de caracterização dos agregados, pode-se notar que a substituição dos agregados naturais pelos reciclados, não devem ultrapassar 50%, pois quando combinados, as curvas granulométricas se enquadraram dentro dos limites estabelecidos pela norma, porém, quanto maior a substituição da brita pelo RCD, mais a curva granulométrica se distanciava dos parâmetros estabelecidos pela norma.

A absorção de água do concreto com agregado natural e com 20% de RCD foram bem semelhantes, já a absorção do concreto com 40% de RCD obteve um resultado quase 60%, superior, evidenciando que quanto maior a substituição de agregado reciclado menos adequado torna-se o concreto para ser utilizado em obras de pavimentação intertravada.

No concreto endurecido foram estudados os ensaios de resistência à compressão aos 28 dias de cura, porém, o equipamento utilizado tinha uma capacidade máxima de 20 MPa. De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão nota-se que o concreto com 20% de RCD obteve resultado bem próximo comparado ao concreto convencional, este ainda superior, já em contrapartida o concreto de 40% obteve resultado bem inferior aos demais, confirmando a teoria que quanto maior a substituição parcial do agregado natural pelo agregado reciclado, mais propriedades são perturbadas, principalmente a sua resistência.

Com base nos resultados obtidos neste estudo, conclui-se que é viável, do ponto de vista técnico, a substituição parcial do agregado convencional por agregado reciclado de Resíduos de Construção e Demolição (RCD).

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros pode-se sugerir:

- Desenvolver métodos para a dosagem de concretos secos com agregados reciclados.
- Estudar outras porcentagens de substituição do agregado natural pelo RCD, por exemplo, concretos com 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de substituição.
- Estudar traços com resistência característica à compressão de 35 MPa, conforme estabelecido pela norma.

REFERÊNCIAS

- ABCP. **Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público**, p. 36, 2010.
- ABNT. **NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação** 2004.
- ABNT. **NBR 15953: Pavimento intertravado com peças de concreto — Execução**, 2011.
- ABNT. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**, 2009^a.
- ABNT. **NBR 9776 (ABNT, 1988) – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman**. 1988.
- ABNT. **NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio**, 2013.
- ABNT. **NBR NM 248: Determinação da composição granulométrica**, 2003.
- ABNT. **NBR NM 30 (ABNT, 2003) – Agregado miúdo - Determinação da absorção de água**, 2003.
- ABNT. **NBR NM 45ABNT (2006) Agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios**. 2006.
- ABNT. **NBR NM 53 (ABNT, 2003) – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**, 2003.
- ABNT. **NM 67/1998 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. 1998.
- ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017**. Disponível em: https://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf . Acesso em: 24 out. 2020.
- ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018-2019**. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/> . Acesso em: 11 jan. 2021.
- ALMEIDA, Jupira et al. Estudo de viabilidade econômica do uso do agregado de RCD em pavimentação de vias urbanas. **Revista de engenharia**, n. 54, p. 16-25, 2018.
- ALVES, Caroline Goulart. **Destinação de resíduos da construção civil: panorama dos receptores de Florianópolis**. MBA Gestão de Obras e Projetos-Florianópolis, 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.

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.

BEZERRA, Izabelle MT et al. **Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 6, p. 639-645, 2011.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CONSTRUÇÃO - CBIC. **Dados do Setor de Construção Civil.** Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/home/> Acesso em 21/01/2021.

CARELI, E. D. **A resolução CONAMA n. 307/2002 e as novas condições para a gestão dos resíduos de construção e demolição. 2008. 155 f.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo-SP, 2008. Disponível em: <https://www.livrosgratis.com.br/ler-livro-online-86651/a-resolucao-conama-no3072002-e-as-novas-condicoes-para-gestao-dos-residuos-de-construcao-e-demolicao>. Acesso em: 19 Jan.2021.

CARPENTER, A. C. et al. Life cycle based risk assessment of recycled materials in roadway construction. *Waste Management*, v. 27, n. 10, p. 1458-1464, 2007.

CRUZ, L. O. M. **Pavimento intertravado de concreto: estudo dos elementos e métodos de dimensionamento.** 2003. 281 p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

DE SOUZA, Felipe Basquioto et al. Análise comparativa das propriedades de concretos convencionais com substituição parcial do cimento Portland por cinza da casca de arroz. *Revista de Iniciação Científica*, v. 12, n. 1, 2014.

FAGURY, Samir Costa; GRANDE, Fernando Mazzeo. **Gestão de Resíduos de Construção e Demolição (RCD)-aspectos gerais da gestão pública de São Carlos/SP.** *Exacta*, v. 5, n. 1, p. 35-45, 2007.

FIORITI, Cesar Fabiano. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

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.

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.

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

HOOD, R. DA S. S. **Análise da Viabilidade Técnica da Utilização de Resíduos de Construção e Demolição como Agregado Miúdo Reciclado na Confeção de Blocos de Concreto para Pavimentação**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

HOSSAIN, Md Uzzal et al. Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 109, p. 67-77, 2016.

JONH, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 113 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KÖHLER, Lucas Guilherme. **Desempenho técnico de blocos de concreto para pavimento intertravado com resíduo de construção e demolição**. 2013.

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.

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho da construção civil para utilização como agregados para argamassas e concretos**. 1997. 145f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

Lima, S. A.; Rossignolo, J. A. **Estudo das características químicas e físicas da conza da casca da castanha de caju para uso em materiais cimentícios**. *Acta Scientiarum Technology*, v.32, p.383-389, 2010.

MACEDO, Pamela Camargo. **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar.** 2009.b

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.

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.

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 em blocos de concreto para pavimentação.** 2004. 139 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

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

POON, C. S.; CHAN, D. **Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates.** *Construction and Building Materials*, Hong Kong, n. 21, p.164-175. Elsevier, 2007.

POON, C. S.; KOU, S.; LAM, C. S. **Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks.** *Construction and Building Materials*, Hong Kong, n. 16, p. 281- 289. Elsevier, 2002.

POON, C. S.; KOU, S.; WAN, H.; ETXEBERRIA, M. **Properties of concrete blocks prepared with low grade recycled aggregates.** *Waste Management*, Hong Kong, n. 29, p. 2369–2377. Elsevier, 2009.

RECENA, F. A. P. **Dosagem empírica e controle de qualidade de concretos convencionais de cimento Portland**. EDIPUCRS ed. Porto Alegre. 2002, pg 16.

SCOTT HOOD, Rogério da Silva. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. 2006.

SIPRES, Clarice. **ANÁLISE TÉCNICA DO USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) NA PRODUÇÃO DE CONCRETO SECO PARA PISO INTERTRAVADO**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SIPRES, Clarice. **ANÁLISE TÉCNICA DO USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) NA PRODUÇÃO DE CONCRETO SECO PARA PISO INTERTRAVADO**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

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.

TROCA, JOSÉ ROBERTO. **Estimativa da geração e destinação do resíduo da construção civil na cidade de Lavras-MG**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Lavra-UFLA, Lavras-MG.

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