

YANN CARVALHO BONILHA

**UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO DA PONTE
RODOVIÁRIA HÉLIO SEREJO-SP/MS NA PRODUÇÃO DE CONCRETO
USINADO**



YANN CARVALHO BONILHA

**UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO
DA PONTE RODOVIÁRIA HÉLIO SEREJO-SP/MS NA
PRODUÇÃO DE CONCRETO USINADO**

Dissertação apresentada como
requisito à obtenção do título de
Mestre à Universidade Estadual
Paulista -Júlio de Mesquita Filho -
Programa de Pós-Graduação em
Ciências e Tecnologia de
Materiais, sob a orientação da
Profa. Dra. Agda Eunice de Souza
Albas

Presidente Prudente – SP
2022

B715u	Bonilha, Yann Carvalho Utilização de agregados reciclados de concreto da ponte rodoviária Hélio Serejo-SP/MS na produção de concreto usinado / Yann Carvalho Bonilha. -- Presidente Prudente, 2022 86 f. : il., tabs., fotos Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente Orientadora: Agda Eunice de Souza 1. Agregado reciclado de concreto. 2. Resíduo. 3. Reaproveitamento. 4. Concreto. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru



ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE YANN CARVALHO BONILHA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 11 dias do mês de abril do ano de 2022, às 14:30 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de YANN CARVALHO BONILHA, intitulada **Utilização de Agregados Reciclados de Concreto da Ponte Rodoviária Helio Serejo SP/MS na Produção de Concreto Usinado..** A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Profa. Dra. AGDA EUNICE DE SOUZA ALBAS (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Física / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente, Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, Prof. Dr. SILVIO RAINHO TEIXEIRA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Física / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente UNESP. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Profa. Dra. AGDA EUNICE DE SOUZA ALBAS

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e por ter me proporcionado chegar até aqui. À minha família, aos meus pais Luiz Carlos e Lucineide por sempre acreditarem em mim e em meus sonhos, aos meus irmãos Kauê e Renan, por todo apoio, à minha namorada, Victoria, por toda paciência e amor, uma pessoa que sempre me deu suporte com palavras de apoio para chegar até aqui.

Agradeço à professora Agda Eunice, por toda atenção e competência em sua orientação, sempre com calma e prestatividade, me mostrou a direção na elaboração deste trabalho. Ao professor Silvio Rainho, que no primeiro dia em que nos conhecemos me trouxe a ideia deste trabalho, e instantaneamente me deu espaço em seu laboratório. Sou muito grato a esses professores por todos os ensinamentos durante o mestrado.

Ao professor e engenheiro Joao Victor Fazzan, o qual há 9 anos atrás, sem saber, me inspirou a trilhar o caminho da engenharia civil e adentrar no campo de pesquisas em concreto.

Ao meu amigo Luis Fernando, a quem desde o primeiro dia de amizade, se colocou à disposição e me guiou com muita agilidade durante o meu mestrado. A todos os amigos do programa: Bruno Brito, Ana Carolina, Sheila, Thariany e Samira, que também fizeram parte desta trajetória. A todo pessoal do Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos (LCGRS) que deram apoio no dia a dia em toda fase do mestrado.

Agradecimento especial à usina de concreto Jomane Concretagem e Serviços, por todo apoio e suporte, no desprendimento de recursos para execução das etapas deste projeto, ao seu laboratorista e engenheiro civil Ederson Del Castilho, por sempre apoiar em compartilhar todo seu conhecimento das tecnologias do concreto.

Muito obrigado a todos!

Bonilha, Y.C. Utilização de agregados reciclados de concreto da ponte rodoviária Hélio Serejo-SP/MS na produção de concreto usinado. Dissertação de Mestrado. 86f (2022). Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Campus de Presidente Prudente, SP.

RESUMO

A disposição adequada dos resíduos provenientes da construção civil é, atualmente, um dos quesitos de maior relevância do ponto de vista legal. Por outro lado, o reaproveitamento destes resíduos tem sido objeto de estudo em diversas áreas. É neste contexto que este trabalho mostra a viabilidade do uso do resíduo proveniente da reforma da ponte Hélio Serejo que liga os estados de SP e MS, sobre o rio Paraná. Desde a reforma da ponte, o resíduo se encontra depositado às margens da orla turística do município de Presidente Epitácio, SP e, até o presente momento, não houve manifestações para seu reaproveitamento e, tampouco, para sua remoção do local. Também, ainda não há estudos disponíveis na literatura que mostrem a caracterização e o potencial de reuso do resíduo proveniente da reforma da ponte Hélio Serejo, o qual denominamos agregados reciclados de concreto (ARC). Este trabalho mostra, portanto, resultados da substituição total do agregado gráudo natural pelos agregados reciclados de concreto (ARC) na preparação de concreto usinado. Os ARC foram caracterizados por fluorescência e difração de Raios X, análise granulométrica, massa específica e material pulverulento. Foram avaliadas as propriedades do concreto no estado fresco (slump test), endurecido (resistência a compressão) e durabilidade (absorção de água). Para isso, os ARC foram beneficiados em um reciclador de resíduos sólidos e classificados em três granulometrias (ARC 1, ARC2 e ARC3). O ARC de menor granulometria (ARC1) foi descartado por apresentar material pulverulento acima de 5%. Para estudos comparativos, foram produzidos dois traços de concreto: um contendo apenas agregados naturais (traço piloto) e o outro contendo a substituição total do agregado gráudo por agregados de maior granulometria, utilizando duas granulometrias diferentes, ambos utilizados para preparação de corpos de prova cilíndricos. O teste de abatimento de tronco ao cone apresentou em ambos os traços, consistência fluida (classe S100). No que tange às propriedades

mecânicas, os dois traços apresentaram resistência à compressão axial aos 28 dias, acima de 35 MPa para a qual é um material que pode ser aplicado na pavimentação. O desempenho dos corpos de provas apresentou resultados abaixo de $< 6\%$ para o ensaio de absorção de água por imersão. O traço com ARC apresentou propriedades adequadas para serem utilizados em concretos, atendendo às exigências das normas brasileiras. Os resultados obtidos mostraram que o resíduo proveniente da reforma da ponte Hélio Serejo pode, portanto, ser utilizado em substituição total aos agregados graúdos em concreto, contribuindo economicamente com o setor da construção civil e, como consequência, promovendo redução dos impactos ambientais causados pela sua disposição inapropriada no local.

Palavras chaves: agregado reciclado de concreto, resíduo, reaproveitamento, concreto.

Bonilha, Y.C. Use of recycled concrete aggregates from the Hélio Serejo-SP/MS road bridge in the production of machined concrete. Masters dissertation. 86f (2022). Sao Paulo State University (UNESP) – Presidente Prudente, SP.

ABSTRACT

The proper disposal of waste from civil construction is currently one of the most relevant requirements from a legal view point. On the other hand, the reuse of these wastes has been the object of study in several areas. It is in this context that this work shows the feasibility of using the waste from the reform of the Hélio Serejo bridge, that connects SP and MS states, over the Paraná River. Since the reform of these bridge, the waste has been deposited on the banks of the Presidente Epitácio, SP touristic edge, and, until now, there have been no demonstrations for its reuse, nor for its removal from this local. Also, there are no studies available in the literature that show the potential for this waste reuse, which we call recycled concrete aggregates (RCA). Therefore, this work shows results of the total replacement of natural coarse aggregate by recycled concrete aggregates (RCA) in the machined concrete preparation. The concrete properties in its fresh state (slump test), hardened (compressive strength) and durability (water absorption) were evaluated. For this, the RCA were benefited in a solid waste recycler and classified into three particle sizes (RCA1, RCA2 and RCA3). The RCAs were characterized by fluorescence and X-ray diffraction, particle size analysis, specific mass and powdery material. The smallest particle size RCA (RCA1) was discarded because it presented powdery material above 20%. For comparative studies, two concrete mixes were produced: the first, containing only natural aggregates (pilot mix) and the second, containing the total replacement of the coarse aggregate by RCA2 and RCA3, both used to prepare cylindrical specimens. The trunk-to-cone slump test showed fluid consistency in both mixtures (class S100). Regarding the mechanical properties, the two mixtures showed compressive strength at 28 days, above 35 MPa. The specimens showed water absorption by immersion results below $< 6\%$. The mix with RCA presented adequate properties to be used in concrete, meeting the requirements of Brazilian standards. The results obtained showed that the waste from the reform of the Hélio Serejo bridge can, therefore, be used in total replacement to the coarse

aggregates in concrete production, contributing economically to the civil construction sector and, as a consequence, promoting the reduction of environmental impacts caused by its inappropriate disposal on site.

Key words: recycled concrete aggregate, waste, reuse, concrete.

Lista de Figuras

Figura 1: Ponte Helio Serejo sobre o rio Paraná, que liga os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul.....	8
Figura 2: Resíduo de concreto proveniente da reforma da ponte Hélio Serejo, depositado em frente a orla do município de Presidente Epitácio, SP.....	9
Figura 3: Cimento Portland.....	11
Figura 4: Agregados miúdos e graúdos.....	15
Figura 5: Pavimento de bloquetes produzidos com RCD no município de Jacareí, SP.....	20
Figura 6: Agregados reciclados de concreto dispostos publicamente.....	24
Figura 7: Triturador Queixada QI 300 utilizado.....	25
Figura 8: ARC após beneficiamento em triturador.....	25
Figura 9: Equipamento de FRX Shimadzu (XRF-7000).....	29
Figura 10: Equipamentos utilizados: (a) Pulverizador Marconi; (b) Difratômetro de Raios X.....	30
Figura 11: Procedimento para retirada do material pulverulento.....	32
Figura 12: Etapas envolvidas na determinação da massa específica aparente das amostras de agregado graúdo.....	35
Figura 13: Processo de adensamento para determinação da massa unitária do agregado graúdo.....	37
Figura 14: Ensaio de Massa Unitária ARC2 e ARC3.....	38
Figura 15: Ensaio de absorção de água.....	44
Figura 16: Corpo de prova cortados para obtenção das imagens de microscopia óptica.....	45
Figura 17: Presença de seixos nos agregados de ARC.....	47
Figura 18: Difratogramas de raios X das amostras ARC.....	49
Figura 19: Distribuição granulométrica do ARC2, ARC3 e agregados graúdos (brita 0 e brita 1).....	51
Figura 20: Distribuição granulométrica do ARC1 e agregados miúdo (areia).....	53
Figura 21 – Slump test do traço ARC.....	57
Figura 22: Resultados de resistência à compressão axial em função da idade de ruptura dos corpos de prova.....	59
Figura 23: Aspecto das amostras ARC2 e ARC3 com poros aparentemente formados em torno dos seixos.....	60

Figura 24: Micrografia com ampliação nominal de 8x da área interna corpo de prova traço piloto.....	61
Figura 25: Micrografia com ampliação nominal de 8x da área interna corpo de prova traço ARC70/30.....	62

Lista de Tabelas

Tabela 1: Categorias e percentual de composição dos diferentes tipos de cimento Portland de acordo com a ASTM.....	11
Tabela 2: Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland.....	12
Tabela 3: Custo do serviço de descarte da COOPEREN.....	19
Tabela 4: Especificações do cimento utilizado.....	26
Tabela 5: Características técnicas do superplastificante utilizado.....	28
Tabela 6: Conjunto de peneiras utilizadas para determinação da granulometria das amostras ARC 1 e areia natural.....	30
Tabela 7: Conjunto de peneiras utilizadas para determinação da granulometria do agregado gráúdo e pedrisco.....	31
Tabela 8: Proporções para determinação da massa unitária.....	38
Tabela 9: Composição para o traço piloto.....	40
Tabela 10: Composição para o traço com ARC.....	40
Tabela 11: Composição química em óxidos das frações do RD determinando por análise de FRX.....	46
Tabela 12: Análise granulométrica do ARC2, ARC3 e agregados gráudos (brita 0 e brita 1).....	50
Tabela 13: Análise granulométrica do ARC1 e agregado miúdo (areia).....	52
Tabela 14: Massa específica e massa específica aparente do agregado miúdo.....	53
Tabela 15: Massa específica, massa específica aparente e absorção de água dos agregados gráudos.....	54
Tabela 16: Massa unitária dos agregados reciclados de concreto e agregados naturais.....	55
Tabela 17: Massa unitária das proporções de agregados gráudos ARC3 e ARC2 utilizados.....	55
Tabela 18: Percentual de material pulverulento dos agregados recicláveis de concreto.....	56
Tabela 19: Resultados de resistência à compressão axial dos corpos de prova aos 7 e 28 dias.....	58
Tabela 20: Resultados dos ensaios absorção por Imersão (28 dias) para os corpos de prova (traço piloto e traço com ARC.....	60

Lista de Quadros

Quadro 1 – Classificação e destinação do RCD, conforme resolução CONAMA 307/2002.....	6
Quadro 2 – RCD gerados em diferentes etapas de uma obra.....	7

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c - Relação Água Cimento
 Al_2O_3 - óxido de alumínio
ARC - Agregado Reciclado de Concreto
ASTM - American Society for Testing and Materials
CaO - óxido de cálcio
C.P - Corpo de Prova
CONAMA - Conselho nacional do meio ambiente
 f_{ck} - Resistência Característica do Concreto à Compressão
 Fe_2O_3 - óxido de ferro
FRX - Espectrometria de Fluorescência de Raios-X
IA - incorporadores de ar
LCGRS - Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos
MPa - Megapascal
P - Plastificantes
PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCC - Resíduos de Construção Civil
RCD - Resíduos de Construção e Demolição
SP - Superplastificantes
 SiO_2 - óxido de silício
UNESP - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3. REVISÃO BIBLOGRÁFICA	4
3.1 Resíduos da Construção e Demolição	4
3.2 Composição RCD.....	6
3.3 Ponte Hélio Serejo	8
3.4 Concreto.....	9
3.5 Materiais constituintes para concreto	10
3.5.1 Cimento.....	10
3.5.2 Água na mistura do concreto	13
3.5.3 Agregados na mistura do concreto	14
3.5.4 Aditivos na mistura do concreto	15
3.5.5 Agregados Reciclados	17
3.5.6 Contaminações	17
3.6 Legislação Municipal de Presidente Epitácio, SP	18
3.7 Descarte de RCD – Estudo de Viabilidade Econômica na Reciclagem do Resíduo.....	18
4. METODOLOGIA.....	21
4.1 Delimitações.....	23
4.2. Materiais e métodos	23
4.2.1 Coleta e beneficiamento do Resíduo da Demolição da Ponte Hélio Serejo	23
4.2.2 Cimento Portland	26
4.2.3 Água	26
4.2.4 Agregado miúdo.....	27
4.2.5 Agregado graúdo	27
4.2.6 Aditivos	27
4.3 Caracterizações	28
4.3.1 Fluorescência de Raios X	28
4.3.2 Difração de Raios X	29
4.3.3 Análise Granulométrica.....	30

4.3.4	Material Pulverulento	31
4.3.5	Massa Específica – Agregado miúdo.....	33
4.3.6	Massa Específica – Agregado graúdo	34
4.3.7	Ensaio de massa unitária compactada dos agregados graúdos.....	36
4.3.8	Ensaio de Massa Unitária da mistura de agregados reciclados para dosagem do concreto.....	38
4.3.9	Dosagem do Concreto.....	39
4.3.10	O Processo de Cura	42
4.3.11	Ensaio.....	42
4.3.11.1	Resistência à Compressão Axial	43
4.3.11.2	Absorção de água por Imersão.....	43
4.3.12	Microscopia Óptica	45
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1	Caracterizações químicas e físicas do ARC	46
5.1.1	Fluorescência de Raios X	46
5.1.2	Difração de Raios X	48
5.1.3	Análise Granulométrica.....	49
5.1.4	Massa específica – Agregado miúdo	53
5.1.5	Massa específica – Agregado graúdo.....	54
5.1.6	Massa unitária.....	55
5.1.7	Material Pulverulento	56
5.1.8	Abatimento de tronco ao cone – Slump Test	57
5.1.9	Resistência à compressão axial.....	58
5.1.10	Absorção de água por imersão	59
5.1.11	Microscopia Óptica dos Corpos de Prova.....	61
6.	CONCLUSÃO.....	63
	REFERÊNCIAS.....	64
	ANEXO I: Carta Traço	70

1. INTRODUÇÃO

A exploração excessiva e constante dos recursos naturais, criam um confronto entre meio ambiente e desenvolvimento, fazendo com que o poder público, o mercado e a indústria passem a buscar formas de produção e consumo sustentáveis. Em razão do adensamento urbano, a coleta e a destinação dos resíduos sólidos gerados passaram a ser objeto de grande preocupação, sendo que a composição destes resíduos é, em grande parte, formada por resíduos da construção civil (COOPEREN, 2015).

Resíduos de construção e demolição (RCD) são descritos na literatura como um material (em grande fração: sólido) que surge indispensavelmente das atividades da construção civil e deve ser administrado de forma eficaz, caso contrário, seu manejo inadequado pode gerar impactos econômicos, ambientais e sociais negativos (KABIRIFAR et al., 2020). A degradação do solo, comprometimento dos corpos d'água e mananciais, intensificação de enchentes, contribuição para a poluição do ar e proliferação de vetores de importância sanitária nos centros urbanos e 'catação' em condições insalubres nas ruas e nas áreas de disposição final, são exemplos de disposição inadequada do RCD (JACOBI e BESEN, 2011).

Desde a publicação, em 05 de julho de 2002, da Resolução CONAMA nº 307, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para gestão dos resíduos da construção civil, posteriormente atualizada para incorporar em seu bojo os aperfeiçoamentos que novas Leis, trouxeram, em especial, a nova Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, Lei nº 12.305/2010; os geradores destes resíduos, pessoas físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, conforme definido no item II do art. 2º da citada resolução, estão obrigados a dispor os resíduos gerados, de forma a atender a legislação adequadamente, conforme está descrito no art. 10 da Resolução CONAMA 307/02.

Uma das abordagens mais aceitáveis e amplamente aplicáveis para gerenciar os resíduos da construção civil é cumprida pelo princípio dos 3Rs, incluindo as abordagens de redução, reutilização e reciclagem. Reduzir é a abordagem mais eficaz, pois tem os menores impactos ambientais e, portanto, é considerada a abordagem mais favorável. Posteriormente, a estratégia de reutilização, que é definida como o processo de usar materiais engendrados por tarefas de construção e demolição para seus propósitos originais ou para

satisfazer uma nova função, é considerada como a segunda prioridade (HUANG, 2018). Finalmente, a estratégia de reciclagem, que pode ser definida como o processo de usar materiais gerados pelas atividades de construção (RCD) para fazer novos materiais.

Os princípios de reutilização e reciclagem serão tomados como foco neste trabalho que propõe um estudo sobre a viabilidade de reutilizar e/ou reciclar resíduos provenientes da reforma da ponte Hélio Serejo, que liga os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul. Essa ponte, com extensão de 2550 metros atravessa o rio Paraná e liga as rodovias Raposo Tavares (SP-270) e BR-267, pertencentes aos respectivos estados. No que está relacionado à reciclagem de RCD na produção de novos materiais com substituições parciais e totais, não foram encontrados trabalhos na literatura que contemplassem o uso de resíduos de demolição de ponte rodoviária. Mesmo que as composições dos RCD, em partes, sejam semelhantes, este RCD possui certa particularidade, pois os resíduos da reforma da ponte Hélio Serejo apresentam agregados naturais - seixos de rios, uma vez que, trata-se de uma construção da década de 60. No ano de 2010, a ponte, em toda sua extensão, passou por uma reforma, cujo intuito foi a troca da camada de rolamento de pavimento rígido, fazendo com que fosse gerada uma quantidade expressiva de resíduo de concreto, que, por sua vez, foi descartado na cidade de Presidente Epitácio-SP e Porto XV-MS.

Neste contexto, este trabalho busca contribuir com um estudo que mostre a possibilidade de reutilização e/ou reciclagem deste resíduo em benefício da sociedade, caracterizando-o e utilizando-o como agregado reciclado de concreto (ARC) na confecção de concreto usinado, após processo de moagem. Este resíduo pode ter várias aplicações na engenharia civil, como, por exemplo, pavers, sub-base para pavimentação, ou ainda, na construção de blocos e artefatos em geral de concreto.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado um traço fornecido por uma concreteira da região, a fim de comparar o traço piloto com o traço de concreto desenvolvido.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Caracterizar o agregado reciclado de concreto da reforma da ponte Hélio Serejo e viabilizar o processo de reutilização e/ou reciclagem como agregado graúdo na produção de concreto usinado.

2.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, foram traçados os objetivos específicos desta pesquisa:

- Realizar a coleta e beneficiamento dos agregados reciclados de concreto coletados no Centro de Estudos Ambientais (CEA), próximo ao Parque da Orla, em Presidente Epitácio – SP;
- Fracionar/triturar os agregados reciclados de concreto em um reciclador de entulho;
- Caracterizar fisicamente e quimicamente os agregados reciclados de concreto, cimento, agregados miúdos e graúdos naturais;
- Determinar o traço de concreto (fornecido pela concreteira), conforme as características dos agregados;
- Compor conjuntos de corpos de prova cilíndrico de concreto, substituindo totalmente o agregado graúdo natural pelo agregado reciclado de concreto, de acordo com a ABNT NBR 9781:2013;
- Realizar o ensaio de resistência à compressão com os corpos de prova feitos com o traço piloto e traço com agregados reciclado de concreto (traço ARC70/30), conforme a ABNT NBR 5739:2018;
- Realizar o ensaio de absorção de água dos corpos de prova, feitos com o traço controle e traços com adição dos agregados reciclado de concreto, conforme a ABNT NBR 9778:2009;
- Realizar análise de microscopia óptica da área interna dos corpos de prova com o traço controle e traço com agregados reciclados de maior granulometria, utilizando duas granulometrias diferentes.

3.REVISÃO BIBLOGRÁFICA

3.1Resíduos da Construção e Demolição

Os primeiros relatos de geração de resíduos foram por volta de 10 mil anos a.C., e ao longo dos séculos as cidades foram se desenvolvendo e crescendo exponencialmente, junto com a economia, urbanização e revolução tecnológica, atrelados ao estilo de vida e modo de produção e consumo da população. Em decorrência direta desses processos, surgiu a necessidade de criar políticas públicas sanitárias para o gerenciamento dos resíduos gerados pelos diversos setores produtivos (GOUVEIA, 2012).

Após a criação destas políticas públicas, os problemas dos resíduos começaram a surgir, tornando um problema sanitário urbano e rural, e por consequência, apresentando perigo à sociedade. Com as novas tecnologias incorporadas ao cotidiano, os resíduos, além de se apresentarem em grandes quantidades, também se tornaram diversos nos grandes centros urbanos, apresentando em sua composição, elementos sintéticos e perigosos ao meio ambiente e a saúde humana (DEUS, 2015).

De acordo com a NBR 10004:2004, Resíduos sólidos – Classificação, resíduos sólidos são:

Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

A geração e descarte de resíduos sólidos pelas atividades da construção civil, e por outras atividades de produção, causam impactos ambientais de diversas ordens (BERNARDO, 2014). Uma das definições mais difundidas de resíduos da construção e demolição (RCD), é “Um material ou subproduto do processo de construção, que é gerado devido a não conformidade com as especificações, não uso, ou utilização excessiva de recursos e danos aos recursos e infraestrutura, e esse material deve ser evacuado de canteiro de

obras para outro local ou pode ser utilizado no canteiro de obras, mas não no objetivo inicial do projeto” (SKOYLES, 1987).

Outra definição de resíduos da construção e demolição é introduzida por (SHEN et al., 2004) como “Detritos gerados em edifícios, terra, entulho, aço, concreto, madeira e materiais mistos nos canteiros de obras, gerados a partir de diferentes atividades nos canteiros de obras, incluindo escavação de terrenos, construção de edifícios e estruturas, limpeza de canteiro, atividades relacionadas a demolição, obras rodoviárias e reforma de edifícios”.

De acordo com a resolução do CONAMA (Nº 307, 05 de julho de 2002), os resíduos da construção e demolição podem ser classificados em quatro classes:

Classe A: resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras.

Classe B: resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias¹ e gesso.

Classe C: resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitem a sua reciclagem ou recuperação.

Classe D: resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde (redação dada pela Resolução nº 431/11).

¹ Observação: § 1º No âmbito dessa resolução consideram-se embalagens vazias de tintas imobiliárias, aquelas cujo recipiente apresenta apenas filme seco de tinta em seu revestimento interno, sem acúmulo de resíduo de tinta líquida.

O Quadro 1 mostra exemplos e destinação final adequada para os RCDs pertencentes às classes estabelecidas pela resolução CONAMA.

Quadro 1 – Classificação e destinação do RCD, conforme resolução CONAMA

Classe	Descrição	Exemplos	Destinação Final
A	(RCD recicláveis como os agregados)	Areia, concreto, argamassa, blocos cerâmicos, solos de escavação, telhas, pisos cerâmicos etc.	Reutilizar ou reciclar na forma de agregados, ou encaminhar a aterro de inertes, dispondo de modo a permitir sua utilização ou reciclagem futura
B	(RCD recicláveis para outras destinações como plásticos, papel/papelão, metais, entre outros)	Madeiras, metais, papel e papelão, plásticos, tubos e forro de PVC, vidros, gesso	Reutilizar, reciclar ou encaminhar a áreas de armazenamento, temporário, permitindo sua reciclagem futura
C	(RCD sem tecnologia disponível para reciclagem e aproveitamento como o gesso)	Fórmicas, manta asfáltica, manta de lã de vidro, peças de fibra de nylon e rejeitos	Armazenar, transportar e destinar em conformidade com normas específicas
D	RCD perigosos	Tintas, solventes; óleos, amiantos, clínicas radiológicas, instalações industriais e outros	Armazenar, transportar e destinar em conformidade com normas técnicas específicas

Fonte: Adaptado de Resolução CONAMA 307/2002

3.2 Composição RCD

É difícil estimar as quantidades de RCD produzidas, pois sua composição é variada. No entanto, pode-se estimar que o RCD pode conter concreto (40%), cerâmicas (30%), madeira (10%), plásticos (5%), metal (5%) e outros (10%) (TULADHAR; MARSHALL; SIVAKUGAN, 2020). A composição pode variar de acordo com a fonte geradora e com a etapa da obra, resultando em materiais de diferentes origens. O Quadro 2 mostra a composição do RCD em diferentes etapas da obra, reportando por Pacheco (2011).

Quadro 2 – RCD gerados em diferentes etapas de uma obra.

Etapa	Composição do RCD
Demolições	Areia, argamassa, azulejos, ferro, blocos, brita, cal, cerâmica, concreto, esmalte, esquadrias metálicas, gesso, janelas, ladrilhos, madeiras, pedras, perfis metálicos, pisos, portas, pré-moldados de concreto, tábuas, tacos, telhas
Escavação do terreno	Solos, rochas, troncos, folhas e outros resíduos vegetais
Canteiro de obras	Blocos, argamassa, concreto (areia e brita), madeira, pregos e telhas
Fundações	Solos e materiais rochosos
Drenagem de terrenos Infraestrutura	Areia, brita, concreto, juntas de tubos cerâmicos e de concreto, madeira, rejeitos rochosos e solos
Infraestrutura	Areia, argamassa, brita, cal, cimento, concreto, pedras manta asfáltica e produtos impermeabilizantes.
Superestrutura	Concreto (areia, brita), madeira, sucata de ferro, blocos, brita, cal, cimento, concreto, laminados, saibro, tijolos
Alvenarias	Blocos cerâmicos, blocos de concreto, argamassa
Instalações hidráulicas e elétricas	Blocos, sucatas de ferro, apara de tubulação (PVC e fibrocimento), argamassa, tubulação de concreto, aparas de cobre e ferro, material de rejunte, vedação, tubulação fios de cobre e cabos, conduíte e mangueira
Reboco	Argamassa
Revestimentos	Pisos e azulejos cerâmicos, piso de madeira, argamassa ou colas, borrachas, cimento, fibrocimento, granitos, lascas de alumínio, de cerâmica, de mármore e de pastilhas de vidro, pedra, concreto pedaços de vigas, restos de tacos
Esquadras	Madeiras, ferros, alumínio, vidros, massas e colas específicas para o assentamento
Forro	Gesso, argamassa, PVC
Pintura	Tintas, vernizes, seladores, texturas

Fonte: Pacheco (2011).

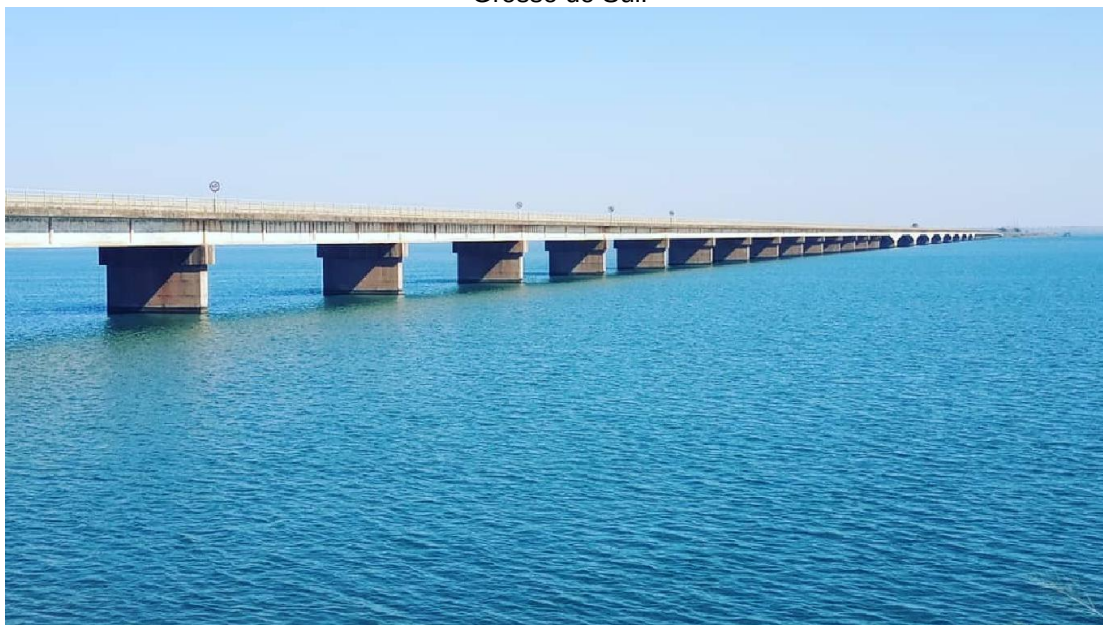
Poon e Chan (2007) descreveram o RCD como um composto de materiais inertes e não inertes. Por exemplo, solo e chorume são classificados como materiais inertes macios, enquanto partículas e rochas de concreto são classificadas como materiais inertes duros.

Santos (2007) afirma que os RCD são gerados em três etapas distintas: durante a construção, manutenção e demolição. O Quadro 2 apresenta apenas os RCD gerados nas etapas de uma obra. Quando se trata de demolição, há exemplos de manutenção e recuperação de pontes rodoviárias, que por sua vez, geram grandes toneladas de resíduos.

3.3 Ponte Hélio Serejo

A ponte Hélio Serejo, construída em 1963 e inaugurada em 1964, possui 2.550 metros de extensão (2,5 km) sobre o rio Paraná, entre o estado de Mato Grosso do Sul e São Paulo. Foi construída em concreto e projetado pelo Engenheiro Civil Sergio Marques de Souza. A ponte tem continuidade na BR-267, ao lado da cidade de Batagassu (sul-mato-grossense) e estende-se até à cidade de Presidente Epitácio, lado paulista (VIALLE, 2021), conforme a Figura 1.

Figura 1: Ponte Helio Serejo sobre o rio Paraná, que liga os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul.



Fonte: (EPITUR, 2017).

No início de 2011, a ponte Hélio Serejo (antes nomeada de ponte Maurício Joppert) passou por uma reforma, que acarretou em um investimento de 24 milhões de Reais, com duração de dois anos. Foi realizada a troca do pavimento total (demolição) da ponte com a implantação de sobre laje de concreto, manutenção no guarda corpo e, ainda, recuperação de alguns pontos de fundação (LOPES, 2015).

Durante a reforma, foram gerados em torno de 40 mil toneladas de resíduos de concreto, dos quais, aproximadamente metade, foram depositados em um local ao lado do Centro de Estudos Ambientais (CEA), próximo a Orla Fluvial de Presidente Epitácio, SP. Até os dias de hoje, os órgãos municipais não acondicionaram, de forma segura, um destino apropriado para este resíduo. A

Figura 2 apresenta o resíduo de concreto da ponte depositado na principal região turística da cidade de Presidente Epitácio, SP.

Figura 2: Resíduo de concreto proveniente da reforma da ponte Hélio Serejo, depositado em frente a orla do município de Presidente Epitácio, SP



Fonte: O autor.

3.4 Concreto

O concreto de cimento Portland é o mais importante material estrutural e de construção civil da atualidade. Mesmo sendo o mais recente dos materiais de construção de estruturas, pode ser considerado como uma das descobertas mais interessantes da história do desenvolvimento da humanidade e sua qualidade de vida (HELENE, 2007).

Ele é, basicamente, o resultado da mistura de cimento, água, agregados graúdos (pedras) e miúdos (areia) e ainda em alguns casos podem necessitar a incorporações de aditivos. O cimento em reação com a água forma uma pasta resistente e aderente aos agregados, portanto a qualidade e quantidade dos materiais empregados no preparo do concreto são de suma importância (CHAGAS, 2011).

Logo após a mistura, o concreto deve possuir consistência satisfatória, devendo atender às exigências de manuseio, transporte e lançamento, além de conferir coesão e resistência ao longo do tempo, devido às reações de hidratação entre o cimento e a água.

A inserção da água, causa a hidratação das partículas de cimento, e essa água, geralmente é dosada conforme as necessidades projetadas para aquele concreto. Usualmente, a dosagem da água é relacionada conforme a quantidade de cimento, surgindo, então, o fator água-cimento (GIAMMUSSO, 1992).

Após a mistura, as propriedades do concreto fresco são relacionadas com a trabalhabilidade. Mehta e Monteiro (1994, p. 314) definem que: “A trabalhabilidade do concreto fresco determina a facilidade com a qual um concreto pode ser manipulado sem segregação nociva”.

A trabalhabilidade é permeada entre duas propriedades relevantes do concreto, a consistência e a coesão. A consistência é a propriedade do estado de fluidez da mistura, que relaciona a demanda de água em função dos agregados e a fluidez desejada para a massa. Ela é fundamental para garantir a trabalhabilidade do concreto, ou seja, a facilidade com que o concreto pode ser colocado num certo tipo de fôrma, sem originar em fenômenos de segregação.

3.5 Materiais constituintes para concreto

3.5.1 Cimento

Tecnicamente, o cimento é definido como um aglomerante hidráulico obtido pela moagem simultânea de pedras e de minerais calcários e argilosos chamados de clínquer, que, com adição de gesso e outras substâncias, determina seu tipo.

Figura 3: Cimento Portland



Fonte: NEVES, A. Tipos de Cimento Portland < <https://www.blok.com.br/blog/tipos-de-cimento-portland-cp> >.

A American Society for Testing and Materials (ASTM C-618:2019) reconhece cinco categorias principais da composição do cimento Portland, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Categorias e percentual de composição dos diferentes tipos de cimento Portland de acordo com a ASTM.

Categoria ASTM	Aplicação	Composição (%)			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₂ A	C ₄ AF
I	Uso geral	50	24	11	8
II	Proteção de Sulfetos e baixa geração de calor	42	33	5	13
III	Endurecimento rápido	60	13	9	8
IV	Baixa geração de calor	26	50	5	12
V	Alta resistência a sulfetos	40	40	4	9

Fonte: ASTM, 2019.

O cimento Portland adquire propriedades adesivas quando misturado à água. Isso acontece porque a reação química do cimento com a água, comumente chamado de hidratação do cimento, gera produtos que possuem características de pega aderência e endurecimento. Deve-se observar que os diferentes minerais do cimento agem de forma diferente durante a hidratação, como visto na Tabela 1. Os minerais presentes no cimento Portland (Figura 3) são, segundo notação técnica: C = CaO; S = SiO₂; A = Al₂O₃; F = Fe₂O₃ (FASSONI, 2018).

C₃S – silicato tricálcico ou alita (3CaO.SiO₂)

C₂S – silicato dicálcico ou belita (2CaO.SiO₂)

C_2A – aluminato tricálcico ($3CaO \cdot Al_2O_3$)

C_4AF - tetracálcico aluminoferrite ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$)

Dessa forma, as propriedades finais do composto irão depender da composição relativa do tipo de mineral constituinte. Geralmente são necessárias algumas semanas para que o concreto atinja suas características finais. A Tabela 2 apresenta as especificações dos tipos de cimento Portland encontrados no mercado, segundo sua classe de resistência e ponto-final (GARCIA, 2010). A classe de resistência representa o valor mínimo de resistência à compressão aos 28 dias de idade.

Tabela 2: Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland

Designação Normalização (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de Resistência	Sufixo
Cimento Portland Comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40 ^c	RS ^a ou BC ^b
	Com adição	CP I - S		
Cimento Portland composto	Com escoria granulada de alto forno	CP II - E		
	Com material carbonático	CP II - F		
	Com material Pozolânico	CP II - Z		
Cimento Portland de Alto-forno		CP III		
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI ^d	
Cimento Portland Branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40 ^c	
	Não Estrutural	CPB	-	-
^a O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo e cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.3, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.				
^b O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.4, além dos requisitos para seu tipo e classe originais				
^c As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215				
^d Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento				

Fonte: NBR 16697:2018 - Tabela 1 - designação normalizada, siglas e classe do cimento Portland.

3.5.2 Água na mistura do concreto

A água utilizada na mistura tem duas funções:

- (a) Reagir quimicamente com os álcalis do cimento dando origem às propriedades desejadas do concreto;
- (b) Fornecer trabalhabilidade e mistura.

A água destinada à mistura, ou, conforme o termo técnico, amassamento, do concreto deverá ser isenta de impurezas que possam prejudicar as suas relações com cimento. Normalmente as águas potáveis são satisfatórias para o uso e devem ser evitadas águas com materiais sólidos em suspensão ou finos, pois estes materiais em suspensão reduzem a aderência entre pasta e agregado. Pela mesma razão, é proibida a presença de algas na água da mistura. No caso da água não potável, além dos já mencionados materiais orgânicos e sólidos em suspensão, é necessário controlar também os teores de sulfatos (íons SO_4^{2-}) e cloretos (íons Cl^{1-}) (GARCIA, 2010).

Na prática, os maiores defeitos provenientes da água têm maior relação com seu excesso do que com, propriamente, os elementos que ela possa conter. A reação química do cimento com a água é fundamental para dar ao concreto as propriedades de resistência, durabilidade, trabalhabilidade e impermeabilidade, dentre outras (RIBEIRO, 2002). Pesquisadores afirmam que todas as propriedades do concreto melhoram com a redução de água aplicada, desde que a massa continue plástica e trabalhável. A razão entre o peso da água e o peso do cimento no concreto é chamada de “fator água-cimento”. Considerando-se apenas a água quimicamente necessária para a hidratação do cimento, seria suficiente o fator água-cimento da ordem de 0,28. Entretanto, a trabalhabilidade do concreto exige fatores água-cimento muito maiores, usualmente entre 0,45 e 0,65. Outra condição é que altas quantidades de água implicam em elevadas taxas de contração na secagem (ASSUNÇÃO, 2021). Deste modo, existe um sério compromisso entre a trabalhabilidade, a contração e a resistência mecânica do concreto em relação à porcentagem de água adicionada à mistura.

3.5.3 Agregados na mistura do concreto

Agregados são materiais geralmente inertes (areias e britas de diferentes tamanhos), que não possuem nenhuma reação presente com o cimento. Fazem parte dos ingredientes primários na fabricação do concreto e compreende entre 65% e 80% do volume total da mistura. A adição dos agregados, objetiva aumentar a resistência mecânica, reduzir os percentuais de retratação durante a secagem e, principalmente, reduzir custos.

As influências do agregado nas propriedades do concreto dependem da densidade e da resistência do agregado, devendo-se destacar que a resistência do concreto não depende diretamente da resistência do agregado, exceto quando este é muito frágil, de baixa resistência ou poroso. De modo geral, os agregados devem ser:

1. Estáveis nas condições de exposição do concreto;
2. Resistentes à compressão e ao desgaste;
3. Com granulometria distribuída de modo a reduzir o volume global de mistura;
4. Isentos de impurezas ou materiais com efeitos prejudiciais, mesmo em longo prazo.

Os agregados estão divididos em grãos e miúdos, de acordo com o tamanho das partículas, que é definido por abertura de malhas de peneiras. Denomina-se agregado grão aquele cuja granulometria seja maior que 4,8 mm e agregados miúdos, os que apresentam partículas menores que 4,8 mm e superior a 75 μm (CHAGAS, 2011).

Comercialmente os agregados possuem nomes que facilitam o reconhecimento do material, conforme suas dimensões, que é um dos principais critérios de escolha na hora de executar um traço de argamassa ou concreto.

Para agregado miúdo é comumente utilizado a areia média ou grossa. Estas areias geralmente são o produto de uma graduação das aberturas medianas, até as maiores aberturas, prevista pela ABNT NBR 7211:2009, para serem caracterizadas como agregado miúdo.

Os agregados grãos, que são geralmente provindos da exploração das rochas basáltica, são popularmente chamados de Brita 0, 1, 2 ou 3. Estas nomenclaturas com número, tem a intenção de informar qual a dimensão máxima dos grãos que compõe aquele agregado.

Segundo o fornecedor dos agregados, em atendimento às especificações da graduação de agregados pela norma ABNT NBR 7211:2009, a brita 0 possui dimensão máxima característica (DMC) de até 12,5 mm, as britas 1 e 2, possuem DMC de 25 mm e 38 mm, respectivamente. A variação de dimensões de 4,8 mm a 12,5 mm para brita 0, 9,5 mm a 25 mm para a brita 1 e 9,5mm a 38mm, para a brita 2, sendo essas faixas de granulometria as mais comuns utilizadas na construção civil.

A Figura 4 mostra alguns dos agregados comumente utilizados na produção de concreto.



Fonte: Miotto, 2010.

3.5.4 Aditivos na mistura do concreto

Aditivos são produtos químicos, usados na composição do concreto e/ou argamassa. Diferentes aditivos são usados para controlar as propriedades tecnológicas de misturas de concreto, bem como propriedades físicas e mecânicas de concreto endurecido (NAGROCKIENÉ, 2017). Frequentemente, em vez da utilização de um cimento, é possível alterar algumas das propriedades dos cimentos de uso mais comum pela incorporação de uma “adição”, um aditivo para cimento ou um aditivo para concreto. Em alguns casos, essa incorporação é a única maneira de se alcançar um determinado efeito (NEVILLE, 2013).

Os aditivos são utilizados na busca de melhorias das propriedades do concreto, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. Neste trabalho foi levantada a hipótese de uso de aditivo no objetivo da diminuição da água, bem como melhoria da trabalhabilidade da massa (ANDOLFATO, 2002).

Quanto mais água adicionada ao concreto, maior a facilidade de adensamento das peças. Isso ocorre porque a mistura mais plástica necessita menor esforço para ser compactada. Entretanto, a água prejudica a resistência do concreto quando é utilizada além da quantidade necessária para hidratação

do cimento. Nesse sentido, o aditivo facilita a obtenção desta melhor condição de adensamento, substituindo parte da água necessária para esta finalidade. Ele atua no concreto lubrificando suas partículas e proporcionando uma melhoria nas consistências e no grau de compactação de mistura, além de melhorar o acabamento das peças. O teor de adição de aditivos varia com a marca e recomenda-se de 0,2 a 2% da massa do cimento. Isso significa empregar de 80 a 160 ml de aditivo por saco de cimento de 40 kg, ou de 100 a 200 ml por saco de 50 kg (FERNANDES, 2016).

A classificação dos aditivos, para concretos e argamassas, segundo a ABNT NBR 11768-1:2019 são determinadas como: aceleradores (AP), retardadores (RP), plastificantes (P), superplastificantes (SP), plastificantes retardadores (PR), superplastificantes retardadores (APR) e incorporadores de ar (IA).

Dentre suas principais melhorias, os aceleradores (AP) aceleram o processo de pega do cimento, diminuindo o tempo de transição entre o estado fresco e endurecido do concreto. Ao contrário, os aditivos retardadores (R) trarão o efeito de retardamento da pega, aumentando o tempo de transição entre os estados.

Os aditivos plastificantes (P) e superplastificantes (SP), atuam diretamente na retenção de água na massa, pois melhoram a trabalhabilidade e podem modificar a viscosidade do concreto. Geralmente, são conhecidos como redutores de água, devido à possibilidade de alcançar elevados níveis de fluidez para a massa utilizando menos água.

Já os incorporadores de ar (IA) tem a função da redução da tensão superficial da água durante o amassamento do concreto. Este aditivo permite a incorporação de forma controlada de pequenas bolhas de ar, uniformemente distribuídas, que permanecem até mesmo no estado endurecido.

Esses são os aditivos mais conhecidos no ramo da tecnologia do concreto, porém, existem também o agrupamento de componentes de aditivos na busca da melhoria conjunta das propriedades do concreto, no caso dos (PR), (APR), entre outros. A norma aborda, também, a possibilidade da utilização de aditivos especiais, porém restrito a casos específicos.

3.5.5 Agregados Reciclados

Existem diversos estudos disponíveis sobre a utilização de resíduos da construção civil (RCC) ou resíduo de construção e demolição (RCD) na fabricação de concreto. Na maioria desses trabalhos, a conclusão é que o consumo de cimento aumenta em relação aos agregados convencionais, fator que, praticamente, inviabiliza a iniciativa em termos econômicos, restando como atrativo apenas a questão ambiental ou ecológica. Exceto nos casos em que o material reciclado provém de uma fonte de grande volume, demolição de um estádio de futebol ou viaduto, por exemplo, o material invariavelmente possui contaminação com argila, caco de tijolo, gesso, cal ou outras impurezas que diminuem sua qualidade e eficiência no concreto (ANGULO; 2011).

Outro fator a considerar é que, muitas vezes, o custo do beneficiamento somando ao consumo de cimento levemente superior, e ainda o desempenho menor do produto, menor resistência e variação da cor, podem diminuir a sua atratividade como opção comercial. O uso alternativo de RCD se justifica, como dito anteriormente, apenas sob o ponto de vista ecológico, no qual o entulho pode ser utilizado para fabricação de blocos da categoria vedação, para fins sociais como creches ou habitações populares de baixo custo. O custo do produto final usando RCD é praticamente igual ao de um bloco comum (se uso de RCD), uma vez que o baixo custo de agregados se dilui no maior consumo de cimento necessário (LEITE, 2001; MAIA, 2021).

Strieder et al. (2022) mostraram que foi possível utilizar agregados reciclados de concreto, em substituição parcial ou total aos agregados naturais, na composição do concreto permeável. Os resultados de testes de laboratório e de campo atestam que o concreto permeável com agregados reciclados atende aos requisitos de projeto das normas brasileiras e internacionais. Entretanto, os autores sugerem que investigações adicionais deveriam ser realizadas para obter o desempenho de campo a longo prazo desses pavimentos.

3.5.6 Contaminações

Contaminações provém, geralmente, dos agregados. Os contaminantes são corpos estranhos ao material, tais como folhas, raízes, torrões de argila, pedras maiores, dentre outros materiais. Em muitos casos, essas contaminações

colocam em risco o equipamento de mistura de massa ou prejudicam a aparência das peças devido à interferência na cor do produto. O ideal, quando se tem agregados passíveis de contaminações, é utilizar um sistema de peneiramento para retirada de corpos estranhos ao material, que possam vir prejudicar as propriedades do produto (ALGARVIO, 2009).

3.6 Legislação Municipal de Presidente Epitácio, SP

Segundo as descrições da lei municipal complementar Nº 192, de 27 de maio de 2021, dispõe sobre o plano integrado de gerenciamento dos resíduos da construção civil e resíduos volumosos e seus componentes. O programa municipal de gerenciamento e projetos de gerenciamento de resíduos da construção civil, conforme previstos na resolução CONAMA Nº 307/2002, e do plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos, regido pela lei municipal 2.589 de 10 de março de 2015, disciplina a ação dos geradores e transportadores de resíduos no âmbito do município, estância turística de Presidente Epitácio, SP.

A lei Nº 192 entrou em vigor em maio de 2021, mas não impôs, de forma eficaz, a destinação final correta (legalizada) dos RCD provenientes da reforma da ponte Hélio Serejo. A falta de eficiência e cumprimento desta lei, por parte da prefeitura de Presidente Epitácio, SP, foi pautada na ausência de soluções para o descarte adequado e processos de reciclagem de tais resíduos.

Diante do cenário apresentado, este trabalho mostra a possibilidade viável de desenvolver um material usando os RCD da ponte Hélio Serejo, que possa ser diretamente empregado em obras urbanas, como por exemplo, escolas, praças públicas e até mesmo na pavimentação total do município.

3.7 Descarte de RCD – Estudo de Viabilidade Econômica na Reciclagem do Resíduo

A cidade de Presidente Epitácio não possui um aterro de resíduos de construção e demolição, sendo assim, a cidade mais próxima para o descarte é Presidente Prudente a 86,4 Km de distância. Após a Lei Municipal Nº 8.986/2016, que institui o Sistema de Gestão Sustentável de Resíduos da Construção Civil e de Demolição, Resíduos Volumosos e Potencialmente

Contaminantes no município de Presidente Prudente, foi criado, por empresários do ramo de transporte de resíduos e da construção civil, a Cooperativa para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição – COOPEREN. A COOPEREN oferece uma solução ambientalmente correta, nos moldes que determina as legislações federal, estadual e municipal. A COOPEREN oferece serviços de destinação correta de resíduos de construção e demolição, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3: Custo do serviço de descarte da COOPEREN.

Categoria	Resíduo Classe A		Resíduo Classe B				Resíduos Classe C e D (R\$)
	Separado (R\$)	Misto (R\$)	Papel Papelo Plásticos Metais (R\$)	Madeiras (R\$)	Gesso (R\$)	Vidro (R\$)	
Caçamba	85,00	120,00	85,00	85,00	80,00	120,00	180,00
Caminhão Toco	106,00	150,00	106,00	106,00	225,00	150,00	210,00
Caminhão Truck	200,00	280,00	200,00	200,00	420,00	280,00	320,00
Caminhão bi Truck	250,00	350,00	250,00	250,00	525,00	350,00	420,00
Carreta	330,00	460,00	600,00	600,00	1.260,00	840,00	500,00
Caminhoneta Reboque	85,00	120,00	85,00	85,00	180,00	120,00	140,00

Fonte: COOPEREN, 2015.

De acordo com a Tabela 3, a distância da Cidade de Presidente Epitácio até a COOPEREN, é de aproximadamente 107 km. A melhor alternativa é licenciar-se como COOPEREN e relacionar seu caminhão na respectiva licença de operação ou utilizar uma transportadora já licenciada para realizar o transporte do resíduo da construção e demolição da ponte Hélio Serejo, que se encontra há cerca de 10 anos em terrenos públicos próximo a Orla Fluvial de Presidente Epitácio.

Há uma estimativa de mais de 3500 metros cúbicos de agregados reciclados de concreto armazenado no local e, nesse caso, a prefeitura do

município poderá considerar inviável o acondicionamento na COOPEREN, uma vez que esse descarte acarretará custos ao município.

Por outro lado, a prefeitura tem potencial para reutilizar, de acordo com a lei federal nº 12.305/2010, os agregados reciclados de concreto para fabricação de blocos intertravados (ou bloquetes) para utilizar em vias ainda não pavimentadas do município ou em praças públicas, conforme novos projetos em andamento que pretendem beneficiar a cidade. O resíduo também pode abrir um leque de opção em se tratando de peças de concreto pré-moldadas, sejam elas peças de elementos estruturais, postes, palanques de concreto, blocos para edificações, dentre outros produtos de utilidade.

Muitos estudos vêm sendo realizados no intuito de reciclar os resíduos da construção e demolição a partir de variadas aplicações. Em 2018, a prefeitura de Jacareí, SP, por meio da Usina de Reciclagem de Resíduos de Construção Civil da Secretaria de Meio Ambiente, conseguiu fabricar 398 mil bloquetes e foram utilizados em três praças públicas. A Figura 5 mostra um dos pavimentos preparados com estes bloquetes naquele município. No ano seguinte, o município fabricou aproximadamente 300 mil bloquetes, com material proveniente da Usina, que foram utilizados para pavimentação do Cemitério Jardim da Paz. A Usina recolheu dos materiais entregues nos pontos de coleta pela população, o equivalente a 8 mil toneladas de RCD, entre 2018 e 2019. O objetivo da usina é promover a redução, reutilização e disposição final ambientalmente adequada dos resíduos (JACAREÍ, 2019)

Figura 5: Pavimento de bloquetes produzidos com RCD no município de Jacareí, SP



Fonte: Jacareí, 2019.

4. METODOLOGIA

Antes de qualquer episódio ou fato a ser apresentado, se faz necessário a compreensão da pesquisa, como também a concepção do método.

No que diz respeito à pesquisa, Gil (2010, p. 01) afirma que “A pesquisa é desenvolvida mediante o concurso dos conhecimentos disponíveis e a utilização cuidadosa de métodos e técnicas de investigação científica”. Há várias razões que podem determinar a realização de uma pesquisa, todavia, são as razões de ordem prática e intelectual que comumente remetem ao desejo de desenvolver uma pesquisa. A pesquisa é, portanto, um conjunto de fatores (métodos e conhecimentos), que busca encontrar a resposta para o problema proposto.

Devido à infinidade de procedimentos técnicos e áreas aplicadas ao desenvolvimento de pesquisas, se faz necessário classificar o tipo de pesquisa desenvolvida neste trabalho. Aqui, a pesquisa caracteriza-se tanto pela natureza aplicada, como também experimental, cujas características serão esclarecidas nos parágrafos a seguir respectivamente.

Para Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa tem por objetivo gerar aprendizados voltados a solucionar um problema específico, por meio de verdades e interesses comuns. Na pesquisa em questão, a substituição total do agregado graúdo por agregado reciclado de concreto (ARC) para a produção de concreto, tem o intuito de viabilizar, por meio de estudo científico, a utilização do mesmo como uma alternativa aos materiais comumente empregados na construção civil.

Assim, na pesquisa experimental, conforme Prodanov e Freitas (2013, p. 57) “determina-se o objeto de estudo, escolhe-se as variáveis que irão alterar, e verifica-se a alteração foi capaz de modificá-lo, definindo formas de controlar a variação produzida”. Na pesquisa em questão, a análise ocorrerá em corpos de prova de concreto, possuindo como variável manipulada, o agregado graúdo (britas), sendo substituído pelo ARC, que é a variável dependente. Busca-se, portanto, verificar a influência da variável dependente pela manipulação do concreto, sendo realizados todos esses procedimentos em ambiente controlado (laboratório) com equipamentos precisos e técnicas adequadas.

Conforme Lakatos e Marconi (2010) a pesquisa desenvolvida neste trabalho, se confere em dois tipos de métodos empregados: método comparativo e método experimental.

O uso do método comparativo é justificado mediante o objeto principal do estudo (ARC), que é a variável que será alterada de modo a verificar sua influência no concreto produzido.

O uso do método experimental, faz-se necessário para analisar as características apresentadas pelo concreto produzido com ARC, podendo apresentar similaridade ou diferença com o traço padrão (piloto) adotado.

Com o entendimento das metodologias utilizadas, foi traçado o conjunto de etapas que ordenou o estudo em questão:

- Coleta e beneficiamento dos resíduos da demolição da ponte Hélio Serejo;
- Ensaio de granulometria (ABNT NBR NM 248:2003 e NBR 7211:2009);
- Ensaio de material pulverulento (ABNT NBR 16973:2021);
- Determinação da massa específica dos agregados (ABNT NBR NM 52 e 53);
- Determinação da massa unitária dos agregados (ABNT NBR NM 45:2006);
- Composição físico-química (fluorescência de raios X) do ARC;
- Ensaio para o concreto: resistência à compressão axial e absorção de água
- Adaptação do traço de concreto fornecido pela usina de concreto Jomane;
- Ensaio Slump test (ABNT NBR 16889:2020) e moldagem dos corpos de provas conforme ABNT NBR 5738:2015;
- Ensaio de resistência à compressão (ABNT NBR 5739:2018);
- Ensaio de absorção de água, massa específica e índice de vazios de acordo com a ABNT NBR 9778:2005; e
- Comparação dos resultados e análise da influência da incorporação do ARC ao traço.

Com o intuito de analisar a influência que o ARC causaria no traço para a produção de concreto, foram realizados os procedimentos e ensaios visando justificar o estudo proposto.

4.1 Delimitações

São delimitações do trabalho:

- 1 - Apenas o cimento CPPII-F-40 foi utilizado no trabalho.
- 2 - Foram utilizados três tipos de agregados reciclados de concretos, triturados apenas em uma recicladora de resíduos, distintos em 3 granulometrias, e classificado de acordo com a sua origem: Ponte Hélio Serejo (SP-270 – Final da Rodovia Raposo Tavares Divisa do Estado de São Paulo/Mato Grosso Do Sul).
- 3 - Foram avaliados dois traços:
 - a) Um traço piloto (Fornecido pela empresa Jomane).
 - b) Um traço com agregado reciclado de concreto (ARC). Neste traço foi variado apenas a substituição total da britas pelo ARC. Os outros itens se mantiveram em relação ao traço piloto. Os corpos de provas foram produzidos a partir dos traços fornecidos pela Usina de Concreto Jomane.

4.2. Materiais e métodos

4.2.1 Coleta e beneficiamento do Resíduo da Demolição da Ponte Hélio Serejo

Os agregados reciclados de concreto (ARC) para esta pesquisa provêm da demolição da ponte Hélio Serejo. Atualmente, como já mencionado, estes resíduos se encontram em terrenos públicos e aberto, que faz frente ao ponto turístico do município, a Orla Fluvial de Presidente Epitácio, como mostra a Figura 6.

Figura 6: Agregados reciclados de concreto dispostos publicamente



Fonte: O autor.

Para desenvolvimento deste trabalho, foi coletado um montante de, aproximadamente, 150 kg de RCD, o qual foi encaminhado para a Universidade Estadual Paulista de Presidente Prudente. O RCD foi beneficiado, utilizando uma recicladora (moinho de mandíbulas) de resíduos de construção civil, Modelo Queixada QI 300, móvel, com produção média (finos + Brita) de 2,2 m³/h, altura de descarga de finos de 400 mm, motor elétrico trifásico, blindado, 200/380V e 5,5/7,5 kW/vc, com consumo de energia de 5,5 kWh e peso 1477 kg, conforme mostra Figura 7. Este equipamento é pertencente ao Laboratório Modelos e Maquetes Tecnologias da Construção e CePETeS do departamento de Planejamento, Urbanismo e ambiente da FCT – Unesp.

Figura 7: Triturador Queixada QI 300 utilizado



Fonte: O autor.

As três granulometrias, obtidas após a tritura, foram chamadas de agregado reciclado de concreto (ARC) e são mostradas na Figura 8.

Figura 8: ARC após beneficiamento em triturador



Fonte: O autor.

Os agregados provenientes da tritura do resíduo, foram nomeados como ARC 3, ARC 2 e ARC 1, respectivamente, da esquerda para a direita, conforme demonstrado na Figura 8.

O resultado visual (geometria similar à brita) após esse processamento, é positivo, pois os ARCs possuem em sua maioria, grãos dos seixos que formavam o RCD das peças de concreto da ponte, e, a própria massa de concreto triturada. Foi possível a redução do agregado a tamanhos granulares, com geometria similar aos agregados graúdos comumente utilizados na construção civil.

Ainda visualmente, é possível correlacionar o ARC 3 (de grãos maiores) à brita 1, e o ARC 2 (de grãos medianos) à brita 0. Já para o ARC 1, é claro o

excesso de material fino, em conjunto com alguns pequenos detritos de concreto e seixo.

No intuito de substituir o agregado graúdo natural pelo ARC, foram determinados, por meio de ensaios laboratoriais, a melhor forma de utilizar esse material triturado, no concreto.

4.2.2 Cimento Portland

Para a produção dos corpos de prova de concretos, foi utilizado o cimento Portland Cauê CP II-F-40 (Inter cement Brasil), fornecido pela Usina de Concreto Jomane, Presidente Prudente - SP. Esse cimento foi escolhido por ser o cimento utilizado na formulação de concretos da Jomane, que também atua no ramo de pré-moldados. O cimento Portland CP II-F-40 tem as especificações mostradas na Tabela 4, de acordo com o fabricante.

Tabela 4: Especificações do cimento utilizado

CP II F – 40	
Clínquer + Gesso	75 – 89 %
Material Carbonático	11- 25%
Massa Específica Absoluta	$2,8 \leq \gamma_r \leq 3,2$ g/cm ³ a 20°C
Massa Específica Aparente	0,9 a 1,2 g/cm ³ a 20°C
pH em Solução Aquosa	$12 \leq \text{pH} \leq 14$
Solubilidade em Água	Até 1,5g/l a 20°C
Resistencia a compressão (MPa)	3dias: >15 7 dias: >25 28 dias: >40

Fonte: (Inter cement, 2021).

4.2.3 Água

A água utilizada foi fornecida pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) de Presidente Prudente e coletada diretamente do Laboratório de Tecnologia de Concreto, pertencente à Usina de Concreto Jomane.

4.2.4 Agregado miúdo

No estudo foi utilizada areia grossa, proveniente da extração do Rio Paraná, no município de Presidente Epitácio, comumente comercializada pela empresa Jomane na região e utilizada na produção e desenvolvimento de concretos desta empresa.

4.2.5 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a brita 0 e 1, com dimensões máximas características de 12,5 mm e 25 mm, respectivamente. As britas são provenientes da pedreira Conquista (Grupo Jomane) localizada no município de Narandiba - SP, comumente comercializada na região e utilizada, também, na produção dos concretos da empresa Jomane. Vale lembrar que, neste trabalho, apenas será utilizado agregado graúdo natural no concreto denominado “Traço Piloto”.

No segundo traço executado, fez-se a substituição total da brita 0 e brita 1, pelo ARC 2 e ARC 3, respectivamente. Este traço foi denominado como “Traço ARC”.

4.2.6 Aditivos

Para a produção dos corpos de provas de concreto, foi utilizado um aditivo superplastificante Adco Mindflow 400 (mid range), aditivo de linha de produção da Jomane, utilizado na produção de concretos da Usina Jomane. Ele possui pega normal para concreto, isento de cloretos, que promove a dispersão do material cimentício, possibilitando a produção de concretos com um maior índice de consistência e/ou a redução da água de amassamento, sem afetar significativamente o tempo de pega. O uso deste aditivo possibilita uma argamassa ou concreto mais coeso, aumentando a trabalhabilidade, reduzindo o fator água/cimento e proporcionando um considerável aumento da resistência mecânica.

O superplastificante é indicado para todos os tipos de concreto como: concreto para formas deslizante; bombeado; pré-moldado; de elevada

resistência à compressão inicial; concretos para estruturas densamente armadas; e concreto protendido.

O teor de aditivo recomendado pelo fabricante varia de 0,5 a 1,2% sobre a massa do cimento. A ficha técnica do aditivo utilizado nessa pesquisa está descrita na Tabela 5.

Tabela 5: Características técnicas do superplastificante utilizado

ENSAIO	ESPECIFICAÇÃO
Densidade	1,20 ± 0,02 g/cm ³
Dosagem	0,5 a 1,2 s/c %
Composição básica	Policarboxilato
Tipo	Superplastificante
Aspecto/Cor	Líquido/Castanho claro
pH	8

Fonte: Adco, 2018.

Giammusso (1992) e Bauer (2013) apontam em seus estudos que aditivos superplastificantes podem reduzir a água em 20% ou mais. Porém, deve-se ficar atento à quantidade utilizada, visto que, esse tipo de aditivo causa abertura das partículas de cimento e, quando usado erroneamente, pode causar segregação da massa, efeito indesejável que tende a separar os elementos do concreto, bem como trazer perda de homogeneidade à massa.

4.3 Caracterizações

4.3.1 Fluorescência de Raios X

A análise de Fluorescência de Raios X (FRX) foi realizada para determinar a composição química e as respectivas concentrações de óxidos presentes nos agregados reciclados de concreto, cimento, agregados graúdos e miúdos. O método utilizado foi de caráter qualitativo-quantitativo, realizado em vácuo. O vácuo é utilizado nas análises com o intuito de obter precisão entre os elementos químicos e evitar o desprendimento dos elementos mais leves. Na análise, utiliza-se uma fonte de radiação primária, catodo de Ródio (Rh) em colimador de 5mm de diâmetro. As amostras foram inseridas em um porta amostra poliéster

biaxalmente orientado de poli (tereftalato de etileno) (boPET, Mylar®) com área analisada de, aproximadamente, 80 mm². Para a FRX, foi utilizado um equipamento Shimadzu, modelo XRF-7000 (Figura 9) com capacidade de varredura de Sódio (Na) a Escândio (Sc) e de Alumínio (Al) a Urânio (U), pertencente ao Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos (LCGRS) da FCT/UNESP.

Figura 9: Equipamento de FRX Shimadzu (XRF-7000)



Fonte: O autor.

4.3.2 Difração de Raios X

A análise por Difração de Raios X (DRX) foi utilizada para determinar o perfil mineralógico e fases cristalográficas dos agregados reciclados de concreto e cimento.

As amostras ARC1, ARC2 e ARC3 foram pulverizadas em um moinho de discos com agitação orbital da marca Marconi, modelo MA 360 (Figura 10 (a)) por um período de, aproximadamente, 20 minutos. O material pulverizado foi submetido à análise de DRX, utilizando um difratômetro da marca Shimadzu, modelo DRX-6000 (Figura 10 (b)) e fonte de radiação Cu-K α , $\lambda \sim 1,54 \text{ \AA}$ (radiação característica) em uma varredura angular de 10° até 90° (2 θ), pertencente ao Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos (LCGRS) da FCT/UNESP.

Figura 10: Equipamentos utilizados: (a) Pulverizador Marconi; (b) Difratorômetro de Raios X



Fonte: O autor.

4.3.3 Análise Granulométrica

A análise granulométrica é o ensaio mais utilizado na caracterização de um material granular. O objetivo da análise é determinar a característica física dos agregados miúdos e graúdos, baseando-se na distribuição granulométrica, ou seja, no percentual da massa retida em cada peneira com relação a massa seca total.

A ABNT NBR NM 248:2003 foi utilizada nesse trabalho para a realização da análise granulométrica dos agregados reciclados de concreto, areia natural e agregados graúdos natural. Para a areia natural, realizou-se a análise visual do seu enquadramento dentro de uma faixa granulométrica recomendada (zona ótima e utilizável) de acordo com as especificações da ABNT NBR 7211:2009.

Para os agregados reciclados de concreto, areia natural e agregados graúdos e miúdos foram utilizadas uma amostra de 1 kg. Como preconizado na norma, foi utilizado o conjunto de peneiras com tela de tecido metálico com as aberturas mostradas na Tabela 6, para os ARC1 e areia natural.

Tabela 6: Conjunto de peneiras utilizadas para determinação da granulometria das amostras ARC 1 e areia natural

(continua)

Conjunto de Peneiras – Série Fina	
Peneiras	Abertura (mm)
4	4,75
8	2,36

Tabela 6: Conjunto de peneiras utilizadas para determinação da granulometria das amostras ARC 1 e areia natural

(conclusão)

16	1,18
30	0,59
50	0,29
100	0,149
200	0,0074
Fundo	0

Fonte: O autor.

Para o peneiramento do agregado graúdo, foram adicionadas ao conjunto as peneiras com tela de tecido metálico com as aberturas especificadas na Tabela 7.

Tabela 7: Conjunto de peneiras utilizadas para determinação da granulometria do agregado graúdo e pedrisco

Conjunto de Peneiras – Série Grossa	
Peneiras	Abertura (mm)
1	25,0
$\frac{3}{4}$	19,0
$\frac{1}{2}$	12,5
$\frac{3}{8}$	9,50
4	4,75
8	2,36
16	1,18
Fundo	0

Fonte: O autor.

O tempo de agitação mecânica para determinação da granulometria dos materiais supracitados foi de 10 minutos, frequência 10 e em seguida foi realizada a pesagem da amostra retida em cada peneira.

4.3.4 Material Pulverulento

De acordo com a ABNT NBR 16973:2021 - *Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 μ m por lavagem*, material pulverulento

é definido como sendo material mais fino que a abertura da malha da peneira de 0,075 mm presente nos agregados grãos e miúdos. O excesso deste material na pasta de cimento aumenta o consumo de água devido à alta superfície específica, acarretando retração e diminuição da resistência de concretos.

Foram separados 500g de material dos agregados reciclados de concreto, agregados grãos (brita 0 e 1) e areia natural, secas previamente em estufa a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ e deixadas à temperatura ambiente. Com as amostras retidas em um recipiente adequado, para não haver perda de material, foi adicionado água até cobrir as amostras (Figura 11), sendo esta, vigorosamente agitada para que o material pulverulento ficasse em suspensão. Após este procedimento cada amostra foi vertida em duas peneiras de 1,2 mm e 0,075 mm respectivamente, para que o material pulverulento fosse eliminado e o material retido na segunda peneira retornasse ao recipiente. A operação foi feita até que a água de lavagem ficasse clara, tomando o devido cuidado para que nenhum material fosse perdido no procedimento.

Figura 11: Procedimento para retirada do material pulverulento



Fonte: O autor.

O ARC e agregado miúdo lavado foi seco em estufa e posteriormente pesado. Foram feitas duas determinações para cada amostra, calculando-se o teor de material pulverulento do agregado miúdo conforme a equação (1).

$$m = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1} \right) \times 100 \quad (1)$$

Na equação (1), m corresponde ao teor de material pulverulento (%); m_1 , à massa da amostra antes da lavagem (g) e m_2 , à massa da amostra seca em estufa após lavagem (g).

4.3.5 Massa Específica – Agregado miúdo

A massa específica de agregados miúdos foi realizada conforme o procedimento normatizado pela NBR NM 52:2021 para ARC1 e areia natural.

Inicialmente, pesou-se $500,0 \pm 0,1\text{g}$ de amostra (m_s), colocando-a no frasco e registrando a massa do conjunto (m_1). Encheu-se o frasco com água até próxima da marca de 500 ml, movendo-o de forma a eliminar as bolhas de ar e depois colocando-o em um banho mantido a temperatura constante de $21 \pm 2^\circ\text{C}$. Após 1 h, aproximadamente, completou-se o frasco com água até a marca de 500 ml e determinou-se a massa total com precisão de 0,1 g (m_2). Retirou-se o agregado miúdo do frasco e secou-o em estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até massa constante ($\pm 0,1\text{ g}$). Após resfriar em dessecador, as amostras foram pesadas em balança com precisão de 0,1 g (m).

A equação (2) foi utilizada para determinação da massa específica do agregado seco.

$$d_1 = \left(\frac{m}{V - V_a} \right) \quad (2)$$

Na equação 2, d_1 representa a massa específica aparente do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico; m , é a massa da amostra seca em estufa, em gramas; V , é o volume do frasco, em centímetros cúbicos e V_a , é o volume de água adicionada ao frasco, em centímetros cúbicos.

O volume de água adicionado (V_a), pode ser determinado de acordo com equação 3, em que m_1 corresponde à massa do conjunto (frasco + agregado), em gramas; m_2 , à massa total (frasco + agregado + água) em gramas; ρ_a , à massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico.

$$V_a = \left(\frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \right) \quad (3)$$

A massa específica do agregado saturado superfície seca é determinado pela equação 4, em que d_2 é a massa específica do agregado saturado superfície seca, em gramas por centímetro cúbico; m_s é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas; V é o volume do frasco, em centímetros cúbicos e V_a é o volume de água adicionada ao frasco, em centímetros cúbicos.

$$d_2 = \left(\frac{m_s}{V - V_a} \right) \quad (4)$$

Por fim, a massa específica é determinada pela equação 5, em que d_3 indica a massa específica do agregado, em gramas por centímetros cúbicos; m , a massa da amostra seca em estufa, em gramas; V , o volume de água adicionado ao frasco, em centímetros cúbicos; m_s , a massa da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas; ρ_a , a massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico.

$$d_3 = \left(\frac{m}{V - V_a - \frac{(m_s - m)}{\rho_a}} \right) \quad (5)$$

4.3.6 Massa Específica – Agregado graúdo

O ensaio para a determinação da massa específica aparente do agregado graúdo segue as orientações da NBR NM 53/2009. A realização do ensaio necessita de alguns instrumentos como, balança de precisão, recipiente e tanque de água para os agregados graúdos. Os ensaios foram realizados para o ARC 2 e ARC 3.

O primeiro passo (Etapa 1) consiste em deixar a amostra do agregado imersa em um recipiente contendo água, por um período de 24 ± 4 horas. Esse tempo é necessário para que a água preencha todos os poros e os agregados fiquem em estado de saturação. Na próxima etapa (Etapa 2), o material saturado é enxugado com um pano absorvente para retirar o excesso de água contido nas superfícies dos agregados. Em seguida, a amostra estará na situação superfície saturada seca, a massa é aferida na balança de precisão, e então mede-se a massa imersa na água (Etapa 3). Finalmente, a amostra é colocada em estufa

para secagem na temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, por um período de 24 horas contínuas.

A Figura 12 mostra as etapas envolvidas neste processo de determinação da massa específica aparente das amostras.

Figura 12: Etapas envolvidas na determinação da massa específica aparente das amostras de agregado graúdo



Fonte: O autor.

A massa específica do agregado seco foi determinada mediante a equação 6.

$$d = \left(\frac{m}{m - m_a} \right) \quad (6)$$

Na equação 6, d , corresponde à massa específica do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico; m , à massa ao ar da amostra seca, em gramas; m_a , à massa em água da amostra, em gramas. A diferença ($m_s - m_a$) é numericamente igual ao volume do agregado, incluindo-se os vazios permeáveis.

A massa específica do agregado na condição saturado superfície seca foi determinada pela equação 7.

$$d_s = \left(\frac{m_s}{m_s - m_a} \right) \quad (7)$$

Nesta equação, d_s representa a massa específica do agregado na condição saturado superfície seca, em gramas por centímetro cúbico; m_s , a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas; m_a , à massa em água da amostra, em gramas.

A massa específica aparente foi determinada pela equação 8, em que da representa a massa específica aparente do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico; m , a massa ao ar da amostra seca, em gramas; ms , a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas; ma , a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas. Aqui, novamente, a diferença ($ms - ma$) é numericamente igual ao volume do agregado, excluindo-se os vazios permeáveis.

$$da = \left(\frac{m}{ms - ma} \right) \quad (8)$$

A absorção de água foi determinada pela equação 9, em que A representa a absorção de água, em porcentagem; ms , a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas; m , a massa ao ar da amostra seca, em gramas.

$$A = \left(\frac{ms - m}{m} \right) \times 100 \quad (9)$$

4.3.7 Ensaio de massa unitária compactada dos agregados graúdos

Segundo a norma ABNT - Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios (ABNT NBR NM 45:2006), a massa unitária é a relação entre a massa do agregado e o volume do recipiente que o contém. A realização do ensaio necessita de alguns instrumentos como, balança de precisão, haste para a realização do adensamento do material, recipiente cúbico resistente, concha metálica e estufa. Neste ensaio, foram analisados os agregados ARC 2 e ARC 3, mediante o Método C da NBR 45:2006.

Inicialmente, deve-se efetuar a medição da massa do recipiente cilíndrico vazio, em seguida, preenche-se 1/3 do volume com o agregado e realiza-se o adensamento com uma haste metálica, com 25 golpes em cada camada preenchida, conforme descreve a norma. A segunda camada terá 2/3 do volume, sendo realizado o mesmo processo de adensamento da primeira camada. Logo após, preenche-se o recipiente com a última camada do material agregado e realiza o mesmo procedimento de adensamento da última camada. Conforme recomendação da norma, os adensamentos realizados com a haste

metálica não devem ultrapassar as camadas anteriores e na primeira camada adensada, não deve tocar o fundo do recipiente. Após o processo, nivela-se o material com o topo da borda do recipiente. A Figura 13 mostra a realização do ensaio.

Figura 13: Processo de adensamento para determinação da massa unitária do agregado graúdo



Fonte: O autor.

A partir desse processo, determina-se, então, a massa total do conjunto, por meio da equação 10.

$$\rho_{ap} = \frac{M_a - M_r}{V} \quad (10)$$

Na equação 10, ρ_{ap} corresponde à massa unitária do agregado graúdo (kg/m^3), M_a , à massa do recipiente contendo o agregado (kg/m^3), M_r , à massa do recipiente (kg/m^3) e V , ao volume do recipiente (m^3).

4.3.8 Ensaio de Massa Unitária da mistura de agregados reciclados para dosagem do concreto

Considerando o método do menor volume de vazios tomando como base a massa unitária do agregado, foram ensaiadas diferentes proporções de massas de misturas de ARC 3 (90 a 60%) e ARC 2 (10 a 40%), os quais foram compactados em um recipiente de volume conhecido. A Figura 14 ilustra o procedimento adotado durante o ensaio, a fim de determinar grau de variação de massa dos agregados que cabem no recipiente. A proporção ideal é definida no instante em que a quantidade do agregado ARC2 é suficiente para preencher os vazios existentes entre os grãos do agregado ARC3, observada pela maior massa obtida da relação dos agregados.

Figura 14: Ensaio de Massa Unitária ARC2 e ARC3



Fonte: O autor.

Tabela 8: Proporções para determinação da massa unitária

Proporção	
ARC 2 (%)	ARC 3 (%)
10	90
20	80
30	70
40	60

Fonte: O autor.

Considerando o pressuposto de que quanto menor o volume de vazios entre os agregados graúdos, maior o grau de empacotamento de grãos, foi elaborado a massa unitária do agregado graúdo com porções de mistura. Como mostra a Tabela 8, iniciou-se com 90% do ARC 3 de maior diâmetro e 10% do ARC2 de diâmetro intermediário, a fim de determinar o grau de variação de massa dos agregados que cabem no recipiente. A proporção ideal para o traço foi definida assim que a quantidade de agregado graúdo de menor diâmetro pudesse preencher os vazios do agregado de maior diâmetro, constando uma massa maior entre as misturas.

4.3.9 Dosagem do Concreto

De acordo com a ABNT NBR 12655:2022, a composição de cada concreto a ser utilizada deve ser definida “em dosagem racional e experimental” com antecedência, tendo em vista as prescrições e exigências do projeto e as condições de execução. Dentro das informações necessárias, tais como, relação água/cimento (a/c), volume de água por m^3 , teor de argamassa e as massas específicas.

O traço foi cedido (ANEXO I) pela Jomane Concretagem e Serviços (usina de concreto e fabricante de artefatos de concreto) para fins experimentais, e foi definido a partir do método de dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) com adaptação do método proposto pela American Concrete Institute (ACI). Este é um dos métodos mais utilizados no Brasil, que leva em consideração as propriedades físicas e mecânicas do cimento e dos agregados utilizados, bem como a adoção das faixas de trabalhabilidade e de desvio padrão na obtenção da resistência alvo.

Conforme informado pela equipe técnica da Jomane, os traços da empresa são desenvolvidos com base nas características dos agregados que eles possuem e comercializam na região, e passam por supervisão geral periodicamente. Dito isso, como já explanado, os agregados naturais utilizados neste trabalho também foram fornecidos pela empresa Jomane, contribuindo positivamente à utilização do traço neste trabalho.

As orientações contidas na carta traço (ANEXO I) são baseadas na produção de $1 m^3$ de concreto e estabeleceu as premissas nela escrita, que são, fornecer um concreto com $F_{ck} = 35 \text{ MPa}$, alto teor de argamassa, baixo ar

incorporado e consistência (slump test) dentro da classe S100 (100 a 160 mm), conforme ABNT NBR 8953:2015.

A quantidade dos componentes do traço pode ser visualizada na Tabela 9, nomeado como traço piloto na elaboração do concreto.

Tabela 9: Composição para o traço piloto

Validação de Traço Quantitativo					
Material	M.C.C (kg/m³)	Massa Específica absoluta	Relação entre os Agregados		
			Agregado Miúdo		
			Areia G 100%		
Cimento	408	3,05			
Adição	-	-	Agregado Graúdo		
Areia G	867	2,64	Brita 0 30%	Brita 1 70%	
Areia M	-	-			
Areia F	-	-	Teor de Argamassa (Vol.):		58,57%
Brita 0	285	2,90	Volume Teórico:		989,8
Brita 1	665	2,90	Ar Previsto:		1,02%
Brita 2	-	-	Relação a/c		0,490
Água	200	1,00	Aditivo Superplastificante		0,5%

Fonte: O autor

O traço descrito será o piloto na confecção dos corpos de provas de concreto e seus resultados servirão como parâmetro de conferência no traço em que for inserido o ARC.

Na adaptação do traço piloto, algumas premissas foram consideradas visando elaborar um traço em que, para fins de comparações, possuísse dosagem similar. Por exemplo, considerar um fator água-cimento (a/c) em que não necessite alteração no decorrer do processo da confecção do concreto, bem como uma quantidade de ar incorporado e de teor de argamassa, que são utilizados corriqueiramente por usinas de concreto e fábricas de artefatos de concreto.

Sendo assim, prevendo todas as necessidades, o objetivo foi obter uma massa de concreto de fácil dosagem e que o traço com o ARC pudesse ser replicado. Esta estratégia visa atender a iniciativa privada que tenha a intensão de substituir seu agregado graúdo natural pelo reciclado, ou a própria prefeitura, caso comprovado a viabilidade do uso deste agregado reciclado.

O traço foi adaptado também em conjunto com o corpo técnico do Laboratório de Tecnologia de Concreto da usina de concreto Jomane. Levando-se em consideração todas as situações objetivadas deste trabalho e as

necessidades supracitadas, foi estabelecida a composição para o traço descrita na Tabela 10.

Tabela 10: Composição para o traço com ARC

Validação de Traço Quantitativo					
Material	M.C.C (kg/m³)	Massa Específica absoluta	Relação entre os Agregados		
			Agregado Miúdo		
			Areia G 100%		
Cimento	408	3,05			
Adição	-	-	Agregado Graúdo		
Areia G	865	2,64	ARC 2 30%	ARC 3 70%	
Areia M	0	-			
Areia F	0	-	Teor de Argamassa (Vol.):		58,52%
ARC 2	255	2,59	Volume Teórico:		987,8
ARC 3	595	2,61	Ar Previsto:		1,22%
Brita 2	-	-	Relação a/c		0,490
Água	200	1,00	Aditivo Superplastificante		0,5%

Fonte: O autor

No traço piloto cedido, foi observado a utilização de dois tipos de granulometrias (de brita) em sua composição, técnica muito utilizada para obtenção de faixa granulométricas homogêneas, que podem conferir aumento de resistência mecânica sem aumento demasiado nos custos do concreto.

A junção dos agregados proposta pela carta é de 70% da brita 1 e 30% da brita 0, conforme descrito na Tabela 10. Essa junção é fundamentada também na utilização dos ARCs, conforme descrito no tópico 4.2.8 (Ensaio de Massa Unitária da mistura de agregados reciclados para dosagem do concreto), onde o teor que mais conferiu grau de empacotamento dos grãos graúdos foram o de 70/30 (70% de ARC 3 e 30% de ARC 2).

Então, na adaptação do traço, também foram consideradas a junção de 70/30, visando melhor encaixe entre os agregados do concreto com ARC.

Conforme explanado, o traço foi finalizado com êxito, mantendo a relação a/c fixa, porém com diferenças mínimas entre as características de teor de argamassa e quantidade de ar incorporado previsto. Essa sutil diferença é justificada pela diferença entre as massas específicas do agregado natural (brita) e do ARC. Pode-se afirmar que, se fosse optado por manter a quantidade do agregado graúdo para o ARC, que possui massa específica menor do que o agregado natural, o método de dosagem adotado na elaboração do mesmo, seria descaracterizado.

Os valores de massa específica do cimento foram fornecidos pelo fabricante. Para os valores considerados de massa específica do ARC e dos agregados naturais foram considerados os resultados obtidos nos ensaios realizados neste trabalho.

Para o ar incorporado é considerado a porcentagem da diferença entre o volume tomado como base no método (1m^3) e o volume teórico (volume somado de cada insumo com base em suas respectivas massas específicas).

Foram produzidos para cada traço de concreto, 15 corpos de prova cilíndricos de dimensões de 10 centímetros de diâmetro por 20 centímetros de altura, conforme as orientações da ABNT NBR 5738:2015. Estes corpos de prova foram utilizados para os ensaios de resistência à compressão (7 e 28 dias), absorção de água e massa específica, a fim de comparar os resultados do concreto endurecido com agregado natural e com agregado reciclado.

4.3.10 O Processo de Cura

Após as 24 horas, os corpos de prova cilíndricos foram devidamente desmoldados e identificados. Imediatamente após sua identificação, foram submersos em água saturada com cal, onde permaneceram até os 7 dias para os primeiros rompimentos e 28 dias para completar o processo de cura e os demais ensaios, como estabelecido pela ABNT NBR 5738:2015.

4.3.11 Ensaios

Os ensaios realizados foram divididos em duas partes: ensaio para a verificação da propriedade dos concretos no estado fresco e ensaios para a verificação das propriedades do concreto no estado endurecido.

Os ensaios do concreto traço piloto e traço com ARC, no estado fresco, foram realizados no Laboratório de Tecnologia do Concreto da Jomane – Usina de Concreto, localizado na cidade de Presidente Prudente, SP. Este ensaio do concreto no estado fresco consistiu em analisar visualmente suas características, a fim de verificar segregações da massa. Também, foi realizado ensaio de consistência pelo abatimento do tronco cone (slump test) de acordo com a ABNT NBR 16889:2020.

Os ensaios no concreto no estado endurecido foram realizados nos corpos de prova após o processo de cura submersa aos 7 e 28 dias. Os corpos de provas cilíndricos foram capeados com neopreme. Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial conforme a ABNT NBR 5739:2018 e de massa específica, absorção de água e índice de vazios conforme a ABNT NBR 9778:2005.

4.3.11.1 Resistência à Compressão Axial

Os corpos de prova cilíndricos foram rompidos usando uma prensa hidráulica Solotest 100t (4294) pertencente ao Laboratório de Tecnologia da Jomane. A resistência à compressão axial foi avaliada nas idades de 7 e 28 dias, de acordo com a ABNT NBR 5739:2007.

Os resultados obtidos com os rompimentos dos corpos de provas na prensa hidráulica, são dados em tonelada força (tf), por isso, fez-se necessário a realização do cálculo de pressão (em MPa), no qual a força é transformada em Newtons (N) e dividida pela área em que está sendo aplicada (secção do corpo de prova cilíndrico, em mm²), conforme a equação 11. Nesta equação, F_c é a resistência à compressão axial (em MPa), F é a força (em Kgf), g é a aceleração da gravidade local (em m/s²) e A , é a área (em mm²).

$$F_c = \frac{F \cdot g}{A} \quad (11)$$

4.3.11.2 Absorção de água por Imersão

A absorção de água por imersão está relacionada à porosidade da peça e à consequente capacidade do bloco de reter líquido no seu interior. Os ensaios de absorção de água por imersão, massa específica (seca e saturada) e índice de vazios para os corpos de prova cilíndricos, seguiram as prescrições normativas da NBR 9778:2005, após os 28 dias de idade.

Foram utilizados para o ensaio, 5 corpos de prova cilíndricos e, antes do ensaio, foi retirada a cal que estava aderido à superfície. Os corpos de prova ficaram em uma câmara úmida por 24 horas. Após este período, os CPs foram mantidos em estufa à $105 \pm 5^\circ\text{C}$, por 72 horas para a secagem. Depois de secos,

os CPs foram pesados na balança com precisão de 0,01g e imersos em água (Figura 15) em temperatura ambiente logo após a pesagem. Após 72 horas de imersão e mantidos nesta condição por 5 horas, os CPs foram pesados na balança hidrostática com precisão de 0,1g.

Figura 15: Ensaio de absorção de água



Fonte: O autor.

A absorção de água por imersão de cada corpo de prova (A_i), em porcentagem, foi determinada pela equação 12.

$$A_i = \left(\frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \right) \times 100 \quad (12)$$

Na equação 12, m_{sat} representa a massa da amostra saturada após imersão (g) e m_s , a massa da amostra seca (g).

O índice de vazios (I_v) de cada amostra, em porcentagem, foi calculado pela equação 13, em que m_i corresponde à massa da amostra saturada imersa (em balança hidrostática).

$$I_v = \left(\frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \right) \times 100 \quad (13)$$

A massa específica de cada amostra seca (ρ_s) foi calculada pela equação 14 e a massa específica da amostra saturada (ρ_{sat}), pela equação 15.

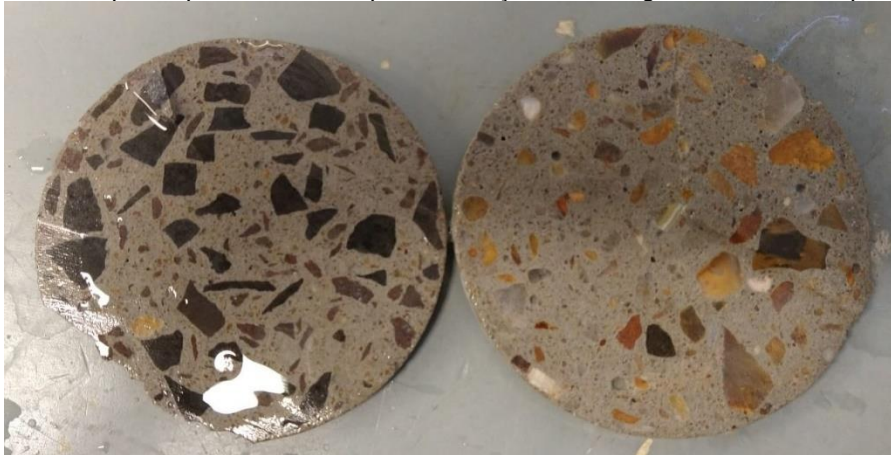
$$\rho_s = \left(\frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \right) \quad (14)$$

$$\rho_{sat} = \left(\frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \right) \quad (15)$$

4.3.12 Microscopia Óptica

No laboratório de Detecção de Traços Nucleares (DETRAN), da FCT/Unesp, foram realizadas imagens de microscopia óptica corpos de prova cilíndricos após o processo de cura aos 28 dias. Foi utilizado um microscópio da marca Zeiss Stereo Discovery, V12, acoplado a uma câmera digitalizadora (ExwareHAD, Sony, modelo SSCDC54A). As imagens foram obtidas com um aumento de 8x. A Figura 16 mostra a região cortada do corpo de prova observado nas imagens de microscopia óptica.

Figura 16: Corpo de prova cortados para obtenção das imagens de microscopia óptica



Fonte: O autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterizações químicas e físicas do ARC

Nesta etapa do trabalho, as três frações do agregado reciclado de concreto (ARC1, ARC2 e ARC3) foram analisadas de maneira isolada, no intuito de identificar e quantificar características de cada fração. O cimento, o agregado miúdo (areia natural) e agregados graúdos (Brita 0 e 1) também foram caracterizados. As análises realizadas nessa sessão são de caráter químico e físico, cujos resultados auxiliam nas discussões das próximas etapas do trabalho.

5.1.1 Fluorescência de Raios X

Na Tabela 11 são apresentados os valores percentuais (em massa) dos óxidos que constituem a composição química das três frações do agregado reciclado de concreto (ARC1, ARC2 e ARC3), cimento, agregado miúdo e agregados graúdos, obtidas por FRX.

Tabela 11: Composição química (% massa) em óxidos das frações do RD determinando por análise de FRX

(continua)

ÓXIDOS (%)	ARC 1	ARC 2	ARC 3	Cimento CII-F-40	Areia Natural	Brita 0	Brita 1
SiO ₂	68,086	74,114	72,441	14,812	93,396	50,407	52,987
CaO	25,961	19,186	23,325	67,840	0,283	11,057	10,534
Fe ₂ O ₃	1,702	2,343	0,766	3,373	0,977	14,696	12,785
Al ₂ O ₃	-	-	-	2,841	3,062	15,130	15,694
TiO ₂	0,363	0,095	0,126	0,242	-	2,433	1,675
SO ₃	0,840	0,826	0,659	5,328	0,940	0,576	1,037
MgO	-	-	-	3,593	-	-	-
K ₂ O	0,303	0,366	0,365	1,420	-	0,731	1,213
MnO	0,049	0,028	0,025	0,060	0,025	0,226	1,197
ZrO ₂	-	0,006	0,003	-	0,009	0,033	0,027
Cr ₂ O ₃	0,013	0,011	0,019	0,019	0,058	0,016	0,017
CuO	0,017	0,016	0,017	0,020	0,015	0,041	0,047
Ir ₂ O ₃	-	0,016	-	-	-	-	-
ZnO	0,007	0,016	-	0,011	-	0,018	-
V ₂ O ₅	-	-	0,005	0,023	0,417	-	-
SrO	0,019	0,015	0,007	0,362	0,004	0,122	0,044
Y ₂ O ₃	-	0,005	-	-	-	-	-
NiO	0,006	-	-	-	-	-	-
Ag ₂ O	-	0,018	-	-	-	-	-
P ₂ O ₅	-	-	-	-	-	-	0,269
PdO	0,032	-	-	-	-	-	-
NiO	0,006	-	-	-	-	-	-

Tabela 11: Composição química (% massa) em óxidos das frações do RD determinando por análise de FRX

(conclusão)							
Ag ₂ O	-	0,018	-	-	0,012	-	-
Rb ₂ O				0,007	0,043	-	-
GeO ₂				-	0,005	-	-

Fonte: O autor

O óxido de silício (SiO₂) é o principal constituinte das três frações do agregado reciclado de concreto. A partir dos estudos Ulsen et.al. (2010), a origem do óxido de silício está associada, principalmente, aos agregados naturais do concreto e, também, presentes nos agregados reciclados de concreto (ARC). Os agregados naturais utilizados na construção da ponte Hélio Serejo, no ano de 1964, foram seixos de rio, possivelmente retiradas das águas do Rio Paraná (rio onde a ponte sobrepõe). O óxido de potássio (K₂O) presente nos agregados reciclados possuem potencial reativo e menor concentração em relação as britas 0 e 1, que podem atrapalhar na resistência do concreto (reação álcali-agregado).

É possível observar visivelmente os seixos de rio nos agregados graúdos ARC2 e ARC3, como mostra a Figura 17. No agregado ARC1 também é possível observar a presença dos seixos, porém com menor quantidade e de forma não homogênea. Esta característica pode ser decorrente do processo de britagem, em que a maior parte dos seixos ficam nas peneiras de maior abertura (peneiras que compõe o ARC2 e ARC3). Isso pode ter ocorrido porque os agregados graúdos (seixo de rio) presentes, são mais resistentes que a massa de concreto, sendo assim, mais difícil o tritramento do seixo em grãos menores.

Figura 17: Presença de seixos nos agregados de ARC 3



Fonte: O autor.

O óxido de cálcio (CaO) é o segundo elemento representativo na composição química das três frações. O CaO está associado ao aglomerante, responsáveis pelas principais características do cimento Portland.

Na amostra de cimento CP II-F-40, o óxido de cálcio é o elemento predominante, com 67,840%. Em seguida tem-se o óxido de silício com 14,812%, óxido de ferro com 3,373% e óxido de alumínio com 2,841%. Em concordância com a literatura, os constituintes químicos principais do clínquer são os óxidos de cálcio, silício, alumínio e ferro (TANG, 2022; SUN, 2021).

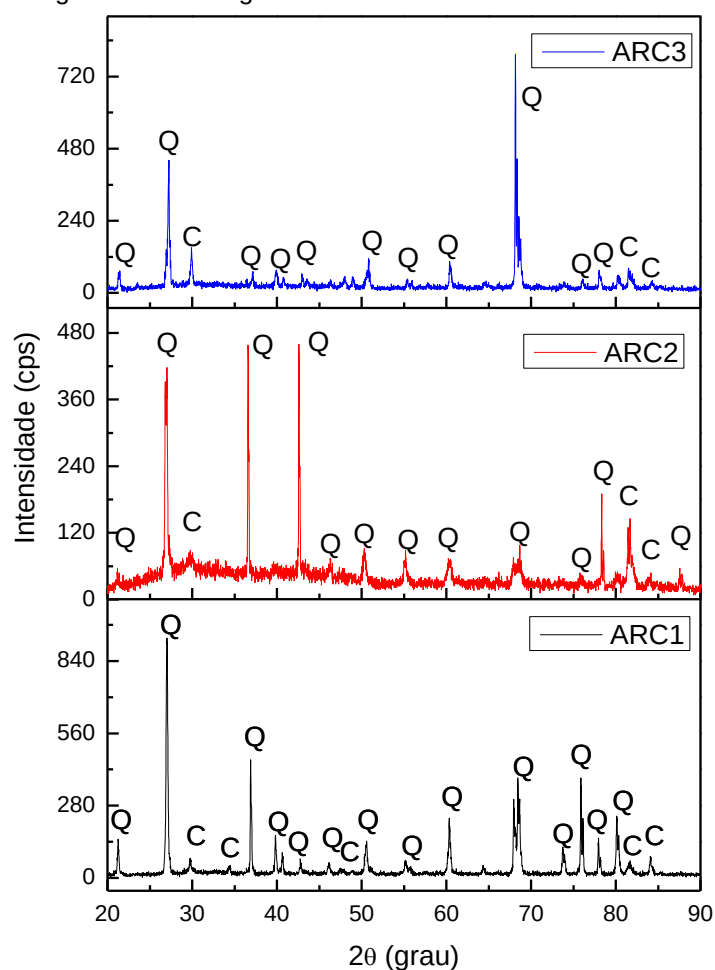
Verifica-se que a composição química da areia natural é composta basicamente por sílica (SiO₂) e óxido de alumínio (Al₂O₃), apresentando traços de outros óxidos.

Os agregados graúdos naturais, brita 0 e 1, não apresentam diferenças expressivas em relação às suas composições químicas. As britas 0 e 1 apresentaram 50,407% e 52,987% de óxido de silício, respectivamente. Como as rochas são compostas essencialmente de silicatos, estas são classificadas de acordo com a sua composição química, em teores de sílica (SiO₂). As britas apresentadas nesse trabalho são caracterizadas como rochas básicas, por apresentarem o SiO₂ entre 45 e 52%. Rochas ácidas possuem teores de sílicas maiores que 65% (WICANDER e MONROE, 2009). Os CaO, Fe₂O₃ e Al₂O₃ são os demais óxidos mais representativos nos resultados da análise de FRX para as amostras de britas.

5.1.2 Difração de Raios X

A Figura 18 mostra o difratograma de Raios X das três frações do agregado reciclado de concreto (ARC1, ARC2 e ARC3). Foram identificadas as fases Quartzo, correspondente ao óxido de silício (SiO₂), identificado no difratograma por Q (JCPDS 3-444) e Calcita, correspondente ao carbonato de cálcio (CaCO₃), identificado por C (JCPDS 3-612). Todas as amostras evidenciam-se as mesmas fases mineralógicas: SiO₂ e CaCO₃, com pequenas variações nas intensidades relativas dos picos de difração.

Figura 18: Difratogramas de Raios X das amostras ARC



Fonte: O autor.

5.1.3 Análise Granulométrica

As frações dos agregados reciclados de concreto, agregados graúdos e agregados miúdos foram pesadas para determinação do percentual retido em cada peneira, bem como o percentual acumulado, de acordo com a NBR 248:2003.

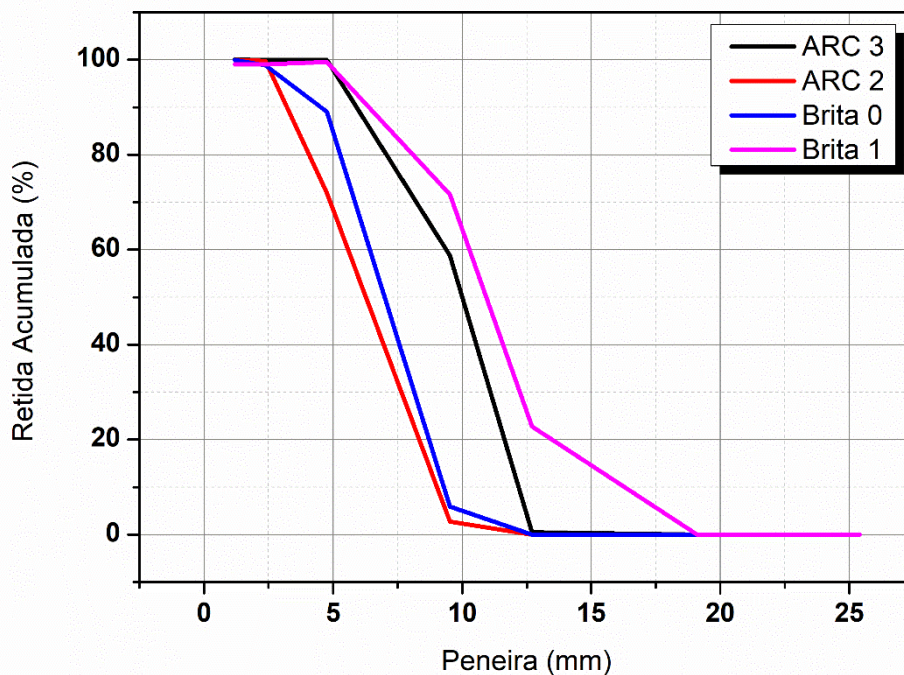
A Tabela 12 mostra os resultados obtidos para os ARC2, ARC3 e agregados graúdos e a Figura 19 mostra a distribuição granulométrica obtida de acordo com os dados da Tabela 12 para os materiais analisados.

Tabela 12: Análise granulométrica do ARC2, ARC3 e agregados graúdos (brita 0 e brita 1)

ARC2 (1000g/1Kg)				
Peneiras (mm)	Massa retida (g)	% Retida	%Retida Acumulada	Norma de Ensaio
25	0	0	0	ABNT NBR NM 248 (2003)
19	0	0	0	
12,5	0	0	0	
9,5	2,7	0,27	0,27	
4,8	717,2	71,72	71,99	
2,4	277,5	27,75	99,74	
1,4	2,3	0,23	99,97	
Fundo	0,3	0,03	100	
ARC3 (1000g/1Kg)				
25	0	0	0	ABNT NBR NM 248 (2003)
19	0	0	0	
12,5	4,6	0,46	0,46	
9,5	582,6	58,26	58,72	
4,8	412,5	41,25	99,97	
2,4	0,1	0,01	99,98	
1,4	0,1	0,01	99,99	
Fundo	0,1	0,01	100	
Agregado gráudo natural – Brita 0 (1000g/1kg)				
25	0	0	0	ABNT NBR NM 248 (2003)
19	0	0	0	
12,5	0	0	0	
9,5	59,10	5,91	5,91	
4,8	831,2	83,12	89,03	
2,4	98,00	9,80	98,83	
1,4	11,20	1,12	99,94	
Fundo	0,1	0,01	100	
Agregado gráudo natural – Brita 1 (1000g/1kg)				
25	0	0	0	ABNT NBR NM 248 (2003)
19	227,4	22,74	22,74	
12,5	488,6	48,86	71,60	
9,5	278,3	28,98	97,56	
4,8	279,4	26,90	99,54	
2,4	4,5	0,45	99,00	
1,4	0	0	99,00	
Fundo	0,1	0,01	100	

Fonte: O autor.

Figura 19: Distribuição granulométrica do ARC2, ARC3 e agregados graúdos (brita 0 e brita 1)



Fonte: O autor

A NBR 7211:2005 – Agregados de concreto, impõe os requisitos para que agregados graúdos correspondam às peneiras com abertura de malhas superior a 4,8mm. Tal normatização classifica os intervalos entre as peneiras de 19,0 mm e 9,5 mm para a graduação da brita 1 e 9,5 mm e 4,8 mm para a graduação da brita 0.

Os ensaios granulométricos mostraram que 71,99% da amostra ARC2 e 99,97% da amostra ARC3 correspondem à faixa dos agregados graúdos, ou seja, com diâmetro maior que 4,8 mm. Estes resultados mostram que as dimensões destes resíduos correspondem à graduação da brita 0 e brita 1 da NBR 7211. O ARC2 e ARC3 apresentam tamanhos máximos de 9,5 mm e 12,5 mm, respectivamente, e, tamanho mínimos em ambas as amostras de 1,4 mm.

Logo, os ensaios granulométricos dos agregados graúdos naturais mostraram que 89,03% da amostra de brita 0 e 99,54% da amostra de brita 1 também correspondem a faixa granulométrica dos agregados graúdos. As britas 0 e brita 1 encontram-se 0,46% e 1,00%, nesta ordem, fora da faixa da série grossa, enquanto os ARC2 e ARC3 encontram-se 28,01% e 0,03%, respectivamente.

Neste ensaio de análise granulométrica, foi observado que o ARC1 passou por todas as peneiras (25, 19, 12,5 e 9,5mm). Dessa forma, foi descartada a hipótese de utilizar o agregado ARC1 como agregado graúdo. Em

consequência disso, a análise granulométrica do ARC1 foi realizada novamente, agora, utilizando as peneiras da série fina, juntamente com a areia natural.

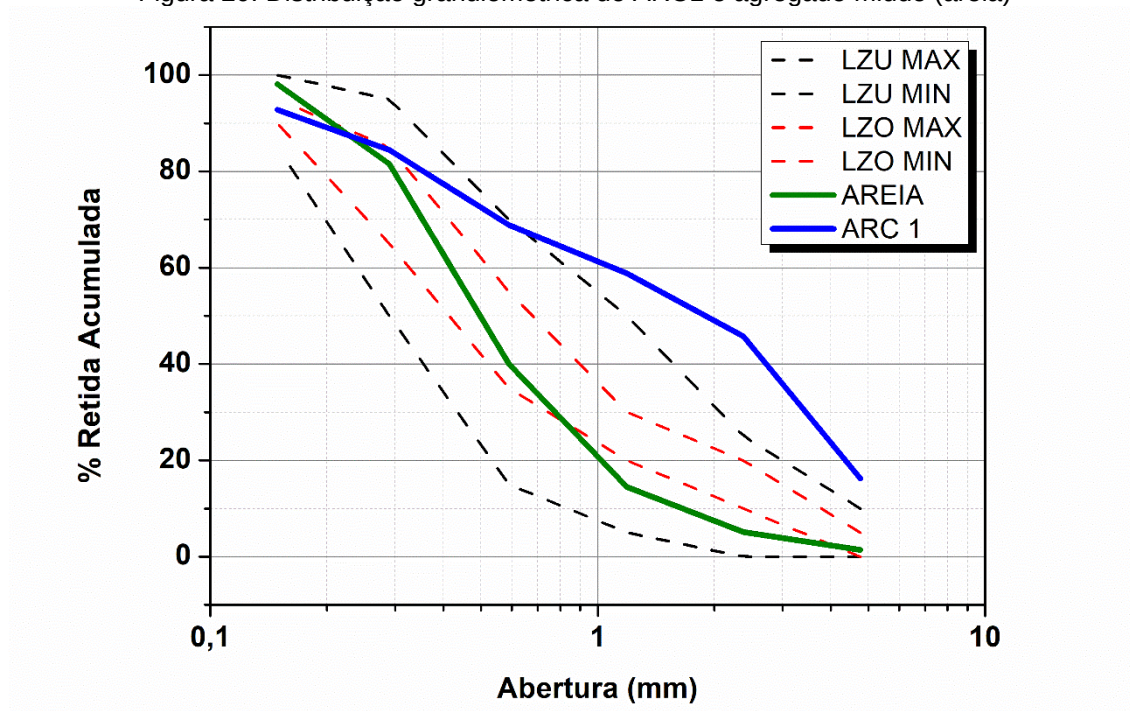
Na figura 20 estão representados os limites máximo e mínimo da zona ótima e utilizável para a classificação como agregado miúdo, conforme as especificações da NBR 7211:2005, assim como as curvas granulométricas do ARC1 e areia natural. Nesta Figura, LZU representa os limites da zona utilizável e LZO, os limites da zona ótima.

Tabela 13: Análise granulométrica do ARC1 e agregado miúdo (areia)

ARC1 (1000g/1Kg)				
Peneiras (mesh)	Massa retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Norma de Ensaio
4	162,6	16,26	16,26	ABNT NBR NM 248 (2003)
8	294,8	29,48	45,74	
16	131,1	13,11	58,85	
30	100,4	10,04	68,89	
50	155,2	15,52	84,41	
100	83,6	8,36	92,77	
200	39,4	3,94	96,71	
Fundo	32,9	3,29	100	
Agregado miúdo natural – Areia (1000g/1kg)				
4	14,14	1,41	1,41	ABNT NBR NM 248 (2003)
8	36,79	3,68	5,09	
16	94,01	9,41	14,50	
30	255,32	25,53	40,03	
50	415,39	41,54	81,57	
100	165,31	16,53	98,10	
200	18,43	1,84	99,94	
Fundo	0,61	0,06	100	

Fonte: O autor.

Figura 20: Distribuição granulométrica do ARC1 e agregado miúdo (areia)



Fonte: O autor.

Por meio das curvas granulométricas da areia natural e ARC1, apresentadas na Figura 20, é observado que a areia natural apresenta uma distribuição inserida nos limites de zona ótima e zona utilizável. Já a curva granulométrica do ARC encontra-se em alguns pontos, dentro do limite de zona ótima e utilizável, porém uma grande faixa da curva granulométrica está fora dos limites máximos para classificação de um agregado miúdo para concreto.

5.1.4 Massa específica – Agregado miúdo

Os resultados da determinação da massa específica e massa específica aparente dos agregados miúdos são mostrados na Tabela 14. Os resultados foram obtidos de acordo com a NBR NM 52:2009.

Tabela 14: Massa específica e massa específica aparente do agregado miúdo

ABNT NBR NM 52:2009 – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente			
Agregado miúdo	Massa específica aparente do agregado seco (g/cm ³)	Massa específica do agregado saturado 'superfície seca' (g/cm ³)	Massa específica (g/cm ³)
Areia Natural	2,65	2,65	2,66
ARC1	2,29	2,35	2,43

Fonte: O autor.

Os resultados mostraram que as massas específicas aparente e saturada do agregado reciclado de concreto ARC1 foi menor em relação ao agregado natural, possivelmente devido à grande quantidade de material pulverulento, deixando-o como um insumo mais leve.

Em relação a dosagem do concreto em massa, o volume do agregado reciclado de concreto em relação ao volume do agregado natural seria maior, resultando numa diferença entre os volumes de concreto convencional e agregados reciclados de concretos, produzidos a partir de um mesmo traço unitário.

5.1.5 Massa específica – Agregado graúdo

Os resultados da determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água dos agregados reciclados de concreto e agregados graúdos naturais, são mostrados na Tabela 15. Os resultados foram obtidos de acordo com a NBR NM 53:2009.

Tabela 15: Massa específica, massa específica aparente e absorção de água dos agregados graúdos

ABNT NBR NM 53:2009 – Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.				
Agregado Graúdo	Massa específica do agregado seco (g/cm ³)	Massa específica do agregado na condição superfície seca (g/cm ³)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Absorção de água (%)
ARC2	2,59	2,45	2,37	3,62
ARC3	2,61	2,55	2,51	1,51
Brita 0	2,97	2,88	2,83	1,61
Brita 1	2,96	2,86	2,81	1,81

Fonte: O autor

Os resultados mostraram que as massas específicas aparente e saturada, do agregado reciclado de concreto (ARC2 e ARC3) foram menores em relação aos agregados graúdos naturais. Há variações nos valores de massa específica dos agregados reciclados de concreto devido a sua granulometria e presença de concreto aderido à superfície dos seixos de rios. Em relação à absorção de água, o agregado reciclado de concreto (ARC2) apresentou 3,62%, valor maior que o

dobro do ARC3, que apresentou 1,51%, uma vez que, o ARC2 apresenta maior concentração de argamassa aderida no seixo, conseqüentemente, uma maior absorção de água.

5.1.6 Massa unitária

Os resultados da massa unitária dos agregados reciclados de concreto, agregados miúdos e grãos naturais são mostrados na Tabela 16. Os resultados foram obtidos de acordo com a NBR NM 45:2006.

Tabela 16: Massa unitária dos agregados reciclados de concreto e agregados naturais

ABNT NBR NM 45:2006 Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios	
Agregado	Massa Unitária (g/cm ³)
Areia Natural	2,29
ARC1	2,08
ARC2	1,80
ARC3	2,57
Brita 0	2,30
Brita 1	2,35

Fonte: O autor.

Os resultados da massa unitária da mistura de dois agregados são mostrados na Tabela 17.

Tabela 17: Massa unitária das proporções de agregados grãos ARC3 e ARC2 utilizados

Proporção		Massa Unitária (g/cm ³)
ARC 2 (%)	ARC 3 (%)	
10	90	1,40
20	80	1,42
30	70	1,44
40	60	1,42

Fonte: O autor.

No instante em que a quantidade da mistura atinge a maior massa dentro daquele volume, é estabelecida a melhor proporção para utilização no traço de concreto, pois, pode-se considerar um melhor empacotamento dos grãos. Dessa forma, a proporção de 70% de ARC 3 com 30% de ARC 2, é tomada como favorável ao traço, pois conforme embasamento da equipe técnica do Laboratório de Tecnologia da Usina de Concreto Jomane, a proporção 70/30 é

comumente utilizada nos traços de linha comercial por parte da concreteira. Esta proporção é considerada comum, pois existe uma relação entre as massas específicas e também econômica, visto que o custo da brita de menor diâmetro é maior. Porém, ao trazer maior empacotamento dos grãos, é proporcionada uma maior resistência, resultando em possível diminuição do consumo cimento e de aditivos. Por este motivo, é importante levar em consideração todos os parâmetros que uma Usina considera ao elaborar um traço.

5.1.7 Material Pulverulento

A Tabela 18 apresenta o teor de material pulverulento passante pela peneira 75 μ m das três frações do agregado reciclado de concreto, de acordo pela NBR 46/2003.

Tabela 18: Percentual de material pulverulento dos agregados recicláveis de concreto

Agregado reciclado de concreto	Teor de material pulverulento (%) NBR NM 46 (2003)
ARC1	20,943%
ARC2	2,384%
ARC3	1,005%
Areia Natural	0,530%

Fonte: O autor.

Com exceção da amostra ARC1, as demais amostras tiveram resultados satisfatórios (<5%) segundo a ABNT NBR 16973:2021. Com 20,943% de material pulverulento, a amostra ARC1 não pode ser utilizada em concreto por apresentar teor de material pulverulento maior que 5%.

Em quantidades elevadas de material pulverulento, os finos do ARC1 podem prejudicar a aderência dos grãos e exigir água em demasia na aplicação, aumentando, assim, a relação a/c. O aumento de material pulverulento e água no concreto, acarreta problemas de fissuração, perda de trabalhabilidade, prejudicando de forma direta a resistência mecânica. Em outras palavras, o excesso de material pulverulento (<75 μ m) presente no agregado reciclado de concreto ARC1 pode afetar negativamente o desempenho mecânico do concreto, principalmente quando se adota uma relação a/c baixa. De acordo com Hoffmann (2015), os materiais pulverulentos podem ter a aderência com a pasta

de cimento prejudicada, chegando a reduzir a resistência à compressão dos concretos em até 30%.

Assim, para eliminar a influência desta variável, optou-se pela retirada do agregado reciclado de concreto ARC1, uma vez que apresentou um teor acima de 20% de material pulverulento. Outro fator considerado para retirada do ARC1 foi a análise granulométrica, que se apresentou, em grande parte, fora do limite de zona ótima e utilizável para um agregado miúdo em concreto.

5.1.8 Abatimento de tronco ao cone – Slump Test

O valor obtido do abatimento de tronco ao cone – slump teste – para o traço piloto, foi de 14 cm e para o traço ARC foi de 16 cm, estando entre a classe S100 (10 a 16 cm), de acordo com a NBR 8953:2015. O agregado reciclado de concreto pode ter uma facilidade maior de transpassar as armaduras (formato cilindro na base). Tendo como vantagem a utilização dos mesmos fatores, não apresentando segregação. A consistência em ambos os traços de concreto apresentou uma consistência fluida. A Figura 21 mostra a realização do ensaio para o traço piloto e para o traço com ARC.



Fonte: O autor.

5.1.9 Resistência à compressão axial

A Tabela 19 mostra os valores da carga de ruptura em tonelada-força, a resistência à compressão axial individual e a média (Mpa) de cada corpo de prova rompidos aos 7 e 28 dias de idade, seguidos dos respectivos desvios padrões. Esses resultados permitem avaliar tecnicamente a possibilidade de utilização dos agregados reciclados de concreto, no que tange o quesito de resistência mecânica em concretos.

Tabela 19: Resultados de resistência à compressão axial dos corpos de prova aos 7 e 28 dias

Traço	Idade de Ruptura	Nº Amostra	TF	MPa	Média (Mpa)	Desvio Padrão
Piloto	7	1	32,04	40,79	40,05 40,1	± 0,34 ± 0,3
		2	32,15	40,93		
		3	31,30	39,85		
		4	31,01	39,48		
		5	30,78	39,19		
	28	1	38,12	48,53	48,98	± 0,01
		2	38,75	49,33		
		3	37,82	48,15		
		4	39,12	49,81		
		5	38,56	49,10		
ARC	7	1	27,97	35,61	35,44	± 0,23
		2	28,41	36,17		
		3	26,98	34,35		
		4	28,05	35,71		
		5	27,81	35,40		
	28	1	33,62	42,80	43,31	± 0,22
		2	32,51	41,39		
		3	34,89	44,42		
		4	34,07	43,38		
		5	35,01	44,58		

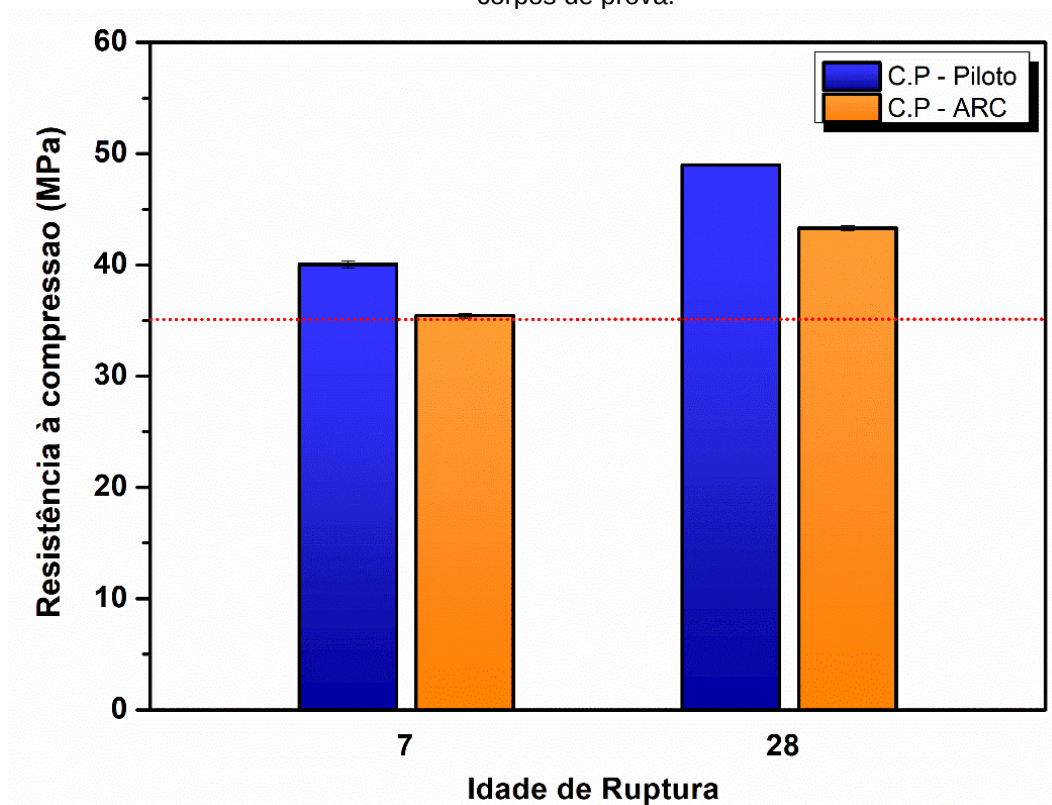
Fonte: O autor.

A média de resistência à compressão axial com 7 dias, tanto para os corpos de prova com o traço piloto, quanto para aqueles com ARC, atingiram valores acima de 20 MPa. Conforme a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e o cimento utilizado, os valores de resistência à compressão estão de acordo com as exigências mecânicas que garantem o desempenho mecânico e reológico quando aplicados em concretos.

Já aos 28 dias de idade, a média de resistência à compressão axial obtida foi de 48,98 MPa para o traço piloto e 43,31 MPa para o traço ARC. Os valores

obtidos atendem aos requisitos impostos pela NBR 9781:2013, que estabelece valor mínimo de 35 MPa para peças de concreto para pavimentação para tráfego leve. Além disso, os corpos de provas, aos 7 dias de idade, a resistência à compressão axial alcançou a resistência fixada pela norma aos 28 dias (> 35 MPa). Estes resultados são visualizados graficamente na Figura 22.

Figura 22: Resultados de resistência à compressão axial em função da idade de ruptura dos corpos de prova.



Fonte: O autor.

5.1.10 Absorção de água por imersão

A Tabela 20 apresenta os valores obtidos nos ensaios de absorção por imersão, índice de vazios, massas específicas seca e saturada aos 28 dias dos corpos de prova com traço piloto e traço com ARC.

Tabela 20: Resultados dos ensaios absorção por Imersão (28 dias) para os corpos de prova (traço piloto e traço com ARC)

C.P. Piloto	Massa Seca Estufa (72h) (g)	Massa Saturada imerso em água (72h) (g)	Massa Imersa B.H (g)	Absorção Água por Imersão (%)	Índice Vazios (%)	Massa Específica Amostra Seca	Massa Específica Amostra. Saturada
Traço piloto							
1	3.975,1	4.132,4	2.436,44	3,96	9,27	2,34	2,44
2	3.981,3	4.145,9	2.411,21	4,13	9,49	2,30	2,39
3	3.923,5	4.078,3	2.393,34	3,95	9,19	2,33	2,42
4	3.875,4	4.011,5	2.383,37	3,51	8,36	2,38	2,46
5	3.892,8	4.051,1	2.374,61	4,07	9,44	2,32	2,42
Média	3.929,6	4.083,8	2.399,8	3,90	9,20	2,30	2,40
Traço com ARC70/30							
1	3.597,7	3.767,2	2.090,1	4,71	10,11	2,15	2,25
2	3.563,1	3.735,1	2.072,5	4,83	10,35	2,14	2,25
3	3.578,6	3.741,1	2.083,1	4,54	9,81	2,16	2,26
4	3.569,8	3.737,9	2.071,5	4,71	10,09	2,14	2,24
5	3.581,9	3.733,2	2.081,0	4,22	9,16	2,17	2,26
Média	3.578,2	3.742,9	2.079,6	4,60	9,90	2,20	2,30

Fonte: O autor.

A média dos resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão dos corpos de prova (traço piloto e traço ARC70/30) foram da ordem de 3,90% e 4,60%, respectivamente. Tal diferença nos resultados pode ser atribuída à absorção de água (%) – agregado graúdo (Tabela 15) do ARC2 (3,62%), potencializando a absorção desses em comparação aos grãos de brita 0 (1,61%) e brita 1 (1,81%). Um outro fator para o aumento de absorção de água pode estar associado aos poros do cimento que se formaram em torno dos seixos dos ARC2 e ARC3, os quais podem ser observados visualmente na Figura 23.

Figura 23: Aspecto das amostras ARC2 e ARC3 com poros aparentemente formados em torno dos seixos



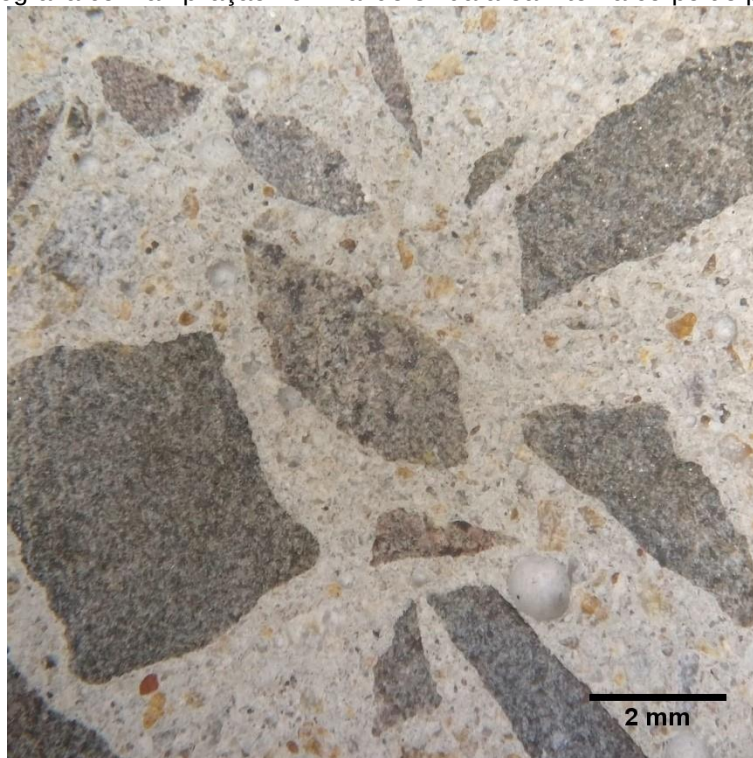
Fonte: O autor.

Os índices de vazios obtidos para os corpos de provas com traço piloto e traço ARC70/30 foram da ordem de 9,20% e 9,90%, respectivamente. O índice de vazios tem relação entre os poros permeáveis e o volume total da amostra. Neste sentido, pode ser observado que o traço piloto apresenta uma concentração menor de poros permeáveis em relação ao traço ARC70/30. Apesar da densidade menor e vazios maiores, foi obtido um concreto mais leve e com resistência semelhante. Para regiões que dispõem desse tipo de material, será bem-vindo para a produção de concreto leve

5.1.11 Microscopia Óptica dos Corpos de Prova

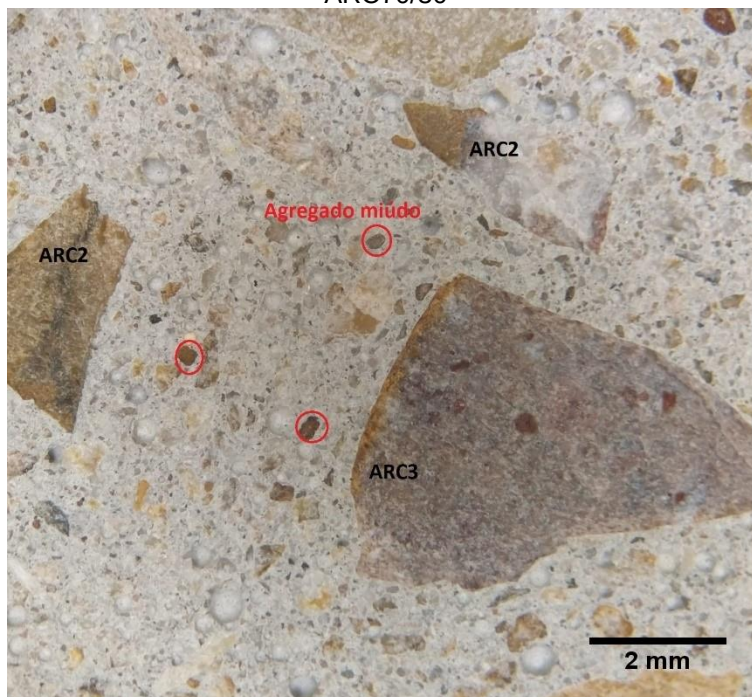
A microscopia óptica visa a observação da área interna dos corpos de provas para o conhecimento da interação dos agregados graúdos, miúdos, reciclados de concreto e o cimento. A imagem da área interna do corpo de prova do traço piloto e traço ARC70/30 são mostrados nas Figuras 24 e 25, respectivamente.

Figura 24: Micrografia com ampliação nominal de 8x da área interna corpo de prova traço piloto



Fonte: O autor.

Figura 25: Micrografia com ampliação nominal de 8x da área interna corpo de prova traço ARC70/30



Fonte: O autor.

Em ambas as micrografias é possível verificar uma distribuição entre os agregados graúdos e miúdos (Figura 24) e reciclados de concreto e agregado miúdo (Figura 25) com a matriz cimentícia, ou seja, há uma boa homogeneidade entre os grãos e o cimento. Para os agregados miúdos, observa-se que alguns grãos estão arredondados, enquanto outros apresentam na forma sub-angulares.

Os grãos dos agregados graúdos naturais apresentam boa homogeneidade na matriz cimentícia e proximidade. Da mesma forma, observa-se que os agregados reciclados de concreto também apresentam boa homogeneidade na matriz cimentícia e em relação aos agregados graúdos naturais.

6. CONCLUSÃO

De modo geral, este trabalho apresentou um estudo sobre o uso de agregados reciclados de concretos beneficiados da reforma da ponte Hélio Serejo em concreto usinado, com a finalidade de avaliar a potencialidade como substituição total do agregado gráúdo, e assim, propor um destino sustentável aos resíduos que se encontram no pátio de uma área turística da cidade de Presidente Epitácio.

Os agregados reciclados foram beneficiados apenas em uma única etapa, utilizando um reciclador que possibilitou separá-los em três granulometrias. De acordo com a análise granulometria e ensaio de material pulverulento, foi descartado o agregado reciclado de menor granulometria, pois este não se encontra dentro da faixa granulométrica ótima e utilizável e possui material pulverulento acima de 20%, impossibilitando sua aplicação em concretos. Entretanto, este agregado não é descartado de possíveis reutilizações e/ou aplicações. Para isso, novos estudos devem ser firmados para especificar sua utilização, como, por exemplo, em bases de pavimentação.

Resultados de ensaios com os corpos de prova contendo os agregados reciclados de concreto mostraram valores de resistência à compressão maiores que 35Mpa e absorção de água inferior a 6%. Estes resultados atendem as especificações das normas brasileiras para que o concreto seja utilizado em pavimentação para tráfego de veículos leves, mesmo em idades iniciais de cura. Em uma análise visual das peças moldadas, foi possível observar um ótimo acabamento em sua superfície, ocasionado pelo seu alto teor de argamassa, o que fundamenta à utilização do traço em outros artefatos de concreto.

Portanto, os resultados mostrados neste estudo são suficientes para direcionar o gerenciamento dos ARC da ponte Hélio Serejo, propondo, assim, um destino ambiental sustentável aos resíduos que se encontram dispostos inadequadamente na Orla Fluvial do município de Presidente Epitácio, SP.

REFERÊNCIAS

ALGARVIO, D. A. N. Reciclagem de resíduos de construção e demolição: Contribuição para controlo do processo. 2009. Tese de Doutorado. FCT-UNL.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) C-618. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete; 2019

ANDOLFATO, R. P. Controle tecnológico básico do concreto. Ilha Solteira, 2002.

ANGULO, S. C., TEIXEIRA, C. E., CASTRO, A. L. D., NOGUEIRA, T. P. Resíduos de construção e demolição: avaliação de métodos de quantificação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 16, p. 299-306, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, NBR 12655 - concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.

____ ABNT, NBR 16889 – Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

____ ABNT, NBR 16973 - Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021.

____ ABNT, NBR 5738 – Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

____ ABNT, NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

____ ABNT, NBR 8953 - Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

____ ABNT, NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

____ ABNT, NBR NM 53 - Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

____ ABNT, NBR. NM 52 - Agregado miúdo. Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2021.

____ ABNT NBR NM 46 - Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2003.

____ ABNT NBR NM 45 - Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

____ ABNT, NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

____ ABNT, NBR 11768-1 - Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

____ ABNT, NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

____ ABNT, NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

____ ABNT, NBR 7211 - Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

____ ABNT, NBR 7211 - Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

____ ABNT, NBR 7217 - Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

____ ABNT, NBR 7689 - Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto – Parte 1: Resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2015.

____ ABNT, NBR 9781 - Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

____ ABNT, NBR MN 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSUNÇÃO, W. R., ALMEIDA, G. M., GOMES, L. G. Análise Estatística da Influência do Tipo de Cura na Resistência Mecânica do Concreto de Cimento Portland. RCT-Revista de Ciência e Tecnologia, v. 7, 2021.

BERNARDO, C; ZEE, D. Meio ambiente urbano: desafios e soluções. Letra Capital Editora LTDA, 2014.

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Lei no. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Presidência da República, Departamento da Casa Civil. Brasília, 2010.

BRASIL. Lei nº 192, de 27 de maio de 2021. Presidente Epitácio, SP. 27 mai. 2021.

BRASIL. Lei nº 2.589, de 10 de março de 2015. Presidente Epitácio, SP. 10 mar. 2015.

CHAGAS, R.M.P. Estudo de concreto laterítico dosado com aditivo plastificante à base de lignosulfonato. 2011. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, 2011.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução No 307, de 5 de julho de 2002. Publicada no DOU nº 136, de 17 de julho de 2002, p. 95-96.

COOPEREN. Cooperativa para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. Disponível em: <www.cooperen.com.br/institucional.php>. Acesso em: 12 de abril de 2021.

DEUS, R. M; BATTISTELLE, R. A. G; SILVA, G. H. R. Resíduos sólidos no Brasil: contexto, lacunas e tendências. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 20, p. 685-698, 2015.

EPITUR. Ponte Hélio Serejo. Epitur. 25 de dezembro de 2017. Disponível em: <www.epitur.com.br/local/ponte-helio-serejo-16>. Acesso em: 25 de abril de 2021.

FASSONI, D. P. Cimentos belíticos fabricados com resíduos industriais e suas perspectivas de aplicação. 2018. 57 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2018

GARCIA, A, SPIM, J. A, SANTOS, C. A. D. Ensaios dos Materiais. -[Reimpr.]. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

GIAMMUSO, S. E. Manual do concreto. São Paulo: PINI, 1992.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 5. Ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. Ciência & saúde coletiva, v. 17, p. 1503-1510, 2012.

HELENE, P; ANDRADE, T. Concreto de cimento Portland. Isaia, Geraldo Cechella. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 905-944, 2007.

HUANG, B., WANG, X., KUA, H., GENG, Y., BLEISCHWITZ, R., & REN, J. Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. Resources, Conservation and Recycling, v. 129, p. 36-44, 2018.

JACAREI. Praças recebem bloquetes feitos em Usina de Resíduos. Prefeitura de Jacareí, 03 de dezembro de 2019. Disponível em: www.jacarei.sp.gov.br/tag/pracas-recebem-bloquetes-feitos-em-usina-de-residuos/. Acesso em: 13 de maio de 2021.

JACOBI, P. R; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. Estudos avançados, v. 25, p. 135-158, 2011.

KABIRIFAR, K.; MOJTAHEDI, M.; CHANGXIN WANG, C.; VIVIAN W.Y., T. A conceptual foundation for effective construction and demolition waste management. Cleaner Engineering and Technology, [s. l.], v. 1, p. 100019, 2020.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. Fundamentos de metodologia científica. 7. ed.- São Paulo: Atlas 2010.

LEITE, M. B. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. 2001.

LOPES, R. Ponte Hélio Serejo completa 50 anos de história. O Imparcial Digital. 2015. Disponível em: < <https://www.imparcial.com.br/noticias/ponte-helio-serejo-completa-50-anos-de-historia,6151>>. Acesso em 12 de Dezembro de 2021.

MAIA, P. S., CARVALHO, M. V. S., JUNIOR, L. A. S., SALLES, P. V. Resistência à compressão de concretos com agregados reciclados provenientes de construção e demolição: revisão de literatura. Revista Engenharia de Interesse Social, v. 6, n. 7, p. 51-74, 2021.

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

MORAES, J. S. L. J. Aditivos para concreto. Artigo (Graduação). Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências Sociais e Agrárias de Itapeva, 2014.

NAGROCKIENĖ, D.; GIRSKAS, G.; SKRIPKIŪNAS, G. Properties of concrete modified with mineral additives. Construction and Building Materials, v. 135, p. 37– 42, mar. 2017.

NEVES, A. Tipos de Cimento Portland. Blok, 21 de abril de 2021. Disponível em: < <https://www.blok.com.br/blog/tipos-de-cimento-portland-cp>>. Acesso em: 24 de março de 2021.

NEVILLE, A. M. Tecnologia do concreto. Bookman Ed ed. [s.l: s.n.].

NM53, N. B. R. Agregado graúdo–Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Specific gravity, bulk density and water absorption of the coarse aggregate–method of test). Rio de Janeiro, v. 2003, p. 8p, 2003.

PACHECO, T. C. Diagnóstico da gestão de resíduos na construção civil: comparação de obras no Rio de Janeiro visando a certificação LEED e obras sem certificação. 2011. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) -Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

POON, C.-S.; CHAN, D. The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. Resources, Conservation and Recycling, v. 50, n. 3, p. 293–305, maio 2007.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. Metodologia do trabalho científico [recurso eletrônico]: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2. ed. – Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RIBEIRO, C. C. Materiais de construção civil. Editora UFMG, 2002.

SANTOS, E. C. G. Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado. 2007. 168 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SHEN, L. Y., TAM, V. W., TAM, C. M., & DREW, D. Mapping Approach for Examining Waste Management on Construction Sites. JOURNAL OF CONSTRUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT, v. 130, p. 472–481, 2004.

SKOYLES, EDWARD R. SKOYLES, J. R. Waste prevention on site. [s.l: s.n.].

STRIEDER, H. L., DUTRA, V. F. P., GRAEFF, Â. G., NÚÑEZ, W. P., & MERTEN, F. R. M. Performance evaluation of pervious concrete pavements with recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials, 315, 125384. 2022.

SUN, C.; CHEN, L.; XIAO, J.; SINGH, A.; ZENG, J. Compound utilization of construction and industrial waste as cementitious recycled powder in mortar. Resources, Conservation & Recycling, 170, p.05561, 2021.

TANG, Y.; XIAO, J.; ZHANG, H.; DUAN, Z.; XIA, B. Mechanical properties and uniaxial compressive stress-strain behavior of fully recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials, 323, p. 126546, 2022.

TULADHAR, R.; MARSHALL, A.; SIVAKUGAN, N. Use of recycled concrete aggregate for pavement construction. In: Advances in Construction and Demolition Waste Recycling. [s.l.] Elsevier, 2020. p. 181–197.

ULSEN, C., KAHN, H., ANGULO, S. C., & JOHN, V. M. Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo. Rem: Revista Escola de Minas, 63, 339-346. 2010.

VIALLE, A. Ponte Bataguassu-Epitácio ganhar nome de Hélio Serejo. PerfilNews, Presidente Epitacio, 12 de abril de 2012. Disponível em: <www.perfilnews.com.br/ponte-bataguassu-presidente-epitacio-ganha-nome-de-helio-serejo/>. Acesso em: 14 de abril de 2021.

WICANDER R & MONROE, J. S. Fundamentos de Geologia. São Paulo, Cengage Learning, 508p, 2009.

ANEXO I: Carta Traço



TRAÇO

A/C Eng^a Yann Refere-se à: Obtenção de traço de concreto na fabricação de peças e artefatos de concreto.

Parâmetros de Dosagem		
<i>Fck</i>	35	MPa
<i>Sd</i> (NBR 12655)	6,6	MPa
<i>Abatimento</i>	12+-2	cm
<i>Teor Argamassa</i>	50 a 60	%
<i>Ar Incorporado</i>	< 2	%
<i>Abatimento previsto na classe S100 (NBR 8953)</i>		

Resistência alvo (*Fcj*) considerando desvio padrão "*Sd* = 4x1,65". ***Fcj* = 41,6 MPa**

TRAÇO ESTUDO						
Material	M.C.C. (kg/m³)	Massa Específica	Relação entre os Agregados			
Cimento	408	3,05	Agregado Miúdo			
Adição	0	2,20	Areia G	Areia M	Areia F	
Areia G	867	2,64	100,0%	0,0%	0,0%	
Areia M	0	2,62	Agregado Graúdo			
Areia F	0	2,64	Areia F	Brita 0	Brita 1	Brita 2
Brita 0	285	2,90	0,0%	30%	70%	0,0%
Brita 1	665	2,90	Teor de Argamassa (vol):			58,52%
Brita 2	0	1,00	Volume Teórico:			989,8
Água	200	1,00	Ar Previsto:			1,02%
			Relação a/c			0,490
Areia F > Miúdo:Graúdo	0	0	Aditivo - % cimento			0,5%

Tratando-se de estudos experimentais. A empresa reserva-se da responsabilidade da utilização das quantidades prevista no traço.

*O traço cedido não conta com alterações empíricas por parte da Usina.

*Traço desenvolvido através do Método de Dosagem ABCP/ACI, cedido única e exclusivamente para o estudo proposto.