



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"

Programa Interunidades

unesp 

Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

NELSON DE ALMEIDA AFRICANO

**CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE RESÍDUO
DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PARA FINS ESTRUTURAIS**



Bauru
2021

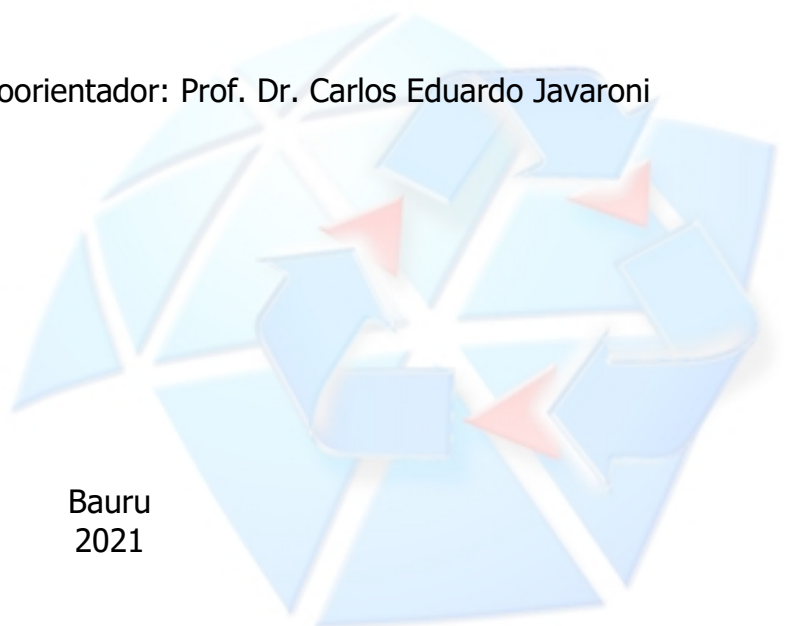
NELSON DE ALMEIDA AFRICANO

**CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE RESÍDUO
DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PARA FINS ESTRUTURAIS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Luis Manzoli

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Javaroni



Bauru
2021

Africano, Nelson de Almeida.

Concreto com agregado graúdo reciclado de resíduo da construção e demolição para fins estruturais / Nelson de Almeida Africano, 2021

112 f. : il.

Orientador: Osvaldo Luís Manzoli

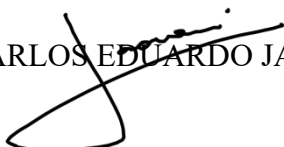
Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2021

1. Agregado reciclado. 2. RCD. 3. Concreto estrutural. 4. Reciclagem. 5. Concreto reciclado. 6. Concreto sustentável. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE NELSON DE ALMEIDA AFRICANO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 23 dias do mês de novembro do ano de 2021, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de NELSON DE ALMEIDA AFRICANO, intitulada **CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PARA FINS ESTRUTURAIS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. CARLOS EDUARDO JAVARONI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. LUÍS ANTÔNIO GUIMARÃES BITENCOURT JÚNIOR (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica / Universidade de São Paulo - USP, Prof. Dr. CAIO GORLA NOGUEIRA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - 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 presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

PROF. DR. CARLOS EDUARDO JAVARONI



Dedico aos meus pais, Fernando e Odete, a minha querida Esposa e aos meus filhos.

AGRADECIMENTOS

ADEUS primeiramente pela sua proteção dias e noites. Porque sem ele esse feito nunca seria visto.

Aos meus familiares que contribuíram direta ou indiretamente pela força dada todos os dias e pela motivação de não parar em busca dos meus objetivos, a minha esposa Rosa Santana Ferreira Africano pelo amor e paciência dados nesses períodos que estamos juntos.

Quero agradecer ao meu orientador, professor Doutor Osvaldo Luís Manzoli pela dedicação que sempre teve para comigo. Em especial ao meu Coorientador Professor Doutor Carlos Eduardo Javaroni que esteve na posição de um pai para mim, corrigindo e orientando sempre em todas as etapas dessa pesquisa.

Aos técnicos do laboratório do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UNESP - Bauru, Tiago Duarte, e um carinho especial ao Israel Luís pelos ensinamentos dado e pela força dada nos experimentos de todos os processos dessa dissertação.

A Professora Doutora Nair Cristina Margarido Brondino pelas dicas nas análises estatísticas e por dividir a sua experiência, que muito contribuiu para nossos resultados.

Aos meus caríssimos amigos provenientes de Angola, estudantes da UNESP/Bauru, Claudio Nelson Mateus Lucas, Elvira Cabral da Conceição Quintas, Aldino Miguel Francisco, Josias da Assunção de Deus Oliveira, Nsifumu Nkuzaila, Jacinto Diassala Monteiro Ernesto, que contribuíram direta ou indiretamente nesse projeto. E um especial afeto ao Mbona Paulo que me acolheu no momento mais difícil da nossa estadia aqui no Brasil.

Agradeço finalmente, ao Instituto Nacional de Gestão de Bolsa de Estudo (I.N.A.G.B. E) pela dedicação incansável dos subsídios que me mantiveram aqui neste todo período da minha formação, e à Empresa Portal Rays pela doação do agregado reciclado utilizado neste trabalho.

Muito Obrigado!

RESUMO

A construção civil brasileira é uma grande geradora de resíduos quer seja em fase de construção ou reforma, quer seja na demolição de obras existentes. O concreto tem seu grande uso como material de construção principalmente por dois motivos: o primeiro é pela facilidade em sua fabricação e aplicação. O segundo é pelo seu próprio preço, relativamente barato quando comparado a outros materiais que o venham a substituir. Portanto, a utilização dos agregados obtidos dos resíduos da construção e demolição (RCD) não se apresenta somente como uma solução econômica, mas principalmente como uma solução sustentável. Diminuiu-se a extração do agregado natural e a deposição de resíduos no meio ambiente. Portanto, tem-se como objetivo neste trabalho possibilitar uma alternativa para a reutilização dos (RCD) na própria construção civil, sua geradora, promovendo-se um estudo sobre a viabilidade técnica da substituição parcial e/ou total do agregado gráudo natural do concreto estrutural pelo agregado gráudo reciclado. Tal estudo se foi realizado por meio de análise experimental, comparando-se as propriedades dos concretos executados com agregados gráudos reciclados e com agregados de concreto convencional, mantendo-se um traço padrão como referencial. Foram executados concretos com agregados gráudos reciclados em substituições parciais do agregado gráudo natural utilizando-se as porcentagens de substituição de 25%, 50%, 75% e 100%. As propriedades físicas e mecânicas para uso como parâmetros de controle foram o abatimento do tronco de cone; a resistência à compressão; o módulo de elasticidade e a absorção de água, determinados por meio de ensaios padronizados pela normalização brasileira. Observou-se que para as substituições de 25% e 50% a redução dos valores das propriedades é pequena. Já para os outros teores de substituições a redução nos valores das propriedades foi considerável. A aplicação desse concreto reciclado em vigas e respectivos ensaios demonstraram a possibilidade de substituição do agregado gráudo natural pelo reciclado na proporção de 100% para uso em concretos estruturais.

Palavras-Chave: Agregado reciclado; RCD; Concreto estrutural; Reciclagem; Concreto reciclado, Concreto sustentável.

ABSTRACT

Brazilian civil construction is a major waste generator whether in the construction or renovation phase, or in the demolition of existing works. Concrete has its great use as a building material mainly for 2 reasons: The first is for the ease in its manufacture and application. The second is for its own price, relatively inexpensive when compared to other materials that will replace it. Therefore, the use of aggregates obtained from RCD is not only presented as an economic solution, but mainly as a sustainable solution. The extraction of the natural aggregate and the deposition of waste into the environment are reduced. The waste thus generated is known as construction and demolition waste (RCD). This research work has as general objective to contribute to the reuse of construction and demolition waste (RCD), contributing to the reduction of possible environmental impacts caused by the deposition of these wastes in nature. As a specific objective, it discusses the technical feasibility of partial and/or total replacement of the large aggregate of concrete by recycled aggregate by means of experimental analysis, comparing the concretes executed with recycled large aggregates with conventional concrete, maintaining a standard trace as a reference. Through the studies carried out, technical knowledge can be acquired for the production of recycled concrete with compressive strength compatible with those specified in the resistance classes, for its use in the execution of structural elements. Concretes were executed with recycled large aggregates in partial replacements of the natural large aggregate using the substitution percentages of 25%; 50%; 75% and 100%. The physical and mechanical properties for use as control parameters were the reduction of the cone trunk; compressive strength; the modulus of elasticity and water absorption, determined by means of tests standardized by Brazilian standardization. It was observed that for substitutions of 25% and 50% the reduction of property values is small. For the other values, the reduction in property values was considerable. The application of this recycled concrete in beams and their tests demonstrated the possibility of replacing the natural large aggregate with the recycled one in the proportion of 100% for use in structural concrete.

Keywords: Recycled aggregate; RCD; Structural concrete; Recycling; Recycled concrete, Sustainable concrete.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - resíduo de concreto (Rc).....	24
Figura 2 - resíduos da construção e demolição (RCD).....	24
Figura 3 - layout esquemático de uma central de usina de beneficiamento de rcd.	26
Figura 4 - usina de reaproveitamento de rcd em operação.....	27
Figura 5 - composição média do rcd no brasil.....	32
Figura 6 - arranjo de ensaio para as vigas de santos, branco e britto, (2004).....	44
Figura7 -relações carga-deformação das vigas testadas por al-zahraa; el-mihilmy; bahaa,2010).....	45
Figura 8 -carga / diagrama estirpe reforço inferior por santos, branco e britto (2004)	45
Figura 9 - detalhes das vigas ensaiadas por ignjatović et al. (2013)	46
Figura 10 - desvio de carga curvas para diferentes concretos por ignjatović et al. (2013).....	48
Figura 11 - curva granulométrica do agregado miúdo natural e zona utilizável.....	51
Figura 12 - areia grossa utilizada para os experimentos.....	51
Figura 13 - agregado graúdo natural e conjunto de peneiras.....	52
Figura 14 - agregado graúdo de rcd e conjunto de peneiras.....	53
Figura 15 – peneirador para separação do agregado graúdo reciclado.....	53
Figura 16 – curva granulométrica para o agregado graúdo de rcd	54
Figura 17 – armadura para as vigas.....	55
Figura 18 - resistência à compressão estimadas e intervalos de 95% de confiança.....	58
Figura 19 - superfície ajustada aos dados dos ensaios piloto	59
Figura 20 - superfície ajustada aos dados dos ensaios piloto	60
Figura 21 - relações paralelas entre a resistência versus rcd.....	63
Figura 22 - superfície ajustada aos dados e curvas de nível.....	66
Figura 23 - diagrama de deformações para concreto do grupo 1 ($f_{ck} \leq 50$ MPa).....	68
Figura 24 – esquema estático e detalhamento da viga.....	69
Figura 25 – esquema de carregamento e diagramas de esforços.....	69
Figura 26 – ensaio sendo preparado para aplicação do carregamento.	70
Figura 27 – preparação da fôrma para a moldagem da viga.....	71
Figura 28- concretagem da viga Vp.	71
Figura 29- corpos de prova e vigas em processo de cura ao ar livre.....	72
Figura 30 - a. Dispositivo de controle. B. Prensa para ensaio.....	72
Figura 31 - a. Cps em processo de fervura; b. Cps colocados em estufa.	73

Figura 32 – extensômetro elétricos de resistência colados nas barras de aço principais.....	74
Figura 33 - dispositivos de apoios para as vigas.	75
Figura 34– arranjo para aplicação de força na viga.....	75
Figura 35– arranjo com transdutor posicionado.	76
Figura 36- extensômetro colado na face superior da viga.	76
Figura 37 – sistema de aquisição de dado.	77
Figura 38 - ensaio em andamento.....	77
Figura 39 - ruína da viga Vr1_50	83
Figura 40 – ruína da viga Vr2_50.....	84
Figura 41 - ensaio da viga Vr_100	86
Figura 42 - fissuração e modo de falha:al-zahraa; el-mihilmy; bahaa,(2010)	90
Figura 43 - fissuração e modo de falha: ignjatović et al. (2013)	91
Figura 44 - fissuração e modo de falha: do autor (2021)	92

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação e destinação dos RDC e demolição segundo resoluções Conama N° 307 E N° 431.....	23
Tabela 2 - Geração de volume total deRCDcoletado no Brasil nos anos de 2014 e 2015	25
Tabela 3 - Requisitos para ARdestinado ao preparo de concreto estrutural.....	28
Tabela 4 - Requisitos do uso dos ARpela norma Dinamarquesa	29
Tabela 5 - Requisitos para ARdestinado ao preparo de concreto sem função estrutural	30
Tabela 6 - Aplicação e recomendação doARsegundo normas de vários países.....	30
Tabela 7- Composição e características dos RCDdas diversas regiões do país	31
Tabela 8 - Características dos ANe reciclados pela composição granulométrica.	33
Tabela 9 - Resistências à compressão obtidas por substituições deANpor reciclados.....	39
Tabela 10 - Módulo de elasticidade obtido em substituições de ANpor reciclados.....	41
Tabela 11 - Composição granulométrica do agregado miúdo natural.....	51
Tabela 12 - Composição granulométrica do agregado graúdo reciclado.	54
Tabela 13 - Resultados comparativos entre autores para o módulo de finura.....	54
Tabela 14 - Dosagens dos concretos iniciais para as substituições adotadas (kg).	56
Tabela 15 - Resultados dos ensaios realizados (MPa).....	57
Tabela 16 - Configuração dos grupos.....	61
Tabela 17 - Dosagens dos traços a partir do planejamento estatístico (kg).....	62
Tabela 18 - Resultados de resistência à compressão.	62
Tabela 19 - P-values para o teste da razão de verossimilhança.....	65
Tabela 20 - Médias marginais estimadas e intervalos de confiança 95%	65
Tabela 21 - Diferenças médias e valores p para comparações aos pares.	65
Tabela 22 - Comparação de resistência à compressão entre traços.....	67
Tabela 23- Valores médios das resistências à compressão simples e do módulo de elasticidade dos concretos.	73
Tabela 24 - Absorção, índice de vazios e massa específica para os concretos.....	73
Tabela 25 - Dados para a viga vce dados para a viga vcp.....	78
Tabela 26 - Força última prevista para as vigas.....	81

ÍNDICE DE FÓRMULAS

Equação 1 -Superfície ajustada aos dados dos ensaios piloto.....	60
Equação 2 -Quantidade de variância de um fator.....	61
Equação 3 -Equações de equilíbrio de vigas de concreto armado com armadura simples	79
Equação 4 -Momento fletor resistente.....	80
Equação 5 -Valor da força última prevista para o ensaio	80

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resíduos x valores preditos.....	64
Gráfico 2 - Q-q plot com envelope simulado.	64
Gráfico 3 - Deslocamentos no meio do vão para a viga Vp.....	81
Gráfico 4 - Deformações medidas nas barras de aço e no concreto para viga Vp	81
Gráfico 5 - Deslocamentos no meio do vão para a viga Vr1_50.....	82
Gráfico 6 - Deformações para o aço e o concreto na viga Vr1_50	82
Gráfico 7 - Deslocamentos no meio do vão para a viga Vr2_50.....	83
Gráfico 8 - Deformações para o aço e o concreto na viga Vr2_50	84
Gráfico 9 - Deslocamentos no meio do vão para a viga Vr_100.....	85
Gráfico 10 - Deformações para o aço e para o concreto na viga Vr_100.....	85
Gráfico 11- Deslocamentos no meio do vão para as vigas.....	87
Gráfico 12 - Deformações nas barras de aço da armadura principal.....	87
Gráfico 13 - Deformações no concreto.....	88
Gráfico 14- Comportamento de vigas com AR.....	89
Gráfico 15 - Comportamento de vigas com AR.....	89
Gráfico 16 - Comportamento de vigas com AR.....	90
Gráfico 17 - Comportamento de vigas com AR de diferentes autores.....	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABRECON - Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduo de Construção Civil e Demolição
- ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
- AGN - Agregado Graúdo Natural
- AGR - Agregado Graúdo Reciclado
- AGCV - Agregado Graúdo de Cerâmica Vermelha
- AGC - Agregado Graúdo de Concreto
- AMN - Agregado Miúdo Natural
- AMR - Agregado Miúdo Reciclado
- AN - Agregado Natural
- AR - Agregado Reciclado
- ARC - Agregado de resíduo de concreto
- ARM - Agregado de resíduo misto
- RAC – Agregado de concreto reciclado
- BSCJ - Building Contractors Society of Japan
- CC - Concreto Convencional
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
- CR - Concreto Reciclado
- CPs - Corpos de Provas
- Dp - Desvio Padrão
- EMIC - Máquina Universal de Medidor de Resistências
- RC - Resíduo de Concreto
- RCD- Resíduos de Construção e Demolição
- RILEM - International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
- VCP - Vigas de Concreto Padrão
- VCR - Vigas de Concreto Reciclado
- TR1_50 – Traço com 50% de agregado reciclado
- TR2_100 - Traço com 100% de agregado reciclado
- N1 - Armadura longitudinal à compressão
- N2 - Armadura longitudinal à tração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	19
1.2	JUSTIFICATIVA	20
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	DEFINIÇÕES.....	22
2.2	GERAÇÃO E BENEFICIAMENTO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	25
2.3	RECOMENDAÇÕES E ESPECIFICAÇÕES NORMATIVAS.....	27
2.4	CARACTERÍSTICAS, COMPOSIÇÃO E GRANULOMETRIA DE RCD	31
2.5	MASSA ESPECÍFICA E MASSA UNITÁRIA	33
2.6	RESISTÊNCIA À ABRASÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS	34
2.7	TRABALHABILIDADE DOS CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS	35
2.8	PROPRIEDADES MECÂNICAS NO ESTADO ENDURECIDO DOS CONCRETOS	36
2.8.1	Absorção de água por imersão	37
2.8.2	Resistência à compressão simples	38
2.8.3	Resistência à tração por compressão diametral	40
2.8.4	Módulo de Elasticidade	41
2.8.5	Durabilidade do concreto com agregado reciclado	43
2.9	VIGAS DE CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS	43
3	MATERIAIS E MÉTODO	48
3.1	Caracterização da área.....	48
3.2	Materiais empregados.....	48
3.3	Método de pesquisa.....	49
3.4	TRAÇOS COM AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS	50
3.5	SELEÇÃO DOS MATERIAIS E TRAÇOS	50
3.5.1	Cimento	50
3.5.2	Agregado miúdo natural	50
3.5.3	Agregado graúdo natural	52
3.5.4	Água	52
3.5.5	Agregado graúdo de resíduo de construção e demolição	52

3.5.6	Aço das armaduras longitudinal e transversal	55
3.5.7	Definições de traços e substituições	55
3.6	RESULTADOS INICIAIS E DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS	56
3.6.1	Traços exploratórios	56
3.6.2	Planejamento estatístico experimental.....	57
3.6.3	Resultados dos ensaios para os grupos avaliados	62
3.6.4	Vigas de concreto armado com agregados naturais e reciclados.....	67
3.7	BREVES ASPECTOS TEÓRICOS	67
3.8	Dosagens dos concretos, moldagem e cura das vigas.....	70
3.9	PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS CONCRETOS	72
3.9.1	Resistência à compressão simples	72
3.9.2	Absorção, índice de vazios e massa específica.....	73
3.10	EXECUÇÃO, INSTRUMENTAÇÃO E PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS	74
3.10.1	Fabricação das vigas.....	74
3.10.2	Posicionamento das vigas e dispositivos de ensaios	74
3.10.3	Aplicação da força e aquisição dos dados	76
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	79
4.1	Previsão de força última	79
4.2	ENSAIO DA VIGA PADRÃO VCP.....	80
4.3	ENSAIO DA VIGA VR1_50	81
4.4	ENSAIO DA VIGA VR2_50	83
4.5	ENSAIO DA VIGA VR_100	84
4.6	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	86
4.6.1	Das vigas ensaiadas	86
4.6.2	De outros pesquisadores.....	88
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
5.1	SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS.....	94
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
	APÊNDICES.....	108
	APÊNDICE A – IMAGENS DE ENSAIOS DE ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE, O CHAMADO SLUMP TEST.	108
	APÊNDICE B – IMAGENS DE ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO E A TRAÇÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE.	109
	APÊNDICE C – IMAGENS DOS CONCRETOS ENSAIADOS APÓS AS SUAS RUPTURAS.	110

1 INTRODUÇÃO

O concreto é, sem dúvida, o material mais utilizado na construção civil e ao mesmo tempo, o mercado da construção civil brasileira é um grande gerador de resíduos, quer seja em fase de construção ou reforma, quer seja na demolição de obras existentes. Os resíduos assim gerados são conhecidos como os resíduos da construção e demolição (RCD). Vários autores em seus estudos apontam para um enorme volume de materiais descartados que, entretanto, podem ser reaproveitados. Isso indica que há necessidade de investimentos em pesquisas de soluções tecnológicas cujo objetivo seja a eliminação ou minimização dessa demanda, a qual traz consequências danosas à sociedade do ponto de vista socioeconômico e ao meio ambiente devido ao descarte irregular daqueles resíduos (LEITE, 2001; VIEIRA, 2003; CABRAL, 2007; REIS, 2009; MOREIRA, 2010; RANGEL, 2015; NANYA, 2018).

Em tempos remotos a extração de minerais para construção era um processo indispensável para a realização das atividades industriais. Com a Primeira Revolução Industrial e o grande crescimento populacional a crescente quantidade de volumes dos minérios retirados da natureza, tais como rochas de basalto, granito e pedras calcárias retirados, geram danos irreversíveis à natureza (MARQUES e BAPTISTA, 2010).

Atualmente dada à necessidade premente em reduzir, reutilizar e reciclar uma grande quantidade de materiais inservíveis, a grande parte da comunidade científica vem direcionando seus estudos para minimizar a exploração dos recursos naturais a fim de garantir uma maior preservação do nosso meio ambiente (ZEGA e MAIO, 2011). Sob este ponto de vista, a construção civil apresenta-se como usuária inesgotável e exploradora massiva do meio ambiente (CORDEIRO et al. 2017).

No Brasil o uso da reciclagem, propriamente na área de construção civil, teve início a partir dos anos 1980, com o uso de um pequeno equipamento chamado maseira moimho, que tinha como função a moagem de resíduos de alvenarias e argamassas considerados bons para reuso em outras aplicações (SOUZA, 2006).

Segundo a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduo de Construção Civil e Demolição os RCD representam de 40% a 70% de todo lixo sólido urbano produzido nas cidades de médio e grande porte brasileiras (ABRECON, 2011). Além disso, a deposição desses resíduos na natureza de forma incorreta acarreta entupimento de bueiros, assoreamentos de rios e enchentes, e mesmo que a deposição seja feita em lugares apropriados, isso não parece ser uma solução única e satisfatória (MESQUITA, 2012). A reutilização do RCD torna-se necessária e, dentre várias aplicações possíveis, a substituição

parcial ou total do agregado graúdo utilizado na execução do concreto é uma opção que tem sua importância na construção sustentável, ajudando a minimizar os impactos ambientais (ZEGA e MAIO, 2011).

O concreto tem seu grande uso como material de construção principalmente por dois motivos: o primeiro é pela facilidade em sua fabricação e aplicação. E o segundo é pelo seu próprio preço, relativamente barato quando comparado a outros materiais que o venham a substituir (GARCIA, GARCIA e MENDES, 2014). Portanto, a utilização dos agregados obtidos dos RCD não se apresenta exatamente como uma solução econômica, mas principalmente, como uma solução sustentável. Diminui-se a extração do agregado natural e a deposição de resíduos no meio ambiente (CABRAL et al. 2012).

Várias pesquisas foram desenvolvidas no Brasil no âmbito dos agregados reciclados provenientes de RCD tais como: avaliação de propriedades mecânicas de concreto produzidos com agregados reciclados de RCD (LEITE, 2001); variabilidade de agregados graúdos de RCD reciclados (Angulo, 2000) e avaliação de propriedade do concreto produzido com agregados reciclados de RCD visando aplicação estrutural (TENÓRIO, 2007), ressaltando-se que as normas brasileiras ABNT NBR 15115 (2004) e ABNT NBR 15116 (2004) não prevêm o uso do concreto com agregados reciclados para uso estrutural.

Outros pesquisadores, porém, têm analisado o uso do material em concretos estruturais, de maneira geral, com resultados satisfatórios (OLIVEIRA, 2018). Nesse contexto além dos trabalhos já citados, podem ser destacados vários outros estudos que contribuem no uso dos agregados reciclados de resíduo de construção civil e demolição para aplicação em concreto estrutural. São eles:

- Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de RCD no desempenho mecânico do concreto estrutural (MOREIRA, 2010).
- Modelagem numérica da flexão de vigas de concreto reciclado armado (MOTA, 2012).
- Influência dos agregados de resíduos de construção nas propriedades mecânicas do concreto (SILVA; BRITO; DHIR, 2019).
- Avaliação da influência do método de mistura nas propriedades do concreto produzidos com agregados graúdos reciclados de concretos (NOGUEIRA, 2015).
- Avaliação da relação entre os módulos de elasticidade estáticos e dinâmicos de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados em substituição aos agregados graúdos naturais (SOUSA, 2018).

- Estudo do comportamento mecânico do concreto com agregado reciclado mediante modelagem multiescala pelo MEF (GIMENES, 2020).

Em diversos países, vários outros estudos estão em desenvolvimentos: na China, Koue Poon (2012), em suas pesquisas concluíram: os seus resultados mostram que uma forma prática de empregar uma alta porcentagem de AR no concreto é incorporando de 25 a 35% de cinza volante, o que minimiza algumas desvantagens introduzidas pelo uso de AR no concreto. Na Índia, Kumar e Dhinakaran, (2012) combinaram o efeito de cinza volante e superplastificante até um nível de 20% de substituição, constatou que os resultados são encorajadores ao usar concreto com agregado reciclado. Em Portugal, Matias et al. (2013) avaliaram os efeitos da introdução de superplastificante em algumas propriedades mecânicas do concreto com agregados de concreto reciclado com isso eles alcançaram pontos fracos e fortes para a produção desse concreto. No Japão, Prasadae Madhavi, (2013) apresentam um concreto estrutural onde se avaliou as propriedades de deformação e cisalhamento mediante uma mistura com 100% de substituição. Na Turquia, Çakir (2014), para a produção do concreto substituiu agregados graúdo por sílica ativa e granulado moído de escória de alto forno em várias proporções, alcançando resistências significativas com 50% de substituição. Na Inglaterra, Anike et al. (2019), realizaram um estudo em misturas e dosagens de aditivos e aplicações de fibras de aço para melhorar as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto reciclado.

De modo geral, os resultados das pesquisas acima evidenciam resultados promissores na obtenção de concretos com resistências e propriedades físicas apropriadas ao uso desse material como elemento estrutural, o que permite delinear os objetivos dessa pesquisa.

1.1 OBJETIVOS

Sendo assim, o objetivo principal da pesquisa consiste na adequada reutilização dos resíduos da construção e demolição (RCD) para a diminuição de eventuais impactos ambientais causados pela deposição desses resíduos na natureza. Discutiu-se a viabilidade técnica, qualitativa e quantitativa, da substituição parcial e/ou total do agregado graúdo natural do concreto por agregado reciclado dos RCD visando a sua utilização como elementos estruturais.

Como objetivos específicos o trabalho previu:

- Determinar as propriedades físicas do agregado reciclado: curva granulométrica, massa específica, absorção de água e porosidade;
- Analisar diferentes teores de substituição para o agregado reciclado tendo como referência um traço padrão previamente definido;
- Avaliar as propriedades mecânicas do concreto endurecido: resistência à compressão, módulo de deformação e resistência a tração diametral tendo como referencial os valores obtidos para o traço padrão;
- Determinar um valor aceitável de substituição do agregado graúdo natural para execução e experimentação de vigas de concreto armado;
- Analisar o comportamento das vigas em confronto com os aspectos teóricos que norteiam o dimensionamento dessas estruturas em concreto armado.

1.2 JUSTIFICATIVA

Dessa forma, a relevância da reciclagem e reuso dos resíduos da construção e demolição (RCD) está diretamente ligada ao menor impacto ambiental causado pela sua deposição em áreas legais e em mitigar a deposição desses resíduos em áreas impróprias, além de possibilitar uma eventual redução na extração do agregado natural.

Por se tratar de um resíduo produzido em grande volume e por ser o concreto um dos materiais de maior uso na construção civil, a substituição do agregado graúdo natural pelo agregado reciclado obtido a partir do RCD torna-se uma solução promissora, como já vem sendo demonstrado por aplicações em pavimentos e em preparo de concretos sem função estrutural.

Ainda, o Brasil carece de recomendações técnicas e diretrizes sobre o uso de agregados reciclados para o uso em elementos estruturais e maior conhecimento sobre o comportamento desse material quando submetido às ações correntes em estruturas contribuirá para o desenvolvimento do seu uso na construção civil o que representará uma alternativa a favor da conservação do meio ambiente.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No primeiro capítulo serão descritos os estudos realizados e os resultados encontrados, esta dissertação apresenta-se em cinco capítulos, o primeiro capítulo apresenta uma abordagem geral sobre o agregado reciclado obtido a partir do RCD e o seu uso no concreto, justificando a relevância do tema e o objetivo principal do trabalho.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica sobre os agregados reciclados e suas possibilidades de aplicação. São apresentadas as características dos agregados reciclados e resultados de estudos realizados com aplicação deles no concreto.

No terceiro capítulo descreve-se a metodologia de pesquisa utilizada, definida a partir de um estudo minucioso das propriedades físicas e mecânicas dos concretos com agregados reciclados. Foi desenvolvido um programa experimental dividido em três etapas onde se caracterizou a seleção dos materiais, definição dos traços e a descrição dos aspectos gerais das vigas. Ainda dentro deste capítulo foram abordados os seguintes itens:

- Foi descrito os traços com agregados naturais e reciclados a partir de duas etapas: os traços exploratórios e os traços com planejamento estatístico fatorial.
- Foram desenvolvidos todos os aspectos teóricos e experimentais que nortearam a fabricação e ensaio das vigas de concreto armado com agregados natural e com agregado reciclado.
- Foram executadas quatro vigas em concreto armado: uma com concreto convencional, sendo definidas como referência, duas com traço TR1_50 e uma com traço TR2_100.

O quarto capítulo apresenta à análise e discussão dos resultados dos ensaios das vigas levadas a ruína. Os resultados das vigas com agregados reciclados de RCD foram comparados com a viga de referência.

No quinto capítulo abordam as considerações finais, bem como as sugestões das pesquisas futuras,

E no sexto capítulo as referências bibliográficas e os apêndices.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DEFINIÇÕES

Diferentes autores entendem que resíduo de construção e demolição (RCD) é aquele proveniente de reformas, reparos e demolições bem como outros originados das atividades de construções que envolvam obras de arte, solos e vegetação e limpezas de terreno (ANGULO 2000; LEITE, 2001; VIEIRA, 2003). Nesse mesmo contexto, os autores retratam os RCD como sendo oriundo de toda atividade de construção e restos de materiais de canteiro de obras, não considerando os inertes de classe B como metais, plásticos e vidros, madeiras e resíduos orgânicos que vem de serviços urbanos e industriais (ANGULO 2005; LOPES, 2005; LOVATO, 2007; REIS, 2009).

Segundo Brasil Recicla (BRASILENGENHARIA, 2015), o Brasil gera mais de 84 milhões de metros cúbicos de RCD, sendo que a maioria desses resíduos gerados é de alvenaria ou de concreto, e enquadra-se em resíduos de classe A, em acordo com a resolução CONAMA N° 307 (2002), e, portanto, podem ser reciclados e utilizados na própria obra ou em muitas outras aplicações, como disposto na resolução (CONAMA N° 431, 2011).

São classificados na classe A aqueles resíduos que podem ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir sua utilização ou reciclagem futura (CONAMA N° 307, 2002).

Observa-se que os RCD, classe A, podem ser utilizados na forma de agregados, sem distinção entre graúdo ou miúdo, permitindo seu uso na confecção de concretos (SOUSA, 2011). Na Tabela 1 estão apresentadas às classificações dos principais resíduos gerados pela construção civil e a sua destinação para reuso ou reciclagem.

O uso dos agregados reciclados de resíduo de construção e demolição (RCD) de classe A em concreto caracteriza-se como um dos maiores desafios para a reciclagem dada à variabilidade de sua composição (MOTA, 2012). Segundo vários pesquisadores demonstraram em seus estudos, os agregados reciclados provenientes de RCD são mais leves, têm alta absorção em relação aos naturais, e possuem uma porosidade elevada, fatores que afetam e podem prejudicar as propriedades mecânicas do concreto tanto no seu estado fresco quanto no endurecido (KUMUTHA e VIJAI, 2008; CABRAL et al., 2012; BRITO e ALVES, 2010).

Deve-se agora distinguir o agregado reciclado obtido somente do concreto daquele obtido de RCD. Qualquer concreto pode ser reciclado, tanto em estado fresco quanto

endurecido, devendo-se levar em conta a sua finalidade e suas limitações técnicas. Trata-se de um único tipo de material, o concreto (SOUZA, ASSIS e SOUTO, 2014).

Já o agregado graúdo reciclado obtido de RCD possui em sua composição alvenaria, materiais cerâmicos, argamassas, concreto, brita entre outros. Essa heterogeneidade do agregado reciclado em muito interfere nas propriedades de resistência do concreto, em geral, diminuindo-as. Portanto, o uso do agregado reciclado deve ser antecedido de uma boa caracterização do material em termos de granulometria, porosidade, massa específica e absorção de água (ANGULO e FIGUEIREDO, 2011; SOUZA, ASSIS e SOUTO, 2014).

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO E DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO SEGUNDO RESOLUÇÕES CONAMA Nº 307 E Nº 431.

Classes	Integrantes predominantes	Destinação
A	Resíduos recicláveis, como agregados, tijolos, blocos, telhas, argamassa, concreto, areia e pedra	Deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir sua utilização ou reciclagem futura.
B	Resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso	Deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir sua utilização ou reciclagem futura.
C	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam sua reciclagem ou recuperação	Deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.
D	Resíduos perigosos como tintas, solventes, óleos e amianto (contaminados)	Deverão ser armazenados, transportados, reutilizados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

Fonte: CONAMA Nº 307 (2002).

Nesse tipo de resíduo há grande variação em sua composição e suas propriedades físicas e químicas podem variar de uma região para outra ou mesmo entre diferentes lotes. Isto pode dificultar a sua utilização no preparo de concreto reciclado. Nesse aspecto a seleção do material descartado na fonte geradora pode colaborar em muito no controle de suas características (ANDREOLI et al. 2014).

Há também os resíduos de concreto (RC) cujo material presente é predominantemente o concreto. Ele é oriundo de demolições de estruturas de concreto e de resíduos de usinas de concreto e fábricas de elementos pré-fabricados (ANGULO e FIGUEIREDO, 2011). Segundo

esses autores aqui no Brasil, há somente concreto com resíduo o que permite um conhecimento maior de suas propriedades de interesse. A Figura 1 e 2 ilustram os dois tipos de agregados.

Diferenciados os tipos de resíduos, os agregados reciclados obtidos a partir dos RCD e dos RC em muito se diferenciam e, apesar de aparente maior qualidade e homogeneidade dos obtidos a partir do RC, o volume gerado de RCD é muito maior e a utilização destes como agregados reciclados indica ser uma solução sustentável (ANGULO e FIGUEIREDO, 2011).

FIGURA 1 - RESÍDUO DE CONCRETO (RC)



Fonte: Ângulo e Figueiredo (2011)

FIGURA 2 - RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)



Fonte: Angulo e Figueiredo (2011)

A reciclagem desses RCD surge com uma solução viável econômica, pois contribui na redução dos custos de produção e diminui na extração de matéria-prima ocasionando menos impacto ambiental na população e nas indústrias de construção (CABRAL et al. 2012).

2.2 GERAÇÃO E BENEFICIAMENTO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais ABRELPE, informa que foram geradas mais de 120.000 toneladas de resíduos da construção civil por dia ao longo dos anos de 2018 e 2019.

Na Tabela 2 são apresentadas as quantidades de RCD coletadas no Brasil em suas regiões geográficas, onde se observa que a região sudeste é a principal fonte geradora.

TABELA 2 - GERAÇÃO DE VOLUME TOTAL DE RCD COLETADO NO BRASIL NOS ANOS DE 2016 E 2017

Região	2016		2017	
	Total (t/dia)	Per capita (kg/habitante/dia)	Total (t/dia)	Per capita (kg/habitante/dia)
Sul	16.472	0,556	16.246	0,546
Sudeste	64.063	0,737	63.679	0,726
Norte	4.727	0,264	4.709	0,259
Nordeste	24.585	0,429	24.123	0,425
Centro Oeste	13.574	0,855	13.255	0,824
Brasil	12.342	0,594	12.201	0,585

Fonte: ABRELPE (2017)

A coleta dos RCD dá-se normalmente por meio das caçambas colocadas nas proximidades das construções onde em seu interior são depositados os entulhos. Após enchidas, tais caçambas são levadas e esvaziada em áreas apropriadas e licenciadas pelo poder público ou para usinas de reciclagem quando for o caso (MENESES et al. 2012).

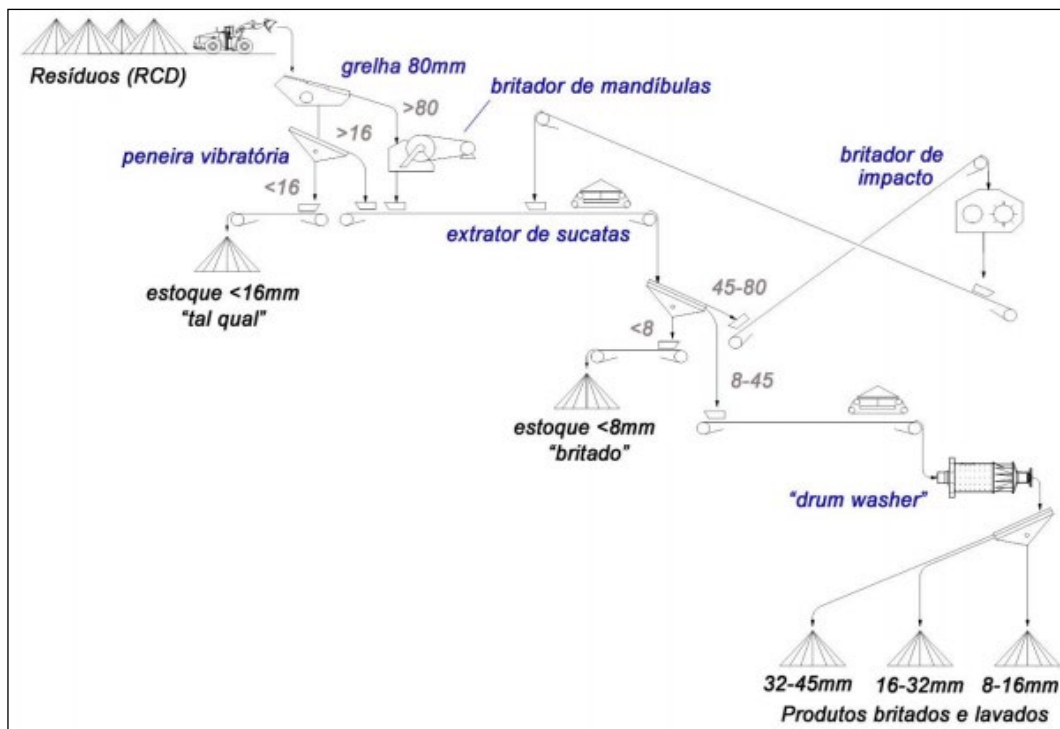
O beneficiamento dos resíduos de construção e demolição envolve uma série de atividades, iniciando-se com a coleta e transporte até a usina, separação de resíduos, britagem e peneiramento até a sua estocagem para posterior utilização. Em situação normal, o reaproveitamento dos resíduos de construção e demolição não poderia ser realizado, mas com o seu beneficiamento, a reutilização torna-se possível (LOVATO, 2007).

Conforme Nogueira (2015) o processo de britagem dos agregados reciclados que são reaproveitados está diretamente influenciado pelo tipo de britador. No entender do autor o beneficiamento depende exclusivamente do tipo de reciclado.

Cabral et al. (2012) observaram que devido à grande quantidade de resíduo de construção e demolição que vem sendo gerado pela indústria de construção, tanto no Brasil quanto no exterior, são necessários maiores estudos nas áreas de Engenharias acerca do reaproveitamento deste material como por exemplo no próprio concreto.

As usinas de beneficiamento de resíduos de construção e demolição que por sua vez transformam os RCD em agregados reciclados vêm sendo de uma maneira geral apresentadas como alternativas para o destino adequado ao combate no despejo ilegal do material, bem como diminuir a extração dos recursos de matéria-prima (SILVA, MEIRA E ARAÚJO, 2015). Ainda, contribuem com a limpeza pública nos municípios bem como com as técnicas e regulamentações para implantação e funcionamento das usinas de beneficiamento. No Brasil, ainda é modesto o número de usinas de reciclagem instaladas (FRASSON, 2017). A Figura 3 e Figura 4 ilustram o layout esquemático de uma central de usina de beneficiamento de RCD.

FIGURA 3- LAYOUT ESQUEMÁTICO DE UMA CENTRAL DE USINA DE BENEFICIAMENTO DE RCD.



Fonte: Angulo e Figueiredo (2011)

FIGURA 4 - USINA DE REAPROVEITAMENTO DE RCD EM OPERAÇÃO



Fonte: Página domtotal.com – Reaproveitamento de resíduos sólidos da construção civil no Brasil

2.3 RECOMENDAÇÕES E ESPECIFICAÇÕES NORMATIVAS

As normalizações e recomendações para os agregados reciclados vêm sendo criadas e utilizadas em vários países: Estados Unidos; Alemanha; Dinamarca; Bélgica; países do Reino Unido; Holanda e Japão, entre outros, destacando-se a utilização dos agregados reciclados e o seu uso de maneira eficaz e satisfatória na busca de alternativas de diminuição dos impactos ambientais do ponto de vista social e econômico (LEITE, 2001).

De acordo com Leite, (2001) serão descritas as principais normas e regulamentações que fornecem diretrizes e possíveis formas de gerenciamento para avaliar o tipo de agregado reciclado e a situação correta de como inseri-los no setor da construção civil:

a. Especificação para concreto com agregados reciclados – comitê técnico RILEM TC 121-DRG, 1994

O comitê Rilem TC 121-DRG (1994) regulamenta e trata especificamente de dois tipos de materiais reciclados: aqueles componentes de alvenaria (Tipo I) e os componentes de concreto (Tipo II), que pela qual considera a granulometria de fração graúda desenvolvida por uma terceira categoria mista (Tipo III) obedecendo aos critérios máximos é mínimo de porcentagem de 80% para agregado natural (AN) é 10% em massa para agregado reciclado (AR) de alvenaria. A Tabela 3 cita várias especificações apresentadas pelo comitê técnico.

b. Regulamento da norma para o uso do agregado reciclado de concreto sobre a técnica de construção - Itália

Nós regulamentos Italianos o uso do agregado reciclado é recomendado pela norma UNI EN 1744-1 (2013) que especifica a sua utilização para produção do concreto reciclado numa substituição de 30% do agregado natural pelo reciclado, atendendo a uma resistência máxima de classe C30/37 desde julho de 2009 NTC 2008 (Grimaz, Barazza e Malisan, 2014).

TABELA 3 – REQUISITOS PARA AGREGADO RECICLADO DESTINADO AO PREPARO DE CONCRETO ESTRUTURAL

Propriedades	Tipo I	Tipo II	Tipo III
	ARM	ARC	ARC+NA
Densidade na condição de superfície saturada seca (SSD) (kg / m ³)	≥1,500	≥2,000	≥2,400
Absorção de água (%)	≤20	≤10	≤3
Quantidade de material com densidade SSD <2.200 kg/m ³ (%)	–	≤10	≤10
Quantidade de material com densidade SSD <1.800 kg/m ³ (%)	≤10	≤1	≤1
Quantidade de material com densidade SSD < 1.000 kg/m ³ (%)	≤1	≤0.5	≤0.5
Contaminantes (betume, vidro, metais) (%)	≤5	≤1	≤1
Metais (%)	≤1	≤1	≤1
Materiais orgânicos (%)	≤1	≤0.5	≤0.5
Filler, <63 μm (%)	≤3	≤2	≤2
Areia (%)	≤5	≤5	≤5
Sulfito solúvel em água (%)	≤1	≤1	≤1
Agregados naturais (%)	–	–	≥80
Agregado de tipo I (%)	-	-	≤10

ARM: Agregado de resíduo misto; ARC: Agregado de resíduo de concreto; ARC+NA: Mistura do resíduo de concreto + agregado natural

Fonte: RILEM TC 121-DRG (1994)

c. Recomendação e normas para uso dos agregados reciclados de concretos - Dinamarca

As recomendações Dinamarquesas especificam o uso dos agregados reciclados em uma porcentagem de até no máximo 20% de substituição em fração miúda pelo natural. Esses agregados estão separados em dois módulos de acordo as suas resistências e massa específicas (RANGEL, 2015).

Segundo Rangel (2015) a norma dinamarquesa apresenta dois grandes grupos que representam o tipo de uso dos agregados reciclados:

- O grupo I é representado pelas propriedades físicas e mecânicas caracterizadas por concretos provenientes de estruturas e de alvenarias. Já o grupo II é de origem residual de construção e demolição contendo pequenas quantidades de concreto e de alvenaria, sem qualquer tipo de contaminações para o seu uso, como apresentado na Tabela 4.

TABELA 4 – REQUISITOS DO USO DOS AGREGADOS RECICLADOS PELA NORMA DINAMARQUESA

Tipo de Agregado	Classificação	Indicação de uso	Ambientes	Propriedades físicas e mecânicas		
				Massa específica (Kg/dm ³)	Resistência exigida (MPa)	Módulo de deformação (%)
GP1	EC+CA	Concreto armado	Passivos + moderados	2,2	≤ 40	80
GP2	RC + CA	Concreto armado	Passivos	1,8	≤ 20	50

EC: Estrutura de concreto; CA: Concreto de Alvenaria; RC: Resíduo de construção;

Fonte: Rangel (2015) adaptado de Leite, (2001)

d. Requisitos para agregado reciclado destinado utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Brasil

No Brasil segundo a norma NBR 15116 (ABNT, 2004) especifica a utilização do AR em pavimentação e para produção de concreto sem função estrutural, desde que se enquadra em resíduos de classe A como descrito na Tabela 1 em acordo com a resolução CONAMA nº 307 (2002), e, portanto, podem ser reciclados e utilizados na própria obra ou em muitas outras aplicações, como disposto na resolução (CONAMA Nº 431, 2011). A Tabela 5 ilustra as recomendações sobre os agregados sem função estrutural, bem como as normas de ensaios e os seus parâmetros. Em seguida são apresentadas na Tabela 6 as recomendações do uso dos agregados em diversos países.

TABELA 5 – REQUISITOS PARA AGREGADO RECICLADO DESTINADO AO PREPARO DE CONCRETO SEM FUNÇÃO ESTRUTURAL

Propriedades		Agregado reciclado classe A				Normas de Ensaio	
		ARC		ARM		Agregado graúdo	Agregado miúdo
		Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo		
Teor de fragmentos à base de cimento e rochas (%)		≥90	-	<90	-	Anexo A	-
Absorção de água (%)		≤7	≤12	≤12	≤17	ABNT NBR NM 53	ABNT NBR NM 30
Contaminantes - teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Cloretos					ABNT NBR 9917	
	Sulfatos					ABNT NBR 9917	
	Materiais não minerais					Anexo A	Anexo B
	Torrões de argila					ABNT NBR 7218	
	Teor total máximo de contaminantes					-	
Teor de material passante na malha 75 µm (%)		≤10	≤15			ABNT NBR NM 46	

Fonte: ABNT NBR 15116 (2004)

TABELA 6- APLICAÇÃO E RECOMENDAÇÃO DO AGREGADO RECICLADO SEGUNDO NORMAS DE VÁRIOS PAÍSES

Continua

Especificação	Normas	Classificação	Máxima substituição de material natural / agregados reciclados		Condições de Uso	Máxima classe de Resistência	
			Graúdo	Miúdo			
BRASIL	NBR 15116	ARC	100%	100%	Concreto não estrutural	15 MPa	
		ARM					
RILEM	TC 121-DRG	ARC + NA	100%	Somente se os requisitos dos agregados naturais forem atendidos	Ambiente seco e molhado; sem agressividade no solo e/ou água	Sem limite	
		ARC					C50/60
		ARM					C16/20
ESPAÑA	EHE standard.	ARC	20%	0%	Não permitido em concreto pretendido	40 MPa	
HOLANDA	NEM 5905	ARC	100%	Somente se aplicado com agregado natural graúdo	Ambientes sem agressividade	C40/50	
		ARM				C20/25	
JAPÃO	BCSJ	ARM	100%	Até 100%, função da aplicação	Fundações e soluções com exigências mais brandas	18 MPa	
	JIS5021	ARM	n.i	n.i	Sem limitações	45 MPa	
	JIS5022	ARM	n.i	n.i	Elementos não sujeitos a congelamento e descongelamento	n.i.	

**TABELA 6 - APLICAÇÃO E RECOMENDAÇÃO DO AGREGADO RECICLADO SEGUNDO
NORMAS DE VARIOS PAÍSES**

Conclusão						
SUIÇA	-	ARM	100%	100%	Concreto Reforçado; concreto protendido somente com testes adicionais	C30/C37
ALEMANHA	DIN 4226- 100	ARM	20'-35%	0%	Carbonatação; Ataques químicos; não permitido para concreto protendido	C30/37 (20 % AR); C25/30 (35 % AR)

Fonte: GIMENES, (2020)

2.4 CARACTERÍSTICAS, COMPOSIÇÃO E GRANULOMETRIA DE RCD

Segundo Corinaldesi et al. (2011) os agregados reciclados têm características e composições totalmente diferentes em relação aos agregados naturais, fato esse atribuído pela heterogeneidade da sua composição que elevam sua porosidade, de tal maneira que resulta em maiores absorções de água. Conforme Leite (2001), afirma que estes fatores afetam nas propriedades mecânicas tais como: as resistências à compressão e a atração, sendo que a mais prejudicada é o módulo de deformação. Na mesma ideia a autora ressalta que as formas granulométricas dos grãos dos agregados predominam na influência do desempenho da concretagem final.

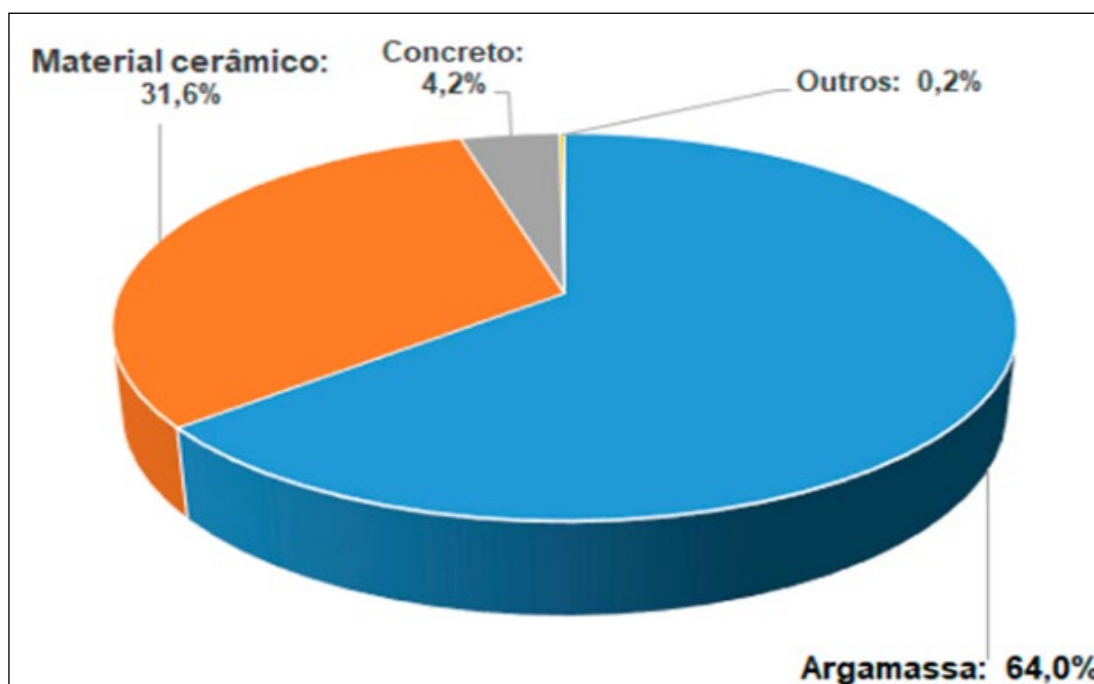
Souza (2006) e também, Santos e Leite, (2018) enfatizam que os resíduos, dado a sua natureza, têm as cerâmicas como elemento predominante, além de britas e concreto. A Tabela 7 mostra as características e composições dos agregados de RCD para diversas regiões do Brasil. Já a Figura 5 apresenta a composição média do RCD no Brasil.

TABELA 7 – COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS RCD DAS DIVERSAS REGIÕES DO PAÍS

AUTORES (ANO)	CIDADES	COMPONENTES (%)					
		Concreto	Argamassa	Cerâmicos	Cerâmicos Polidos	Rochas	Outros
Pinto(1986)	São Carlos (SP)	4,38	63,67	29,09	0,39	0,13	2,34
Brito(1999)	Itatinga (SP)	47,0	40,0	13,0	-	-	-
Lovato (2007)	Porto Alegre (RS)	18,3	44,2	35,6	0,1	1,8	-
Zordan(1997)	Ribeirão Preto (SP)	15,18	28,26	26,33	2,5	29,57	0,39
Cochran et al. (2010)	Salvador (BA)	-	53,0	14,0	5,0	22,0	6,0
Nóbrega(2002)	Campina Grande (PB)	10,0	28,0	34,0	11,0	9,0	18,0
Vieira(2003)	Maceió (AL)	18,65	27,82	48,15	3,06	-	2,32
Lopes(2005)	Florianópolis (SC)	32,9	39,1	8,7	-	18,4	0,9

FONTE:PINTO (1986), ZORDAN(1997), BRITO (1999), NÓBREGA (2002), VIEIRA(2003), LOPES (2005), LOVATO (2007), COCHRAN e TOWNSEND (2010)

FIGURA 5- COMPOSIÇÃO MÉDIA DO RCD NO BRASIL.



Fonte: Página domtotal.com – Reaproveitamento de resíduos sólidos da construção civil no Brasil

Com base nas características e natureza dos agregados reciclados eles podem ser classificados desde o ponto de vista ambiental e até pela sua correta destinação e manuseio (LEITE, 2001). Em uma análise visual mais detalhada, Tenório (2007) acredita que tais classificações dependem exclusivamente da separação em classes que envolvem materiais recicláveis ou não, sua natureza e propriedades.

Rangel (2015) mostrou que as características dos agregados reciclados que apresentam maior influência nas propriedades do concreto são: massa específica; composição granulométrica; forma e textura superficial e porosidade e absorção de água.

Segundo a ABNT NBR NM 248 (2003) três itens interferem no processo de determinação da composição granulométrica do agregado para confecção de concreto: dimensão máxima características (DMC), módulo de finura (MF) e o material pulverulento (MP). Na Tabela 8 estão apresentadas as principais características que devem ser atendidas pelos agregados naturais e reciclados pela sua composição granulométrica e método de ensaio pertinente.

TABELA 8- CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS PELA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA.

Agregado miúdo natural				Agregado graúdo natural			
Peneira (%)	Retida (%)	Acumulada (%)	Método de ensaios	Peneira (%)	Retida (%)	Acumulada (%)	Método de ensaios
4,8	0,9	1	ABNT NBR NM 248:2003	4,8	0	0	ABNT NBR NM 248:2003
2,4	3,8	5		2,4	2,6	3	
1,2	11,4	16		1,2	68,2	71	
0,6	27,1	43		0,6	24,6	97	
0,3	40,1	83		0,3	2,1	99	
0,15	15,3	98		0,15	0,6	100	
< 0,15	1,4	100		< 0,15	0,1	100	
Total	100	-----		Total	100	-----	
Dimensão máxima características (mm)		4,8	ABNT NBR NM 248:2003	Dimensão máxima características (mm)		19	ABNT NBR NM 248:2003
Módulo de finura (MF)		2,46		Módulo de finura (MF)		7	
Graduação		Zona 3 (Areia Média)	ABNT NBR 7211:2012	Graduação		Brita 1	NBR 7211:2019
Agregado miúdo reciclado				Agregado graúdo reciclado			
Peneira (%)	Retida (%)	Acumulada (%)	Método de ensaio	Peneira (%)	Retida (%)	Acumulada (%)	Método de ensaios
4,8	0,7	1	ABNT NBR NM 248:2003	4,8	0	0	ABNT NBR NM 248:2003
2,4	15,6	17		2,4	1,1	1	
1,2	17,9	35		1,2	34,8	36	
0,6	17,8	53		0,6	32,1	68	
0,3	23,3	76		0,3	16,5	85	
0,15	15,4	91		0,15	8,4	93	
< 0,15	9,3	100		< 0,15	7,1	100	
Total	100	-----		Total	100	-----	
Dimensão máxima características (mm)		4,8	ABNT NBR NM 248:2003	Dimensão máxima características (mm)		19	ABNT NBR NM 248:2003
Módulo de finura (MF)		2,73		Módulo de finura (MF)		6,62	
Graduação		Zona 3 (Areia Média)	NBR 7211:2005	Graduação		---	NBR 7211:2005

Fonte: LEITE (2021)

2.5 MASSA ESPECÍFICA E MASSA UNITÁRIA

A massa específica real é a massa do material por unidade de volume excluindo-se os vazios. Já a massa unitária é definida como sendo a massa do material por unidade de volume aparente da amostra, ou seja, incluindo-se os seus vazios (ABNT NBR NM 53, 2002).

Em geral, na determinação das massas específicas e unitárias dos agregados reciclados (miúdos e graúdos) observam-se valores menores que a dos agregados naturais (LEITE, 2001; VIEIRA, 2003; CARRIJO, 2005; TENÓRIO, 2007; CABRAL, 2007).

Cabral et al. (2010) acharam valores de massas específicas e unitárias inferiores nos agregados miúdos e graúdos reciclados. Constataram valores de massa específica dos agregados graúdos reciclados (AGR) de 2,27 kg/m³ para RC, 2,01 kg/m³ para reciclados de argamassa e 1,86 kg/m³ para reciclados de cerâmica vermelha.

Araújo et al. (2015) afirmam que pode haver uma diminuição de 3 a 4% na massa específica do concreto reciclado em comparação ao padrão, fato esperado devido ao aumento e a variação do teor de substituição do AN pelo AR.

Concretos produzidos com agregados de resíduo de construção de fração miúda e graúda da região de Criciúma – Santa Catarina apresentaram reduções das massas específicas de 2,52 kg/m³ de concreto com agregado natural para 2,41 kg/m³ de concreto com agregado reciclado (FIGUEIREDO e VARGAS, 2016).

Costa e Rios (2017) e Frotté et al. (2017) observaram diminuições das massas específicas seca e saturada de 3,4% dos agregados miúdos reciclados (AMR) em relação ao agregado miúdo natural (AMN), isso mediante as variações dos teores de substituições do concreto natural pelo reciclado onde oscilam de 2,26 kg/m³ a 2,28 kg/m³ para os concretos de 25% a 50% de porcentagem dos agregados.

De acordo com os levantamentos biográficos realizado por Viana, Sales e Sales, (2018) os valores das massas específicas avaliados pelo efeito da variabilidade de agregados de RCD da coleta 1 e coleta 2 sobre o desempenho mecânico do concreto de cimento *portland* tiveram suas médias de massas originárias oscilando 2,02 kg/m³ a 2,54 kg/m³ com respeito ao concreto padrão.

A massa específica dos agregados graúdos provenientes de RCD teve uma redução de 6% do concreto com agregados reciclados com relação ao concreto de referência, o autor conclui o seu estudo com outros fatores primordiais que influenciaram esse decréscimo tais como: a relação água/cimento, e as porcentagens de substituições dos agregados (SOUSA, 2018).

2.6 RESISTÊNCIA À ABRASÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS

O ensaio de resistência à abrasão é realizado de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 16974 (2021), cujo procedimento tem como base o método de ensaio de abrasão dos agregados graúdos usando a máquina "*Los Angeles*". É constituído por um tambor cilíndrico onde são colocados no seu interior os agregados e um conjunto de bolas de ferro fundido que giram por um tempo estabelecido, dando-se o processo de desgaste dos grãos. Segundo

ABNT NBR 7211 (2009), o índice de desgaste por abrasão deve ser inferior a 50% em massa do material para uso em concreto armado (DE BRITO e SAIKIA, 2012).

Segundo Leite (2001) os agregados graúdos reciclados (AGR) de resíduo de construção e demolição apresentam desgaste por abrasão superior aos agregados graúdos naturais (AGN). A autora indica o ensaio de abrasão como um procedimento adequado para a avaliação do agregado reciclado quanto ao desgaste ocorrido durante seu manuseio (LEITE, 2001).

Buttler (2003) estudou a produção do concreto proveniente da trituração de um concreto reciclado de fração graúda onde observou que o AGN apresentou uma perda por fragmentação de 20,5%, enquanto para os AGR obtidos com um dia de cura a perda foi de 41,7%.

2.7 TRABALHABILIDADE DOS CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS

A trabalhabilidade do concreto envolve várias características que, adequadas à obra, permitem o seu lançamento e adensamento à forma, resultando em perfeita moldagem e envolvimento da armadura (FROTTÉ et al. 2017). Essa trabalhabilidade pode ser medida através da consistência do concreto no estado fresco cuja medida mais utilizada é o ensaio de abatimento de tronco de cone, o chamado *slump test* (ABNT NBR 16889, 2021).

Em geral, concretos feitos com AR apresentam reduções nos índices de consistências em relação ao concreto convencional de referência. Tal fato pode ser contornado com uma umidificação prévia dos agregados reciclados e aumento da relação água cimento (*a/c*) em função dos teores de substituição de cada fração de agregado (BUTLLER, 2003; ANGULO, 2005; LOPES, 2005; CARRIJO, 2005; REIS, 2009).

Leite (2001) achou desvantajosa a utilização do abatimento de tronco de cone quando se produz concretos com material reciclado devido à porosidade dos agregados reciclados. A autora em sua pesquisa indicou o uso do ensaio de *VeBe* como mais adequado, pela praticidade do método em avaliar a mistura do concreto do ponto de vista de compatibilidade do seu uso.

Nogueira (2015) avaliou a mistura do concreto com AGR de concreto, analisou o abatimento de tronco de cone e concluiu que a relação *a/c* e as misturas dos agregados contribuíram para a diminuição de 10% a 21% no abatimento em comparação ao concreto convencional.

Por outro lado, Araújo et al. (2016) estudaram a influência de agregados reciclados de resíduos de construção nas propriedades mecânicas do concreto onde fixou o abatimento

do tronco de cone em (100 ± 20) mm. Obteve esses valores com aplicação de aditivo superplastificante nas quantidades de 0,35% a 1,2% nos traços de referência e no de substituição total do agregado graúdo.

Figueiredo e Vargas (2016) consideraram o abatimento para os concretos de referência em (10 ± 2) cm e para os concretos de agregados de RC em 14 cm para dois teores de substituições testados (30% e 60%) e com variação da relação a/c, obtendo resultados satisfatórios com a utilização de hiper plastificante.

Frotté et al. (2017) analisou os valores de abatimentos pelo troco de cone para os concretos com agregados reciclados de RCD e observou reduções de aproximadamente 43% no abatimento para substituições de 50% de AN.

Jayakody, Zimar e Ranaweera (2018) utilizaram agregados graúdos reciclados de RCD para uso em concretos não estruturais com substituições de até 90% do agregado graúdo obtendo reduções de 5% a 10% no abatimento em relação ao concreto de referência. Para manter um valor que fixou em 10 cm aumentou a relação a/c e utilizou superplastificante.

2.8 PROPRIEDADES MECÂNICAS NO ESTADO ENDURECIDO DOS CONCRETOS

As propriedades mecânicas no estado endurecido dos concretos segundo Leite (2001) apresentam ótimas resistências e durabilidades no que concerne a situações de intempéries e deteriorização.

Vários autores vêm estudando o concreto e destacam a importância das resistências à compressão e sua aplicação nas suas pesquisas tais como:

- Malešev; Radonjanin; Marinković, (2010), utilizaram agregado graúdo do concreto reciclado e encontraram resultados praticamente idênticos aqueles obtidos com agregado graúdo natural.
- Riaz et al. (2016), sugeriram que até 25% de substituição do agregado natural pelo reciclado de concreto praticamente não interfere na resistência do concreto.

Em suas conclusões vários autores concluíram de um modo geral, que é possível alcançar valores satisfatórios nas propriedades mecânicas do concreto, variando os teores de substituição dos agregados reciclados pelo agregado natural na produção de concreto estrutural e sem função estrutural, onde se destacou a durabilidade para os concretos de agregados reciclados aceitáveis (EVANGELISTA e DE BRITO et al. 2010; KUMUTHA e VIJAI, 2008; CORINALDES, 2010; SHI-CONG, ZHAN BAO-JIAN e POON CHI-SUN 2012, PRASADA e MADHAVI, 2013; GOMES, BRITO e BRAVO, 2014; RANGEL, 2015;

OPARA, EZIEFULA e UGWUEGBU, 2016; SEARA-PAZ et al. 2016; FROTT et al. 2017; SILVA, BRITO e DHIR 2019; LY e FAR, 2019).

Neville e Brooks (2010) citam as diferenças relacionadas às propriedades dos agregados convencionais e dos reciclados, devido a sua forma e textura para a produção do concreto, como responsável pela qualidade das ligações que exerce com os outros aglomerantes afetando o concreto em seu estado fresco e endurecido. Em sequência vêm citados as propriedades mecânicas no estado endurecido tais como: absorção de água por imersão; resistências à compressão e a tração; módulo de deformação e durabilidade do concreto.

2.8.1 Absorção de água por imersão

A ABNT NBR 9778 (2009) define a absorção de água por imersão de argamassas e concretos endurecidos como sendo o processo de preenchimento dos vazios da amostra pela água.

A partir de estudos realizados na produção dos concretos com agregados naturais e agregados reciclados pode-se afirmar que o material natural apresenta baixos índices de taxas de absorção em comparação ao reciclado, novamente, devido à maior porosidade do agregado reciclado - AR - (BRITO e SAIKIA, 2012).

Cabral et al. (2010) avaliaram a influência do tipo de agregado reciclado de RCD na produção do concreto e constataram taxas de absorção de AGR de concreto de 5,65%, de agregados de argamassa de 9,52% e uma alta de 15,62% para cerâmica vermelha.

Angulo e Figueiredo (2011) concluíram que a remoção do agregado de cerâmica vermelha (ACV) por separação visual diminui a taxa de absorção entre 4% a 7% e que o processo eficiente, influenciando positivamente as propriedades mecânicas do material.

Rodrigues e Fucale, (2014) verificaram taxas de absorções médias cerca de 10 vezes maiores após a imersão do agregado miúdo reciclado no período de três dias em comparação ao agregado natural. Esses resultados foram influenciados negativamente pela relação água/cimento, diminuição da massa específica à medida que os teores das substituições foram incrementados na mistura.

De acordo ao código de concreto estrutural Espanhola EHE: 2008 citado por Robles et al. (2014) a absorção de água é limitada a 7% para o uso em concreto com agregados reciclados de fração graúda, originando um aumento considerável a partir dos concretos com teores de substituições elevadas, fazendo com que alguns concretos violassem as especificações padrões, o que corroborou com os resultados de González et AL, (2015).

A partir do estudo feito das propriedades físicas e mecânicas do concreto com substituição parcial do agregado natural por resíduo de construção analisado por Frotté et al. (2017), foram encontrados índices elevados de absorção de 42 a 45%, tendo variado os teores de substituição de 25 a 50% da sua mistura em comparação ao concreto de referência.

Sousa (2018) e Nanya (2018) concluíram em suas pesquisas que os concretos produzidos com agregados reciclados proveniente da cominuição do concreto, tendem a aumentar as taxas de absorção numa margem de 50 a 80%, pelo fato de existir vários fatores que vêm influenciando essa propriedade de maneira negativa.

2.8.2 Resistência à compressão simples

A resistência à compressão é a propriedade mecânica do estado endurecido do concreto mais importante, porque esta está diretamente ligada à confiabilidade e segurança das estruturas. Esta proporciona o controle de qualidade, a resistência no processo de dosagens, bem como a segurança e estabilidade estrutural que virá a oferecer (NEVILLE e BROOKS, 2010).

Várias pesquisas são unânimes em descreverem que os concretos compostos com os agregados reciclados miúdo e agregados reciclado graúdos apresentam resistências à compressão inferiores por causa dos níveis de porosidades que contém ambos os materiais em relação aos agregados convencionais, fato esse relatado por diversos autores tais como: (RANGEL, 2015; FROTTÉ et al. 2017, NANYA, 2018).

Vale ressaltar que o aumento ou a diminuição dessa propriedade está diretamente influenciado por diversos fatores tais como: relação água/cimento, variação dos teores de substituições dos agregados naturais pelos reciclados e tempo de cura de hidratação (LEITE, 2001; BUTLLER, 2003; SOUZA, 2006; CABRAL, 2007; TENÓRIO, 2007; ANGULO E FIGUEIREDO 2011). A Tabela 9 apresenta os resultados da variação das resistências obtidos por vários autores.

Gonzáles-Fonteboa et al. (2008) confeccionaram concreto com 50% de substituição AGN pelo AGR, atingindo valores de resistência a compressão menores em comparação ao concreto convencional. Ainda nesse contexto ao utilizarem 8% de adição com sílica ativa e com agregado reciclado graúdo apresentaram resultados de 8,29% superiores aos 28 dias em relação ao concreto padrão.

No trabalho realizado por Faria et al. (2014) observou-se uma perda de resistência a compressão média de 27,62% do concreto padrão em relação ao CR, os pesquisadores

atribuíram essa disparidade ao baixo teor de cimento na mistura, qualidade do agregado e principalmente os tipos de substituições dos agregados naturais pelos reciclado.

TABELA 9 – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO OBTIDAS POR SUBSTITUIÇÕES DE AGREGADOS NATURAIS POR RECICLADOS.

Autor (Ano)	Traço (%)	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)					Observações
LEITE (2001)	Padrão	a/c					fc variou de 15 a 41 MPa aos 28 dias, as taxas de decréscimo foram de 26%; 13% para a/c de 0,40 a 0,80 dos agregados graúdos reciclados em relação aos agregados naturais.
		0,40	0,45	0,60	0,75	0,80	
	100% AGR e 0% AMR	39,6	31,6	19,6	14,2	13,0	
BUTLLER (2003)	Misturas	fc (MPa)		a/c	Idade de ensaios	O autor constatou que os agregados de concretos reciclados apresentaram fc superiores em comparação aos concretos convencionais. Exceto o concreto não-adensado (GRAN28) fato causado pelo alto índice de vazios e porosidade.	
	Referência	44,48		0,41	28 dias		
	GR1	47,74		0,45			
	GR7	45,29		0,48			
	GR28	49,22		0,45			
GRAN28	42,46		0,48				
LOPES (2005)	Misturas	fc (MPa)		a/c	Os agregados reciclados tiveram valores inferiores de 73,2%; 64% e 66,2% para os teores de 0%; 3,45% e 5,85% em relação ao padrão		
	Padrão	46,6		0,50			
	CRrcd 3,45%	29,8					
	CRrcd 0%	34,1					
CRrcd 5,85%	30,9						
TENÓRIO (2007)	Misturas	a/c					A partir da iteração agregado de ambas as frações a fc tiveram um aumento de 5,1% a 12,5% quando se variou a/c 0,4 a 0,5 e 0,67 os valores foram praticamente iguais. Em comparação aos concretos padrões.
		0,40	0,50	0,67			
	Padrão	40 MPa	30 MPa	20 MPa			
	MNG1-MRG1	32,2-36,0	28,0-31,3	20,1-20,4			
MNG2-MRG2	39,7-44,7	30,9-31,2	22,0-22,5				

AGR – agregado graúdo reciclado; AMR – agregado miúdo reciclado; GRi – agregado reciclado por idade; GRAN – agregado graúdo adensado; CRrcd – concreto reciclado produzido com RCD; MNG1 – agregado miúdo natural; MRG1 – agregado miúdo reciclado

Fonte: do autor (2021).

Araújo et al. (2015) afirma em sua pesquisa que é possível substituir até 100% do agregado graúdo natural (AGN) pelo agregado graúdo reciclado (AGR) sem que haja reduções significativas nas resistências à compressão em comparação ao concreto de referência.

Em sua pesquisa Figueiredo e Vargas (2016) analisaram a influência do uso do agregado de uma região de Criciúma/SC para concretos estruturais. Segundo os autores a resistência a compressão variou de 2 a 7% respectivamente, em função dos teores de substituições de 30 a 60%, já para o teor de 100% houve uma perda considerável de 50% dos agregados naturais pelo reciclado.

Frotté et al. (2017) a partir das propriedades mecânicas analisadas, propriamente a resistências á compressão obteve uma diminuição média de 13 a 22% aproximadamente para uma taxa de substituições de 25 a 50% do concreto padrão pelo reciclado. Ainda no mesmo contexto os autores afirmam probabilisticamente que até 50% da substituição parcial do agregado natural pelo reciclado o seu uso é confiável.

2.8.3 Resistência à tração por compressão diametral

Neville e Brooks (2010) afirmam que a resistência à tração por compressão diametral tem uma ligação direta com a resistência à compressão devido à zona de transição da interface que os mesmos dependem e através dos agregados de ambas as frações que afetam na sua variabilidade. Os autores salientam que os fatores que influenciam no maior ou menor valor da propriedade têm uma ligação com respeito à relação água/cimento, à fração volumétrica, e principalmente à qualidade que apresentam os agregados.

González-Fonteboa e Martínez-Abella (2008) analisaram concretos com 50% de substituição do agregado graúdo de concreto (AGN) pelo agregado graúdo reciclado (AGR) e 8% de adição mineral de sílica ativa, apresentando um aumento de 6,78% de resistências à tração diametral em comparação ao concreto convencional aos 28 dias.

Reduções nas resistências à tração por compressão diametral foram encontradas nos concretos com agregados reciclados por Faria et al. (2014) numa margem de 6% a 15% em relação ao concreto padrão. O autor, afirma ainda que essas reduções não se comparam com as reduções relativas à resistência à compressão.

Em suas conclusões, Araújo et al. (2015) afirmam que apesar das variações dos teores de substituições do agregado natural pelo agregado reciclado, a resistência à tração por compressão diametral se manteve praticamente igual em comparação ao concreto piloto.

Figueiredo e Vargas (2016) em sua análise puderam categoricamente comprovar que aplicação ao uso do CR é viável estruturalmente, a partir das resistências a tração por compressão diametral que variou numa escala de 1,5 a 8% em função do traço de referência.

Conclusões sobre a resistência à tração por compressão diametral foram observadas por Frotté et al. (2017), onde o mesmo desencadeou uma apresentação dos seus resultados inferiores em virtude do concreto de controle, e também a respeito dos níveis de taxas de substituições do agregado natural pelo reciclado.

2.8.4 Módulo de Elasticidade

Dada a máxima importância que exerce o módulo de deformação no que envolve a composição de elemento estrutural, os aglomerantes constituintes para produção do concreto variam de forma espontânea que segundo Cabral et al. (2008) apud Mehta e Monteiro (2014) afirmam:

[...] que o módulo de deformação do concreto está intrinsecamente ligado à fração volumétrica, à massa específica, ao módulo de deformação do agregado e da matriz de cimento e às características da zona de transição, à sua porosidade e, em grau um pouco menor, à dimensão máxima característica do agregado, à forma, à textura, granulometria e à sua composição mineralógica [...]

Neville e Books (2010) salientam que cuidados devem ser tomados com relação os agregados reciclados, que por sua vez obedecem a critérios, mais rigorosos no que tange ao processo de confecção do concreto. Várias conclusões encontradas em bibliografias no que diz respeito sobre os módulos de deformações dos concretos com agregados reciclados que resulta sempre em valores inferiores em comparação ao concreto natural são apresentados na Tabela 10.

TABELA 10 – MÓDULO DE ELASTICIDADE OBTIDO EM SUBSTITUIÇÕES DE AGREGADOS NATURAIS POR RECICLADOS.

Continua.

Autores/Ano	Traço (%)	Módulo de deformação aos 28 dias (MPa)					Observações
		a/c					
		0,40	0,45	0,60	0,75	0,80	
LEITE, 2001	Padrão	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	O E_c para os agregados reciclados foram menores para toas relação a/c, numa margem de 10% em comparação ao concreto padrão.
	100%AGR 0%AMR	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	
BUTLLER, 2003	Misturas	E_c (GPa)		a/c		O autor encontrou valores de E_c inferiores em uma média de 16% em relação ao concreto de referência, apesar de um grande aumento nas f_c GR1 a diminuição deu-se pela maior porosidade encontrada no agregado reciclado.	
	Referência	35,45		0,41			
	GR1	32,01		0,45			
	GR7	29,41		0,48			
	GR28	29,71		0,45			
	GRAN28	27,52		0,48			

TABELA 10 - MÓDULO DE ELASTICIDADE OBTIDO EM SUBSTITUIÇÕES DE AGREGADOS NATURAIS POR RECICLADOS

Conclusão					
LOPES, 2005	Misturas	E_c (GPa)	a/c		Reduções foram encontradas do E _c entorno de 5,2%; 7,9% e 6,5% dos respectivos concretos dos teores de 0%, 3,45% e 5,85% em relação ao concreto padrão.
	Padrão	23,7	0,50		
	CRrcd_0%	18,5			
	CRrcd_3,45%	15,8			
	CRrcd_5,85%	17,2			
TENÓRIO, 2007	Misturas	a/c			O autor constatou que para uma relação a/c = 0,67 o módulo de deformação (E _c) do agregado reciclado foi menor em relação ao concreto padrão.
		0,40	0,50	0,67	
	Padrão	22,5	36,0	36,3	
	MNG1-MRG1	21,3-26,9	24,0-31,8	20,4-27,2	
	MNG2-MRG2	30,3-32,5	23,1-30,2	24,9-27,4	

AGR – agregado graúdo reciclado; AMR – agregado miúdo reciclado; GRi – agregado reciclado por idade; GRAN – agregado graúdo adensado; CR_{RCD} – concreto reciclado produzido com RCD; MNG1 – agregado miúdo natural; MRG1 – agregado miúdo reciclado

Fonte: do autor (2021)

Resultados de módulo de deformação foram encontrados por Cabral et al. (2008). Os pesquisadores acharam valores inferiores em comparação dos concretos confeccionados por agregados naturais. A partir dos testes feitos puderam afirmar que os agregados graúdos de concreto vermelho (AGCV) exerceram uma influência negativa sobre os módulos, bem como os agregados graúdos de concreto (AGC).

Araújo et al. (2016) constataram reduções médias nos módulos de deformações numa margem de 6 a 12%, os autores chegaram a conclusão que tais resultados foram extremamente influenciados pelos os teores de substituições dos aglomerantes naturais pelo reciclados.

Em conclusões de sua pesquisa Figueiredo e Vargas (2016) encontraram quedas de módulo de deformação até 11%, 24% e 60% mediante ao aumento dos teores de substituição de agregados reciclados de porcentagens de 30%, 60% e 100% em relação ao concreto padrão.

Frotté et al. (2017) afirmam em sua análise que independentemente das taxas de substituições o concreto com agregados reciclados sempre apresentou módulo de deformação em torno de 15 a 30% menor em comparação ao concreto convencional, numa faixa de substituição do agregado natural pelo reciclado de 25% a 50%.

2.8.5 Durabilidade do concreto com agregado reciclado

Segundo o conceito de durabilidade, Jiménez e Moreno (2015) definem como sendo um período em que um material tende a resistir aos impactos ambientais e que volta ser operado novamente baseando nas suas propriedades iniciais.

A durabilidade dos concretos produzidos com agregados naturais e reciclados de acordo com Leite (2001) está relacionada com a permeabilidade dos concretos. A mesma autora afirma que essa propriedade está ligada à porosidade, à relação água/cimento e às taxas de absorção de água de cada material.

Cabral (2007), em sua pesquisa realça que a durabilidade do concreto indica a segurança ou estabilidade de uma estrutura. Mehta e Monteiro (2014) afirmam que para alcançar uma ótima segurança faz-se necessário conhecer os tipos de ensaios e as camadas de poros existentes no concreto.

Três tipos de testes foram necessários para analisar os parâmetros de durabilidades dos concretos com misturas de agregados finos reciclados citados por Evangelista e De Brito (2010), onde os autores mediram a absorção por imersão, absorção por capilaridade e penetração de cloretos. Em suas conclusões afirmaram que a substituição total do agregado natural fino pode acarretar sérios problemas de durabilidade.

Koue Poon (2012) compararam os concretos com substituição de agregado natural pelo agregado reciclado utilizando produção parcial do cimento pela adição de cinza volante. Os pesquisadores concluíram que as propriedades de durabilidades são diminuídas em função dos teores de substituições e que podem ser compensadas pela aplicação de ligantes.

Em conclusão do seu trabalho referente à durabilidade, Nanya (2018) enfatiza que a porosidade é um fator chave nos concretos com agregados reciclados, tanto para controle na produção quanto no uso do concreto.

2.9 VIGAS DE CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS

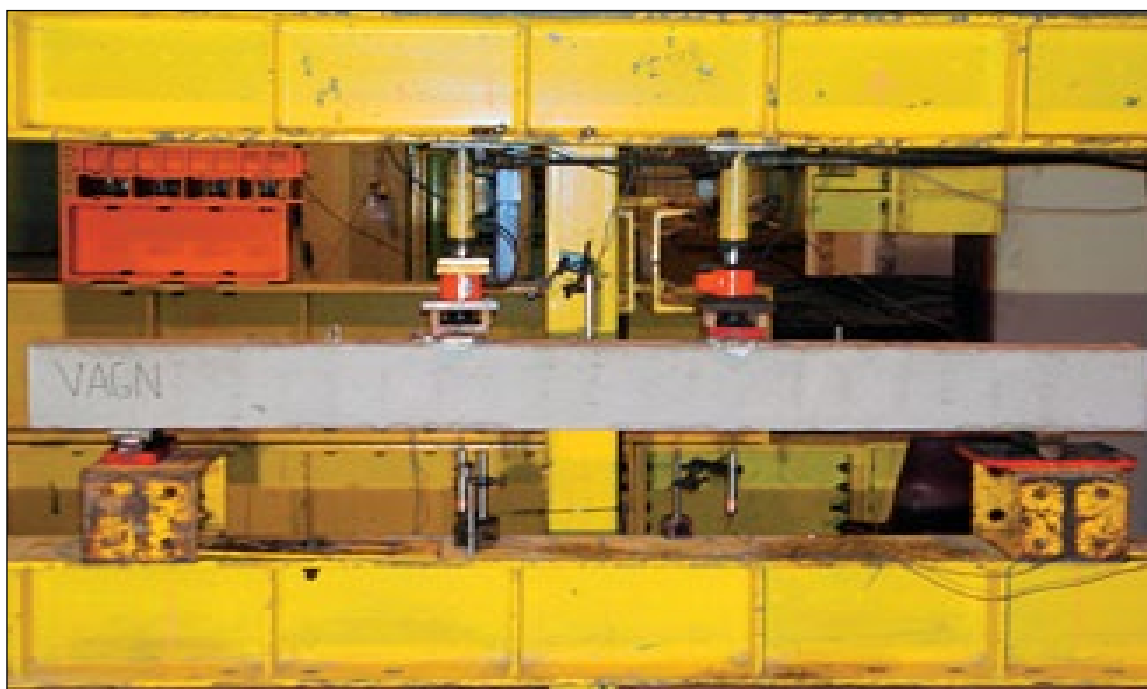
Santos, Branco e Brito, (2004) realizaram ensaios em vigas fabricadas em três misturas de concreto designado como NAC, RCA-WC e RCA-SL sendo:

- NAC: Concreto com agregado natural
- RCA-WC: Concreto com agregado reciclado – zona norte
- RCA-SL: Concreto com agregado reciclado – zona sul

As vigas tinham seções transversais com 15 centímetros (cm) de largura e 20 cm de altura, com comprimento de 2,20 metros, com armaduras executadas com barras longitudinais

de 16 milímetros (mm) de diâmetro e estribos de 8 mm de diâmetro a cada 10 cm. As vigas foram ensaiadas para um modo de falha a flexão sob aplicação de uma carga pontual variável entre ciclos (SANTOS, BRANCO E BRITO, 2004). As vigas de concreto armado foram ensaiadas conforme arranjo apresentado na Figura 6, com forças aplicadas em dois pontos.

FIGURA 6 – ARRANJO DE ENSAIO PARA AS VIGAS DE SANTOS, BRANCO E BRITO, (2004)



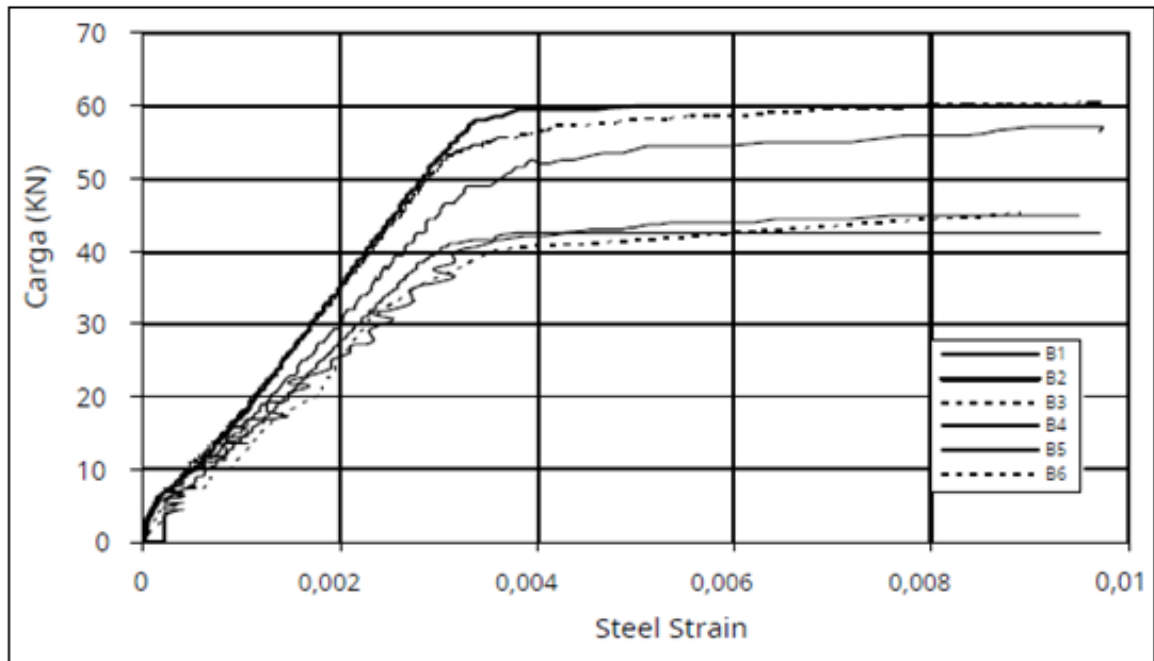
Fonte: Santos, Branco e Brito (2004)

Os resultados obtidos nas vigas apresentaram um padrão em todas as faixas durante a flexão foi semelhante na análise das deformações nas barras e nos deslocamentos medidos no meio do vão (SANTOS, BRANCO E BRITO, 2004).

A partir de um programa experimental, AL-ZAHRAA; EL-MIHILMY; BAHAA, (2010) testaram seis vigas de concreto armado designadas como B1 e B4: vigas de concreto com agregado natural e as vigas B2, B3, B5 e B6: foram produzidas com concreto de agregado reciclado (RAC) nas porcentagens de 25% e 50% em substituições do agregado natural (AN) pelo agregado reciclado (AR), projetadas para diferentes modos de falhas tais como: a viga B1 composta por agregado natural falhou na flexão do meio do vão, o mesmo comportamento surgiu com as vigas B2 e B3 formadas por agregados reciclados de 25% e 50% ambas falharam por flexão clássica, já a viga B4 composta de agregado natural excedeu no seu limite com uma carga máxima falhando a flexão no meio do vão o mesmo comportamento para as vigas B5 e B6.

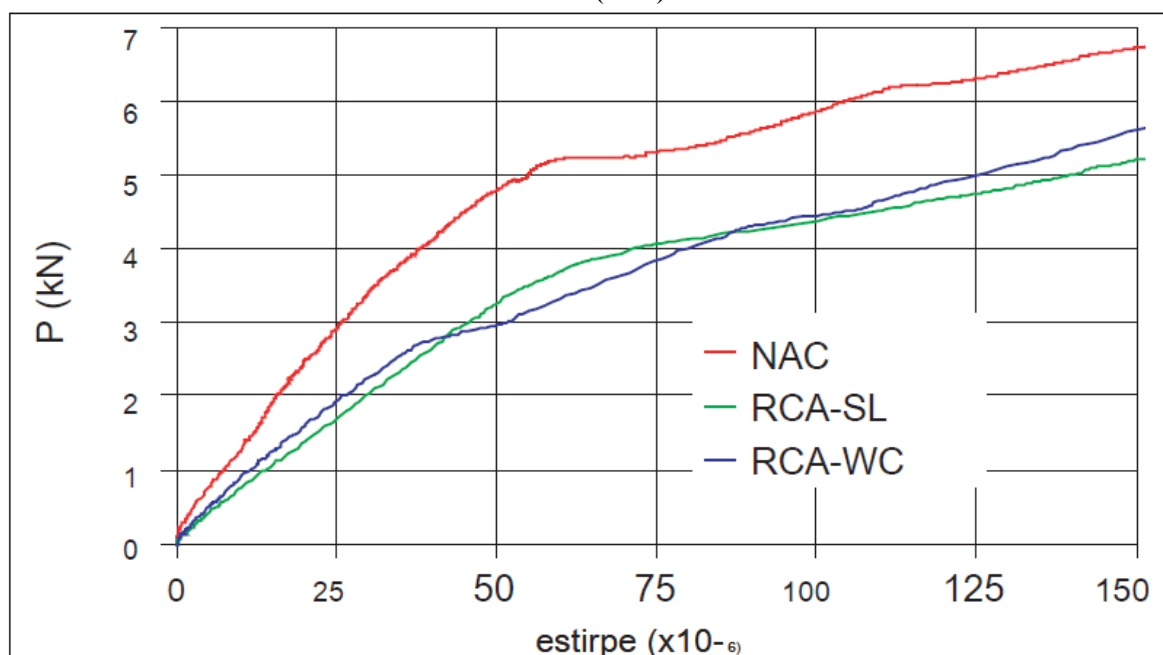
Al-zahraa; El-mihilmy; Bahaa, (2010) constataram que os resultados observados foram similares entre as vigas, com ruptura caracterizada por tensões normais, com escoamento do aço, resultados semelhantes aos encontrados por Santos, Branco e Brito (2004). Os modos das diferentes vigas estão apresentados nas Figuras 7 e Figura 8.

FIGURA 7 – RELAÇÕES CARGA-DEFORMAÇÃO DAS VIGAS TESTADAS POR AL-ZAHRAA; EL-MIHILMY; BAHAA, (2010)



Fonte: Al-zahraa; El-mihilmy; Bahaa, (2010)

FIGURA 8 – CARGA / DIAGRAMA ESTIRPE REFORÇO INFERIOR POR SANTOS, BRANCO E BRITO (2004)



Fonte: Santos, Branco e Brito (2004)

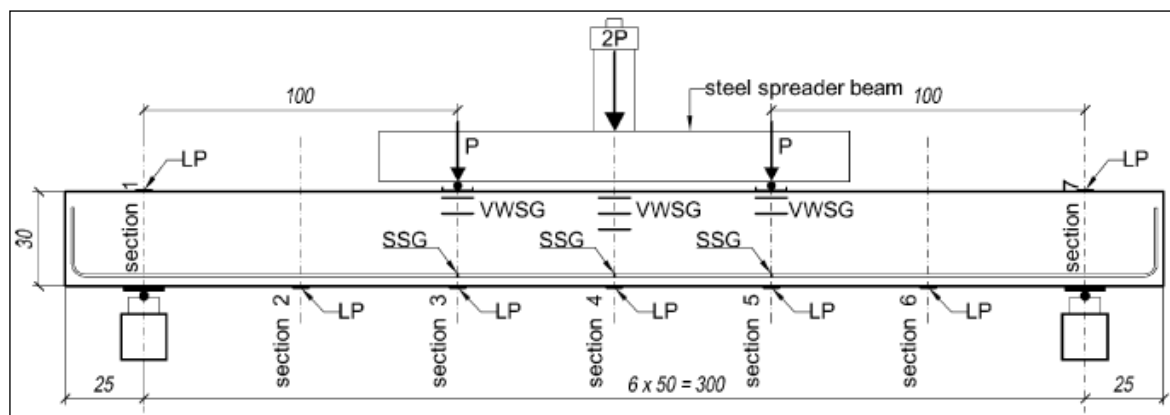
A Figura 9 apresenta a descrição e detalhamento de instrumentação em vigas de concreto armado testadas por Ignjatović et al. (2013). Esses autores ensaiaram três vigas denominadas NAC, RAC50 e RAC100 com diferentes tipos de concreto e taxas de armadura longitudinal, para os concretos com agregados reciclados foram executadas nove vigas com variação de teores diferentes como: NAC-1, RAC50-1, RAC100-1; NAC-2, RAC50-2, RAC100-2 e NAC-3, RAC50-3, RAC100-3.

As nove vigas tiveram ensaios padronizados. Todas as vigas foram projetadas para um modo de falha a flexão, ou seja, foram reforçadas com armadura transversal suficiente para evitar a ruptura por cisalhamento. Tais vigas foram denominadas como:

- NAC: Concreto com agregado natural
- RAC50: Concreto com 50% de agregado reciclado
- RAC100: Concreto com 100% de agregado reciclado

As vigas tinham seções retangulares com dimensões de 20 cm de largura e 30 cm de altura, com comprimento total de 3,5 m, ensaiadas em vão de 3 metros e forças aplicadas a cada terço de vão (IGNJATOVIĆ ET AL, 2013).

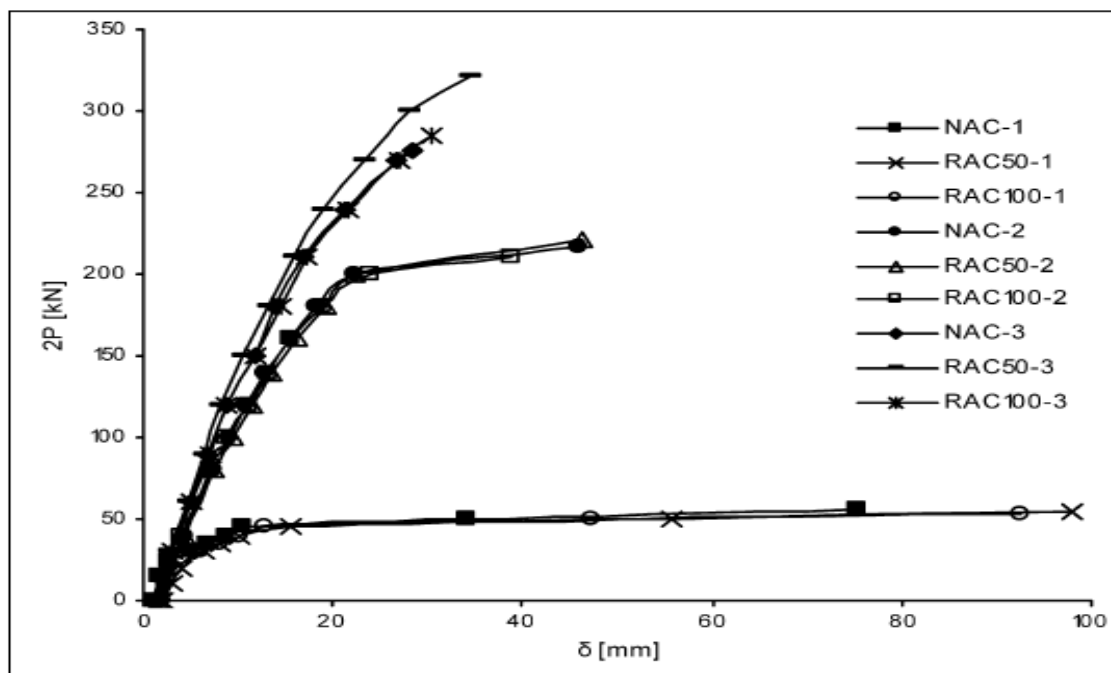
FIGURA 9 – DETALHES DAS VIGAS ENSAIADAS POR IGNJATOVIĆ ET AL. (2013).



Fonte: Ignjatović et al. (2013)

Novamente os resultados obtidos para as substituições foram semelhantes aos obtidos pelas vigas de concreto convencional, reforçando os resultados obtidos pelos pesquisadores anteriormente mencionados (IGNJATOVIĆ et al. 2013). Sendo que as deformações ilustradas por Al-zahraa; El-mihilmy; Bahaa, (2010) e Al-zahraa; El-mihilmy; Bahaa, (2010) indicam semelhanças nos seus modos de falhas. Figura 10.

FIGURA 10 – DESVIO DE CARGA CURVAS PARA DIFERENTES CONCRETOS POR IGNJATOVIĆ ET AL. (2013)



Fonte: Ignjatović et al. (2013)

3 MATERIAIS E MÉTODO

3.1 Caracterização da área

Esta pesquisa teve por objetivo avaliar a substituição do agregado graúdo natural por agregado reciclado de resíduos da construção e demolição.

Neste aspecto a pesquisa envolveu a necessidade de permear por várias áreas da Engenharia Civil destacando-se a área de estruturas, a área de materiais de construção e a área ambiental.

Dentro da área ambiental o trabalho foi inserido quando se dispôs a reutilizar materiais de descarte na produção de concreto para a construção civil. Ainda, tal ação reduz a extração do agregado natural, contribuindo para menor degradação do meio ambiente.

Para uso do RCD como material de construção enquanto agregado graúdo, já se pode fazê-lo para concretos não estruturais. Ao propor o uso desses RCD como agregado graúdo para o concreto estrutural, análises das propriedades do concreto endurecido tais como massa específica, porosidade e principalmente resistência à compressão simples, precisam ser conhecidas.

Na área estrutural, o desempenho do concreto estrutural convencional sob os efeitos de forças que o venham a solicitar já é bem conhecido e amplamente utilizado. Ao substituir o agregado graúdo natural é preciso ter garantias que o desempenho desses “novos concretos” seja compatível com o convencional, utilizando para isso os critérios de dimensionamento do concreto armado.

3.2 Materiais empregados

Pelo que foi proposta, a pesquisa teve o emprego de materiais de construção oriundos da região da cidade de Bauru, estado de São Paulo.

Tais materiais compreenderam os resíduos da construção e demolição, os agregados graúdos e miúdos; água, cimento e barras de aço, todos adquiridos na região.

Equipamentos e instrumentos de medição necessários ao bom desenvolvimento dos estudos eram pertencentes e estavam disponíveis no Laboratório de Materiais de Construção e no Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia da UNESP, do campus de Bauru. São exemplos desses: moldes para confecção de corpos de prova; balanças; estufas; câmara úmida; células de carga; transdutores de deslocamentos lineares; *strain gages* (extensômetros de resistência elétrica); atuadores hidráulicos, pórtico de reação e sistema de aquisição de dados.

3.3 Método de pesquisa

O método de pesquisa consistiu em um estudo minucioso das propriedades físicas e mecânicas dos agregados reciclados de RCD e dos concretos com agregados reciclados visando à utilização em elementos estruturais, tendo caráter teórico-experimental, com uma análise de caráter exploratório combinada com métodos qualitativos e quantitativos.

O programa experimental foi desenvolvido para determinar as propriedades do concreto confeccionado com o agregado graúdo reciclado em diversos teores de substituição, sempre tendo como referência o concreto convencional e os valores de resistências mínimas exigidos por normas brasileiras.

O procedimento adotado para o programa experimental dividiu-se em basicamente quatro etapas distintas e sequências, descritas a seguir.

- **Etapa I:** Caracterizou-se pela seleção do agregado graúdo reciclado de RCD e por sua caracterização quanto a algumas propriedades físicas como sua granulometria, massa específica e absorção de água, essenciais para definir as quantidades de material para cada substituição. As substituições foram definidas em 25%, 50%, 75% e 100%. Caracterizada a seleção dos materiais, métodos de ensaios e suas propriedades, descrição da dosagem dos agregados naturais e reciclados, definiu-se um traço padrão, convencional, para um concreto cujo valor de resistência à compressão média fosse da ordem de 25 MPa a 30 MPa.

- **Etapa II:** Foram realizados estudos de traços em caráter exploratório sendo avaliada principalmente a resistência à compressão para as diversas substituições em comparação ao traço convencional. Esta fase permitiu concluir que as substituições de 50% e 100% ofereceram condições de resistência satisfatórias e foram os valores analisados.

- **Etapa III:** Em vista dos resultados anteriores, foi realizado um planejamento estatístico fatorial para a produção dos concretos e moldagem de corpos de provas em quantidades representativas para determinação das principais propriedades do concreto produzido com agregado reciclado de RCD.

- **Etapa IV:** Definidos os traços foram moldadas as vigas com comprimentos de 2,5 metros e seção transversal de 12 cm x 25 cm, devidamente armadas e ensaiadas.

O comportamento das vigas sob o carregamento imposto foi analisado em acordo com os critérios de dimensionamento das vigas de concreto armado, conforme ABNT NBR 6118 (2014), possibilitando a discussão teórica sobre esse comportamento e permitindo as

primeiras impressões sobre o uso do agregado graúdo reciclado de RCD em concreto para uso estrutural, especificamente no caso de vigas.

3.4 TRAÇOS COM AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS

Neste item serão abordadas as características e seleção dos materiais com agregados naturais e reciclados provenientes da região da cidade de Bauru, estado de São Paulo, tais materiais compreenderam os resíduos da construção e demolição (RCD), os agregados graúdos (AG) e miúdos (AM); água, cimento e barras de aço, todos adquiridos na região.

3.5 SELEÇÃO DOS MATERIAIS E TRAÇOS

Os materiais utilizados nesta pesquisa para a produção dos concretos foram adquiridos em lojas da cidade de Bauru e, à exceção do cimento, em um único lote procurando-se eliminar outras variáveis que podem interferir nas propriedades finais do concreto e prejudicar comparações de resultados.

Os materiais foram devidamente estocados nas dependências dos Laboratórios de Materiais de Construção e de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UNESP/Bauru, seguindo as boas práticas de armazenagem de materiais de construção.

3.5.1 Cimento

O cimento utilizado na pesquisa inicialmente foi o cimento Portland CII F-32, escolhido pela sua aplicação corrente na construção civil e facilmente encontrado nas lojas de materiais de construção.

3.5.2 Agregado miúdo natural

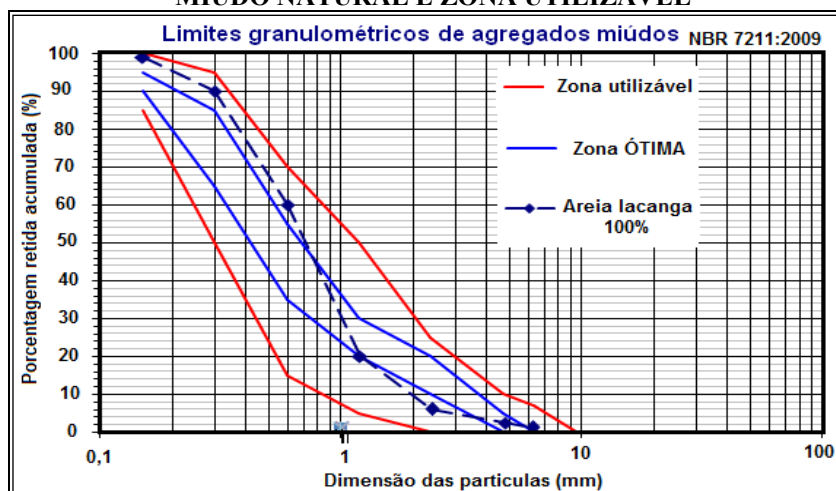
O agregado miúdo utilizado foi uma areia de origem natural extraída de um segmento quartzoso, recolhida do Rio Tietê na região do município de Iacanga, estado de São Paulo. Tem como classificação areia grossa, zona 2, conforme especificação ABNT NBR 7211 (2009) e sua composição granulométrica está apresentada na Tabela 11 e na Figura 11 indica a sua curva granulométrica em relação aos limites especificados, a areia utilizada está apresentada na Figura 12.

TABELA 11 – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO NATURAL

Peneiras		Massa retida (g)			Porcentagem retida (%)	
Nº ABNT	Abertura (mm)	1ª deter.	2ª deter.	Média	Individual	Acumulada
	6,3	3,35	3,35	3,35	1,12	****
4	4,8	5,08	5,08	5,08	1,69	2,3
8	2,4	12,7	12,7	12,7	4,23	6
16	1,2	56,37	56,37	56,37	18,79	20
30	0,6	131,53	131,53	131,53	43,84	60
50	0,3	77,37	77,37	77,37	25,79	90
100	0,15	10,64	10,64	10,64	3,55	99,01
Fundo		2,96	2,96	2,96	0,99	****
Total		300	300	300	100,00	299,84
Modulo de Finura				3,0		
Massa Total da Amostra				300 (g)		

Fonte: do autor (2021)

FIGURA 11- CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO NATURAL E ZONA UTILIZÁVEL



Fonte: do autor (2021)

FIGURA 12 - AREIA GROSSA UTILIZADA PARA OS EXPERIMENTOS



Fonte: do autor (2021)

3.5.3 Agregado graúdo natural

O agregado graúdo natural tem origem basáltica, encontrada na região do município de Pederneiras, estado de São Paulo com granulometria correspondente a de brita 1. A Figura 13.a ilustra o agregado graúdo natural e a Figura 13.b ilustra o conjunto de peneiras para determinação de curva granulométrica.

FIGURA 13- AGREGADO GRAÚDO NATURAL E CONJUNTO DE PENEIRAS.



Fonte: do autor (2021).

3.5.4 Água

A água utilizada para a produção do concreto é proveniente de um poço que está localizada ao lado do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UNESP/Bauru.

3.5.5 Agregado graúdo de resíduo de construção e demolição

O agregado reciclado de RCD para a substituição do agregado natural foi adquirido por doação junto à Empresa Portal Rays localizada no Distrito Industrial III da cidade de Bauru/SP.

A partir da obtenção do material suas propriedades principais foram determinadas através de ensaios padronizados pelas normas brasileiras pertinentes (ABNT NBR 7211, 2009). A Figura 14.a ilustra certa quantidade do agregado graúdo de RCD em bandejas e a Figura 14.b ilustra o conjunto de peneiras preparado para o ensaio de granulometria.

FIGURA 14 - AGREGADO GRAÚDO DE RCD E CONJUNTO DE PENEIRAS.



Fonte: do autor (2021)

A usina obtém o RCD a partir de caçambas de entulhos recolhidas em obras de construção ou demolição para posterior separação manual de contaminantes e britagem por peneiras, como ilustra a Figura 15.

O ensaio da composição granulométrica dos agregados naturais e do material reciclado de fração miúda e graúda foi determinado pela especificação da ABNT NBR 7211:2009, onde após o ensaio com o conjunto das peneiras, se classificou o agregado graúdo como aquele em que até 15% do material passar pela peneira de 4,8mm.

FIGURA 15 – PENEIRADOR PARA SEPARAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO RECICLADO.



Fonte: do autor (2021).

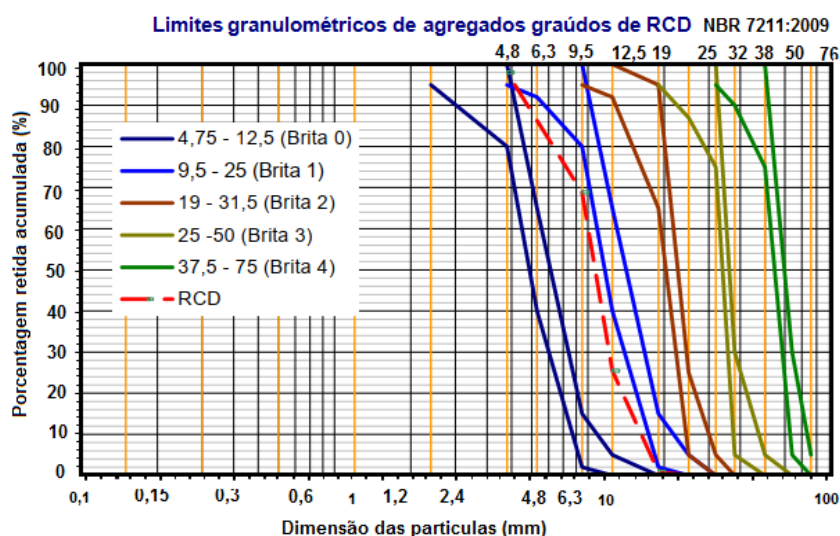
O agregado graúdo reciclado foi inicialmente peneirado em peneira manual de malha 4,8 mm para separação dos finos e posteriormente feito o ensaio de granulometria, conforme resultados apresentados na Tabela 12 e na Figura 16.

TABELA 12 - COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO RECICLADO.

Peneiras (mm)	Retido (%)	Retido acumulado (%)
19	2,2	2
12,5	50,3	53
9,5	33,0	87
6,3	12,5	99
4,8	2,0	100
Fundo	100	-
Modulo de Finura		6,89
Dimensão máxima (mm)		19
Gradação		1

Fonte: do autor (2021)

FIGURA 16 – CURVA GRANULOMÉTRICA PARA O AGREGADO GRAÚDO DE RCD



Conforme o resultado apresentado no gráfico da Figura 16 o ensaio da granulometria do agregado graúdo reciclado forneceu curva granulométrica contínua e compatível com faixa de graduação do agregado natural designado brita 1, apresentando módulo de finura igual a 6,89. Resultados aproximados de módulo de finura foram observados por vários autores em suas pesquisas no que diz respeito às condições de distribuições contínuas dos AGR em comparação ao AGN. Na Tabela 13 são apresentados os resultados de outros autores.

TABELA 13 – RESULTADOS COMPARATIVOS ENTRE AUTORES PARA O MÓDULO DE FINURA

Autores/ano	Módulo de finura	Dimensão Máxima (mm)	Faixa de graduação
LEITE, 2001	6,69	19	Os agregados graúdos reciclados (AGR) não se encaixaram nas faixas de graduação a partir da norma prescrita ABNT NBR 7211:2009.
VIEIRA, 2003	6,62	19	
LOVATO, 2007	6,82	25	
RANGEL, 2015	6,78	19	
SOUSA, 2018	6,64	19	

Fonte: do autor (2021)

3.5.6 Aço das armaduras longitudinal e transversal

As armaduras longitudinais foram compostas de duas barras de aço CA-50 com diâmetros de 12,5 mm e duas barras porta estribo com diâmetros de 5 mm cada. A armadura transversal consistiu em estribos confeccionados com barras de aço CA-50 de diâmetro de 5 mm cada. O espaçamento entre estribos foi de 10 cm com cobrimento de 12,5 mm (espaçadores feitos com barras de aço de 12,5 mm de diâmetro), Figura 17.

As dimensões das barras e comprimento da viga (2,50 metros) foram escolhidas em vista de equipamentos e fôrmas disponíveis no Laboratório, respeitando-se o modo de falha à flexão para o limite dos domínios de deformação 2 e 3.

FIGURA 17 – ARMADURA PARA AS VIGAS.



Fonte: do autor (2021)

3.5.7 Definições de traços e substituições

Na determinação dos traços para uso no presente estudo foram realizadas duas etapas exploratórias. Na primeira etapa foram preparados corpos de prova em pequenas quantidades do concreto padrão e dos concretos com agregados graúdos reciclados.

Para se ter uma referência padrão para o concreto convencional, foi adotada um traço tendo por base estudos de traços realizados por Barboza e Bastos, (2008). Como critério de escolha definiu-se o tipo de cimento e a resistência à compressão aos 28 dias com valores de 25 MPa a 30 MPa, valores que devem corresponder pelo menos a f_{ck} igual a 20 MPa. Adotou-se o traço unitário em massa 1:2,625:2,75:0,55 o qual corresponde a um volume de 2,625 litros.

As substituições foram determinadas inicialmente em quatro valores para, após análise dos resultados, se necessário assumem adotar valores intermediários. As substituições iniciais foram adotadas como 25%, 50%, 75% e 100%.

3.6 RESULTADOS INICIAIS E DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS

3.6.1 Traços exploratórios

Os primeiros traços utilizados estão indicados na Tabela 14. O traço padrão teve um volume maior para se obter sua melhor caracterização, principalmente com relação ao valor da resistência à compressão axial aos 28 dias, principal propriedade do concreto avaliada.

Ainda na Tabela 14, a variação do fator a/c se deu para compensar a maior absorção de água pelo agregado reciclado de tal modo a não se utilizar água de hidratação do cimento. Ou seja, o fator a/c foi mantido em 0,55 e o acréscimo devido à maior absorção resultou em um fator a/c aparente.

TABELA 14 - DOSAGENS DOS CONCRETOS INICIAIS PARA AS SUBSTITUIÇÕES ADOTADAS (KG).

Composição	Padrão	25 %	50 %	75 %	100 %
Cimento	40	18	18	18	18
Areia	105	47,25	47,25	47,25	47,25
Brita	110	37,13	24,75	12,38	-----
Água (a/c)	0,55	0,58	0,60	0,64	0,67
RCD	-----	10,55	21,10	31,65	42,20
Volume (l)	105	47,25	47,25	47,25	47,25

Fonte: do autor (2021)

Na Tabela 15 encontram-se os resultados da resistência à compressão (f_{c28}) obtida em corpo de prova (CP) cilíndrico de (10 x 20) cm e as resistências à tração diametral (f_{tD}) e em prisma (f_{tP}), além do módulo de elasticidade (E_c). Os ensaios foram realizados em máquina universal EMIC do Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UNESP/Bauru, todos na idade de 28 dias.

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 15, observa-se que nas reduções nos valores de resistência e elasticidade para as substituições de 25% e 50% são similares. Para as reduções de 75% e 100% as reduções já são maiores, com redução um pouco mais significativa para a substituição de 100%.

TABELA 15 – RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS (MPa)

Grupo	Traço/substituição	f_{c28} (MPa) Média	Número de Cps	Dp	Coefficiente de variação (%)
Controle	Padrão	29,44	8	1,17	3,96
PI	RCD = 25 %; a/c = 0,58; brita = 2,06	29,07	9	1,25	4,29
PII	RCD = 50 %; a/c = 0,60; brita = 1,38	27,58	8	1,43	5,18
PIII	RCD = 75 %; a/c = 0,64; brita = 0,69	22,77	9	1,26	5,53
PIV	RCD = 100 %; a/c = 0,67; brita = 0	24,03	10	1,75	7,28

Fonte: do autor (2021).

Pelo exposto e visando o uso máximo de RCD nos traços, o estudo será dirigido para as substituições de 50% e de 100%. Essas proporções são relevantes enquanto o objetivo é a utilização do RCD e a minimização da extração de agregados naturais.

3.6.2 Planejamento estatístico experimental

O planejamento estatístico experimental teve por objetivo determinar um número suficiente de repetições dos ensaios para avaliar com nível adequado de confiança os resultados a serem obtidos.

A partir dos resultados obtidos com os traços exploratórios, três variáveis de respostas obtidas nos ensaios iniciais foram considerados para o planejamento:

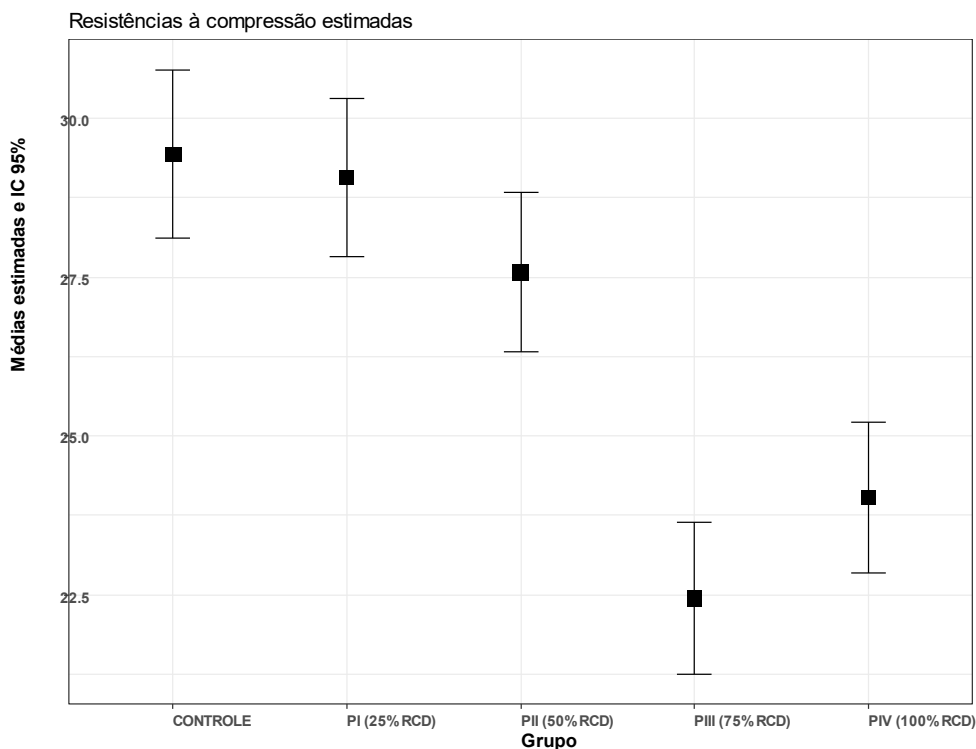
- A resistência à compressão, como objetivo alvo;
- Percentuais de substituição: 50% e 100%.
- Relação água cimento: foram utilizadas as relações a/c de 0,55 e de 0,667, esta última levando em consideração a maior absorção de água pelo agregado de RCD em relação ao natural.

Para analisar as melhores faixas de valores para cada grupo, foram utilizados os resultados do estudo piloto, os quais foram utilizados no ajuste de um modelo estatístico que considera tanto os efeitos principais da proporção de RCD, da relação a/c e da quantidade de brita, assim como o efeito de interação entre as duas primeiras variáveis. Esse primeiro modelo indicou que o efeito da brita na resistência não foi estatisticamente significativo. Dessa forma, essa variável foi desconsiderada nas etapas posteriores.

Inicialmente, os resultados foram analisados por meio de uma ANOVA one-way, em que os grupos apresentados na Tabela 2 foram considerados como fatores. Tendo em vista que os dados sugerem um efeito significativo de grupo na resistência à compressão ($p\text{-value} < 0$,

0001), foram realizadas comparações dos grupos aos pares por meio de testes com ajustamento dos graus de liberdade pelo Método de Tukey. Considerando um nível $\alpha = 5\%$ de significância, os resultados sugerem não existir diferença estatisticamente significativa entre os grupos Controle, PI e PII (todos os p-values superiores a 0,07) e também entre os grupos PIII e PIV (p-value = 0,10). As médias estimadas e intervalos de confiança 95% são mostrados no gráfico da Figura 18.

FIGURA 18 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO ESTIMADA E INTERVALOS 95% DE CONFIANÇA.



Fonte: do autor (2021)

Na etapa posterior, o %RCD, a relação água/cimento e a brita foram tratados como variáveis quantitativas na estimação de um modelo de regressão múltipla, com o objetivo de analisar o comportamento dessas variáveis na resistência. O modelo 1 considerou as três variáveis e os efeitos de interação das mesmas duas a duas, o modelo 2 excluiu tanto o efeito de brita quanto as interações envolvendo essa variável e o modelo 3 excluiu o %RCD, tanto como efeito principal quanto nos efeitos de interação. O Teste da Razão de Verossimilhanças foi utilizado na comparação desses modelos e apontou pela adequação dos modelos 2 e 3.

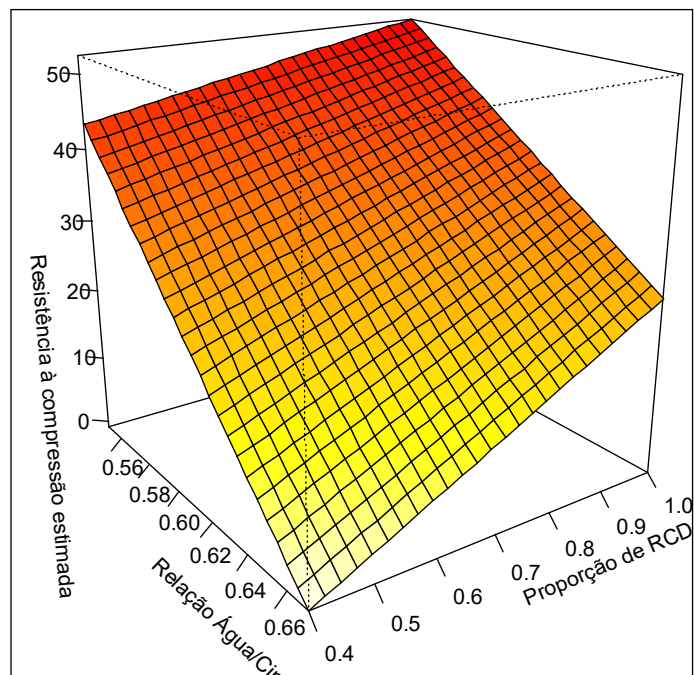
Na sequência, esses dois modelos foram comparados pelos valores de AIC (Akaike Information Criteria) e BIC (Bayesian Information Criteria), indicando mesmo desempenho

de ambos. Diante disso, e tendo em vista a correlação linear perfeita observada entre as variáveis %RCD e brita, optou-se pela permanência do %RCD nas análises, pelo fato do mesmo ser de maior interesse nesta pesquisa.

O modelo de regressão múltipla ajustado aos dados considerou tanto os efeitos principais do %RCD e da relação a/c, assim como o efeito de interação entre essas duas variáveis. Como o objetivo do trabalho era avaliar o efeito da inclusão de RCD na resistência à compressão, a mistura que utilizou apenas a brita foi excluída do banco de dados nessa etapa.

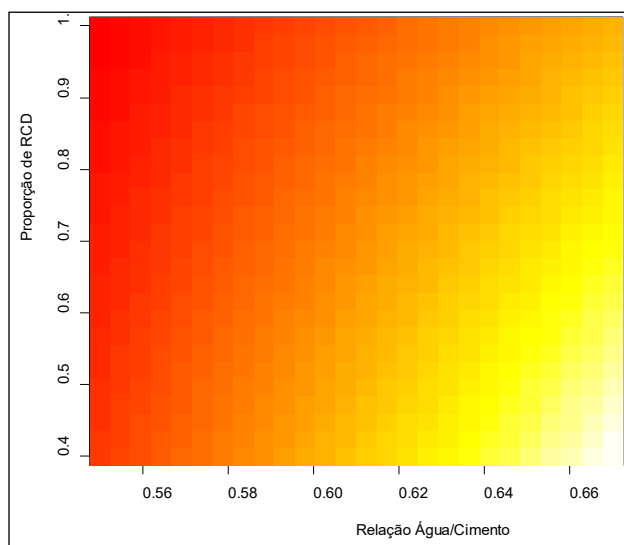
O software R(R CORE TEAM, 2017) foi utilizado nessa etapa, juntamente com a biblioteca *rsm* (LENTH, 2009). A Figura 19 apresenta a superfície ajustada aos dados a partir da função *lm* e na Figura 20 observa-se a projeção dessa superfície no plano definido pelas variáveis independentes. Os locais onde a curva apresenta tons mais próximos de vermelho indicam a região onde a resistência à compressão atingiu seus maiores valores.

FIGURA 19 - SUPERFÍCIE AJUSTADA AOS DADOS DOS ENSAIOS PILOTO



Fonte: do autor (2021)

FIGURA 20 - SUPERFÍCIE AJUSTADA AOS DADOS DOS ENSAIOS PILOTO



Fonte: do autor (2021)

A equação da superfície é dada na Equação 1 e o valor do coeficiente de determinação obtido foi $R^2 = 0,792$, indicando que o modelo representa 79,2% da variação total. O termo multiplicativo envolvendo os dois fatores na equação ajustada indica que o efeito da proporção de RCD na resistência depende da relação a/c empregada na mistura.

EQUAÇÃO 1

$$f_c = 287,23 - 104,64.(\%RCD) - 454,45.(a/c) + 217,81.(\%RCD).(a/c)$$

Os resultados desse estudo preliminar serviram para definir dois níveis de proporção de RCD e dois níveis de relação a/c que foram incluídos na etapa posterior, na qual será utilizado um planejamento experimental com um número maior de amostras. Tendo em vista que valores baixos de resistência foram observados para uma combinação de teores baixos de RCD e alta relação a/c (correspondendo à região mais clara na Figura 17), esse tipo de combinação foi descartado na etapa posterior e, desta forma, a proporção de RCD foi mantida nos valores de 50% e 100%. Quanto à relação a/c, buscou-se dois valores diferentes que permitissem confrontar o comportamento da proporção de RCD na resistência e, desta forma, foram escolhidos os teores 0,55 e 0,667.

A Tabela 16 apresenta o experimento em esquema fatorial 2^2 . De acordo com os resultados do estudo piloto, assumiu-se linearidade nos efeitos principais e presença apenas do termo quadrático misto no modelo (termo de interação). Dessa forma, não foram adicionados pontos centrais ao experimento.

TABELA 16 - CONFIGURAÇÃO DOS GRUPOS

Grupo	Proporção AN – RCD	Relação a/c
G1	50% - 50%	0,55
G2	0% - 100%	0,55
G3	50% - 50%	0,667
G4	0% - 100%	0,667

Fonte: do autor (2021)

Escolhida a configuração dos grupos a ser utilizado na etapa posterior, o software *G*Power 3.1.9.2* foi utilizado no dimensionamento do tamanho da amostra, considerando-se grupos de mesmo tamanho, a partir do teste *F-Snedecor* para ANOVA *two-way*, que segundo Larson e Farber, (2015, p. 510) consiste na comparação de dois modelos com variâncias de efeitos principais e termo de diferentes interações. No dimensionamento da amostra, considerou-se um tamanho de efeito médio segundo a definição (COHEN, 1988), ou seja, $\eta=0,06$, além de um poder $1-\beta=0,80$ e nível de significância $\alpha=0,05$. O valor η representa a quantidade de variância explicada pelo efeito de um fator e é dado pela Equação 2.

EQUAÇÃO 2

$$\eta = \frac{\text{Soma de quadrados devido ao efeito}}{\text{Soma de quadrado total}}$$

Dessa forma, se $\eta=0,06$, então o efeito do fator será considerado significativo se responder por, pelo menos, 6% da variação total. Os valores de α e β estão relacionados às probabilidades de cometer os erros de tipo I e de tipo II em um Teste de Hipóteses. Dessa forma, α representa a probabilidade de concluir β erroneamente que o fator exerce efeito na variável resposta quando isso não ocorre. O, β por sua vez, representa a probabilidade de concluir que o efeito não exerce influência na variável resposta quando, na verdade, essa influência existe.

Considerando os parâmetros adotados, o tamanho amostral total calculado foi de 124, ou seja, 31 espécimes por grupo. Na Tabela 17 são apresentados os traços para cada grupo (G1 a G4), denominados de TR1_50, TR2_50, TR1_100 e TR2_100.

TABELA 17 - DOSAGENS DOS TRAÇOS A PARTIR DO PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO (KG)

MATERIAL	PADRÃO	TR1_50	TR2_50	TR1_100	TR2_100
Cimento	1	1	1	1	1
Areia	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63
Brita	2,75	1,38	1,38	0	0
Água	0,55	0,55	0,67	0,55	0,67
RCD	0	1,17	1,17	2,34	2,34
Volume (l)	2,625	2,625	2,625	2,625	2,625

Fonte: do autor (2021)

3.6.3 Resultados dos ensaios para os grupos avaliados

Com os traços definidos foram moldados os corpos de prova para cada um dos 4 grupos definidos. A cura se deu em câmara úmida e os corpos de prova foram ensaiados em máquina universal de ensaio EMIC em acordo com ABNT NBR 5739 (2018), na idade de 28 dias. A Tabela 18 apresenta os valores médios obtidos nos ensaios de compressão axial para os traços TR1 e TR2 nas substituições de 50% e 100%.

TABELA 18 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.

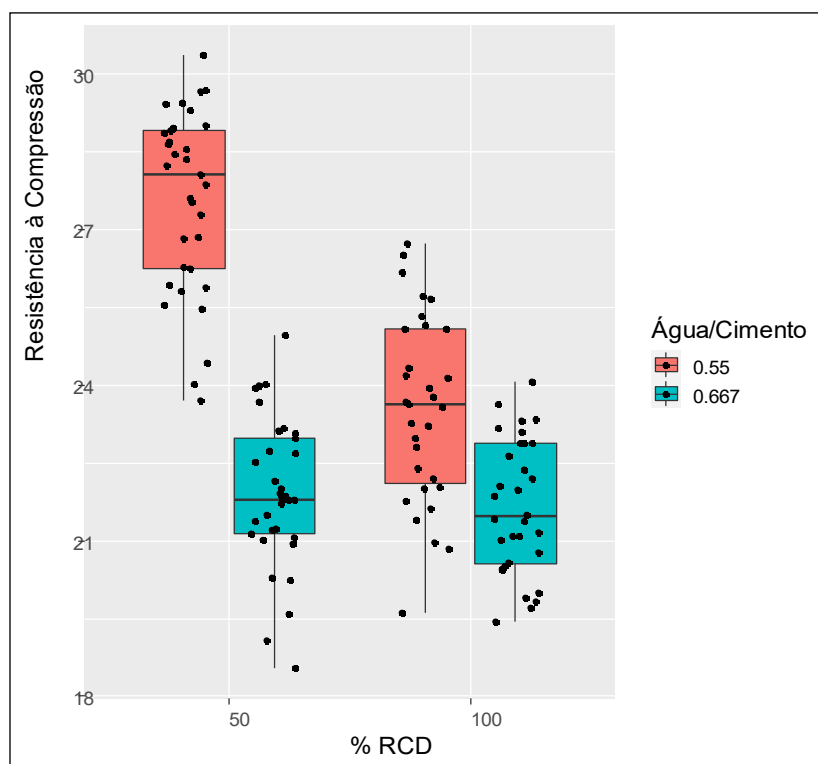
DESCRIÇÃO	TRAÇOS			
	TR1_50	TR2_50	TR1_100	TR2_100
Número de CPs	33	33	31	32
Tensão de ruptura média (f_{cm})	27,58	21,91	23,60	21,65
Tensão de ruptura característica (f_{ck})	24,67	19,50	20,35	19,51
Desvio Padrão (S)	1,76	1,45	1,79	1,29
Coef. de Variação (%)	6,37	6,65	7,64	5,98

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65 \times S$$

Fonte: do autor (2021)

Todas as análises foram realizadas no software *R*, versão 4.0.0. A biblioteca *ggplot2* apresentada pelos autores Moral, Hinde e Demétrio (2017), foi utilizada na construção do *boxplot* (caixa de plotagem), Figura 21.

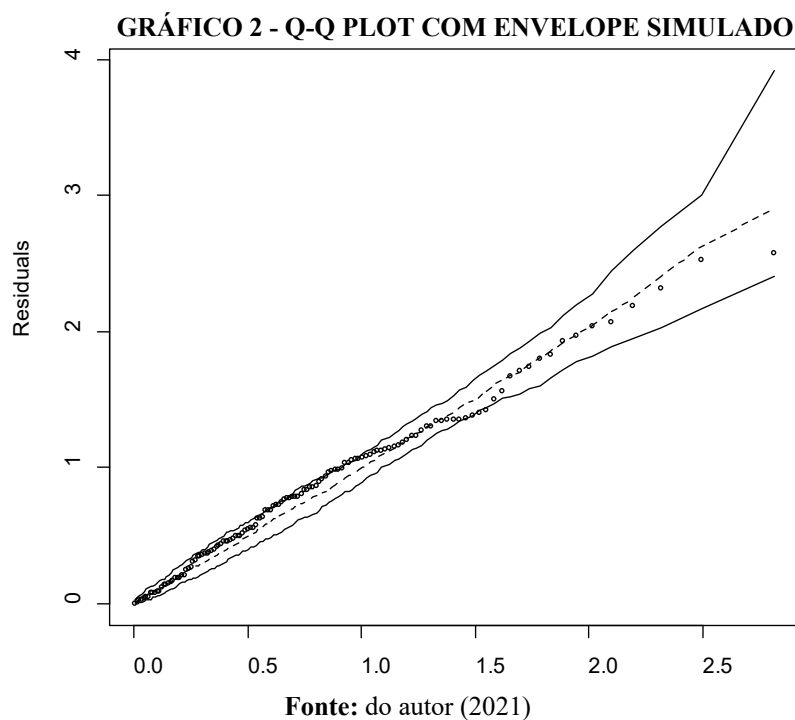
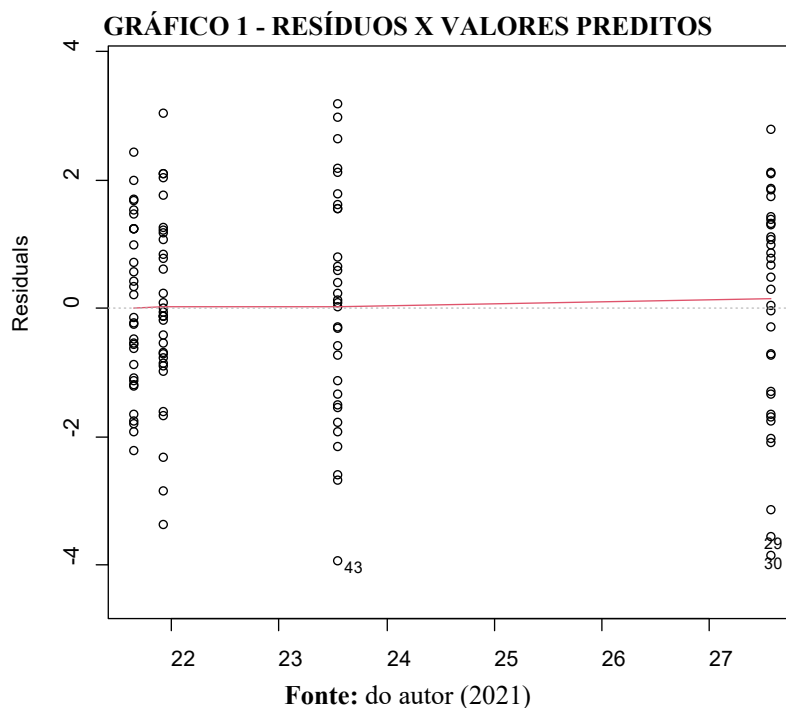
FIGURA 21 - RELAÇÕES PARALELAS ENTRE A RESISTÊNCIA VERSUS RCD



Fonte: do autor (2021)

Para a análise dos efeitos dos fatores %RCD e relação a/c na resistência à compressão (f_c), foi ajustado um Modelo Linear Geral aos dados, com a utilização da biblioteca *lme4* (BATES, MAECHELER e BOLKER,2015). Os modelos encaixados foram comparados a partir do Teste da Razão de Verossimilhança. A hipótese de normalidade dos resíduos do modelo foi avaliada a partir do *Q-Q Plot* com envelope simulado, criado com o uso da biblioteca *hnp* (MORAL, HINDE E DEMÉTRIO, 2017). A hipótese de homocedasticidade (variância constante) do resíduo foi verificada a partir do gráfico de Resíduos versus Valores Preditos. Para as comparações aos pares dos valores de resistência de acordo com os níveis dos fatores, foi utilizado o teste com ajustamento do valor-p pelo Método de Tukey, implementado a partir da biblioteca *emmeans* (LENTH et al.,2017). Os gráficos da superfície ajustada e das curvas de nível foram criados a partir da biblioteca *rsm* (LENTH, 2009).

Inicialmente, foi ajustado o modelo completo aos dados, considerando os efeitos principais de %RCD e relação a/c e o efeito de interação. Os gráficos referentes aos resíduos desse modelo são apresentados nos gráficos 1 e 2, observa-se que os resíduos se distribuem numa faixa homogênea em torno da média zero, indicando não violação da hipótese de homocedasticidade. O gráfico 2 sugere que a hipótese de normalidade também não foi violada, uma vez que os pontos se encontram todos dentro do envelope.



Na sequência, o modelo completo, denominado de modelo 1, foi comparado com os modelos mais enxutos, sendo eles o modelo que exclui o efeito de interação (modelo 2), o modelo que só incluiu o efeito de %RCD (modelo 3) e, por fim, o modelo que só incluiu o efeito de relação a/c (modelo 4). Esses modelos foram comparados a partir do Teste da Razão de Verossimilhança, a hipótese nula desse teste considera que o modelo mais compacto representa os dados tão bem quanto o modelo mais completo e, dessa forma, poderia ser usado na análise do problema (RENCHER e SCHAALJE, 2008). Os p-values desse teste são

apresentados na Tabela 19. Os baixos p-values observados apontam para a rejeição da hipótese nula de que os modelos mais enxutos representam bem o problema e, dessa forma, o efeito de interação deve ser mantido no modelo.

TABELA 19 - P-VALUES PARA O TESTE DA RAZÃO DE VEROSSIMILHANÇA

Comparação	P-value	Conclusão
Modelo 2 versus modelo 1	<0,0001	O modelo 1 é mais adequado
Modelo 3 versus modelo 1	<0,0001	O modelo 1 é mais adequado
Modelo 4 versus modelo 1	<0,0001	O modelo 1 é mais adequado

Fonte: do autor (2021)

Tendo em vista a significância do efeito de interação, conclui-se que os efeitos principais não podem ser analisados separadamente, uma vez que o efeito de um se comportou de forma diferente dentro dos níveis do outro.

A Tabela 20 apresenta as médias marginais estimadas pelo modelo, assim como o intervalo de confiança (IC) de 95% para os valores dessas médias. Como pode ser observada, a média estimada para o traço TR1_50 foi superior a todas as outras e as médias dos grupos TR2_50 e TR2_100 foram bem próximas.

TABELA 20 - MÉDIAS MARGINAIS ESTIMADAS E INTERVALOS DE CONFIANÇA 95%

Traço	Fator a/c	Substituição	Média estimada	IC 95%
TR1_50	0,55	%RCD = 50%	27,6	(27; 28,1)
TR1_100		%RCD = 100%	23,5	(23; 24,1)
TR2_50	0,667	%RCD = 50%	21,9	(21,4; 22,5)
TR2_100		%RCD = 100%	21,6	(21,1; 22,2)

Fonte: do autor (2021)

A Tabela 21 apresenta as diferenças em médias, assim como os intervalos de confiança de 95% para essas diferenças médias e os valores-p para as comparações. De acordo com os resultados, os dados não rejeitaram a hipótese nula de que não houve diferença na resistência à compressão quando a relação a/c foi mantida a 0,667, mesmo quando o %RCD foi aumentado para 100%. Por outro lado, quando a relação a/c foi mantida a 0,55; o menor percentual de RCD levou ao maior valor médio para a resistência à compressão.

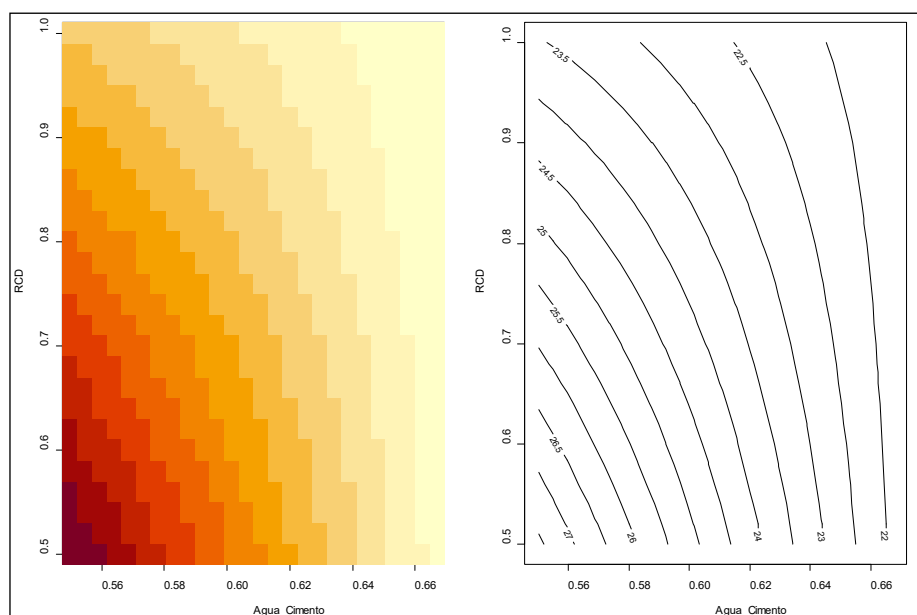
TABELA 21 - DIFERENÇAS MÉDIAS E VALORES P PARA COMPARAÇÕES AOS PARES.

Fator a/c	Diferença média	Diferença estimada	Ic 95%	P-value
0,55	%RCD = 50% menos %RCD = 100%	4.03	(3,37;4,69)	<.0001
0,667	%RCD = 50% menos %RCD = 100%	0.27	(-0,38;0,92)	0.4947

Fonte: do autor (2021)

A Figura 22 apresenta a superfície criada a partir do modelo ajustado, assim como as curvas de níveis com as regiões em que as maiores resistências são observadas. Nas áreas mais escuras no gráfico são observadas as maiores resistências à compressão quando a relação a/c varia entre 0,55 e 0,56 e a %RCD varia entre 50% e aproximadamente 57%. O modelo ajustado apresentou um $R^2 = 0,7$ indicando que este modelo conseguiu explicar 70% da variação total da resistência à compressão.

FIGURA 22 - SUPERFÍCIE AJUSTADA AOS DADOS E CURVAS DE NÍVEL.



Fonte: do autor (2021)

Observa-se que quando a relação a/c é mantida em 0,667, a quantidade de RCD parece não interferir na resistência (área mais escura no gráfico). Observa-se também que a menor proporção a/c e o menor percentual de RCD conduzem às maiores resistências.

Outro fator que deve ser considerado na produção desses concretos é a trabalhabilidade. Este estudo não contemplou o uso de qualquer tipo de aditivo, destacando o fato de que para 100% de RCD com fator a/c=0,55 a trabalhabilidade do concreto ficou muito prejudicada.

Na Tabela 22 faz-se um resumo das resistências médias à ruptura por compressão dos diversos traços e substituições utilizados. Esses valores são comparados com o traço padrão.

A partir dessa análise inicial, os traços a serem utilizados para a continuidade da pesquisa serão o TR1_50 e o TR2_100, chamados doravante de TR_50 e TR_100, respectivamente.

TABELA 22 - COMPARAÇÃO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO ENTRE TRAÇOS

Traço	f_{c28} (MPa)	(%)
Padrão	29,44	100
TR_25	29,07	98,74
TR1_50	27,58	93,68
TR_75	22,77	77,34
TR2_100	21,65	73,54

Fonte: do autor (2021)

3.6.4 Vigas de concreto armado com agregados naturais e reciclados

Esta etapa da pesquisa teve como objetivo principal a aplicação dos traços e substituições estudadas em elementos estruturais de concreto armado, especificamente em vigas, e a análise do comportamento deles quando submetidos a carregamentos.

A escolha do elemento estrutural vigas deu-se pelo fato de que são elementos estruturais presentes em praticamente todas as obras e a combinação de deformações da armadura e do concreto, os chamados domínios de deformação (BASTOS, 2019), podem trazer resultados satisfatórios para a substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado de RCD onde a falha do conjunto dá-se pelo escoamento da armadura, preferencialmente.

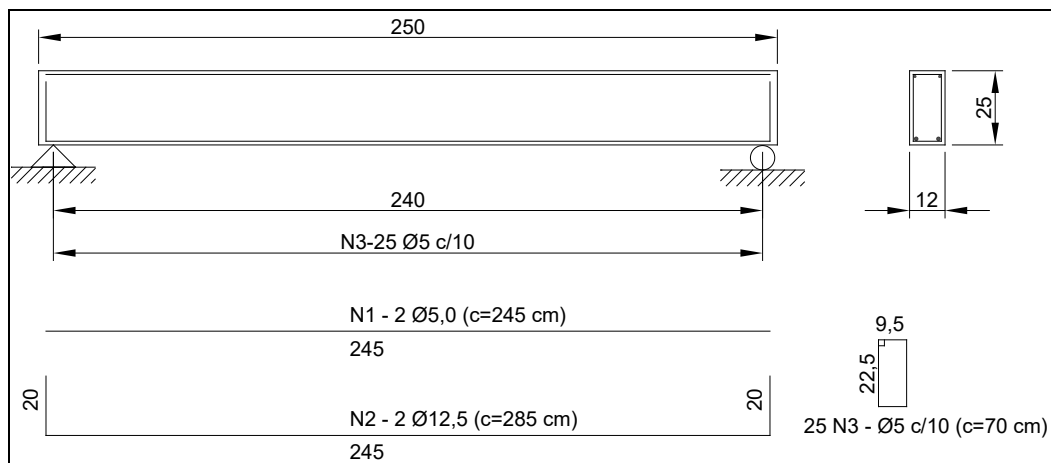
3.7 BREVES ASPECTOS TEÓRICOS

As vigas são elementos estruturais lineares sujeitos a cargas transversais perpendiculares ao seu eixo. Sabidamente, os esforços internos solicitantes são o momento fletor (M) e a força cortante (V), sendo que as armaduras longitudinais são responsáveis por absorverem os esforços de tração oriundos das tensões normais oriundas do momento fletor e as armaduras transversais (estribos) colaboram na resistência às tensões tangenciais oriundas da força cortante (ABNT NBR 6118, 2014item 14.4.1.1). Dessa forma, uma viga pode ser levada à ruína por tensões normais devidas ao momento fletor ou por tensões de cisalhamento devidas à força cortante (ABNT NBR 6118, 2014item 16.2.3).

Neste trabalho o modo de falha previsto será o correspondente às tensões normais. Ainda, tendo-se em vista os domínios de deformação do concreto armado, a falha prevista será aquela em que o aço está escoando, ou seja, a tensão nas barras da armadura principal corresponde à tensão de escoamento do aço.

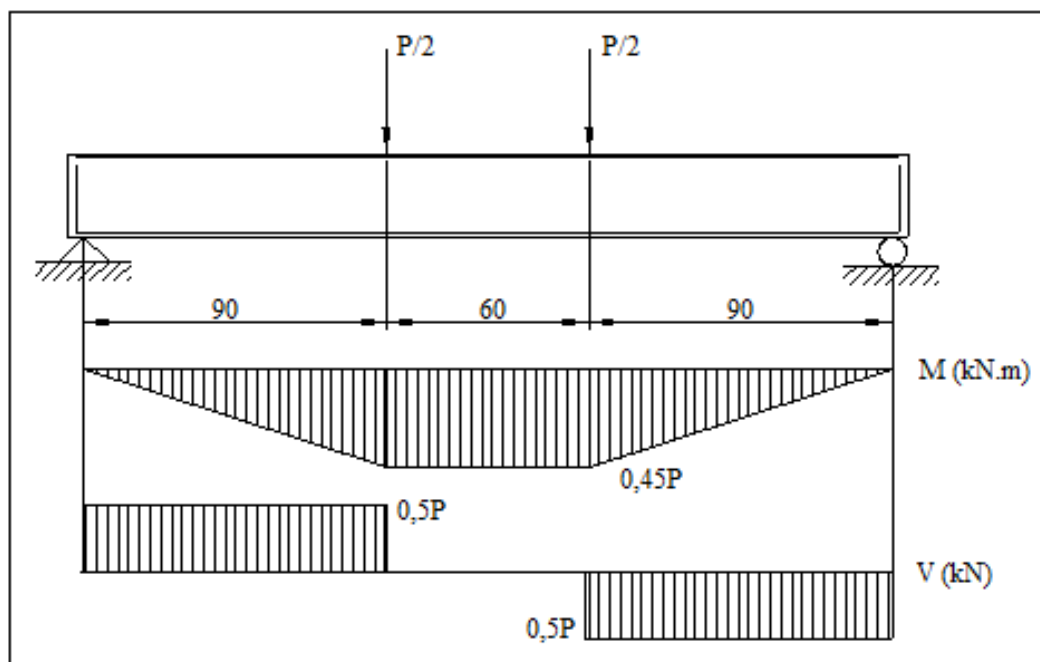
Os domínios de deformações do aço e do concreto para elemento fletidos estão representados na Figura 23 e são perfeitamente conhecidos no meio técnico. Economicamente os domínios 2 e 3 são os melhores pois o aproveitamento da armadura é total, com o

FIGURA 24 – ESQUEMA ESTÁTICO E DETALHAMENTO DA VIGA.



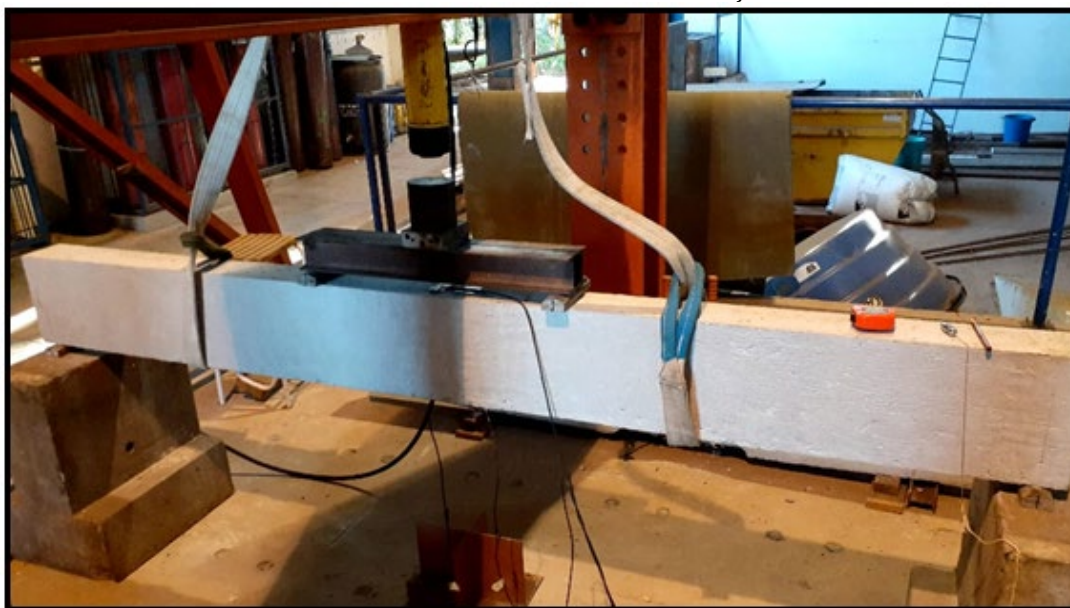
Fonte: do autor (2021)

Figura 75 – ESQUEMA DE CARREGAMENTO E DIAGRAMAS DE ESFORÇOS.



Fonte: do autor (2021)

FIGURA 26 – ENSAIO SENDO PREPARADO PARA APLICAÇÃO DO CARREGAMENTO.



Fonte: do autor (2021)

3.8 Dosagens dos concretos, moldagem e cura das vigas

As dosagens e fôrmas para a produção das vigas seguiram os mesmos procedimentos e metodologias adotadas para a execução dos traços e foram idênticos para as quatro (4) vigas.

Os concretos com agregados naturais e com agregados reciclados foram realizados em mistura única em betoneira para enchimento de cada viga em sequência, com intervalo de uma semana entre uma e outra. Na primeira semana foi executada a viga com traço padrão, na segunda semana foram executadas duas vigas com substituição de 50% e na terceira semana foi executada a última viga, com substituição de 100%. As vigas receberam as seguintes denominações:

- VP - Vigas de concreto padrão, tendo somente o agregado graúdo natural, sendo utilizado como referência para comparação das demais;
- VR1_50- Primeira viga com 50% de AR, traço TR1_50;
- VR2_50 - Segunda viga com 50% de AR, traço TR1_50;
- VR_100 - Viga com 100% de AR, traço TR2_100

As fôrmas foram executadas com chapas compensado de 20 mm de espessura e por facilidade de execução, utilizou-se a posição horizontal, como ilustra a Figura 27.

FIGURA 27 – PREPARAÇÃO DA FÔRMA PARA A MOLDAGEM DA VIGA.



Fonte: do autor (2021)

Preparada a fôrma, foi posicionada a armadura para posterior enchimento com o concreto. As barras principais da armadura foram instrumentadas com extensômetros elétricos de resistência, os *strain gages*, no meio do vão para medidas dos seus alongamentos. A Figura 28 ilustra o processo de concretagem de uma viga.

FIGURA 28- CONCRETAGEM DA VIGA VP.



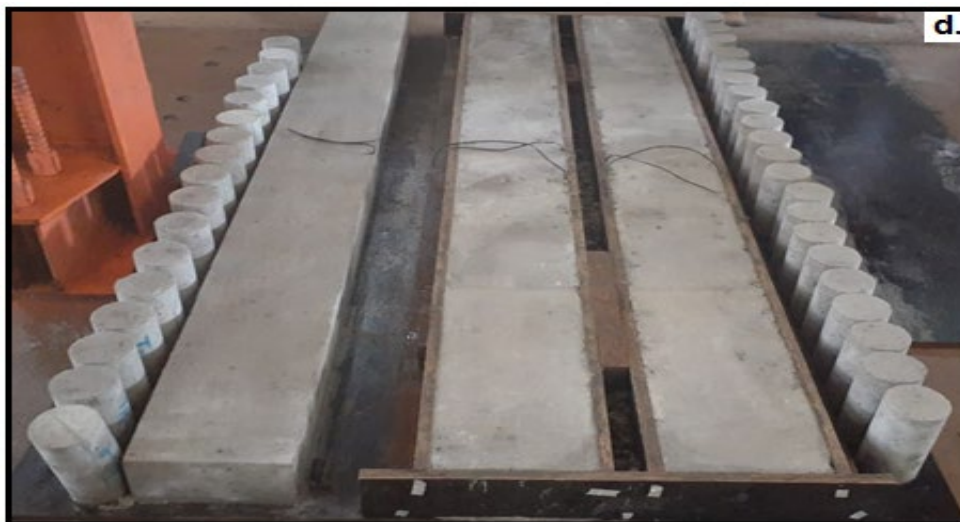
Fonte: do autor (2021)

Para cada traço foram moldados pelo menos 12 corpos de prova para determinação da tensão de ruptura à compressão do concreto aos 28 dias de idade. Os corpos de prova foram rompidos e as vigas ensaiadas no mesmo dia.

Diferentemente da cura realizada para os corpos de prova durante o estudo das substituições, onde os corpos de prova foram curados em câmara úmida, os corpos de prova foram colocados juntos às vigas e ambos umedecidos de tempo em tempo, durante quatro dias, como ilustra a Figura 29, portanto, a cura se deu ao ar livre.

Na Figura 29, além dos corpos de prova são observadas as vigas VP já desformada e as vigas VR1_50 e VR2_50 bem como os cabos dos extensômetros elétricos de resistência colados nas barras de aço.

FIGURA 29- CORPOS DE PROVA E VIGAS EM PROCESSO DE CURA AO AR LIVRE.



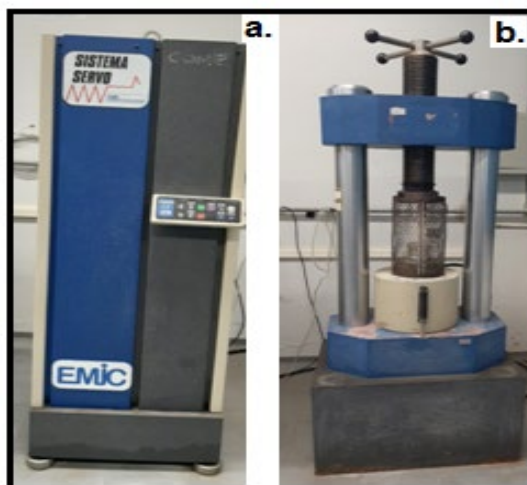
Fonte: do autor (2021)

3.9 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS CONCRETOS

3.9.1 Resistência à compressão simples

Esta foi a principal característica de resistência que norteou o estudo e a viabilidade das substituições. Foi obtida por ensaio padronizado de corpos de prova cilíndricos de dimensões (10x20) cm, ensaiados em prensa servo-assistida, Figura 30.

FIGURA 30 - A. DISPOSITIVO DE CONTROLE. B. PRENSA PARA ENSAIO.



Fonte: do autor (2021)

A Tabela 23 apresenta os resultados obtidos.

TABELA 23 - VALORES MÉDIOS DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO SIMPLES E DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS CONCRETOS.

Traço	a/c	f_{c28} (MPa)	E (MPa)
VP	0,55	41,18	25.678
VR_50%	0,55	34,69	24.810
VR_100%	0,667	34,78	24.400

Fonte: do autor (2021)

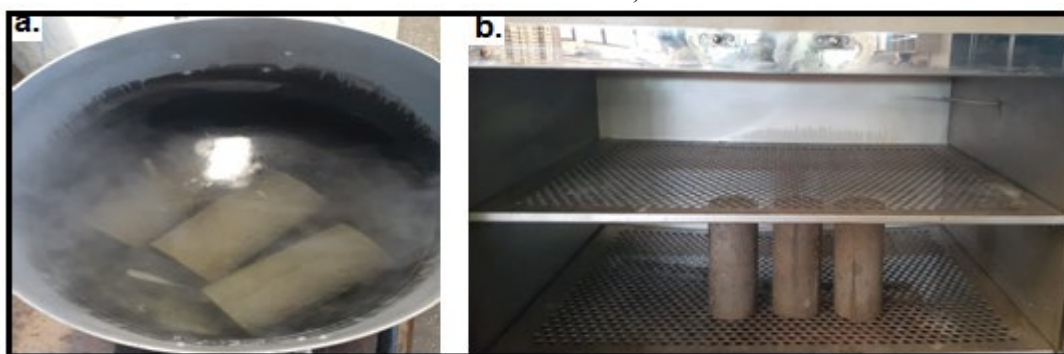
Embora os traços sejam os mesmos utilizados anteriormente, observam-se na Tabela 23 resultados superiores aos encontrados, destacando-se que o único procedimento diferente entre um e outro foi à forma da cura do concreto. No primeiro caso feito em câmara úmida e no segundo caso feito ao ar livre. Este fato pode ter contribuído para esse aumento.

3.9.2 Absorção, índice de vazios e massa específica

Algumas características físicas do concreto endurecido são importantes para a durabilidade da estrutura.

O ensaio da massa específica, índices de vazios e absorção de água por imersão foi determinado de acordo com a norma ABNT NBR 9778 (2009), onde a Figura 31 ilustra a realização de um ensaio.

FIGURA 31 - A. CPS EM PROCESSO DE FERVURA; B. CPS COLOCADOS EM ESTUFA.



Fonte: do autor (2021)

Os resultados dos ensaios para os traços adotados estão apresentados na Tabela 24 e são os valores médios dos resultados de três corpos de provas para cada traço.

TABELA 24 - ABSORÇÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA PARA OS CONCRETOS.

Traço	a/c	Absorção de água (%)	Índice de Vazios (%)	Massa específica seca (g/cm^3)
VP	0,55	2,48	5,92	2,39
VR_50%	0,55	2,75	6,44	2,34
VR_100%	0,667	2,83	6,23	2,35

Fonte: do autor (2021)

Observa-se na Tabela 24 que o uso dos agregados reciclados de RCD atribui ao concreto uma maior porosidade, diminuindo sua massa específica, porém, os valores são poucos diferentes e, portanto, aceitáveis.

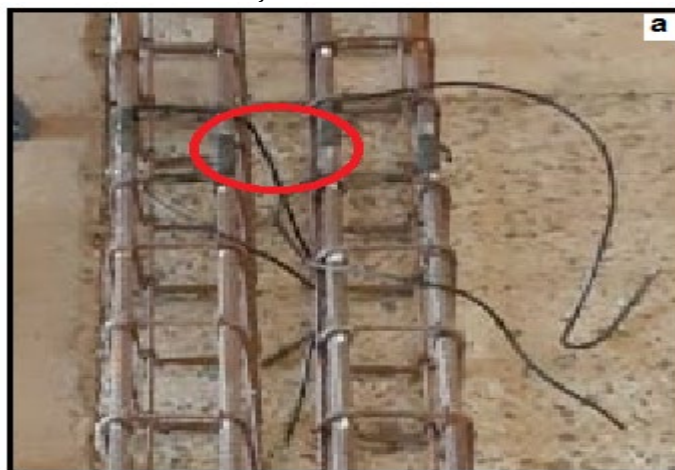
3.10 EXECUÇÃO, INSTRUMENTAÇÃO E PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS

3.10.1 Fabricação das vigas

Definidos os traços a serem trabalhados, as dimensões das vigas e a armadura, foram executadas as fôrmas para moldagem delas.

As armaduras foram previamente instrumentadas com extensômetros elétricos, Figura 32, posicionada e fixada nas fôrmas com cobertura de 1,25 centímetros.

FIGURA 32 – EXTENSÔMETRO ELÉTRICOS DE RESISTÊNCIA COLADOS NAS BARRAS DE AÇO PRINCIPAIS.



Fonte: do autor (2021)

O concreto foi dosado e misturado em betoneira com capacidade para 350 litros. Após completado o ciclo de misturas dos componentes do concreto foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone, o *slump test*, obtendo-se os valores de 90 mm, 40 mm e 25 mm para o concreto padrão, substituição de 50% e substituição de 100%, respectivamente.

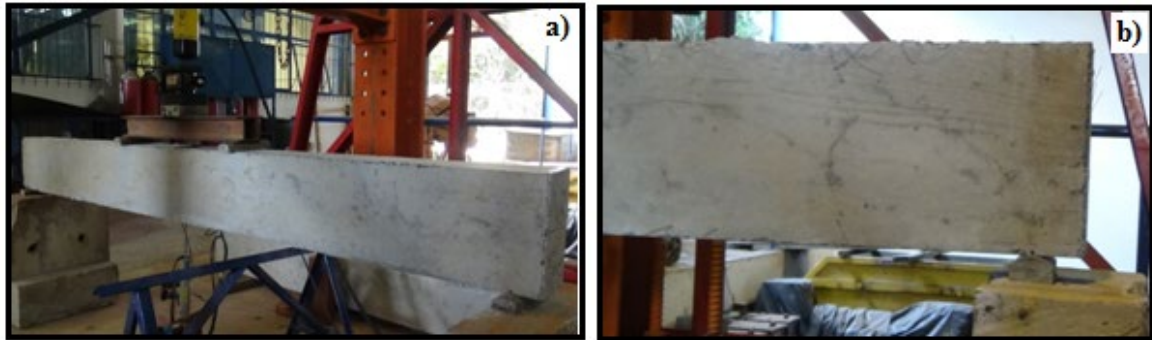
O concreto foi então, para o enchimento das fôrmas e dos moldes de corpos de prova. Para o adensamento nas vigas foi utilizado vibrador de agulha e para os corpos de prova mesa vibratórios. As vigas e os corpos de prova tiveram cura ao ar livre e foram ensaiados aos 28 dias de idade.

3.10.2 Posicionamento das vigas e dispositivos de ensaios

Fabricadas e curadas, as vigas foram posicionadas para ensaios, conforme esquema estático indicado no item 3.7.

Para reproduzir o carregamento desejado foram posicionados dois blocos de concreto para suportar dois dispositivos de aço em forma de meia lua, formando então os apoios, Figura 33.

FIGURA 33 - DISPOSITIVOS DE APOIOS PARA AS VIGAS.



Fonte: do autor (2021)

Posicionada a viga, dois dispositivos de aço eram colocados sobre a face superior, centralizados e distantes de 90 cm dos apoios. A distância entre os dispositivos foi de 60 centímetros.

A força total (P) foi aplicada por meio de um atuador hidráulico sobre um dispositivo de perfis de aço que tinha a função de transmitir para cada apoio a força ($P/2$) sobre as vigas. Entre o atuador hidráulico e os perfis de aço havia uma célula de carga com capacidade de 100 kN para aferição da força aplicada. Esta configuração para a aplicação das forças pode ser vista na Figura 34.

FIGURA 34- ARRANJO PARA APLICAÇÃO DE FORÇA NA VIGA.



Fonte: do autor (2021)

Na sequência posicionava-se um transdutor de deslocamentos lineares no meio do vão da viga para a medição dos deslocamentos, Figura 35, e em seguida colava-se um

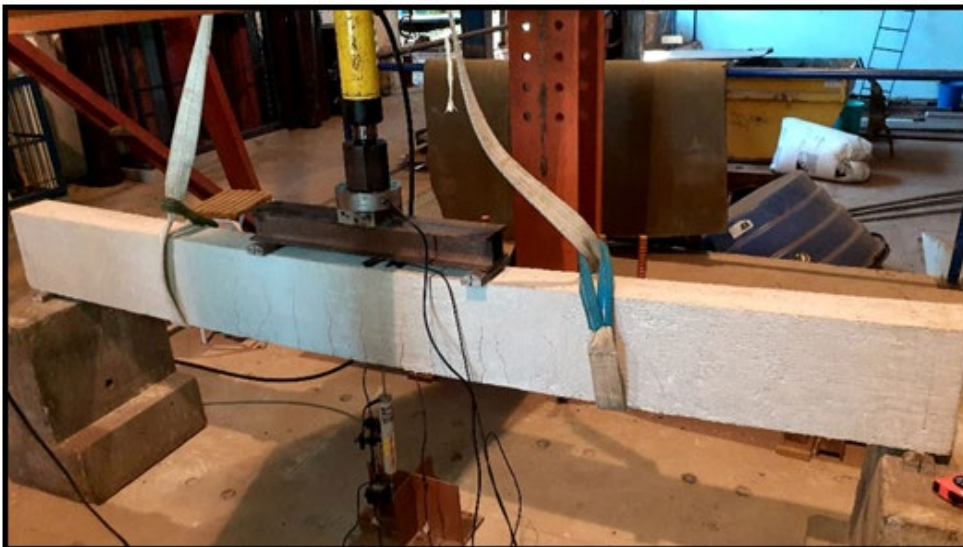
extensômetro elétrico de resistência no meio do vão, na face superior da viga, Figura 36. Esses procedimentos de montagem da viga e dispositivos foram seguidos igualmente na montagem das quatro vigas ensaiadas.

FIGURA 35 – ARRANJO COM TRANSDUTOR POSICIONADO.



Fonte: do autor (2021)

FIGURA 36 - EXTENSÔMETRO COLADO NA FACE SUPERIOR DA VIGA.



Fonte: do autor (2021)

3.10.3 Aplicação da força e aquisição dos dados

Após o posicionamento devidamente verificado, os cabos dos dispositivos e instrumentos de ensaios eram conectados ao sistema de aquisição de dados para início dos ensaios, Figura 37.

FIGURA 37 – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADO.



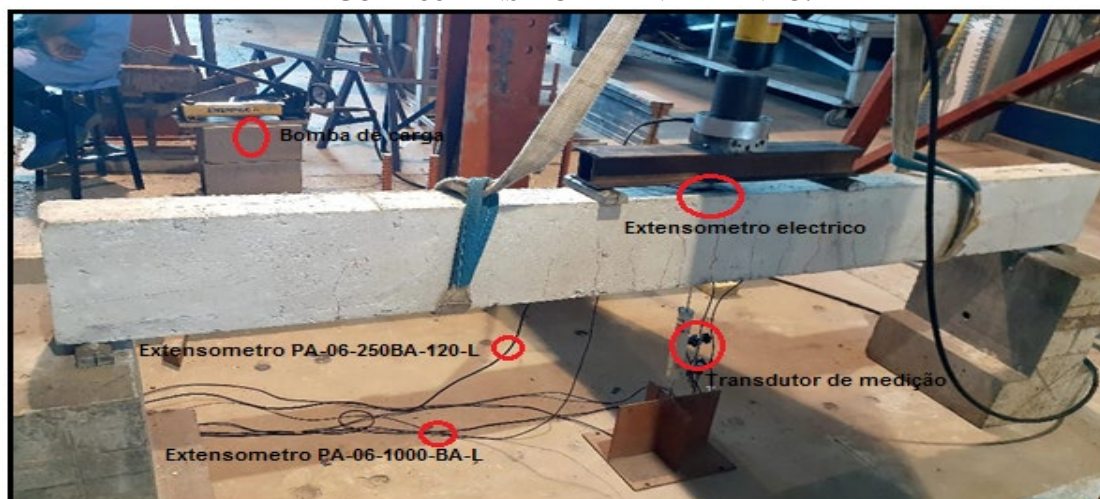
Fonte: do autor (2021)

O início do ensaio consistia na aplicação de uma força de 0,5 kN à viga para acomodação e verificação do funcionamento do arranjo, o escorvamento do conjunto e posterior descarregamento. Os instrumentos eram zerados novamente e dava-se início à aplicação da força (P) com incrementos de 0,5 kN até a ruptura da viga. Para cada incremento foram realizadas e registradas as leituras da força P, das deformações nas barras de aço, da deformação na fibra superior da seção transversal da viga e o deslocamento da viga no meio do vão.

O sistema de aquisição de dados utilizado foi o System 5000 da Vishay Precision Group para medidas de deformações e deslocamentos e para a leitura da força aplicada havia uma caixa dedicada exclusivamente à célula de carga.

Na Figura 38 apresenta-se o ensaio de uma viga em andamento e a indicação de todos os instrumentos de medidas e aplicação de forças utilizadas e a Tabela 25 mostra os dados obtidos e organizados para a viga padrão.

FIGURA 38 - ENSAIO EM ANDAMENTO.



Fonte: do autor (2021)

TABELA 25 - DADOS PARA A VIGA VCE DADOS PARA A VIGA VCP

ScanSession: "ScanSession #2"

Start Time: 10/03/2020 09:14:56

Assignment		Trandustoroncha nnel 1	Uniaxial Strain Gage #1 on channel 11	Uniaxial Strain	Gage #1 onchanne l 12	
ReductionMeth od		Calibrated Values	Strain	Strain	Strain	
ID	SecondsElaps ed	[1] mm	[11] Strain	[12] Strain	[13] Strain	Força kgf
1	22,2	-0,02	-2	-1	-1	0
2	88,1	0,4	-70	124	153	499
3	135,7	0,92	-151	271	354	997
4	206,7	1,44	-234	432	582	1504
5	268,1	2,25	-313	618	871	2010
6	585,2	3,05	-400	821	1182	2480
7	815,8	3,95	-488	1039	1513	2996
8	858,9	4,85	-576	1280	1831	3500
9	1189,5	5,84	-666	1530	2159	4005
10	1301,1	6,84	-757	1781	2482	4532
11	1592,5	7,86	-844	2009	2794	5000
12	1762,2	8,89	-935	2259	3160	5498
13	1813,4	9,96	-1022	2563	3727	5966
14	2051,3	10,16	-1047	2659	3963	6010
15	2113,6	10,7	-1100	2904	4482	6237
16	2177,3	11,49	-1181	3420	5549	6496
17	2326,9	11,85	-1221	3723	6109	6547
18	2378,2	12,57	-1299	4543	7550	6710
19	2411,6	13,76	-1426	6714	10475	6950
20	2446	14,66	-1518	8918	12739	7050
21	2561,1	16,05	-1657	11498	15170	7150
22	2588,3	16,7	-1710	12339	16014	7215
23	2627,6	17,33	-1763	13095		7250
24	2695,3	18,09	-1821	13806		7280
25	2733,6	18,76	-1861	14446		7314

Fonte: do autor (2021)

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Previsão de força última

O esquema estático da viga foi ilustrado na Figura 17 e foi aplicado igualmente a todas as vigas ensaiadas.

Torna-se necessário fazer uma previsão de carga última ou de ruptura dessas vigas para uma melhor aquisição dos dados, tomando-se incrementos de cargas de tal modo a se obter um número de pontos suficientes para se ter o comportamento da viga (deformações e deslocamentos) sob o carregamento.

Para tanto, serão utilizadas as equações de equilíbrio de vigas de concreto armado com armadura simples, de onde se tem a posição da linha neutra obtida pela Equação 3 (Bastos, 2019):

EQUAÇÃO 3

$$\beta_x = \frac{x}{d} = \frac{\sigma_s A_s}{0,68.b_w.d.f_c}$$

Onde:

b_w = Largura de seção transversal;

d = Altura útil da seção transversal;

f_c = Resistência à compressão do concreto;

A_s = Área da seção transversal da armadura principal;

σ_s = Tensão de tração na armadura principal.

Deve ser observado que os valores de tensões e esforços solicitantes não serão afetados pelos seus respectivos fatores de minoração ou majoração, pois se trata de avaliação experimental.

Assumindo-se domínio 2, a tensão no aço será igual a sua tensão de escoamento ($\sigma_s = f_y$) e a resistência à compressão do concreto será aquela obtida para a compressão aos 28 dias, valor médio ($f_c = f_{c28}$), Tabela 22.

Determinado β_x verifica-se o domínio de deformação e se for domínio 2 a tensão no aço corresponde à sua tensão de escoamento e o valor do momento fletor resistente (M_R) será dado pela Equação 4.

EQUAÇÃO 4

$$M_R = f_y \cdot A_s \cdot d \cdot (1 - 0,4 \cdot \beta_x) \text{ ou}$$
$$M_R = 0,68 \cdot b_w \cdot d^2 \cdot f_c \cdot \beta_x \cdot (1 - 0,4 \cdot \beta_x)$$

Igualando-se o momento fletor resistente ao momento fletor solicitante, conforme diagrama de esforços indicado na Figura 21, obtém-se o valor da força última prevista para o ensaio, Equação 5.

EQUAÇÃO 5

$$M_s = M_R \Rightarrow P = \frac{2 \cdot M_R}{0,90}$$

Aplicando a Equação 4 e Equação 5, obtém-se os valores da força última (P) prevista para o ensaio de cada viga como apresentados na Tabela 26.

TABELA 26 - FORÇA ÚLTIMA PREVISTA PARA AS VIGAS.

Traço	f_{c28} (MPa)	β_x	M_R (kN.m)	P (kN)
VCP	41,18	0,153	27,31	60,68
VCR_50%	34,69	0,182	26,97	59,94
VCR_100%	34,78	0,182	26,97	59,94

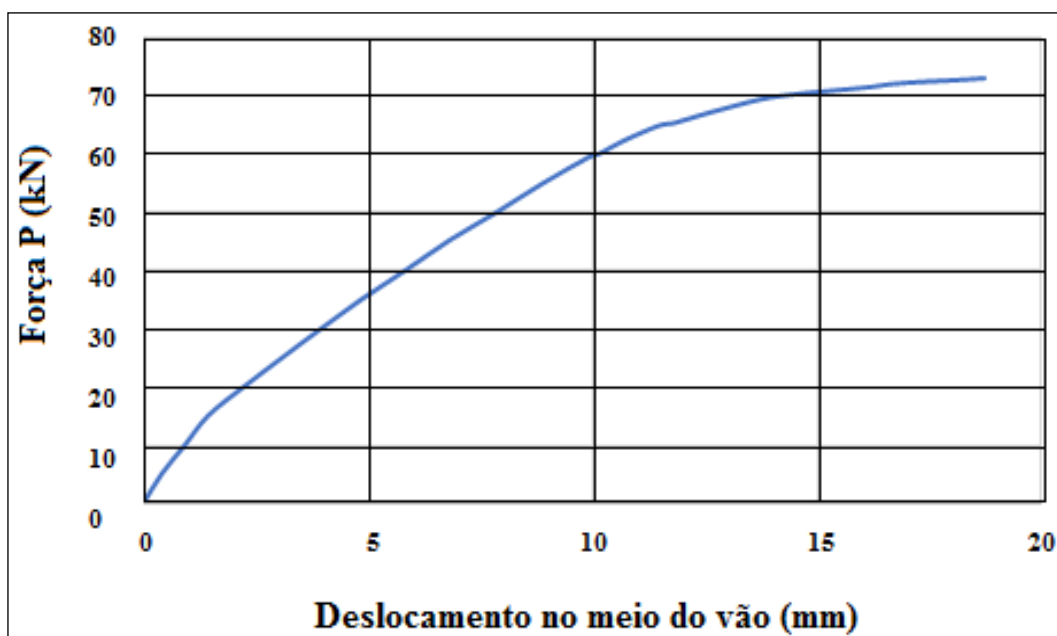
Fonte: do autor (2021)

Da Tabela 29 observa-se que as vigas estão no domínio 2 e, portanto, a hipótese da tensão na armadura igual a sua tensão de escoamento está correta e com o valor de P obtido o incremento de força será de 5 kN.

4.2 ENSAIO DA VIGA PADRÃO VCP

Esta viga foi tomada como referência por ser fabricada em concreto convencional. Os dados registrados em ensaio foram: a força P aplicada, os respectivos deslocamentos verticais no meio do vão, as deformações nas barras de aço da armadura principal e a deformação na face superior da viga, ou seja, no concreto comprimido. O gráfico 3 apresenta o comportamento do deslocamento contra a força aplicada. As nomenclaturas referentes ao detalhamento das vigas nas deformações para o aço e para o concreto seguem da seguinte forma: N1 - armadura longitudinal a compressão; N2 - armadura longitudinal de tração; e N3 são os estribos. Como pode ser observado que essas são as duas barras longitudinais na região tracionada.

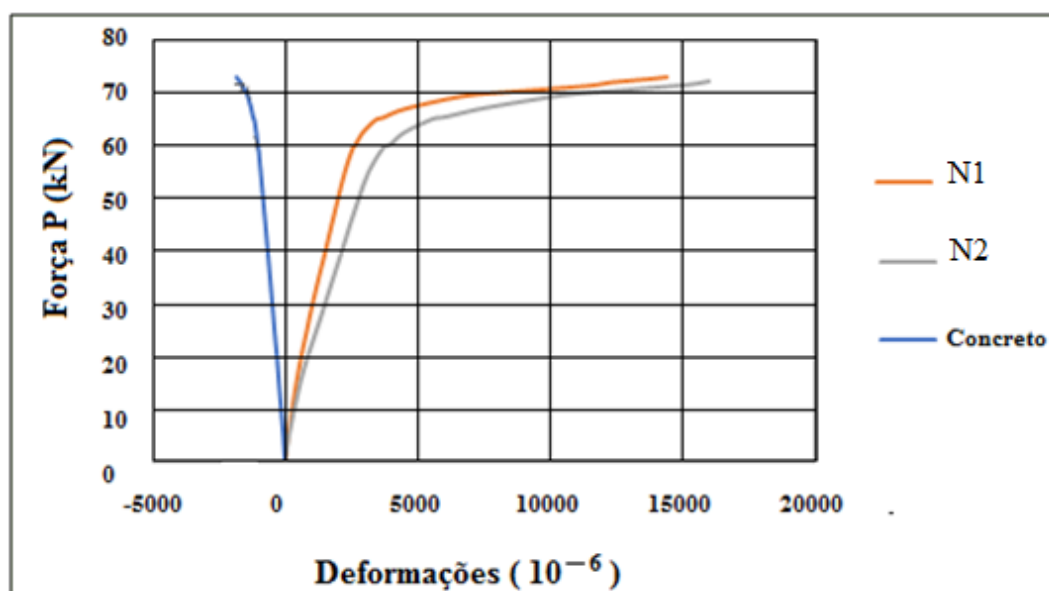
GRÁFICO 3 - DESLOCAMENTOS NO MEIO DO VÃO PARA A VIGA VP



Fonte: do autor (2021)

O Gráfico 4 apresenta as deformações das barras de aço e do concreto.

GRÁFICO 4 - DEFORMAÇÕES MEDIDAS NAS BARRAS DE AÇO E NO CONCRETO PARA VIGA VP



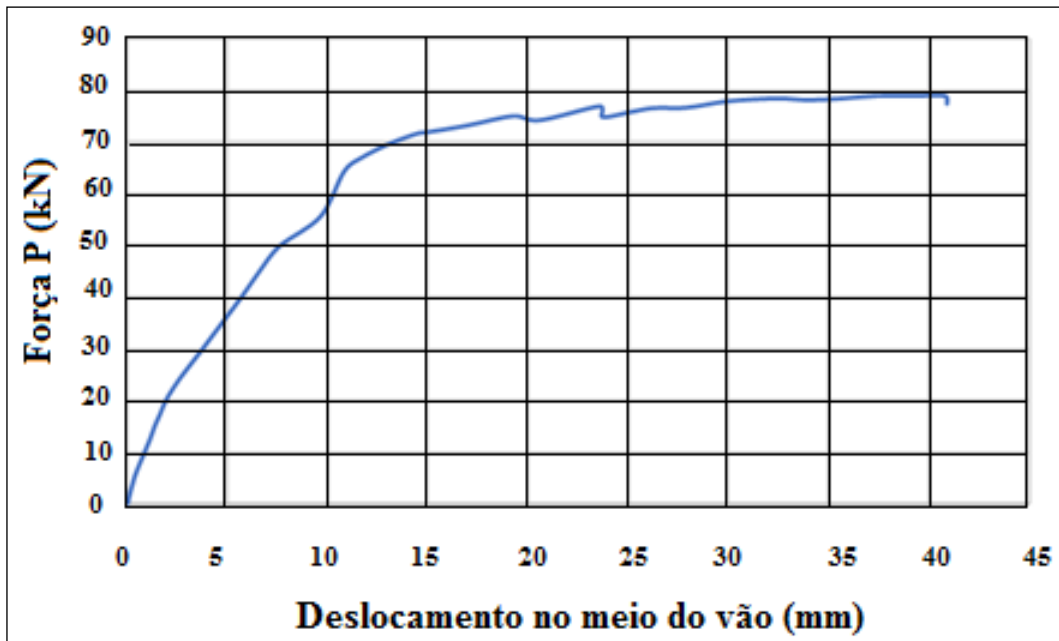
Fonte: do autor (2021)

4.3 ENSAIO DA VIGA VR1_50

A viga VR1_50 foi fabricada com 50% de agregado gráudo natural e 50% de agregado gráudo reciclado de RCD.

Assim como para a viga padrão VP, os dados registrados em ensaio foram: a força P aplicada, os respectivos deslocamentos verticais no meio do vão, as deformações nas barras de aço da armadura principal e a deformação na face superior da viga. O gráfico 5 apresenta os deslocamentos para a viga a VR1_50.

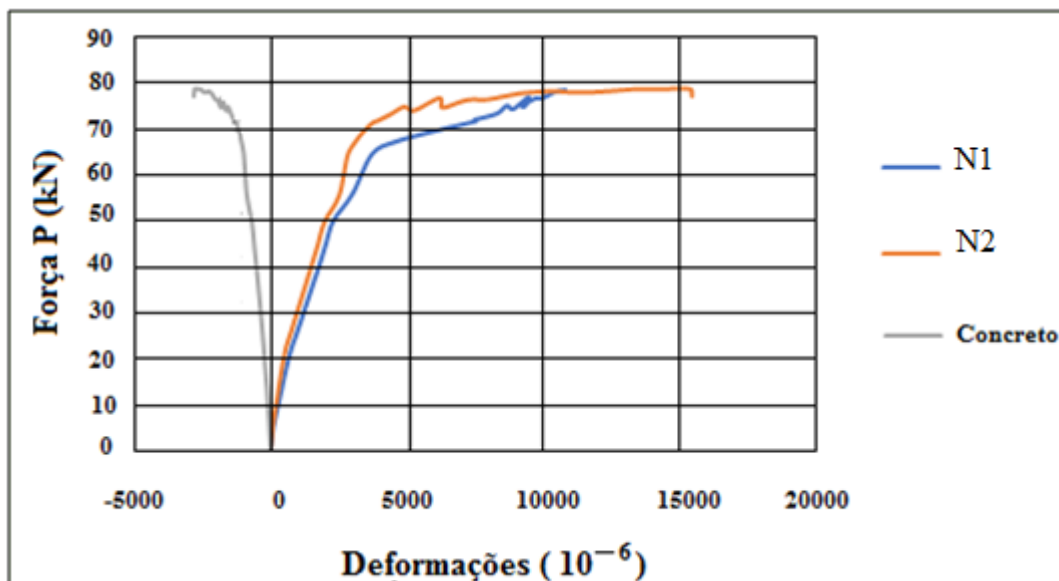
GRÁFICO 5- DESLOCAMENTOS NO MEIO DO VÃO PARA A VIGA VR1_50



Fonte: do autor (2021)

O gráfico 6 apresenta as deformações medidas para a viga VR1_50.

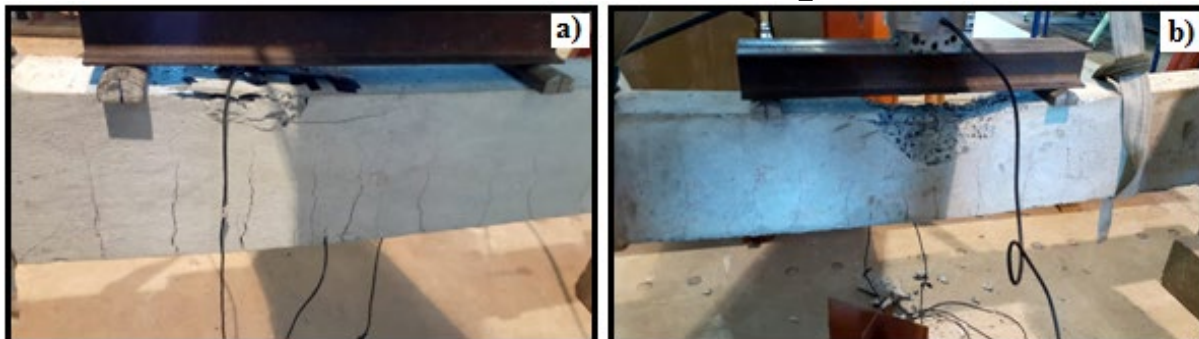
GRÁFICO 6 – DEFORMAÇÕES PARA O AÇO E O CONCRETO NA VIGA VR1_50



Fonte: do autor (2021)

A Figura 39 ilustra a ruína da viga VR1_50 onde observam-se as fissuras características do momento fletor e o esmagamento do concreto.

FIGURA 39 - RUÍNA DA VIGA VR1_50



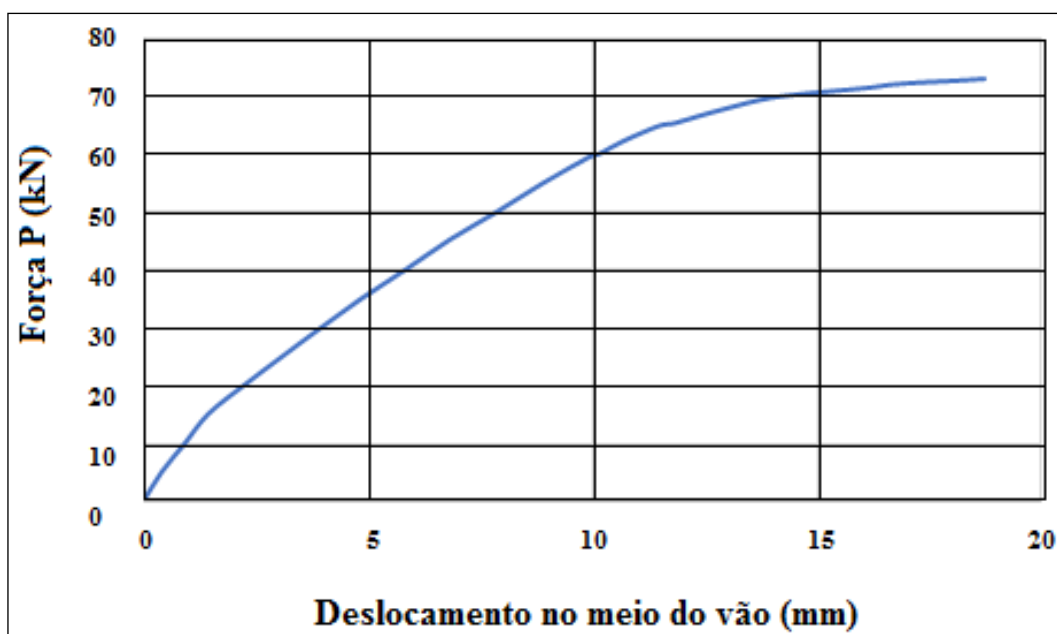
Fonte: do autor (2021)

4.4 ENSAIO DA VIGA VR2_50

A viga VR2_50 foi fabricada com 50% de agregado graúdo natural e 50% de agregado reciclado de RCD, juntamente com a viga VR1_50.

Novamente, os dados registrados em ensaio foram: a força P aplicada, os respectivos deslocamentos verticais no meio do vão, as deformações nas barras de aço da armadura principal e a deformação na face superior da viga. O gráfico 7 apresenta os deslocamentos para a viga a VR2_50.

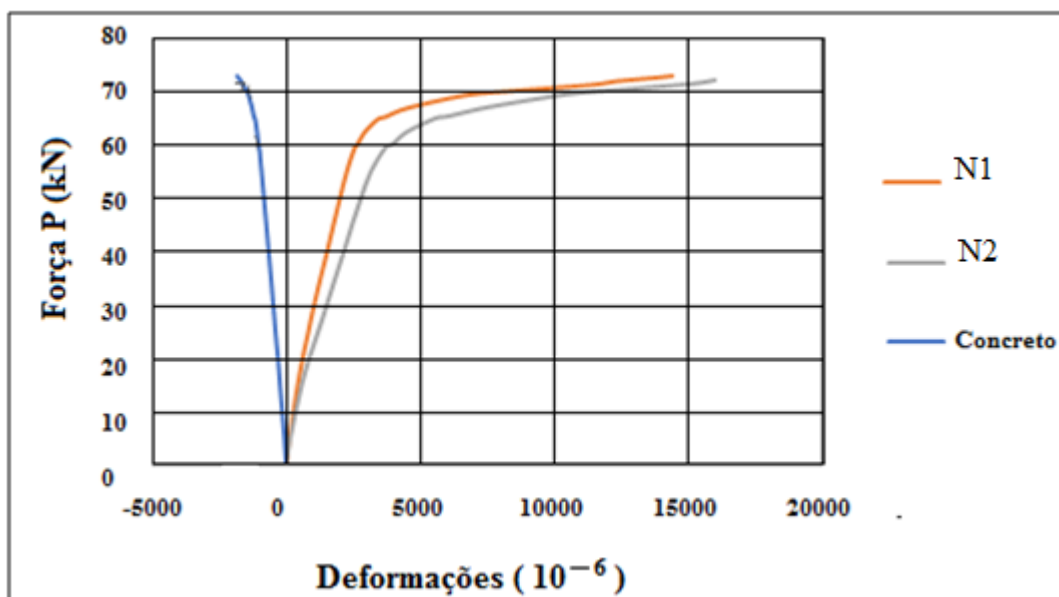
GRÁFICO 7 – DESLOCAMENTOS NO MEIO DO VÃO PARA A VIGA VR2_50



Fonte: do autor (2021)

O Gráfico 8 apresenta as deformações medidas para a viga VR2_50.

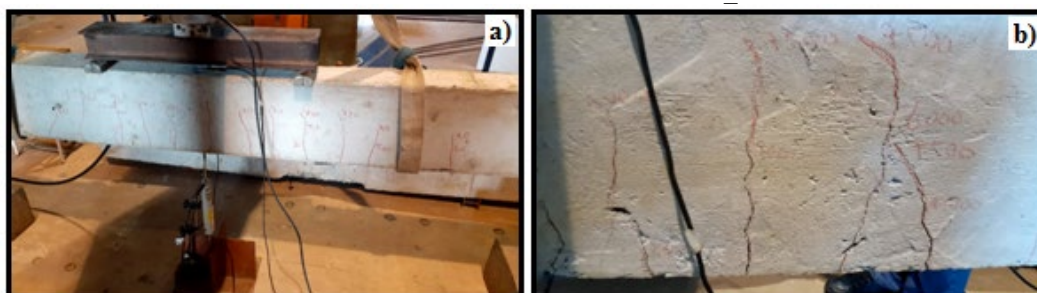
GRÁFICO 8 – DEFORMAÇÕES PARA O AÇO E O CONCRETO NA VIGA VR2_50



Fonte: do autor (2021)

A Figura 40 ilustra a ruína da viga VR2_50 e detalhes das fissuras.

FIGURA 40 – RUÍNA DA VIGA VR2_50



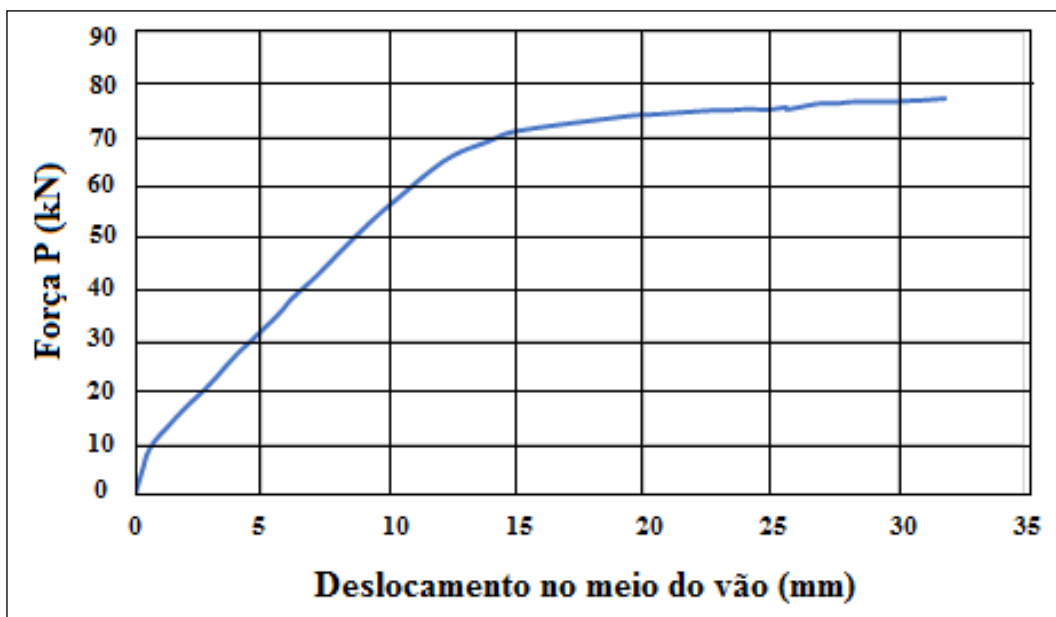
Fonte: do autor (2021).

4.5 ENSAIO DA VIGA VR_100

A viga VR_100 foi fabricada com 100% de agregado graúdo reciclado e durante seu ensaio foram registrados os dados referentes à força P aplicada, os respectivos deslocamentos verticais no meio do vão, as deformações nas barras de aço da armadura principal e o encurtamento do concreto na face superior da viga.

O Gráfico 9 apresentam-se os deslocamentos medidos no meio do vão para a viga VR_100.

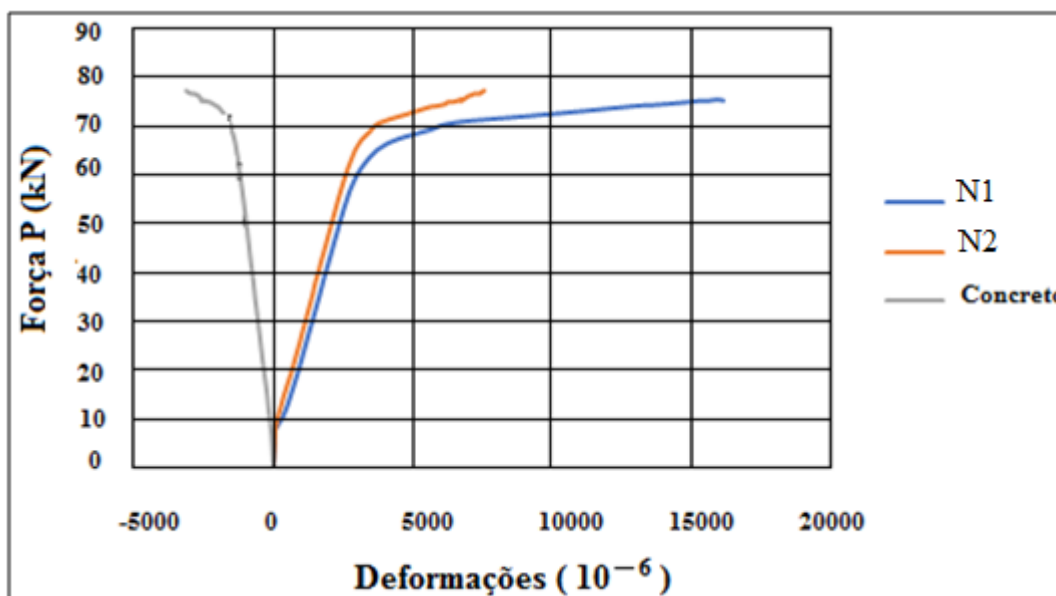
GRÁFICO 9 - DESLOCAMENTOS NO MEIO DO VÃO PARA A VIGA VR_100



Fonte: do autor (2021).

As deformações ocorridas nas barras de aço e no concreto estão apresentadas no Gráfico 10.

GRÁFICO 10 – DEFORMAÇÕES PARA O AÇO E PARA O CONCRETO NA VIGA VR_100



Fonte: do autor (2021)

A Figura 41 ilustra o ensaio da viga VR_100 em andamento.

FIGURA 41 - ENSAIO DA VIGA VR_100



Fonte: do autor (2021).

4.6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Como descrito no item 2.9 do capítulo 2 sobre as referências das literaturas bibliográficas das vigas de concreto com agregados reciclados foram mencionadas as pesquisas de vários autores tais como: Santos, Branco e Brito, (2004); Al-zahraa; El-mihilmy; Bahaa, (2010) e Ignjatović et al. (2013) onde apresentaram um conjunto de resultados e ensaios predominantes de misturas de CR tendo em vista o CC como referência. Eles apresentaram um comportamento idêntico em geral em relação ao concreto convencionais. Esses resultados foram comparados com os ensaios aqui apresentado.

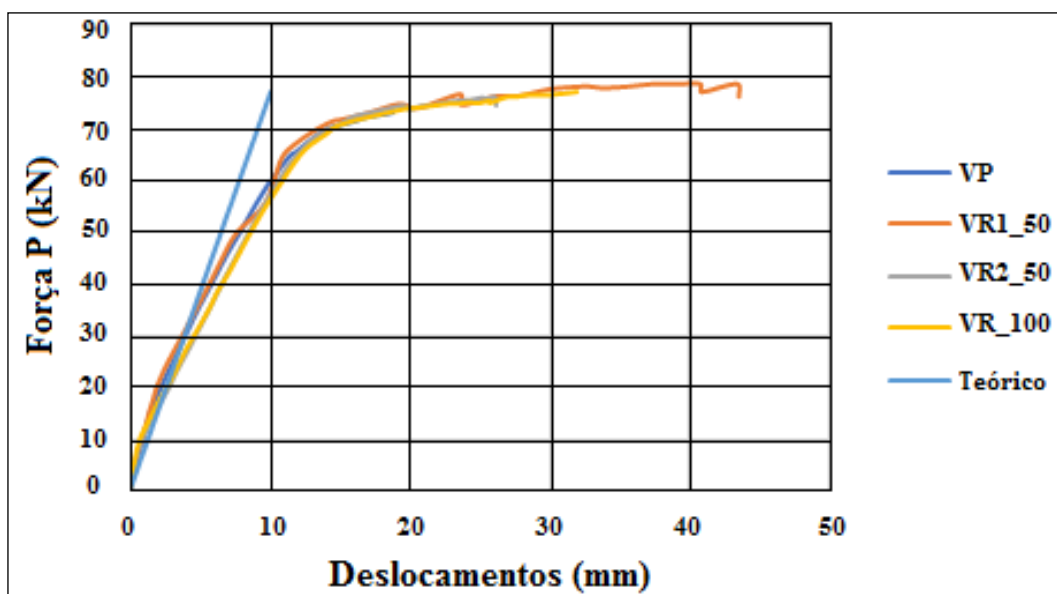
4.6.1 Das vigas ensaiadas

Para efeito de comparação dos resultados obtidos, os resultados de cada uma das vigas ensaiadas serão apresentados em conjunto, em um mesmo gráfico.

O Gráfico 11 apresenta os deslocamentos medidos no meio do vão para cada uma das vigas ensaiadas e o valor teórico considerando-se $E=25$ GPa e momento de inércia da seção transversal do concreto. Nota-se um comportamento praticamente idêntico para cada uma delas e boa relação entre deslocamento teórico e experimental para valores de carregamento até 30 kN aproximadamente. A partir desse valor, as deformações são maiores, com diminuição da rigidez da viga, porém mantém o comportamento linear até próximo à força de 65 kN e, a partir daí, indicando um comportamento dúctil.

Observando-se os deslocamentos de todas, pode-se afirmar que o módulo de deformação do concreto é praticamente o mesmo para todas as vigas, o que foi observado nos ensaios, conforme resultados apresentados no Gráfico 11.

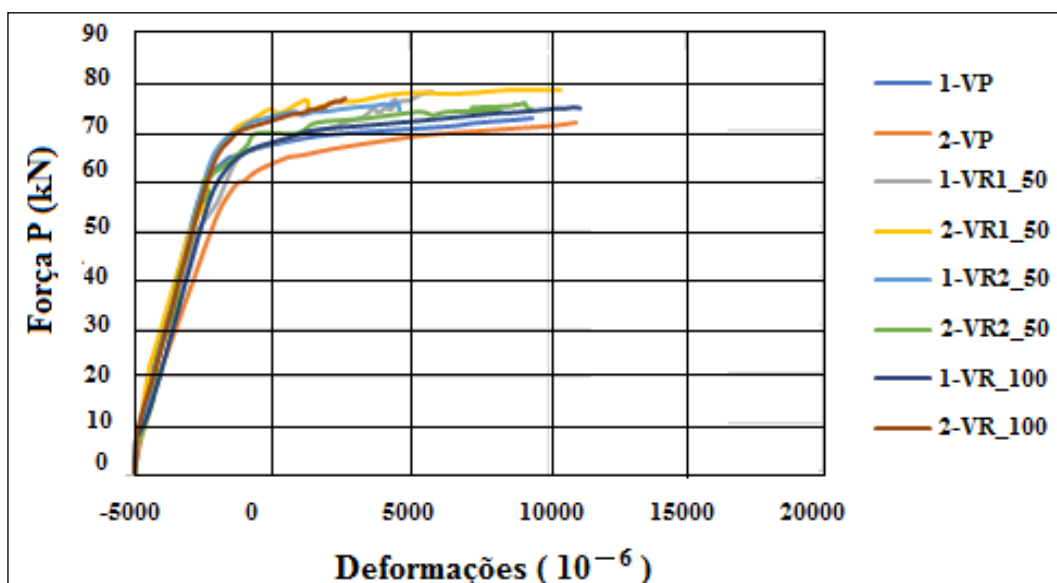
GRÁFICO 11- DESLOCAMENTOS NO MEIO DO VÃO PARA AS VIGAS



Fonte: do autor (2021).

No Gráfico 12 encontram-se as deformações ocorridas nas barras de aço tracionadas para cada uma das vigas ensaiadas. Com poucas diferenças pode-se observar que o comportamento das vigas é similar. Observa-se também, o escoamento das barras de aço a partir da aplicação da força correspondente a 65 kN aproximadamente, fato similar ao ocorrido com os deslocamentos.

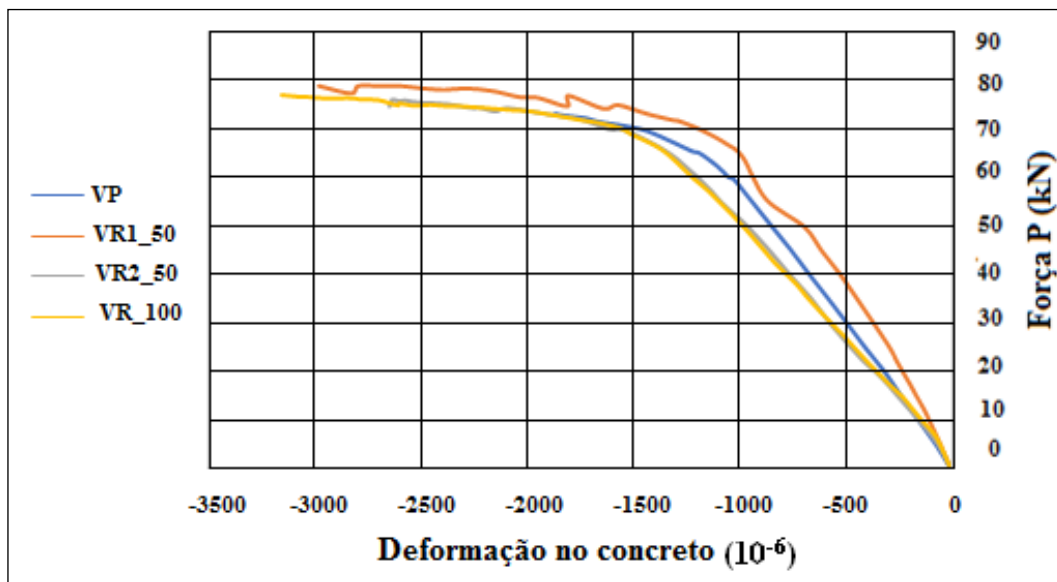
GRÁFICO 12 – DEFORMAÇÕES NAS BARRAS DE AÇO DA ARMADURA PRINCIPAL



Fonte: do autor (2021).

No Gráfico 13 são apresentadas as deformações medidas no concreto na face superior da viga, novamente, mostrando um bom comportamento das vigas com agregados reciclados de RCD.

GRÁFICO 13 – DEFORMAÇÕES NO CONCRETO.



Fonte: do autor (2021)

Das comparações realizadas pode-se inferir que as substituições do agregado natural nas proporções de 50% e 100% não resultaram em alterações significativas no comportamento das vigas, sendo um bom indicativo do uso desses agregados em vigas.

4.6.2 De outros pesquisadores

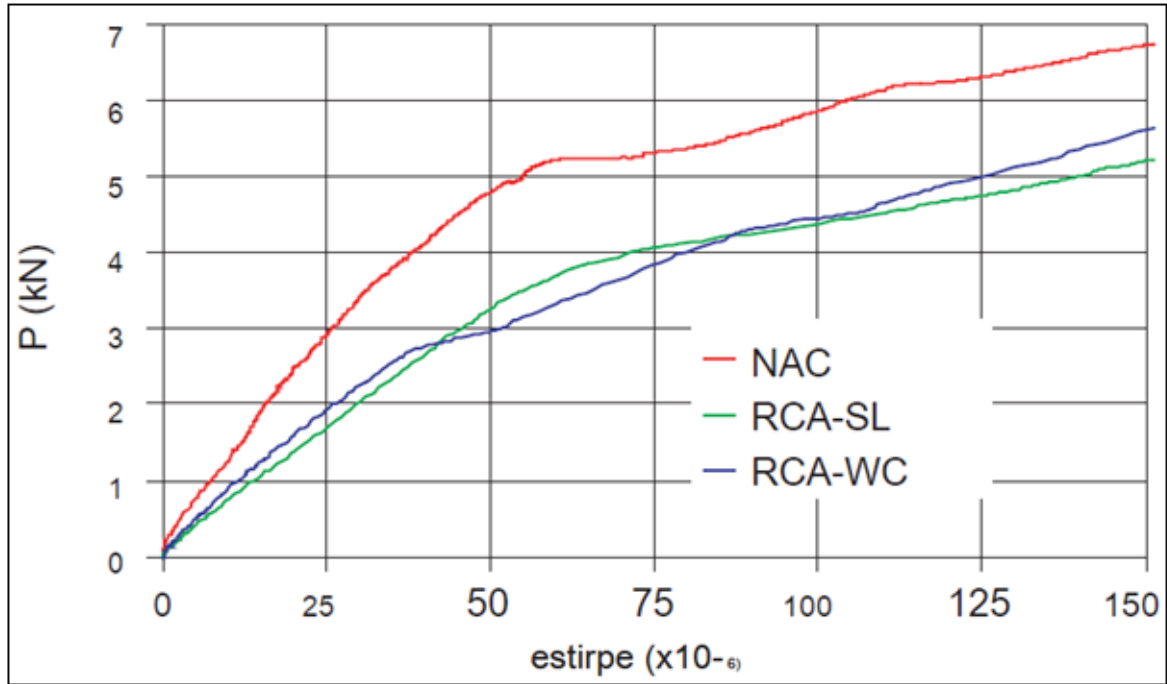
No item 2.9 desta dissertação foram citados trabalhos de pesquisas com vigas produzidas em concreto com agregados reciclados similares a pesquisa aqui realizada. Para efeito de comparação, os resultados encontrados são apresentados nos gráficos 14,15, 16 e 17 as quais representam as flechas das vigas.

No caso das curvas apresentadas nos Gráficos 14 aos 17 foram utilizadas diferentes taxas de armaduras e as menores taxas são próximas da utilizada nessa pesquisa. Observa-se a semelhança dos comportamentos das diferentes vigas.

Os autores tais como: Santos, Branco e Brito (2004); Al-zahraa; El-mihilmy; Bahaa, (2010); Ignjatović et al. (2013) também apresentam os gráficos e figuras relativos à deformação no concreto e nas barras de aço. Entretanto pode-se afirmar que os comportamentos das diferentes vigas são similares entre si e com as aqui ensaiadas. Em seguida são apresentadas nas Figuras 42 e Figura 43 os comportamentos das vigas indicando desempenhos semelhantes nas pesquisas relacionados com os autores: Al-zahraa; El-mihilmy;

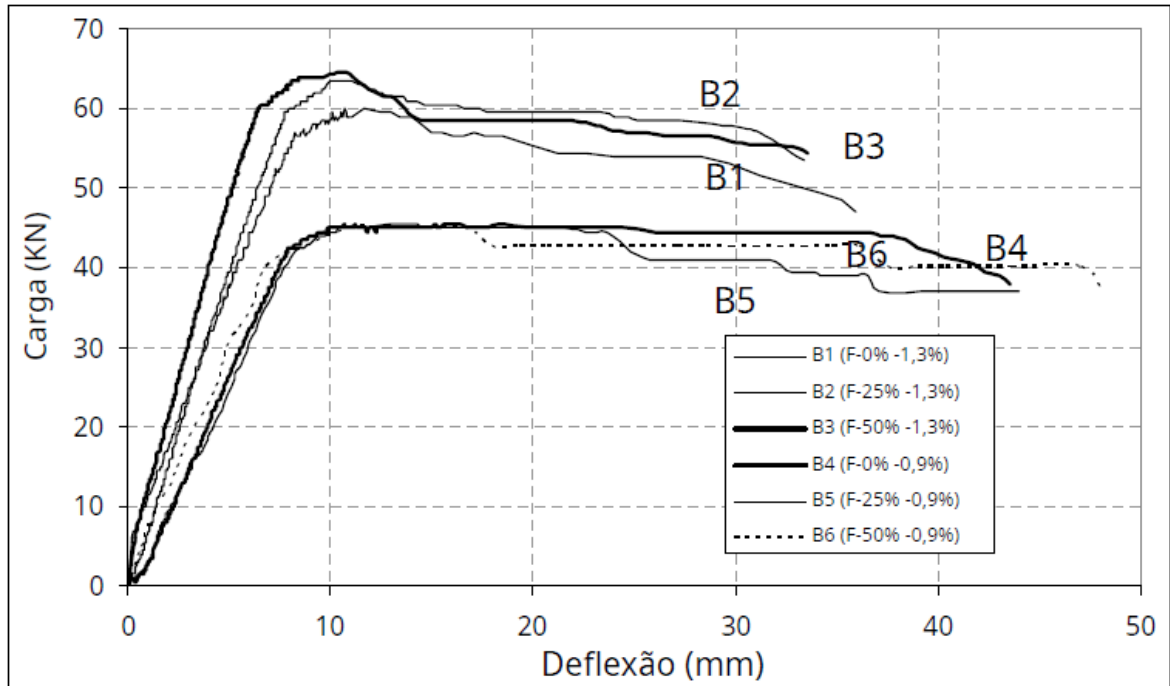
Bahaa, (2010) e Ignjatović et al. (2013) em relação aos ensaios apresentados onde se pode ver as semelhanças nos resultados aqui demonstrados na Figura 44.

GRÁFICO 14 – COMPORTAMENTO DE VIGAS COM AR



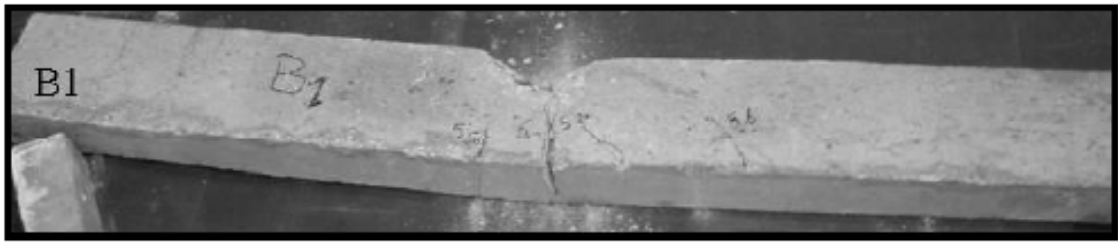
Fonte: Santos, Branco e Brito (2004)

GRÁFICO 15 - COMPORTAMENTO DE VIGAS COM AR

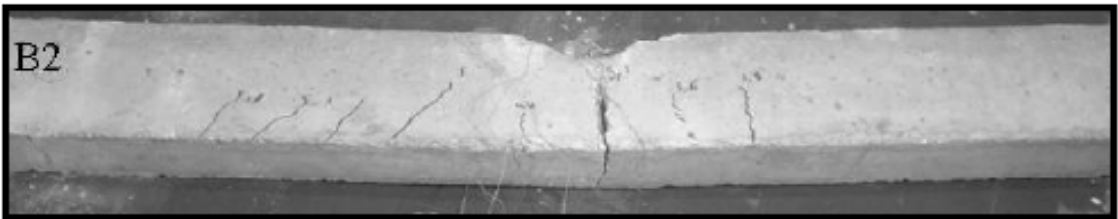


Fonte: Al-zahraa; El-mihilmy; Bahaa, (2010)

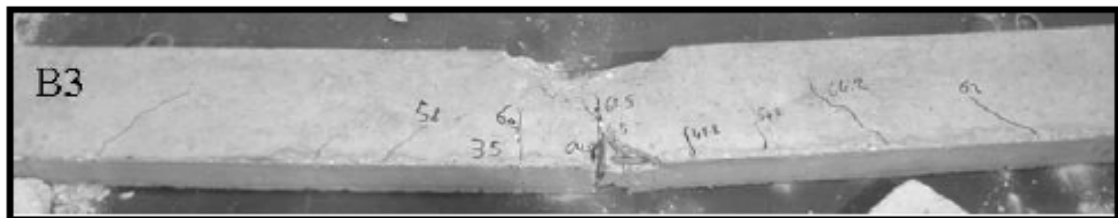
FIGURA 42 – FISSURAÇÃO E MODO DE FALHA: AL-ZAHRAA; EL-MIHILMY; BAHAA, (2010)



B1: Viga de concreto natural

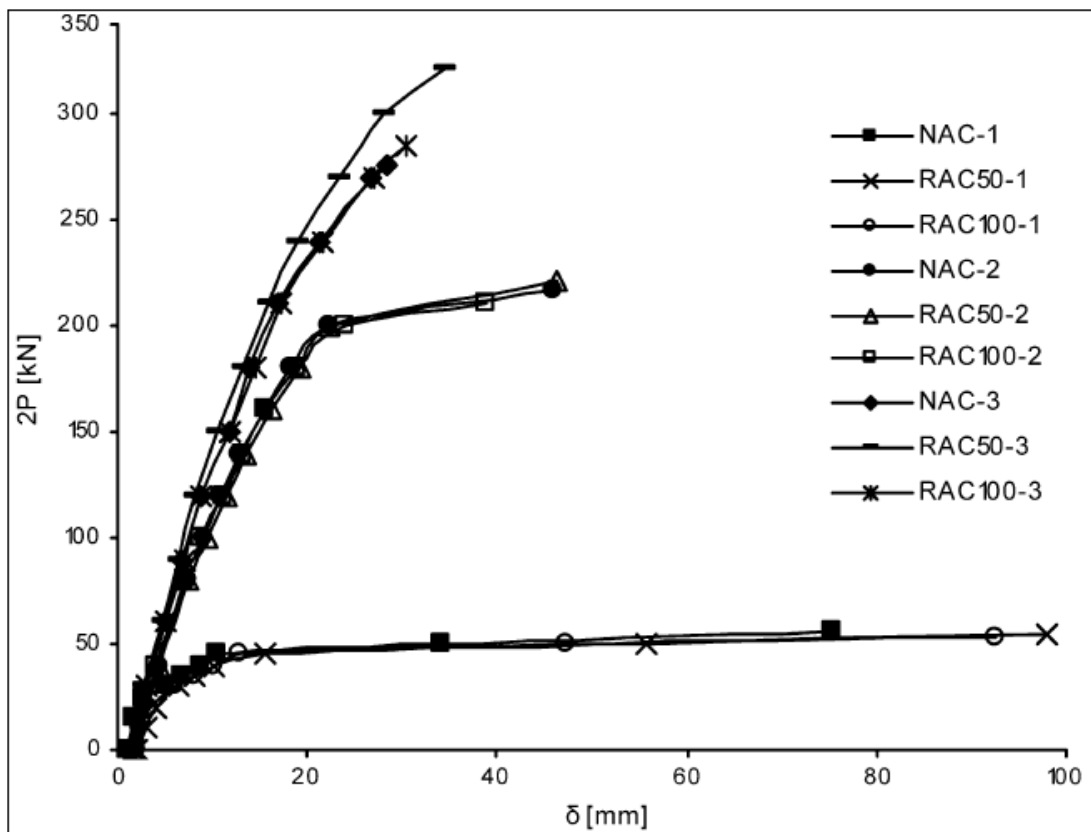


B2: Viga de concreto reciclado com o teor de 25%



B3: Viga de concreto reciclado com o teor de 50%

GRÁFICO 16 - COMPORTAMENTO DE VIGAS COM AR



Fonte: Ignjatović et al. (2013)

FIGURA 43 – FISSURAÇÃO E MODO DE FALHA: IGNJATOVIĆ ET AL. (2013)

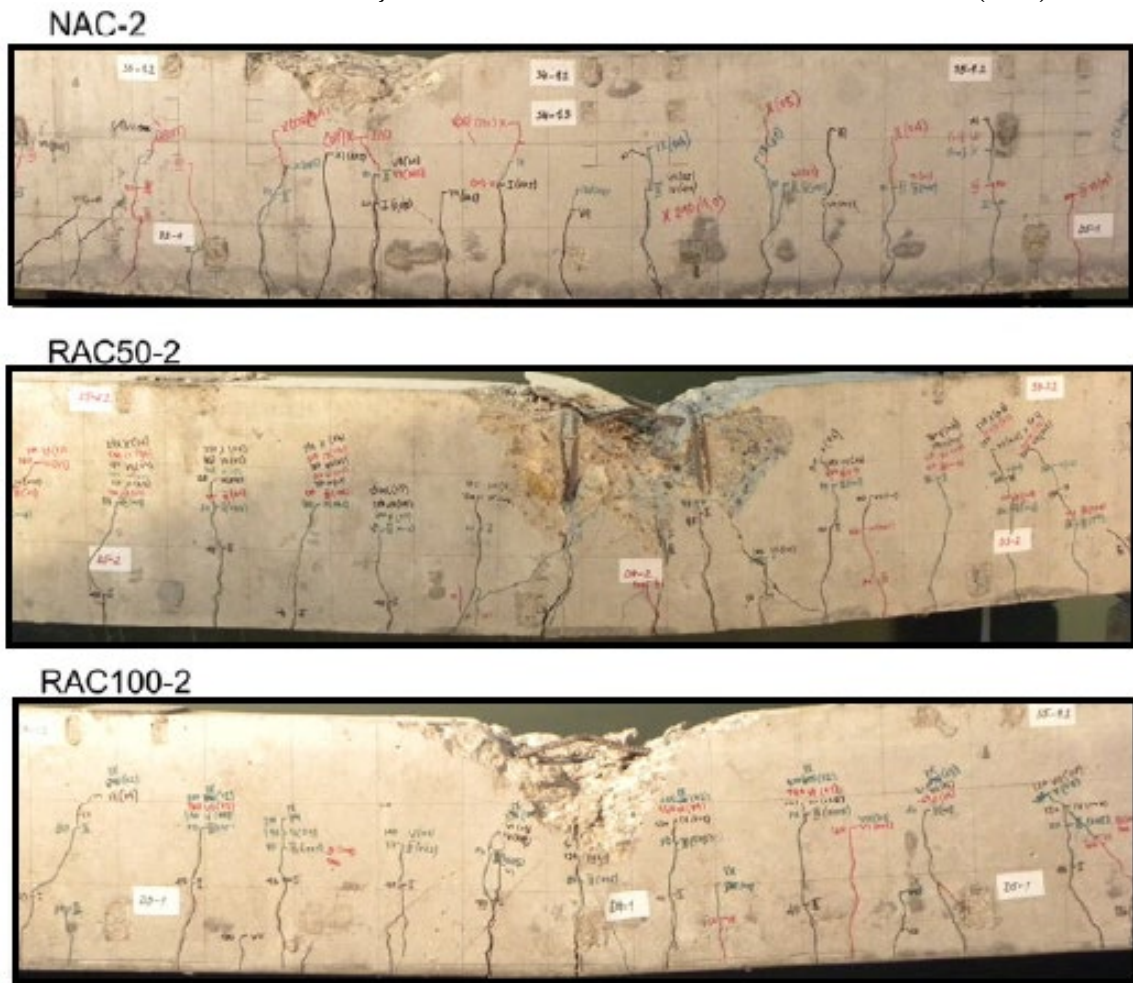
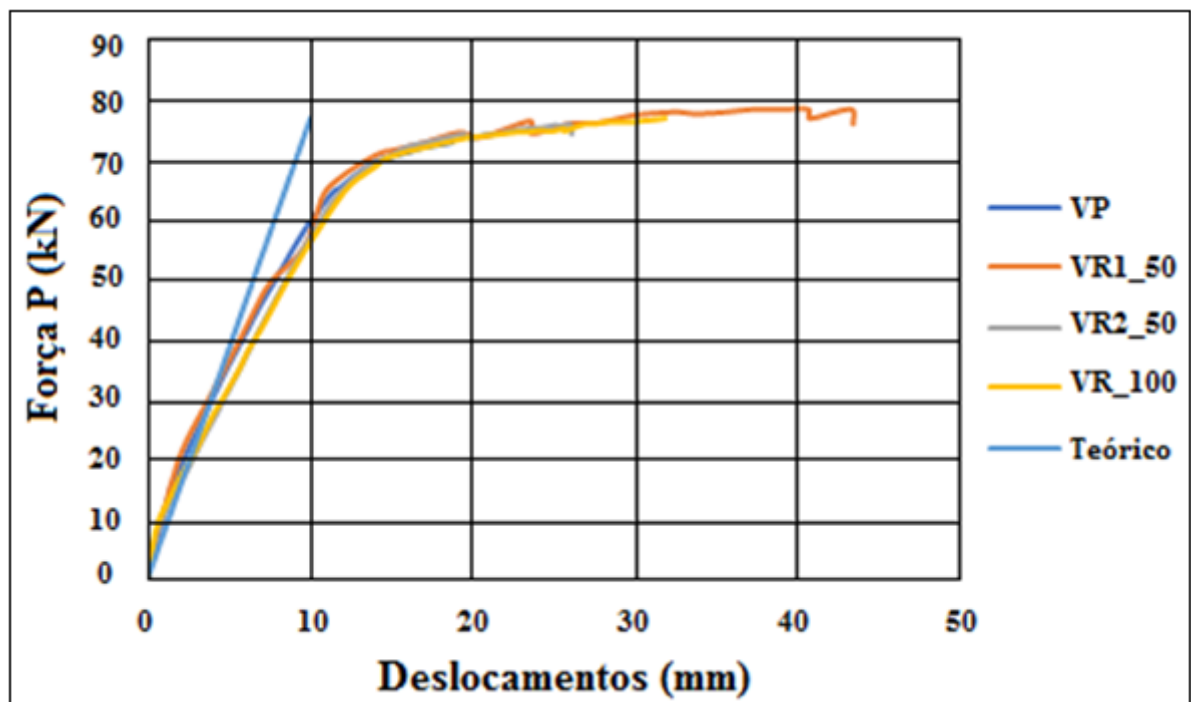


GRÁFICO 17 – COMPORTAMENTO DE VIGAS COM AR DE DIFERENTES AUTORES



Fonte: Do autor. (2021)

FIGURA 44 – FISSURAÇÃO E MODO DE FALHA: DO AUTOR (2021)



Fonte: Do autor. (2021)

As conclusões são notáveis a partir do estudo feito pelos autores corroboraram com as análises feitas na presente pesquisa, constatando-se semelhanças nos seus resultados, que praticamente podemos afirmar poucas diferenças e pode-se observar que os comportamentos das vigas foram similares tais como:

- O modo de falha na viga deu-se por deflexão, como eles esperavam. É que algumas vigas tiveram falhas antes do início do escoamento.
- As diferenças de comportamentos das vigas compostas de material de RCA foram idênticas aos dos concretos convencionais.
- A ductilidade ocorrida no meio do vão das vigas esteve em função da variação das taxas dos reforços das armaduras.
- Eles consideraram poucas semelhanças de deformações plásticas nas vigas ensaiadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de pesquisa teve como objetivo principal avaliar o uso dos agregados graúdos reciclados de resíduos da construção e demolição (RCD) na fabricação de concreto estrutural e sua aplicação em elementos estruturais, especificamente em vigas.

Partiu-se de um traço para o concreto convencional, tomado com referência, dando sequência a substituições parciais do agregado natural.

Concluiu-se que as substituições de 25% e de 50% praticamente não interferiram nas propriedades do concreto endurecido. Por outro lado, as substituições de 75% e 100% apresentaram reduções maiores sendo que, entre as duas a diferença não foi significativa.

Portanto, as porcentagens a serem trabalhadas foram definidas: 50% e 100% sendo que o fator água cimento (a/c) foi mantido em 0,55 para a substituição de 50% e aumentada para 0,667 para a de 100% em vista da maior absorção do agregado graúdo reciclado em relação ao agregado graúdo natural.

Dessa forma, as opções pelas substituições de 50% e 100% foram adotadas para a fabricação das vigas de concreto armado.

Para essas duas substituições foram moldados corpos de prova em quantidades estatisticamente determinadas para serem avaliadas algumas propriedades físicas do concreto endurecido como absorção, índice de vazios e densidade. As diferenças entre os valores do concreto convencional e do concreto com substituições foram mínimas.

A propriedade alvo foi à resistência à compressão simples para se garantir atingir resistência compatível ao concreto estrutural. Ainda, foram avaliadas as propriedades de resistência à tração e o módulo de deformação. Os resultados foram considerados bons e compatíveis com o uso em elementos estruturais.

Moldadas as quatro vigas, sendo uma com concreto convencional para referência, os resultados obtidos demonstraram que o comportamento delas foi muito parecido sendo importante indicativo de que as substituições parciais ou mesmo total são possíveis de uso em estruturas de concreto armado.

Também com relação ao valor da força última é possível afirmar que os valores experimentais foram muito próximos e coerentes com aquele obtido com a formulação teórica do concreto armado.

5.1 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

Este estudo não teve pretensão de esgotar o assunto, mas abrir possibilidades para outros trabalhos junto ao PPGCA e como continuidade de estudos são sugeridos:

- Estudo de traços específicos para o concreto com agregado graúdo reciclado de RCD;
- Análise de vigas com maiores taxas de armadura abrangendo os domínios 2 e 3 para os concretos com agregado graúdo reciclado de RCD;
- Análise da resistência ao cisalhamento para o concreto com agregado graúdo reciclado de RCD;
- Avaliação do uso de agregado miúdo reciclado de RCD em substituição ao natural;
- Extensão desses estudos a outras solicitações;
- Avaliação do ciclo de vida dos agregados provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD);
- Análises macroscópicas dos corpos de provas dos resíduos reciclados;
- Análise de vigas de concreto composto com fibras em diversas porcentagens de substituições do agregado natural pelo reciclado.
- Estudo de elementos estruturais com aplicação em concreto reciclado mediante a exposição de incêndios.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT—ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. p. 14.

ABNT—ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. p. 238.

ABNT—ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009. p. 11.

ABNT—ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009. p. 04.

ABNT—ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004. p. 10.

ABNT—ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004. p.12.

ABNT—ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16974: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 2021. p.05.

ABNT—ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16889: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2021. p. 05.

ABNT—ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente absorção de água. Rio de Janeiro, 2021. p. 21.

ABNT—ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. p. 13.

ABRELPE—ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Disponível em: <http://www.abes-mg.org.br/visualizacao-de>

clipping/ler/9557/lançamento do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017 (abes-mg.org.br). Acesso em 12 abril 2020.

ABRECON. Brasileiro produz por ano meia tonelada de resíduos de construção civil. 2019. Disponível em: <<http://abrecon.org.br/brasileiro-produz-por-ano-meia-tonelada-de-residuos-de-construcao-civil>>. Acesso em: 01 Março 2019.

AL-ZAHRAA, F.; EL-MIHILMY, M.; BAHAA, T. Flexural strength of concrete beams with recycled concrete aggregates. J. Eng. Appl. Sci, v. 57, n. 5, p. 355–375, 2010.

ANDREOLI C. V, ANDREOLI F. N, TRINDADE T. V, HOPPEN C. Resíduos sólidos: origem, classificação e soluções para destinação final adequada. Complexidade: Redes e Conexões do Ser Sustentável. 1ªEd, Programa Coleção Agrinho, p. 531 – 552. 2014.

ANGULO S. C. Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. 2000. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 2000.

ANGULO S. C. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 2005.

ANGULO S. C, FIGUEIREDO A. D. Concreto com agregados reciclados. ISAIA, GC Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo: Arte Interativa.Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. Livro concreto: ciência e tecnologia, 2011.

ANIKE E. E.; GANJIAN M. S. E.; TYRER M.; OLUBANWO A. O. The potency of recycled aggregate in new concrete: a review. Construction Innovation, Emerald Publishing Limited, Construction Innovation, v 19, nº4, 2019, pp. 594–613.CoventryUniversity, 2019.

ARAUJO D. L.; FELIX L. P.; SILVA L. S.; SANTOS T. M. Influência de agregados reciclados de resíduos de construção em propriedades mecânicas do concreto.REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 11,n. 1, Goiânia, GO, 2016.

BARBOZA, M. R.; BASTOS, P. S. Traços de concreto para obras de pequeno porte. Concreto e Construção, v. 36, p. 32–36, V.XXXVI, IBRACON, p.32-36, 2008.

BASTOS, P. S. Fundamentos do concreto protendido.Universidade Estadual, 2020.

BATES, D.; MAECHLER, M.; BOLKER, B. WALKER., S. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, v. 67, n. 01, p. 148, Cornell University, 2015.

BRITO FILHO, JERSON A. Cidade versus entulho. In: *Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil*, 2, 1999, São Paulo. *Anais*. São Paulo: Comitê Técnico do IBRACON; CT 206 - Meio Ambiente. P. 56-67, 1999.

BRITO J. D.; ALVES F. Concrete with recycled aggregates: the Portuguese experimental research. DE Civil-IST, Technical University of Lisbon, Portugal. *Materials and Structures*, Springer, v. 43, n. 1, p. 35–51, 2010.

BRITO, J. D.; SAIKIA, N. Recycled aggregate in concrete: use of industrial, construction and demolition waste. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. *Green Energy and Technology*. 4ª edição, Lisbon, Portugal, The book. p. 379, 2012.

BCSJ — Proposed standard for the “use of recycled aggregate and recycled aggregate concrete”. Building Contractors Society of Japan. Committee on disposal and reuse of construction waste. May 1977 (english version published in June 1981).

BRASIL ENGENHARIA. Brasil recicla cerca de 20% dos resíduos de construção. 2015. Disponível em: <<: <http://www.brasilengenharia.com/portal/noticiasnoticias-daengenharia/14151-brasil-recicla-cerca-de-20-dos-residuos-de-construcao>>. Acesso em: 05 Março 2019.

BUTTLER, A. M. Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto: influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, 2003.

CONAMA - Resolução Conama nº431, que altera o art. 3º. da resolução Conama nº. 307, de 5 de julho de 2002, estabelecendo nova classificação para o gesso. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, 2011.

CABRAL, A. E. B. Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos de com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD. Tese de Doutorado em Ciências de Engenharia Ambiental. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

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

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH V.; MOLIN D. C. C. D.; RIBEIRO J. L. D. Shrinkage modeling for recycled aggregate concretes. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, SciELO Brasil, v. 3, p. 1–23, 2010.

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH V.; MOLIN D. C. C. D.; RIBEIRO J. L. D. Performance estimation for concretes made with recycled aggregates of construction and demolition waste of some Brazilian cities. *Materials Research*, SciELO Brasil, v. 15, p. 1037–1046, 2012.

ÇAKIR, Ö. Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (rca) concrete with mineral additives. *Construction and Building Materials*, Journal Elsevier, Istanbul, Turkey, v. 68, p. 17–25, 2014.

CARRIJO P. M. Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto. 2006. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2005.

COCHRAN K. M, TOWNSEND, T. G. Estimating construction and demolition debris generation using a materials flow analysis approach. *Waste management*, v. 30, n. 11 p. 2247-2254, 2010.

COHEN, J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Applied psychological measurement, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 12, n. 4, p. 425–434, Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers. (1988).

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente-Resolução nº307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. [S.l.]: Diário Oficial da União Brasília, Brasil, 2002.

CORDEIRO, L. de N. P.; MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C.; SOUZA, P. S. L.; PAES, I. N. L. Avaliação de processos de misturas de concretos com agregados graúdos reciclados. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, SciELO Brasil, v. 17, p. 255–265, 2017.

CORINALDESI, V. Structural concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate: from investigation to design. Università Politecnica delle Marche - Construction and Building Materials, Ancona, Italy, v. 24, p. 1616–1620 Advances in Civil Engineering, Hindawi, 2011.

COSTA, G. D. C.; RIOS, E. N. Avaliação da resistência à compressão do concreto produzido com agregados reciclados da construção civil. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC’2017 8 a 11 de agosto de 2017 – Belém-PA, Brasil. 74ª (SOAEA) - Semana Oficial da Engenharia e da Agronomia, 2017.

DOMTOTAL. Ensaio em Engenharia, Ciência e Sustentabilidade, Brasil, 2018. Reaproveitamento de resíduos sólidos da construção civil no Brasil. Disponível em: <https://domtotal.com/noticia/1262733/2018/06/reaproveitamento-de-residuos-solidos-da-construcao-civil-no-brasil/>. Acesso em: 05 ago. 2021.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. D. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. cement & concrete composites. Lisboa - Portugal, 2010. v. 32, p. 9–14, 2010.

FARIA J. V. O.; FURTADO M. R. C.; BELLO L. A. L.; RIBEIRO J. L. O. S.; VINAGRE M. V. A. Estudo comparativo entre concreto proveniente de RCD e concreto padrão, com aplicação em peças pré-moldadas. XVII COMBRASEG – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica de 09 – 13 set. Goiânia, GO. Organização: Texas A&M University, 2014.

FIGUEIREDO N, VARGAS A. Análise da influência do uso de agregados reciclados da região de Criciúma/SC nas propriedades mecânicas de concretos estruturais. 2016.

FRASSON, S. A. Usinas de reciclagem de entulho como agentes na valoração dos resíduos gerados pela construção civil. Encontro Internacional de Gestão Empresarial e Meio Ambiente, v. 19, p. 04, 2017. Anais: XIX ENGEMA – USP - São Paulo, Edição 2017 - 04 a 05 de dez 2017.

FROTTE, C. et al. Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD. Revista Material (Rio de Janeiro), SciELO Brasil, v. 22, 2017, Departamento Acadêmico de Construção Civil – UTFPR, 2017.

GIMENES M. Estudo do comportamento mecânico do concreto com agregado reciclado mediante modelagem multiescala pelo MEF. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Faculdade de engenharia de Bauru programa de pós-graduação em engenharia civil e ambiental, São Paulo – Bauru, p. 32. 2020.

GARCIA, F. A. M.; GARCIA, R. S.; MENDES, I. T. D. O. Avaliação da viabilidade de utilização do concreto polimérico em substituição ao concreto convencional. *Revista Científica UNILAGO*, 2014. vol. 1, n. 1, 2014.

GONZÁLEZ J. G.; ROBLES D. R.; VALDÉS A. J.; POZO J. M. M. D.; ROMERO M. I. G. Ceramicwarewaste as coarseaggregate for structural concrete production. *Journal: Environmental Technology*. Taylor & Francis, v. 36, n. 23, p.3050–3059, 2015.

GOMES, M.; BRITO, J. D.; BRAVO, M. Mechanical performance of structural concretewith the incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 26, n. 10, p.04014076, 2014.

GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F. Concretes with aggregatesfrom demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties. *Building and Environment*, Elsevier, v. 43, n. 4, p. 429–437, 2008. Department of Civil Engineering, La Coruña University, Spain, 2008.

GRIMAZ, S.; BARAZZA, F.; MALISAN, P. Seismic safety design of sprinkler systems comparison between nfpa 13 and Italian NTC 2008. *Chemical Engineering Transactions*, v. 36, p. 307–312, 2014.

IGNJATOVIĆ I. S.; SNEŽANA B.; MARINKOVIĆ Z. M.; SAVIĆ A. R. Flexural behavior of reinforced recycled aggregate concretebeams under short-term loading. *Revista Materials and structures*, Springer, v. 46, n. 6, p.1045–1059, 2013.

JAYAKODY S.; ZIMAR A. M. Z.; RANAWEERA R. A. L. M. Potential use of recycled constructionand demolition waste aggregates for non-structural concrete applications. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, Sri Lanka, v. 49, n. 02, p.205–216. 2018.

JIMÉNEZ, L. F.; MORENO, E. I. Durability indicators in high absorption recycled aggregate concrete. Journals of Hinadawi Publishing Corporation, Advances in Materials Science and Engineering. Chetumal Institute of Technology, México, 2015 v. 2015 p. 08.

KOU, S.; POON, C. S. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. Revista Cement and Concrete Composites, Department of Civil and Structural Engineering, v. 33, n. 8, p. 788-795. Construction and building materials, Elsevier, v. 35, p.69–76, 2012.

KUMAR, P. S.; DHINAKARAN, G. Effect of admixed recycled aggregate concrete on properties of fresh and hardened concrete. Journal of materials in civil engineering, American Society of Civil Engineers, Tamil Nadu, India. v. 24, n. 4, p. 494–498, 2012.

KUMUTHA, R.; VIJAI, K. Effect of recycled coarse aggregates in properties of concrete. Journal of Green Building, College Publishing, v. 3, n. 4, p. 130–137, 2008.

LARSON, R.; FARBER, B. Estatística Aplicada [Applied statistics]. [S.l.]: São Paulo: Blog: Ciências Exatas – São Paulo – SP – Brasil Pearson Education do Brasil, 2015

LEITE, M. A. Avaliação de propriedade mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Porto Alegre-RS, Tese de (Doutorado em Engenharia). Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

LENTH, R. V. R: A language and environment for statistical computing. r foundation for statistical computing. Vienna, Austria: URL [https://www. R-project. org/](https://www.R-project.org/). [GoogleScholar], 2017. Acesso em: 05 Janeiro 2020.

LENTH, R. V.; BUERKNER P.; HERVE M.; LOVE J.; RIEBL H.; SINGMANN H.R: A language and environment for statistical computing. Vienna: Rfoundation for statistical computing. Online: [http://www. R - Project. org](http://www.R-Project.org), 2009. Acesso em: 05 janeiro 2020.

LOPES, L. R. Avaliação da interferência dos finos no desempenho de concretos com resíduos de construção e demolição. Londrina–2005. 148p. Dissertação (Mestrado)–Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina, 2005.

LOVATO P. S. Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto. 2007. Dissertação de Mestrado em Engenharia na modalidade Acadêmico. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LY, B. T.; FAR, H. Investigation on properties of coarse reclaimed aggregates and their effects on concrete strength and workability Structural Concrete, Wiley Online Library, v. 20, n. 5, p. 1622–1630, 2019.

MALEŠEV, M.; RADONJANIN, V.; MARINKOVIĆ, S. Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. Journal Sustainability of Constructions, Molecular Diversity Preservation International, v. 2, n. 5, p. 1204–1225, 2010.

MARQUES, R. J.; BAPTISTA, E. M. d. C. Estudo preliminar da degradação por mineração: O caso do município de Timon/ma. X Simpósio de Produção Científica e IX Seminário de Iniciação Científica da UESPI, 2010.

MATIAS D.; BRITO J.; ROSA A.; PEDRO D. Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates—influence of the use of super plasticizers. Revista Construction and building materials, Portugal, Elsevier, v. 44, p. 101–109, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. Concrete: microstructure, properties, and materials. [S.l.]: . 4ª Edição, Editora McGraw-Hill Professional Publishing. p. 645. 2014.

MENESES I. A.; VIDAL I. C. A.; SANTOS D. L.; LIMA M. R.; FERREIRA W. B. Estudo de caso das caçambas coletoras de resíduos de construção e demolição na cidade de campina grande. Encontro Nacional de Educação, Ciência e Tecnologia/UEPB, 2012.

MESQUITA A. S. G. Análise da geração de resíduos sólidos da construção civil em Teresina, Piauí. Editorial Educação Escola HOLOS Tecnologia, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, v. 2, p. 58–65, 2012. Instituto Federal do Piauí, 2012.

MORAL, R. A.; HINDE, J.; DEMÉTRIO, C. G. Half-normal plots and over dispersed models in r: the hnp package. Journal of Statistical Software, v. 81, n. 1, p. 1–23, 2017.

MOREIRA L. H. H. Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto

estrutural. 2010. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MOTA T. M. Modelagem numérica da flexão de vigas de concreto reciclado armado. 2012. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana. p. 122.

NANYA C. S. O uso de resíduos de construção civil como substituto de agregados naturais em concretos: avaliação de alguns parâmetros de durabilidade. 2018. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Programa de pós-graduação em Estruturais e Construção Civil da Universidade de São Carlos – São Paulo.

NEVILLE, A.; BROOKS, J. Concrete technology, Second Edition, 2p. 361 a 375. Essex, England: Pearson Education Limited, 2010.

NÓBREGA A. R. S. Contribuição ao diagnóstico da geração de entulho da construção civil no município de Campinas Grande – PB. 2002. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Centro Tecnologia em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, 2002.

NOGUEIRA J. R. S. Avaliação da influência do método da mistura nas propriedades de concreto produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto. 2015. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa em Engenharia Civil da Universidade do vale do Rio dos Sinos-UNISINOS- São Leopoldo, 2015.

OLIVEIRA, D. F.O. Concreto: sua origem, sua história. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) — Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Pós-Graduação – Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura. Universidade de São Paulo, 2016.

OLIVEIRA J. J. A. Análise teórica da deflexão de vigas de concreto com agregados reciclados de RCD. Universidade Estadual Feira de Santana. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Feira de Santana, BA, 2018.

OPARA, H. E.; EZIEFULA, U. G.; UGWUEGBU, C. C. Experimental study of concrete using recycled coarse aggregate. *International Journal of Materials and Structural Integrity*, Inderscience Publishers (IEL), v. 10, n. 4, p. 123–132, 2016.

PRASADA, R. D.; MADHAVI, M. A study on partially used recycled coarse aggregate cement concrete. *Asian journal of civil engineering (building and housing)*, v. 14, n. 6, p. 917-933.2013.

PINTO T. P. Utilização de resíduos de Construção: Estudo de uso em argamassa. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Planejamento. Departamento de Arquitetura e Planejamento da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1986. p. 140.

RANGEL, C. S. Influência de agregados graúdos reciclados nas propriedades estruturais de concretos de resistência normal e de alto desempenho. 2015. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

RILEM - 121-DRG., R. T. F. T. Specifications for concrete with recycled aggregates *Mater Struct.*, v. 27, n. 173, p. 557–559, 1994.

REIS C. N. S. Influência da utilização de agregado miúdo de rcd na aderência aço-concreto reciclado. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Feira de Santa, 2009.

RENCHER, A. C.; SCHAALJE, G. B. *Linear models in statistics*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Second Edition. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, Published simultaneously in Canada. 2008.

RIAZ, M. R.; HAMEED, R.; ILYAS, M.; AKRAM, A.; SIDDIQI, Z. A Mechanical characterization of recycled aggregate concrete *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 16. p. 25-32, 2016.

R CORE TEAM. A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Version 3.4.1. Disponível em: [https://fullrefman.pdf\(mit.edu\)](https://fullrefman.pdf(mit.edu)). (2017-06-30). Acesso em: 6 março 2020.

RODRIGUES, C. R. d. S.; FUCALE, S. Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil. *Ambiente Construído*, SciELO Brasil, Revista em online da ANTAC - Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 99-111, 2014.

ROBLES D. R.; GONZÁLEZ J. G.; VALDÉS A. J.; POZO J. M. M.D.; ROMERO M. I. G. Quality assessment of mixed and ceramic recycled aggregates from construction and demolition wastes in the concrete manufacture according to the Spanish standard. *Materials*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 7, n. 8, p. 5843–5857, 2014.

SANTOS A. A. M.; LEITE M. B. Avaliação de concretos reciclados com agregado graúdo de concreto dosado pelo método da abcp modificado. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, SciELO Brasil, v. 18, p. 341–359, 2018.

SANTOS, J. R. D; BRANCO, F.; BRITO, J. D. Mechanical properties of concrete with coarse recycled aggregates. *Journal Structural engineering international*, Taylor & Francis, v. 14, n. 3, p. 213–215, 2004.

SEARA-PAZ S.; CORINALDESI V. B.; GONZÁLEZ-FONTEBOA E.; MARTÍNEZ-ABELLA F. Influence of recycled coarse aggregates characteristics on mechanical properties of structural concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Taylor & Francis, v. 20, n. sup1, p. s123–s139, 2016.

SILVA R. E.; MEIRA A. R.; ARAÚJO N. M. C. Resíduos da construção civil: análise de uma obra e de uma usina de reciclagem. *Revista Principia Editora IFPB*, 2015. v. 1, n. 21 p. 112–118, 2015.

SILVA, R.; BRITO, J. D.; DHIR, R. Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 236, p. 117629, 2019.

SOUSA F. H. F. Avaliação da relação entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico de concreto produzido com agregados graúdos reciclados em substituição aos agregados graúdos naturais. 2018. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale Rio dos Sinos. São Leopoldo.

SOUSA W. F. Estudo sobre a aplicação de agregado reciclado de concreto em construção de pavimento. Dissertação de Mestrado em Ciências. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transporte. Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 2011.

SOUZA C. A. Utilização de resíduo de concreto como agregado miúdo para argamassa de concretos estruturais convencionais. Dissertação de Mestrado em Construção Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

SOUZA, L. M.; ASSIS, C. D; SOUTO, S. B. G. Agregado reciclado: um novomaterial da construção civil. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 18, n. 1, p. 273–278, 2014.

TENÓRIO J. J. L. Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção demolição visando aplicações estruturais. Dissertação Mestrado em Engenharia Civil. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas. Maceió, AL. 2007.

UNI EN 1744-1. Tests for chemical properties of aggregates - part 1: chemical analysis. Publisher: Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), 2013. 2013. Disponível em: <https://infostore.saiglobal.com/en-us/Standards/1081153_SAIG_UNI_UNI_2518630/>. Acesso em: 25 abril 2019.

VIANA, L. A. d. C.; SALES, A. T. C.; SALES, L. C. Efeitos da variabilidade de agregados de rd sobre o desempenho mecânico do concreto de cimento portland. *Matéria (Rio de Janeiro)*, SciELO Brasil, v. 23, 2018.

VIEIRA, G. L. Estudo do processo de corrosão sob ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Dissertação de Mestrado em Engenharia na Modalidade Acadêmica. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

ZEGA, C. J.; MAIO, Á. A. D. Use of recycled fine aggregate in concretes with durablerequirements. *JounarlWaste Management, Argentina*, v. 31, n. 11, p. 2336-2340. Elsevier, 2011.

ZORDAN S. E. A. Utilização de entulho como agregado na confecção de concreto. 1997. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, na área de Saneamento. Departamento de Saneamento e Meio Ambiente da Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas SP, 1997.

APÊNDICES

APÊNDICE A – IMAGENS DE ENSAIOS DE ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE, O CHAMADO *SLUMP TEST*.



Figura A.1 – Concreto natural.



Figura A.2 – Concreto 50%



Figura A.3 – Concreto 100%

APÊNDICE B – IMAGENS DE ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO É A TRAÇÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE.



Figura B.1 – Resistência à compressão

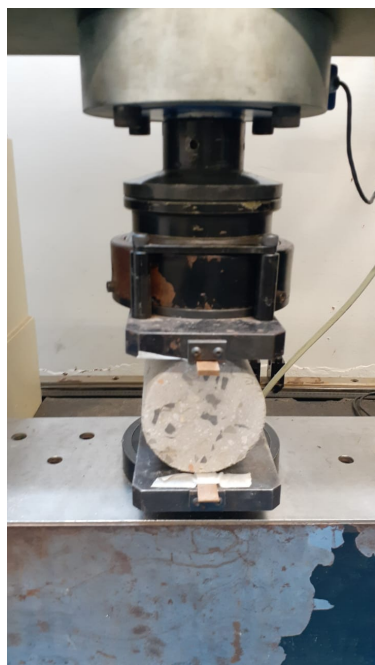


Figura B.2 - Resistência à tração



Figura B.3 – Módulo de Elasticidade

APÊNDICE C – IMAGENS DOS CONCRETOS ENSAIADOS APÓS AS SUAS RUPTURAS.



Figura C.1 – Ensaio de resistência à compressão traço padrão.



Figura C.2 – Ensaio de resistência à compressão traço 50%



Figura C.3 – Ensaio de resistência à compressão traço 100%



Figura C.4 – Ensaio de resistência à tração traço padrão.



Figura C.5 – Ensaio de resistência à tração traço 50%



Figura C.6 – Ensaio de resistência à tração traço 100%