



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO GRAÚDO
NO CONCRETO POR RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

TÁLISON YURE DA COSTA SANTOS

POMBAL – PB

2023

TÁLISON YURE DA COSTA SANTOS

ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO GRAÚDO NO
CONCRETO POR RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Unidade Acadêmica de
Ciências e Tecnologia Ambiental da
Universidade Federal de Campina Grande,
como parte dos requisitos necessários
para obtenção do título de Engenheiro
Civil.

Orientador(a): Prof^a. Dr^a. Larissa Santana
Batista

POMBAL – PB

2023

S237a Santos, Tálison Yure da Costa.

Análise da substituição parcial do agregado graúdo no concreto por resíduo da construção civil / Tálison Yure da Costa Santos. – Pombal, 2023.

76 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) –
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia
Agroalimentar, 2023.

“Orientação: Profa. Dra Larissa Santana Batista”.

Referências.

1. Concreto. 2. Materiais alternativos. 3. Agregado graúdo. 4. RCD. 5.
Impactos ambientais. 6. Sustentabilidade. I. Batista, Larissa Santana. II. Título.

CDU 691.32 (043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.

TÁLISON YURE DA COSTA SANTOS

**ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO GRAÚDO NO
CONCRETO POR RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Trabalho de Conclusão de Curso do discente TÁLISON YURE DA COSTA SANTOS **APROVADO** em 04 de dezembro de 2023 pela comissão examinadora composta pelos membros abaixo relacionados como requisito para obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL pela Universidade Federal de Campina Grande.

Registre-se e publique-se.

Documento assinado digitalmente
 LARISSA SANTANA BATISTA
Data: 16/12/2023 09:57:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Larissa Santana Batista
(Orientadora – UACTA/CCTA/UFCG)

Documento assinado digitalmente
 CICERO FELLIPE DINIZ DE SANTANA
Data: 16/12/2023 09:36:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Cícero Felipe Diniz de Santana
(Membro Interno – UACTA/CCTA/UFCG)

Documento assinado digitalmente
 ANA LETICIA RAMOS BEZERRA
Data: 16/12/2023 09:51:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng^a. Ana Leticia Ramos Bezerra
(Membro Externo – Mestranda UFCG)

Dedico este trabalho à minha mãe, Francisca Celestina, por todo amor, carinho, dedicação, incentivo e por nunca medir esforços para a realização dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Deus, pela saúde, proteção, sabedoria e por me permitir enfrentar os últimos anos, sem suas bênçãos não seria possível a conclusão dessa graduação.

À minha mãe, Francisca Celestina, por ser meu exemplo de garra e esperança. Por sempre acreditar em mim. Pelo amor e carinho que nunca faltou, apesar de todas as dificuldades. Sem dúvidas, não estaria aqui hoje sem a sua presença na minha vida. Sou eternamente grato por tudo que fez e faz por mim.

À minha avó, Inácia Celestina (*in memoriam*), por ter sido uma segunda mãe. Por sempre ter me dado amor, carinho e todo suporte possível durante a minha vida. Serei eternamente grato por tudo.

Aos meus irmãos, Cintia Yngrid, Pablo Ygor e Palloma Yane, por todo companheirismo e lealdade. Por estarem sempre torcendo por mim, e ao meu lado me dando forças para a realização dos meus sonhos.

À toda minha família, avós, tios e primos, por toda torcida e apoio ao longo desses anos, em especial à minha prima Márcia Araújo, por ser incentivadora desse sonho.

À Victória Rachel, por todo incentivo e apoio que me deu, nos momentos de dúvidas e medos. Foi muito importante para a minha motivação nessa reta final de curso.

Aos amigos que conquistei no decorrer da faculdade, em especial Lucas Pinheiro, o qual esteve presente em cada momento do meu curso e que foi essencial ao longo dessa trajetória. Minha gratidão por ter me apoiado e ter acreditado em mim e na minha capacidade de sempre poder ser melhor.

Aos amigos que conquistei em Pombal, em especial ao pessoal do pensionato, por todo apoio e incentivo dado.

À Eudes Medeiros, técnico de laboratório, por sua atenção desde o primeiro contato, por sua disponibilidade em ajudar e pelos conhecimentos repassados acerca dos ensaios. Sua contribuição foi essencial para esse trabalho.

À toda comunidade acadêmica do Centro de Ciências e Tecnologias Agroalimentar, desde os terceirizados, corpo técnico aos professores, por sempre

estarem comprometidos em repassarem os conhecimentos, contribuindo diretamente para o meu aprendizado.

Aos professores que fizeram parte da minha formação acadêmica, em especial à professora Larissa Santana Batista, por ter aceitado me orientar neste trabalho, me auxiliando da melhor maneira possível para a realização do mesmo.

À SolEnergy Engenharia, por todo apoio e suporte dado nos últimos meses, nos quais foram muito importantes.

Aos membros da banca, professor Cícero Felipe Diniz de Santana e Ana Leticia Ramos Bezerra pelas críticas e sugestões que serão de grande valia para o trabalho, como também para o âmbito profissional.

Por fim, a todos que contribuíram com este momento de alguma forma, os meus mais sinceros agradecimentos.

RESUMO

A construção civil apresenta um elevado consumo de materiais, tornando-se uma grande geradora de impactos ambientais. Sendo assim, ela tem atingido fortemente o meio ambiente, seja pela mineração para a fabricação desses materiais, ou pelo descarte incorreto dos resíduos gerados. Diante deste quadro, a procura por materiais alternativos para a sua composição tem se mostrado cada vez mais interessante. Desta forma, este trabalho tem como objetivo estudar a substituição parcial do agregado graúdo por resíduos das construções e demolições (RCD), nas produções de concretos. Inicialmente realizou-se a caracterização física dos materiais, e em seguida foram moldados corpos de prova com substituição por RCD com porcentagens de 15 %, 30 % e 50 %, e averiguadas as condições do *slump test*, para serem rompidos com 7 dias, 14 dias e 28 dias para verificação das resistências à compressão simples. O concreto com 15 % de RCD teve um abatimento no *slump test* de 80 mm, o de 30 % teve um abatimento de 80 mm, e o de 50 % teve de 100 mm, eles apresentaram uma resistência à compressão média de 16,54 MPa, 15,07 MPa, e 13,24 MPa, respectivamente. Portanto, inferiu-se que devido a porosidade dos agregados do RCD, obteve-se uma queda de resistência à compressão simples quando comparado ao corpo de prova com agregado natural. No entanto, o concreto alterado apresentou uma viabilidade ambiental podendo ser utilizado em processos construtivos sem fins estruturais, como calçadas, praças de pedestres, meio fio, elementos de drenagem, blocos de vedação, entre outros, diminuindo assim, os impactos ambientais causados pela mineração dessa matéria-prima, e pelos despejos inadequados.

Palavras-chave: RCD; Impactos ambientais; Sustentabilidade.

ABSTRACT

Civil construction has a high consumption of materials, making it a major generator of environmental impacts. Therefore, it has hit the environment hard, whether through mining to manufacture these materials, or through incorrect disposal of the waste generated. Given this situation, the search for alternative materials for its composition has become increasingly interesting. Therefore, this work aims to study the partial replacement of coarse aggregate with construction and demolition waste (CDW) in concrete production. Initially, the physical characterization of the materials was carried out, and then specimens were molded with replacement by CDW with percentages of 15 %, 30 % and 50 %, and the *slump test* conditions were investigated, to be ruptured after 7 days, 14 days and 28 days to check the resistance to simple compression. Concrete with 15 % CDW had a *slump test* slump of 80 mm, that with 30 % had a slump of 80 mm, and that with 50 % had 100 mm, they presented an average compressive strength of 16.54 MPa, 15.07 MPa, and 13.24 MPa, respectively. Therefore, it was inferred that due to the porosity of the CDW aggregates, a drop in resistance to simple compression was obtained when compared to the specimen with natural aggregate. However, the altered concrete presented environmental viability and could be used in construction processes without structural purposes, such as sidewalks, pedestrian plazas, curbs, drainage elements, fence blocks, among others, thus reducing the environmental impacts caused by mining. of this raw material, and due to inadequate disposal.

Keywords: CDW; Environmental impacts; Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma das atividades realizadas	30
Figura 2 – Fragmentação dos RCD.....	31
Figura 3 – Frasco volumétrico de Le Chatelier.....	32
Figura 4 – Sequência das peneiras.....	34
Figura 5 – Recipiente com agregado graúdo	35
Figura 6 – Recipiente com agregado miúdo.....	36
Figura 7 – Recipiente com RCD.....	36
Figura 8 – Agregado graúdo no cesto de arame	38
Figura 9 – RCD no cesto de arame.....	38
Figura 10 – Moldes metálicos.....	42
Figura 11 – Betoneira.....	43
Figura 12 – Molde para <i>Slump test</i>	43
Figura 13 – Corpos de prova desmoldados	44
Figura 14 – Prensa manual	45
Figura 15 – Curva granulométrica brita e RCD	51
Figura 16 – Curva granulométrica areia	52
Figura 17 – Curva de Abrams	55
Figura 18 – Corpos de prova com 15 % de substituição	61
Figura 19 – Corpos de prova com 30 % de substituição	61
Figura 20 – Corpos de prova com 50 % de substituição	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resistência à compressão aos 7 dias.....	63
Gráfico 2 – Resistência à compressão aos 14 dias.....	64
Gráfico 3 – Resistência à compressão aos 28 dias.....	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Ensaio complementares para agregado graúdo	22
Quadro 2 – Ensaio complementares para agregado miúdo	24
Quadro 3 – Representação do traço convencional	41
Quadro 4 – Valorização de Impactos	47
Quadro 5 – Representação do traço RCD	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites da composição granulométrica do agregado graúdo	21
Tabela 2 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	23
Tabela 3 – Avaliação de impactos.....	46
Tabela 4 – Granulometria agregado graúdo	48
Tabela 5 – Granulometria agregado miúdo	49
Tabela 6 – Granulometria RCD	49
Tabela 7 – Massa unitária agregado graúdo, miúdo e RCD	52
Tabela 8 – Massa específica agregado graúdo, miúdo e RCD	53
Tabela 9 – Absorção de água agregado e RCD.....	54
Tabela 10 – Estimativa do consumo de água por m ³	55
Tabela 11 – Volume compactado seco	56
Tabela 12 – Consumo de materiais para 1 m ³ de concreto.....	58
Tabela 13 – Traço convencional	58
Tabela 14 – Traço RCD	59
Tabela 15 – Ensaio <i>Slump test</i>	60
Tabela 16 – Avaliação de impactos.....	68

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Siglas

- ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland;
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- ABRELPE – Associação de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais;
- AIA – Avaliação de Impacto Ambiental;
- CAGEPA – Companhia de Água e Esgoto da Paraíba;
- CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção;
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente;
- IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto;
- IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração;
- NBR – Norma Brasileira;
- NM – Norma Mercosul;
- PB – Paraíba;
- RCD – Resíduos de Construção e Demolição;

Símbolos

- cm^3 - Centímetro cúbico;
- g – Grama;
- kg – Quilograma;
- m – Metro;
- m^3 – Metro cúbico;
- ml – Mililitro;
- mm – Milímetro;
- μm – Micrómetro;
- MPa – Mega Pascal;
- N – Newtons.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	17
1.1.	Justificativa	18
1.2.	Objetivos.....	19
1.2.1.	<i>Objetivo Geral</i>	19
1.2.2.	<i>Objetivos Específicos</i>	19
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1.	Concreto – características importantes.....	20
2.1.1.	<i>Agregado graúdo</i>	21
2.1.2.	<i>Agregado miúdo</i>	23
2.1.3.	<i>Principais tipos de cimentos utilizados no Brasil</i>	24
2.2.	Resíduos de Construção e Demolição.....	25
2.3.	Impactos Ambientais.....	26
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1.	Materiais	29
3.2.	Métodos	29
3.2.1.	<i>Coleta e beneficiamento dos RCD</i>	31
3.2.2.	<i>Caracterização física dos agregados</i>	32
3.2.2.1.	<i>Massa específica do aglomerante</i>	32
3.2.2.2.	<i>Composição granulométrica</i>	33
3.2.2.3.	<i>Massa unitária</i>	34
3.2.2.4.	<i>Massa específica</i>	37
3.2.2.5.	<i>Absorção de água</i>	40
3.2.3.	<i>Moldagem dos corpos de prova</i>	40
3.2.3.1.	<i>Traço convencional</i>	40
3.2.3.2.	<i>Traço RCD</i>	41
3.2.3.3.	<i>Confecção dos corpos de prova</i>	41
3.2.4.	<i>Resistência à compressão</i>	44
3.2.5.	<i>Avaliação de impacto ambiental</i>	45
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1.	Caracterização física dos agregados	48
4.1.1.	<i>Massa específica do aglomerante</i>	48

4.1.2. Composição granulométrica	48
4.1.3. Massa unitária	52
4.1.4. Massa específica	53
4.1.5. Absorção de água	53
4.2. Moldagem dos corpos de prova	54
4.2.1. Traço convencional.....	54
4.2.1.1. Determinação do fator água/cimento	54
4.2.1.2. Determinação do consumo de água estimado	55
4.2.1.3. Determinação do consumo de cimento estimado	55
4.2.1.4. Determinação do consumo de agregado graúdo estimado	56
4.2.1.5. Determinação do consumo de agregado miúdo estimado	57
4.2.2. Traço RCD.....	58
4.2.3. Slump test	59
4.3. Resistência à compressão	60
4.4. Avaliação de impacto ambiental	65
5. CONCLUSÕES.....	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil, então, buscar formas que minimizem os custos para sua produção é uma grande vantagem. Uma das formas de tentar diminuir esse custo seria substituir o agregado graúdo por materiais alternativos.

Com essa elevada utilização do concreto como material construtivo nota-se que a parcela de resíduos da indústria da construção civil usada como aterro ou despejados indevidamente em terrenos baldios, tem aumentado ao longo do tempo. Isso levou a uma crescente falta de áreas de aterro, terrenos se tornando depósitos de lixo. Portanto, o manuseio de resíduos tornou-se uma das questões ambientais mais importantes nos países em desenvolvimento (BEHERA *et al.*, 2014).

Por gerar um acúmulo excessivo de entulhos, seja pela construção de obras, ou demolições delas, tem-se buscado ainda mais uma destinação correta e sustentável para esses resíduos, colaborando diretamente com as questões ambientais (TEIXEIRA, 2018).

Sendo assim, a construção civil, cada vez mais, busca reduzir os danos ao meio ambiente, por isso, procura-se novos métodos e tecnologias para chegar a esses objetivos. Segundo o Art. 13 da Lei nº 12.305/2010, os resíduos da construção civil são aqueles que são gerados nas: construções; reformas; reparos; e demolições de obras; incluindo também aqueles resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis (BRASIL, 2010).

Por possuir diversos tipos de materiais nos resíduos das construções, é de suma importância a realização da caracterização física deles. A caracterização de um material representa os aspectos de composição e estrutura, até mesmo dos defeitos, inseridos dentro de um contexto de relevância para um processo, e busca essencialmente prever o desempenho de vida útil do material, fazendo com que minimize as possíveis degradações e falhas indesejáveis durante a sua utilização (NETO *et al.*, 2017).

Portanto, a possibilidade de utilizar esses Resíduos da Construção e Demolição (RCD) e outras matérias-primas alternativas nas obras civis, para a fabricação de concreto, pode ser uma excelente solução para o aproveitamento deles, contribuindo

para a diminuição da mineração e dos descartes incorretos, colaborando com a melhora dos impactos ambientais.

1.1. Justificativa

A utilização de RCD justifica-se principalmente pelo desenvolvimento sustentável frente as tecnologias tradicionais, propondo uma funcionalidade para esses materiais descartados.

De acordo com a Câmara Brasileira da Indústria da Construção – CBIC (2023), foram vendidas mais de 300 mil novas unidades habitacionais no Brasil, em 2022. Isso dá uma ideia de que o consumo de materiais de construção tem se mostrado crescente nos últimos anos. O concreto está no topo desses materiais, o que consequentemente faz com que seus componentes também sejam bastantes solicitados. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM (2011), os agregados minerais são as matérias-primas mais consumidas pela construção civil, e para sua obtenção são gerados impactos ambientais negativos.

Sendo assim, a busca por tecnologias que sejam capazes de substituir, ou que possam ser utilizadas de forma alternativa no lugar de alguns desses materiais é contínua. Mas por serem desconhecidas, são pouco aceitas pela sociedade, além de não existirem políticas públicas e normas regulamentadoras que facilitem suas utilizações.

Além disso, há os resíduos ocasionados das obras, que são toneladas por ano, nos quais muitas das vezes não possuem um descarte correto, ou são lançados a céu aberto, acarretando problemas para o meio ambiente, ou/e para a população das localidades próximas às áreas de disposição ilegal dos resíduos.

Dessa forma, a substituição do agregado graúdo convencional por material alternativo, como os RCD, na fabricação do concreto é uma excelente possibilidade, já que as construções civis geram uma enorme quantidade de resíduos. Sendo assim, esse estudo tem grande relevância, pois minimizaria os danos causados ao meio ambiente, já que iria reduzir os materiais jogados em lugares inadequados, como também a redução na exploração de recursos naturais.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Estudar a viabilidade ambiental da substituição parcial do agregado graúdo por resíduos da construção e demolição para a confecção de concretos na utilização em processos construtivos.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar a caracterização dos materiais;
- Realizar um estudo da propriedade mecânica de resistência à compressão simples do concreto endurecido;
- Analisar a possível utilização desses materiais em processos construtivos;
- Analisar comparativamente os níveis de impactos ambientais da substituição parcial do agregado por RCD nos processos construtivos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Concreto – características importantes

Segundo Yazigi (2008), o concreto é um material constituído por um aglomerante, pela mistura de um ou mais agregados, e água. Para o autor, o conjunto deverá apresentar quando recém misturado algumas propriedades, como por exemplo: a plasticidade, para facilitar o seu transporte, lançamento e adensamento. Do mesmo modo, para o estado endurecido, também deve apresentar algumas propriedades, para que atenda o projeto em relação à resistência a compressão e a tração.

O concreto é formado pelo cimento e pelos agregados, sendo eles miúdos e graúdos, e a água para formar uma mistura homogênea. Além desses, pode ter na sua composição algumas adições, sejam de aditivos, ou outras substâncias que ajudem a melhorar suas propriedades após o concreto endurecido (IBRACON, 2020).

Esse material apresenta algumas propriedades particulares, que trabalhando junto com o aço, se fazem uma ótima opção construtiva. Essas propriedades são as seguintes: uma alta resistência à compressão; a durabilidade; a estabilidade e o custo-benefício. Além disso, permitem a produção de diversos tipos de estruturas, devido a sua flexibilidade para moldar-se em vários formatos diferentes, o que acaba por facilitar diretamente o cronograma da obra (BASTO, 2014).

No estado fresco, a mistura apresenta algumas propriedades, como a consistência, trabalhabilidade, e exudação, que é a tendência da água de amassamento de vir à superfície do concreto recém-lançado (ALMEIDA, 2002).

Além das propriedades no estado fresco, o concreto possui também as propriedades no estado endurecido. Como por exemplo, a retração por secagem, a resistência estática, onde estão inclusas as resistências à compressão e a tração na flexão, a resistência a fadiga, o módulo de elasticidade, a porosidade e a permeabilidade, a expansão térmica, a fluência, a tenacidade e a resistência a abrasão (CAVA, 2018).

A NBR 12655 (ABNT, 2015), classifica o concreto em três categorias principais de acordo com a sua massa específica no estado endurecido, que são as citadas abaixo:

- Leve, quando possui massa específica de no mínimo 800 kg/m³, porém, que não ultrapasse os 2000 kg/m³. Esses concretos normalmente são formados por agregados naturais ou que são fabricados, onde esses possuem baixa densidade;
- Normal, no qual apresenta uma massa específica de no mínimo 2000 kg/m³, mas que não ultrapasse os 2800 kg/m³. Esse tipo de concreto normalmente é formado por areia natural, seixo rolado ou pedra britada;
- Pesado, onde ele apresenta massa específica maior do que 2800 kg/m³. Nesse tipo de concreto os agregados possuem alta densidade.

2.1.1. Agregado graúdo

De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2022), o agregado graúdo é aquele no qual os grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm, porém, ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, onde são realizados ensaios para que se possa chegar a essas conclusões. O agregado graúdo é confeccionado a partir da pedra britada, e é considerado um agregado de origem artificial. A distribuição granulométrica deve atender aos limites indicados para o agregado graúdo constantes na Tabela 1.

Tabela 1 – Limites da composição granulométrica do agregado graúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica d/D ^a				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 – 5
63 mm	-	-	-	-	5 – 30
50 mm	-	-	-	0 – 5	75 – 100
37,5 mm	-	-	-	5 – 30	90 – 100
31,5 mm	-	-	0 – 5	75 – 100	95 – 100
25 mm	-	0 – 5	5 – 25 ^b	87 – 100	-
19 mm	-	2 – 15 ^b	65 ^b – 95	95 – 100	-

12,5 mm	0 – 5	40 ^b – 65 ^b	92 – 100	-	-
9,5 mm	2 – 15 ^b	80 ^b – 100	95 – 100	-	-
6,3 mm	40 ^b – 65 ^b	92 – 100	-	-	-
4,75 mm	80 ^b – 100	95 – 100	-	-	-
2,36 mm	95 – 100	-	-	-	-

^a Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo.

^b Em cada zona granulométrica, deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com a Nota de rodapé b. Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

NOTA 1 O módulo de finura da zona 4,75/12,5 varia de 5,77 a 6,15.

NOTA 2 O módulo de finura da zona 9,5/25 varia de 6,77 a 7,15.

NOTA 3 O módulo de finura da zona 19/31,5 varia de 7,60 a 7,95.

NOTA 4 O módulo de finura da zona 37,5/75 varia de 8,90 a 9,05.

Fonte: NBR 7211 (2022)

Para a utilização do agregado graúdo no concreto podem ser necessários alguns ensaios complementares de caracterização. No Quadro 1 estão alguns desses ensaios.

Quadro 1 – Ensaios complementares para agregado graúdo

Determinação		Método
Propriedades físicas	Teor de partículas leves	ABNT NBR 9936
	Umidade total	ABNT NBR 9939
	Densidade e absorção de água	ABNT NBR 16917
Propriedades mecânicas	Resistência à compressão uniaxial no estado saturado	ABNT NBR 5564:2021, Anexo D
	Resistência ao esmagamento	ABNT NBR 9938

Fonte: NBR 7211 (2022)

Para Yazigi (2008), o agregado graúdo é o pedregulho natural ou a pedra britada que possuem o diâmetro superior à 4,8 mm. Devido às razões comerciais, as britas se classificam das seguintes maneiras:

- Pedrisco ou brita 0: de 4,8 mm a 9,5 mm;
- Brita 1: de 9,5 mm a 19 mm;
- Brita 2: de 19 mm a 38 mm;
- Brita 3: de 38 mm a 76 mm;

- Pedra-de-mão: maior que 76 mm.

A natureza, o tamanho, a forma, a textura, todos esses pontos irão influenciar nas propriedades do agregado, fazendo com que diferentes tipos de materiais apresentem distinções entre si nas propriedades.

De acordo com Gomes (2015), os agregados reciclados apresentam uma porosidade elevada e uma menor densidade. Eles são mais heterogêneos, o que gera uma dificuldade para a uniformidade de suas propriedades, e são menos resistentes, além de possuírem um formato mais irregular ou textura superficial mais rugosa.

2.1.2. Agregado miúdo

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2022), o agregado miúdo é aquele onde os grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm, porém, ficam retidos na peneira de abertura de 150 μ m, no qual deve-se realizar ensaios para essa determinação. A distribuição granulométrica do agregado miúdo deve atender aos limites da Tabela 2.

Tabela 2 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 μ m	15	35	55	70
300 μ m	50	65	85	95
150 μ m	85	90	95	100

NOTA 1 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.

NOTA 2 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.

NOTA 3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: NBR 7211 (2022)

Para a utilização do agregado miúdo em concreto, podem ser necessários alguns ensaios complementares de caracterização. No Quadro 2 estão alguns desses ensaios.

Quadro 2 – Ensaios complementares para agregado miúdo

Propriedades físicas	Método
Coeficiente de inchamento	ABNT NBR 6467
Umidade superficial	ABNT NBR 9775
Teor de partículas leves	ABNT NBR 9936
Densidade e absorção de água	ABNT NBR 16916
Massa unitária	ABNT NBR 16972

Fonte: NBR 7211 (2022)

2.1.3. Principais tipos de cimentos utilizados no Brasil

De acordo com a Associação Brasileira de Cimentos Portland – ABCP (2019), o cimento pode ser caracterizado como um pó fino que possui propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que sob a ação da água conseguem endurecer, tornando-se uma pedra artificial, que de acordo com a necessidade da obra, pode ganhar diversas formas e volumes. O cimento apresenta propriedades particulares, como por exemplo, trabalhabilidade e moldabilidade. Além disso, ele faz com que as argamassas e os concretos, apresentem alta durabilidade e resistência a cargas e ao fogo.

No mercado nacional, atualmente, há 8 opções de cimentos, que atendem aos mais diversos tipos de obras, onde são diferenciados pelas suas propriedades, características e usos.

1. Cimento Portland Comum (CP I);
 - CP I – Cimento Portland Comum;
 - CP I-S – Cimento Portland Comum com Adição;
2. Cimento Portland Composto (CP II);
 - CP II-E – Cimento Portland Composto com Escória;
 - CP II-Z – Cimento Portland Composto com Pozolana;

- CP II-F – Cimento Portland Composto com Filer;
- 3. Cimento Portland de Alto-Forno (CP III);
- 4. Cimento Portland Pozolânico (CP IV);
- 5. Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI);
- 6. Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS);
- 7. Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC);
- 8. Cimento Portland Branco (CPB).

2.2. Resíduos de Construção e Demolição

O desenvolvimento econômico conduz a um ritmo acelerado das construções, e com isso está relacionado a crise ambiental, devido ao desperdício dos recursos naturais de fontes não renováveis e à geração de resíduos. De acordo com os dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2022), os municípios do Brasil coletaram cerca de 132.535 toneladas/dia de RCD, sendo assim, a construção civil é um dos setores que mais geram resíduos no país.

A resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA nº 307/2002, traz o seguinte conceito para os resíduos de construção e demolição (BRASIL, 2002, p. 1):

São os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha (BRASIL, 2002, p. 1).

Ainda de acordo com a resolução do CONAMA nº 307/2002, os RCD podem ser classificados em quatro principais classes:

- Classe A – são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:
 - a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;

- b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
- c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;
- Classe B – são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;
- Classe C – são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
- Classe D – são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Sendo assim, segundo a resolução do CONAMA nº 307/2002, a classe que se enquadra para ser utilizada no concreto é a classe A, onde são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregado.

A geração de resíduos da construção civil expressa um grande problema ambiental, em razão de que se eles não receberem uma destinação adequada, colaboram diretamente para o acúmulo de entulho e conseqüentemente para a poluição, por isso necessitam de um melhor gerenciamento desses materiais e uma destinação mais sustentável.

2.3. Impactos Ambientais

Segundo Hagemann (2011), a construção civil tem uma representação considerável quando se trata dos impactos causados ao meio ambiente no decorrer dos séculos, já que este setor apresenta um elevado consumo dos recursos naturais, onde ele transforma a paisagem em um enorme gerador de resíduos.

Os impactos ambientais da extração mineral estão presentes a partir da fase inicial, até o seu transporte e beneficiamento. Sendo assim, essa extração causa uma mudança descontrolada no meio físico, desde desmatamentos, erosão e contaminação dos corpos hídricos, o que conseqüentemente causam mudanças nas paisagens (BERMANN, 2016).

Fernandes, Alamino e Araujo (2014, p. 3), expõem de forma objetiva os impactos negativos que esse tipo de atividade causa no meio ambiente,

A mineração altera de forma substancial o meio físico, provocando desmatamentos, erosão, contaminação dos corpos hídricos, aumento da dispersão de metais pesados, alterações da paisagem, do solo, além de comprometer a fauna e a flora. Afeta, também, o modo de viver e a qualidade de vida das populações estabelecidas na área minerada e em seu entorno (FERNANDES; ALAMINO; ARAUJO, 2014, p. 3).

De acordo com a resolução do CONAMA nº 001/1986, impacto ambiental é qualquer mudança nas propriedades do meio ambiente, ocasionadas por atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam (BRASIL, 1986):

- A saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- As atividades sociais e econômicas;
- A biota;
- As condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- A qualidade dos recursos ambientais.

Por isso, conhecer os impactos ambientais e avaliá-los é de suma importância. Segundo Andrade (2022), a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) é um mecanismo formado por técnicas e procedimentos que são capazes de identificar e avaliar o nível de impactos ambientais causados por empresas. Sua finalidade é diminuir os danos ao meio ambiente e conservar recursos naturais, minimizando os danos para a sociedade. Um dos métodos de AIA, é a Matriz de Leopold.

A Matriz de Leopold foi um dos primeiros meios no formato de matriz produzida para avaliar os impactos ambientais. A matriz é formada pelo cruzamento de 88 fatores ambientais e 100 ações potencialmente alteradoras do ambiente, mostrando um total de 8.800 interações possíveis. Em cada uma dessas interações são sugeridos algarismos que variam de 1 a 10, à magnitude e à importância do impacto,

respectivamente. O número 1 indica a condição de menor alteração ambiental, e de menor relevância sobre o componente ambiental em questão. O número 10 corresponde aos valores máximos dessas propriedades. O sinal de + ou – na frente dos números mostra se o impacto é favorável ou prejudicial (SÁNCHEZ, 2020).

Com isso, é importante observar os impactos ambientais causados pelo RCD. Segundo Pinto (1999 *apud* SANTANA, 2016), quando a destinação final dos resíduos é feita de maneira inadequada, podem resultar em impactos ambientais negativos, como por exemplo: obstruções de vias, comprometimento da qualidade do ambiente e da paisagem local, proliferação de vetores, assoreamento de córregos e rios, entre outros.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item serão exibidos todos os materiais utilizados para esta pesquisa, bem como os procedimentos adotados para o seu desenvolvimento.

3.1. Materiais

Os materiais utilizados para a produção do concreto foram os seguintes:

- Agregado graúdo (brita 0; brita 1): obtido no comércio local de Pombal – PB;
- Agregado graúdo (RCD): obtido na construção da Escola Padrão Sustentável no município de Pombal – PB;
- Agregado miúdo (areia): obtido no comércio local de Pombal – PB;
- Água: obtida pelo fornecimento da Companhia de Água e Esgoto da Paraíba (CAGEPA);
- Cimento Portland CP II F32: obtido no comércio local de Pombal – PB.

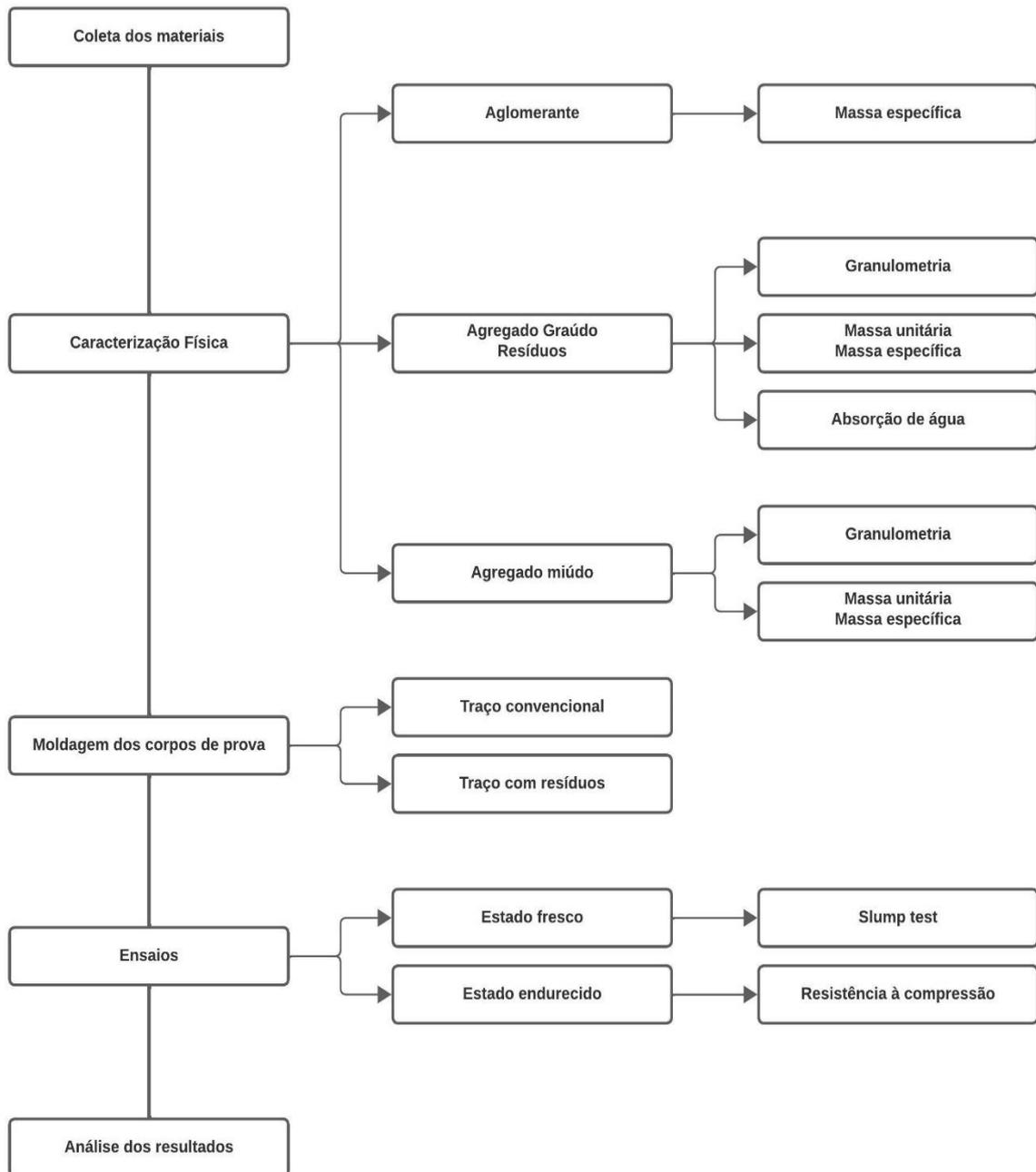
Para os agregados naturais, ou seja, os obtidos nos comércios, não há nas suas características uma diferença significativa entre um local e outro, sendo assim a escolha por um determinado mercado não irá causar mudanças consideráveis no concreto. Optou-se pelo RCD dessa escola por está sendo realizado o estágio nela, facilitando a sua coleta.

3.2. Métodos

O estudo desse trabalho e os devidos ensaios foram realizados nos laboratórios de Materiais de Construção e Resíduos Sólidos, na Universidade Federal de Campina Grande – Campus Pombal.

A Figura 1 apresenta os procedimentos seguidos para a realização do presente trabalho.

Figura 1 – Fluxograma das atividades realizadas



Fonte: Autor (2023)

Primeiramente, foi realizada a coleta e beneficiamento dos resíduos. Logo em seguida, efetuou-se a caracterização física dos agregados utilizados. Posteriormente foi feita a moldagem dos corpos de prova, e os ensaios no estado fresco e endurecido. A partir disso, analisou-se os resultados encontrados, e a sua viabilidade ambiental.

3.2.1. Coleta e beneficiamento dos RCD

Inicialmente foi realizada a coleta dos resíduos, para a confecção do concreto não convencional, na construção da Escola Padrão Sustentável no município de Pombal – PB.

Em seguida, com o auxílio de uma marreta foi feita a fragmentação dos RCD para dimensões aproximadas dos agregados graúdos naturais, para que eles apresentassem tamanhos mais compatíveis com as britas, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Fragmentação dos RCD



Fonte: Autor (2023)

Em seguida, de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022), foi feito seu peneiramento para separar os materiais mais adequados para a realização dos ensaios de caracterização física.

3.2.2. Caracterização física dos agregados

Nesta etapa foram realizados os ensaios de massa específica do aglomerante seguindo a NBR 16605 (ABNT, 2017), de granulometria de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022), de massa unitária a partir da NBR 16972 (ABNT, 2021), de massa específica que foi seguida a NBR 16917 (ABNT, 2021) e 16916 (ABNT, 2021) e absorção de água a partir da NBR 16917 (ABNT, 2021), dos agregados graúdos, miúdos e resíduos.

3.2.2.1. Massa específica do aglomerante

Foi realizado de acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017), onde esta norma determina a massa específica do cimento Portland através do frasco volumétrico de Le Chatelier, e um líquido no qual não deve reagir quimicamente com o material, nesse ensaio foi utilizado o querosene, como mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Frasco volumétrico de Le Chatelier



Fonte: Autor (2023)

Feito isso, foi calculada a massa específica do material pela Equação 1.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Onde:

ρ é a massa específica do material ensaiado em g/cm³;

m é a massa do material ensaiado em g;

V é o volume deslocado pela massa do material ensaiado ($V_2' - V_1'$) em cm³;

$V_2' - V_1'$ são os valores corrigidos de V_1 e V_2 , respectivamente, a partir da calibração da escala do frasco volumétrico em cm³.

3.2.2.2. Composição granulométrica

Para o procedimento desse ensaio, foi seguida a NBR 17054 (ABNT, 2022), no qual esse ensaio consiste basicamente no peneiramento das amostras dos agregados por meio do conjunto de peneiras das séries normal e intermediária definidas em norma.

Foram usadas duas amostras de 5 kg de agregado graúdo, duas amostras de 500 g de agregado miúdo e duas amostras de 10 kg de resíduo, e em seguida realizados os seus peneiramentos. Após esse procedimento, para cada uma das amostras, foi calculada a massa retida em cada peneira com uma aproximação de 0,1 %. Posteriormente, foi realizada uma média com as porcentagens retidas e acumuladas nas peneiras, com aproximação de 1 %, e gerada a curva granulométrica de cada um deles.

Na Figura 4 está o sequenciamento das peneiras utilizadas para a realização desse ensaio.

Figura 4 – Sequência das peneiras



Fonte: Autor (2023)

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2022), a dimensão máxima característica está associada à distribuição granulométrica do agregado, na qual corresponde à abertura nominal da peneira da série normal ou intermediária, onde o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5 %. Ainda de acordo com a norma, o módulo de finura é a soma das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal, dividida por 100.

3.2.2.3. Massa unitária

Para a realização desse ensaio foi seguida a NBR 16972 (ABNT, 2021), na qual define a massa unitária como a relação entre a massa do agregado lançado no recipiente, de acordo o método determinado nela, e o volume desse recipiente.

A massa unitária do agregado graúdo, miúdo e do resíduo foi determinada utilizando o método A, que é empregado para determinação do material no estado compactado, e que os agregados possuam dimensão máxima característica de 37,5 mm, ou menor, e o método C, no qual deve ser empregado para material no estado solto.

Pelo método A, deve-se encher o recipiente com o material até um terço da capacidade, em seguida realizar o adensamento da camada de agregado com 25 golpes com o auxílio da haste, distribuídos uniformemente em toda a superfície do material. Logo após, encher até dois terços e realizar o mesmo procedimento, e depois encher totalmente e fazer o mesmo processo.

Pelo método C, o seguinte procedimento foi executado, com o auxílio de uma concha, completou-se o recipiente até ele transbordar, despejando o material de uma altura que não ultrapassasse 50 mm, evitando ao máximo a segregação das amostras, e em seguida foi feito o rasamento do material para que ele ficasse rente a borda superior do recipiente.

O resultado foi obtido fazendo a média da determinação de três amostras, de ambos os materiais. Na Figura 5, encontra-se o recipiente com o agregado graúdo depois de rasá-la.

Figura 5 – Recipiente com agregado graúdo



Fonte: Autor (2023)

Na Figura 6, está o recipiente com o agregado miúdo para a realização da pesagem após o rasamento.

Figura 6 – Recipiente com agregado miúdo



Fonte: Autor (2023)

O RCD no recipiente após o rasamento, como podemos ver na Figura 7.

Figura 7 – Recipiente com RCD



Fonte: Autor (2023)

Após esses procedimentos, calculou-se a massa unitária pela Equação 2.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (2)$$

Onde:

ρ_{ap} é a massa unitária do agregado em kg/m^3 ;

m_{ar} é a massa do recipiente com o agregado em kg;

m_r é a massa do recipiente vazio em kg;

V é o volume do recipiente em m^3 .

3.2.2.4. Massa específica

Esse ensaio teve como base a NBR 16917 (ABNT, 2021), no qual determinou-se a massa específica dos materiais na condição saturada superfície seca.

Foram utilizadas duas amostras de agregados de 3 kg, e duas de resíduos de 5 kg. Inicialmente as amostras foram lavadas sobre a peneira de malha 4,75 mm em água corrente, para retirar o pó ou outros materiais da superfície das partículas. Em seguida, elas ficaram submersas em uma bandeja com água por 24 horas. Logo após, retirou-se as amostras da água, e as envolveram com um pano absorvente até que toda a água visível fosse eliminada, determinou-se então a massa na condição saturada superfície seca. Posteriormente, foi determinada a massa da amostra submersa em água, no qual elas são colocadas em um cesto de arame e submergidas em água.

A Figura 8 mostra o agregado graúdo submerso em água.

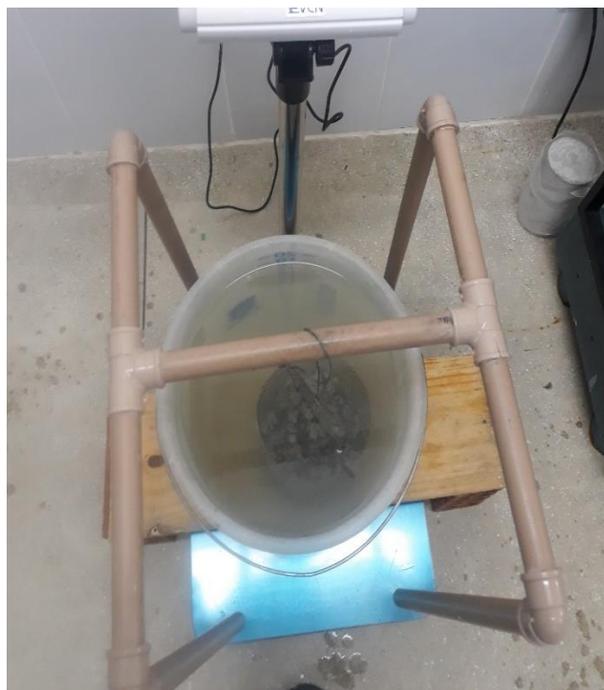
Figura 8 – Agregado graúdo no cesto de arame



Fonte: Autor (2023)

A Figura 9 apresenta os resíduos submersos em água.

Figura 9 – RCD no cesto de arame



Fonte: Autor (2023)

Após esse procedimento, as amostras ficaram em estufa por 24 horas, para serem pesadas secas.

Portanto, para a determinação da massa específica do agregado graúdo e dos RCD, foi utilizada a Equação 3.

$$\rho_{sss} = \frac{m_B}{m_B - m_C} \quad (3)$$

Onde:

ρ_{sss} é a densidade do agregado na condição saturada superfície seca em g/cm³;

m_B é a massa da amostra na condição saturada superfície seca em g;

m_C é a massa da amostra submersa em água na condição saturada superfície seca em g.

A realização do ensaio de massa específica do agregado miúdo foi de acordo com a NBR 16916 (ABNT, 2021), no qual determina a massa específica do agregado na condição saturada superfície seca como o resultado da divisão entre a massa dele nessa condição e o volume de seus grãos, excluindo os vazios entre os grãos.

Inicialmente a amostra foi colocada na bandeja, e coberta por água durante 24 horas. Após isso, retirou-se a amostra e aplicou-se uma corrente de ar suave, até que os grãos não ficassem fortemente aderidos entre si. Posteriormente, colocou-se a amostra no molde tronco-cônico, e foram aplicados 25 golpes suavemente na sua superfície. Caso o agregado mantivesse a forma do molde, repetia-se o processo.

Feito isso, foi pego 500 g dessa amostra, e colocada no frasco. Em seguida, completou-se com água até próximo a marca de 500 ml, e movimentou-se o frasco de forma a eliminar as bolhas de ar, logo após, completou-se de água até os 500 ml, e determinou-se sua massa.

Coletou-se 500 g da amostra preparada inicialmente, e foi colocada em estufa por 24 horas, após retirada, determinou-se sua massa.

Para o cálculo da massa específica do agregado miúdo na condição saturada superfície seca usou-se a Equação 4.

$$\rho_{SSS} = \frac{m_B}{V - V_a} \quad (4)$$

Onde:

ρ_{SSS} é a densidade do agregado na condição saturada superfície seca em g/cm³;

m_B é a massa da amostra na condição saturada superfície seca em g;

V é o volume do frasco calibrado em cm³;

V_a é o volume de água adicionada ao frasco em cm³.

3.2.2.5. Absorção de água

Para este ensaio de absorção de água do agregado graúdo e RCD utilizou-se a NBR 16917 (ABNT, 2021), assim como para a massa específica. Foram seguidos os mesmos procedimentos, porém, o cálculo foi feito de acordo com a Equação 5.

$$Abs = \frac{m_B - m_A}{m_A} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

A é a absorção de água em %;

m_A é a massa da amostra seca em estufa em g;

m_B é a massa da amostra na condição saturada superfície seca em g.

3.2.3. Moldagem dos corpos de prova

3.2.3.1. Traço convencional

Para a definição do traço convencional, para servir como referência, utilizou-se os dados obtidos nos ensaios, e foi realizado de acordo o método ABCP.

O método ABCP baseia-se nas características físicas dos materiais para a realização da dosagem dos traços. Inicialmente ocorre a fixação da relação água/cimento com o auxílio da curva de Abrams. Em seguida, é feita a estimativa do consumo de água, levando em conta o abatimento e a dimensão máxima característica do agregado graúdo. Na sequência, é estimado o consumo de cimento,

com o auxílio do consumo de água e do fator água/cimento. Logo após, é feita a determinação estimada do consumo de agregados, no qual o graúdo é definido a partir do volume seco dele, e do módulo de finura da areia. Determina-se então o consumo de agregado miúdo e posteriormente a apresentação do traço. A forma de representação do traço de concreto de referência é feita da maneira que está exposta no Quadro 3.

Quadro 3 – Representação do traço convencional

Representação	Significado
c : a : b : a/c	Cimento : Areia : Brita : Água

Fonte: Autor (2023)

O objetivo era atingir a resistência de 25 MPa, mas que ele possuísse uma trabalhabilidade com abatimento entre 80 mm e 100 mm.

Foram moldados 9 corpos de prova com concreto convencional, para serem rompidos com 7 dias, 14 dias e 28 dias.

3.2.3.2. Traço RCD

O traço com a substituição do agregado graúdo por RCD também foi feito de acordo com o método ABCP, e buscando atingir a resistência de 25 MPa, e a mesma trabalhabilidade.

Após uma pesquisa bibliográfica, optou-se pelas porcentagens de 15 %, 30 % e 50 %, para substituírem em massa, o agregado graúdo pelos resíduos, baseando-se no trabalho de Irali *et al.* (2014), que fez um concreto com agregado reciclado com essas porcentagens, e após 5 anos apresentou um ótimo desempenho a longo prazo.

Para cada porcentagem de substituição foram moldados 9 corpos de prova para serem rompidos com 7 dias, 14 dias e 28 dias.

3.2.3.3. Confecção dos corpos de prova

Para a realização da moldagem dos corpos de prova utilizou-se como fonte a NBR 5738 (ABNT, 2015), que trata do procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.

Foram utilizados 9 moldes metálicos de formas cilíndricas, com dimensões de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. Como mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Moldes metálicos



Fonte: Autor (2023)

Inicialmente foi feita a preparação dos moldes, onde foram untados internamente com uma fina camada de óleo.

Com os materiais preparados, utilizou-se uma betoneira de 120 litros para a mistura dos traços, como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Betoneira



Fonte: Autor (2023)

Logo após a mistura dos traços estarem concluídas, foram retiradas amostras no estado fresco para a realização do *Slump test*, esse ensaio foi realizado seguindo a NBR 16889 (ABNT, 2020). O molde para realização do ensaio está ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Molde para *Slump test*



Fonte: Autor (2023)

Posteriormente foi realizada a moldagem dos corpos de prova. Baseado no diâmetro do corpo de prova, definiu-se o número de camadas em 2, e o número de golpes para o adensamento em 12. Após 24 horas, eles foram desmoldados, e colocados submersos em um tanque com água, para ser realizado a cura nas idades de 7 dias, 14 dias e 28 dias.

A Figura 13 mostra os corpos de prova logo após a desmoldagem.

Figura 13 – Corpos de prova desmoldados



Fonte: Autor (2023)

Depois das suas respectivas curas, os corpos de prova foram preparados para a realização do ensaio de resistência à compressão.

3.2.4. Resistência à compressão

Para a realização desse ensaio foi levado em consideração a NBR 5739 (ABNT, 2018). Inicialmente foi preciso determinar os diâmetros dos corpos de prova para realização dos cálculos, onde é feita pela média de dois diâmetros. Em seguida foi preciso determinar também a altura do corpo, incluindo o capeamento.

O ensaio aconteceu com o auxílio da prensa manual exibida na Figura 14.

Figura 14 – Prensa manual



Fonte: Autor (2023)

Com o valor encontrado na prensa, a resistência à compressão foi calculada pela Equação 6.

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (6)$$

Onde:

f_c é a resistência à compressão em MPa;

F é a força máxima alcançada em N;

D é o diâmetro do corpo de prova em mm.

3.2.5. Avaliação de impacto ambiental

Para a realização da AIA da substituição parcial do agregado graúdo por RCD, utilizou-se a Tabela 3, na qual é uma adaptação da Matriz de Leopold, ela irá comparar os níveis de impactos ambientais das aplicações do concreto com e sem substituição dos resíduos. Inicialmente, determina-se as possíveis aplicações do concreto

confeccionado com as alterações do agregado natural, que serão exibidas na linha 1 da Tabela 3.

Nas colunas estão os indicadores de impactos, que são os seguintes: o caráter do impacto, se é positivo, negativo ou neutro; a severidade do impacto, que pode ser alta, baixa ou média; a cobertura do impacto, se é regional, pontual ou local; a duração do impacto, se é permanente, de média ou curta duração; e a reversibilidade do impacto, se é irreversível, reversível ou parcial.

Com o preenchimento dos indicadores, irá chegar ao impacto resultante de cada aplicação, definindo-se assim a de maior benefício.

Tabela 3 – Avaliação de impactos

		Aplicação 1	Aplicação 2	Aplicação 3	Aplicação 4	Aplicação 5
Com substituição parcial	Caráter do impacto					
	Severidade do impacto					
	Cobertura do impacto					
	Duração do impacto					
	Reversibilidade do impacto					
	Impacto resultante					
Sem substituição parcial	Caráter do impacto					
	Severidade do impacto					
	Cobertura do impacto					
	Duração do impacto					
	Reversibilidade do impacto					
	Impacto resultante					
Amplitude entre os níveis de impacto						
Aplicação de maior benefício						

Fonte: Adaptado da Matriz de Leopold (1971)

O preenchimento dos dados da Avaliação de impacto é realizado de acordo com o Quadro 4.

Quadro 4 – Valorização de Impactos

Valorização do impacto			
Caráter (Ca)	Positivo (1)	Neutro (0)	Negativo (-1)
Importância (I)	Alta (3)	Média (2)	Baixa (1)
Cobertura (Co)	Regional (3)	Local (2)	Pontual (1)
Duração (D)	Permanente (3)	Média (2)	Curta (1)
Reversibilidade (R)	Irreversível (3)	Parcial (2)	Reversível (1)

Fonte: Adaptado da Matriz de Leopold (1971)

Após o preenchimento é realizado o cálculo do impacto resultante, por meio da Equação 7.

$$IT = Ca \times (I + Co + D + R) \quad (7)$$

Onde:

- IT é o impacto total;
- Ca é o caráter;
- I é a importância;
- Co é a cobertura;
- D é a duração;
- R é a reversibilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização física dos agregados

4.1.1. Massa específica do aglomerante

Seguindo a NBR 16605 (ABNT, 2017), chegou-se ao resultado para a massa específica do cimento de 2,99 g/cm³. Esse resultado corresponde a uma única determinação, e foi calculado com aproximação de milésimo, na qual representa a massa da unidade de volume do material.

4.1.2. Composição granulométrica

As composições granulométricas do agregado graúdo, miúdo e do RCD foram obtidas de acordo com NBR 17054 (ABNT, 2022).

A Tabela 4 mostra a composição granulométrica do agregado graúdo.

Tabela 4 – Granulometria agregado graúdo

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)		Massa média retida (g)	Média retida (%)	Média retida acumulada (%)	Passante acumulada (%)
	Ensaio (A)	Ensaio (B)				
25	0	0	0	0,00	0,00	100,00
19	200,90	201,20	201,05	4,02	4,02	95,98
12,5	2300,10	2299,30	2299,70	46,00	50,03	49,97
9,5	1570,90	1571,20	1571,05	31,43	81,45	18,55
6,3	803,40	801,10	802,25	16,05	97,50	2,50
4,75	94,30	92,40	93,35	1,87	99,37	0,63
2,36	30,20	32,80	31,50	0,63	100,00	0,00
Total	4999,80	4998,00	4998,90			
Dim. Máxima Característica (mm)			19			
Módulo de finura			6,85			

Fonte: Autor (2023)

A dimensão máxima característica do agregado graúdo é de 19 mm. O módulo de finura desse agregado graúdo é 6,85. A maior parte dessa brita está retida na peneira de abertura de 12,5 mm. Com o auxílio da granulometria pode-se determinar que 99,37% da brita é classificada como agregado graúdo

A Tabela 5 mostra a composição granulométrica do agregado miúdo.

Tabela 5 – Granulometria agregado miúdo

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)		Massa média retida (g)	Média retida (%)	Média retida acumulada (%)	Passante acumulada (%)
	Ensaio (A)	Ensaio (B)				
4,75	0	0	0	0,00	0,00	100,00
2,36	40,90	40,80	40,85	8,18	8,18	91,82
1,18	78,70	78,10	78,40	15,69	23,87	76,13
0,6	153,10	151,90	152,50	30,53	54,40	45,60
0,3	172,40	172,50	172,45	34,52	88,92	11,08
0,15	45,10	46,30	45,70	9,15	98,07	1,93
Fundo	9,60	9,70	9,65	1,93	100,00	0,00
Total	499,80	499,30	499,55			
Dim. Máxima Característica (mm)			4,75			
Módulo de finura			2,73			

Fonte: Autor (2023)

De acordo com a composição granulométrica, a dimensão máxima característica do agregado miúdo é de 4,75 mm. O módulo de finura desse material é 2,73. A maior parte dessa areia está retida nas peneiras de abertura de 0,6 mm e 0,3 mm. Analisando a granulometria, percebe-se que 98,07 % da areia é classificada como agregado é miúdo.

A composição granulométrica do RCD está exibida na Tabela 6.

Tabela 6 – Granulometria RCD

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)		Massa média retida (g)	Média retida (%)	Média retida acumulada (%)	Passante acumulada (%)
	Ensaio (A)	Ensaio (B)				

25	413,40	403,90	408,65	4,09	4,09	95,91
19	623,20	627,80	625,50	6,26	10,34	89,66
12,5	4394,70	4380,30	4387,50	43,88	54,22	45,78
9,5	1633,80	1642,00	1637,90	16,38	70,60	29,40
6,3	2585,60	2592,40	2589,00	25,89	96,49	3,51
4,75	295,80	299,00	297,40	2,97	99,47	0,53
2,36	52,20	54,00	53,10	0,53	100,00	0,00
Total	9998,70	9999,40	9999,05			
Dim. Máxima Característica (mm)			25			
Módulo de finura			6,80			

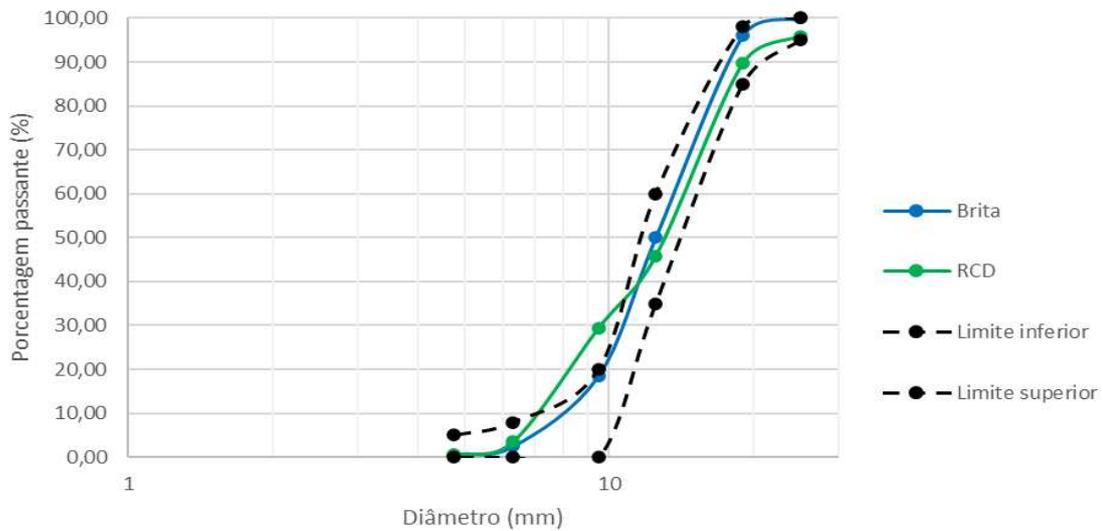
Fonte: Autor (2023)

A dimensão máxima característica dos resíduos de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2022), é de 25 mm. O módulo de finura desse material é 6,80. Assim como o agregado graúdo, a maior parte do RCD está retido na peneira de 12,5 mm. De acordo a granulometria, 99,47 % do resíduo é classificado como agregado graúdo.

O módulo de finura dos RCDs é 0,73 % menor comparado a brita, logo, o concreto feito com resíduo exigirá uma maior quantidade de água na sua mistura.

A partir da composição granulométrica do agregado graúdo e do resíduo, foram feitas as curvas granulométricas. Como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Curva granulométrica brita e RCD



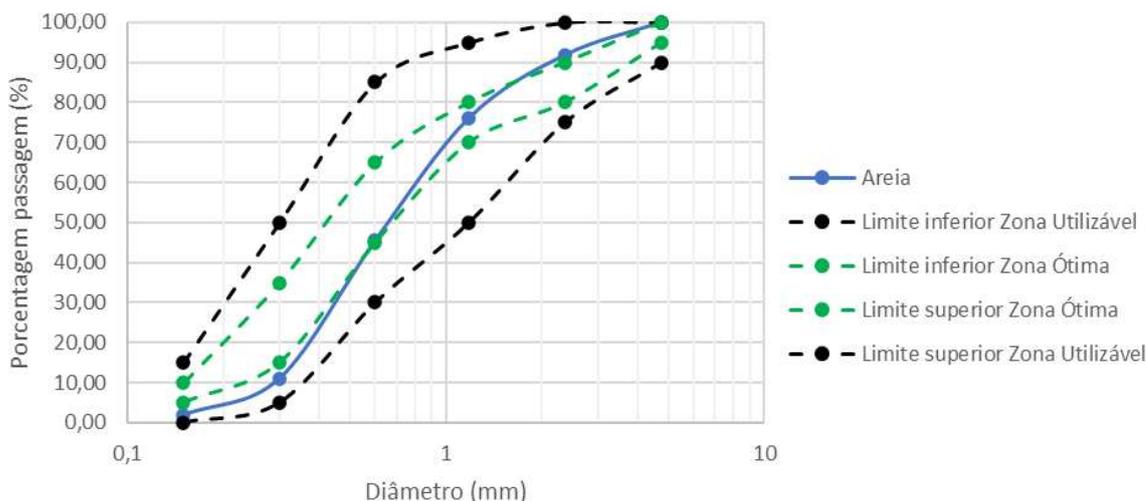
Fonte: Autor (2023)

Toda a porcentagem de material que é classificado como graúdo está dentro dos limites da composição granulométrica determinada pela NBR 7211 (ABNT, 2022). Sendo assim, esse agregado graúdo é enquadrado por brita 0 e brita 1.

O RCD apresentou uma parte fora dos limites, isso ocorreu por apresentar uma porcentagem de massa retida acumulada na peneira de abertura de 9,5 mm menor do que o estabelecido, podendo influenciar negativamente na resistência do concreto, já que não terá um preenchimento dos vazios adequado.

A partir da composição granulométrica do agregado miúdo, foi feita sua curva granulométrica, como mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Curva granulométrica areia



Fonte: Autor (2023)

As massas retidas nas peneiras de aberturas de 1,18 mm e de 0,6 mm estão dentro da Zona Ótima, enquanto os restantes estão dentro das Zonas Utilizáveis, de acordo com a determinação da NBR 7211 (ABNT, 2022). Por isso, espera-se uma melhor coesão, interferindo diretamente na diminuição da permeabilidade e aumento da resistência.

4.1.3. Massa unitária

De acordo com os procedimentos da NBR 16972 (ABNT, 2021), as massas unitárias dos agregados graúdos, miúdos e dos resíduos foram determinadas. Os valores encontrados, tanto pelo método A como pelo método C estão exibidos na Tabela 7.

Tabela 7 – Massa unitária agregado graúdo, miúdo e RCD

Material	Massa unitária (kg/m ³)	
	Compactada	Solta
Brita	1404,00	1340,50
Areia	1492,00	1430,00
RCD	1001,00	904,50

Fonte: Autor (2023)

Analisando os resultados obtidos, percebe-se que o agregado miúdo apresenta uma massa unitária maior em relação aos outros materiais. Além disso, o RCD mostra uma massa compactada 28,70 % menor em relação ao agregado graúdo, e uma massa solta 32,52 % menor em relação ao mesmo.

O agregado miúdo tem a massa unitária superior aos outros materiais analisados por ter grãos menores, fazendo com que preencha os espaços vazios com maior facilidade. A diferença entre o agregado graúdo e o RCD ocorre devido ao maior número de vazio, pode-se concluir então, que os grãos do RCD têm dimensões superiores aos do agregado natural. Isso acontece por causa da diminuição da densidade dos materiais e da alta porosidade que os resíduos apresentam, visto que possuem um número de vazios elevado.

4.1.4. Massa específica

O resultado das massas específicas da brita, dos resíduos e do agregado miúdo que foram calculadas de acordo com a NBR 16917 (ABNT, 2021) e NBR 16916 (ABNT, 2021), respectivamente, estão exibidos na Tabela 8.

Tabela 8 – Massa específica agregado graúdo, miúdo e RCD

Material	Massa específica (g/cm³)
Agregado graúdo	2,65
Agregado miúdo	2,56
RCD	1,81

Fonte: Autor (2023)

A partir dos valores encontrados, pode-se analisar que os resíduos apresentam uma massa específica 31,69 % menor que a da brita. Isso significa que esses resíduos são mais leves em relação a brita, demonstrando ter uma densidade menor do que o agregado natural. Provavelmente os resíduos apresentam mais poros e volumes de vazios que a brita.

4.1.5. Absorção de água

Utilizando a mesma norma que foi usada para a determinação da massa específica, chegou-se ao resultado da absorção de água dos materiais. Na Tabela 9 está apresentado o resultado.

Tabela 9 – Absorção de água agregado e RCD

Material	Absorção (%)
Brita	1,02
RCD	11,73

Fonte: Autor (2023)

A partir dos resultados encontrados, pode-se observar que os resíduos possuem uma absorção de água consideravelmente maior que o agregado graúdo, quase 10 vezes mais, o que irá resultar numa dosagem maior de água, para que possa ser corrigida sua trabalhabilidade.

Portanto, os resultados anteriores corroboram com o resultado da absorção de água, considerando que materiais capazes de absorver mais água, são necessariamente mais porosos. Essa porosidade dos resíduos pode ocasionar um aumento no teor de água do concreto, por consequência podendo comprometer a resistência à compressão simples.

4.2. Moldagem dos corpos de prova

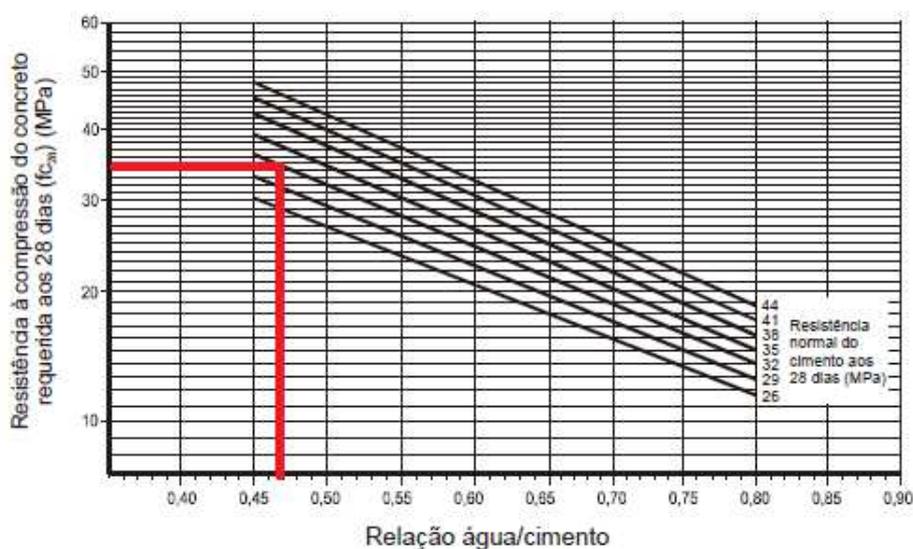
4.2.1. Traço convencional

Para o cálculo do traço do concreto convencional que irá servir como referência, utilizou-se o método ABCP, levando-se em conta as características físicas dos materiais. Definiu-se então o consumo de materiais.

4.2.1.1. Determinação do fator água/cimento

Inicialmente, foi fixado o fator água/cimento pela Curva de Abrams. O cimento utilizado para a produção do concreto foi o CP II F32, e deseja-se obter uma resistência aos 28 dias de 34,075 MPa. Desse modo, foi obtido uma relação água/cimento de 0,475, como se pode observar na Figura 17.

Figura 17 – Curva de Abrams



Fonte: Rodrigues (1998)

4.2.1.2. Determinação do consumo de água estimado

Para a determinação da quantidade de água necessária para que a mistura adquira uma certa consistência, precisa-se basicamente da medida do abatimento do tronco de cone e da granulometria. Desejou-se obter um abatimento entre 80 e 100 mm, e o agregado graúdo apresentou uma dimensão máxima característica de 19 mm. Relacionando o abatimento com a dimensão máxima, determinou-se o consumo de água aproximado de 205 l/m³, como pode ser verificado na Tabela 10.

Tabela 10 – Estimativa do consumo de água por m³

ABATIMENTO DO TRONCO DO CONE	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO (Φ_{max})				
	9,5mm	19mm	25mm	32mm	38mm
40 a 60mm	220 l/m ³	195 l/m ³	190 l/m ³	185 l/m ³	180 l/m ³
60 a 80mm	225 l/m ³	200 l/m ³	195 l/m ³	190 l/m ³	185 l/m ³
80 a 100mm	230 l/m ³	205 l/m ³	200 l/m ³	200 l/m ³	190 l/m ³

Fonte: Rodrigues (1998)

4.2.1.3. Determinação do consumo de cimento estimado

Realizada a estimativa do consumo de água por metro cúbico de concreto, e fixada a relação água/cimento, a estimativa do consumo de cimento pode ser obtida pela Equação 8.

$$C_c = \frac{C_a}{(a/c)} \quad (8)$$

Onde:

C_c é o consumo do cimento em kg/m^3 ;

C_a é o consumo de água em l/m^3 ;

(a/c) é a relação água/cimento.

Sendo assim, o consumo de cimento foi $431,58 \text{ kg/m}^3$.

4.2.1.4. Determinação do consumo de agregado graúdo estimado

Para a determinação do consumo de agregado graúdo utilizou-se a Equação 9.

$$C_{ag} = V_{pc} \times MU_c \quad (9)$$

Onde:

C_{ag} é o consumo de agregado graúdo em kg/m^3 ;

V_{pc} é volume compactado seco em m^3 ;

MU_c é a massa unitária compactada do agregado graúdo em kg/m^3 .

O volume compactado seco é determinado pela Tabela 11, onde se utiliza o módulo de finura da areia e a dimensão máxima característica do agregado graúdo.

Tabela 11 – Volume compactado seco

MÓDULO DE FINURA DA AREIA	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO (Φ_{\max})				
	9,5mm	19mm	25mm	32mm	38mm
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845

2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Rodrigues (1998)

O valor encontrado de acordo com a tabela foi de 0,677 m³ e a massa unitária da brita é 1404 kg/m³, obteve-se então o consumo de agregado graúdo de 949,95 kg/m³.

4.2.1.5. Determinação do consumo de agregado miúdo estimado

Após determinados os consumos de água, cimento e agregado graúdo, a estimativa do consumo de agregado miúdo é imediata. Por causa do princípio de que o volume do concreto é formado pela soma dos volumes dos materiais que o constituem. Logo, para 1 m³ de concreto, o volume do agregado miúdo é encontrado de acordo com a Equação 10.

$$V_{am} = 1 - \left(\frac{C_c}{\gamma_c} + \frac{C_{ag}}{\gamma_{ag}} + \frac{C_a}{\gamma_a} \right) \quad (10)$$

Onde:

V_{am} é o volume do agregado miúdo em m³;

$\gamma_c, \gamma_{ag}, \gamma_a$ é a massa específica do cimento, do agregado graúdo e da água em kg/m³, respectivamente.

O volume encontrado para o agregado miúdo foi de 0,29 m³. Com esse valor, pode-se encontrar o consumo de areia, através da Equação 11.

$$C_{am} = V_{am} \times \gamma_{am} \quad (11)$$

Onde:

C_{am} é o consumo de agregado miúdo em kg/m³;

γ_{am} é a massa específica do agregado miúdo em kg/m³.

Assim, foi encontrado o consumo de agregado miúdo de 741,82 kg/m³. O consumo de materiais para a produção de 1 m³ de concreto foi encontrado, como mostrado na Tabela 12.

Tabela 12 – Consumo de materiais para 1 m³ de concreto

Consumo de materiais (kg/m ³)			
Cimento	Areia	Brita	Água
431,58	741,82	949,95	205

Fonte: Autor (2023)

Portanto, encontrado os consumos dos materiais, foi definido o traço de referência em massa a ser utilizado, como mostrado na Tabela 13.

Tabela 13 – Traço convencional

Tipo	Traço
Convencional	1 : 1,72 : 2,20 : 0,475

Fonte: Autor (2023)

4.2.2. Traço RCD

O cálculo do traço com as substituições por resíduos também foi realizado de acordo com o método ABCP. A representação do traço referente as substituições estão apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 – Representação do traço RCD

Representação	Significado
---------------	-------------

c : a : b : r : a/c	Cimento : Areia : Brita : Resíduo : Água
---------------------	------------------------------------------

Fonte: Autor (2023)

Pelo motivo dos resíduos apresentarem uma absorção maior de água em relação ao agregado graúdo em estudo, a correção da água se deu por meio do ensaio de *Slump test*. Onde buscava-se sua consistência de acordo com o abatimento determinado. Sendo assim, a relação água/cimento aumenta conforme a mudança na quantidade de resíduos adicionados no concreto, para que fosse efetuado a correção do traço de acordo com a absorção dos agregados. No traço com 15 % de substituição, teve um acréscimo de 7,37 % de água. No traço de 30 % teve uma adição de 11,58 % de água, e no de 50 % adicionou-se 13,68 %. Com a saída de água no processo de cura, esses acréscimos de água em relação ao traço convencional podem ocasionar mais espaços vazios, causando uma diminuição no desempenho do concreto.

A Tabela 14 mostra o resultado dos traços referentes as substituições do agregado graúdo, pelo RCD.

Tabela 14 – Traço RCD

Tipo	Traço
RCD 15 %	1 : 1,74 : 1,99 : 0,35 : 0,51
RCD 30 %	1 : 1,74 : 1,64 : 0,70 : 0,53
RCD 50 %	1 : 1,74 : 1,17 : 1,17 : 0,54

Fonte: Autor (2023)

Por ter uma diferença na dimensão máxima característica, o traço com RCD apresentou uma pequena variação na quantidade de consumo dos materiais.

4.2.3. *Slump test*

O ensaio de *Slump test* determina a consistência e a trabalhabilidade do concreto. Em todos os concretos buscou-se um abatimento entre 80 e 100 mm. Quanto maior a porcentagem de substituição de RCD na mistura mais consistente foi o concreto.

Os resultados dos abatimentos dos traços em estudos, estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Ensaio *Slump test*

Tipo	Abatimento (mm)
Convencional	100
RCD 15 %	80
RCD 30 %	80
RCD 50 %	100

Fonte: Autor (2023)

Inicialmente, alguns dos traços não chegaram no abatimento desejado, por possuir uma maior absorção de água. Para tanto, foi necessário aumentar a quantidade de água no concreto, causando um ajuste na relação água/cimento. Atingindo assim o abatimento desejado em todos os traços.

4.3. Resistência à compressão

A partir da NBR 5739 (ABNT, 2018), foram rompidos três corpos de prova por traço para cada idade de cura. A Figura 18 mostra os corpos de prova com 15 % de substituição após serem rompidos aos 14 dias.

Figura 18 – Corpos de prova com 15 % de substituição



Fonte: Autor (2023)

A Figura 19 mostra os corpos de prova com 30 % de substituição após serem rompidos aos 7 dias.

Figura 19 – Corpos de prova com 30 % de substituição



Fonte: Autor (2023)

A Figura 20 mostra os corpos de prova com 50 % de substituição após serem rompidos aos 28 dias.

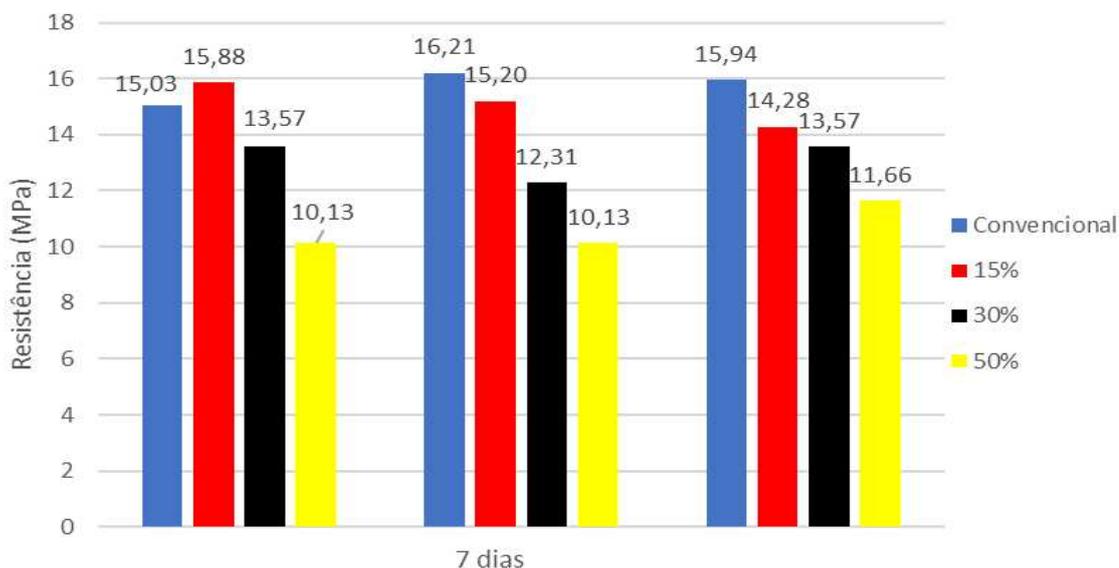
Figura 20 – Corpos de prova com 50 % de substituição



Fonte: Autor (2023)

O Gráfico 1 mostra os resultados da resistência à compressão dos corpos de prova aos 7 dias.

Gráfico 1 – Resistência à compressão aos 7 dias

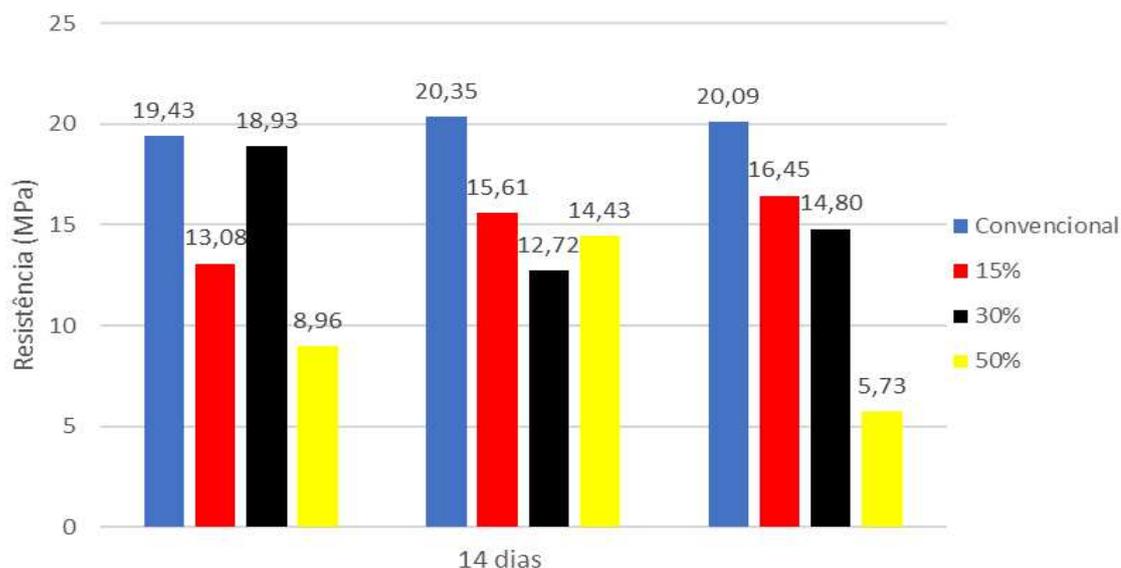


Fonte: Autor (2023)

Analisando os dados aos 7 dias de cura, percebe-se que o concreto com substituição de RCD de 15 % apresentou resultados semelhantes e próximos do concreto convencional, além disso, um dos corpos de prova de 15 % chegou à valor superior de resistência, quando comparado com um dos convencionais. O traço com 15 % de RCD apresentou uma variação de 3,88 % em relação ao traço de referência. O traço com 30 %, teve uma resistência de 16,40 % menor, quando comparado com o de referência. O concreto com 50 % foi o que apresentou pior desempenho com uma resistência inferior de 32,36 %.

O Gráfico 2 mostra o resultado do ensaio aos 14 dias.

Gráfico 2 – Resistência à compressão aos 14 dias

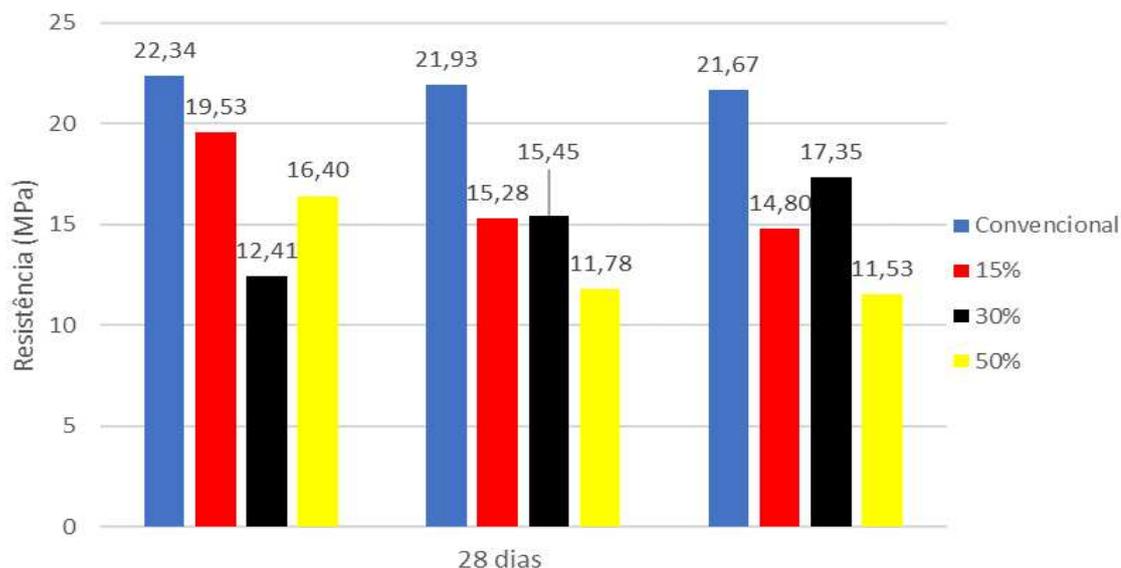


Fonte: Autor (2023)

Aos 14 dias de cura, apenas um dos corpos com substituição de RCD de 30 % apresentou resultado próximo ao do concreto convencional. Enquanto os com substituição de 50 % apresentaram resistência baixíssima aos 14 dias de idade. O traço com 15 % apresentou uma resistência de 24,60 % menor em relação ao de referência, tendo uma variação maior do que aos 7 dias. O concreto com 30 % de RCD, teve uma resistência de 22,44 % abaixo do convencional, porém, foi superior ao com 15 % de substituição. O traço de 50 % mostrou uma resistência inferior acima dos 50 %.

Os resultados para os concretos aos 28 dias de idade de cura estão apresentados no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Resistência à compressão aos 28 dias



Fonte: Autor (2023)

A partir dos resultados pode-se analisar que o concreto convencional chegou no valor mínimo de 20 MPa estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Em relação ao concreto feito com a substituição do agregado graúdo pelos resíduos, o que chegou mais próximo do valor mínimo foi um dos corpos de prova de 15 %, com a resistência de 19,53 MPa, no qual mostrou uma resistência média de 24,80 % menor. Em segundo fica o concreto com 30 % de substituição, apresentando uma resistência média inferior de 31,44 %. O que apresentou resultados mais distantes em comparação com o valor mínimo estabelecido foi o concreto fabricado com 50 % de RCD, ficando com uma resistência de 39,76 % menor.

Esses resultados têm relação com a caracterização dos materiais, uma vez que os resíduos demonstraram bastante porosidade, tanto no ensaio de massa unitária, como no de massa específica. Além disso, os resíduos mostraram um maior volume de vazios e absorção de água, conseqüentemente com o aumento da utilização dos resíduos, ocorreu uma diminuição na resistência dos concretos.

4.4. Avaliação de impacto ambiental

Por não se ter atingido resistências elevadas, optou-se pela utilização de 5 aplicações para fins não estruturais do concreto com substituições do agregado graúdo, sendo elas:

- Aplicação 1 – Calçadas;
- Aplicação 2 – Praças de pedestres;
- Aplicação 3 – Meio fio;
- Aplicação 4 – Elementos de drenagem;
- Aplicação 5 – Bloco de vedação.

Para a AIA, os indicadores do Quadro 4 foram utilizados. No qual, o indicador do caráter do impacto considera a classificação em positivo (1), neutro (0) ou negativo (-1), conforme definido:

- Positivo – Quando a aplicação resulta na melhoria da qualidade de um fator ou parâmetro ambiental;
- Neutro – Quando a aplicação não resulta em mudanças na qualidade de um fator ou parâmetro ambiental;
- Negativo – Quando a aplicação resulta em um prejuízo à qualidade um fator ou parâmetro ambiental.

A severidade do impacto classifica a aplicação quanto a sua importância em alta (3), média (2) e baixa (1), definidos como:

- Alta – Quando a aplicação apresenta uma elevada importância sobre os efeitos dos impactos;
- Média – Quando a aplicação apresenta uma média importância sobre os efeitos dos impactos;
- Baixa – Quando a aplicação apresenta uma baixa importância sobre os efeitos dos impactos.

A definição das áreas de influência de uma determinada aplicação permite a classificação da cobertura de um impacto em regional (3), local (2) ou pontual (1), de acordo com a definição:

- Regional – Quando os efeitos do impacto se manifestam também na área de influência indireta definida para a aplicação;
- Local – Quando os efeitos do impacto se manifestam somente na área de influência direta para a aplicação;
- Pontual – Quando os efeitos do impacto se manifestam em áreas que extrapolam as áreas de influência definidas para a aplicação, sem, contudo, se apresentarem como condicionante para ampliar tais áreas.

O indicador de duração corresponde ao tempo que o impacto pode ser verificado na área em que se manifesta, variando como permanente (3), média (2) ou curta (1), conforme definido:

- Permanente – Quando um impacto tem seus efeitos se estendendo além de um horizonte temporal definido ou conhecido;
- Média – Quando um impacto cessa a manifestação de seus efeitos em um horizonte temporal de média duração, definido ou conhecido;
- Curta – Quando um impacto cessa a manifestação de seus efeitos em um horizonte temporal de curta duração, definido ou conhecido.

Para este indicador, considera-se as possibilidades do impacto ser irreversível (3), parcial (2) ou reversível (1), de acordo com a definição:

- Irreversível – Quando mesmo com a suspensão da aplicação geradora do impacto não é possível reverter a tendência;
- Parcial – Quando é possível reverter parcialmente os efeitos decorrentes das aplicações;
- Reversível – Quando é possível reverter os efeitos causados pelas aplicações.

A partir dos indicadores, definiu-se o nível de cada aplicação. Como todas as aplicações feitas com substituição do RCD apresentam resultados na melhoria da qualidade de parâmetros ambientais, já que diminuirão os danos ao meio ambiente, elas são classificadas como positivas (1).

Para a importância das aplicações, definiu-se como parâmetros as quantidades de materiais utilizados em cada obra, e a utilidade da aplicação no bem-estar. Pois quanto maior a quantidade de insumos a serem usados, mais concreto alterado ser necessário. Sendo assim, definiu-se as aplicações 1, 2 e 4 com uma importância alta (3), enquanto às 3 e 5, como baixa (1).

Considerando que todas as aplicações causam efeitos indiretamente em outras partes, como por exemplo, se for fazer uma dessas obras em algum local, não irá ser necessário realizar a mineração, impactando nesses outros locais. Portanto, determinou-se elas como um indicador com cobertura regional (3).

Como as obras não possuem uma duração permanente, definiu-se todas as aplicações com uma duração de impacto média (2).

Levando em conta que se pararem as aplicações os impactos podem facilmente voltarem, elas foram definidas então como reversíveis (1).

Para as aplicações sem substituição, foram adotados os mesmos critérios, e considerando-se que ambas causam impactos negativos.

Portanto, estabelecendo-se os níveis dos indicadores de acordo a aplicação, chegou-se aos resultados da Tabela 16.

Tabela 16 – Avaliação de impactos

		Aplicação 1	Aplicação 2	Aplicação 3	Aplicação 4	Aplicação 5
Com substituição parcial	Caráter do impacto	1	1	1	1	1
	Severidade do impacto	3	3	1	3	1
	Cobertura do impacto	3	3	3	3	3
	Duração do impacto	2	2	2	2	2
	Reversibilidade do impacto	1	1	1	1	1
	Impacto resultante	9	9	7	8	7
Sem substituição parcial	Caráter do impacto	-1	-1	-1	-1	-1
	Severidade do impacto	3	3	1	3	1

	Cobertura do impacto	3	3	3	3	3
	Duração do impacto	2	2	2	2	2
	Reversibilidade do impacto	1	1	1	1	1
	Impacto resultante	-9	-9	-7	-8	-7
Amplitude entre os níveis de impacto		18	18	14	16	14
Aplicação de maior benefício				18		

Fonte: Autor (2023)

A partir dos resultados encontrados, calculou-se o impacto resultante de cada aplicação, que leva em consideração todos os indicadores e é calculado com o auxílio da Equação 7. Com os valores dos impactos resultantes, determinou-se a amplitude entre os níveis de impacto, definindo-se assim a aplicação de maior benefício.

Com a análise da Tabela 16, percebe-se que as aplicações de concreto confeccionado com RCD apresentam impactos bem semelhantes. Ainda de acordo com a tabela, nota-se que as aplicações do concreto com substituição parcial de resíduos obtiveram impactos positivos, enquanto as convencionais obtiveram resultados negativos. A utilização dos concretos com resíduos em calçadas e praças de pedestres foram as que tiveram maior benefício de aplicação, ambas com 18.

Portanto, com os resultados mostrados, observa-se que todas as aplicações estabelecidas demonstram uma viabilidade ambiental para a utilização de RCD na fabricação de concreto, minimizando os danos causados ao meio ambiente.

5. CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos a partir dos diversos ensaios realizados, com os resíduos e as propriedades referentes a substituição dos agregados graúdos pelo RCD na confecção do concreto, chegou-se a algumas conclusões.

Os resíduos possuem uma granulometria mais grossa quando comparado com o agregado graúdo, além de apresentarem uma menor porcentagem de massa retida dentro dos limites ótimos estabelecidos em norma. Analisando os resultados das massas unitárias e específicas, percebe-se que os resíduos em estudos são mais leves do que o agregado graúdo utilizado nesse trabalho, isso se dá basicamente por causa dos resíduos serem mais porosos.

O RCD apresentou uma alta absorção de água, o que influencia diretamente na resistência do concreto. Por apresentar essa maior absorção, adicionou-se água gradativamente, para poder melhorar sua trabalhabilidade, e para chegar no abatimento determinado. Porém, essa adição de água pode ter influenciado na resistência do concreto.

Enquanto o concreto convencional teve uma resistência à compressão média de 21,98 MPa, o concreto com substituições que apresentou melhor resistência à compressão aos 28 dias, foi o com substituição de 15 %, no qual obteve uma resistência média de 16,54 MPa. O concreto feito com 30 % de RCD chegou a uma resistência média de 15,07 MPa aos 28 dias. O que apresentou pior desempenho foi o concreto composto por 50 % de resíduos, onde ele teve uma resistência média à compressão de 13,24 MPa.

Sendo assim, apesar de nenhum dos concretos feitos com substituição de RCD terem atingidos altas resistências, esses materiais ainda podem ser empregados em processos construtivos sem fins estruturais, como em calçadas, praças de pedestres, meio fio, elementos de drenagem e blocos de vedação.

As aplicações que obtiveram melhor resultado em relação aos impactos ambientais foram as calçadas e praças de pedestres, em seguida elementos de drenagem, e posteriormente meio fio e blocos de vedação.

Portanto, esse estudo mostrou-se promissor, visto que demonstrou uma viabilidade ambiental. Tornando-se uma alternativa para a substituição do agregado

natural, contribuindo para a diminuição dos impactos ambientais promovidos pela extração de minerais, e apresentando uma destinação final adequada para os RCD.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimentos Portland. **Versatilidade do cimento brasileiro**. ABCP, São Paulo, 04 set 2019. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/tipos/a-versatilidade-do-cimento-brasileiro>>. Acesso em: 07 jun. 2022.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. ABRELPE, São Paulo, 01 dez 2022. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2022.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2023.

ALMEIDA, L. C. **Concreto**. Notas de aula da disciplina - AU414 - Estruturas IV - Concreto armado, Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2002. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~almeida/au405/Concreto.pdf>>. Acesso em: 05 dez. 2023.

ANDRADE, F. **Avaliação de Impacto Ambiental – AIA: o que é?**. Aterra, Belo Horizonte, 20 out 2022. Disponível em: <<https://aterraambiental.com/avaliacao-de-impacto-ambiental-aia-o-que-e/>>. Acesso em: 27 nov. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de Cimento Portland – Preparo Controle, Recebimento e Aceitação - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2022.

BASTOS, P. S. S. **Estruturas de Concreto Armado.** Notas de Aula - Disciplina de Estruturas de Concreto I, curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/Introducao.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

BEHERA, M., BHATTACHARYYA, S.K., MINOCHA, A.K., DEOLIYA, R., MAITI, S. **Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards 62 sustainability in construction sector: A review.** Construction and Building Materials, v. 68, p. 501-516, 2014.

BERMANN, C. **O projeto da Usina Hidrelétrica Belo Monte: a autocracia energética como paradigma.** Novos Cadernos NAEA, v. 15, n. 1, p. 5-23, 2016.

BRASIL. **Lei nº 12305, de 02 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. Brasília, DF, 02 de agosto de 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 27 mar. 2022.

BRASIL. **Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002.** Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). 2002. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/2002_Res_CONAMA_307.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2022.

BRASIL. **Resolução nº 001, de 23 de janeiro de 1986.** Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). 1986. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <https://www.suape.pe.gov.br/images/publicacoes/legislacao/3._CONAMA_01_1986.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2023.

CAVA, F. H. **9 propriedades do concreto endurecido.** Além da inércia, São Paulo, 25 jun 2018. Disponível em: <<https://alemdainercia.com/2018/06/25/9-propriedades-do-concreto-endurecido/?amp=1>>. Acesso em: 04 jun. 2022.

CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção. **Após 5 anos de crescimento, mercado imobiliário registra queda em 2022.** Cbic, Brasília, 27 fev 2023. Disponível

em: <<https://cbic.org.br/apos-5-anos-de-crescimento-mercado-imobiliario-registra-queda-em-2022/>>. Acesso em: 22 nov. 2023.

FERNANDES, F. R. C. (Ed.); ALAMINO, R. C. J. (Ed.); ARAUJO, E. R. (Ed.). **Recursos minerais e comunidade: impactos humanos, socioambientais e econômicos**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.

GOMES, P. C. C.; ALENCAR, T. F. F.; SILVA, N. V.; MORAES, K. A. M.; ÂNGULO, S. C. **Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 31-46, 2015.

HAGEMANN, S. E. **Materiais de Construção Básicos**. Universidade Aberta do Brasil. Instituto Federal Sul-rio-grandense, 2011.

IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto. **Concreto e construções**. IBRACON, São Paulo, 05 jun 2020. Disponível em: <<http://site.ibracon.org.br/search?searchword=concreto&searchphrase=all>>. Acesso em: 01 jun. 2022.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **A mineração: No foco das políticas públicas para o desenvolvimento do Brasil e para a promoção da qualidade de vida do brasileiro**. 2. ed. Brasília: Profissionais do texto, 2011.

IRALI, F.; KIVI, A.; SMITH, J. T.; TIGHE, S. L.; SANGIORGI, C. **Recycled Concrete Aggregate in Concrete Pavements: A Five Year Study on Its Effect on Pavement Performance**. Transportation Association of Canada, Canadá, 11 mar 2014. Disponível em: <<http://www.tac-atc.ca/english/annualconference/tac2013/session20/kivi.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2023.

LEOPOLD, L. B. **A procedure for evaluating environmental impact**. Geological Survey Circular, v. 645, p. 1-16, 1971.

NETO, V. F. S.; SILVA, M. T. R.; LUZ, P. M. S. G.; ARAÚJO, M. L. R.; MENDONÇA, A. M. G. D. **Análise da microestrutura do concreto incorporado com resíduo oleoso de petróleo.** Encontro Internacional de Jovens Investigadores / Edição Brasil. 3., 2017. Anais...Campina Grande: Realize Editora, 2017.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de Dosagem do Concreto.** ET-67. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 1998.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2020.

SANTANA, I. C. **Análise dos impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos de construção e demolição em Conceição do Almeida – BA.** 2016. 58f. Monografia (Graduação em Ciências Exatas e Tecnológicas) – Universidade Federal de Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, Bahia, 2016.

TEIXEIRA, J. H. S. **Resíduos de construção e demolição – concreto reciclável.** Revista Científica Semana Acadêmica, Fortaleza, v. 1, n. 144, p. 1-18, 2018.

YAZIGI, W. **A técnica de edificar.** 9. ed. São Paulo: Pini, 2008.