

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANA LUÍZA FARIA MICHELS

**ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO
COMO AGREGADO GRAÚDO DO CONCRETO**

CAMPO MOURÃO

2022

ANA LUÍZA FARIA MICHELS

**ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO
COMO AGREGADO GRAÚDO DO CONCRETO**

**Analysis of using construction and demolition waste (cdw) as a coarse aggregate in
concrete**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil do Curso da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Jucélia Kuchla Vieira.

Coorientadora: Fabiana Goia Rosa de Oliveira.

CAMPO MOURÃO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ANA LUÍZA FARIA MICHELS

**ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO
COMO AGREGADO GRAÚDO DO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil do Curso da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 07/junho/2022

Jucélia Kuchla Vieira
Doutorado em Arquitetura e Urbanismo
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Fabiana Goia Rosa de Oliveira
Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Valdomiro Lubachevski Kurta
Mestrado em Engenharia de Produção
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Vera Lúcia Barradas Moreira
Doutorado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CAMPO MOURÃO

2022

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à Deus, por sempre iluminar minhas escolhas e ter me guiado e me dado forças para chegar até aqui.

Aos meus pais Rosiney e Lédio e irmão Matheus, por sempre me apoiarem e me incentivarem a ser uma pessoa melhor. Em especial à minha mãe, que sempre confiou no meu potencial e nunca me deixou desistir dos meus sonhos.

Aos meus familiares, por sempre contribuírem com os meus desenvolvimentos pessoal e profissional, sobretudo ao meu tio Alexandre, por me auxiliar a ter acesso ao material estudado.

Ao meu namorado João, que esteve comigo durante toda a jornada e com quem compartilho minhas decisões e sucessos, bem como meus amigos que me ampararam nos momentos em que mais precisei. Em específico à Sthefany, que trilhou este caminho junto comigo.

Agradeço à minha orientadora Prof^a. Dr^a. Jucélia Kuchla Vieira e coorientadora Prof^a. Dr^a. Fabiana Rosa Goia de Oliveira por todos os ensinamentos e experiências que compartilharam comigo, além de sempre estarem dispostas a ajudar em tudo que foi preciso.

Aos técnicos do laboratório, Fábio e Fernando, por toda a paciência e assessoria que dedicaram a mim e ao meu trabalho.

Aos meus colegas de curso.

Ao Departamento do Curso e aos demais professores por toda a cooperação e ensino vivenciados durante os últimos anos.

Enfim, agradeço a todos os que por algum motivo participaram da realização desta pesquisa e a tornaram possível.

RESUMO

A construção civil é responsável por produzir resíduos devidos à retirada de recursos naturais. A análise da substituição do agregado graúdo pelo agregado reciclado de resíduos de construção e demolição (RCD) visa colaborar com o desenvolvimento sustentável, por meio do incentivo à reciclagem, redução de novas matérias-primas naturais e a destinação dos resíduos na natureza, fatores que causam impactos ambientais. Sendo assim, o presente trabalho aborda o estudo das propriedades do concreto convencional comparadas com as propriedades do concreto utilizando agregado reciclado de resíduos de construção e demolição beneficiados, oriundos de uma usina de reciclagem de RCD, localizada em Guarapuava, no Paraná. Os agregados miúdo, graúdo natural e reciclado foram caracterizados conforme suas massas específicas, absorção de água, granulometria e massas unitárias. O agregado reciclado é mais poroso, influenciando em uma maior absorção de água e na massa específica, em consequência de sua densidade. Foram produzidos concretos com diferentes taxas de substituição (CR, C30, C50 e C100), a fim de se observar a consistência no estado fresco, absorção de água, índice de vazios, massa específica e resistência à compressão axial. Constatou-se que para taxas de substituição mais elevadas, maior a redução causada no abatimento, ou seja, na trabalhabilidade. Os corpos de prova são mais leves, porém possuem mais índices de vazios e maior absorção de água. Em relação à resistência axial, os valores obtidos tiveram pouca variação para as diferentes taxas de substituição. O estudo é importante, pois novas análises estão sendo empregadas neste âmbito, com o objetivo de tornar a pesquisa dos resíduos de construção e demolição mais frequente, para posteriormente ser empregada nas obras de construção civil.

Palavras-chave: agregado reciclado; concreto; resíduos de construção e demolição.

ABSTRACT

The civil construction is responsible for producing waste due to the extraction of natural resources. The analysis of the replacement of coarse aggregate by recycled aggregate from construction and demolition waste (CDW) aims to collaborate with sustainable development, by encouraging recycling, the reduction of new natural materials and the disposal of waste in nature, factors that cause environmental impacts. Therefore, the present work approaches the study of the properties of conventional concrete compared with the properties of concrete using recycled aggregate from benefited construction and demolition waste, from a CDW recycling plant, located in Guarapuava, Paraná. Fine, coarse natural and recycled aggregates were characterized according to their specific masses, water absorption, granulometry and unit masses. Recycled aggregate is more porous, influencing greater water absorption and specific mass, as a result of its density. Concrete samples were produced with different replacement rates (CR, C30, C50 and C100), in order to observe the consistency in the fresh state, water absorption, void ratio, specific mass and axial compressive strength. It was found that higher replacement rates, correspondently caused a reduction in the slump, that is, the workability, in addition to the samples being lighter. However, they have more void rates and greater water absorption. Regarding the axial resistance, the values obtained had minor variation for the different replacement rates. It was possible to verify that this study is important, as new analyses are being used in this context, with the aim of making the research of construction and demolition waste more frequent, so it can be applied in civil construction buildings hereafter.

Keywords: recycled aggregate; concrete; construction and demolition waste.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 - Tipos de Cimento Portland existentes atualmente no mercado brasileiro.....	17
Figura 1 - Etapas da metodologia.	24
Fotografia 1 - Agregado de RCD – mostra úmida.....	26
Fotografia 2 – Materiais encontrados no agregado reciclado.	26
Fotografia 3 - Frasco de Chapman – ensaio para obtenção de massa específica do agregado miúdo.	27
Fotografia 4 - Massa saturada superfície seca do agregado reciclado.....	28
Fotografia 5 - Massa saturada superfície seca da brita.	28
Fotografia 6 – Massa em água do agregado reciclado.	29
Fotografia 7 – Massa em água da brita.	29
Fotografia 8 - Agitador mecânico com as peneiras.	31
Fotografia 9 - Agregado miúdo retido nas respectivas peneiras.	31
Fotografia 10 - Agregado reciclado retido nas respectivas peneiras.	32
Fotografia 11 - Agregado graúdo natural (brita) retido nas respectivas peneiras.....	32
Fotografia 12 – Pesagem para massa unitária do agregado miúdo.	33
Fotografia 13 – Pesagem para massa unitária do agregado reciclado.	33
Fotografia 14 – Pesagem para massa unitária do agregado graúdo.....	33
Fotografia 15 - Corpos de prova desmoldados.	36
Fotografia 16 - Ensaio de consistência: traço de referência (CR).....	37
Fotografia 17 - Corpos de prova retirados da estufa.	37
Fotografia 18 - Prensa hidráulica medindo a força do corpo de prova.....	39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	42
Gráfico 2 - Curva granulométrica do agregado reciclado.....	42
Gráfico 3 – Curva granulométrica do agregado graúdo natural.....	42
Gráfico 4 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo e zonas granulométricas conforme NBR 7211:2009a.	43
Gráfico 5 - Slump test: consistência no estado fresco do concreto.....	44
Gráfico 6 - Resistência à compressão axial média em relação ao traço.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Massas e absorção de água obtidas do agregado reciclado e da brita.	40
Tabela 2 – Composição granulométrica do agregado miúdo.	41
Tabela 3 - Composição granulométrica do agregado reciclado.	41
Tabela 4 - Composição granulométrica do agregado graúdo natural.....	41
Tabela 5 - Dimensão máxima característica e módulo de finura dos agregados.....	43
Tabela 6 - Massa unitária dos agregados.	44
Tabela 7 - Consistência no estado fresco do concreto.	44
Tabela 8 - Massas seca, saturada e imersa após pesagem dos corpos de prova.	45
Tabela 9 - Absorção de água.....	46
Tabela 10 - Índice de vazios.....	46
Tabela 11 - Massa específica da amostra seca.	47
Tabela 12 - Massa específica da amostra saturada.	47
Tabela 13 - Massa específica real.	47
Tabela 14 - Resistência à compressão axial dos corpos de prova.....	48
Tabela 15 - Resistência à compressão axial média para cada traço.	48

LISTA DE SÍMBOLOS

γ	Massa específica do agregado miúdo
L	Volume de água e agregado miúdo
d_s	Massa específica do agregado graúdo na condição saturado superfície seca
m_s	Massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca
m_a	Massa em água da amostra de agregado graúdo
d_a	Massa específica aparente do agregado seco
m	Massa de amostra seca
A	Absorção de água
ρ_{ap}	Massa unitária
v	Volume da fôrma
f_{ck}	Resistência característica inicial
S_d	Desvio padrão de dosagem
f_{cj}	Resistência de dosagem do concreto à compressão
m_{sat}	Massa da amostra saturada em água após imersão
m_s	Massa da amostra seca em estufa
I_v	Índice de vazios
m_i	Massa da amostra saturada imersa em água
ρ_s	Massa específica da amostra seca
ρ_{sat}	Massa específica da amostra saturada
ρ_r	Massa específica real
f_c	Resistência à compressão
F	Força máxima alcançada
D	Diâmetro do corpo de prova

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo geral.....	14
2.2	Objetivos específicos.....	14
3	JUSTIFICATIVA	15
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
4.1	Concreto de cimento Portland.....	16
4.1.1	Aglomerante	17
4.1.2	Agregados	17
<u>4.1.2.1</u>	<u>Agregados miúdos.....</u>	<u>18</u>
<u>4.1.2.2</u>	<u>Agregados graúdos.....</u>	<u>19</u>
4.1.3	Água.....	19
4.1.4	Aditivos	19
4.2	Propriedades fundamentais do concreto	20
4.2.1	Trabalhabilidade	20
4.2.2	Resistência mecânica	21
4.2.3	Dosagem	21
4.3	Resíduos de Construção e Demolição (RCD).....	22
4.3.1	Concreto de agregados recicláveis.....	22
5	METODOLOGIA.....	24
5.1	Caracterização da pesquisa	24
5.2	Materiais empregados	25
5.3	Obtenção e análise dos Resíduos de Construção e Demolição.....	25
5.4	Ensaio de caracterização dos agregados graúdos e miúdo.....	26
5.4.1	Massa específica do agregado miúdo.....	27
5.4.2	Massa específica, massa específica aparente e absorção de água dos agregados graúdo (brita) e reciclado.....	28
5.4.3	Granulometria	30
5.4.4	Massa unitária.....	32
5.5	Dosagem do concreto.....	34
5.6	Produção dos corpos de prova.....	35
5.7	Ensaio do concreto.....	36
5.7.1	Consistência no estado fresco.....	36

5.7.2	Absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	37
5.7.3	Resistência à compressão axial.....	39
6	RESULTADOS.....	40
6.1	Resultados da caracterização dos agregados graúdos e miúdo.....	40
6.1.1	Massa específica do agregado miúdo	40
6.1.2	Massa específica, massa específica aparente e absorção de água dos agregados graúdo (brita) e reciclado.....	40
6.1.3	Granulometria	41
6.1.4	Massa unitária.....	43
6.2	Resultados dos ensaios do concreto.....	44
6.2.1	Consistência no estado fresco do concreto	44
6.2.2	Absorção de água, índice de vazios e massa específica	45
6.2.3	Resistência à compressão axial.....	47
7	CONCLUSÃO.....	50
	REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

Segundo Grubba (2009), a construção civil possui ampla importância estratégica para todos os países, e em especial para os em desenvolvimento, como é o caso do Brasil. Contudo, verifica-se neste setor relevantes impactos ambientais, que consomem muitos recursos naturais e geram resíduos.

Para Frotte e Núbila (2015), este setor impacta significativamente no meio ambiente, em virtude do consumo de matérias-primas naturais, energia e resíduos obtidos, provindos das atividades de construção, reparos, reformas e demolição. Conforme o cenário descrito, é imprescindível adotar medidas que diminuam o volume dos resíduos a serem destinados à natureza, além da extração dos recursos naturais, por isso existe a importância da reciclagem dos resíduos de construção e demolição.

Pimenta (2012) ressalta que a construção civil é responsável por utilizar 50% dos recursos minerais produzidos e extraídos em todo o planeta. Os derivados das atividades mineradoras que são mais usados na construção são os agregados, cimento e cal. A qualidade do concreto é diretamente proporcional em relação à qualidade dos agregados aplicados.

Bezerra (2020) afirma que a construção civil requer elevadas quantidades de recursos naturais, que são retirados da natureza a fim de gerar matéria-prima, como o basalto (rocha usada na produção da brita) e a areia (retirada do leito dos rios para ser aplicada como agregado miúdo). Estes materiais são essenciais, visto que são usados na fabricação de argamassas e concretos, materiais não-renováveis. Entretanto, a extração da matéria-prima para geração dos materiais constituintes do concreto e a formação de entulho impactam desfavoravelmente o meio ambiente. Entre os impactos, pode-se listar: erosão (causada por problemas de estabilidades no solo), assoreamento (devido às alterações nos leitos dos rios), danos à fauna e à flora e impactos atmosféricos e sociais.

Pinto (1999) define os resíduos de construção e demolição como uma porção dos resíduos sólidos urbanos, abrangendo também os resíduos domiciliares. Todavia, no caso dos resíduos de construção e demolição, existem agravadores: a incompreensão dos volumes gerados e os impactos causados, custos sociais incluídos, além do desconhecimento da gravidade da situação por parte dos gestores, atrelado à ineficiência das ações corretivas. Contudo, com a intensificação da problemática urbana, os resíduos sólidos foram envolvidos na definição de políticas e estruturas de apoio, no âmbito municipal, regiões metropolitanas e estados da federação. Da mesma forma, em outros países como Japão, Estados Unidos e Europa Central esses esforços vêm acontecendo. No Japão e países europeus, devido à densidade

demográfica e limitação de espaços para alocação dos resíduos sólidos, existem políticas mais organizadas e estabilizadas, por causa da elevada industrialização e escassez de recursos naturais, sendo pioneiros no conhecimento e controle dos resíduos de construção e demolição.

Conforme o Conselho Nacional do Meio Ambiente (2002), os resíduos da construção civil são derivados de reformas, reparos e demolições das obras de construção e abrangem: plástico, resíduos de concreto, de cerâmica vermelha, de argamassa, papelão e madeira. Habitualmente, esses resíduos são chamados de entulho e são denominados de RCD: Resíduos de Construção e Demolição.

De acordo com Grubba (2009), é possível fazer a reciclagem dos RCD na forma de agregados reciclados por meio de beneficiamento, composto de triagem, britagem e peneiramento. Normalmente, classifica-se os agregados reciclados em duas categorias, conforme sua principal composição: agregados reciclados de concreto e agregados reciclados mistos.

Buttler (2003) afirma que, segundo as pesquisas realizadas sobre a análise de agregados reciclados, existe uma boa potencialidade de uso do material. No caso do Brasil, os estudos têm enfoque no tratamento dos resíduos de concreto das centrais dosadoras e na reutilização dos resíduos de construção e demolição. As maiores alterações entre o agregado natural para o agregado reciclado do concreto são: menor massa específica, maior absorção de água e a quantidade de argamassa incorporada à superfície dos agregados, interferindo nas propriedades do concreto final, tanto no estado seco quanto endurecido.

O trabalho visa estudar a relação da utilização dos RCD no concreto, a fim de que estes resíduos sejam beneficiados e reaproveitados. Assim, é possível garantir a destinação adequada, minimizando os rejeitos depositados no meio ambiente, além da diminuição dos recursos naturais extraídos, devido à nova fonte de matéria-prima para a fabricação do concreto.

2 OBJETIVOS

Nesta seção serão apresentados os objetivos geral e específicos deste trabalho.

2.1 Objetivo Geral

Estudar a substituição do agregado graúdo pelos resíduos de construção e demolição constituídos principalmente de concreto, argamassa, tijolos e telhas na composição do concreto, observando seu comportamento quanto às propriedades de resistência à compressão.

2.2 Objetivos específicos

- Pesquisar a disponibilidade de usinas de beneficiamento de entulhos na região;
- Caracterizar os agregados miúdo e graúdos a serem empregados na preparação do concreto;
- Estabelecer os traços a serem utilizados na substituição de agregado natural pelo agregado reciclado;
- Analisar as propriedades do concreto de acordo com as variadas proporções de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado.

3 JUSTIFICATIVA

Segundo Pimenta (2012), os impactos ambientais influenciam as indústrias concretistas, visto que essas empresas visam melhor produtividade atrelada à qualidade do produto. Sendo assim, a substituição do agregado graúdo pelos resíduos de construção e demolição garantem a solução de problemas ambientais, o menor consumo de cimento na produção do concreto e, conseqüentemente a redução do custo final do concreto. Para Martins (2010), o cimento é o componente de valor mais elevado na composição do concreto e, com essa atenuação no consumo do material, gera-se uma margem de lucro das indústrias concretistas e assegura a qualidade devido ao controle mais preciso da relação água e cimento do concreto.

Buttler (2003) ressalta que, com a aplicação de resíduos de concreto como agregado para novas dosagens, tem-se a redução dos custos relacionados à exploração e transporte dos agregados, além da diminuição do volume de resíduos depositados na natureza. O comércio de resíduos já é praticado em países como a Holanda e os Estados Unidos, que lucram com a atividade econômica.

Para Pinto (1999), o custo do agregado reciclado será mais acessível ao ser comparado com o custo do agregado natural, mesmo considerando os custos dos compostos essenciais para as instalações de uma usina de reciclagem de resíduos de construção e demolição, além dos custos de manutenção e reposição, fornecimento de água e energia, mão-de-obra, amortizações, juros e equipamentos internos.

Conforme Frotte e Núbila (2015), as conseqüências geradas na natureza pelo excesso da utilização dos recursos naturais e os resíduos provenientes têm sido evidenciados ao redor do mundo. O enfoque ocasionou determinações governamentais e privadas, com a finalidade de converter a deterioração do meio ambiente. O emprego de materiais alternativos é uma possibilidade de atenuar os impactos ambientais, como a utilização de insumos reciclados dos resíduos de construção e demolição. Esses resíduos podem ser beneficiados para o uso na própria obra, ou ainda encaminhados para usinas de reciclagem.

Para auxiliar no desenvolvimento sustentável focado na construção civil, o presente trabalho pretende acrescentar estudo relacionado às propriedades do concreto, provindos da substituição do agregado graúdo natural pelo agregado derivado de resíduos de construção e demolição, fomentando a reciclagem e a maior receptividade da construção civil para uso deste material.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No presente capítulo serão abordados os materiais constituintes e as principais propriedades do concreto, bem como os conceitos relacionados aos resíduos de construção e demolição.

4.1 Concreto de cimento Portland

Segundo Helene e Andrade (2010) o concreto feito a partir do cimento Portland é o material estrutural mais difundido e empregado pelo mundo todo nos dias de hoje. Embora seja o material mais moderno com a função estrutural, está entre as maiores descobertas na evolução da humanidade. Para Fonseca (2010), a sua composição inclui água, agregados graúdo e miúdo, aglomerante e, quando necessário, aditivos.

De acordo com Andolfato (2002), a mistura da água com o cimento compõe a pasta, preenchendo a maioria dos vãos entre os agregados. Posteriormente, a pasta se consolida, originando uma massa sólida. Os agregados são inertes, ou seja, não têm capacidade para agir. Em contrapartida, a pasta é ligante, devido às reações químicas que ocorrem entre a água e o cimento, tendo a função de se associar em um material sólido. Neville (2016) ressalta que os ingredientes da mistura devem ser misturados de forma adequada, a fim de se produzir um concreto fresco, no qual as superfícies das partículas dos agregados sejam cobertas pela massa de cimento, que devido à homogeneidade, possui propriedades constantes.

Para que haja a reação, a medida de água fundamental é pouca, contudo é utilizada uma porção maior, com o intuito de melhorar a trabalhabilidade e inserir o agregado em maior quantidade. Todavia, o acréscimo de água minora a resistência da pasta, tornando inevitável a utilização apropriada da relação água cimento, com o objetivo de resultar em um concreto aceitável. Os agregados representam entre 60% a 80% do concreto, por isso, garantem economia na produção, visto que o cimento tem o preço mais alto. Ademais, em torno de 1% a 2% da composição do concreto é ar, que fica retido no decurso da mistura dos materiais (ANDOLFATO, 2002).

Segundo Tiboni (2007), os aditivos são usados em casos particulares, possibilitando o controle do tempo de pega e a diminuição da porção de água, no desenvolvimento da resistência, calor de hidratação, trabalhabilidade e durabilidade como exemplos. No âmbito ecológico, os aditivos minerais também são interessantes, visto que inicialmente seriam transformados em agentes poluentes por serem subprodutos industriais, contudo, acabam por proporcionar melhorias ao concreto.

4.1.1 Aglomerante

Para Neville (2016), o cimento é um componente que possui propriedades coesivas e adesivas, capazes de ligar os fragmentos minerais. Na construção civil, o constituinte principal é o calcário. Quando em contato com a água, os cimentos reagem e endurecem, sendo classificados como cimentos hidráulicos.

Pimenta (2012) afirma que o cimento Portland é composto de clínquer e aditivos, sendo o primeiro o maior constituinte, formado por argila e calcário. Quando em contato com a água, reage, tornando-se inicialmente pastoso e logo após endurecendo, atingindo alta durabilidade e resistência. Os variados tipos de cimento Portland ocorrem em razão dos aditivos, que têm como matérias-primas o gesso, escórias de alto-forno, materiais carbonáticos e pozolânicos, sendo incorporados ao clínquer durante a moagem.

Segundo Andolfato (2002), com a modificação dos componentes do cimento, obtêm-se diferentes resultados em relação ao calor de hidratação, resistência mecânica, resistência a sulfatos, tempo de pega, entre outros. Os cimentos pozolânicos têm o aditivo na porção entre 10% e 40% do constituinte. Como vantagens, a resistência a águas sulfatadas e ácidas se eleva, além da baixa velocidade na liberação do calor de hidratação. Já os cimentos de alto-forno são resultantes da mistura entre o clínquer e a escória de alto-forno, na porção de 25% a 65% de peso do cimento. Os benefícios decorrentes são análogos aos dos cimentos pozolânicos supracitados.

Quadro 1 - Tipos de Cimento Portland existentes atualmente no mercado brasileiro

NOME	SIGLA (Estampada na embalagem)
Cimento Portland comum com adição	CP I-S-32
Cimento Portland composto com escória	CP II-E-32
Cimento Portland composto com pozolana	CP II-Z-32
Cimento Portland composto com filer	CP II-F-32
Cimento Portland de alto forno	CP III-32
Cimento Portland pozolânico	CP IV-32
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V-ARI

Fonte: Pimenta (2012, p. 14).

De acordo com Pimenta (2012), existem os cimentos Portland de baixo calor de hidratação, resistente aos sulfatos, branco estrutural e não estrutural, além do cimento específico para poços petrolíferos.

4.1.2 Agregados

Segundo Neville (2016), as características dos agregados são de suma importância de acordo com as proporções aplicadas, visto que compõem em torno de 75% do concreto. Sendo assim, as propriedades dos agregados influenciam o desempenho estrutural e a durabilidade do

concreto, por isso, se tiverem propriedades indesejáveis, o concreto executado não será resistente.

Andolfato (2002) afirma que, comumente, os agregados são constituídos de partículas resistentes e duras, verificadas em ensaios normatizados de peneiração. Os agregados combinados devem apresentar bom entrosamento, ou seja, deve haver pouco volume de espaços vazios entre as partículas. Sendo assim, as curvas granulométricas precisam se encaixar nas especificações.

Conforme Pimenta (2012), o agregado é o determinante para a massa unitária, estabilidade dimensional do concreto e o módulo de elasticidade. A massa específica do concreto é influenciada diretamente pela massa específica do agregado graúdo, além da direta proporção à resistência, visto que quanto maior o índice de vazios do agregado, menor a resistência e, portanto, a porção mais fraca do composto. É possível se fazer a classificação dos agregados da forma a seguir:

- De acordo com a origem: os naturais são retirados da natureza como areia e pedregulho. Enquanto os artificiais passam por fragmentação, como areia e pedra britada;
- De acordo com a densidade: agregados leves (vermiculita, argila expandida, pedras pomes, entre outros); agregados pesados (magnetita, barita, entre outros) e agregados normais (pedregulhos, pedra britada e areia);
- De acordo com a dimensão dos fragmentos: agregados miúdos (diâmetro máximo igual ou menor do que 4,8 mm) e agregados graúdos (diâmetro mínimo maior do que 4,8 mm).

4.1.2.1 Agregados miúdos

Para a NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a), conforme o módulo de finura, as areias podem ser classificadas como muito grossas (maior do que 3,90), grossas (3,30 a 3,90 mm), médias (2,40 a 3,30 mm), finas (menor do que 2,40).

A areia pode ser de fonte natural ou artificial. A primeira, é composta da mistura de partículas com variados tamanhos, divididos em areia fina, média e grossa, sendo retiradas de rios, cava e britagem. Já a segunda é originária da rocha, que é processada por britagem até alcançar o tamanho desejado. A Areia artificial ou industrial possui uma relação custo/benefício melhor, ao ser comparada com o outro tipo de areia, devido à redução do custo total da obra e

da matéria-prima, visto que a sua produção ocorre em canteiros de pedreiras próximas aos centros urbanos (PIMENTA, 2012).

4.1.2.2 Agregados graúdos

Os agregados graúdos são especificados conforme seu tamanho, ou diâmetros mínimo e máximo, conforme as partículas constituintes. A brita 0 tem diâmetro entre 4,8 e 9,5 mm, brita 1 de 9,5 a 19 mm, brita 2 de 19 a 25 mm, brita 3 de 25 a 50 mm, brita 4 de 50 a 76 mm e brita 5 de 76 a 100 mm. Para o concreto armado, as britas mais usadas são a 1 ou a combinação das britas 1 e 2 (ANDOLFATO, 2002).

Segundo Pimenta (2012), o agregado graúdo pode ter origem natural (pedregulho ou seixo) ou artificial (cascalho, pedra britada e trituração de rochas). O formato e a superfície são de muita relevância, visto que as superfícies lisas e formas arredondadas diminuem a porosidade entre os grãos e permitem a fluidez do concreto. Por outro lado, as superfícies rugosas e as formas angulosas auxiliam a aderência do cimento.

Neville (2016) afirma que o formato ideal das partículas dos agregados graúdos é o equidimensional, visto que as partículas com dimensões diversificadas possuem uma superfície específica superior e são capazes de se empacotar de forma anisotrópica. As partículas lamelares podem influenciar negativamente a durabilidade do concreto, devido à orientação em apenas um plano, formando vazios e acumulando água de exsudação sob elas.

4.1.3 Água

Conforme Neville (2016), a textura e o formato dos agregados miúdos intervêm na quantidade de água da mistura executada. Para Fonseca (2010), o método de hidratação do cimento Portland abrange o equilíbrio da água com os minerais do clínquer. Esta hidratação depende da relação água-cimento, finura, temperatura, período de cura, além das propriedades mineralógicas do clínquer e adições do cimento.

De modo que não haja quaisquer tipos de substâncias orgânicas ou resíduos industriais, a água utilizada para a composição do concreto deve ser preferencialmente potável (ANDOLFATO, 2002).

4.1.4 Aditivos

“Produto adicionado e misturado no concreto, em quantidade geralmente não superior a 5% da massa de ligante total contida no concreto, com o objetivo de modificar suas

propriedades no estado fresco e/ou no estado endurecido” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019, p. 3).

Os aditivos no concreto possuem diversos objetivos, dentre os quais a melhora da trabalhabilidade, aceleração e retardo de pega, aceleração do endurecimento e aumento de tensões nas idades iniciais, aumento de resistência gelo x degelo, diminuição da permeabilidade de líquidos, diminuição da retração, diminuição do calor de hidratação, impedimento de segregação e sedimentação, aumento de aderência dos agregados ao cimento, produção de propriedades fungicidas, germicidas e inseticidas e inibição da corrosão das armaduras (FONSECA, 2010).

Segundo Martins (2005), no Brasil ainda existe relutância em relação ao uso de aditivos no concreto. Isso ocorre devido a diversos fatores, tais como: alguns tipos têm alto custo; muitas composições presentes no mercado, sendo essencial na performance dos aditivos quando misturados; importância dos testes de desempenho para a fabricação; além do mais, certos materiais podem prejudicar a resistência mecânica do concreto. Embora haja pontos de melhoria, é possível observar um aumento no uso dos aditivos, especialmente os plastificantes e os superplastificantes.

4.2 Propriedades fundamentais do concreto

De acordo com Pimenta (2012), o concreto deve ser avaliado conforme os seus dois estados: fresco e endurecido. O material é classificado no primeiro caso até o instante em que ocorre o começo do tempo de pega do aglomerante. Já no segundo caso, o concreto é obtido conforme a combinação dos constituintes em seguida do fim da pega do aglomerante.

Neville (2016) ressalta que muitas das propriedades do concreto fresco e endurecido dependem do cimento escolhido. Além disso, a granulometria e o formato dos agregados graúdo e miúdo influenciam na trabalhabilidade e resistência do concreto. A dosagem está atrelada à resistência e durabilidade do material. Ademais, as condições de cura também são essenciais para a boa qualidade do concreto.

4.2.1 Trabalhabilidade

Para Helene e Andrade (2010), aspectos como a relação água/materiais secos, consumo e tipo de cimento, traço, teor de argamassa e forma, tamanho e textura dos agregados interferem na trabalhabilidade do concreto. Além desses aspectos, existem o transporte,

características da fôrma, lançamento, distribuição das armaduras, esbelteza dos elementos estruturais, entre outros.

A trabalhabilidade do concreto é uma propriedade que se refere ao seu comportamento no estado fresco. Entretanto sua influência não se restringe apenas a esse período de vida do material, pois dela vai depender a quantidade de energia necessária para adensar o material até o máximo de compacidade, o que, por sua vez, afetará a resistência final (MARTINS, 2005, p. 19).

Segundo a NBR 16889 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020, p. 1), o *slump test* é o método que avalia a consistência do concreto no estado fresco. Essa consistência pode ser medida de acordo com o seu assentamento, em obras ou em laboratório. Conforme a norma supracitada, esta metodologia pode ser utilizada em concretos plásticos e coesos.

4.2.2 Resistência mecânica

Para Neville (2016), muitas vezes a resistência do concreto é classificada como a propriedade mais importante para o material. Todavia, no que diz respeito às situações práticas, outras propriedades como a permeabilidade e a durabilidade podem ser ainda mais consideráveis. Ademais, a resistência proporciona a qualidade do concreto, em virtude da sua relação direta com a estrutura da pasta de cimento hidratada.

De acordo com Andolfato (2002), a resistência do concreto endurecido à tração é baixa e à compressão é elevada. Como o material trabalha principalmente à compressão, essa é a sua propriedade mais importante e propicia que outros parâmetros físicos sejam associados empiricamente. Quando bem desempenhado, o concreto é muito estável, por isso, ao ficar sujeito às intempéries, sua resistência mecânica aumenta paulatinamente ao passar do tempo.

Martins (2005) afirma que os aspectos que alguns dos fatores que interferem na resistência à compressão são: relação água/cimento; porosidade; relação cimento/agregados; granulometria, forma e textura dos agregados; natureza, dosagem e granulometria dos aglomerantes; qualidade da água; aditivos; idade; cura e parâmetros do ensaio.

4.2.3 Dosagem

A dosagem do concreto é a determinação da proporção mais viável, ou seja, a quantidade com que cada um dos constituintes entra na mistura. Sendo assim, o traço é estipulado conforme as exigências particulares de cada projeto e demonstra a proporção de cada um dos materiais utilizados (PIMENTA, 2012).

Segundo Duran e Fracaro (2011), o método de dosagem ABCP (desenvolvido pela Associação Brasileira de Cimento Portland) é indicado para concretos de consistência plástica até fluida. Antes de executar esta metodologia, é essencial saber as propriedades do cimento (como o tipo, a massa específica e a resistência aos 28 dias), dos agregados (como a análise granulométrica e massas específica e unitária compactada) e do concreto (consistência pretendida quando no estado fresco e a resistência de dosagem desejada). Os procedimentos envolvem o desenvolvimento do traço que será utilizado como base, moldagem dos corpos de prova e, após a obtenção do resultado, é possível fazer os ajustes necessários para a dosagem.

4.3 Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

De acordo com o Conselho Nacional do Meio Ambiente (2002), os resíduos da construção civil se derivam de construções, reparos, reformas, demolições das obras e oriundos do preparo e desaterro dos terrenos, bem como: concreto, solos, blocos cerâmicos, tijolos, rochas, resinas, metais, colas, madeiras, vidros, forros, argamassa, gesso, plásticos, telhas, tubulações, fiações elétricas, entre outros, que usualmente são denominados entulhos de obra, metralha ou caliça.

A sustentabilidade deve ser levada em conta durante todo o processo de uma construção, a começar de sua idealização até sua restauração, desconstrução ou demolição. Os materiais e resíduos precisam ser abordados associadamente, visto que a seleção e uso de materiais adequados diminuem a produção de resíduos, assim como os impactos na natureza consequentes da mesma. Desse modo, atualmente há uma preocupação da indústria do cimento e concreto para a evolução sustentável, com ênfase na inovação e gestão ambiental, proteção climática, diminuição das emissões e produtividade dos recursos (FONSECA, 2010).

Para Bezerra (2020), a indústria da construção civil é responsável por produzir resíduos que não possuem uma destinação apropriada, seja por ausência de recursos e gerenciamento, ou devido às ideologias políticas. A deposição desses materiais na natureza no decurso dos anos tem a consequência de gerar desequilíbrios ecológicos. Todavia, alguns estudos têm sido proporcionados por pesquisadores, com o objetivo de reduzir os impactos e possibilitar a sustentabilidade.

4.3.1 Concreto de agregados recicláveis

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (2002) classifica os resíduos da construção civil da seguinte maneira: classe A, os resíduos recicláveis ou reutilizáveis como agregado,

como: de construção, demolição, reformas e reparos das edificações (tijolos, placas de revestimento, telhas, argamassa e concreto); classe B, resíduos recicláveis com outras finalidades (papel, plástico, metais, madeiras, embalagens vazias e gesso); classe C, resíduos que ainda não possuem metodologias a fim de reciclá-los ou recuperá-los e classe D, resíduos perigosos (tintas, óleos e solventes).

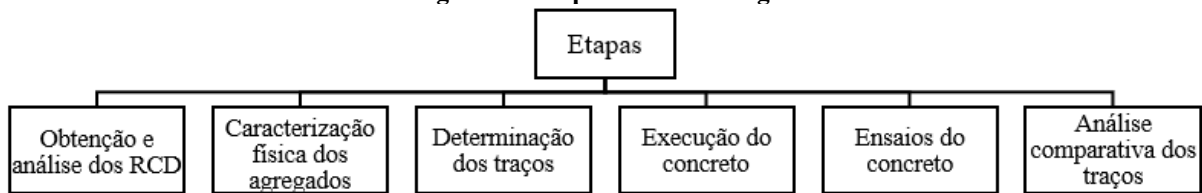
Grubba (2009) ressalta que a constituição dos resíduos oriundos de construções é proveniente das especificidades de cada região, conforme matérias-primas utilizadas e técnicas construtivas. Entretanto, no Brasil, grande parte dos resíduos é constituída de materiais recicláveis e inertes, tais como: concretos, restos de argamassa, materiais cerâmicos e agregados.

Os concretos fabricados com a substituição dos agregados por resíduos de construção e demolição são definidos conforme o seu beneficiamento e podem ser classificados como: agregado reciclado (material resultante do beneficiamento dos resíduos de classe A); agregado reciclado cimentício (composto de argamassas e concreto, blocos pré-moldados de concreto); agregado reciclado de concreto (formado principalmente por resíduos de concreto); agregado reciclado misto (produzido da mistura de materiais cimentícios, como concretos, argamassas e materiais cerâmicos) e agregado total reciclado (sua composição contém agregados graúdos e miúdos) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS , 2021, p. 2).

5 METODOLOGIA

O presente capítulo apresenta a caracterização da pesquisa. Além disso, aborda sobre a obtenção e análise dos entulhos utilizados na fabricação do concreto com agregado reciclado de resíduos de construção e demolição, para diferentes traços. Por fim, trata sobre os processos de pesquisa, com base nos ensaios de laboratório, analisando as propriedades físicas e mecânicas dos agregados natural e reciclado e verificando o comportamento do concreto para variadas proporções de agregado reciclado.

Figura 1 - Etapas da metodologia.



Fonte: Autoria própria (2022).

5.1 Caracterização da pesquisa

Segundo Silva e Menezes (2005), a pesquisa se caracteriza como uma soma de ações, que são sugestões para se resolver determinado problema, baseando-se em processos sistemáticos e racionais. Para Severino (2013), a pesquisa é essencial, visto que por meio dela é possível produzir conhecimento, fundamentado em problemas concretos e reais vividos pela sociedade.

A natureza da presente pesquisa é aplicada, visto que o intuito é fomentar conhecimentos de aplicação prática, orientados para a resolução de situações características (GERHARDT; SILVEIRA, 2009). O objetivo é exploratório, em virtude da busca por informações acerca de um campo de trabalho delimitado. Portanto, é uma preparação para a análise explicativa, que registra e observa os fatos pesquisados, de acordo com aplicação de métodos experimentais e matemáticos (SEVERINO, 2013).

Os procedimentos podem ser caracterizados como de pesquisa experimental. Segundo Fonseca (2002), esse tipo de pesquisa reúne assuntos semelhantes, sujeita-os a processos diversificados e investiga se as divergências nos resultados são expressivas estatisticamente.

A abordagem da pesquisa pode ser classificada como quali-quantitativa, uma vez que abrange pontos qualitativos e quantitativos. Silva e Menezes (2005) classificam a abordagem qualitativa considerando que os resultados são qualificáveis, ou seja, seguindo opiniões e informações, tornando-se possível identificá-las e estudá-las, com auxílio dos métodos qualitativos. Já no enfoque quantitativo, conforme Fonseca (2002), as resoluções são

quantificáveis, embasando-se na verificação dos dados brutos e utilizando a linguagem matemática para apresentar as razões de um fenômeno. Sendo assim, com a pesquisa qualitativa é possível agregar melhores resultados ao serem comparados isoladamente.

5.2 Materiais empregados

Os materiais utilizados para o estudo são os seguintes: cimento CPV – ARI, por possuir alta resistência inicial; areia fina e brita 1, sendo comumente utilizados na construção civil; agregados reciclados de RCD e água potável.

5.3 Obtenção e análise dos Resíduos de Construção e Demolição

A primeira etapa executada na metodologia deste trabalho foi a pesquisa da disponibilidade de usinas de beneficiamento de entulhos na região. Para isso, entrou-se em contato com possíveis empresas que executassem o serviço, nas cidades de Campo Mourão e Maringá. Contudo, na região Noroeste do Paraná, atualmente não há usinas de beneficiamento de entulho. Por isso, ampliou-se a pesquisa para o estado do Paraná, no qual foi localizada uma usina em Guarapuava.

O agregado reciclado foi recolhido em uma usina de reciclagem de RCD, localizada na cidade de Guarapuava, no Paraná. A usina coleta os RCD, faz a triagem dos materiais, separando-os, como o concreto, argamassa, tijolos, telhas e areia. Já o papel, plástico, papelão, ferro, vidro, entre outros, são encaminhados para outras empresas capazes de fazerem a destinação correta. Os resíduos a serem reciclados pela usina são direcionados aos britadores, resultando em um material que é conduzido para as peneiras vibratórias, com o intuito de classificar e separar em pó de brita, brita 1 e brita 3. Conforme Bezerra (2020), as técnicas de beneficiamento dos resíduos de construção e demolição são análogas às aplicadas na obtenção de britas comuns.

Para a atual pesquisa, utilizou-se o agregado reciclado de brita 1, visto que é muito empregado na construção civil. Coletou-se 40 kg de agregado reciclado em março de 2022. O material foi trazido à cidade de Campo Mourão por meio de fretamento, embalado em saco de estopa e levado à universidade de carro. A granulometria do agregado era variada, abrangendo diversos materiais, como mostrado na Fotografia 1. Em relação à aparência, o agregado de RCD é bastante diferente ao ser comparado com o agregado graúdo de origem natural. Na amostra úmida, observa-se a coloração puxada para o marrom, possivelmente devido à presença da telha cerâmica e de solo.

Fotografia 1 - Agregado de RCD - mostra úmida.



Fonte: Aatoria própria (2022).

Como observado, o formato dos grãos é bastante irregular. Segundo Neville (2016), a forma e a lamelaridade do agregado graúdo agem diretamente na trabalhabilidade do concreto, além de afetar no grau de empacotamento. No que diz respeito ao formato lamelar, a influência na durabilidade pode ser negativa, visto que, com a orientação em um único plano, existe a formação de vazios e, conseqüentemente, o acúmulo de água de exsudação sob as partículas.

Na Fotografia 2, destacam-se os materiais presentes no agregado reciclado. Foram encontrados pedaços de espuma, plásticos, cascalho, espaçadores de piso, fragmentos de metais e de gesso, vidros, pregos, borracha e telha. Esses materiais foram descartados após a fotografia. Para a execução dos ensaios descritos a seguir, fez-se a separação do solo encontrado.

Fotografia 2 - Materiais encontrados no agregado reciclado.



Fonte: Aatoria própria (2022).

5.4 Ensaio de caracterização dos agregados graúdos e miúdo

Os procedimentos descritos a seguir foram realizados a fim de se caracterizar os agregados natural e reciclado, visto que as características físicas dos materiais influem nas propriedades do concreto. Esses ensaios foram executados em laboratório, seguindo as normas vigentes. As características estudadas foram: massa específica, massa específica aparente,

absorção de água, granulometria e massa unitária. A amostragem dos materiais foi preparada conforme a NBR NM 27 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000).

5.4.1 Massa específica do agregado miúdo

A massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume. Para a caracterização da massa específica do agregado miúdo, a amostra de 500 g de areia foi colocada no frasco de Chapman, adicionando-se 200 mL de água. Após balançá-lo para eliminar as bolhas de ar, observou-se a marca de 390 mL (L), conforme a Fotografia 3. Este ensaio foi executado com base na NBR 9776 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987).

De acordo com a NBR 9776 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987), a massa específica do agregado miúdo (γ) é calculada pela seguinte fórmula:

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (1)$$

Onde:

- γ = massa específica do agregado miúdo, em g/cm³;
- L = leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo), em mL.

Fotografia 3 - Frasco de Chapman – ensaio para obtenção de massa específica do agregado miúdo.



Fonte: Autoria própria (2022).

5.4.2. Massa específica, massa específica aparente e absorção de água dos agregados graúdo (brita) e reciclado

Segundo a NBR NM 53 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009c), uma amostra de agregado reciclado e outra de brita foram submergidas em água à temperatura ambiente, durante um dia. A seguir, retirou-se a água das amostras e as envolveu com pano, a fim de se eliminar toda a água visível. Assim, pesou-se as amostras, obtendo-se as massas de agregado saturado com superfície seca (m_s), conforme mostrado nas Fotografias 4 e 5.

Fotografia 4 - Massa saturada superfície seca do agregado reciclado.



Fonte: Autoria própria (2022).

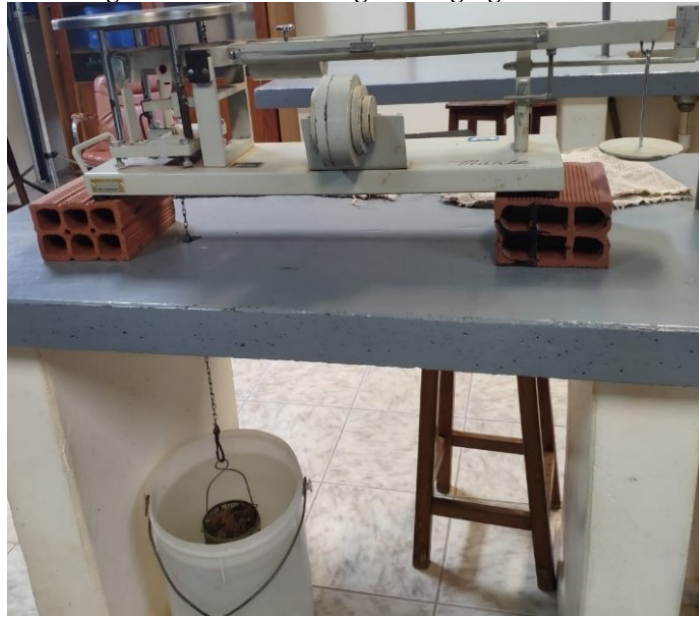
Fotografia 5 - Massa saturada superfície seca da brita.



Fonte: Autoria própria (2022).

Em seguida, colocou-se as amostras em um cesto aramado, submergiu-as e as pesou em água (m_a), conforme as Fotografias 6 e 7.

Fotografia 6 – Massa em água do agregado reciclado.



Fonte: Autoria própria (2022).

Fotografia 7 – Massa em água da brita.



Fonte: Autoria própria (2022).

De acordo com a NBR NM 53 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009c), os cálculos da massa específica dos agregados graúdos (d) e da massa específica na condição saturado superfície seca (d_s), foram obtidos conforme as Equações (2) e (3) abaixo:

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad (2)$$

Onde:

- d = massa específica do agregado seco, em g/cm³;
- m = massa ao ar da amostra seca, em g;

- m_a = massa em água da amostra, em g.

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad (3)$$

Onde:

- d_s = massa específica do agregado na condição saturado superfície seca, em g/cm³;
- m_s = massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em g;
- m_a = massa em água da amostra, em g.

Por fim, os materiais foram levados para a estufa, à temperatura de 105°C, com o intuito de se obter a massa específica do agregado gráudo seco (d). Após o período de 24 horas, as massas (m) obtidas foram de 855 g para o agregado reciclado e de 1124 g para a brita. A absorção de água (A) também foi determinada, em conformidade com a NBR NM 53 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009c), como segue nas Equações (4) e (5) abaixo:

$$d_a = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (4)$$

Onde:

- d_a = massa específica aparente do agregado seco, em g/cm³;
- m = massa ao ar da amostra seca, em g;
- m_s = massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em g;
- m_a = massa em água da amostra, em g.

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

- A = Absorção de água, em %;
- m = massa ao ar da amostra seca, em g;
- m_s = massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em g.

5.4.3 Granulometria

Em conformidade com a NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), para este ensaio, utilizou-se amostras de areia, agregado reciclado e brita previamente secas em estufa a 105°C e esfriadas à temperatura ambiente. Pesou-se 500 g de areia e 1000 g de brita e de agregado reciclado. Depois, com as peneiras encaixadas e limpas, de 4,8 mm a 150 μ m para o agregado miúdo e de 25 mm a 4,75 mm para

os agregados graúdos, colocou-se as amostras na peneira superior, sendo uma amostra de cada material por vez, repetindo o processo.

Seguidamente, o conjunto de peneiras foi colocado no agitador mecânico durante dez minutos, a fim de se possibilitar a segregação e a classificação das variadas dimensões de grão das amostras de agregados miúdo e graúdos, mostrado na Fotografia 8.

Fotografia 8 - Agitador mecânico com as peneiras.



Fonte: Autorial própria (2022).

Nas Fotografias 9, 10 e 11, pode-se observar a areia, o agregado graúdo reciclado e a brita, retidos em cada uma das peneiras utilizadas durante o experimento.

Fotografia 9 - Agregado miúdo retido nas respectivas peneiras.



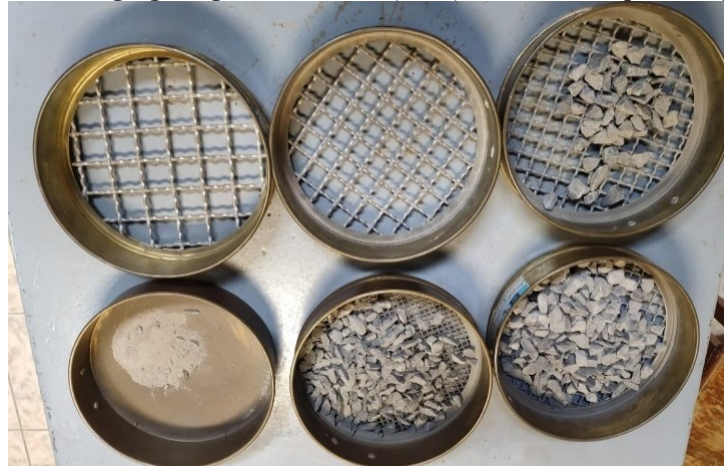
Fonte: Autorial própria (2022).

Fotografia 10 - Agregado reciclado retido nas respectivas peneiras.



Fonte: Autoria própria (2022).

Fotografia 11 - Agregado graúdo natural (brita) retido nas respectivas peneiras.



Fonte: Autoria própria (2022).

5.4.4 Massa unitária

As massas unitárias (ρ_{ap}) de cada agregado foram estabelecidas de acordo com a NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006a). Para essa determinação, foi utilizado uma fôrma metálica, com volume (v) de 3612,14 cm³, no qual suas medidas de profundidade, largura e comprimento foram tiradas três vezes cada, com o auxílio de um paquímetro e, posteriormente, foi realizada a média de cada uma das dimensões, obtendo-se o volume mencionado.

O ensaio foi realizado conforme o Método C – Determinação da Massa Unitária Solta de Agregado Seco ou Úmido da NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006a). Os materiais foram levados à estufa, permanecendo em secagem por um período de 24 horas, à temperatura de 105 °C, para atingir a massa constante. Após isso, para cada material, a fôrma foi preenchida três vezes, até transbordar, com o auxílio de uma concha,

depositando os materiais a uma altura de 5 cm em relação à borda superior da fôrma. A camada superior foi arrasada com régua metálica e, posteriormente, os materiais contidos na fôrma foram pesados (m), conforme as Fotografias 12, 13 e 14.

Fotografia 12 – Pesagem para massa unitária do agregado miúdo.



Fonte: Autoria própria (2022).

Fotografia 13 – Pesagem para massa unitária do agregado reciclado.



Fonte: Autoria própria (2022).

Fotografia 14 – Pesagem para massa unitária do agregado graúdo.



Fonte: Autoria própria (2022).

As massas unitárias (ρ_{ap}) são calculadas por meio da equação, presente na NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006a):

$$\rho_{ap} = \frac{m}{v} \quad (6)$$

Onde:

- ρ_{ap} = massa unitária, em kg/m³;
- m = massa da amostra seca, em kg;
- v = volume, em m³;

5.5 Dosagem do concreto

Para Bezerra (2020), a análise de viabilidade do concreto utilizando o agregado graúdo reciclado deve passar pelo processo de dosagem, feito conforme o método ABCP (desenvolvido pela Associação Brasileira de Cimento Portland), empregando três traços diferentes para serem comparados ao de referência, conforme a descrição a seguir:

- Traço de referência (CR): constituído apenas com agregado graúdo natural;
- Traço agregado reciclado 30 (C30): constituído de 70% de agregado graúdo natural e 30% de agregado graúdo reciclado;
- Traço agregado reciclado 50 (C50): constituído de 50% de agregado graúdo natural e 50% de agregado graúdo reciclado;
- Traço agregado reciclado 100 (C100): constituído de 100% de agregado graúdo reciclado.

A resistência característica inicial (f_{ck}) adotada foi de 20 MPa. De acordo com a NBR 12655 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022), devido à variabilidade da resistência do concreto em seu procedimento de obtenção, foi indispensável o uso do desvio padrão de dosagem (S_d), adotado como controle A, de 4 MPa, a fim de se obter como resultado a resistência de dosagem do concreto à compressão (f_{cj}), expressada conforme a equação a seguir:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \times S_d \quad (7)$$

Onde:

- f_{cj} = resistência de dosagem do concreto à compressão, em MPa;
- f_{ck} = resistência característica inicial, em MPa;
- S_d = desvio padrão de dosagem.

O valor obtido de f_{cj} foi de 26,6 MPa. Assim, foi possível calcular as dosagens para os traços de CR, C30, C50 e C100, apresentados abaixo:

- Traço de referência (CR): 1:3,1:2,7:0,7 (cimento: brita: areia: relação água/cimento);
- Traço agregado reciclado 30 (C30): 1:2,17:0,93:2,7:0,7 (cimento: brita: agregado reciclado: areia: relação água/cimento);
- Traço agregado reciclado 50 (C50): 1:1,55:1,55:2,7:0,7 (cimento: brita: agregado reciclado: areia: relação água/cimento);
- Traço agregado reciclado 100 (C100): 1:2,5:3,2:0,8 (cimento: agregado reciclado: areia: relação água/cimento).

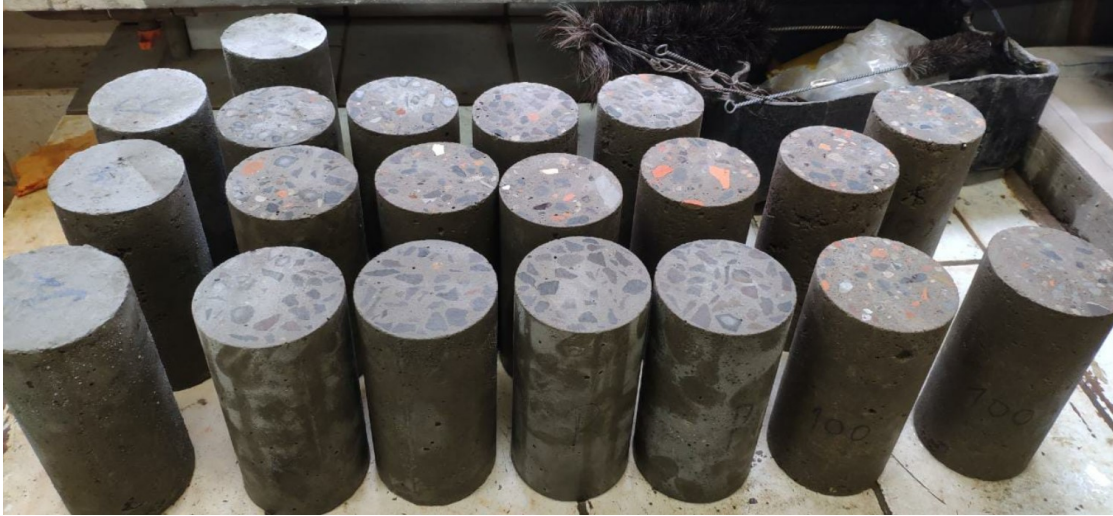
Conforme mencionado, a relação água/cimento utilizada para os concretos CR, C30 e C50 foi de 0,7. Já para o concreto C100, utilizou-se a/c de 0,8. Isso ocorreu devido ao fato de que o agregado reciclado é muito poroso, sendo assim, fez-se necessário aumentar a sua quantidade de água para a execução dos ensaios previstos e abordados em seguida.

5.6 Produção dos corpos de prova

Os concretos foram produzidos conforme os traços calculados e com o auxílio de betoneira para se fazer a mistura dos materiais. Produziu-se 20 L de concreto para cada um dos traços, a fim de se obter massa suficiente para 24 corpos de prova, mais o excedente para a utilização da betoneira. Os corpos de prova usados eram cilíndricos, com dimensões de 10 x 20 cm. Os métodos de moldagem e cura foram executados segundo a NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015). Primeiramente, foi aplicado desmoldante nos corpos de prova. Em seguida, o concreto foi colocado em duas camadas e em cada uma delas o material foi adensado, com o auxílio de uma haste metálica, com 12 golpes.

Após o período de 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados conforme a Fotografia 15 e se iniciou a etapa de cura, no qual as amostras foram submergidas em água durante 7 dias, por se tratar de concretos executados com cimento ARI V, ou seja, com alta resistência inicial.

Fotografia 15 - Corpos de prova desmoldados.



Fonte: Autoria própria (2022).

5.7 Ensaio do concreto

As etapas apresentadas a seguir foram realizadas a fim de se comparar o concreto executado com agregado natural e o com agregado reciclado. Os ensaios foram feitos no laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, em Campo Mourão, baseando-se em suas respectivas normas vigentes.

5.7.1 Consistência no estado fresco

O *slump test* foi executado conforme a NBR 16889 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020). Para este teste, foi necessário o uso de uma base metálica plana quadrada, uma haste metálica com seção circular e um molde tronco-cônico. A trabalhabilidade foi determinada de acordo com os tipos de concreto a serem fabricados: CR, C100, C50 e C30.

Depois do concreto ser misturado na betoneira, o material foi colocado no molde tronco-cônico, em local plano, sendo feito em três camadas, cada uma delas foi compactada com 25 golpes, com o auxílio da haste metálica. Após alguns instantes, o molde foi retirado aos poucos e colocado no chão. Ao final, comparou-se a mudança de altura entre o tronco de cone de concreto fresco e o molde, obtendo-se o abatimento, conforme a Fotografia 16.

Fotografia 16 - Ensaio de consistência: traço de referência (CR).



Fonte: Aatoria própria (2022).

5.7.2 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

A absorção de água, índice de vazios e massa específica dos corpos de prova foram obtidos conforme a NBR 9778 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b), que especifica os procedimentos pertinentes à porosidade do concreto. Para a determinação da massa da amostra saturada imersa em água (m_i), o ensaio foi executado sem a fervura dos corpos de prova, devido ao fato de que o laboratório não possui o equipamento necessário para isso.

Primeiramente, os 24 corpos de prova foram colocados em estufa na temperatura de 105 °C, durante o período de 72 horas, depois, foram medidas as suas massas secas (m_s). Em seguida, as amostras foram imersas em água, na temperatura de 23 °C e mantidas por 72 horas. Após esse período, os corpos de prova foram enxugados com pano e suas massas saturadas foram determinadas (m_{sat}). Por fim, as amostras foram pesadas imersas em água, com o auxílio da balança hidrostática, obtendo-se as massas saturadas imersas em água (m_i).

Fotografia 17 - Corpos de prova retirados da estufa.



Fonte: Aatoria própria (2022).

A absorção de água (A), o índice de vazios (I_v), a massa específica da amostra seca (ρ_s), a massa específica da amostra saturada (ρ_{sat}) e a massa específica real (ρ_r), foram determinadas de acordo com a NBR 9778 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b), como segue nas Equações (8), (9), (10), (11) e (12) a seguir:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

- A = Absorção de água, em %;
- m_{sat} = massa da amostra saturada em água após imersão, em g;
- m_s = massa da amostra seca em estufa, em g.

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (9)$$

Onde:

- I_v = Índice de vazios, em %;
- m_{sat} = massa da amostra saturada em água após imersão, em g;
- m_s = massa da amostra seca em estufa, em g;
- m_i = massa da amostra saturada imersa em água, em g.

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (10)$$

Onde:

- ρ_s = massa específica da amostra seca, g/cm³;
- m_{sat} = massa da amostra saturada em água após imersão, em g;
- m_s = massa da amostra seca em estufa, em g;
- m_i = massa da amostra saturada imersa em água, em g.

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (11)$$

Onde:

- ρ_{sat} = massa específica da amostra saturada, g/cm³;
- m_{sat} = massa da amostra saturada em água após imersão, em g;
- m_i = massa da amostra saturada imersa em água, em g.

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (12)$$

Onde:

- ρ_r = massa específica real, em g/cm³;
- m_s = massa da amostra seca em estufa, em g;
- m_i = massa da amostra saturada imersa em água, em g.

5.7.3 Resistência à compressão axial

As resistências à compressão dos 24 corpos de prova (6 para cada um dos traços) foram obtidas pela metodologia descrita na NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018), aos 23 dias. A prensa hidráulica utilizada foi EMIC PCE 100C, com capacidade de 100 tf, conforme a Fotografia 18. Para a realização deste ensaio, os corpos de prova estavam úmidos. Para cada corpo de prova, mediu-se dois diâmetros com o auxílio de paquímetro e se fez a média dos valores.

Fotografia 18 - Prensa hidráulica medindo a força do corpo de prova.



Fonte: Autoria própria (2022).

Para o cálculo da resistência à compressão axial (f_c), segundo a NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018), utilizou-se a seguinte equação:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (13)$$

Onde:

- f_c = resistência à compressão, em MPa;
- F = força máxima alcançada, em N;
- D = Diâmetro do corpo de prova, em mm.

6 RESULTADOS

Neste capítulo serão abordados os resultados obtidos nos ensaios descritos previamente.

6.1 Resultados da caracterização dos agregados graúdos e miúdo

A seguir, estão dispostos os resultados encontrados nos ensaios de massa específica, massa específica aparente, absorção de água, granulometria e massa unitária dos agregados graúdos e miúdo, a fim de caracterizá-los e compará-los, para assim analisar suas influências no concreto.

6.1.1 Massa específica do agregado miúdo

A massa específica real obtida para o agregado miúdo (areia) pelo método de Chapman foi de 2,632 g/cm³.

6.1.2 Massa específica, massa específica aparente e absorção de água dos agregados graúdo (brita) e reciclado

A massa específica do agregado seco, massa específica do agregado na condição saturado superfície seca e massa específica aparente do agregado reciclado são menores se comparadas ao agregado graúdo natural (brita), ou seja, o material reciclado é mais poroso e possui menor densidade, interferindo na massa específica do concreto. Já em relação à absorção de água, o agregado reciclado absorve mais do que o agregado graúdo comum, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Massas e absorção de água obtidas do agregado reciclado e da brita.

	Massa específica do agregado seco (g/cm ³)	Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (g/cm ³)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Absorção de água (%)
Agregado reciclado	2,76	2,41	2,21	9,0
Agregado graúdo natural	3,01	2,97	2,92	1,8

Fonte: Autoria própria (2022).

6.1.3 Granulometria

O material retido em cada peneira das amostras segue nas Tabelas 2, 3 e 4, bem como as porcentagens retida, retida acumulada e passante para o agregado miúdo, agregado reciclado e agregado graúdo natural. Sendo assim, fez-se possível obter a composição granulométrica dos materiais estudados.

Tabela 2 – Composição granulométrica do agregado miúdo.

Peneira (mm)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	% passante
4,75	0,18	0,04	0,04	99,96
2,36	4,28	0,86	0,89	99,11
1,18	9,78	1,96	2,85	97,15
0,6	35,25	7,06	9,92	90,08
0,3	289,77	58,07	67,98	32,02
0,15	143,19	28,69	96,68	3,32
Fundo	16,59	3,32	100,00	0,00
Σ	499,04	100,00		

Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 3 - Composição granulométrica do agregado reciclado.

Peneira (mm)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	% passante
25	9,44	0,94	0,94	99,06
19	16,41	1,64	2,58	97,42
12,5	228,33	22,81	25,40	74,60
9,5	240,92	24,07	49,47	50,53
4,75	368,68	36,83	86,30	13,70
Fundo	137,12	13,70	100,00	0,00
Σ	1000,90	100,00		

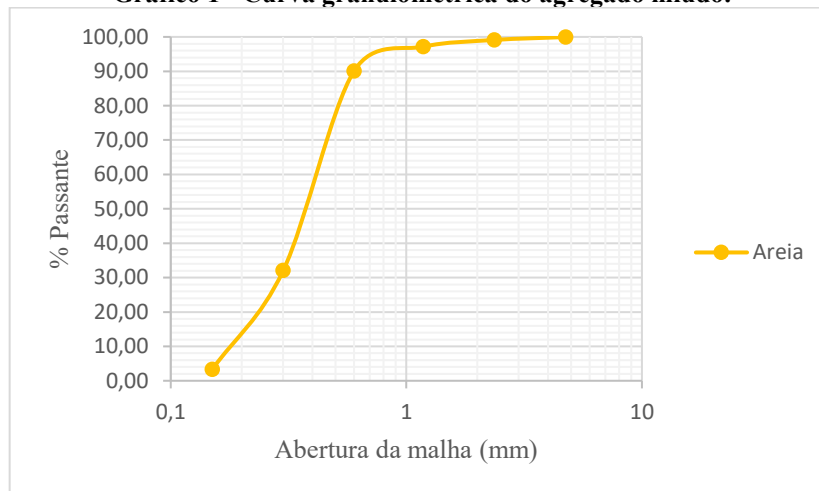
Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 4 - Composição granulométrica do agregado graúdo natural.

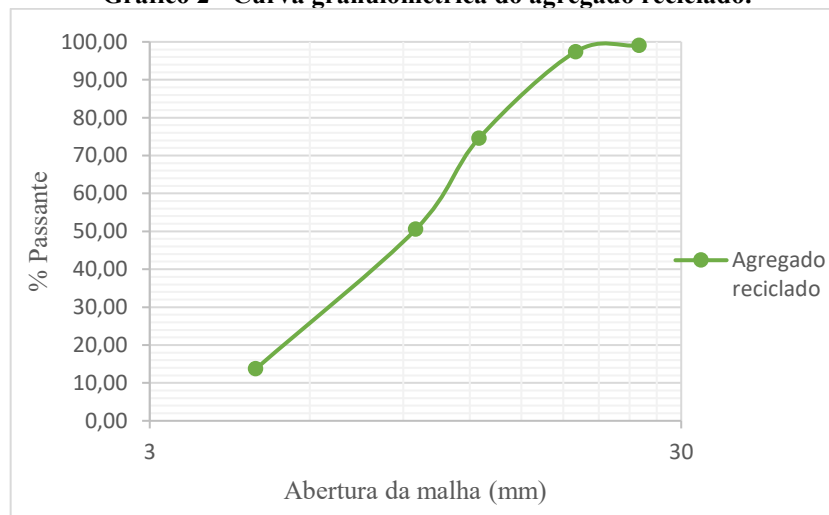
Peneira (mm)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	% passante
25	0,00	0,00	0,00	100,00
19	0,00	0,00	0,00	100,00
12,5	180,13	17,98	17,98	82,02
9,5	525,92	52,48	70,46	29,54
4,75	283,73	28,31	98,77	1,23
Fundo	12,28	1,23	100,00	0,00
Σ	1000,90	100,00		

Fonte: Autoria própria (2022).

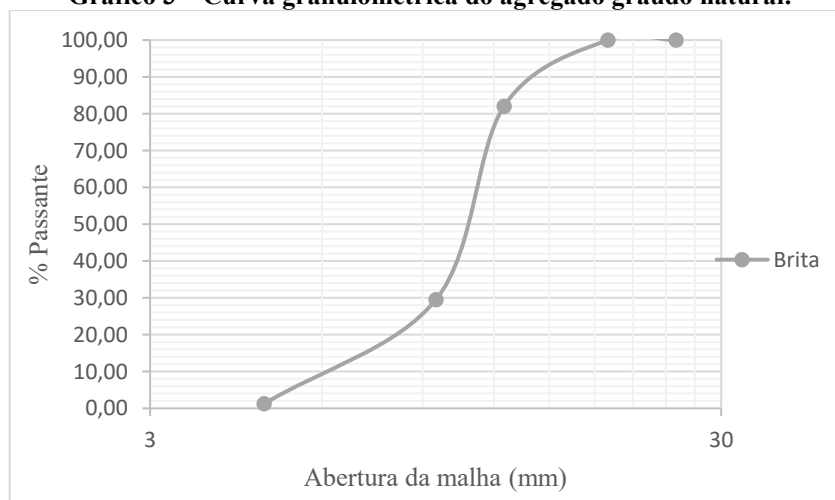
Os Gráficos 1, 2 e 3 evidenciam a curva granulométrica de cada um dos materiais estudados.

Gráfico 1 - Curva granulométrica do agregado miúdo.

Fonte: Autoria própria (2022).

Gráfico 2 - Curva granulométrica do agregado reciclado.

Fonte: Autoria própria (2022).

Gráfico 3 - Curva granulométrica do agregado graúdo natural.

Fonte: Autoria própria (2022).

Conforme os materiais retidos acumulados nas peneiras, obteve-se a dimensão máxima característica e módulo de finura para cada um dos agregados, apresentados na Tabela 5. Para a NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a), a dimensão máxima característica se refere à abertura nominal da malha da peneira, em que 5% ou menos do agregado é retido acumulado. Já o módulo de finura é o total das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras de série nominal, dividida por 100.

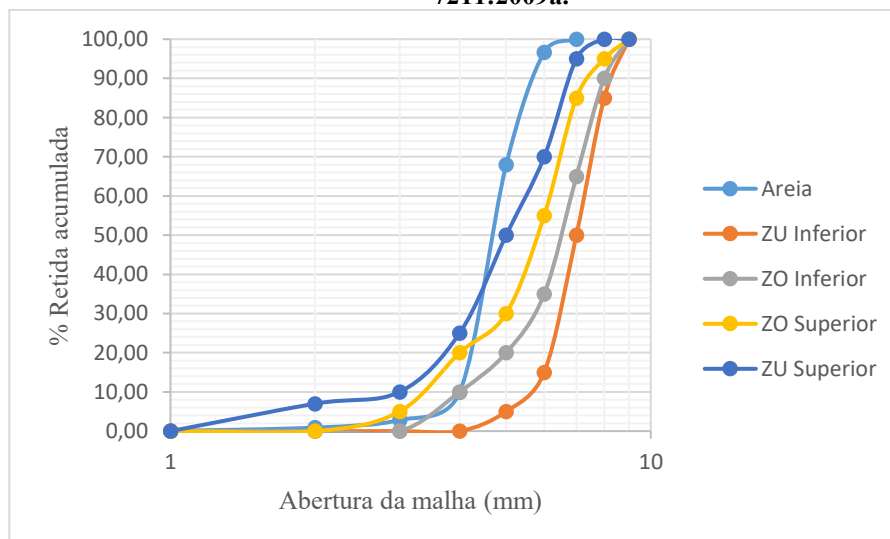
Tabela 5 - Dimensão máxima característica e módulo de finura dos agregados.

	Dimensão máxima característica (mm)	Módulo de finura
Agregado miúdo	1,18	1,78
Agregado reciclado	19	1,38
Agregado graúdo natural	19	1,69

Fonte: Autoria própria (2022).

De acordo com a NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a), o agregado miúdo se encontra na zona utilizável inferior para o módulo de finura, por estar na faixa de 1,55 a 2,20, conforme o Gráfico 4. Em relação à dimensão máxima característica, a areia apresentou granulometria fina, por ter 1,18 mm. O agregado reciclado foi classificado como brita 1, com 19 mm, assim como o agregado graúdo natural estudado.

Gráfico 4 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo e zonas granulométricas conforme NBR 7211:2009a.



Fonte: Autoria própria (2022).

6.1.4 Massa unitária

Conforme a NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006a), a massa unitária pode ser definida como a relação entre a massa e o volume de um agregado, sem haver compactação e se levando em conta os vazios presentes nos grãos. Seu

uso está atrelado à transformação de massa em volume, bem como o oposto. Para os agregados estudados, os resultados obtidos seguem na Tabela 6.

Tabela 6 - Massa unitária dos agregados.

	Massa unitária (kg/m ³)
Agregado miúdo	1656
Agregado reciclado	1183
Agregado graúdo natural	1444

Fonte: Autoria própria (2022).

6.2 Resultados dos ensaios do concreto

Os resultados relativos ao estudo do concreto equivalem à consistência no estado fresco, absorção de água, índice de vazios, massa específica e resistência à compressão axial, conforme demonstrados a seguir.

6.2.1 Consistência no estado fresco do concreto

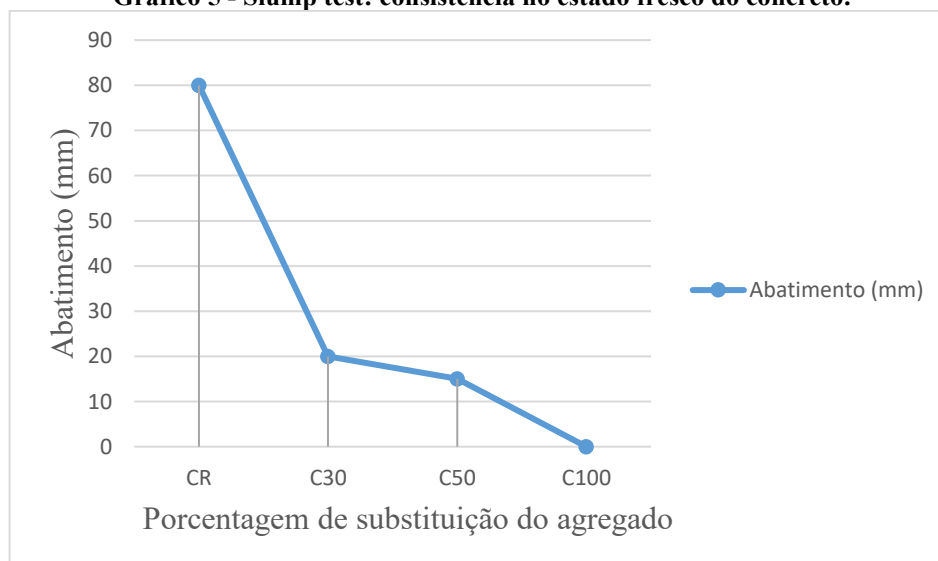
No ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone, obteve-se as informações contidas na Tabela 7 e no Gráfico 4, em que o abatimento resultante está relacionado com a porcentagem de substituição do agregado graúdo reciclado.

Tabela 7 - Consistência no estado fresco do concreto.

Trço	Abatimento (mm)
CR	80
C30	20
C50	15
C100	0

Fonte: Autoria própria (2022).

Gráfico 5 - Slump test: consistência no estado fresco do concreto.



Fonte: Autoria própria (2022).

É possível analisar que o uso do agregado reciclado na constituição do concreto ocasionou a diminuição do abatimento, prejudicando a trabalhabilidade do material. O motivo para o ocorrido se deve ao fato de que os resíduos inclusos na mistura do concreto são mais porosos, absorvendo uma maior quantidade de água quando comparados aos agregados usuais.

Segundo Cabral (2007), o formato dos agregados influencia na trabalhabilidade do concreto. Enquanto os agregados naturais possuem superfície lisa e forma arredondada, os agregados reciclados são mais angulares e possuem superfície áspera. No momento da preparação do concreto, observou-se uma massa mais seca quando utilizado o agregado reciclado.

Uma possível solução para a melhora da consistência do concreto e, conseqüentemente da trabalhabilidade, seria a adição de plastificante na composição, ou uma quantidade adicional de água de amassamento (FROTTE; NÚBILA, 2015).

6.2.2 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

As massas seca, saturada e imersa dos corpos de prova foram pesadas e dispostas na Tabela 8 a seguir, em gramas, para os concretos com 30% de substituição do agregado gráudo natural pelo agregado reciclado, 50% de substituição de agregado reciclado e 100% de substituição de agregado reciclado e concreto de referência. Analisa-se que os corpos de prova compostos por maior quantidade de agregado gráudo natural (brita) são mais pesados do que os de agregado reciclado.

Tabela 8 - Massas seca, saturada e imersa após pesagem dos corpos de prova.

Corpo de prova	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Massa imersa (g)
CR			
1	3477	3709	2209
2	3468	3701	2202
3	3497	3730	2222
4	3510	3741	2231
5	3490	3719	2215
6	3460	3697	2197
C30			
1	3318	3559	2042
2	3395	3643	2096
3	3337	3570	2066
4	3312	3556	2042
5	3364	3603	2080
6	3290	3534	2018
C50			
1	3293	3554	2017
2	3270	3538	2000

3	3281	3546	2007
4	3202	3472	1955
5	3260	3526	1999
6	3262	3520	1994
<hr/>			
C100			
1	3090	3357	1822
2	3077	3343	1814
3	2977	3342	1746
4	3031	3302	1798
5	3061	3323	1816
6	3095	3367	1836

Fonte: Autoria própria (2022).

Os resultados do ensaio de absorção de água do concreto estão dispostos na Tabela 9, a seguir. Segundo Levy (2001), os concretos constituídos de agregado reciclado possuem maior capacidade de absorção de água. Isso ocorre devido ao maior diâmetro dos poros capilares. É possível observar que, com o aumento do teor de substituição do agregado graúdo pelo reciclado, a absorção de água também aumenta, sendo uma relação não linear, como destacado a seguir:

Tabela 9 - Absorção de água.

Corpo de prova	CR (%)	C30 (%)	C50 (%)	C100 (%)
1	6,67	7,26	7,93	8,64
2	6,72	7,30	8,20	8,64
3	6,66	6,98	8,08	12,26
4	6,58	7,37	8,43	8,94
5	6,56	7,10	8,16	8,56
6	6,85	7,42	7,91	8,79
Média	6,67	7,24	8,12	9,31

Fonte: Autoria própria (2022).

Os índices de vazios dos corpos de prova foram calculados, conforme a Tabela 10. Verifica-se que o índice de vazios também aumenta em concordância com cada teor de substituição em relação ao CR, no qual quanto maior a utilização do agregado reciclado, maior a tendência de se aumentar estes índices de vazios.

Tabela 10 - Índice de vazios.

Corpo de prova	CR (%)	C30 (%)	C50 (%)	C100 (%)
1	15,47	15,89	16,98	17,39
2	15,54	16,03	17,43	17,40
3	15,45	15,49	17,22	22,87
4	15,30	16,12	17,80	18,02
5	15,23	15,69	17,42	17,39
6	15,80	16,09	16,91	17,77
Média	15,46	15,89	17,29	18,47

Fonte: Autoria própria (2022).

Os resultados relativos às massas específicas seca, real e saturada dos concretos no estado endurecido conforme cada teor de substituição consta nas Tabelas 11, 12 e 13.

Tabela 11 - Massa específica da amostra seca.

Corpo de prova	CR (g/cm ³)	C30 (g/cm ³)	C50 (g/cm ³)	C100 (g/cm ³)
1	2,32	2,19	2,14	2,01
2	2,31	2,19	2,13	2,01
3	2,32	2,22	2,13	1,87
4	2,32	2,19	2,11	2,02
5	2,32	2,21	2,13	2,03
6	2,31	2,17	2,14	2,02
Média	2,32	2,19	2,13	1,99

Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 12 - Massa específica da amostra saturada.

Corpo de prova	CR (g/cm ³)	C30 (g/cm ³)	C50 (g/cm ³)	C100 (g/cm ³)
1	2,47	2,35	2,31	2,19
2	2,47	2,35	2,30	2,19
3	2,47	2,37	2,30	2,09
4	2,48	2,35	2,29	2,20
5	2,47	2,37	2,31	2,21
6	2,46	2,33	2,31	2,20
Média	2,47	2,35	2,30	2,18

Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 13 - Massa específica real.

Corpo de prova	CR (g/cm ³)	C30 (g/cm ³)	C50 (g/cm ³)	C100 (g/cm ³)
1	2,74	2,60	2,58	2,44
2	2,74	2,61	2,57	2,44
3	2,74	2,63	2,58	2,42
4	2,74	2,61	2,57	2,46
5	2,74	2,62	2,59	2,46
6	2,74	2,59	2,57	2,46
Média	2,74	2,61	2,58	2,44

Fonte: Autoria própria (2022).

Nota-se que, com o aumento do teor de substituição do agregado gráudo natural pelo agregado reciclado, houve uma diminuição das massas específicas seca, saturada e real do concreto, conforme o aumento da absorção de água e do índice de vazios.

6.2.3 Resistência à compressão axial

Para este ensaio, obteve-se as forças máximas alcançadas (F), em Newton, apresentadas na Tabela 14, nos quais são dependentes dos diâmetros dos corpos de prova, e, assim, resultou-se nas resistências à compressão (f_c), em MPa, dispostas a seguir, para os devidos traços.

Tabela 14 - Resistência à compressão axial dos corpos de prova.

Corpo de prova	F (N)	D1 (mm)	D2 (mm)	D (mm)	fc (MPa)
CR					
1	99900	99,5	100,2	99,85	12,758
2	96000	99,7	100,5	100,1	12,199
3	95000	99,2	100,0	99,6	12,193
4	96600	99,5	100,2	99,85	12,336
5	103100	99,3	100,0	99,65	13,219
6	94300	100,2	100,4	100,3	11,935
C30					
1	96100	99,3	99,8	99,55	12,347
2	94500	100,2	100,3	100,25	11,972
3	100300	99,6	100,4	100	12,771
4	96600	100,0	100,6	100,3	12,226
5	100600	100,5	100,6	100,55	12,669
6	97200	99,5	99,7	99,6	12,475
C50					
1	101100	99,6	99,9	99,75	12,937
2	93100	99,8	100,1	99,95	11,866
3	93300	99,6	100,0	99,8	11,927
4	88800	99,7	99,7	99,7	11,375
5	91000	100,0	100,1	100,05	11,575
6	98900	99,8	100,4	100,1	12,567
C100					
1	96200	100,0	100,7	100,35	12,163
2	90700	99,6	101,0	100,3	11,479
3	87800	99,8	100,3	100,05	11,168
4	95600	99,6	100,0	99,8	12,221
5	93800	99,4	101,0	100,2	11,895
6	97200	99,9	100,0	99,95	12,388

Fonte: Autoria própria (2022).

Na Tabela 15, estão apresentadas as médias obtidas, em relação à cada traço. É possível analisar que, quanto maior a substituição do agregado graúdo pelo agregado reciclado, ocasionou em uma menor resistência média. Fazendo uma comparação com cada traço em relação ao concreto de referência, o C30 teve uma queda de 0,24%, o C50 de 3,21% e o C100 teve a sua resistência de compressão axial reduzida em 4,46%.

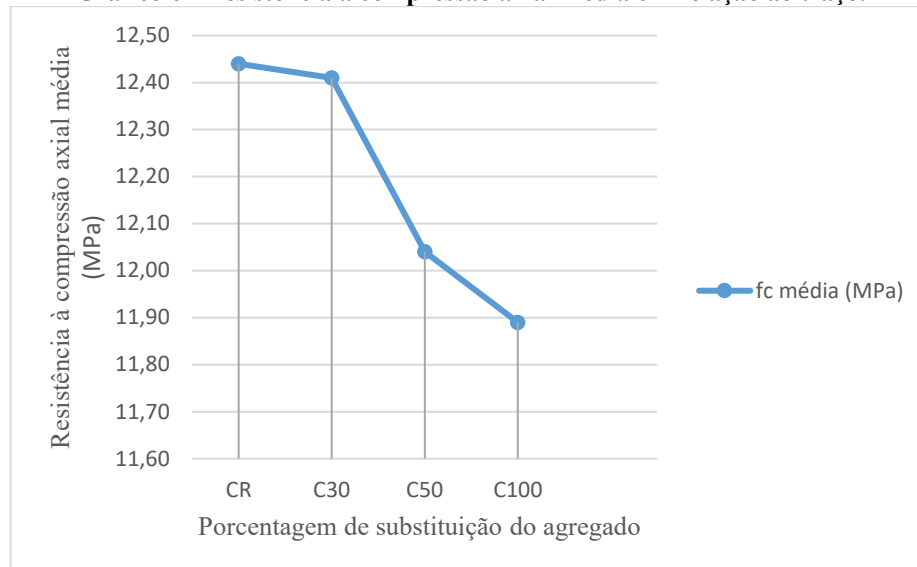
Tabela 15 - Resistência à compressão axial média para cada traço.

Traço	fc média (MPa)
CR	12,44
C30	12,41
C50	12,04
C100	11,89

Fonte: Autoria própria (2022).

No Gráfico 6, nota-se a variação média entre as resistências obtidas para cada traço. Importante ressaltar que a relação água/cimento utilizada para o C100 foi de 0,8, já para os demais traços foi usado 0,7.

Gráfico 6 - Resistência à compressão axial média em relação ao traço.



Fonte: Autoria própria (2022).

Mesmo com a mudança no fator a/c, observa-se que as resistências permaneceram próximas. Segundo Neville (2016), a textura superficial do agregado influencia na aderência com a pasta de cimento e na demanda de água do concreto. Além disso, os agregados afetam a resistência do concreto, intervindo na durabilidade e desempenho estrutural do material.

Para finalizar esse capítulo, apresenta-se um resumo dos resultados referentes aos ensaios do concreto, tendo em vista que os diferentes traços foram analisados e comparados para cada um dos ensaios. Para a consistência no estado fresco do concreto, foi observado que, quanto maior a utilização do agregado reciclado na composição do concreto, menor o abatimento apresentado. Em relação aos ensaios realizados com os corpos de prova, percebe-se que, ao aumentar a substituição de agregado gráudo natural pelo agregado reciclado, ocasionou em uma redução das massas específicas, contudo houve o aumento da absorção de água e dos índices de vazios. Por fim, para a resistência a compressão axial, a substituição do agregado gráudo pelo agregado reciclado gerou em uma resistência média menor, porém próxima.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram realizadas investigações quanto às propriedades do concreto de resistência à compressão axial, absorção de água, índice de vazios e massa específica, substituindo diferentes traços do agregado graúdo natural pelo agregado reciclado, obtido por meio do beneficiamento dos resíduos sólidos de construção civil. O estudo foi feito com base em ensaios laboratoriais e suas devidas análises.

Para a realização do trabalho, foi necessário entrar em contato com as possíveis empresas que executassem o beneficiamento dos resíduos na região Noroeste do Paraná, onde a cidade de Campo Mourão se encontra. Todavia, não foi encontrada nenhuma usina que estivesse em atividade. Sendo assim, a pesquisa foi expandida para o estado do Paraná e o material estudado foi obtido em Guarapuava e transportado até a cidade da análise.

Primeiramente, foram realizados os ensaios de caracterização dos agregados miúdo, graúdo e reciclado. Ao analisar os resultados de massa específica, absorção de água e massa unitária, é possível concluir que o agregado reciclado possui uma menor densidade por ser mais poroso, o que influencia na massa específica do concreto, além do material reciclado absorver mais água ao ser comparado com o agregado graúdo natural.

No ensaio de consistência no estado fresco do concreto, verificou-se que, quanto maior a substituição de agregado graúdo natural pelo reciclado, menor foi o abatimento obtido, afetando a trabalhabilidade do material, que devido ao formato dos grãos (angulares e ásperos), são mais porosos. Para a absorção de água, índice de vazios e massa específica, observa-se que os corpos de prova com maior taxa de substituição de agregado são mais leves, porém absorvem mais água e possuem maiores porcentagens de índices de vazios.

Na determinação da resistência à compressão axial, concluiu-se que a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado não afetou significativamente na resistência do concreto, visto que, ao levar o CR em conta, o C30 diminuiu apenas 0,24%, o C50 3,21% e o C100 teve uma redução média de 4,46%. Sendo assim, as resistências obtidas foram proporcionais. Contudo, conforme a dosagem calculada, esperava-se que essas resistências fossem de 20 MPa, mas ficaram em torno de 12 MPa.

A possível causa para esse resultado pode ser explicada pela areia utilizada como agregado miúdo, já que conforme a NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a), este agregado foi classificado na zona utilizável inferior devido ao módulo de finura obtido. Para Neville (2016), o ideal para o módulo de finura da areia utilizada no concreto, seria entre 2,3 e 3,1. Além disso, quanto mais fino o agregado miúdo, maior deverá

ser a vinculação com o agregado graúdo e, nesse caso, do agregado reciclado também, a fim de se compensar a redução da trabalhabilidade existente em consequência do formato mais pontiagudo e anguloso dos grãos.

A partir desses dados, a seleção do resíduo e um bom processo de britagem são essenciais para um eficiente desempenho do concreto. Os agregados com formato laminar e natureza cimentícia estão mais sujeitos a absorver água, por serem mais porosos, por isso são menos preconizados. Além disso, o agregado miúdo também exerce influência no concreto, por isso deve ser levado em conta para a obtenção do composto. A análise é importante para a criação de normas que viabilizem a utilização dos agregados reciclados, diminuindo os impactos na natureza consequentes da produção dos resíduos sólidos de construção e demolição.

REFERÊNCIAS

- ANDOLFATO, R. P. **Controle tecnológico básico do concreto**. 2002. Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2002. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/control-tecnologico-basico-do-concreto.pdf>. Acesso em: 17 out. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9776**: agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- 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: ABNT, 2009b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11768**: aditivos químicos para concreto de cimento Portland: parte 1: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: concreto de cimento Portland: preparo, controle, recebimento e aceitação: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15116**: agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889**: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 27**: agregados: redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 53**: agregado graúdo: determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

- BEZERRA, F. F. P. **Influência da substituição do agregado graúdo natural pelo resíduo de construção e demolição no concreto**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ifpb.edu.br/handle/177683/1386>. Acesso em: 12 out. 2021.
- BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto: influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-06082003-172935/publico/buttler.pdf>. Acesso em: 1 out. 2021.
- CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a viabilidade da composição de RCD**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-21102007-164548/pt-br.php>. Acesso em: 11 abr. 2022.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 307**, 05 de julho de 2002. Ministério do Meio Ambiente. Brasil. 2002.
- DURAN, A. P.; FRACARO, D. **Verificação das propriedades básicas do concreto industrializado fornecido em embalagens de 30 kg**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Concreto) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/9321>. Acesso em: 17 nov. 2021.
- FONSECA, G. C. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica**. 2010. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/ISMS-8ALHAQ/1/disserta__o_mestrado_gustavo.pdf. Acesso em: 17 out. 2021.
- FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: Universidade Estadual do Ceará, 2002. Apostila. Disponível em: <http://www.ia.ufrj.br/ppgea/conteudo/conteudo-2012-1/1SF/Sandra/apostilaMetodologia.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2021.
- FROTTE, C.; NÚBILA, C. S. A. **Estudo das propriedades de concretos com substituição parcial de agregado natural por RCD**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/8335>. Acesso em: 28 out. 2021.
- GERALDO FILHO, P. R. **Avaliação do gerenciamento de resíduos sólidos: estudo de caso em obra portuária no município de Paranaguá/PR**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/26299>. Acesso em: 19 nov. 2021.
- GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. (Org.). **Métodos de pesquisa**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 120 p. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/cursopgdr/downloadsSerie/derad005.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2021.

GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infraestrutura de Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-01122009-140152/pt-br.php>. Acesso em: 20 out. 2021.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. *In*: ISAIA, G. C. (org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** 2. ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2010. v. 1, cap. 29, p. 905-942. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc48.pdf>. Acesso em: 17 out. 2021.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria.** 2001. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Disponível em: https://ietsp.com.br/static/media/media-files/2015/01/23/Tese_Salomon_Mony_L Levy.pdf. Acesso em: 03 maio 2021.

MARTINS, V. C. **Otimização dos processos de dosagem e proporcionamento do concreto dosado em central com a utilização de aditivos:** estudo de caso. 2005. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/101966/211524.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 18 out. 2021.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** Tradução: CREMONINI, R. A. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. Disponível em: <https://docero.com.br/doc/cs0xxv>. Acesso em: 11 maio 2021.

PIMENTA, D. S. **Produção de concreto convencional com a utilização de pó de brita.** 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/283145115/Producao-de-Concreto-Convencional-Com-a-Utilizacao-de-Po-de-Brita>. Acesso em: 17 out. 2021.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** 1999. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. Disponível em: <http://www.casoi.com.br/hjr/pdfs/GestResiduosSolidos.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2021.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico.** 1. ed. São Paulo: Cortez, 2013. Disponível em: https://www.ufrb.edu.br/ccaab/images/AEPE/Divulga%C3%A7%C3%A3o/LIVROS/Metodologia_do_Trabalho_Cient%C3%ADfico_-_1%C2%AA_Edi%C3%A7%C3%A3o_-_Antonio_Joaquim_Severino_-_2014.pdf. Acesso em: 17 nov. 2021.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação.** 3. ed. Florianópolis: Laboratório de Ensino à Distância da Universidade Federal de Santa Catarina, 2001. 121 p. Disponível em: <https://cursos.unipampa.edu.br/cursos/ppgcb/files/2011/03/Metodologia-da-Pesquisa-3a-edicao.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2021.

TIBONI, R. A utilização da cinza da casca de arroz de termoelétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento Portland. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: http://web.set.eesc.usp.br/static/media/producao/2007ME_RafaelleTiboni.pdf. Acesso em: 21 out. 2021.