

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL - GUARAPUAVA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

JOÃO HENRIQUE GRZYNSKI

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DO RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE LAJES
PRÉ-FABRICADAS COMO AGREGADO RECICLADO DE
CONCRETO.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUARAPUAVA

2021

JOÃO HENRIQUE GRZYNSKI

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DO RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE LAJES
PRÉ-FABRICADAS COMO AGREGADO RECICLADO DE
CONCRETO.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil, da Coordenação de
Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Prof. Me. Marcela Maier
Farias Czap

GUARAPUAVA

2021

ATA DE DEFESA

Realizou-se no dia 27, de agosto de 2021, às 10h no Campus Guarapuava da UTFPR, a defesa Trabalho de Conclusão de Curso, como requisito parcial para aprovação do aluno João Henrique Gryczynski, na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Engenharia Civil intitulado: ESTUDO DA APLICAÇÃO DO RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE LAJES PRÉ-FABRICADAS COMO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO.

A Banca foi composta pela Presidente:

- Prof^a Me. Marcela Maier Farias Czap (Orientadora)

e pelos seguintes membros:

- Prof. Me. Dyorgge Alves Silva
- Prof^a Dr^a. Joice Cristini Kuritza

Guarapuava, 27 de agosto de 2021.

Dedico esse trabalho aos meus pais:
Rosane Aparecida Siquinel Gryczynski e
Edilson José Gryczynski

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pelo dom da vida e da perseverança, para que nunca desanimasse em minha caminhada.

Agradeço toda minha família, e especialmente aos meus pais Rosane e Edilson pelo incondicional apoio e amor durante esses difíceis anos de graduação. Agradeço também a minha irmã Isabela e minhas sobrinhas Maria Clara e Maria Luíza que sempre me deram força e acreditaram em mim.

A todos os professores e servidores da UTFPR Guarapuava, que contribuíram para minha formação, principalmente a minha orientadora Professora Marcela Maier Farias Czap, por todo auxílio e paciência no desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço à equipe de colaboradores da empresa Engeprócons por toda a colaboração para o desenvolvimento deste trabalho e também pela ótima experiência de estágio, que me qualificou muito profissionalmente.

E por fim, agradeço a todos meus amigos que fiz durante esses anos de graduação, que proporcionaram momentos felizes e descontraídos, e estiveram comigo mesmo nos dias mais difíceis.

RESUMO

GRYCZYNSKI, João H. **Estudo Da Aplicação Do Resíduo Da Produção De Lajes Pré-Fabricadas Como Agregado Reciclado De Concreto**. 2021. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

A construção civil é um dos setores mais expressivos da economia nacional, empregando cerca de 8 milhões de trabalhadores no país. Dentre os materiais que são empregados, o concreto é o insumo mais utilizado nesse ramo, além de ser o segundo material mais consumido no mundo. Convencionalmente, as estruturas de concreto armado são moldadas *in loco*, respeitando um período mínimo de 7 dias para sua desmoldagem e mais 14 para sua cura satisfatória. Com a demanda por melhores materiais e menores prazos, novas práticas construtivas ganharam espaço, como a dos pré-fabricados. Esse material tem o mesmo dimensionamento do concreto armado, porém, com peças moldadas em local diferente de sua aplicação final. Entretanto, as atividades da construção civil são causadoras de grandes impactos ambientais. De acordo com levantamentos recentes, os municípios brasileiros coletam todos os dias cerca de cento e vinte mil toneladas de resíduos de construção civil (RCC). Os estudos que abordam a reutilização dos RCC ainda apresentam limitações, principalmente quanto a qualidade dos resíduos utilizados. Portanto, este trabalho visa avaliar a utilização do resíduo de concreto gerado por uma indústria de peças pré-fabricadas, situada na cidade de Irati-PR. Os resíduos coletados foram diminuídos para a utilização como agregado reciclado para concreto em diferentes teores. Depois de moldados os corpos de prova, foram avaliados quanto a resistência em teste de compressão axial.

Palavras-chave: Agregado Reciclado. RCC. Concreto. Construção Civil. Sustentabilidade.

ABSTRACT

GRYCZYNSKI, João H. **Application Study Of Waste From The Production Of Prefabricated Slabs As Concrete Recycled Agregated.** 2021. 87 f. Couse Competition Assignment (Civil Engineering Bachelor degree) – Federal Technological University of Paraná. Guarapuava, 2021.

Construction is one of the most expressive industries in the national economy, employing around 8 million workers in the country. Between the most used materials, concrete is the most used input in this branch, besides to being the second most consumed material in the world. Commonly, reinforced concrete are molded in loco, respecting a minimum period of 7 days to take it out of the molds, and another 14 days for their satisfactory drying and cure. With the bigger demand for better materials and shorter deadlines, newer construction practices gained ground: such as prefabricated concrete structures. Which have the same reinforced concrete dimensioning, however, with molded parts in a different location from their final disposal. In disagreement with the presented advantages, civil construction activities causes great environmental impacts. According to recent surveys, Brazilian cities collect about a hundred and twenty thousand tons of civil construction waste (RCC) every day. Studies that address the reuse of RCC still have some limitations, especially regarding the quality of the waste used. Therefore, this assignment aims to use the concrete waste generated by the prefabricated concrete structures industry, located in the city of Irati – PR. The collected residues were reduced for use as recycled aggregate for concrete in different contents. After molding the concrete test cylinder, they were evaluated for strength in an axial compression test.

Key words: Recycled Aggregate. Construction Waste. Concrete. Civil Construction. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo ideal da geração e reciclagem de RCC.....	27
Figura 2 - Agregado de Resíduos de Concreto (ARCO)	30
Figura 3 - Agregado Reciclado Misto (ARM).....	30
Figura 4 – Delineamento da pesquisa.....	33
Figura 5 - Produção do concreto da empresa	34
Figura 6 - Mistura do concreto na concreteira industrial.....	34
Figura 7 – Depósito dos resíduos da fábrica de lajes pré-fabricadas.....	35
Figura 8 – Material em sua forma bruta	35
Figura 9 - Material desgastado na tentativa de britagem	36
Figura 10 – Rolo compactador utilizado para britagem do material	37
Figura 11 – Material depois de britado e peneirado	38
Figura 12 - Agitador mecânico com a série de peneiras utilizadas para granulometria	40
Figura 13 - Frasco de Chapman.....	41
Figura 14 – Método de dosagem ABCP	47
Figura 15 – Curva de Abrams	49
Figura 16 - Ensaio de abatimento de tronco de cone (slump test)	53
Figura 17 - Realização do ensaio de abatimento de tronco de cone.....	53
Figura 18 – Corpos de prova produzidos	55
Figura 19 - Ensaio de compressão do Corpo de prova	57
Figura 20 - Granulometria dos agregados graúdos.....	59
Figura 21 – Granulometria do Agregado Miúdo Natural.....	60
Figura 22 – Curva de inchamento do agregado miúdo	65
Figura 23 - Concreto produzido com proporção 100/0.....	67
Figura 24 - Slump Test do concreto com proporção 15/85	69
Figura 25 - Comparação dos testes de compressão axial	70
Figura 26 - Tipos de ruptura	71
Figura 27 - Ruptura cônica e bipartida	71
Figura 28 - Ruptura colunar.....	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos RCC segundo a resolução 307/2002 – CONAMA.....	23
Quadro 2 - Massas unitárias para curva do ensaio de inchamento.....	46
Quadro 3 – Nomenclatura dos traços do concreto	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Taxa de desperdício materiais	25
Tabela 2 – Composição de resíduo de construção e demolição	26
Tabela 3 - Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural – NBR 15116 (2004)	32
Tabela 4 - Classificação de acordo com as dimensões nominais	37
Tabela 5 – Série de peneiras	39
Tabela 6 - Consumo de água aproximado (l/m^3)	49
Tabela 7 - Determinação do consumo de agregado graúdo (CB)	50
Tabela 8 - Massa e percentuais retidos nas peneiras	58
Tabela 9 - Massa e percentual retido nas peneiras.....	58
Tabela 10 - Massa e percentual retido nas peneiras.....	59
Tabela 11 - Cálculo da Massa específica do agregado miúdo	61
Tabela 12 - Cálculo massa específica aparente e absorção de água do agregado reciclado de concreto (ARCO).....	61
Tabela 13 - Cálculo da massa específica aparente e absorção de água do agregado graúdo natural	62
Tabela 14 - Volume do recipiente.....	62
Tabela 15 - Massa unitária do agregado miúdo natural	62
Tabela 16 - Volume do recipiente.....	63
Tabela 17 - Massa unitária do agregado graúdo reciclado	63
Tabela 18 - Volume do recipiente.....	63
Tabela 19 - Massa unitária do agregado graúdo natural	64
Tabela 20 – Massa unitária de diferentes proporções entre agregados graúdos.....	64
Tabela 21 – Coeficientes de inchamento e Massas unitárias do agregado miúdo natural	65
Tabela 22 – Dosagens dos traços dos concretos.....	67
Tabela 23 – Massas específicas aparentes de cada traço.....	68
Tabela 24 – Abatimento do concreto no Slump Test.....	68
Tabela 25 - Áreas superficiais	69
Tabela 26 - Resistências médias à compressão	70
Tabela 27 - Classe de resistência do grupo 1	75

Tabela 28 - Grupo de resistência do grupo 2	75
---	----

LISTA DE SIGLAS

a/c – Relação água cimento

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRECON – Associação Brasileira Para Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ARCO – Agregado reciclado de concreto

ARI – Alta resistência inicial

cm - centímetros

cm³ - centímetros cúbicos

CO₂ – Dióxido de carbono

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CP-V – Cimento Portland categoria 5

g – gramas

g/cm³ - gramas por centímetros cúbicos

h – horas

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ISO – *International Organization for Standardization* (Organização Internacional de Normatização)

Kg – Quilograma

kg/m³ - quilogramas por metro cúbico

kN – Quilo Newtons

kN/cm² - Quilo Newtons por centímetro quadrado

L – litros

m² - metros quadrados

MF – Módulo de finura

ml – mililitros

mm – milímetros

MPa – Mega Pascais

MPa/s – Mega Pascais por segundo

NBR – Norma Brasileira

°C – graus centígrados

PIB – Produto Interno Bruto

PR – Paraná

RC&D – Resíduos da construção e demolição civil

RCC - Resíduos da Construção Civil

UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. INDÚSTRIA DE PRÉ-FABRICADOS.....	19
2.1.1. Aspectos Gerais.....	19
2.1.2. Histórico das Estruturas Pré-Fabricadas.....	20
2.1.3. Processo Construtivo.....	21
2.2. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	22
2.2.1. Geração de RCC.....	24
2.3. . RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL.....	26
2.3.1. Agregados Reciclados.....	29
3. METODOLOGIA	33
3.1. DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	33
3.2. ORIGEM DOS MATERIAIS DE ESTUDO.....	33
3.3. COLETA E BRITAGEM DOS RESÍDUOS.....	35
3.4. ENSAIOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO.....	38
3.4.1 Ensaio da Determinação da Composição Granulométrica dos Agregados..	38
3.4.2 Ensaio de Determinação da massa específica e massa específica aparente dos agregados.....	40
3.4.3 Determinação da Massa Específica e Massa Específica Aparente e Absorção De Água dos Agregados Graúdos.....	42
3.4.4 Massa Unitária dos Agregados.....	44
3.4.5 Ensaio de Inchamento do Agregado Miúdo.....	45
3.5 MÉTODO ABCP PARA DOSAGEM DO CONCRETO.....	46
3.5.1 Característica dos Materiais.....	47
3.5.2 Fixação da Relação Água – Cimento (A/C).....	48
3.5.3 Determinação Aproximada do Consumo de Água (Ca).....	49
3.5.4 Determinação do Consumo de Cimento (C).....	50
3.5.5. Determinação do Consumo de Agregados.....	50
3.5.6. Apresentação do Traço do Concreto.....	51
3.6. ENSAIOS DE CONCRETO FRESCO.....	51
3.6.1. Ensaio de Massa Específica do Concreto Fresco.....	52

3.6.2. Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone.....	52
3.7. PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	54
3.8. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	55
4. RESULTADOS	58
4.1. GRANULOMETRIA.....	58
4.2. MASSA ESPECÍFICA DOS AGREGADOS	60
4.3. DETERMINAÇÃO DA MASSA UNITÁRIA DOS AGREGADOS	62
4.4. INCHAMENTO DO AGREGADO MIÚDO	64
4.5. CÁLCULO E DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS DOS CONCRETOS	65
4.6. MASSA ESPECÍFICA APARENTE DO CONCRETO FRESCO	68
4.7. ABATIMENTO DO CONCRETO NO ENSAIO DO TRONCO DE CONE	68
4.8. ENSAIOS DE COMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	69
4.9. TIPOS DE RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA	71
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
5.1. DISCUSSÕES	73
5.2. CONCLUSÕES.....	76
5.3. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	79
REFERÊNCIAS.....	80

1. INTRODUÇÃO

A construção civil pode ser considerada um dos setores mais expressivos na economia da maioria dos países, no Brasil é diretamente responsável por 4,5 % do Produto Interno Bruto – o PIB, empregando cerca de 8 milhões de trabalhadores, além de movimentar 260 milhões de reais nesse período (IBGE, 2019).

O concreto vem sendo utilizado por décadas no desenvolvimento da nossa civilização, e sua versatilidade permite seu uso de maneira quase que intuitiva. Porém, pode ter tratamento mais científico, através de medições e dosagens experimentais, com uso de métodos de controle e de investigação (RECENA, 2015; MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A composição do concreto é basicamente água, cimento industrializado e agregados, miúdos e grãos. Sua principal característica é sua durabilidade natural, devido as características físico-químicas, que se assemelham às características de rochas naturais (FUSCO, 2012). A proporção de materiais que compõe o concreto denomina-se traço, e a sua composição é sem dúvida um passo importante para produzir um material que atenda às especificações de resistência e durabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Convencionalmente, as estruturas das edificações são dimensionadas em concreto armado moldado *in loco*, pois a trabalhabilidade do concreto fresco permite a moldagem nas mais diversas formas e volumes. Porém, depois de moldado, os elementos estruturais precisam de algum tipo de procedimento de cura, ou seja, cuidados tomados durante os primeiros dias de endurecimento como prevenção à retração plástica, por exemplo. A desforma desses elementos é realizada em no mínimo 7 dias após a moldagem, sendo comum a espera de 14 dias para que a evolução do endurecimento seja suficiente para o suporte de formas e de uma nova concretagem. Todas as etapas existentes no serviço de concretagem podem ser realizadas por equipes pequenas, porém exigem um prazo de execução mais estendido. (BASTOS, 2019)

Porém, em um panorama de expansão da indústria da construção civil, encontra-se demandas de melhores materiais e menores prazos de execução de obras e, portanto, novas técnicas construtivas começaram a ser desenvolvidas. A exemplo, os pré-moldados e pré-fabricados, que utilizam o mesmo dimensionamento

do concreto armado, porém com peças moldadas em local diferente da aplicação final (VASCONCELOS, 2002).

Os elementos pré-moldados têm uma variedade de benefícios comparados aos métodos construtivos tradicionais como: (a) a qualidade do produto final; (b) economia, levando em conta a pequena produção de desperdícios na execução e montagem; (c) prazos de entrega reduzidos; (d) garantia de um retorno financeiro mais rápido ao investidor (FERNANDES, 2015).

Em contraponto a sua grande importância econômica e constante evolução, a indústria da construção civil ainda é uma atividade que causa impactos ambientais expressivos, sendo considerada uma das maiores geradoras de resíduos do mundo (MARQUES et. al., 2020). De acordo com o levantamento publicado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), no ano de 2017, os municípios brasileiros coletaram cerca de cento e vinte mil toneladas diárias de resíduos provenientes de construções e demolições, representando cerca de 63 % de todo resíduo sólido urbano coletado naquele ano (ABRELPE, 2017).

Grandes nações e blocos econômicos já traçaram políticas nacionais para destinação e reutilização correta dos resíduos de construção civil (RCC). A União Europeia pretende reutilizar 70 % dos RCC até o ano de 2020, com o objetivo de reduzir o impacto ambiental e na saúde humana, como maximizar a eficiência dos seus recursos disponíveis (GONZÁLEZ et al., 2017).

Buscando alternativas de reaproveitamento dos RCC, o estudo realizado por Lintz et al. (2012), apontara que por meio de testes de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, existe a possibilidade de fazer a substituição dos agregados naturais por resíduos de construção civil reciclados na fabricação de novos concretos. Islam et al. (2019) citam que a reciclagem de RCC é uma atividade empreendedora e uma boa oportunidade de extrair benefícios tanto econômicos quanto ambientais desses materiais destinados ao descarte. Em adição a isto, em estatísticas recentes, indicativos apontam um aumento de cerca de 20 milhões de toneladas na demanda global por agregados para construção civil até o ano de 2025.

O impacto ambiental gerado pela extração de agregados naturais para suprir essa demanda precisa ser evitado, conservando o meio ambiente e seus recursos naturais. Uma das alternativas para colaborar com a diminuição deste impacto ambiental é a utilização de RCC para a produção de peças ou elementos estruturais,

o que a caracteriza como uma alternativa ambientalmente correta (FAVARETTO et al., 2017).

Porém, os estudos que abordam a utilização de RCC em dosagens experimentais como os de Islam et al. (2019), Lintz et al. (2012) e Vieira, Molin e Lima (2004) ainda apresentam limitações significativas, principalmente com relação a qualidade do resíduo utilizado, de acordo com a disponibilidade regional, e a existência de centrais de britagem que processem esse material. Os resultados ainda são bastante divergentes, mas há expectativas de que, nos próximos anos, com o desenvolvimento de mais resultados expressivos, a utilização de agregados reciclados seja mais frequente.

Portanto, esta pesquisa visa avaliar a utilização do resíduo de concreto gerado por uma indústria de pré-fabricados em Irati – PR. Destaca-se que esse resíduo não tem a presença de cerâmica, madeira, isopor e outros materiais comumente encontrados em RCC e, por isso, tem potencial para produzir melhores resultados em relação a concretos utilizando esse tipo de agregados reciclados.

O objetivo principal deste trabalho é analisar quais as possibilidades de utilização de um agregado reciclado na produção de novos concretos, provenientes de resíduos de concreto de uma fábrica de lajes pré-fabricadas, na cidade de Irati, no estado do Paraná.

E os objetivos secundários são:

- Comparar as propriedades físicas do agregado reciclado de concreto com as dos agregados graúdos convencionais;
- Comparar as propriedades físicas do concreto fresco com a utilização de agregado reciclado de concreto em diferentes traços de concentração;
- Avaliar a resistência do corpo de prova de concreto com agregado reciclado utilizando diferentes dosagens e traços.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INDÚSTRIA DE PRÉ-FABRICADOS

2.1.1. Aspectos Gerais

A escolha dos materiais para a construção de uma obra, não diz respeito apenas às propriedades físicas dos materiais utilizados, mas sim na sua relação custo-benefício, e se haverá solução para dado problema proposto. Algumas características dos materiais devem ser levadas em consideração em cada caso, tais como a resistência, desempenho estrutural e durabilidade, mas a decisão final será sempre de responsabilidade do engenheiro. (SCHAFFER et al, 2000).

O uso de concreto pré-moldado está amplamente relacionado à uma forma econômica, durável, estruturalmente segura e com versatilidade arquitetônica. A pré-fabricação das estruturas de concreto é um processo industrializado com grande potencial para o futuro, visto que a indústria de pré-fabricados está continuamente fazendo esforços para atender as demandas da sociedade, como economia, eficiência, desempenho técnico, segurança, condições favoráveis de trabalho e sustentabilidade (VAN ACKER, 2002).

Ainda segundo Van Acker (2002), muitas tipologias de edificações são adequadas para a utilização da construção pré-moldada. Tipologias com planos ortogonais são ideais, pois apresentam um grau de regularidade e repetição em suas malhas estruturais. Contudo, de acordo com o autor, é completamente errôneo pensar que o concreto pré-moldado não possui flexibilidade arquitetônica. Mesmo layouts irregulares de pavimentos podem vir a ser apropriados para a pré-fabricação em várias ocasiões, se não totalmente, ao menos parcialmente.

A crescente industrialização do setor da construção civil é reflexo do progressivo investimento na qualificação dos processos construtivos e na mão-de-obra. O resultado é um produto de melhor qualidade, produzido em escala racionalizada e em ambientes controlados, atendendo as exigências do mercado, tendo acabamento entre peças melhorados, encaixes mais desenvolvidos e com estética aperfeiçoada. (MELO, 2004).

Comparado aos métodos de construção tradicionais, os sistemas pré-fabricados, como método construtivo, e o concreto armado como material apresentam muitas vantagens, tais como produtos feitos em fábricas, com processos de produção mais eficiente e racionais, mão-de-obra especializada e controle de qualidade; uso otimizado de materiais, com uso de equipamentos modernos com menor margem para desperdícios; menor tempo de construção, menos da metade do tempo necessário para a construção convencional moldada no local; oportunidade para boa arquitetura, eficiência estrutural, flexibilidade no uso, adaptabilidade, e construções menos agressivas ao meio ambiente (VAN ACKER, 2002).

2.1.2. Histórico Das Estruturas Pré-Fabricadas

Segundo Serra, Ferreira e Pigozzo (2005), a história da indústria da construção civil se deu em diversas fases, cada uma sendo caracterizada por sua própria metodologia, arquitetura e tecnologia. Hoje em dia, é notável uma organização dessa indústria em subsetores, e o sistema dos pré-fabricados de concreto surge como destaque por seu moderno sistema construtivo e processos industriais.

Vasconcelos (2002) diz que não consegue se afirmar com precisão quando começou a utilização da pré-moldagem de elementos estruturais. Segundo o autor, o nascimento desses elementos surgiu juntamente com o início do uso do concreto armado, porém em locais fora de sua destinação final. Sendo assim é possível se dizer que a pré-moldagem se iniciou com a invenção do concreto armado. A terminologia “pré-fabricado” no campo da construção civil tem o significado de: “fabricação de certo elemento antes de seu posicionamento final na obra” (REVEL, JACOBSON e NAVACERRADA, 1973).

Após a Segunda Guerra Mundial, grandes países europeus encontravam-se em ruínas. Com fábricas e habitações destruídas, a necessidade de reconstrução pós-guerra fez com que os europeus recorressem a novas metodologias e técnicas de construção que utilizassem métodos mais econômicos e racionais de recursos. Impulsionado por essa necessidade, a pré-fabricação se tornou uma realidade naquela época (SOARES, 1998).

2.1.3. Processo Construtivo

Cada material ou sistema construtivo tem suas próprias características, que influenciam a tipologia, o comprimento do vão, a altura da edificação, os sistemas de contraventamento, etc. Isso também ocorre no caso dos sistemas construtivos de concreto pré-fabricado em relação aos outros tipos estruturais. Para que todas as vantagens do concreto pré-moldado sejam potencializadas, a estrutura deve ser concebida de acordo com uma filosofia de projeto, que são grandes vãos livres, conceitos apropriados de estabilidade e detalhes simples. Os projetistas devem considerar as possibilidades, restrições, vantagens e desvantagens desde antes do início do projeto (VAN ACKER, 2002).

As peças produzidas nas indústrias de pré-fabricados podem ser pilares, vigas, muros, paredes, terças de cobertura, lajes e elementos para fundações. Com a finalidade de conseguir uma produção acelerada e eficiente, é preciso aprofundar-se em estudos sobre materiais cujo uso traga benefícios, tanto qualitativos quanto econômicos. (TUTIKIAN, 2015)

No Brasil, os sistemas de pré-fabricados conquistaram seu espaço, consolidando-se como uma opção viável para sistemas de fundação, pilares, vigas, lajes, coberturas e fechamentos laterais, pois atendem de modo satisfatório e eficiente, as exigências econômicas, de prazo e qualidade técnica para edificações de grande porte destinada à várias funções, como o caso dos edifícios industriais (SOARES, 1998).

Os processos de fabricação, execução e controle de qualidade desses elementos são regidos por algumas normas vigentes. A principal delas é a NBR 9062:2017 intitulada “Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado” (ABNT, 2017). Essa trás normativas sobre as especificações técnicas, produção, manuseio, transporte, armazenamento, acabamento para finalização e entrega da obra.

Na norma, o pré-moldado pode ser definido como um elemento moldado previamente fora do local da sua destinação final, em instalações temporárias, como canteiro de obras. Já os pré-fabricados são entendidos como peças também moldadas fora de sua disposição final, porém fabricados em indústrias em instalações permanentes e destinadas ao fim de produção desses elementos. Os processos de

fabricação, montagem e controle de qualidade de elementos pré-moldados e pré-fabricados são norteados por algumas outras normas vigentes, como a NBR 14931 - Execução de estruturas de concreto – Procedimento (ABNT, 2004) e a NBR 12655 - Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento (ABNT, 2006).

2.2. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, na NBR 10004 de 2014, define resíduos sólidos ou semissólidos, resultantes de atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e de varrição. Também se inclui o lodo que provem de sistemas de tratamento de água (ABNT, 2004).

No ano de 1981, foi criada a primeira lei em que haviam diretrizes a respeito de resíduos sólidos e meio ambiente. A Lei federal nº. 6.938 estabeleceu a Política Nacional do Meio Ambiente, e a criação do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), com o objetivo de estabelecer critérios, padrões e normas a atividades causadoras de impactos ambientais. (BRASIL, 1981)

A resolução nº. 307, posteriormente alterada em 2015, pela resolução nº. 384/04 do CONAMA estabeleceu e determinou a execução de um plano integrado de gerenciamento de RCC, cabendo aos municípios buscar soluções para o gerenciamento dos pequenos volumes de resíduos, bem como o disciplinamento da ação dos agentes envolvidos com grandes volumes (CONAMA, 2002).

Ainda segundo a mesma resolução, os resíduos de construção civil, são classificados em quatro classes (Quadro 1):

Quadro 1 - Classificação dos RCC segundo a resolução 307/2002 – CONAMA

Tipo de RCC	Definição	Exemplos
Classe A	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados	De construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem II) De construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, revestimentos), argamassa e concreto III) De processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas de concreto (blocos, tubos, meios-fios, etc.) produzidos em canteiro de obras
Classe B	São os resíduos recicláveis para outras destinações	Plásticos, papel e papelão, metais, vidros, madeiras, gessos e outros;
Classe C	São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação	Isopor, e materiais que ainda não foram desenvolvidas tecnologias para a reciclagem.
Classe D	São os resíduos perigosos oriundos do processo de construção	Resíduos de amianto, tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros

Fonte: Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002 - CONAMA (2002)

Essa resolução adota a definição de resíduo de construção civil (RCC) como todo material provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil. Também é definido como resíduo os resultantes da preparação e escavação de terrenos. São exemplos desses materiais os tijolos, blocos cerâmicos, concretos em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassas, gessos, telhas, pavimentos asfálticos, vidros, plásticos, tubulações, fiações elétricas, entre outros. São popularmente chamados de entulho de obra, caliça ou metralha (CONAMA, 2002).

Outra definição importante do CONAMA (2002) interessante a este trabalho é a definição de agregado reciclado. A resolução define agregado reciclado como material granular, proveniente do beneficiamento de resíduos de construção, que apresentam características técnicas para aplicação em obras de edificação, infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia.

2.2.1. Geração de RCC

Em cada etapa de uma obra na construção civil, acontecem perdas e desperdícios de materiais, gerando RCC tanto em equívocos em sua etapa de concepção, quanto na execução. Na fase de concepção acontecem diferenças entre as quantidades previstas em projeto e as que realmente seriam utilizadas em obra.

Para Lima e Lima (2012) mais de 50 % dos RCC gerados em obras de grandes proporções provém de desperdício de materiais nos canteiros, materiais que, em quase sua totalidade, poderiam ser reaproveitados ou reciclados. Os autores ainda comentam que a reciclagem do resíduo de construção civil pode ter uma importância fundamental, tanto ambiental quanto financeiramente, pois os referidos resíduos retornariam às obras em substituição à novas matérias primas que seriam provenientes do meio ambiente.

Segundo o Sindicato da Indústria da Construção Civil de Minas Gerais (SINDUSCON), são inúmeros os fatores que podem ser levados em conta para a geração de RCC em obras. Desde tecnologias utilizadas em obra, qualidade dos produtos, treinamento de pessoal, até costumes regionais, que podem ser fatores que influenciam na geração de resíduos de construção civil (SINDUSCON-MG, 2018).

A redução de perdas e desperdícios passou a ser importante fator de sobrevivência das grandes empresas e construtoras e para adequação ao mercado, porém a necessidade de minimizar a geração de RCC, não resulta apenas da questão econômica, e sim se trata de uma questão fundamentalmente de uma importante ação para a preservação ambiental (LIMA e LIMA, 2012). Com isso, ocorre o surgimento do termo Construção Sustentável no mercado, com o objetivo de reduzir a exploração de recursos naturais e minimizar os efeitos da poluição no meio ambiente (CAMENAR e SCHEID, 2016).

Baseado na necessidade de se produzir uma quantidade significativa de matéria prima utilizando a menor quantidade de recursos naturais, ocorre o desenvolvimento de destes tipos de construção, e conseqüentemente, gerando uma menor degradação ambiental (BRASILEIRO e MATOS, 2015)

Autores categorizam o desperdício e geração de RCC de duas maneiras, aqueles que saem da obra em forma de entulho, e os desperdícios que acabam incorporados à obra, como exageros na espessura de emboço, por exemplo. A Tabela 1 apresenta taxas de desperdício desses materiais, diferenciado em máximo e

mínimo, com diferenças consideráveis, devido as diferentes variações de metodologias de projeto, execução e controle de qualidade de cada uma das obras (LIMA e LIMA, 2012).

Tabela 1 – Taxa de desperdício materiais

MATERIAIS	TAXA DE DESPERDÍCIO (%)		
	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO
Concreto usinado	9	2	23
Aço	11	4	16
Blocos e tijolos	13	3	48
Placas cerâmicas	14	2	50
Revestimento têxtil	14	14	14
Eletrodutos	15	13	18
Tubos para sistemas prediais	15	8	56
Tintas	17	8	24
Condutores	27	14	35
Gesso	30	14	120

Fontes: Adaptado de LIMA e LIMA (2012)

Segundo Ribeiro (2004), o mau gerenciamento de resíduos sólidos da construção civil causa severos problemas à gestão ambiental urbana, como o esgotamento antecipado de locais destinados ao despejo de resíduos sólidos urbanos, obstrução ou entupimento de elementos de drenagem, assoreamento de rios e córregos, degradação de mananciais, entulho nas vias públicas, proliferação de pragas urbanas, que podem ser nocivos à saúde humana, gerando prejuízos aos cofres públicos.

Estimativas recentes indicam que mais de dez bilhões de toneladas de resíduos de construção civil são geradas por ano em todo o mundo, causando uma série de impactos ambientais, como o consumo excessivo de matéria prima e energia, além de elevadas emissões de gases que contribuem para o efeito estufa (WANG et al., 2019).

Para Aragão (2013), a geração desenfreada de resíduos na grande maioria das cidades é preocupante para atual e futuras gerações, pois a poluição ambiental, propagação de vetores de doenças e destruição de habitat de animais silvestres podem ser relacionados com a destinação incorreta desses resíduos.

Para Oliveira et. al. (2011), durante as obras, são nas fases de concretagem, alvenaria, reboco e revestimento, que a cultura construtiva brasileira apresenta maiores perdas, e por consequência, uma geração de resíduos mais elevada. No

Brasil, estima-se que a geração destes resíduos seja de cem milhões de toneladas por ano. Além disso, é observado a prática do descarte dos resíduos em locais públicos, encostas e cursos d'água, mesmo havendo legislação proibindo o depósito irregular desses materiais vigente desde 2004 (NUNES et al., 2020).

Esses resíduos de construção e demolição apresentam composição extremamente heterogênea, pois está relacionado com o tipo de construção civil, conforme evidencia a Tabela 2.

Tabela 2 – Composição de resíduo de construção e demolição

Categoria de resíduo	% mínima	% máxima
Concreto e alvenaria	40	84
Concreto	12	40
Alvenaria	8	54
Asfalto	4	26
Compostos minerais	2	9
Madeira	2	4
Metais	0,2	4
Plásticos	0,1	2
Materiais diversos	2	36

Fonte: Adaptado de Gálvez-Martos e Istrate (2020)

2.3. . RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Pesquisadores e indústrias têm unido forças na tentativa de diminuir os impactos ambientais negativos relacionados ao RCC. Alguns países com alto percentual de reciclagem de resíduos em geral, como Holanda, Dinamarca e Alemanha, possuem políticas ambientais que recompensam às iniciativas que reaproveitam e reciclam esses materiais (LOTURCO, 2004).

Contudo, a utilização de agregados reciclados ainda é considerada um tabu no que diz respeito à qualidade técnica dos serviços. Isso evidencia a falta de mobilidade da indústria da construção civil no que se refere às pesquisas e aceitação de novas técnicas, que a primeira vista não traz grandes vantagens financeiras, deixando de lado o ponto de vista ambiental e sustentável (LIMA e LIMA, 2012).

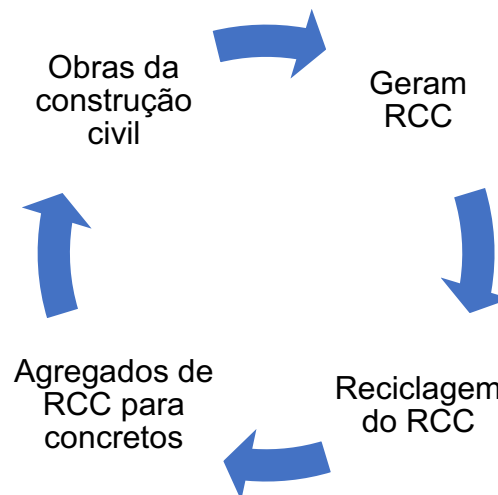
Lima e Lima (2012) ainda cita que apesar dos primeiros registros de reciclagem de RCC no Brasil datarem de 1997, os trabalhos nesse sentido no setor

ainda estão nos estágios iniciais, o que demonstra que a questão ambiental, por si só, não é motivadora para a inclusão dessas práticas no cotidiano do canteiro de obras.

Segundo Bazuco (1999), os agregados reciclados podem apresentar impurezas em sua composição, que podem comprometer o desempenho do material se não foram devidamente identificadas, quantificadas e, se possível eliminadas. Entre os principais componentes dos resíduos de concreto e materiais cerâmicos, também podem ser encontrados madeira, metais, borracha, vidro, papel/papelão, materiais têxteis e sintéticos, solo e tintas (HENDRIKS, 1996).

Na produção de novos concretos com agregados reciclados, há a utilização de vários resíduos de demolição e construção, e entre eles o que se destaca são os resíduos de concreto, por parecer ter as melhores propriedades entre eles (BAZUCO, 1999). McLaughlin (1993) destaca que entre todos os tipos de resíduos de construção e demolição, somente o concreto britado pode ser reutilizado como agregado de concreto (MCLAUGHLIN, 1993). Na figura 1, pode-se observar o que seria o ciclo ideal da reciclagem dos RCC, desde sua geração nas obras, até a reciclagem e reutilização em novas obras.

Figura 1 - Ciclo ideal da geração e reciclagem de RCC



Fonte: Adaptado de Figueiredo *et al.* (2007)

Apesar disso, agregados de alvenaria vêm sendo utilizados com a finalidade de produção de concreto, contudo conforme observado por Hansen (1992), algumas de suas propriedades são significativamente menores comparadas as dos agregados reciclados de concreto. Quando utilizado o agregado reciclado de alvenaria, foram

notadas consideráveis reduções de resistência e problemas relacionados à absorção de água, quando comparados ao agregado reciclado de concreto.

Bazuco (1999) afirma que uma das grandes dificuldades encontradas para a produção de agregados de concreto é a seleção e caracterização das propriedades desses materiais, pois geralmente o concreto demolido pode conter impurezas advindas do solo ou outros resíduos de materiais de construção.

Além disso, a qualidade do agregado reciclado depende dos métodos e processo de reciclagem adotado. Suas propriedades dependem principalmente da proporção água cimento (a/c) utilizada no concreto original da construção. Os agregados reciclados oriundos de construções e demolições geralmente em argamassa agregada grossa ou grãos de agregados naturais com argamassa aderida. (HANSEN, 1993).

Em pesquisa, Lintz et al. (2012), por meio de testes de resistência a compressão, apontaram que em amostras cilíndricas, é possível a substituição de agregados convencionais por agregados de RCC na fabricação de concreto. É importante ressaltar que a absorção de água nos blocos de concreto aumentou conforme o percentual de agregado reciclado no traço, porém os valores resultantes atenderam os limites estabelecidos no padrão brasileiro. Com isso os autores garantiram que os resultados dos testes comprovaram a viabilidade do uso do material na indústria de construção de alvenaria.

Vieira, Molin e Lima (2004) citam que a utilização de agregado reciclado no concreto, em proporções e dosagens convenientes, não afeta a resistência a compressão, tão pouco a durabilidade do concreto se tratando de corrosão nas armaduras. Porém, os autores afirmam que é imprescindível a importância do tratamento adequado desses resíduos, desde o beneficiamento, caracterização e utilização desses agregados no concreto, afim de se conhecer as propriedades do material e ter menor limitação de utilização destes.

Islam et al. (2019) citam que a reciclagem de RCC é uma atividade empreendedora e uma boa oportunidade de extrair benefícios tanto econômicos quanto ambientais desses materiais destinados ao descarte, auxiliando ainda na redução das emissões de CO_2 , e no uso de energia e recursos naturais. A pesquisa ainda cita que os valores econômicos da reutilização de resíduos de concreto podem girar em torno de 45 milhões de dólares ao ano em relação aos demais materiais utilizados.

2.3.1. Agregados Reciclados

A necessidade da gestão e do correto manejo dos RCC, de forma a destinar resíduos gerados na indústria da construção foi estabelecida, como já mencionado anteriormente, pelo CONAMA, em 2002.

Os agregados reciclados coletados devem atender os requisitos especificados pela NBR 15116: 2004 “Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos”. Essa norma trata especificamente da utilização dos agregados reciclados em como leitos e camadas e projetos de pavimentações, e em preparos de concreto para utilização não estrutural. A utilização no preparo de concretos com função estrutural depende ainda de estudos que viabilizem essa tecnologia, e que serão tratados em normalização específica. (ABNT, 2004)

Como já informa o título da norma, o agregado reciclado para concreto estrutural ainda não possui normatização nacional. Esse fato corrobora com necessidade da ampliação de trabalhos no assunto, e como suas propriedades podem influenciar nas resistências dos concretos. (PADERES; SATLER, 2017)

Os RCC são formados por uma variedade de matérias, uma vez que são gerados em diferentes momentos de um processo construtivo, o que dificulta o total aproveitamento destes como agregado durante a mesma obra em que foi gerado. Para evitar contaminações, o RCC gerado deve ser destinado para coleta e separado adequadamente (WERLE, 2010).

Tem-se que os agregados reciclados, são genericamente compostos por grãos britados de concretos, argamassas, cerâmicas e outros materiais em menores proporções, como madeira e aço. As características dos agregados de modo individual são relevantes a serem estudadas, pois os agregados são os materiais que ocupam $\frac{3}{4}$ do volume do concreto, e interferem na resistência mecânica do concreto (ÂNGULO; FIGUEIREDO, 2011).

Pela resolução do Conama, visto no Quadro 1, e reforçada pela NBR 15116 (2004), os agregados reciclados são produzidos a partir de resíduos que se enquadram na classe A da resolução. Os agregados reciclados de concreto (ARCO) e os agregados de resíduos mistos (ARM) são os agregados que se enquadram na determinação da norma.

Figura 2 - Agregado de Resíduos de Concreto (ARCO)



Fonte: O autor (2021)

Figura 3 - Agregado Reciclado Misto (ARM)



Fonte: O autor (2021)

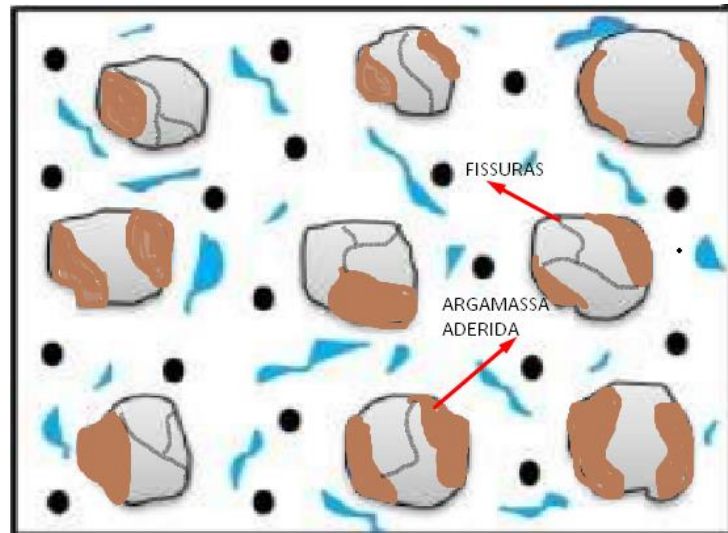
Ambos os agregados reciclados mostrados nas figuras 2 e 3, são obtidos do beneficiamento de resíduos pertencentes à classe A desta norma, compostos, na sua fração graúda, de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas. (ABNT, 2004)

O agregado reciclado carece de mais atenção com relação ao desempenho do seu concreto em relação aos agregados convencionais. O tipo de obtenção desses agregados influencia diretamente nas propriedades dos agregados, visto que esses podem partir de diferentes tipos de construção e estruturas (HANSEN, 1993).

Esses agregados provenientes de RCC possuem a chamada zona de transição interfacial, apresentada na figura 4, devida a presença de argamassa ou pasta de

cimento aderida ao seu redor. Por conta da presença de poros na argamassa aderente, rachaduras ou fissuras contínuas são desenvolvidas no interior do agregado reciclado, em consequência do processo de compressão em que ele pode ser submetido em uma estrutura (POON, 2004).

Figura 4 - Zonas de transição interfacial dos agregados reciclados



Fonte: Adaptado de Behara (2014)

Os agregados reciclados possuem propriedades mecânicas consideradas inferiores aos agregados convencionais, como baixa resistência a compressão, impacto e à abrasão. Esses fatores, em conjunto com fatores como as zonas de transição interfacial, acabam por dificultar o grande uso de agregados reciclados. (BEHERA, 2014)

No que se diz respeito a aplicabilidade desses materiais, como já citado anteriormente, atualmente eles só podem ser utilizados em concretos sem fins estruturais. A NBR 15116 (2004) sugere sua aplicação em obras de pavimentação e em peças de concreto não estruturais como meios-fios, sarjetas e canaletas para drenagem urbana, possam ser produzidos com concretos de classe C20, o que abriria a possibilidade de utilização de agregados reciclados na composição destes concretos desde que observados alguns requisitos gerias para destinação a pavimentação e concretos sem função estrutural

Tabela 3 - Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural – NBR 15116 (2004)

Propriedades	Agregado reciclado de Classe A				Normas de ensaios	
	ARCO		ARM		Agreg. Graúdo	Agreg. Miúdo
	Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo		
Teor de fragmentos à base de cimento e rochas (%)	≥90	-	< 90	-	Anexo A	-
Absorção de água (%)	≤ 7	≤ 12	≤ 12	≤ 17	ABNT NBR NM 53	ABNT NBR NM 30
Contaminantes - teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Cloretos		1		ABNT NBR 9917	
	Sulfatos		1		ABNT NBR 9918	
	Materiais não minerai*s		2		Anexo A	Anexo B
	Torrões de argila		2		ABNT NBR 7218	
Teor total máxima de contaminantes		3			-	
Teor de material passante na malha 75 µm (%)	≤ 10	≤ 15	≤ 10	≤ 20	ABNT NBR NM 46	

* Para efeitos desta norma, são exemplos de materiais não mineiras são madeiras, plásticos, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos

Fonte: Adaptado de ABNT (2004)

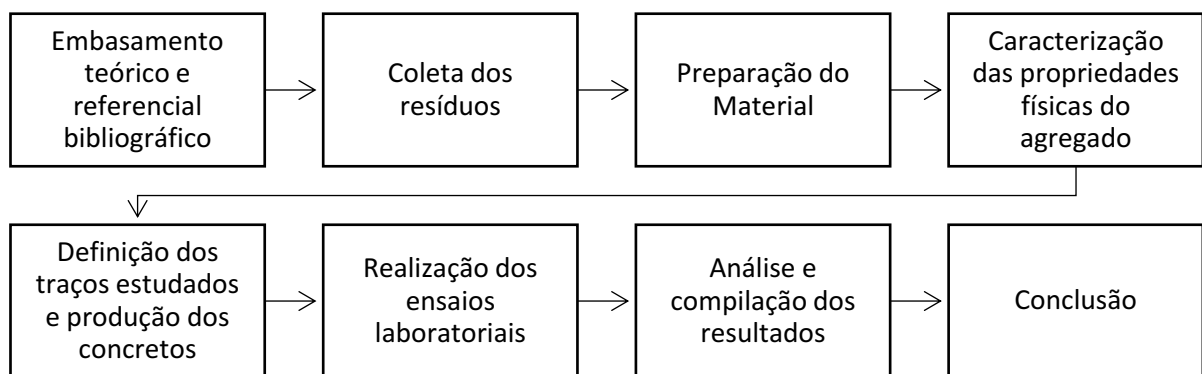
A NBR 8953 (1992) cita que obras de concreto não estruturais podem ser enchimento de contrapisos, lastros de concreto, calçadas, e fabricação de artefatos como blocos de vedação e placas de muros, estas podendo ser utilizadas com resistências a compressão entre 10 e 15 MPa, abrindo espaço para a utilização de agregados reciclados na produção destas obras.

3. METODOLOGIA

3.1. DELINEAMENTO DA PESQUISA

A Figura 5 apresenta um fluxograma delineando as atividades a serem desenvolvidas por essa pesquisa:

Figura 5 – Delineamento da pesquisa



Fonte: O autor (2020)

3.2. ORIGEM DOS MATERIAIS DE ESTUDO

A empresa, localizada na cidade de Irati, no estado do Paraná, está no ramo de pré-fabricados há muitos anos e produz lajes, pilares e vigas em concreto armado e protendido, estruturas pré-fabricadas de até seis pavimentos, com lajes com até 12 metros de vão livre.

O concreto produzido pela empresa é de característica auto adensada, muito comum em fábricas deste ramo. O traço é definido e dosado de modo automatizado, os agregados miúdos (areia comum e pó de pedra), e os agregados graúdos (brita 1 e brita 2) são despejados na esteira rolante (figura 6), e dentro da betoneira industrial (figura 7), é misturado com água, cimento e os aditivos, para auto adensamento, para acelerar a cura do concreto e para deixar as peças com aspecto mais esbranquiçado, a fim de melhorar a estética das estruturas pré-fabricadas.

Figura 6 - Produção do concreto da empresa



Fonte: Autor (2020)

Figura 7 - Mistura do concreto na concreteira industrial



Fonte: Autor (2020)

A maioria dos resíduos de concreto pela empresa são gerados em uma fábrica secundária próxima à fábrica principal, onde ocorre a produção de apenas lajes, e por utilizar grandes quantidades de concreto em sua produção, excessos acabam por cair

fora das formas. Estes excessos são retirados após a secagem das lajes para a limpeza das formas e depositados num espaço ao lado aonde ficariam as lajes prontas, como mostra a figura 8.

Figura 8 – Depósito dos resíduos da fábrica de lajes pré-fabricadas



Fonte: O autor (2020)

3.3. COLETA E BRITAGEM DOS RESÍDUOS

A coleta do material foi realizada no depósito da fábrica de lajes da empresa na cidade de Irati, e ocorreu a separação visual por tamanho, uma tentativa de se recolher os resíduos com tamanho e peso semelhantes, como apresenta a figura 9. Foram coletados cerca de 250 kg de amostra do resíduo, para realizar todos os ensaios laboratoriais para caracterização do material.

Figura 9 – Material em sua forma bruta



Fonte: Autor 2021

Como observado na figura 9, o material era de granulometria variada e com alta resistência. A utilização de um britador de grande porte, para diminuição da sua granulometria, não se mostrou viável, pois o material com os tamanhos selecionados para o estudo, passariam direto pelas garras do britador. O equipamento do ensaio de abrasão Los Angeles, disponibilizado pelo laboratório da UTFPR, também foi utilizado na tentativa de obter a granulometria desejada, porém o material era desgastado ao invés de britado devido a sua grande dureza, como apresenta a figura 10.

Figura 10 - Material desgastado na tentativa de britagem



Fonte: Autor 2021

A solução encontrada para a britagem do material foi a utilização de um rolo compactador, como mostra a figura 11. O ponto positivo desta solução é que a britagem do material se dá em poucas passadas da máquina sobre as amostras, porém, a desvantagem é a não-homogeneidade da granulometria e a contaminação dos agregados com as impurezas do chão do local aonde o equipamento passou.

Figura 11 – Rolo compactador utilizado para britagem do material



Fonte: Autor 2021

Com a utilização do rolo compactador sobre as amostras, e do agitador mecânico de peneiras, foram obtidas cerca de 100 kg de material com granulometria equivalente à Brita 1, como mostra a figura 12, e conforme a ABNT NBR 7225:1993, observável na Tabela 4, para utilização nesse estudo.

Tabela 4 - Classificação de acordo com as dimensões nominais

Brita Número	Abertura de peneiras de malhas quadradas (mm)	
	Mínima	Máxima
1	4,8	12,5
2	12,5	25
3	25	50
4	50	76
5	76	100

Fonte: Adaptado de ABNT (1993)

Figura 12 – Material depois de britado e peneirado



Fonte: Autor 2021

3.4. ENSAIOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO

Além de saber a composição granulométrica do agregado, é preciso saber as suas propriedades físicas, e para isso, ensaios laboratoriais foram realizados. Entre esses ensaios estão:

- Ensaio da determinação da composição granulométrica dos agregados, regido pela norma NBR NM 248 (ABNT, 2003);
- Ensaio da determinação da massa específica e massa específica aparente, regido pela norma NBR NM 52 (ABNT, 2009);
- Ensaio de determinação da massa unitária e coeficiente de vazios dos agregados regidos pela norma NBR NM 16972 (ABNT, 2021);
- Ensaio da determinação do inchamento de agregado miúdo, regido pela norma NBR 6467 (ABNT, 2009).

3.4.1 Ensaio da Determinação da Composição Granulométrica dos Agregados

Para caracterizar os agregados, reciclado e natural, graúdos e miúdo, foi utilizado a norma NBR NM 248 que rege este ensaio (ABNT, 2003). E os aparelhos utilizados nele são uma balança, uma estufa, as bandejas; escova ou pincel de cerdas

macias e o aparelho principal do ensaio: as peneiras devem ser das séries normal e intermediária (Tabela 4), com tampa de fundo, que atendam às exigências das normas NBR NM ISO 3310-1 ou 2 (ABNT, 2010a; ABNT, 2010b).

O ensaio começa com a secagem das amostras de ensaio na estufa, e após isso, deixar que se resfrie a temperatura ambiente, e determinar suas massas. A seguir encaixam-se as peneiras de modo a formar um único conjunto, com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo, por último prover um fundo de peneiras adequado para o conjunto. Depois, promover a agitação mecânica do conjunto, por um tempo razoável. Após a agitação, deve-se destacar e agitar manualmente cada uma das peneiras de cima para baixo, até que a massa de material passante pela peneira seja inferior a 1 % do material retido. A seguir, retirar o material retido na peneira para uma bandeja identificada, e escovar a tela em ambos os lados da peneira, em que o material removido do lado interno é considerado como retido, e o da parte inferior como passante. Proceder com o mesmo procedimento até a última peneira. A tabela 5 apresenta a série de peneiras utilizadas nesse ensaio.

Tabela 5 – Série de peneiras

Série normal	Série intermediária
75 mm	--
--	63 mm
--	50 mm
37,5 mm	--
--	31,5 mm
--	25 mm
19 mm	--
--	6,3 mm
4,75 mm	--
2,36 mm	--
1,18 mm	--
600 µm	--
300 µm	--
150 µm	--

Fonte: NBR NM 248 – ABNT (2009)

A figura 13 apresenta as peneiras dispostas no agitador mecânico para o ensaio.

Figura 13 - Agitador mecânico com a série de peneiras utilizadas para granulometria

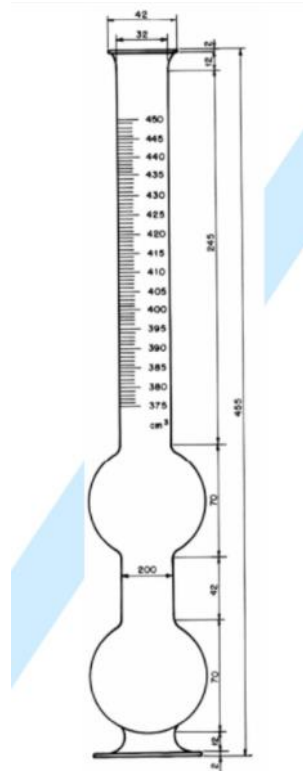


Fonte: Autor (2021)

3.4.2 Ensaio de determinação da massa específica e massa específica aparente dos agregados

A seguir, para a caracterização do agregado miúdo, utilizamos a norma NBR NM 52, que é a norma vigente para o ensaio de determinação da massa específica e massa específica aparente (ABNT, 2009). A aparelhagem utilizada para este ensaio se dá por uma balança, um frasco aferido de $500 \pm 5 \text{ cm}^3$ de capacidade (figura 14); uma haste de compactação metálica, uma estufa capaz de manter a temperatura no intervalo de $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.; uma bandeja metálica para secar a amostra; uma espátula de aço; um circulador de ar regulável e um dessecador.

Figura 14 - Frasco de Chapman



Fonte: NBR 9776 (1987)

As fórmulas utilizadas para as determinações das massas específicas neste ensaio são as seguintes:

$$d_1 = \frac{m}{(V - V_a)} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

d_1 é a massa específica aparente do agregado, em gramas por centímetros cúbicos;

m é a massa da amostra seca em estufa, em gramas;

V é o volume do frasco, em centímetros cúbicos;

V_a é o volume de água adicionado ao frasco, em centímetros cúbicos;

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

m1 é a massa do conjunto frasco + agregado, em gramas;

m2 é a massa total do conjunto frasco + agregado + água, em gramas

Va é o volume de água adicionado ao frasco, em centímetros cúbicos;

ρ_a é a massa específica da água, em gramas por centímetros cúbicos.

$$d_2 = \frac{m_s}{(V - V_a)} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

d2 é a massa específica do agregado saturado superfície seca, em gramas por centímetros cúbicos;

m_s é a massa da amostra na condição saturada de superfície seca, em gramas;

V é o volume do frasco, em centímetros cúbicos;

Va é o volume de água adicionado ao frasco, em centímetros cúbicos;

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

d3 é massa específica do agregado, em gramas por centímetros cúbicos;

m é a massa da amostra seca em estufa, em gramas;

V é o volume do frasco, em centímetros cúbicos;

Va é o volume de água adicionado ao frasco, em centímetros cúbicos;

m_s é a massa da amostra na condição saturada de superfície seca, em gramas;

ρ_a é a massa específica da água, em gramas por centímetros cúbicos

3.4.3 Determinação Da Massa Específica E Massa Específica Aparente E Absorção De Água Dos Agregados Graúdos

Esse ensaio é regido peça NBR NM 53 de 2002 e para sua realização requer uma balança com resolução de 1g, um cesto de arame para que a amostra fique submersa em água, um recipiente de tamanho adequado para submergir a amostra em água, e peneiras para o ensaio.

O procedimento do ensaio se dá por pesar uma certa quantidade de material e submergir o agregado em água por um período de 24 horas, após o período, secar o material com um tecido absorvente até que ele tenha uma aparência exterior seca, e em seguida pesar novamente a amostra.

Em seguida, colocar o material no cesto de arame e submergi-lo em um recipiente com água, e realizar a pesagem do material submerso com auxílio da balança hidrostática. Por último, deixar o material secando em estufa por mais 24 horas e realizar a pesagem do material seco.

Para calcular a massa específica do agregado seco, deve se utilizar a fórmula:

$$d = \frac{m}{(ms - ma)} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

d é a massa específica do agregado seco, em gramas por centímetros cúbicos;

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

ms é a massa ao ar da amostra na condição saturada de superfície seca, em gramas;

ma é a massa em água da amostra, em gramas;

Para calcular a massa específica do agregado na condição saturado de superfície seca, deve se utilizar a fórmula:

$$ds = \frac{ms}{(ms - ma)} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

ds é a massa específica do agregado na condição saturado de superfície seca, em gramas por centímetros cúbicos;

ms é a massa ao ar da amostra na condição saturada de superfície seca, em gramas;

ma é a massa em água da amostra, em gramas;

Para calcular a massa específica aparente do agregado, deve se utilizar a fórmula:

$$da = \frac{m}{(m - ma)} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

da é a massa específica aparente do agregado, em gramas por centímetros cúbicos;

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

ma é a massa em água da amostra, em gramas;

Para calcular a absorção de água agregado, deve se utilizar a fórmula:

$$A = \frac{m_s - m}{m} * 100 \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

A é a absorção de água, em porcentagem;

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

ms é a massa ao ar da amostra na condição de superfície seca, em gramas.

3.4.4 Massa Unitária Dos Agregados

Outra propriedade dos agregados que se deve determinar é a massa unitária. Ela é regida pela NBR NM 45 de 2006, tem três métodos de ensaio, (A, B e C) e serve tanto para agregados graúdos e miúdos. O método adotado nesse ensaio foi o método C e seu procedimento é simples, e precisa apenas de uma balança, um recipiente, as amostras e água.

Primeiramente deve-se encher um recipiente de agregado, de forma desordenada sem compactação, e realizar a pesagem do mesmo. Após isso, deve-se retirar o agregado do recipiente e preenche-lo com água, e realizar a pesagem do recipiente com água, afim de determinar seu volume. Utilizando a massa específica da água como dado conhecido de 998,54 kg/m³, podemos calcular a massa unitária dos agregados utilizando a seguinte fórmula.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

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

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

m_r é a massa do recipiente vazio, em quilogramas;
 V é o volume do recipiente, em metros cúbicos;

Como o recipiente pode ser tarado na balança antes das pesagens, pode-se substituir a variável m_r por zero. Pode-se encontrar o volume do recipiente pela equação 10

$$d_1 = \frac{m}{(V - V_a)} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

d_1 é a massa específica da água, em gramas por centímetros cúbicos;
 m é a massa de água no recipiente, em gramas;
 V é o volume do recipiente, em centímetros cúbicos;

3.4.5 Ensaio de Inchamento do Agregado Miúdo

A norma NBR 6467 estabelece o método para determinação do inchamento de agregados miúdos para concreto (ABNT, 2009). A norma define inchamento de agregado miúdo como um fenômeno relativo à variação do volume aparente provocado pela absorção de água livre pelos grãos do agregado, que acaba alterando sua massa unitária. A aparelhagem necessária para a realização dos ensaios estabelecidos são um encerado de lona, balança com resolução 0,01 g; um recipiente metálico; uma pá ou concha e uma estufa capaz de manter a temperatura num intervalo de 105 ± 5 °C.

Inicialmente, deve-se secar a amostra de agregado durante 24 horas, em uma estufa mantida a aproximadamente 105 °C. Em seguida pesa-se o material e coloca-se a amostra seca sobre o encerado de lona ou dentro do misturador mecânico para homogeneizar e determinar a massa unitária do agregado seco. Adiciona-se água em quantidades sucessivas, de modo a obter variados teores de umidade. O quadro 2 apresenta os teores de umidade utilizados durante esse ensaio.

Quadro 2 - Massas unitárias para curva do ensaio de inchamento

Ensaio	Teor de umidade
1º.	0,00%
2º.	0,50%
3º.	1,00%
4º.	2,00%
5º.	3,00%
6º.	4,00%
7º.	5,00%
8º.	7,00%
9º.	9,00%
10º.	12,00%

Fonte: Autor (2021)

Para cada teor de umidade, deve-se calcular o coeficiente de inchamento, de acordo com a Equação 11:

$$\frac{V_h}{V_s} = \frac{\gamma_s}{\gamma_h} \times \left(\frac{100 + h}{100} \right) \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

V_h é o volume do agregado com um determinado teor de umidade (h), em centímetros cúbicos;

V_s é o volume do agregado seco em estufa, em centímetros cúbicos;

V_h/V_s é o coeficiente de inchamento do agregado;

γ_h é a massa unitária do agregado com um determinado teor de umidade (h), em gramas por centímetros cúbicos;

γ_s é a massa unitária do agregado seco em estufa, em gramas por centímetro cúbico

h é o teor de umidade aplicado.

3.5 MÉTODO ABCP PARA DOSAGEM DO CONCRETO

Com as características do agregado reciclado em mãos, iniciou-se o cálculo das dosagens a fim de encontrar o traço do concreto a ser produzido. Segundo a norma NBR 12655, o traço ou composição é definido como expressão das quantidades, em massa ou volume, dos vários componentes do concreto. O traço também pode ser expresso em quantidade de materiais por metro cúbico de concreto. O estudo dessa dosagem é o conjunto de procedimentos necessários à obtenção do

traço do concreto para atendimento dos requisitos especificados pelo projeto estrutural ou pelas condições da obra.

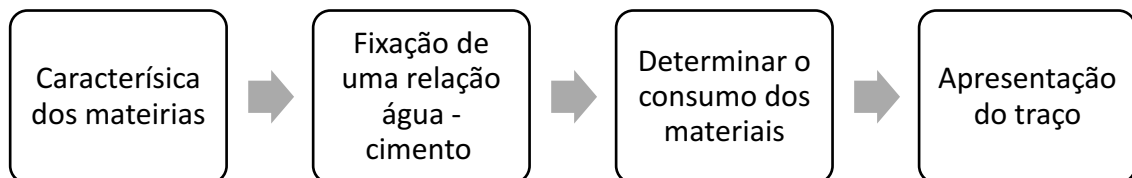
A composição de cada concreto de classe C15 ou superior deve ser definida, em dosagem racional ou experimental, com antecedência em relação ao início da concretagem da obra. O cálculo da dosagem do concreto deve ser feito cada vez que for prevista uma mudança de marca, tipo ou classe do cimento ou demais materiais.

O método de dosagem adotada para o trabalho foi o método da Associação Brasileira de Cimento Portland, o método ABCP. Esse método é uma adaptação do método da ACI (*American Concret Institute*) para os agregados brasileiros.

Segundo Ambrozewicz (2012), em seu livro *Materis de Construção*, o método pode ser utilizado para concretos de consistência plástica à fluída e fornece uma primeira aproximação da quantidade de materiais, devendo-se realizar uma mistura experimental.

A Figura 15 demonstra o processo de cálculo do método de dosagem ABCP.

Figura 15 – Método de dosagem ABCP



Fonte: Autor (2021) adaptado de Ambrozewicz (2012)

3.5.1 Característica dos Materiais

No primeiro passo, deve-se ter em mãos todas as características dos materiais. As características do cimento que devem ser levadas em consideração são:

- Tipo de cimento
- Massa específica
- Resistência pretendida do cimento aos 28 dias

No caso dos agregados, as características a serem notadas são:

- Análise granulométrica
- Módulo de finura do agregado miúdo
- Dimensão máxima dos agregados graúdos
- Massa específicas de todos os agregados
- Massa unitária compactada dos agregados.

E no caso do concreto, deve ser levado em consideração:

- A consistência desejada no estado fresco
- Condições de exposição
- Resistência de dosagem do concreto

O cálculo da resistência de dosagem deve atender as condições de variabilidade prevalentes durante a construção. Esta variabilidade é medida pelo desvio-padrão, sd , e é levado em conta no cálculo da resistência de dosagem segundo a Equação 12:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 sd \quad \text{Equação 12}$$

Onde

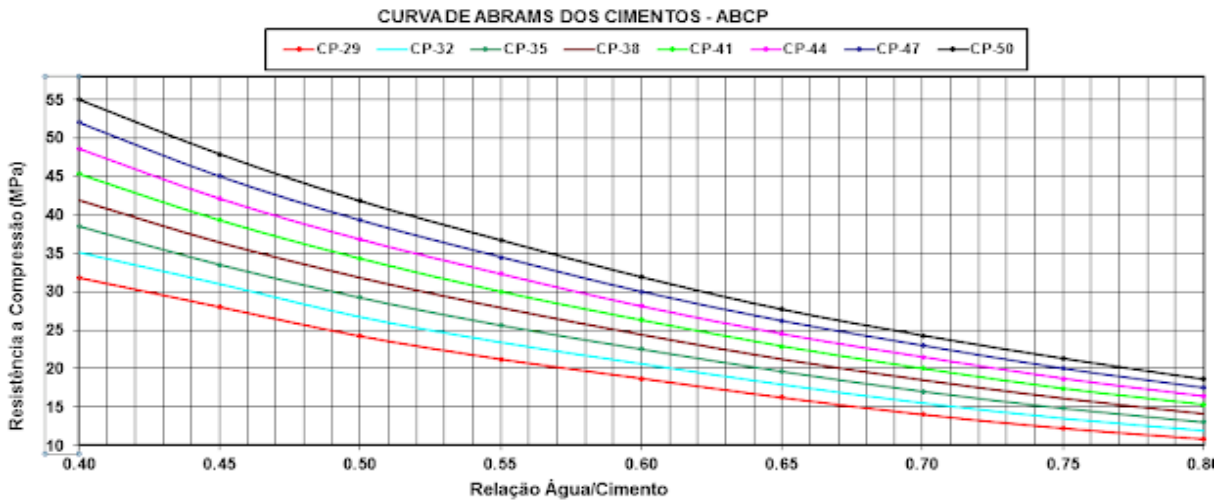
f_{cj} é a resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de j dias, em megapascais;

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão, em megapascais;
 sd é o desvio padrão da dosagem, em megapascais.

3.5.2 Fixação Da Relação Água – Cimento (A/C)

Os critérios da fixação a/c devem seguir os critérios de durabilidade da NBR 12655, e a resistência mecânica, em que a escolha do a/c é em função da curva de Abrams do cimento a ser utilizado, como mostra a figura 16.

Figura 16 – Curva de Abrams



Fonte: Clube do concreto (2021)

Para encontrar a relação água cimento utilizando da curva de Abrams, deve-se conhecer a classe do cimento e a resistência, f_c do concreto, utilizando a equação 12.

3.5.3 Determinação Aproximada Do Consumo De Água (C_a)

Para a determinação do consumo de água, pode-se utilizar a tabela do livro de Ambrozewicz (2012), em que se relaciona o diâmetro máximo do agregado graúdo, com a dimensão desejada do abatimento do concreto no ensaio de tronco de cone, ambas medidas em milímetros, como mostra a tabela 6, em litros por metro cúbico.

Tabela 6 - Consumo de água aproximado (l/m^3)

Abatimento (mm)	D máx do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220,0	195,0	190,0	185,0	180,0
60 a 80	225,0	200,0	195,0	190,0	185,0
80 a 100	230,0	205,0	200,0	195,0	190,0

Fonte: Ambrozewicz (2012)

3.5.4 Determinação Do Consumo De Cimento (C)

O consumo de cimento depende diretamente do consumo de água no concreto, logo podemos calcular o consumo de cimento pela equação 13, em kg/m³.

$$C = \frac{Ca}{a/c} \quad \text{Equação 13}$$

3.5.5. Determinação Do Consumo De Agregados.

Para a determinação do consumo de agregados graúdos, deve-se saber a dimensão máxima do agregado graúdo e o módulo de finura do agregado miúdo (areia). Utilizando a tabela fornecida no livro de Ambrozewicz (2012), relacionamos os parâmetros já citados para encontrar o consumo utilizando a tabela 7.

Tabela 7 - Determinação do consumo de agregado graúdo (CB)

MF	Dimensão Máxima (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
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: Ambrozewicz (2012)

Já para a determinação do consumo de agregados miúdos, deve-se saber o consumo de agregado graúdo, e os consumos anteriores, de água e cimento, utilizando a equação 14.

$$V_m = 1 - \left(\frac{Cc}{\gamma c} + \frac{Cb}{\gamma b} + \frac{Ca}{\gamma a} \right) \quad \text{Equação 14}$$

Em que:

V_m é o volume de agregado miúdo, em m^3

C_c é o consumo de cimento

C_b é o consumo de agregado graúdo

C_a é o consumo de água

γ_c é a massa específica do cimento

γ_b é a massa específica do agregado graúdo

γ_a é a massa específica da água.

E o consumo de agregado miúdo pode ser encontrado pela multiplicação do volume de agregado encontrado na equação 14, pela massa específica do agregado miúdo, como mostra a equação 15.

$$C_m = \gamma_m * V_m \quad \text{Equação 15}$$

3.5.6. Apresentação Do Traço Do Concreto

Para a apresentação do traço do concreto, deve-se dividir todos os consumos pelo consumo do cimento, ficando como mostra a equação 16

$$\frac{C_c}{C_c} : \frac{C_m}{C_c} : \frac{C_b}{C_c} : \frac{C_a}{C_c} \quad \text{Equação 16}$$

Em que:

C_c é o consumo de cimento

C_m é o consumo de agregado miúdo

C_b é o consumo de agregado graúdo

C_a é o consumo de água

3.6. ENSAIOS DE CONCRETO FRESCO

Com o traço definido e o concreto já produzido, deve-se realizar testes de consistência a fim de verificar quais as propriedades físicas dos traços utilizados. Os ensaios feitos nesse estudo são os seguintes:

- Ensaio de massa específica do concreto fresco
- Ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone;

3.6.1. Ensaio De Massa Específica Do Concreto Fresco

O ensaio de massa específica do concreto fresco é regido pela norma NBR 9833 de 2009, foi realizado analogamente aos outros ensaios de massa específica. Primeiramente, foi pesado um frasco de volume desconhecido e anotado sua massa, depois o frasco foi preenchido de água até sua borda e pesado novamente. Utilizando a equação 2, e com a informação da massa específica da água sendo $998,54 \text{ kg/m}^3$, calcula-se o volume do recipiente. Então para descobrir a massa específica do concreto fresco, basta pesar o mesmo recipiente preenchido de concreto até sua borda, e utilizando a equação 1, com o volume conhecido, calcular sua massa específica aparente.

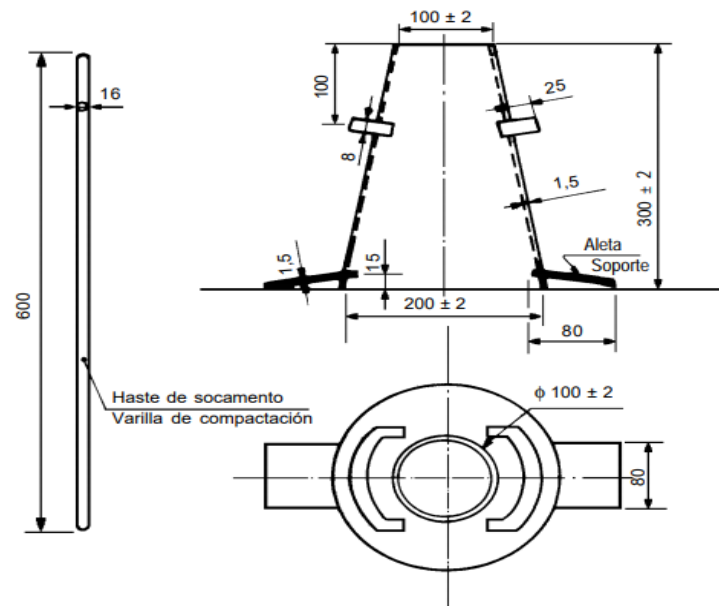
3.6.2. Ensaio De Abatimento De Tronco De Cone

Este ensaio é regido pela norma NBR NM 67 e tem como objetivo determinar a consistência do concreto fresco através da medida de seu assentamento, em laboratório e canteiro de obra (ABNT, 1998). O molde para o corpo-de-prova do ensaio é metálico de interior liso, e deve ter uma forma de um tronco de cone oco. Para o apoio do molde, deve existir uma placa metálica plana e retangular como mostram as figuras 17 e 18.

Para iniciar o procedimento, deve-se umedecer o molde e a placa de base, e colocar rapidamente o concreto fresco no molde. Deve-se colocar um terço do volume de concreto fresco no cone, e compactar a camada com 25 golpes com uma haste de socamento, e realizar isto até preencher completamente o tronco de cone.

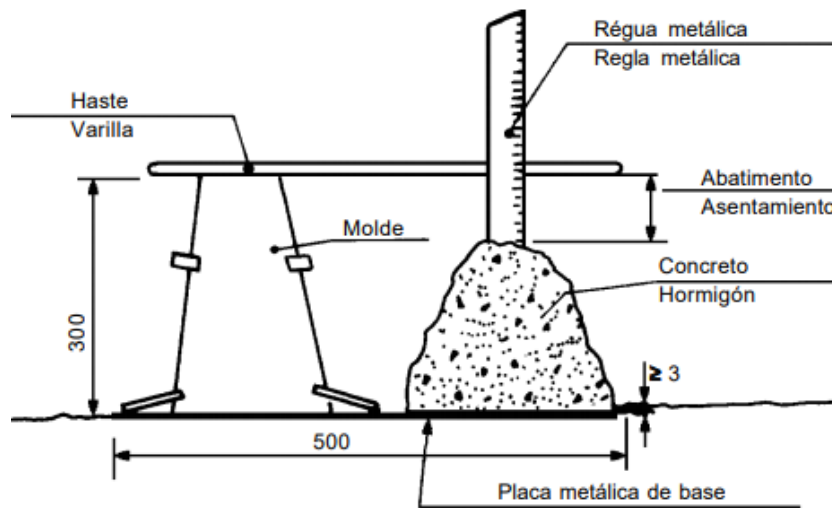
A placa deve ser limpa e então pode-se retirar o molde do concreto cuidadosamente na direção vertical. Imediatamente após a retirada do molde, medir o abatimento do concreto, determinando a diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo-de-prova

Figura 17 - Ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*)



Fonte: NBR NM 67 (1998)

Figura 18 - Realização do ensaio de abatimento de tronco de cone



Fonte: NBR NM 67 (1998)

3.7. PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Depois da realização dos ensaios de consistência, pode se iniciar a produção dos corpos de prova com o concreto que é o núcleo deste estudo. A norma que regula o procedimento de moldagem e cura dos corpos de prova é a NBR 5738 (ABNT, 2015).

Os moldes cilíndricos devem ter altura igual ao dobro do diâmetro. O diâmetro deve ser de 10 cm até 45 cm, variando de 5 cm em 5 cm. As laterais e a base do molde devem ser de aço, ou de outro material não absorvente, que não reaja com o cimento Portland e suficiente resistente para manter sua forma durante a operação de moldagem, e aberto em seu extremo superior para facilitar a desmoldagem.

A dimensão básica do corpo de prova deve ser no mínimo três vezes maior que a dimensão nominal máxima do agregado graúdo do concreto. Antes da realização da moldagem, os moldes devem ser revestidos com uma fina camada de lubrificante não reagente com o cimento. O concreto fresco deve ser golpeado com uma haste de ferro no mínimo 20 vezes por cada camada colocada dentro do corpo de prova, a fim de deixar os moldes com um adensamento adequado.

É imprescindível que as bases se tornem superfícies planas e perpendiculares ao eixo longitudinal do corpo de prova, e essa preparação pode ser feita por retificação ou capeamento. O tempo de cura inicial deve ser de pelo menos 24 h para desmoldagem de corpos de prova cilíndricos, e devem ser armazenados em local protegido de intempéries, identificados e cobertos para evitar perda de água no concreto.

Ao todo, foram produzidos 35 corpos de prova cilíndricos, sendo 29 corpos com tamanho de 20 cm de altura por 10 de diâmetro, e 6 unidades com 30 cm de altura e 15 cm de diâmetro, como apresenta a figura 19. Os corpos de prova foram cuidadosamente desenformados e depois colocados submersos no tanque d'água, a fim de que não percam umidade durante o seu período de cura.

Figura 19 – Corpos de prova produzidos



Fonte: Autor (2021)

3.8. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Com os corpos de prova confeccionados em conformidade a norma vigente, com suas bases devidamente lisas sem irregularidades, respeitado o seu tempo de cura conforme planejado, com 7,14 e 21 dias de idade, e foram realizados os testes de resistência a compressão dos corpos de prova. A norma reguladora deste teste é a NBR 5739 (ABNT, 2018). Este ensaio é importante para se determinar a carga máxima admitida sobre o corpo de prova até o momento do seu rompimento.

A máquina de ensaios deve atender os valores máximos admissíveis determinados pela NBR ISO 7500-1, e deve ser equipada com dois pratos de aço, sendo o prato inferior removível para permitir a manutenção da superfície (ABNT, 2016). Os corpos de prova foram posicionados de modo que o seu eixo coincida com o eixo da máquina, fazendo com que as forças resultantes passem pelo centro do corpo de prova. O sistema de medição de força pode ser análogo ou digital, sendo

que deve ser previsto uma indicação numérica da força máxima atingida antes do rompimento.

Na execução do ensaio, os corpos de prova foram rompidos à compressão em uma idade específica, contada a partir do momento da moldagem, no caso deste estudo, com idades de 7, 14 e 21 dias. O ensaio de compressão não pode ser realizado com idade de 28 dias por questões falta de calendário disponível para realização deste estudo. O carregamento de ensaio deve ser aplicado continuamente e sem choques, com velocidade de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s (mega pascais por segundo). O carregamento só deve cessar quando houver uma queda de força, que indique a ruptura do corpo de prova.

Como o equipamento de utilizado para o ensaio de compressão fornece resultados na unidade de Quilo Newtons (kN) para demonstrar a força exercida, devemos dividi-la pela área de superfície de contato do corpo de prova, a fim de encontrar-se a pressão suportada pela amostra antes de seu rompimento.

$$P = \frac{F}{A} \qquad \text{Equação 17}$$

Onde:

P é a pressão, em kN/cm²;

F é a força aplicada pelo equipamento, em kN;

A é a área da superfície de contato do equipamento e o corpo de prova, em cm²;

A figura 20 apresenta o equipamento utilizado para o ensaio de compressão axial neste estudo.

Figura 20 - Ensaio de compressão do Corpo de prova



Fonte: Autor (2021)

4. RESULTADOS

4.1. GRANULOMETRIA

Para o ensaio de granulometria do agregado reciclado de concreto, foi separada massa de 3,0kg de material e colocada no conjunto de peneiras descritas na tabela 8 e foi obtido as seguintes massas de material. A partir disso, obteve-se a massa de material para cada abertura de peneira.

Tabela 8 - Massa e percentuais retidos nas peneiras

Abertura da Malha da peneira (mm)	Massa retida na peneira (g)	% de material retido	% acumulada
19,10	0,00	0,00%	0,00%
12,70	46,56	1,55%	1,55%
9,50	1358,57	45,29%	46,83%
6,35	1147,21	38,24%	85,07%
4,75	347,77	11,59%	96,67%
2,00	71,19	2,37%	99,04%
1,19	7,59	0,25%	99,29%
fundo	17,65	0,59%	99,88%
total	2996,54	99,88%	

Fonte: Autor (2021)

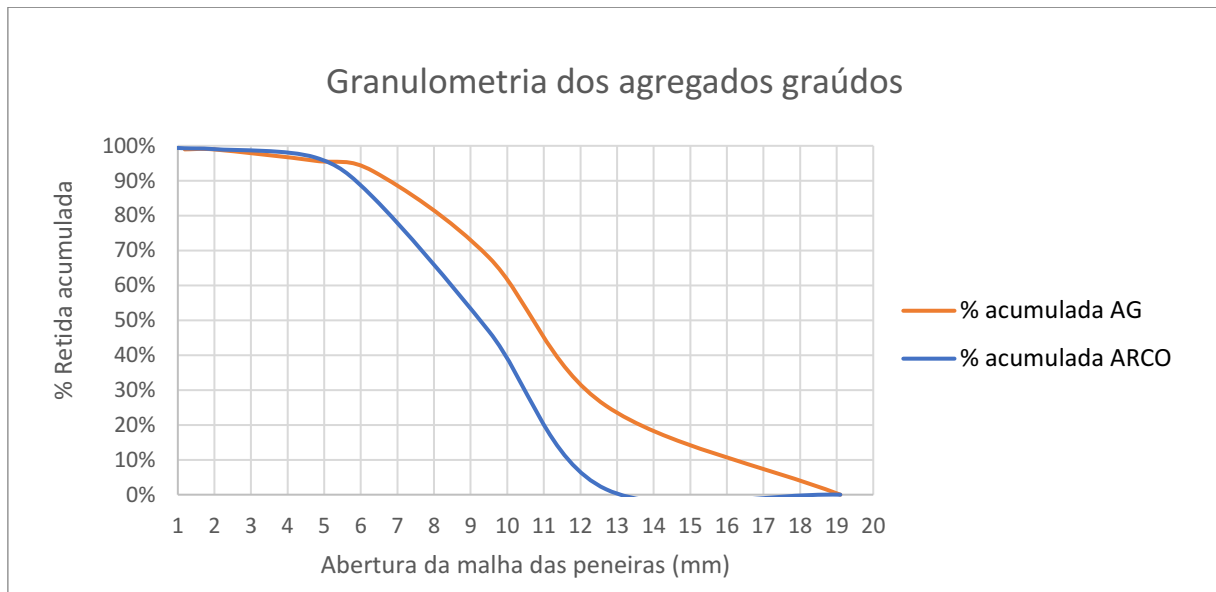
Para o ensaio de granulometria do agregado graúdo comum, foi separado uma massa de 3,0kg de material e colocada no conjunto de peneiras descritas na tabela 9 e foi obtido as seguintes massas de material. A partir disso, obteve-se a massa de material para cada abertura de peneira.

Tabela 9 - Massa e percentual retido nas peneiras

Abertura da Malha da peneira (mm)	Massa retida na peneira (g)	% de material retido	% acumulada
19,10	0,00	0,00%	0,000%
12,7	1018,81	25,47%	25,470%
9,5	1701,89	42,55%	68,016%
6,35	984,56	24,61%	92,630%
4,75	123,83	3,10%	95,726%
2,00	129,14	3,23%	98,954%
1,19	1,13	0,03%	98,983%
Fundo	6,08	0,15%	99,135%
total	3965,44	99,13%	

Fonte: Autor (2021)

Figura 21 - Granulometria dos agregados graúdos



Fonte: Autor (2021)

A figura 21 mostra que o ARCO, comparada com o agregado natural utilizado neste estudo, tem uma granulometria um pouco menor, o que pode influenciar durante os testes de concreto fresco, como o ensaio de tronco de cone, o chamado *slump test*.

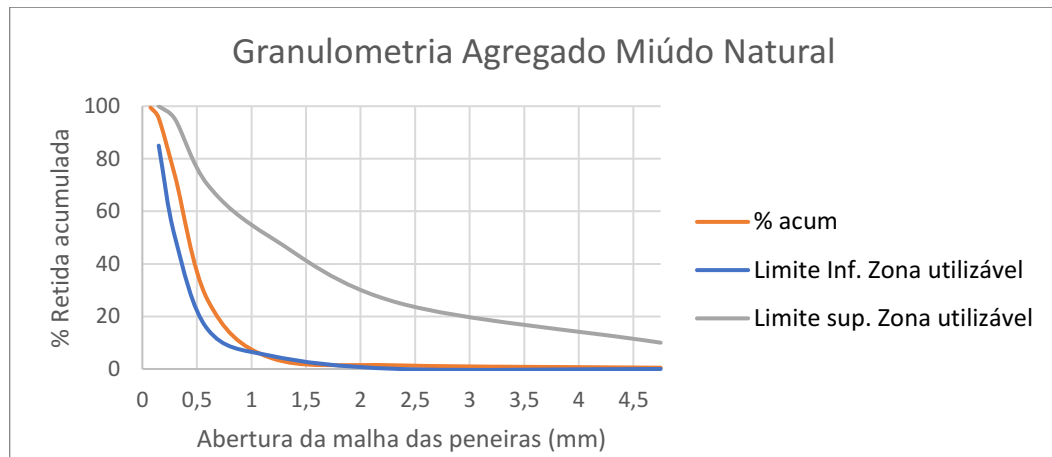
Para o ensaio de granulometria do agregado miúdo, foi separada uma massa de 1,0 kg de material e foi colocada no conjunto de peneiras descritas na tabela 10 e foi obtido as seguintes massas de material, as zonas utilizáveis são definidas pela NBR 7211:2005.

Tabela 10 - Massa e percentual retido nas peneiras

Abertura da Malha da peneira (mm)	Massa retida na peneira (g)	% de material retido	% acumulada
4,75	4,88	0,00%	0,48%
2,36	8,74	25,47%	1,36%
1,18	28,22	42,55%	4,18%
0,6	219,61	24,61%	26,13%
0,3	472,12	3,10%	73,32%
0,15	221,44	3,23%	95,46%
0,075	40,09	0,03%	99,47%
fundo	4,73	0,15%	99,94%
total	999,83	99,13%	

Fonte: Autor (2021)

Figura 22 – Granulometria do Agregado Miúdo Natural



Fonte: Autor (2021)

A figura 22 mostra que, segundo a NBR 7211 de 2005, o agregado miúdo estudado está dentro da faixa granulométrica de zona utilizável.

4.2. MASSA ESPECÍFICA DOS AGREGADOS

A amostra de agregado miúdo para esse ensaio foi constituída por 500 g de areia seco por 24h em estufa, e a amostra colocada integralmente em um frasco de Chapman, graduado. Utilizando a balança de precisão, foi aferida a massa do conjunto frasco e material com 653,73 g.

Após, encher o frasco com a amostra com água até a marca de 500 ml, e movido de modo para retirar as bolhas de ar da mistura e novamente pesada a amostra com resultado de 966,95 g. Por fim, foi pesado apenas o frasco com 500ml de água, resultando em 648,54 g. Com esses dados e a informação que a massa específica da água é de 998,54 kg/m³, podemos calcular a massa específica, a massa específica de do agregado saturado de superfície seca e a massa específica aparente do agregado miúdo seco utilizando as equações descritas no item 3.4.2, então chegou-se nos seguintes resultados descritos na tabela 11.

Tabela 11 - Cálculo da Massa específica do agregado miúdo

Utilizando a equação 2:	Volume de água adicionado ao frasco (Va)	0,31 L
Utilizando a equação 1:	Massa específica aparente do agregado miúdo (d1)	2,68 g/cm ³ .
Utilizando a equação 3:	Massa específica do agregado miúdo saturado de superfície seca (d2)	5,19 g/cm ³
E utilizando a equação 4:	Massa específica do agregado miúdo (d3)	2,68 g/cm ³ .

Fonte: Autor (2021)

Utilizando o Agregado Reciclado de Concreto (ARCO) para o ensaio, foi pesada sua massa inicial de precisamente 2500,03 g. Depois de 24 horas submersa em água, a amostra foi seca com tecido e pesou 2640,96 g. Fazendo a pesagem na balança hidrostática, a amostra submersa em água pesou 1587,85 g. Depois de ficar 24 horas em estufa com uma temperatura média de 100° C, a amostra pesou 2584,08 g.

Utilizando as equações descritas no item 3.4.3, chegou-se nos seguintes resultados descritos na tabela 12.

Tabela 12 - Cálculo massa específica aparente e absorção de água do agregado reciclado de concreto (ARCO)

Utilizando a equação 5	Massa Específica (d)	2,46 g/cm³
Utilizando a equação 6	Massa específica saturada de superfície seca (ds)	2,50 g/cm ³
Utilizando a equação 7:	Massa específica aparente (da)	2,60 g/cm ³
E utilizando a equação 8:	Absorção de água (A)	2,20%.

Fonte: Autor (2021)

Utilizando o Agregado graúdo comum para o ensaio, foi pesada sua massa inicial de precisamente 2499,98 g. Depois de 24 horas submersa em água, a amostra foi seca com tecido e pesou 2624,72 g. Fazendo a pesagem na balança hidrostática, a amostra submersa em água pesou 1649,06 g. Depois de ficar 24 horas em estufa com uma temperatura média de 100° C, a amostra pesou 2576,62 g.

Utilizando as equações, chegou-se nos seguintes resultados descritos na tabela 13.

Tabela 13 - Cálculo da massa específica aparente e absorção de água do agregado graúdo natural

Utilizando a equação 5	Massa Específica (d)	2,64 g/cm³
Utilizando a equação 6	Massa específica saturada de superfície seca (ds)	2,69 g/cm ³
Utilizando a equação 7:	Massa específica aparente (da)	2,78 g/cm ³ .
E utilizando a equação 8:	Absorção de água (A)	1,87%.

Fonte: Autor (2021)

Como esperado, as massas específicas do agregado reciclado de concreto foram menores que as agregado reciclado, devido a sua maior porosidade. Este fator da porosidade também é o responsável pela maior absorção de água do ARCO comparado ao outro agregado utilizado.

4.3. DETERMINAÇÃO DA MASSA UNITÁRIA DOS AGREGADOS

Utilizando as equações descritas no item 3.4.4 calculou-se a massa unitária de todos os agregados. Para o agregado miúdo, chegou-se nos seguintes resultados descritos na tabela 14.

Tabela 14 - Volume do recipiente

Massa específica da água:	0,99854 g/cm³
Massa de água no recipiente:	718,71 g
Portanto, tem-se o volume do recipiente:	719,76 cm ³

Fonte: Autor (2021)

Utilizando a equação 9 e o resultado do volume do recipiente, tem-se os resultados da tabela 15.

Tabela 15 - Massa unitária do agregado miúdo natural

Massa do conjunto amostra + recipiente:	1,19429 kg
Portanto, a massa unitária da amostra:	1659,28 kg/m ³

Fonte: Autor (2021)

No cálculo da massa unitária do ARCO, o recipiente foi tarado na balança antes das pesagens, e podemos substituir a variável m_r na equação 9 por zero. Pode-se encontrar o volume do recipiente pela equação 10

Com isso, tem-se a tabela 16.

Tabela 16 - Volume do recipiente

Massa específica da água:	0,99854 g/cm³
Massa de água no recipiente:	1541,55 g
Portanto, tem-se o volume do recipiente:	1541,55 cm ³

Fonte: Autor (2021)

Utilizando a equação 9 e o resultado do volume do recipiente, tem-se a tabela 17.

Tabela 17 - Massa unitária do agregado graúdo reciclado

Massa do conjunto amostra + recipiente:	2,58605 kg
Portanto, a massa unitária da amostra:	1340,69 kg/m ³

Fonte: Autor (2021)

No cálculo da massa unitária do agregado graúdo comum, o recipiente foi tarado na balança antes das pesagens, e podemos substituir a variável m_r por zero. Pode-se encontrar o volume do recipiente pela equação 10

Com isso, tem-se a tabela 18.

Tabela 18 - Volume do recipiente

Massa específica da água:	0,99854 g/cm³
Massa de água no recipiente:	1541,55 g
Portanto, tem-se o volume do recipiente:	1541,55 cm ³

Fonte: Autor (2021)

Utilizando a equação 9 e o resultado do volume do recipiente, tem-se na tabela 19:

Tabela 19 - Massa unitária do agregado graúdo natural

Massa do conjunto amostra + recipiente:	2,06977 kg
Portanto, a massa unitária da amostra:	1675,12 kg/m ³

Fonte: Autor (2021)

Analogamente à ensaios anteriores, também foi feito o ensaio de massa unitária com diferentes proporções de mistura entre os dois agregados graúdos. Os resultados podem ser observados na tabela 18.

Tabela 20 – Massa unitária de diferentes proporções entre agregados graúdos.

Proporção AG/ARCO	Massa (g)	Massa unitária (g/cm³)
100/0	3540,71	1,77
90/10	3527,12	1,76
80/20	3521,18	1,76
70/30	3505,83	1,75
60/40	3516,86	1,75
50/50	3515,36	1,75
0/100	3005,67	1,50

Fonte: Autor (2021)

4.4. INCHAMENTO DO AGREGADO MIÚDO

Utilizando um frasco de volume igual a 790,8 cm³ e uma massa inicial de agregado seco igual a 2456,08 g, pode-se calcular a massa de água em cada teor de umidade descritos no Quadro 2, e com o peso do recipiente cheio lido na balança, pode-se calcular a massa unitária pela equação 10.

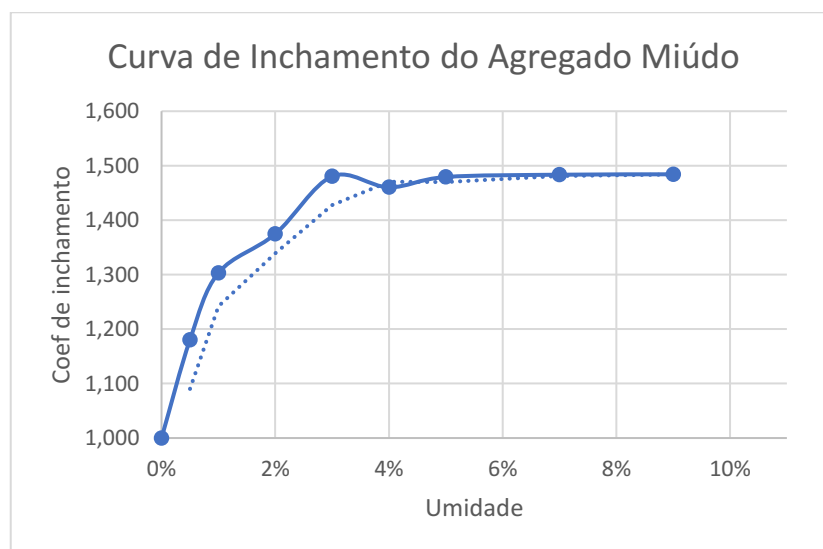
Os resultados podem ser observados na tabela 21. Na figura 23 pode-se observar a curva de inchamento do material, e que a umidade crítica da amostra fica em torno de 3 a 4%.

Tabela 21 – Coeficientes de inchamento e Massas unitárias do agregado miúdo natural

Teor de umidade	Massa de água (g)	Massa amostra (g)	Massa unitária (g/cm ³)	Vh/Vs (coef. de inchamento)
0%	0	1276,77	1,61	1,000
0,5%	12,2804	1087,14	1,37	1,180
1%	24,5608	989,6	1,25	1,303
2%	49,1216	947,42	1,19	1,375
3%	73,6824	888,34	1,12	1,480
4%	98,2432	909,28	1,14	1,460
5%	122,804	906,28	1,14	1,479
7%	171,9256	920,93	1,16	1,483
9%	221,0472	937,66	1,18	1,484

Fonte: Autor (2021)

Figura 23 – Curva de inchamento do agregado miúdo



Fonte: Autor (2021)

4.5. CÁLCULO E DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS DOS CONCRETOS

Para a produção do concreto, foi escolhido o cimento ARI CP-V para obras estruturais, visto que sua resistência é maior que os cimentos convencionais em menor intervalo de tempo, e a massa específica desse tipo de cimento é 3140 kg/m³, dado fornecido pela fabricante de cimentos.

Para os testes de compressão, foram definidos 5 traços para os concretos, cada um deles com uma proporção diferente de agregados comuns e reciclados, como mostra o quadro 3

Quadro 3 – Nomenclatura dos traços do concreto

Traço	Proporção Agregado Reciclado / Agregado Comum
1	15 / 85
2	30 / 70
3	60 / 40
4	100 / 0
5	0 / 100 (concreto de referência)

Fonte: Autor (2021)

Utilizando os ensaios de granulometria, observa-se que o módulo de finura da areia é de 2,944, considerada uma areia de tipo média, e que as dimensões máximas dos agregados reciclados e gráudo comum são, respectivamente 12,7mm e 19,1mm, considerados do tipo brita 1.

Tendo como objetivo um concreto com resistência de 20 MPa aos 28 dias, de idade, e com um desvio padrão de 5,5 MPa, utilizamos a equação 12, e chegamos a um $F_{c_{28}}$ na resistência de 29,1 MPa.

Antes do cálculo da dosagem, deve-se saber a umidade do agregado miúdo, para definir com precisão a quantidade de água no concreto. O cálculo da umidade pode ser realizado através da seguinte equação 18.

$$h = \frac{m_i - m_f}{m_f - m_c} \times 100 \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

h é o teor de umidade do agregado, em porcentagem;
 m_i é a massa inicial da cápsula recipiente com o material em ensaio, em gramas;
 m_f é a massa após secagem, da cápsula, com o material em ensaio, em gramas;
 m_c é a massa da cápsula recipiente em gramas.

Com os valores de m_i e m_f sendo 122,99 e 117,96 gramas respectivamente, utilizando a equação 17, obtém-se uma umidade do agregado miúdo de 4,096 %

Agora pode-se seguir em frente e utilizar o método ABCP para definir a dosagem de cada traço da pesquisa. Utilizando toda a metodologia descrita no capítulo 4.5 desta pesquisa, podem ser observados as seguintes dosagens dos traços que foram utilizados na pesquisa na tabela 22.

Tabela 22 – Dosagens dos traços dos concretos

Traços	Cimento	Agr. Miúdo	Agr. Graúdo	ARCO	Água
1	1	2,175	1,962	0,416	0,600
2	1	2,076	1,615	0,833	0,600
3	1	2,618	1,176	2,123	0,650
4	1	2,250	0,000	3,539	0,650
5 (ref)	1	3,131	2,941	0,000	0,650

Fonte: Autor (2021)

A figura 24 mostra o concreto produzido durante a utilização do traço 4, ou seja, de proporção 100% agregado reciclado de concreto.

Figura 24 - Concreto produzido com proporção 100/0



Fonte: Autor (2021)

4.6. MASSA ESPECÍFICA APARENTE DO CONCRETO FRESCO

Analogamente ao item 4.4.2 dessa pesquisa, foi calculada a massa específica aparente dos concretos frescos pela equação 1, e obteve-se os resultados apresentados na tabela 23.

Tabela 23 – Massas específicas aparentes de cada traço

Traço	Massa específica aparente (kg/m³)
1	2339,74
2	2339,74
3	2243,59
4	2243,59
5 (referência)	2275,64

Fonte: Autor (2021)

4.7. ABATIMENTO DO CONCRETO NO ENSAIO DO TRONCO DE CONE

Os resultados dos ensaios de tronco de cone dos concretos frescos podem ser observados na tabela 24.

Tabela 24 – Abatimento do concreto no *Slump Test*

Traço	Abatimento (mm)
1	30
2	135
3	135
4	180
5 (referência)	60

Fonte: Autor (2021)

Figura 25 - Slump Test do concreto com proporção 15/85



Fonte: Autor (2021)

4.8. ENSAIOS DE COMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA.

Tendo em vista que para se determinar a pressão suportada pelos corpos de prova, deve-se saber a sua área superficial, e que foram produzidos corpos de prova com raios de 5cm e 7,5cm, tem-se:

Tabela 25 - Áreas superficiais

Área raio = 5 cm	78,5375 cm²
Área raio = 7,5 cm	176,7094 cm²

Fonte: Autor (2021)

Aferindo a força aplicada mostrada na tela do equipamento, as áreas superficiais dos corpos de prova da tabela 25, e utilizando a equação 17 para converter os resultados em MPa, as pressões aplicadas nos testes de compressão podem ser apresentadas

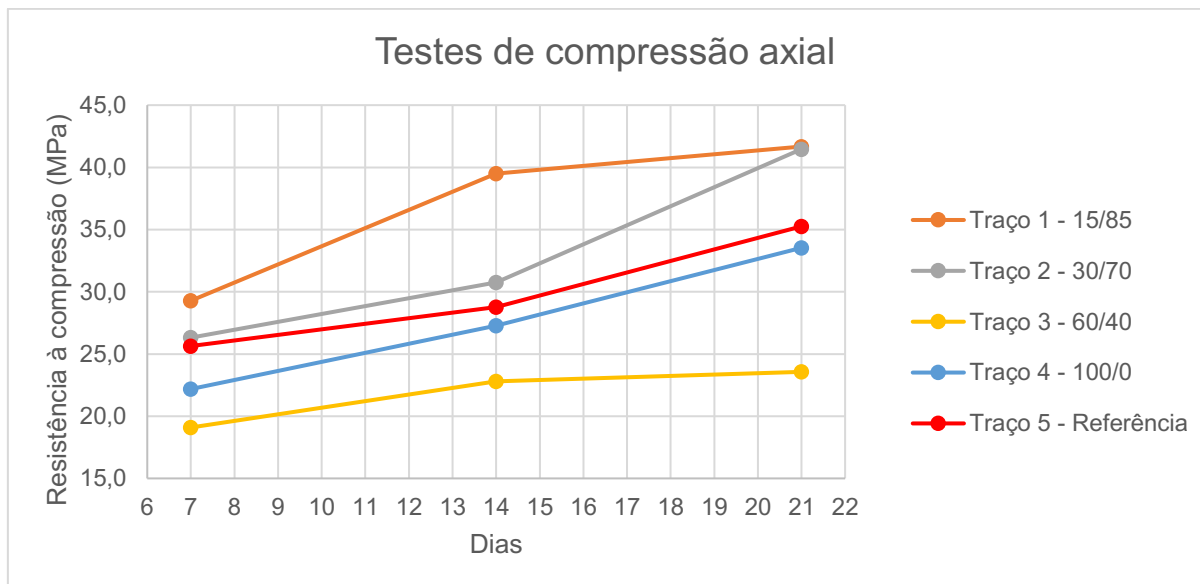
Tabela 26 - Resistências médias à compressão

Resistência à compressão em MPa					
Dias / Proporções	Traço 1 (15/85)	Traço 2 (30/70)	Traço 3 (60/40)	Traço 4 (100/0)	Traço 5 (0/100 - Ref.)
7 dias	29,3	26,3	19,1	22,1	25,6
14 dias	39,5	30,7	22,8	27,3	28,8
21 dias	41,7	41,4	23,6	33,5	35,3

Fonte: Autor (2021)

Na figura 26, pode-se observar a comparação de todos os traços em apenas um gráfico.

Figura 26 - Comparação dos testes de compressão axial

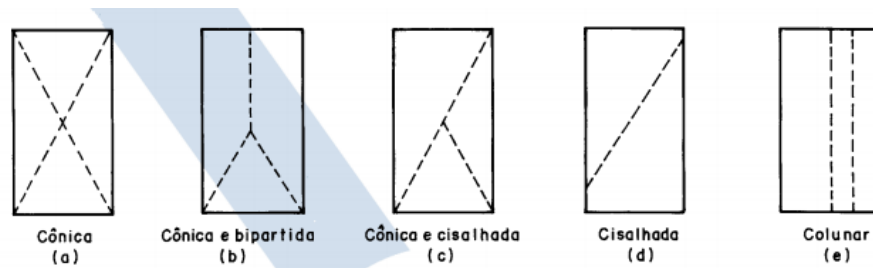


Fonte: Autor (2021)

4.9. TIPOS DE RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA

De acordo com a norma NBR 5739 (1994), os corpos de prova podem ter diferentes tipos de rompimento quando sofrem pressão axial, como mostra a figura 27.

Figura 27 - Tipos de ruptura



Fonte: ABNT (1994)

Os tipos de ruptura ocorridos neste estudo foram o tipo de ruptura cônica e bipartida, e a ruptura colunar, como mostram as figuras 28 e 29.

Figura 28 - Ruptura cônica e bipartida



Fonte: Autor (2021)

Figura 29 - Ruptura colunar



Fonte: Autor (2021)

As fissuras não se iniciam na argamassa antes de atingir 50% de sua tensão de ruptura. Em níveis de maiores tensões, as fissuras se iniciam na matriz (argamassa), e sua quantidade e tamanho crescem progressivamente com o aumento da tensão, a ponto que as fissuras na matriz e na zona de transição acabam por se agrupar. Normalmente a superfície de ruptura pode ser observada entre 20° e 30° a partir da direção da carga (GUERRANTE *et al.*, 2015).

Nem sempre há sinais visíveis de fratura externa, no entanto, as fissuras internas podem ter atingido um estado avançado tal que o corpo de prova não suporta cargas de maiores magnitudes. (GUERRANTE *et al.*, 2015)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. DISCUSSÕES

Segundo Nunes (2007), os agregados reciclados apresentam menores massas específicas e unitárias que os agregados graúdos naturais, e essas propriedades de densidade correlacionam-se com a maior quantidade de argamassa aderida às partículas dos agregados reciclados, maior porosidade, e conseqüentemente maior umidade dos agregados reciclados. Esse resultado pode ser observado nos experimentos de determinação de massa específica e massa unitária realizados.

Segundo Poon et. al. (2001) essa argamassa aderida é a grande responsável pela sua capacidade de absorção de água, que dessa forma se mostra mais abundante nos agregados reciclados, e isso é observável comparando a absorção de água dos dois agregados estudados, sendo a absorção de água do ARCO e do agregado convencional de 2,2% e de 1,8% respectivamente.

Zangeski *et al.* (2017) em seu trabalho com agregados reciclados, observou que a massa específica de seu agregado foi 9% menor comparado aos agregados convencionais, dado que é semelhante ao resultado obtido nesse trabalho, em que a massa específica do ARCO é aproximadamente 7% menor comparado aos agregados comuns. Ambos os dados estão de acordo com Bazuco (1999), que encontrou a massa específica dos agregados reciclados entre 5 a 10% mais baixa que os agregados convencionais, podendo variar de acordo com as origens dos materiais.

Os mesmos autores também utilizaram o método ABCP para a dosagem de seu concreto com agregados reciclados, e utilizaram um cimento de categoria CP-II para seu estudo. Os corpos de prova com utilização de 100% de agregado reciclado tiveram suas resistências médias a compressão aos 7, 14 e 21 dias resultando em 8,5 MPa, 10,8 MPa e 14,2 MPa respectivamente. (ZANGESKI *et al.* 2017),

Resistências essas que são menores que as obtidas no traço 4 deste estudo, com 100% de ARCO como agregado graúdo, que teve suas resistências médias a compressão aos 7, 14 e 21 dias resultando em 22,2 MPa, 27,3 MPa e 33,5 MPa respectivamente. Essa diferença pode ser explicada pela utilização de um cimento CP-V, de alta resistência inicial (ARI) nesse estudo, e também pela qualidade do

ARCO em relação a impurezas na sua composição, comparado ao agregado reciclado utilizado pelos autores.

O cimento CP-V tem como característica atingir altas resistências já nos primeiros dias de cura. O desenvolvimento da alta resistência é conseguido pela utilização diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como a moagem mais fina do cimento, de modo que, com a reação dele com água, consiga atingir elevadas resistências com maior velocidade. (MEDEIROS-JUNIOR; LIMA; MEDEIROS; REAL, 2014)

Almeida *et al.* (2019) em seu trabalho, cujo objetivo era comparar o desempenho dos concretos com diferentes categorias de cimento e utilizando água residual da produção de álcool, também produziu corpos de prova utilizando concreto com cimento ARI CP-V. O traço utilizado em seu concreto foi de 1: 2: 3: 0,6 (cimento, areia, brita e água). Após o ensaio de compressão dos corpos de prova, seus resultados foram nas idades de 7, 14 e 21 dias foram 15,79 MPa, 19,36 MPa e 21,30 Mpa respectivamente.

O traço 3 realizado neste trabalho, de proporção de ARCO e agregado comum de 60/40, mostrou-se o traço com menor resistência comparado aos demais. Os resultados de Almeida *et al.* (2019) se mostram bem semelhantes aos resultados obtidos nos testes de compressão do traço em questão. Essa semelhança de resistência média obtida nos testes de compressão pode indicar que o baixo desempenho de resistência se dá devido a um erro na dosagem do traço nos agregados miúdo e graúdo, visto que a autora utiliza um traço sem um método de dosagem definido, e que por sinal é muito comum ser executado em obras de pequeno porte.

Sobre as resistências dos corpos de prova, a NBR 6118 (2014) é a que fornece as propriedades do concreto para estruturas de concreto armado, e se aplica aos concretos compreendidos nas classes de resistência dos grupos I e II da NBR 8953, até a classe C90. Os grupos I e II podem ser observados nas tabelas 27 e 28.

Tabela 27 - Classe de resistência do grupo 1

Grupo I de resistência	Resistência característica à compressão (Mpa)
C20	20
C25	25
C30	30
C35	35
C40	40
C45	45
C50	50

Fonte: NBR 8953 (1992)

Tabela 28 - Grupo de resistência do grupo 2

Grupo II de resistência	Resistência característica à compressão (Mpa)
C55	55
C60	60
C70	70
C80	80
C90	90

Fonte: NBR 8953 (1992)

Segundo a norma, os concretos de classe C20 ou superior, se aplicam aos concretos armados com armaduras passivas, e C25 ou superior, podem ser aplicados aos concretos com armaduras ativas. A classe C15 não podem ser utilizadas em peças estruturais armadas, apenas em obras provisórias ou concreto sem fins estruturais.

Portanto, dos traços estudados nesse trabalho, apenas o traço 3 não apresenta segurança na utilização de qualquer peça estrutural, ainda que possa ser aplicado em peças com armaduras passivas. Os demais traços (1, 2 e 4) poderiam, de acordo com as resistências apresentadas, serem utilizados em estruturas de concreto armado.

Porém a norma NBR 15116 (2004), reitera que os agregados reciclados podem ser utilizados em concreto, desde que sem função estrutural, substituindo parcial ou integralmente os agregados convencionais, e que sejam provenientes de material de

classe A. O material estudado se enquadra na classe A, sendo classificado como resíduo de processo de reparo ou demolição de peças pré-moldadas em concreto.

5.2. CONCLUSÕES

Diante do exposto até aqui, este autor pôde obter as seguintes conclusões:

- Comparando a granulometria de ambos os agregados, o reciclado de concreto e o natural, pode-se notar que o agregado reciclado de concreto se encontra exatamente na faixa de classificação da brita 1, pois foi produzido para tal, conforme a norma NBR 7211:2005. Já o agregado convencional utilizado nesse estudo é de granulometria um pouco maior que a brita 1, mas não a ponto de ser classificado como brita 2, estando com praticamente 70% de sua granulometria na faixa de classificação da brita 1;
- No que se diz respeito as massas específicas dos agregados, foi observado que a massa específica do ARCO é 7,08% menor que a massa específica do agregado natural, o que concorda com a bibliografia consultada;
- O mesmo ocorre quando se comparam as massas unitárias, sendo a massa unitária do ARCO 19,96% menor do que a do agregado natural;
- Nos testes experimentais, observou-se que a absorção de água do ARCO foi de 2,2%, contra 1,8% do agregado natural, sendo assim, a absorção de água do ARCO foi 17,91% maior do que a absorção de água do agregado gráudo convencional, o que concorda com a bibliografia consultada;
- Já sobre o concreto fresco, foi observado que a massa específica dos concretos com proporções de 60% de agregado reciclado e 40% agregado comum, e também de 100% agregado reciclado ambos foram de $2243,59 \text{ g/cm}^3$, estas foram as proporções que mais se aproximaram à massa específica do concreto produzido como referência, que teve sua massa específica aferida em $2275,64 \text{ g/cm}^3$;

- Quanto ao teste do abatimento de tronco de cone, o *Slump Test*, foi observado que o primeiro traço, de proporção 15/85 teve um abatimento muito pequeno comparado aos demais traços de proporções, isso pode ser devido ao fato da mistura ter consistência com menos água que as demais;
- As magnitudes dos abatimentos seguintes foram aumentando conforme o aumento da quantidade de agregado reciclado na proporção;
- Isso se deve ao fato de que a granulometria do ARCO é um pouco menor que a do agregado comum utilizado, o que facilita o empacotamento das partículas no interior do concreto;
- Também, o aumento de água de amassamento se fez necessária devido ao teor de absorção maior conforme a quantidade de ARCO foi crescendo, aumentando também o abatimento medido no *Slump Test*.
- Os traços 1 (15/85) e 2 (30/70), que tem relação a/c de 0,6, com menos água que os demais, apresentaram resultados semelhantes de resistência 21 dias, com pouco mais de 41 MPa resistidos, sendo as maiores resistências registradas nesse trabalho.
- O traço 3, com proporção 60/40 e relação a/c de 0,65, apresenta resistências médias bem menores em comparação aos demais traços. Sua maior resistência alcançada foi de pouco mais de 23 MPa aos 21 dias. A provável justificativa para isto, seria erro na dosagem do traço, visto que esse é o traço que tem maior quantidade de agregado miúdo calculada no estudo de dosagem, o que pode ter diminuído sua resistência média à compressão.
- O traço 4, feito apenas com utilização de ARCO como agregado graúdo se mostrou com evolução de resistência muito parecida com o concreto de referência produzido, sem adição de qualquer agregado reciclado (traço 5). Ambos os concretos atingiram uma resistência aos 21 dias de 33,5 MPa e 35,2 MPa, respectivamente, e tiveram a mesma relação a/c de 0,65.
- O aumento de água no amassamento, que se mostra evidente a partir do traço 3, em que se adotou uma a/c de 0,65 ao invés de 0,60 por causa da absorção de água do ARCO, provocou uma diminuição de resistência

à compressão aos 21 dias, dos traços 3, 4 e 5, comparados aos traços 1 e 2.

- Embora, três dos quatro traços estudados com uso de ARCO sejam aptos a serem utilizados em qualquer tipo de peças estruturais, de acordo com a NBR 6118 que determina como classificação mínima C25 como ideal para qualquer concreto estrutural, as normativas atuais ainda não permitem a utilização de agregados reciclados para esses casos.
- Espera-se que no futuro, com o crescimento do estudo no assunto, as normas sejam flexibilizadas a fim de aceitar os RCCs em todos os usos dos concretos e argamassas.
- Segundo a NBR 12655 de 2006, algumas aplicações são possíveis para esse tipo de concreto com agregados reciclados. Peças não estruturais de concreto, são meios-fios ou guias, sarjetas ou canaletas, cujas resistências mínimas são de 20 MPa podem ser fabricadas com concreto com agregado reciclado
- Segundo a NBR 15116 de 2004, os concretos sem função estrutural com agregado reciclado ainda podem ser utilizados como enchimentos, contrapisos, calçadas, e fabricação de artefatos não estruturais, como blocos de vedação e placas de muros, que requerem concretos de classes de resistência entre C10 (10 MPa) e C15 (15 MPa) segundo a NBR 8953:2015.
- Outra alternativa seria a produção de blocos para pavimentos intertravados, os *pavers*. A NBR 15953 (2011) define como 35 MPa o valor de resistência mínima dos blocos para áreas com tráfego de pedestres e veículos leves, resistência essa, que é atingida pelos traços 1 e 2.

5.3. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros são listados:

- Refazer os traços realizados neste trabalho para investigar falhas como a observada no traço 3;
- Utilização de ARCO como agregado miúdo;
- Utilização de aditivos plastificantes a fim de aumentar a resistência obtida;
- Estudo de caracterização do material fino produzido na britagem do concreto reciclado;
- Estudo comparativo com outros métodos de dosagem;
- Estudo de viabilidade na utilização do ARCO na produção de pré fabricados.

REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação -. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 7225**: Materiais de Pedra e agregados naturais. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15953:2011** Pavimento intertravado com peças de concreto — Execução Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 5738**: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento Rio de Janeiro, 2014

_____. **NBR 6467**: Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 899853:** Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência Rio de Janeiro, 2015

_____. **NBR 8953:** Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR ISO 3310-1:** Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação. Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico (ISO 3310-1, IDT). Rio de Janeiro, 2010a.

_____. **NBR ISO 3310-2:** Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação. Parte 2: Peneiras de ensaio de chapa metálica perfurada (ISO 3310-2:1999, IDT). Rio de Janeiro, 2010b.

_____. **NBR ISO 7500-1:** Materiais metálicos - Calibração e verificação de máquinas de ensaio estático uniaxial. Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/ compressão - Calibração e verificação do sistema de medição da força. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR NM 16972** Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 45:2006:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 68:** Concreto - Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 9776:** Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR NM 9833:2009:** Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil.** São Paulo, 2017. Acesso em: 30 jul. 2021.

ALMEIDA, Maryane Pipino Beraldo de *et al.* **INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA VINHAÇA COM CIMENTOS PORTLAND: CP ARI- V E CP II- Z COM POZOLANA.** Presidente Prudente - Sp: Centro Universitário “Antonio Eufrásio de Toledo”, 2019. Disponível em: <http://intertemas.toledoprudente.edu.br/index.php/ETIC/article/view/7745/67648346>. Acesso em: 15 ago. 2021.

AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. **Materiais de Construção:** normas, especificações, aplicações e ensaios de laboratório. São Paulo: Pini, 2012. 460 p.

ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. de. Concreto com agregados reciclados. In: ISAIA, G. C. (Editor). **Concreto: ciência e tecnologia.** 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. Vol. 2

ARAGÃO, E. V. **Análise do conhecimento dos profissionais da construção civil na cidade de Campo Mourão – PR sobre os RCC’s.** 2013. 68 f. Dissertação (Graduação) – Curso em Tecnologia em Materiais para Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **FUNDAMENTOS DO CONCRETO ARMADO.** Bauru: Unesp - Campus de Bauru/Sp, 2019. Disponível em: <https://www.pbastos.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/Fundamentos%20CA.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2021.

BAZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para produção de novos concretos**. 1999. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999.

BEHERA, M.; *et al.* Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, Volume 68, p 501-516, 2014.

BRASIL. **Lei Federal nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm>. Acesso em: 15 mai. 2021.

BRASILEIRO, L. L., MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 178-189, mar. 2015.

CAMENAR, M. T., SCHEID, M. F. **Análise do Sistema de Gestão de Resíduos da Construção Civil: Estudo de caso no Município de Pato Branco – PR**. 2016. 93 f. Dissertação (Graduação) - Curso Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

CLUBE DO CONCRETO (Brasil). **Curvas de Abrahms em Excel Revisado**. Disponível em: <http://www.clubedoconcreto.com.br/2016/05/curvas-de-abrams.html>. Acesso em: 15 jul. 2021.

CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). **Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/estruturas/a3p/_arquivos/36_09102008030504.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2020.

FAVARETTO, P.; *et al.* Characterization and use of construction and demolition waste from south of Brazil in the production of foamed concrete blocks. **Applied Sciences**, [s.l.], v.7, p. 1-15, 2017.

FERNANDES, L. R. **Metodologias para produção de pré-fabricados em concreto armado e protendido com abordagem das manifestações patológicas que surgem na fabricação e montagem**. 2015. 81 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2015.

FIGUEIREDO, Enio Pazini *et al.* **USO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)**: influência do agregado graúdo reciclado de resíduos da construção predial, provenientes das etapas construtivas de estruturas e alvenarias, nas propriedades do concreto fresco e endurecido. Goiânia: Ibracon 2007 Ct-Mab: VII Seminário de Desenvolvimento Sustentável e A Reciclagem na Construção Civil, 2007. 101 slides, color. Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/eventos/49cbc/Enio%20SUSTENTABILIDADE%2049%20CBC.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2021.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados**. 2. ed. São Paulo: Editora Pini Ltda, 2012.

GÁLVEZ – MARTOS, J.L.; ISTRATE, I.R. Construction and demolition waste management. In. Pacheco-Torgal, P; et al. **Advances in Construction and Demolition Waste Recycling. Management, Processing and Environmental Assessment**. 1. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2020. p. 51-68

GONZÁLEZ, J.S. et al. Influence of recycled brick aggregates on properties of structural concrete for manufacturing precast prestressed beams. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 149, p.507-514, 2017.

GUERRANTE, Iporan de Figueiredo *et al.* Análise do comportamento de corpos de prova cilíndricos com duas partes aderidas por epóxi em concretos com diferentes resistências e inclinações. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 4, p. 1-15, jan. 2015.

HANSEN, T. C. **Recycling of Demolished Concrete and Masonry**. 1. ed. London: Spon Pr, 1992.

HENDRIKS, C. F. Recycling and Reuse as a Basis for Sustainable Development in Construction Industry. **Concrete for Environment Enhancement and Protection**. London, p. 43-54, 1996.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **PIB cresce 1,1 % e fecha 2019 em R\$ 7,3 trilhões**. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/27007-pib-cresce-1-1-e-fecha-2019-em-r-7-3-trilhoes>>. Acesso em: 17 out. 2020.

ISLAM, R.; et al. An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling. **Waste Management**, [s.l.], v. 95, p. 10-21, 2019.

LIMA, R. S.; LIMA, R. R. R. **Guia para elaboração de projeto de gerenciamento de resíduos da construção civil**. Paraná: CREA-PR, 2012.

LINTZ, R.C.C.; et al. Study of the reuse of construction residues in concrete employed by blocks manufacture. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v 5, p.1-8, 2012.

LOTURCO, B. A nova lei do lixo. **Revista Técnica**, n. 82, p. 52-55, 2004.

MARQUES, H. F.; et a. Reaproveitamento de resíduos da construção civil: a prática de uma usina de reciclagem no estado do Paraná. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 21912-21930, 2020.

MCLAUGHLIN, J. A Review of the Prospects for the Greater Use of Recycled and Secondary Aggregates in Construction. **The Concrete Society Journal**, [s.l.], v. 27, n. 6, p. 16-18, 1993.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G.; MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V.. Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. **Revista Alconpat**, [S.L.], v. 4, n. 2, p. 113-128, 30 maio 2014. Revista ALCONPAT. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v4i2.21>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1994.

MELO, C. E. E. Manual Munte de Projetos em Pré-fabricados de Concreto. São Paulo: Pini, 2004

NUNES, Wesley Carlos. **INFLUÊNCIA DO AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO PREDIAL NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO E ENDURECIDO**. 2007. 202 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007. Disponível em:
<https://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tde/671/1/Dissertacao%20Wesley%20Carlos%20Nunes.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2021.

OLIVEIRA, M.E.D.; SALES, R.J.M.; OLIVEIRA, L.A.S.; CABRAL, A.E.B. Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 16, n. 13, p. 219-224, 2011.

PADERES, Rafael de Paula; SATLER, Samyr Vale. **CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE CONCRETO RECICLADO: COMPORTAMENTO MECÂNICO E ASPECTOS DE DURABILIDADE**. 2017. 75 f. TCC (Graduação) - Curso de Curso Superior de Engenharia Civil, Instituto Tecnológico de Caratinga, Caratinga/Mg, 2017. Disponível em:

<https://dspace.doctum.edu.br/bitstream/123456789/450/1/TCC%20PADERES%20e%20SATLER.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2021.

POON, C. S., T.W.A.T.W. Yu, L.H. Ng. On-site sorting of construction and demolition waste in Hong Kong. *Resour Conserv Recycl*, 32, p. 157-172, 2001.

RECENA, F. A. P. **Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland**. 3. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2015.

REVEL, M.; JACOBSON, M.; NAVACERRADA, G. de. **La prefabricacion em la construccion**. 1.ed. Bilbao: Urmo, 1973.

RIBEIRO, H. C. **Aplicação de Resíduos Sólidos da Construção Civil em Revestimento Asfáltico tipo CBUQ PF-001A/04**. 2004. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2004.

SCHAFFER, J. et al. *Ciencia y diseño de materiales para ingerería*. México: Grupo Pátria Cultural, 2000

SERRA, S.M.B.; FERREIRA, M. A.; PIGOZZO, B. N. Evolução dos Pré-fabricados de Concreto. In. 1º ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO. 2005, São Carlos. **Anais...** São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2005. p. 1-10.

SINDUSCON-MG (Sindicato da Indústria da construção Civil no Estado de Minas Gerais). **Alternativas Para a Destinação de Resíduos da Construção Civil**. 3ª Edição. Civil. Belo Horizonte: SINDUSCON-MG, 117 p. 2018. Disponível em: <<http://materiais.sindusconmg.org.br/cartilha-gratuita-destinacao-residuos-construcao>>Acesso em: 18 jun de 2021.

SOARES, A. M. M. **Análise estrutural de pórticos planos de elementos pré-fabricados de concreto considerando a deformabilidade das ligações**. 1998. 230 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

TUTIKIAN, B. F., MOLIN, D. C. D. **Concreto Autoadensável**. São Paulo: 2ª edição. Pini, 2015.

VAN ACKER, A. **Manual de Sistemas Pré-Fabricados de Concreto**. 2002.

Disponível em: <<http://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/pre-moldados/Manual%20Fib.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2020

VASCONCELOS, A. C. **O concreto no Brasil: Pré-Fabricação, Monumentos, Fundações**. 1. ed. Rio de Janeiro: Studio Nobel, 2002

VIEIRA, G. L.; MOLIN, D. C. C. D.; LIMA, F. B. de. Resistência e Durabilidade de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados Provenientes de Resíduos de Construção e Demolição. **Engenharia Civil**, [s.l.], n. 18, p. 5-18 2004.

WANG, J.; WU, H.; TAM, V. W. Y.; ZUO, J. Considering life-cycle environmental impacts and society's willingness for optimizing construction and demolition waste management fee: An empirical study of China. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p.1004-1014, 2019.

WERLE, A. P. Determinação de propriedades de concreto com agregados reciclados de concreto, com ênfase na carbonatação. 2010. Dissertação. 162 f. Mestrado em Engenharia Civil pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2010

ZANGESKI, Dahiane dos Santos Oliveira *et al.* **Estudo Comparativo Entre a Resistência à Compressão do Concreto com Agregado Convencional Calcário e com Agregados Recicláveis**. Cuiabá: Universidade de Cuiabá – Unic, 2017.

Disponível em: <https://ensaioseciencia.pgsskroton.com.br/article/view/4860>. Acesso em: 14 ago. 2021.