

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

MATEUS RIZZI

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE UM CONCRETO LEVE UTILIZANDO
VERMICULITA EXPANDIDA**

**BENTO GONÇALVES
2022**

MATEUS RIZZI

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE UM CONCRETO LEVE UTILIZANDO
VERMICULITA EXPANDIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado à Universidade de Caxias do
Sul como requisito parcial à obtenção do
título de bacharel em Engenharia civil.

Orientador: Prof. Me. Maurício Schäfer

BENTO GONÇALVES
2022

RESUMO

RIZZI, Mateus. **ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE UM CONCRETO LEVE UTILIZANDO VERMICULITA EXPANDIDA**. 74p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Caxias do Sul, Área de conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias, Bento Gonçalves, 2022.

A construção civil procura, cada vez mais, tecnologias construtivas para a melhor utilização de materiais em suas edificações, e com base nisso este trabalho procura aprimorar o entendimento da utilização de agregados leves para desenvolvimento de construções mais eficientes. Esta pesquisa tem como objetivo geral revelar as propriedades da utilização de diferentes proporções de um agregado miúdo leve, neste caso a vermiculita expandida, na realização de um concreto leve. Um dos principais benefícios da utilização do concreto leve se dá pela redução da massa específica do material, ocasionando menores esforços na estrutura e diminuição de custos de transporte e produção de estruturas pré-moldadas. A vermiculita expandida é um agregado miúdo de grande importância pela sua baixa massa específica e possui diversas vantagens em suas utilizações na construção civil, sendo algumas delas elevado conforto térmico e acústico. Pensando nisso, e com o crescente número de pesquisas voltadas a entender as características dos agregados leves, a utilização de vermiculita expandida poderá movimentar mais o mercado de trabalho com produtos cada vez mais eficientes e desenvolvendo novas técnicas construtivas. Os estudos foram realizados nos laboratórios da Universidade de Caxias do Sul - UCS, campus CARVI. Este trabalho tem o intuito de estudar o desempenho dos corpos de prova com um traço de 1:2,36:2,64 com a adição de vermiculita expandida em proporções definidas de substituição ao agregado miúdo (10%, 20%, 30%, 40% e 50%), comparando com um concreto convencional referência, entendendo o desempenho de suas propriedades. Os resultados obtidos através dos ensaios feitos neste trabalho mostram que a substituição do agregado miúdo influencia nas propriedades do concreto, devido às suas características. O traço de 40% de substituição foi o que apresentou melhores resultados sendo considerado um concreto leve em quatro das cinco normas estudadas. Podemos entender que no estado endurecido, quanto maior é a porção de substituição da areia, ocorre uma diminuição no desempenho de suas propriedades em relação ao concreto convencional, entretanto mesmo com 40% de substituição, este traço pode ser considerado como concreto estrutural.

Palavras-chave: Concreto leve; vermiculita expandida; agregado leve; redução de densidade; resistência à compressão; construção civil.

ABSTRACT

RIZZI, Mateus. **ANALYSIS OF THE PROPERTIES OF A LIGHTWEIGHT CONCRETE USING EXPANDED VERMICULITE**. 74p. Final paper of Civil Engineering Course - University of Caxias do Sul, Area of knowledge of Exact Sciences And Engineering, Bento Gonçalves, 2022.

Civil construction is increasingly looking for constructive technologies for the best use of material in its buildings, and based on that, this work seeks to improve the understanding of lightweight aggregates for development of more efficient constructions. This research has the general objective of revealing the properties of using different proportions of a light fine aggregate, in this case using expanded vermiculite, in the making of lightweight concrete. One of the main benefits of using lightweight concrete is the reduction of the specific mass of the material, causing less stress in the structure and lowering the cost of transportation and production of precast structures. Expanded vermiculite is a fine aggregate of great importance due to its low specific mass and has several advantages in its uses in civil construction, some of which are high thermal and acoustic comfort. With that in mind, and with the growing number of researches aimed at understanding the characteristics of lightweight aggregates, the use of expanded vermiculite could move the job market more and more with increasingly efficient products and developing new construction techniques. The studies were performed at the laboratory of the University of Caxias do Sul - UCS, CARVI campus. This work aims to study the performance of specimens with a ratio of 1:2,36:2,64 with the addition of expanded vermiculite in defined replacement proportions to the fine aggregate (10%, 20%, 30%, 40% e 50%) comparing with a conventional reference concrete, understanding the performance of its properties. The results obtained through the test carried out in this work show that the replacement of the fine aggregate influences the properties of the concrete, due to its characteristics. The 40% replacement mix was the one that showed the best results, being classified as a lightweight concrete in four of the five standards studied. We can understand that the greater the replacement portion of sand, there is a decrease in performance in relation to conventional concrete, however even with 40% replacement, this trait can be considered as structural concrete.

Keywords: Lightweight concrete; expanded vermiculite; lightweight aggregate; density reduction; compressive strength; civil construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Vermiculita expandida	22
Figura 2: Resíduo de borracha	24
Figura 3: Resíduo de EVA	25
Figura 4: Poliestireno expandido	26
Figura 5: Pedra pomes	26
Figura 6: Argila expandida	27
Figura 7: Intervalos aproximados de valores de massa específica de concretos leves	28
Figura 8: Panteão de Roma	29
Figura 9: BMW Building	30
Figura 10: Classificações de concreto leve	31
Figura 11: Fluxograma do programa da pesquisa	36
Figura 12: Cimento Itambé	39
Figura 13: Agregado miúdo natural	40
Figura 14: Curva da distribuição granulométrica do agregado miúdo natural	41
Figura 15: Agregado graúdo natural	41
Figura 16: Curva da distribuição granulométrica do agregado graúdo natural	42
Figura 17: Vermiculita expandida média	43
Figura 18: Curva da distribuição granulométrica do agregado miúdo leve	44
Figura 19: Corpos de prova em cura úmida	46
Figura 20: Ensaio de resistência à compressão	48
Figura 21: Ensaio de compressão diametral	49
Figura 22: Ensaio do módulo de elasticidade	50
Figura 23: Gráfico do abatimento por traço	52
Figura 24: Gráfico da massa específica	54
Figura 25: Gráfico da resistência à compressão (MPa)	56
Figura 26: Gráfico da resistência à compressão diametral (MPa)	57
Figura 27: Gráfico do módulo de elasticidade	58
Figura 28: Gráfico de absorção de água total	60
Figura 29: Gráfico índice de vazios	61
Figura 30: Gráfico de massa específica aos 28 dias	62
Figura 31: Resultados e classificações das amostras	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classes de resistências do concreto	16
Tabela 2: Principais utilizações dos agregados	18
Tabela 3: Tipos de agregados	20
Tabela 4: Granulometria Vermiculita	22
Tabela 5: Utilização da vermiculita	23
Tabela 6: Valores de referência da massa específica dos concretos leves	28
Tabela 7: Métodos de ensaio	37
Tabela 8: Nomenclatura dos traços	37
Tabela 9: Quantidade de corpos de prova ensaio aos 7 e 28 dias	38
Tabela 10: Características químicas do cimento	39
Tabela 11: Características físicas do cimento	39
Tabela 12: Características físicas do agregado miúdo natural	40
Tabela 13: Características físicas do agregado graúdo natural	42
Tabela 14: Características físicas da vermiculita	43
Tabela 15: Características químicas da vermiculita	44
Tabela 16: Quantidade de material para cada traço	45
Tabela 17: Compensação da água e relação a/c	53

LISTA DE ABREVIATURAS

ABCP	Associação Brasileira do Cimento Portland
aC.	Antes de Cristo
dC.	Depois de Cristo
fck	Resistência característica do concreto à compressão
CP	Cimento Portland
MPa	Mega Pascal
GPA	Giga Pascal
MPa/s	Mega Pascal por segundo
m	Metro
cm	Centímetros
mm	Milímetro
Kg	Quilograma
L	Litro
°C	Grau Celsius
Kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
Kgf/m ²	Quilograma-força por centímetro quadrado
CLE	Concreto leve estrutural
EVA	Acetato-vinílico de etileno
Mg ²⁺	Íon de magnésio positivo bivalente
NBR	Norma Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
nº	Número
ANM	Agência Nacional de Mineração
ACI	American Concrete Institute
EPS	Poliestireno Expandido
μ	Micra
RS	Rio Grande do Sul
SC	Santa Catarina
TCC	Trabalho de conclusão de curso

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. OBJETIVOS	12
1.1.1. Objetivo geral	12
1.1.2. Objetivos específicos	12
1.2. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	13
1.3. DELINEAMENTO DA PESQUISA	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. CONCRETO CONVENCIONAL	14
2.1.1. Características do concreto convencional no estado fresco	15
2.1.2. Características do concreto convencional no estado endurecido	16
2.1.3. Vida útil do concreto convencional	18
2.2. AGREGADOS	19
2.2.1. Tipos de agregados	21
2.2.2. Agregados leves	22
2.2.2.1. Vermiculita expandida	22
2.2.2.2. Resíduo de borracha	24
2.2.2.3. Resíduo de EVA	25
2.2.2.4. Poliestireno expandido	26
2.2.2.5. Pedra pomes	27
2.2.2.6. Argila expandida	28
2.3. CONCRETO LEVE	28
2.3.1. Desenvolvimento histórico	30
2.3.2. Tipos de concreto leve	31
2.3.3. Produção dos concretos leves	33
2.3.4. Propriedades do concreto leve no estado fresco	33
2.3.5. Propriedades do concreto leve no estado endurecido	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	37
3.2. MATERIAIS UTILIZADOS	39

3.2.1. Aglomerante	39
3.2.2. Agregado miúdo natural	40
3.2.3. Agregado graúdo natural	42
3.2.4. Agregado miúdo leve	44
3.2.5. Água	45
3.3. MÉTODOS DE DOSAGEM	45
3.4. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	47
3.4.1. Trabalhabilidade	48
3.4.2. Determinação da massa específica	48
3.5. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	48
3.5.1. Resistência à compressão	48
3.5.2. Resistência à tração por compressão diametral	49
3.5.3. Módulo de elasticidade	50
3.5.4. Absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazios	51
3.6. ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS	52
4. RESULTADOS E ANÁLISES	53
4.1. ESTADO FRESCO	53
4.1.1. Trabalhabilidade	53
4.1.2. Massa específica	54
4.2. ESTADO ENDURECIDO	56
4.2.1. Resistência à compressão	56
4.2.2. Resistência à tração por compressão diametral	58
4.2.3. Módulo de elasticidade	59
4.2.4. Absorção de água total, índice de vazios e massa específica	60
Fonte: Autor (2022).	64
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
5.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

1. INTRODUÇÃO

O concreto encontra-se presente em praticamente todas as construções, sendo elas obras de pequeno e grande porte, ele é o segundo produto mais utilizado no mundo, ficando atrás apenas da água. Por ser um produto que é misturado com materiais que são encontrados de certa forma facilmente, por possuir um vasto número de aplicações, e com facilidade de ser trabalhado, ocasiona o aumento da demanda do mercado da construção civil e proporciona o crescimento da produção de concreto (ROSSIGNOLO, 2009).

Contudo, ao longo dos anos, houve uma importante evolução na tecnologia do concreto quanto ao incremento ou substituição de novos materiais para melhorias em suas propriedades, surgindo concretos especiais como o concreto leve. A substituição dos agregados usualmente empregados por materiais leves pode proporcionar alguns benefícios notáveis como isolamento térmico superior que do concreto convencional, leveza dos agregados, e logo, baixa massa específica do concreto, reduzindo as cargas sobre a estrutura (NEVILLE, 1997; ROSSIGNOLO, 2009).

Segundo estudo de Mehta e Monteiro (2014), os agregados, por possuírem características granulares de dimensões e propriedades que são consideradas como adequadas para construção civil, estão divididos em miúdos e graúdos. Pelo fato do concreto convencional ter uma massa específica de certa forma elevada, um dos fatores responsáveis é o peso dos agregados naturais, porém estes agregados podem ser substituídos por outros de menor massa específica, como por exemplo, utilizando a vermiculita expandida e, conseqüentemente tornando o material composto com menor massa específica e constituindo o concreto leve.

O uso desse agregado proporciona a redução da massa específica do concreto, o que conforme Mehta e Monteiro (2014), teria uma massa específica em torno de 600 Kg/m^3 , permitindo assim a redução do peso próprio dos elementos fabricados com este tipo de material, porém a sua resistência é significativamente menor que o concreto convencional, reduzindo sua área de aplicação (SILVA, 2014). Rossignolo (2009), aponta que o uso de concreto leve estrutural permite a execução de edifícios com múltiplos pavimentos em solos de menor capacidade de carga, tornando possível a construção de estruturas que precisam ser projetadas em situações mais complexas.

Segundo Catoia (2012), a ampla utilização desse material deve-se especialmente aos benefícios promovidos pela diminuição de sua massa específica, como a redução das cargas na estrutura e na infraestrutura das edificações, reduzindo os esforços aplicados nas sustentações, a economia com fôrmas e cimbramentos e pela redução das solicitações devido ao peso próprio. Comparando com o concreto convencional, podendo ter uma

diminuição nos custos com transporte e montagem de construções pré-fabricadas, como falado anteriormente, pela redução no peso dos materiais manuseados e aumento da produtividade nas construções. Apesar da sua durabilidade e resistência, o custo e a qualidade de acabamento do concreto leve podem ser aprimorados.

Atualmente, a aplicação do concreto leve para fins estruturais ainda não é muito utilizada, muito relacionado a dificuldade de se trabalhar com este tipo de material, ao pouco conhecimento sobre ele, por não ter uma distribuição para todas as regiões, a viabilidade econômica, a redução das propriedades mecânicas e falta de normas técnicas para o desenvolvimento de estruturas com este tipo de produto. Devido a estes fatores, este estudo busca apresentar a relevância da análise do comportamento do emprego de agregados leves ao concreto, realizando a produção de misturas com baixo peso específico e a avaliação ao aplicá-lo aos testes de qualidade de concreto. Através do conhecimento mais aprofundado deste material e demonstrando o uso do mesmo em maior escala na construção civil, resultando em obras mais leves, e assim podendo tornar as mesmas mais econômicas, diminuindo a quantidade de matéria prima e permitindo que sejam construídas em situações onde o emprego concreto convencional com alto peso específico não seja possível.

1.1. OBJETIVOS

Os objetivos desta pesquisa estão apresentados como o objetivo geral e os objetivos específicos.

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é identificar a influência da substituição de um agregado miúdo convencional por um agregado miúdo leve, de um concreto convencional frente às suas propriedades físicas e mecânicas.

1.1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

a) Analisar as propriedades no estado fresco de um concreto convencional com diferentes teores de agregado leve em substituição ao agregado natural;

b) Analisar as propriedades no estado endurecido de um concreto convencional com diferentes teores de agregado leve em substituição ao agregado natural;

c) Identificar o desempenho mecânico do concreto utilizando diferentes teores de agregado leve, em substituição de um agregado natural.

1.2. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Alguns critérios foram delimitados para a condução deste trabalho:

- Utilizar vermiculita como agregado miúdo;
- Utilizar traço convencional de 30 MPa;
- Os ensaios serão realizados em laboratório, com acompanhamento profissional.

1.3. DELINEAMENTO DA PESQUISA

O presente trabalho foi dividido em cinco partes, onde nesta primeira parte foi realizada a introdução sobre o assunto que será tratado nesta pesquisa e objetivos. Na segunda parte está descrita a revisão bibliográfica sobre o assunto que será tratado ao longo desta pesquisa. A revisão bibliográfica foi descrita sobre o assunto proposto, a partir de referências de livros, artigos, dissertações e teses. Na terceira parte foi desenvolvido o programa experimental onde foi descrito sobre as propriedades dos materiais que foram utilizados e sobre métodos de ensaios que foram realizados para chegarmos à conclusão deste trabalho, desenvolvendo sempre em referências bibliográficas e em normativas. Na quarta parte foi elaborada a análise dos resultados segundo aos ensaios realizados, esta parte foi dividida em duas partes, onde na primeira foi realizada a análise dos ensaios no estado fresco, e na segunda parte foram analisados os ensaios do estado endurecido do concreto. Na etapa final foram elaboradas as considerações finais da pesquisa, onde está descrita a conclusão do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o desenvolvimento da tecnologia e das técnicas construtivas, foi possível desenvolver com o passar dos anos um concreto de baixa densidade e com diversas vantagens ao utilizá-lo. Além disso, foi estudado mais profundamente as propriedades físicas e mecânicas do concreto no estado fresco e endurecido com a utilização de um agregado leve.

2.1. CONCRETO CONVENCIONAL

O concreto de cimento Portland é um produto que está cada vez mais sendo utilizado em projetos para o desenvolvimento da infraestrutura global, e é o material de construção mais utilizado no planeta. Ele é utilizado em diversas áreas, como fundações, estradas, prédios, barragens entre diversas outras situações. Até os anos de 1970, o concreto continuou sendo "simplesmente" uma mistura de agregados, cimento e água, porém, visando a necessidade de melhorar o desempenho das propriedades do concreto. Houve uma considerável evolução na tecnologia do mesmo, quanto ao incremento ou substituição de novos materiais para melhorias em suas propriedades, surgindo concretos especiais como o concreto leve (ROSSIGNOLO, 2009).

Para se desenvolver um concreto da maneira que conhecemos atualmente, é necessário misturar cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, no qual estado fresco possui consistência plástica e o estado endurecido é caracterizado por uma resistência à compressão elevada, entretanto, uma baixa resistência à tração. Outro fator que está se desenvolvendo é que com o passar do tempo tem-se conseguindo aprimorar os métodos e atingindo concretos com resistências cada vez maiores (SILVA, 2000).

O concreto, como falado anteriormente, é uma mistura de água, cimento, agregados, e dependendo da situação é necessário acrescentar aditivos, dependendo da caracterização procurada para a obra. Na produção do concreto, o bem de maior valor agregado é o cimento, enquanto os agregados, mesmo representando o maior volume, são de menor valor. As razões para o uso tão expandido do concreto são: a facilidade com que elementos estruturais de concreto podem ser executados, numa variedade de formas e tamanhos mais baratos e facilmente disponível no canteiro de obra (MEHTA e MONTEIRO, 2014; PEDROSO, 2009). Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) o concreto convencional que pode ser aplicado por esta norma deve ser com a massa específica de 2.000 Kg/m³ a até 2.800 Kg/m³. O concreto convencional pode também ser usado na fabricação de blocos de concreto, na construção de tubulações, em pisos etc (BOTELHO, 2006).

Concreto armado é um material de construção resultante da união do concreto convencional e de barras de aço, envolvidas pelo concreto, com perfeita aderência entre os dois materiais, de tal maneira que ambos resistam aos esforços a que forem submetidos. O coeficiente de dilatação térmica do aço e do concreto por serem praticamente iguais e o concreto protege de oxidação o aço da armadura garantido a durabilidade da estrutura (SOUZA JUNIOR, MEHTA e MONTEIRO, 2014).

2.1.1. Características do concreto convencional no estado fresco

Segundo a ABCP (2015), a pasta do concreto convencional é a mistura água/cimento, e a sua função é preencher os vazios entre agregados e comunicar uma certa mobilidade ou fluidez à mistura. Sua influência nas propriedades do concreto afeta pontos importantes, como trabalhabilidade, porosidade, permeabilidade, resistência à compressão, durabilidade, entre outros. Segundo Holm e Bremner (1994), quanto maior o índice de água/cimento, maior será a trabalhabilidade da massa de concreto, maior será a porosidade e permeabilidade, porém a resistência será menor. Portanto quanto menor a relação, água/cimento, mais durável será a estrutura.

No estado fresco as partículas constituintes do concreto apresentam-se totalmente misturadas, formando uma pasta fluida capaz de ser moldada em diversas geometrias, esta característica é denominada de trabalhabilidade, e é dada em função da proporção volumétrica das partículas de dimensões distintas e é influenciada pelo tempo e temperatura. O concreto fresco se fortifica com o tempo devido à perda da água e é medido pela perda da trabalhabilidade através da perda de abatimento, entrando no estado endurecido (NEVILLE, 2016).

Segundo a ABCP (2015), concreto é denominado fresco enquanto a pasta estiver no estado fluido ou plástico e permitir uma modificação das partículas constituintes por uma ação dinâmica qualquer. No caso do concreto fresco, muito mais importante que a relação água/cimento é o teor de água/mistura seca, ou seja, a percentagem da massa de água em relação à massa da mistura seca (cimento + agregado), são parâmetros de grande importância na sua dosagem. Um ponto importante é que não se pode produzir concreto endurecido de alta qualidade se o concreto no estado fresco não tiver propriedades satisfatórias. A mais importante dessas propriedades é, sem dúvida, a trabalhabilidade, que na verdade agrupa várias propriedades fundamentais do concreto fresco.

Segundo Bauer (2000) a trabalhabilidade depende principalmente das condições do local da aplicação do concreto, ou seja, um concreto adequado para peças de grandes dimensões e pouco armado pode não ser para peças delgadas e muito armadas. A cura do

concreto é um conjunto de medidas que têm por objetivo evitar a evaporação da água utilizada na sua mistura e que deverá reagir com o cimento, hidratando-o. Todas as qualidades desejáveis do concreto como a resistência mecânica à ruptura e ao desgaste, impermeabilidade e resistência a ataques de agentes agressivos são extremamente favorecidas e até mesmo somente conseguidas através de uma boa cura.

De acordo com a NBR 9833 (ABNT, 2008), o controle do teor de ar é fundamental no controle de qualidade do concreto, desde verificar limites máximos e mínimos de ar incorporados ou para identificar teores de vazios de ar no concreto. Para o concreto convencional pode-se adotar que terá um teor de ar incorporado de aproximadamente 1,5% a 2% e massa específica de cerca de 2.500 Kg/m³ (BARBAR, 2016).

2.1.2. Características do concreto convencional no estado endurecido

A propriedade fundamental do concreto, a resistência à compressão, pode ser definida como a capacidade do material de suportar ações aplicadas sem que ocasione colapso. Ela é utilizada como parâmetro que indica a qualidade do concreto, por estar diretamente relacionada com a estrutura da massa de cimento endurecida (NEVILLE, 1997; ISAIA, 2005). Segundo Petrucci (1998) as principais causas da porosidade do concreto são: é sempre necessário utilizar uma quantidade de água superior à que se precisa para hidratar o aglomerante, e essa água, ao evaporar, deixa vazios; com a combinação química, diminuem os valores absolutos de cimento e água que entram em reação; inevitavelmente, durante a mistura do concreto, incorporando as à massa.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), a classificação de resistência do concreto ocorre com base no valor do fck, expresso em MPa, denominada concreto simples (caso a massa específica seca estiver compreendida entre 2.000 Kg/m³ e 2.800 Kg/m³) ou denominado concreto leve (caso a massa específica for inferior a 2.000 Kg/m³). Caso ela não for conhecida, para efeitos de cálculo, pode-se adotar 2.400 Kg/m³. De acordo com a NBR 8953 (ABNT, 2015), que classifica o concreto para fins estruturais quanto ao seu grupo de resistência, os concretos são classificados em grupos I e II, conforme sua resistência característica à compressão (fck). Grupo I com resistência à compressão de 10 MPa a 50 MPa, e o grupo II com resistência a compressão de 55 MPa a 100 MPa. Podendo ser melhor observado na Tabela 1.

Tabela 1: Classes de resistências do concreto

Classificação de resistência	Resistência característica à compressão (MPa)	Grupo
C10	10	I
C15	15	I
C20	20	I
C25	25	I
C30	30	I
C35	35	I
C40	40	I
C45	45	I
C50	50	II
C55	55	II
C60	60	II
C70	70	II
C80	80	II
C90	90	II
C100	100	II

Fonte: Adaptada NBR 8953 (ABNT, 2015).

Segundo Araújo (2001), de maneira análoga, a resistência à tração do concreto apresenta uma significativa variabilidade em torno de um valor médio. Em geral, essa variabilidade é maior do que a verificada para a resistência à compressão. De acordo com Neville (1997), a correlação amplamente utilizada de que a resistência à tração do concreto corresponde a 10% da sua resistência à compressão não pode ser feita livremente.

Com base pesquisa de Mehta e Monteiro (2014), podemos entender que a estrutura de uma pasta endurecida de concreto não é homogênea, sendo assim, não é a porosidade total que influencia efetivamente a resistência, a permeabilidade e as variações em volume em uma pasta de cimento endurecida, mas sim a distribuição e os tamanhos dos poros. Essa distribuição é afetada pela relação água/cimento e pela idade de hidratação do cimento. Concretos convencionais endurecidos contêm em seu interior, mesmo sem uso de aditivos incorporadores de ar, teores entre 1% e 3% de seu volume na forma de ar aprisionado. No entanto, esse ar aprisionado consiste em cavidades microscópicas de formas irregulares, absolutamente ineficazes se comparadas com o ar incorporado sob a forma de microbolhas esferas de diâmetros entre 100 μ e 500 μ (AGNESINI, 1988).

2.1.3. Vida útil do concreto convencional

A questão da vida útil das estruturas de concreto deve ser considerada como resultante de ações coordenadas e realizadas em todas as etapas do processo construtivo, levando em consideração na fase de projeto, se a estrutura é capaz de desenvolver as funções que foi projetada, sem que haja necessidade de interferência (HELENE, 2002). Na norma NBR 5674 (ABNT, 2020), é estabelecido requisitos de gestão do sistema de manutenção de edificações, para evitar a queda de desempenho. Nesta norma podemos entender que a manutenção preventiva é fundamental tanto para garantir a segurança dos usuários da edificação, quanto a valorização do edifício. Estas manutenções podem ser desde pequenas infiltrações, como grandes patologias, que podem comprometer a estrutura de concreto.

Segundo Helene (2002), a durabilidade da estrutura do concreto é determinada por quatro fatores identificados como regra dos 4C: composição ou traço do concreto; compactação ou adensamento efetivo do concreto na estrutura; cura efetiva do concreto na estrutura; cobrimento das armaduras. Os quais dependem da variação dos diferentes meios agressivos do meio ambiente nos arredores da construção, também pela composição e dosagem do concreto, ou pelo tipo e consumo do cimento e/ou adições, entre outros.

Neville (1997), afirma que a capacidade do concreto em manter suas propriedades e resistir às ações de agentes externos durante um determinado período, é conhecida como sendo a durabilidade do material. A durabilidade inadequada se manifesta por uma deterioração que pode ser originada por fatores externos ou por causas internas no interior do próprio concreto. As diferentes formas de ação podem ser físicas, químicas ou mecânicas. Para as estruturas em concreto armado, a NBR 6118 (ABNT, 2014) recomenda que as estruturas tenham vida útil de 50 anos.

Segundo a norma NBR 15575 (ABNT, 2021), edificações precisam ser pensadas para ter uma vida útil elevada e sem maiores problemas para os usuários. Podemos observar que ela pode ser aplicada para diversos tipos de edificações, apresentando medidas que devem ser tomadas para melhorar o desempenho, capacidade térmica, degradação, durabilidade, vida útil de projeto, entre outros. Nesta norma, estão descritos os requisitos de gerenciamento e segurança que devem ser tomados para que a edificação possa ser mais bem utilizada.

Para evitar o envelhecimento precoce e satisfatório às exigências de durabilidade da obra devem ser observados os seguintes critérios de projeto: prever drenagem eficiente; garantir concreto de qualidade apropriada; garantir corrimentos de concreto apropriados para proteção às armaduras; detalhar adequadamente as armaduras; evitar formas

arquitetônicas e estruturais inadequadas; controlar a fissuração das peças; prever espessuras de sacrifício ou revestimentos protetores em regiões sob condições de exposição ambiental muito agressivas; definir um plano de inspeção e manutenção preventiva (HELENE, 2002).

2.2. AGREGADOS

Conforme a Tabela 2, a construção civil tem a disponibilidade de diversos tipos de agregados para a utilização, segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM, 2022), estes agregados são materiais granulares, sem forma e volume definidos, de dimensões e propriedades estabelecidas para uso em obras de engenharia civil. Um exemplo muito utilizado é a pedra britada, e as areias naturais ou obtidas pela moagem de pedras, entre outros.

Os agregados podem ser naturais ou artificiais. Os naturais são os que se encontram de forma particulada na natureza (areia, cascalho ou pedregulho) e os artificiais são aqueles produzidos por algum processo industrial, como as pedras britadas, areias artificiais, escórias de alto-forno e argilas expandidas, entre outros (Cuchierato, 2000; Albuquerque, 1994). Os usos dos agregados miúdos e agregados graúdos estão relacionados ao seu tamanho e granulometria, e grande parte da matéria extraída é utilizada com uma mistura de aglomerados para a utilização em diversas áreas (ANM, 2022).

Tabela 2: Principais utilizações dos agregados

PRINCIPAIS UTILIZAÇÕES DOS AGREGADOS	
Areia Artificial e Areia Natural	Assentamento de blocos, tubulação em geral, tanques, podendo entrar na composição de concreto e asfalto.
Pedrisco	Confecção de pavimentação asfáltica, lajotas, blocos, intertravados, lajes, jateamento de túneis e acabamentos em geral.
Brita 1	Intensivamente na fabricação de concreto, com inúmeras aplicações, como na construção de pontes, edificações e grandes lajes.
Brita 2	Fabricação de concreto que exija maior resistência, principalmente em formas pesadas.
Brita 3	Utilizada principalmente em ferrovias.
Brita 4	Destinado a obras de drenagem, como drenos sépticos e fossas.
Pedra de mão ou pedra marroada	Fabricação de gabiões, muros de contenção e bases.
Brita graduada	Em base e sub-base, pisos, pátios, galpões e estradas.

Fonte: Adaptada, Kulaif (2001).

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2019) define areia ou agregado miúdo como areia de origem natural ou resultante da britagem de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT de 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT de 0,075 mm. Define ainda agregado graúdo como pedregulho ou brita proveniente de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT de 4,8 mm.

Os agregados miúdos e graúdos, apresentam uma composição granulométrica mais contínua e com maior número de finos, e com isso uma granulometria de certa forma bem distribuída, dentro da faixa de tamanhos imposta pela norma. Esses agregados permitem uma interação física entre os grãos, contribuindo para uma consistência, ou seja, melhor arranjo e maior resistência mecânica entre na composição (SANTOS, 2011; NEVILLE, 1997). Em seu estado fresco, os agregados com uma granulometria mais contínua, apresentam na mistura de concreto, uma granulometria trabalhável e econômica (MEHTA e MONTEIRO, 2014). No estado endurecido a granulometria proporciona um concreto mais denso, fortalecendo as propriedades mecânicas do concreto (OLIVEIRA, 2012).

O concreto pode interagir sobre a trabalhabilidade e resistência, a granulometria dos agregados é um importante parâmetro para a dosagem (SANTOS, 2011). Deste modo alguns aspectos são importantes como: módulo de finura, teor de finos e dimensão máxima do agregado. Porém, quanto maior o módulo de finura e a dimensão máxima característica, maior será o tamanho das partículas, o que diminui sua superfície específica, a fim de reduzir a necessidade da pasta em lubrificar os grãos, além de diminuir a água para molhar a superfície dos agregados (LEITE, 2001).

A forma e a textura superficial das partículas influenciam principalmente as propriedades do concreto no estado fresco em relação ao estado endurecido. Quanto à forma dos grãos, os agregados podem ser classificados como arredondados, angulosos ou lamelares (MEHTA e MONTEIRO, 2014). A textura superficial é classificada e definida dependendo de quanto a superfície do agregado é lisa ou áspera, e pode ser classificada principalmente como vítrea, lisa, áspera ou porosa (NEVILLE, 1997).

As substâncias patogênicas podem eventualmente ficar contidas nos agregados miúdos e graúdos. Essas substâncias podem se apresentar sob a forma de argila em torrões e materiais quebradiços, materiais poeirentos, ou impurezas orgânicas e devem ter os seus teores limitados a NBR 7211 (ABNT, 2019), de maneira a nunca prejudicar a qualidade do concreto, como por exemplo, a trabalhabilidade, a resistência, a durabilidade, a pega ou o endurecimento (MORAVIA, 2007).

2.2.1. Tipos de agregados

A norma NBR 7211 (ABNT, 2019) fixa as características exigíveis na recepção e produção de agregados, miúdos e graúdos, de origem natural, encontrados fragmentados ou resultantes da britagem de rochas. Conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Tipos de agregados

Tipos de agregados	Descrição
Agregado graúdo	Pedregulho ou brita proveniente de rochas estáveis, com grãos que ficam retidos na peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm 75 mm e ficam retidos na peneira ABNT até a peneira de 4,8mm.
Agregado miúdo	Areia de origem natural ou resultante de britagem de rochas estáveis (ou a mistura de ambas), com grão que passam pela peneira ABNT 4,8mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075mm.
Agregados leves, normais ou pesados	O que define é a massa específica aparente. Nesse quesito, podem ser divididos em leves (argila expandida, pedra-pomes e vermiculita), normais (pedras britadas, areias e seixos) e pesados (hematita, magnetita e barita).
Agregados artificiais ou naturais	Como artificiais, seriam as areias e pedras provenientes do britamento de rochas, pois necessitam da atuação do homem para modificar o tamanho dos grãos. Já em relação aos agregados naturais, existem as areias extraídas de rios ou barrancos e os seixos rolados, isto significa, que são aqueles que já se encontram na natureza.

Fonte: Adaptada NBR 7211 (ABNT, 2019).

Segundo Moravia (2007), os agregados graúdos e miúdos normalmente são encontrados relativamente próximos ao destino final, são coletados em mineradoras e leitos de rios nas proximidades. Já os agregados leves ou pesados são necessários procurar qual é o mais comumente utilizado nas regiões para ver se há fácil disponibilidade, dependendo para qual será a utilização, e os artificiais são os obtidos por tratamento térmico de uma variedade de materiais.

Na utilização de um agregado altamente poroso, com dimensão máxima maior que 19 mm, a massa específica do concreto pode ser reduzida, mas o produto pode não atingir a resistência exigida para concretos estruturais de qualidade. Isso é devido ao aumento do volume de vazios decorrente do aumento da dimensão do agregado. O uso de areia natural para aumentar a resistência mecânica do concreto leve tende a aumentar sua massa específica, mesmo que essa tendência seja parcialmente compensada pelo efeito oposto ao do ar incorporado, que é muitas vezes utilizado para melhorar a trabalhabilidade (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

2.2.2. Agregados leves

Segundo Pereira (2012), o termo agregado leve serve para caracterizar um agregado de massa específica baixa. Para concretos leves estruturais essa massa é limitada a cerca de um a dois terços da massa específica dos agregados normais, embora essa característica seja diretamente influenciada pela classificação e forma das partículas. As características de peso e resistência das partículas são as duas propriedades técnicas mais importantes de um agregado leve.

Quanto à origem, existem dois tipos de agregados leves: os agregados leves naturais, provenientes da natureza, e os agregados leves artificiais ou sintéticos, confeccionados em fábricas através de processo de aquecimento da matéria prima (SANTIS, 2012). De acordo com Rossignolo (2009), os agregados leves naturais (pedra-pomes e tufo vulcânico) apresentam muita variação em suas propriedades, limitando seu uso em concretos estruturais. Já os agregados leves artificiais (argila expandida, escória sintetizada e vermiculita) são classificados de acordo com sua matéria prima.

2.2.2.1. Vermiculita expandida

A vermiculita, ilustrada na Figura 1, é um silicato hidratado de magnésio, alumínio e ferro, com uma estrutura micáceo-lamelar e clivagem basal. É um membro de minerais de argila, produzidos por decomposição de micas, apresentando uma estrutura de camadas. Os intervalos entre as camadas contêm moléculas de água e cátions, principalmente Mg^{2+} , característica responsável pelo seu elevado índice de expansão (DEER et al., 1992).

O material é inodoro, incombustível, imputrescível, não deteriorável e não alergênico, além de possuir estabilidade química e não conter elemento tóxico, tão pouco amianto em sua composição (Global Minérios, 2022). Dentre os agregados leves, a vermiculita se mostra como o agregado que gera o concreto com menor massa específica, chegando a impressionantes 300 Kg/m^3 , ainda que sem função estrutural (MICHEVIZ, SANTOS, TEIXEIRA, 2011).

A vermiculita é um mineral formado pela superposição de finíssimas lamínulas, que submetida a altas temperaturas, em fornos que chegam a acima de 1.300°C , sofre expansão de 15 vezes o seu volume original, constituindo-se no produto industrializado, denominado vermiculita expandida. Possui múltiplas e interessantes utilizações em vários setores da indústria e da agricultura. Os espaços vazios originados desta expansão volumétrica são preenchidos por ar, que a caracteriza como leveza, e ao mesmo tempo

isolamento térmico e acústico (ROSSIGNOLO, 2009). Na Tabela 4 podemos observar a granulometria da Vermiculita.

Tabela 4: Granulometria Vermiculita

Padrão Internacional	Tamanho (mm)	Densidade (kg/m ³)
Grossa	-	64 - 85
Média	55-95%>2,4	82 - 90
Fina	65-95%>1,2	75 - 112
Superfina	70-95%>0,6	80 - 144
Micrômetro	80-100%>0,3	90 - 160

Fonte: Adaptada de Reis (2002).

Figura 1: Vermiculita expandida



Fonte: Grupo Refratil Refratários (2022).

Na forma a granel, é utilizado como isolante termo-acústico, em lajes, paredes duplas, salas de som, salas de espetáculos, cinemas, igrejas, etc. Em associação com cimento, é utilizado na regularização de lajes, na conformação do caimento para os pontos de captação pluvial, antes da impermeabilização, na fabricação de painéis de fechamento de prédios, casas pré-fabricadas, galpões, entre outros (SILVA, 2014).

Em associação com cimento e aditivos, é utilizado na elaboração de elementos pré-fabricados como lajota, bloco vazado, blocos maciços, elementos vazados, elementos decorativos para fachadas e jardins, pedras artificiais, argamassa de reboco termo-acústico, barreira de proteção corta-fogo (GLOBAL MINÉRIOS, 2022).

Na Tabela 5, segundo o site do próprio minerador (Global Minérios, 2022), está escrito algumas utilizações da vermiculita, podendo ser utilizada em diversos passos da construção.

Tabela 5: Utilização da vermiculita

Utilização da vermiculita	
Construção civil	Pode ser utilizada para diversas finalidades, sendo elas preenchimento de contrapisos, aplicado em paredes ou forros para ter uma isolamento termo acústico, ajuda na impermeabilização da laje de cobertura, tem características muito favoráveis para a utilização em portas contra fogo, pode ser utilizada para aplicação de reboco isolante, entre outros.
Indústria	É muito utilizada para a fabricação de tijolos, placas e argamassas refratárias isolantes, tem um bom isolante térmico podendo ser usada para a fabricação de fornos, chaminés e dutos, é um material anticorrosivo, é um material com características relevantes para a fabricação de câmaras frias, entre outros.
Paredes	Para ter um resultado adequado, as paredes devem receber antes um chapisco de areia e cimento fino, com as paredes bem secas, aplicar uma camada de até 3 cm, em seguida utilizar um traço de 5:1 (Vermiculita:Cimento) e adicionando 25% de água sobre o volume utilizado de vermiculita, após aproximadamente 3 dias, quando estiver bem seco, aplicar uma nova camada, repetindo o processo até uma espessura adequada para a parede. Recomenda-se uma espessura mínima de 3 cm. E para finalizar, fazer uma camada de aproximadamente 1 cm para dar um acabamento ao reboco.
Lajes descobertas	Para que a laje tenha um bom acabamento, é preciso que seja regularizada a superfície da laje, deixando um caimento mínimo de 1%, em seguida faça a impermeabilização. Aplique argamassa de vermiculita na espessura de 3 a 5 cm. Depois de bem seco fazer a proteção com argamassa de areia e cimento com um traço de 4:1 (Vermiculita:Cimento).
Contrapiso	Para ter um bom acabamento, regularize a superfície da laje, deixando caimento mínimo de 1%, em seguida fazendo a impermeabilização planejada na obra, e assim que possível, aplique argamassa de vermiculita na espessura de 2 a 3 cm, depois de bem seco fazer a proteção com argamassa de areia e cimento. Caso haja trânsito de qualquer espécie, é recomendado uma proteção mecânica da camada de isolante com uma argamassa de cimento x areia traço 1:3 (Vermiculita:Cimento) com no mínimo 2 cm de espessura.
Paisagismo	É um mineral muito utilizado na agricultura, é um excelente material contentor para nutrientes, inseticidas, herbicidas, fungicidas e fumigantes. Também é um ótimo condicionador de solos, e retentor de água em solos permeáveis, arenosos por exemplo.

Fonte: Adaptada de Global Minérios (2022).

2.2.2.2. Resíduo de borracha

Se trata da reciclagem de resíduos industriais, como sobras e destino final de pneus, como mostra na Figura 2, misturando com a argamassa ou concreto para deixar a densidade da estrutura um pouco mais baixa. Hoje há uma necessidade para a preservação do meio ambiente, redução do custo e consumo de energia na produção de materiais e componentes de construção (DIERKS, 2008).

Algumas pesquisas têm confirmado a viabilidade da utilização de resíduos de borracha de pneu nos concretos. Fioriti et al. (2010) concluíram nos resultados obtidos em blocos intertravados confeccionados com concreto com resíduos de pneus, que a utilização para uso em ambientes com solicitações leves, por exemplo, em calçadas, praças, ciclovias e condomínios residências são viáveis, apresentando resultados satisfatórios.

Granzotto e Souza (2013) relataram que quanto maior a quantidade de resíduo de borracha adicionado ao concreto, menor será a massa específica aparente, ressaltando que no concreto sem resíduo se tem uma massa específica média de 2.420 Kg/m^3 . Enquanto no concreto com substituição de 15% em massa da areia por resíduo de borracha, a massa específica média é de 2.239 Kg/m^3 .

Figura 2: Resíduo de borracha



Fonte: Dana, 2022.

2.2.2.3. Resíduo de EVA

A aplicação do EVA como carga de concreto diminui o peso estrutural, reduzindo o risco de rachaduras e fissuras, e diminui a quantidade de cimento necessária para a construção da obra. Também apresenta um excelente isolamento acústico e térmico, proporcionando muito maior conforto no interior das construções (GARLET, 1998).

Segundo estudo de Andrade e Medeiros (2012), as principais características do EVA são a grande resistência às quebras sob tensões, atóxico, flexibilidade, elasticidade similar à da borracha, baixo preço, material termofixo, ótima transparência e facilmente moldável. Suas aplicações mais comuns são em embalagens, vestuário, calçados, medicina, comunicação e eletricidade, construção civil, entre outros.

Os resíduos de EVA (Figura 3) não são biodegradáveis, causando acúmulo em aterros, e por ser um polímero termofixo e termorrígido não podem ser reprocessados, pois, se decompõem pelo reaquecimento. Seu armazenamento ou deposição a céu aberto

provoca problemas que vão desde a poluição visual até a possibilidade de propagação de insetos e também de combustão deste material (GARLET, 1998; ANDRADE et al., 2012).

Figura 3: Resíduo de EVA



Fonte: AMS EVA, 2022.

2.2.2.4. Poliestireno expandido

Entre os materiais utilizados como agregados leve, o Poliestireno Expandido (EPS), ilustrado na Figura 4, destaca-se por ser um material isolante térmico, leve devido sua baixa densidade, resistente, fácil de manusear e de baixo custo (FIGUEIREDO, 2016). Segundo Souza (2002), as principais características deste material são a sua baixa condutividade térmica (97% de seu volume é ar) que dificulta a passagem do calor, a densidade que é entre 10 e 30 Kg/m³ reduzindo significativamente o peso da estrutura, resistência à compressão que varia de 7.000 Kgf/m² a até 14.000 Kgf/m² superando a resistência de muitos solos, econômico em praticamente todos os sentidos, entre outros.

O EPS pode ser usado em diversos tipos de aplicações, quando utilizado na confecção de concretos. Os segmentos mais utilizados são: pré-fabricados, elementos de vedação internos, isolante térmico e acústico, elementos resistentes à propagação do fogo, casas pré-fabricadas, tijolos, blocos, entre outras (ROCHA, FIGUEIREDO, ALTRAN, 2016).

Figura 4: Poliestireno expandido



Fonte: Termotécnica, 2022.

2.2.2.5. Pedra pomes

É uma rocha vulcânica de baixa densidade, caracterizada por grande quantidade de vazios em seu interior, com textura de espuma e com massa específica entre 500 e 900 Kg/m^3 . A pedra-pomes (Figura 5) é um importante inerte utilizado na construção civil como material de aterro ou preenchimento, e como aditivo em concretos de baixa densidade, embora com baixa resistência à compressão. Quando usado como aditivo ao cimento, sob a forma de uma pozolana de granulometria muito fina, produz um concreto leve e plástico, muito utilizado em rebocos e revestimentos (VIEIRA, 2000). Neville (1997), as variedades de pedra pomes são muito fracas a ponto de vista estrutural, produzem concretos com massas específicas entre 800 e 1.800 Kg/m^3 com boas características isolantes, com elevada absorção e grande retração.

Figura 5: Pedra pomes



Fonte: Silva, 2014.

2.2.2.6. Argila expandida

A aplicação de argila expandida é um dos procedimentos utilizados na construção civil para a formação de concreto leve e por isso é amplamente versátil para fechamentos e fundações de edifícios, recuperações estruturais e até mesmo projetos de pontes. Além disso, este produto é incombustível, possui um ótimo isolamento térmico e acústico, proporciona mais estabilidade e é muito prático de aplicar (HOLM e BREMNER, 1994). Segundo Neville (1997), concretos feitos com agregado de argila geralmente têm resistências maiores do que com outros agregados leves.

O procedimento de fabricação da argila expandida utilizada neste tipo de concreto, conforme Moravia (2007), consiste no método de obtenção artificial, fazendo-se uso do forno rotativo a gás ou óleo diesel, a uma temperatura de 1.200 °C. Segundo Rossignolo (2009), nesta temperatura parte da matéria se funde formando uma massa viscosa, enquanto a outra parte sofre decomposição, liberando gases que se aderem a massa, expandindo-a em até 7 vezes seu volume inicial, na Figura 6 podemos observar seu estado final. Durante este método forma-se externamente a partícula de argila, uma camada vitrificada com baixa porosidade.

Figura 6: Argila expandida



Fonte: Global Minérios, 2022.

2.3. CONCRETO LEVE

Concretos leves são caracterizados pela baixa massa específica total em relação a concretos convencionais, conseqüentes da substituição da parte sólida dos materiais por ar. O concreto convencional possui uma densidade aproximada de 2.300 Kg/m³, e o concreto leve possui uma densidade aproximada de 1.850 Kg/m³. Existem diversos materiais que podem ser utilizados para a mistura de um concreto leve, sendo materiais que substituirão o agregado graúdo ou o agregado miúdo. As principais propriedades dos concretos

influenciadas pela substituição dos agregados tradicionais por agregados leves são a massa específica, trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de elasticidade, propriedades térmicas, retração, fluência e espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz do cimento (NEVILLE, 1997; ROSSIGNOLO, 2009).

De acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2006), concreto leve é o concreto que quando endurecido e seco em estufa possui uma massa específica entre 800 Kg/m³ e 2.000 Kg/m³, e de acordo com ACI 213R (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2003), deve apresentar uma resistência à compressão maior que 17,2 MPa e massa específica em torno de 1.120 Kg/m³ a 1.920 kKg/m³. Porém a NBR 6118 (ABNT, 2014) exige resistência mínima de 20 MPa para concretos estruturais.

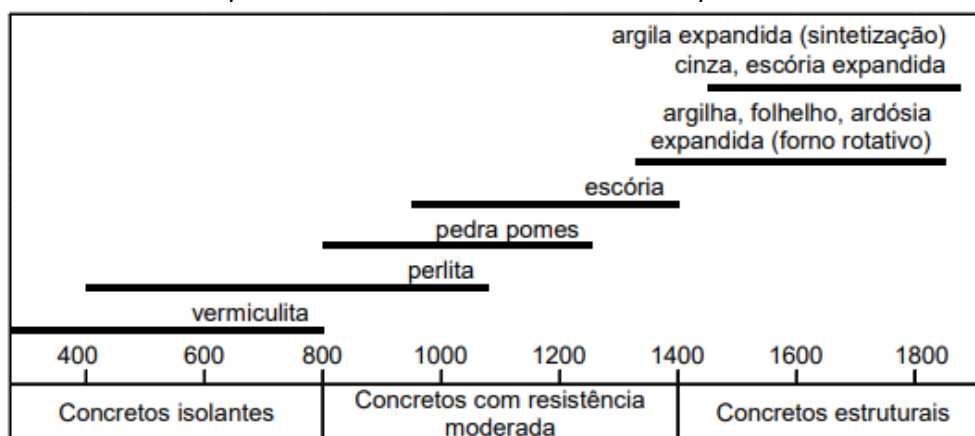
Tabela 6: Valores de referência da massa específica dos concretos leves

Referência	Massa específica aparente (Kg/m ³)
NM 35 (1995)	1.680 < γ < 1.840
ACI 213R-03 (2003)	1.120 < γ < 1.920
EUROCODE 2 (2007)	900 < γ < 2.000
RILEM (1975)	γ < 2.000
CEB-FIP (1977)	γ < 2.000

Fonte: Rossignolo, 2009.

Conforme ilustrado na Figura 7, utiliza-se a designação concreto leve para identificar concretos com massa específica inferior aos concretos tradicionais, que podem ser obtidos com a utilização de agregados leves (ROSSIGNOLO, 2009). Pela classificação da American Concrete Institute, por meio da norma ACI 213R (2003) e segundo Mehta & Monteiro (2014), são três os grupos existentes nessa classificação.

Figura 7: Intervalos aproximados de valores de massa específica de concretos leves



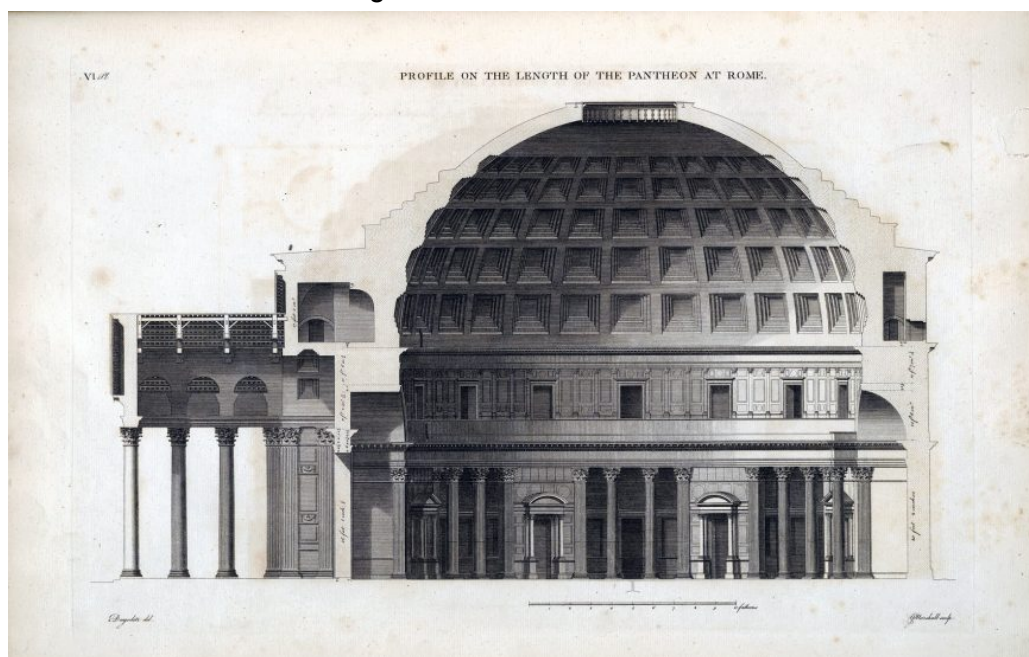
Fonte: Traduzida ACI 213R-87, 1995.

Nos dias atuais é comum relacionar a massa específica com a resistência à compressão no que se refere aos concretos leves. Pois, concretos com baixas massas específicas acabam tendo baixa resistência e concretos com elevadas massas específicas tem alta resistência mecânica (CHANDRA; BERNTSSON, 2002).

2.3.1. Desenvolvimento histórico

O primeiro registro da utilização de concreto leve se acredita que seja de aproximadamente 3000 anos atrás, quando construtores pré-colombianos utilizaram uma mistura de pedra pomes com um aditivo ligante a base de cinzas vulcânicas e cal para a construção de elementos estruturais (VIEIRA, 2000). Segundo Mitidieri (1976), os concretos leves também foram utilizados pelos romanos, com a necessidade de reduzir as cargas da estrutura, onde utilizaram um ligante à base de cal e rochas vulcânicas. Um dos exemplos das construções romanas que foi utilizada essa forma de construção foi na reconstrução do Panteão de Roma (Figura 8), após ter sido consumido por um incêndio por volta de 80 dC, e passando alguns anos, o Imperador Adriano propôs uma reforma por volta dos anos 125 - 126 dC. Nesta reforma foi construída a cúpula deste local, ela possui 43,4 m de diâmetro e sua altura interna, do piso ao teto, é igual ao seu diâmetro, pesa 4.500 toneladas e até os dias de hoje está em perfeito estado de conservação, o concreto leve utilizado foi uma mistura de pedra pomes e está a quase 2000 anos suportando o peso da estrutura da cúpula.

Figura 8: Panteão de Roma



Fonte: Pantheon.

O concreto leve como conhecemos hoje é considerado como um produto consequente do desenvolvimento da tecnologia em concreto e que tem sido usada desde o início do século passado com intuito estrutural e para reduzir o peso da própria estrutura, e vem obtendo excelentes resultados (ROSSIGNOLO, 2003). Após a Segunda Guerra Mundial, houve um aumento considerável dos estudos e aplicações estruturais deste concreto. A partir dos anos 1960, diversos edifícios foram construídos utilizando concreto leve estrutural, como Park Regis na Austrália em 1968 e o BMW Building na Alemanha em 1972 (Figura 9), por exemplo. Durante a próxima década, com o aprimoramento da tecnologia dos concretos e desenvolvimento de novos materiais, como as adições pozolânicas e aditivos redutores de água, se tornou mais fácil a obtenção de concreto leves duráveis e com elevada resistência mecânica (ROSSIGNOLO, 2009; AGNESINI, 2005).

Figura 9: BMW Building



Fonte: BMW, 2014.

Já no Brasil, os estudos e utilização dos concretos leves se iniciou por volta dos anos 1970, com o início da produção de argila expandida, para fornecer a uma empresa de elementos pré-fabricados. A principal utilização do concreto leve estrutural no Brasil é para itens pré-moldados (ROSSIGNOLO, 2003).

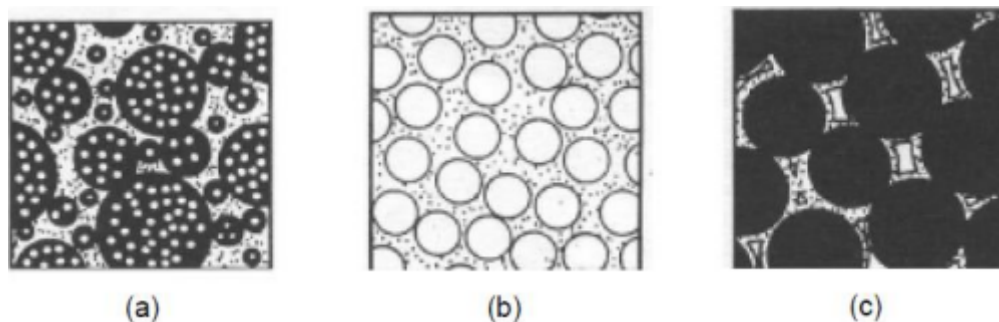
2.3.2. Tipos de concreto leve

Segundo estudo de Catoia (2012), os concretos leves podem ser classificados conforme sua estrutura, conforme Figura 10, em:

- a) Concretos com agregados leves, onde apresenta maior aplicação estrutural;

- b) Concretos aerado, onde se baseiam na introdução de grandes vazios no interior da massa de concreto;
- c) Concreto sem finos, que consistem simplesmente em eliminar o agregado miúdo do concreto, formando uma grande quantidade de vazios.

Figura 10: Classificações de concreto leve



Fonte: Moravia (2007).

O concreto de agregado leve abrange um campo consideravelmente amplo, devido à variedade de tipos destes agregados, que permitem a produção de concretos leves com diferentes tipos de aplicação. Como principais aplicações, os concretos de agregados leve são utilizados em estruturas na forma de peças pré-moldadas. Quando comparado aos outros tipos de concreto leve, o concreto de agregado leve pode atingir resistências à compressão maiores, podendo ser usado estruturalmente (MORAVIA, 2007).

O concreto leve aerado possui dois tipos, no primeiro é adicionado um gás na massa ainda fresca para que quando se endureça, tenha bolhas de ar no interior do concreto. Já o segundo método é utilizado um agente espumante na massa, onde com uma elevada rotação se espalha para todo o concreto, assim também formando bolhas de ar. O concreto aerado apresenta retrações maiores do que nos concretos de agregados leves com igual resistência, devido à falta do agregado graúdo neste tipo de concreto. E também devido a alta porosidade do concreto, as armaduras podem estar vulneráveis à corrosão, por isso recomenda-se utilização de imersão em líquidos anticorrosivos (MORAVIA, 2007).

Já o concreto sem finos, segundo Moravia (2007), é obtido suprimindo-se o agregado miúdo, o concreto sem finos é constituído somente de cimento, agregado graúdo e água. Por esse motivo, grandes poros no interior do concreto, que são os responsáveis pela baixa resistência mecânica e pela redução de massa específica. Seu custo é relativamente baixo pois o teor de cimento pode chegar a valores pequenos, e sua massa específica depende principalmente da granulometria do agregado graúdo.

Normalmente os concretos sem finos não são usados em concreto armado, mas quando necessário, a armadura deve ser revestida por uma camada fina, aproximadamente

3 mm, de pasta de cimento, para melhorar a aderência. Este tipo de concreto é mais utilizado em painéis para isolamento térmico e acústico. Para agregados convencionais, a massa específica dos concretos sem finos varia entre 1.600 Kg/m³ e 2.000 Kg/m³, mas usando-se agregados leves obtém-se massas específicas de até 640 Kg/m³ (NEVILLE, 1997).

Em sua pesquisa, Neville (1997), destaca que evidente que a presença destes vazios reduz a resistência do concreto leve em relação ao concreto normal, mas em muitas aplicações a resistência não é fundamental. Os concretos leves proporcionam um bom isolamento térmico, e tem uma durabilidade satisfatória, mas não são muito resistentes à abrasão.

2.3.3. Produção dos concretos leves

Segundo Holm e Bremner (2000), para a mistura do concreto leve, pode-se aplicar as mesmas formas utilizadas para o concreto convencional, porém deve-se observar as características dos agregados leves que estão sendo utilizados. Como por exemplo observar a quantidade de água que o material está absorvendo e ajustar para que não prejudique suas propriedades. Para o adensamento do concreto, pode-se utilizar as mesmas técnicas de concreto convencional, porém os concretos leves necessitam de maior tempo de vibração para evitar segregação.

E para o procedimento de cura, pode-se adotar o mesmo processo dos convencionais, apenas observar a temperatura para não prejudicar a resistência do concreto. Uma característica interessante é que como o concreto leve possui uma porcentagem maior de vazios, consegue reter uma parcela de água em sua parte interna, ajudando nas reações químicas internas deste processo, independentemente do clima do local (AL-KHAIAT e HAQUE, 1998).

2.3.4. Propriedades do concreto leve no estado fresco

As propriedades dos concretos leves no estado fresco e os fatores que as afetam são essencialmente os mesmos observados nos concretos tradicionais. Entretanto, devido à baixa massa específica e à alta absorção de água dos agregados leves, as propriedades relacionadas à trabalhabilidade dos concretos leves necessitam de uma atenção especial (ROSSIGNOLO, 2003).

Segundo Monteiro (1994), a trabalhabilidade dos concretos pode ser definida como a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de

concreto fresco, com perda mínima de sua homogeneidade, podendo ser aplicado para concretos leves e convencionais. Com o termo manipular inclui as primeiras operações como lançamento, adensamento e acabamento.

No processo de definição dos valores do índice de consistência, é necessário considerar valores baixos da massa específica dos agregados, que no teste do *slump*, fará com que os concretos leves apresentem valores de abatimento menores do que os concretos tradicionais, tudo devido à diferença dos valores da massa específica. Considera-se o índice de consistência, medido pelo abatimento do tronco de cone ou pela mesa de espalhamento, um dos parâmetros mais adequados para a verificação das características associadas à trabalhabilidade dos concretos no estado fresco (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A faixa de variação dos valores para o índice de consistência dos concretos leves, normalmente é menor do que a utilizada para concretos tradicionais. Os concretos leves com altos valores de índice de consistência apresentam grandes possibilidades de segregação dos agregados e, por outro lado, concretos leves com baixos valores de índice de consistência apresentam dificuldades no adensamento (ROSSIGNOLO, 2003).

Na pesquisa realizada por Rossignolo (2003), utilizou-se cinco traços diferentes com diferentes porcentagens de adição de material. Seguindo prescrições da NBR 9833 (ABNT, 2009) calculou-se a massa específica e teor de ar na massa de concreto. A massa específica de todos os experimentos ficou entre 1.562 Kg/m^3 e 1.717 Kg/m^3 e seu teor de ar varia de 2,3% a 4,4%. Estes valores são cerca de 30% a 40% menores que os valores obtidos utilizando agregados tradicionais.

2.3.5. Propriedades do concreto leve no estado endurecido

Em uma análise das propriedades dos concretos leves, é preciso considerar que os agregados apresentam resistência mecânica relativamente baixa, e assim a resistência mecânica da matriz de cimento apresenta grande importância na resistência mecânica dos concretos. Nos concretos leves, é utilizado a resistência mecânica potencial da matriz do cimento, em função da similaridade entre os valores dos módulos de deformação do agregado e da qualidade da mistura do agregado no concreto (ROSSIGNOLO, 2003).

Segundo Eurolightcon (1998), os concretos leves, normalmente, não se rompem devido a diferença entre as deformações dos agregados, e sim devido ao colapso da argamassa, que ocorre na região ao redor do agregado. Os concretos leves apresentam estabilização dos valores finais de resistência à compressão mais rapidamente em relação

aos concretos convencionais, onde aos 7 dias os concretos leves apresentam 80% da resistência à compressão observada aos 28 dias dos convencionais.

Isso pode ser visto também de acordo com o estudo realizado por Holm e Bremner (1994), destacando a resistência à tração, os valores dos concretos leves de forma geral são inferiores aos concretos convencionais, em função do volume de vazios dos agregados leves. A relação entre os valores das resistências à compressão e tração por compressão diametral dos concretos leves pode variar entre 5% a 15% para concretos com resistência acima de 20 MPa, podendo variar conforme a qualidade do concreto.

Segundo Rossignolo (2003), a granulometria dos agregados tem mais influência na massa específica dos concretos leves do que nos concretos convencionais, levando em consideração que a massa específica dos agregados leves é inversamente proporcionais a sua dimensão. Outro ponto importante é que a massa específica dos concretos leves apresenta variação progressiva dependendo das condições de exposição.

De acordo com Rossignolo (2003), os concretos leves, para a observação de sua massa específica, segundo Figura 7, podem ser relacionados como: concretos isolantes, massa específica entre 300 Kg/m³ e 800 Kg/m³; concretos com resistência moderada, massa específica entre 800 Kg/m³ e 1.400 Kg/m³; concretos estruturais, massa específica entre 1.400 Kg/m³ e 1.850 Kg/m³. O valor do módulo de deformação dos concretos leves depende dos valores do módulo de deformação dos componentes individuais, proporcionalmente entre matérias e a qualidade da mistura entre o agregado e o cimento. Na utilização dos concretos leves, é adicionado materiais que apresentam valores de módulo de deformação significativamente reduzidos em comparação aos tradicionais. Nos estudos realizados por Zhang (1991), observou-se que o módulo de deformação do concreto leve está diretamente relacionado com a resistência e com a quantidade de agregado, e também a qualidade da mistura do concreto.

A durabilidade dos concretos em geral depende essencialmente da permeabilidade dos materiais. Um fator muito importante é a permeabilidade na ocorrência de fissuras internas, ocasionadas principalmente pela concentração de tensões em relação aos valores do módulo de deformação do agregado e as características do cimento. Nos concretos leves estruturais, os agregados apresentam grande influência na permeabilidade dos concretos caso apresentem a estrutura porosa comunicante, pois facilita o fluxo de líquidos e conseqüentemente de agentes agressivos para o concreto. De forma geral, os concretos leves estruturais apresentam permeabilidade semelhante ou inferior em comparação com o concreto convencional, utilizando os mesmos traços. Este resultado pode ser relacionado aos baixos valores de água/aglomerante dos concretos leves. Realizando a distribuição

uniforme das tensões internas dos concretos leves reduz a formação de fissuras microscópicas (HOLM e BREMNER, 1994).

Em estudos realizados por Eurolightcon (1998), e Holm e Bremner (1994), destaca-se que as propriedades térmicas dos concretos leves são diferentes em comparação ao concreto convencional, onde o ar aprisionado na estrutura celular dos agregados leves reduz a transferência e a absorção de calor em relação aos agregados convencionais, reduzindo a condutividade térmica.

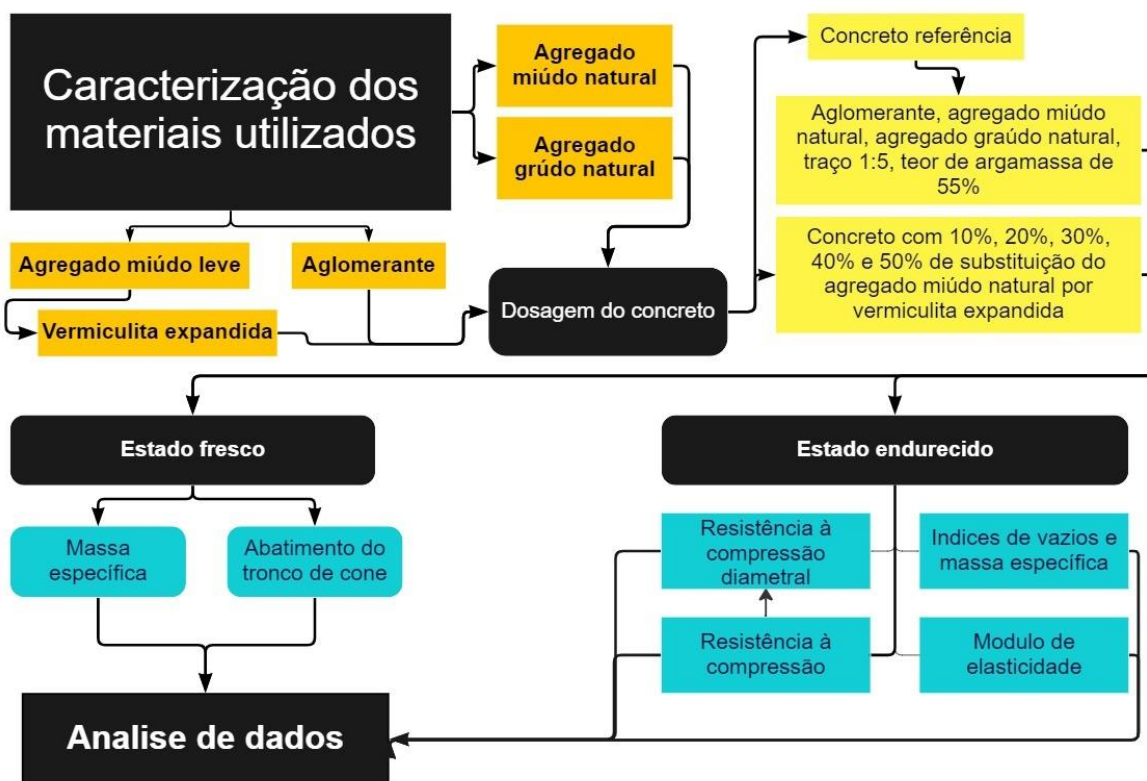
3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão caracterizados os materiais e métodos, bem como o procedimento experimental para obtenção de dados e atingir os objetivos propostos neste trabalho. Foi realizado um traço de concreto convencional e outros com a substituição parcial do agregado miúdo por vermiculita expandida. Primeiramente estão apresentados os materiais utilizados para confecção do concreto e na segunda parte os métodos de ensaios que foram empregados para avaliar as propriedades das amostras realizadas nesta pesquisa.

3.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A pesquisa visa avaliar o comportamento dos concretos com diferentes volumes adicionados com a finalidade de produzir um concreto com um bom desempenho, analisando suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido aos 7 e 28 dias. A Figura 11, mostra um fluxograma com os materiais e porcentagens de substituições que serão utilizados na pesquisa.

Figura 11: Fluxograma do programa da pesquisa



Fonte: Elaborada pelo autor, (2022).

A Tabela 7, mostra um planejamento dos ensaios que foram realizados nas matrizes cimentícias, no estado fresco e endurecido.

Tabela 7: Métodos de ensaio

Ensaio		Normas
ESTADO FRESCO	Abatimento do tronco de cone (<i>slump test</i>).	NBR 16889 (ABNT, 2020)
	Determinação da massa específica.	NBR 9833 (ABNT, 2018)
ESTADO ENDURECIDO	Resistência à compressão.	NBR 5739 (ABNT, 2018)
	Resistência à tração por compressão diametral.	NBR 7222 (ABNT, 2010)
	Módulo de elasticidade.	NBR 8522 (ABNT, 2021)
	Índice de vazios, massa específica e absorção total.	NBR 9778 (ABNT, 2009)

Fonte: Elaborada pelo autor, (2022).

O planejamento experimental desta pesquisa busca avaliar o comportamento dos concretos convencionais e os concretos leves com a substituição parcial de vermiculita expandida. Foram realizados 11 corpos de prova para cada nomenclatura, substituindo 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% do agregado miúdo pelo agregado leve estudado. Estes valores foram determinados através de pesquisas que concluíram que acima de 20% de substituição o concreto perde resistência a compressão (NEVILLE, 1997; ROSSIGNOLO, 2003). Com finalidade de padronizar o nome para cada traço foi criado uma nomenclatura, conforme a Tabela 8.

Tabela 8: Nomenclatura dos traços

ABREVIATURAS	NOMENCLATURAS
REF	Concreto de referência somente com agregados naturais.
T 10S	Traço com substituição de 10% do agregado miúdo.
T 20S	Traço com substituição de 20% do agregado miúdo.
T 30S	Traço com substituição de 30% do agregado miúdo.
T 40S	Traço com substituição de 40% do agregado miúdo.
T 50S	Traço com substituição de 50% do agregado miúdo.

Fonte: Elaborada pelo autor, (2022).

Para esta etapa da pesquisa foram moldados corpos de provas de formato de 100 x 200 mm. Para poder avaliar os resultados conforme as normativas, totalizando 66 de corpos

de prova, sendo que para cada ensaio necessita uma determinada quantidade de corpos de provas, estas quantidades estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9: Quantidade de corpos de prova ensaio aos 7 e 28 dias

Amostras	Resistência à Compressão	Resistência à Compressão Diametral	Módulo de Elasticidade	Absorção de água, índice de vazios	Total
REF	4	2	2	3	11
T 10S	4	2	2	3	11
T 20S	4	2	2	3	11
T 30S	4	2	2	3	11
T 40S	4	2	2	3	11
T 50S	4	2	2	3	11
Total	24	12	12	18	66

Fonte: Elaborada pelo autor, (2022).

Todos os corpos de provas que foram ensaiados, possuem os materiais, dosagem, cura e ensaios padronizados, para que haja um controle dos traços de concreto produzidos nesta pesquisa. A temperatura e umidade do ambiente de laboratório são variáveis não controladas.

3.2. MATERIAIS UTILIZADOS

Estão descritos a seguir, em tópicos, os materiais que foram utilizados para a realização da pesquisa. A caracterização dos materiais é importante para determinar sua composição e caracterização.

3.2.1. Aglomerante

Para a produção do concreto foi empregado o cimento CP II-F-40, do fabricante Itambé. A escolha do cimento se deu em virtude da disponibilidade do material no comércio da cidade de Bento Gonçalves, RS. A Figura 12 ilustra o tipo de cimento utilizado.

Figura 12: Cimento Itambé



Fonte: Itambé (2022).

As características físicas e químicas do aglomerante estão apresentadas nas Tabelas 10 e 11 sendo elas fornecidas pelo fabricante do cimento.

Tabela 10: Características químicas do cimento

Químico	AL ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resid. Insol	Equiv. Acal.
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Média	4,48	18,72	2,82	60,73	3,2	2,75	5,76	1,61	0,82	0,69
Sd	0,09	0,25	0,13	0,39	0,23	0,06	0,13	0,22	0,24	0,02
Min	4,34	18,48	2,64	60,14	2,87	2,63	5,44	1,35	0,63	0,66
Max	4,62	19,14	2,96	61,49	3,48	2,87	5,88	1,99	1,45	0,71

Fonte: Itambé, (2022).

Tabela 11: Características físicas do cimento

Físico	Exp. Quente	Tempo de pega		Cons. Normal	Blaine	#200	#325	Resistência à compressão			
		Início	Fim					1 Dias	3 Dias	7 Dias	28 Dias
	mm	min	min	%	cm ² /g	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa
Média	0,1	175	224	28	4,423	0,06	0,43	22,3	35,9	41,8	50,5
Sd	0,21	9	11	0,4	57,36	0,02	0,14	1,0	1,0	0,9	0,9
Min	0,00	160	210	27,7	4,35	0,02	0,3	21	34,2	40,5	49,3
Max	0,5	185	240	29	4,51	0,09	0,7	24,4	37,5	43,1	51,8

Fonte: Itambé, (2022).

3.2.2. Agregado miúdo natural

Para a realização desta pesquisa foi utilizado o agregado miúdo fornecido por uma empresa localizada na cidade de Bento Gonçalves, RS. Suas propriedades físicas foram

determinadas através de ensaios como, ensaio de massa específica NBR NM 52 (ABNT, 2003), ensaio de distribuição granulométrica seguindo os parâmetros da NBR 7211 (ABNT, 2005). A Figura 13 mostra o agregado miúdo utilizado para o trabalho.

Figura 13: Agregado miúdo natural



Fonte: O autor (2022).

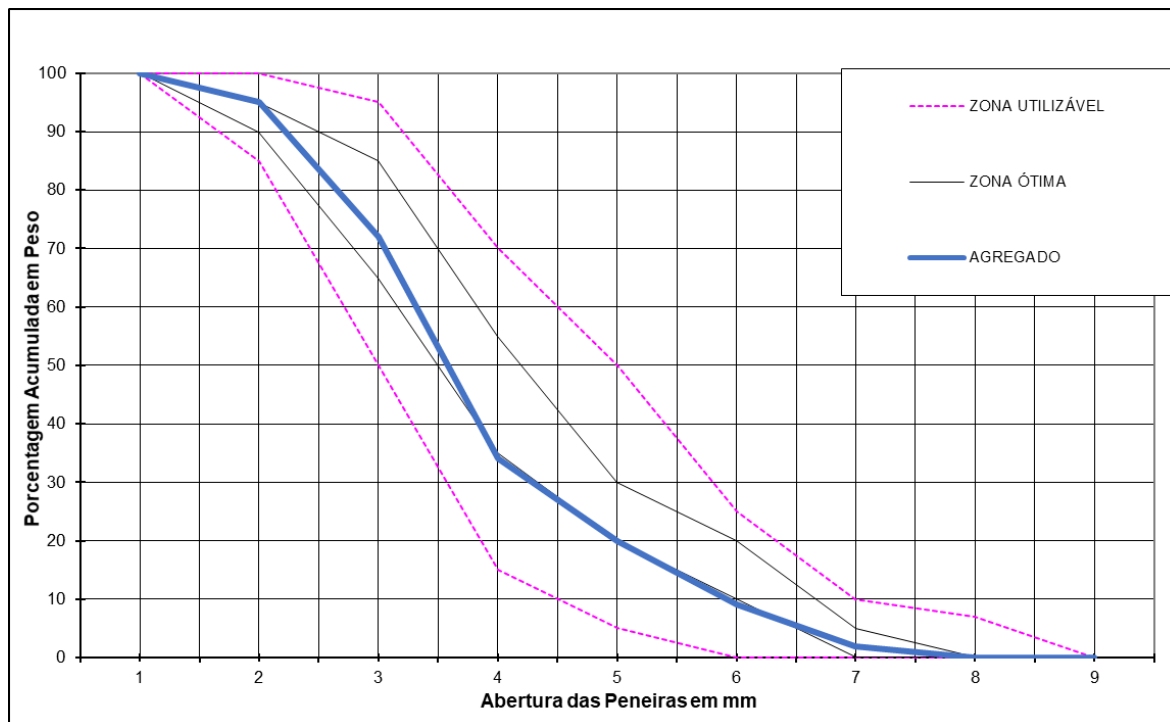
Na Tabela 12 podemos observar as características físicas deste agregado miúdo que pode ser classificado como areia natural média. Na Figura 14 podemos observar a curva granulométrica do agregado miúdo natural, onde ele se enquadra dentro da zona utilizável.

Tabela 12: Características físicas do agregado miúdo natural

Peneira (mm)	Agregado miúdo natural	
	Retido %	Acumulado %
4,8	2	2
2,4	7	9
1,2	11	20
0,6	14	34
0,3	37	72
0,15	23	95
Fundo	5	100
Módulo de finura		2,32
Dimensão máxima característica		4,8
Pulverulento (< 0,075mm) (%)		0,9
Material fino (< 0,30mm) (%)		28
Massa específica (g/cm³)		2,62

Fonte: O autor (2022).

Figura 14: Curva da distribuição granulométrica do agregado miúdo natural



Fonte: O autor (2022).

3.2.3. Agregado graúdo natural

Para a realização desta pesquisa foi utilizado o agregado graúdo natural fornecido por uma empresa localizada na cidade de Bento Gonçalves, RS. Foram realizados ensaios para classificar sua granulometria segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005), ensaios de absorção e massa específica deste agregado, conforme a NBR NM 53 (ABNT, 2009). A Figura 15 mostra o agregado graúdo utilizado para o trabalho, na Tabela 13 podemos ver as características físicas do agregado graúdo natural, e na Figura 16 a curva granulométrica do mesmo.

Figura 15: Agregado graúdo natural



Fonte: O autor (2022).

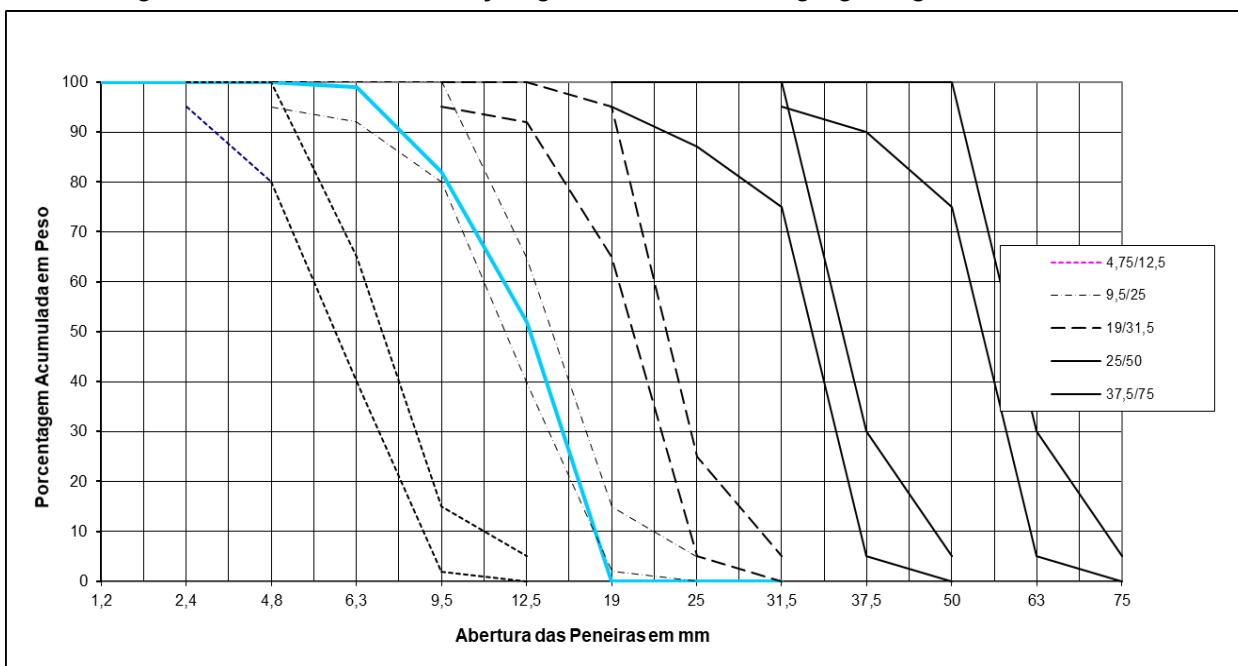
Na Tabela 13 podemos observar as características físicas do agregado graúdo que pode ser classificado como brita nº1, e na Figura 16 podemos observar a curva granulométrica do agregado miúdo natural.

Tabela 13: Características físicas do agregado graúdo natural

Peneira (mm)	Agregado graúdo natural	
	Retido %	Acumulado %
12,5	52	52
9,5	30	82
6,3	17	99
Fundo	1	100
Módulo de finura		6,79
Dimensão máxima característica		19
Pulverulento (< 0,075mm) (%)		0,6
Material fino (< 0,30mm) (%)		1
Massa específica (g/cm³)		2,62
Absorção (%)		3,2

Fonte: O autor (2022).

Figura 16: Curva da distribuição granulométrica do agregado graúdo natural



Fonte: O autor (2022).

3.2.4. Agregado miúdo leve

O agregado leve utilizado como parte de agregado miúdo foi a vermiculita expandida de classificação média, adquirida na empresa Global Minérios, localizada na cidade de Joinville, SC. Foram realizados ensaios para classificar sua granulometria segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005), e o procedimento para determinação da massa específica de acordo com a NBR 9935 (ABNT, 2011). A Figura 17 ilustra a granulometria da vermiculita, as características físicas e químicas da vermiculita estão apresentadas nas Tabelas 14 e 15 sendo elas fornecidas pelo fornecedor.

Figura 17: Vermiculita expandida média



Fonte: O autor (2022).

Tabela 14: Características físicas da vermiculita

Peneira (mm)	Agregado miúdo leve	
	Retido %	Acumulado %
4,8	18	18
2,4	30	48
1,2	25	73
0,6	16	89
0,3	8	97
0,15	2	99
Fundo	1	100
Dimensão máxima característica		4
Massa específica (g/cm³)		0,322
Absorção (%)		270,6

Fonte: O autor (2022).

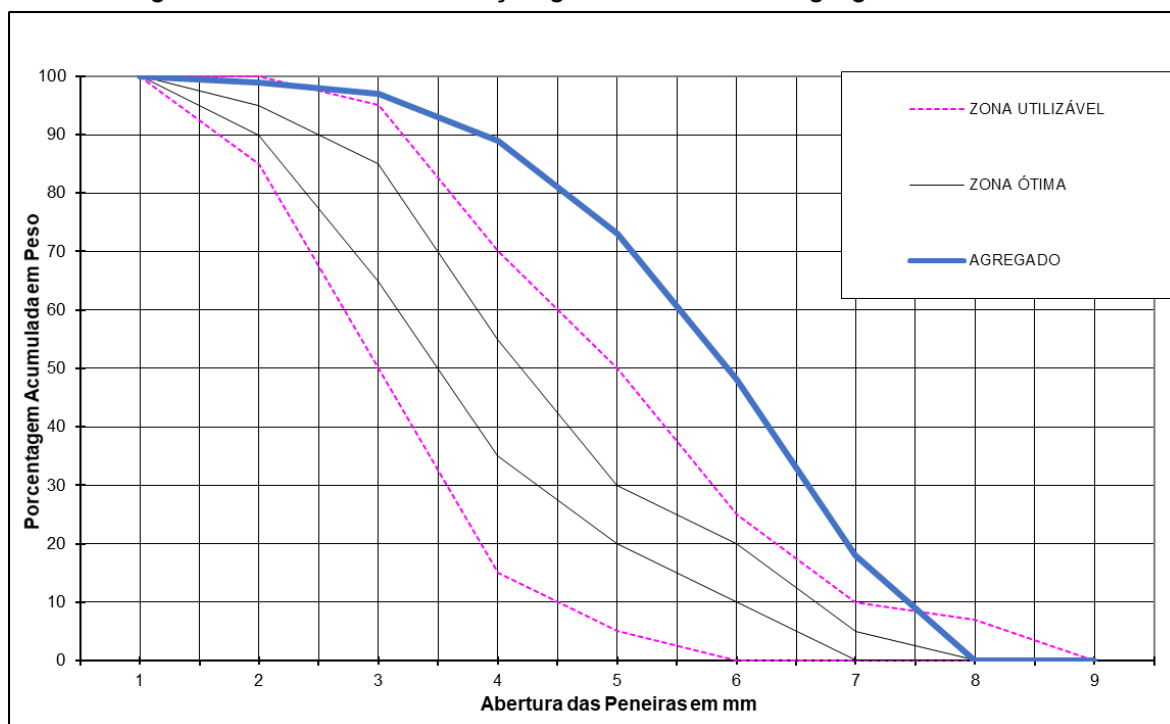
Tabela 15: Características químicas da vermiculita

Química	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	Cr ₂ O ₃
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Análise química típica	49,77	16,73	12,1	5,95	0,8	0,9	3,2	0,3	0,06	0,21

Fonte: O autor (2022).

Na Figura 18, está presente a curva de distribuição granulométrica da vermiculita. Podemos observar que ela não está dentro da zona utilizável do agregado miúdo, porém este material é comercializado com estas características.

Figura 18: Curva da distribuição granulométrica do agregado miúdo leve



Fonte: O autor (2022).

3.2.5. Água

A água que foi utilizada para a mistura dos materiais é potável, proveniente da rede de abastecimento municipal de Bento Gonçalves, RS.

3.3. MÉTODOS DE DOSAGEM

A dosagem do concreto utilizará o traço intermediário (1:5) de acordo com o método de dosagem IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992), utilizando como parâmetro de controle

a trabalhabilidade de foi de 120 ± 20 mm, e empregando o teor ideal de argamassa de 55%. Assim o traço de referência foi definido em 1:2,36:2,64 em massa, com 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de teor de substituição de agregado miúdo natural pelo leve estudado. A substituição de cada percentual, foi realizada através de uma compensação de volume de agregados, em busca de ajustar as quantidades em função de suas massas específicas, pois em uma substituição simples em massa possivelmente teremos uma discrepância em relação ao volume final dos materiais, modificando o traço. O cálculo para tal compensação foi através da Equação 1.

$$M_{aml} = M_{amn} \frac{\gamma_{aml}}{\gamma_{amn}} \quad (1)$$

Onde:

- M_{aml} (Kg) = massa do agregado miúdo leve a ser utilizado;
- M_{amn} (Kg) = massa do agregado natural a ser substituído;
- γ_{aml} (Kg/dm³) = massa específica do agregado miúdo leve;
- γ_{amn} (Kg/dm³) = massa específica do agregado miúdo natural.

Na Tabela 16 podemos verificar a quantidade de material para cada traço. A proposta é de manter o teor de a/c da mistura, porém, os agregados leves possuem uma taxa de absorção muito maior que a dos agregados naturais, portanto quando necessário iremos adicionar água de compensação a fim de manter a trabalhabilidade da mistura.

Tabela 16: Quantidade de material utilizado em cada traço

Amostras	Cimento (Kg)	Agregado miúdo (Kg)	Agregado graúdo natural (Kg)	Agregado leve (Kg)	Água (Kg)
REF	10,667	25,173	28,161	0	6,251
T 10S	10,667	22,656	28,161	0,309	6,251
T 20S	10,667	20,139	28,161	0,619	6,251
T 30S	10,667	19,621	28,161	0,928	7,298
T 40S	10,667	15,104	28,161	1,237	7,653
T 50S	10,667	12,587	28,161	1,547	8,189
Total	64	113,28	168,96	4,64	23,159

Fonte: Elaborada pelo autor, (2022).

Posterior à dosagem de cada um dos traços, eles foram moldados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015) na seguinte ordem de mistura, primeiro foi feito a molhagem da betoneira, em seguida foi adicionado o agregado graúdo e parte da água padrão da amostra, em seguida foi colocado o cimento, depois adicionado o agregado miúdo natural

e o restante da água padrão da mistura, e por fim após a massa estar bem misturada foi incluído a vermiculita. Para as amostras que não passaram no ensaio de trabalhabilidade foi misturado novamente e adicionado água de compensação para obter o resultado conforme foi estipulado. O tempo de mistura aproximado foi de 10 minutos por traço.

Após a mistura, a massa foi disposta em corpos de prova com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados, e em seguida foram submetidos ao processo de cura úmida em água saturada com cal, conforme Figura 19. Os corpos de prova permaneceram em cura até a data da realização dos ensaios, 7 ou 28 dias após a moldagem, de acordo com as prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2008).

Figura 19: Corpos de prova em cura úmida



Fonte: O autor (2022).

3.4. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Os métodos que foram empregados para o estudo das propriedades mecânicas dos concretos confeccionados no estado fresco estão apresentados na sequência, sendo todos os ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil, da Universidade de Caxias do Sul - CARVI, nesta etapa se possibilita a moldagem dos corpos de prova, conforme a norma que a rege.

3.4.1. Trabalhabilidade

Para esta pesquisa com fim de controlar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco foi definido um abatimento de 120 ± 20 mm, com o intuito de garantir um melhor controle da trabalhabilidade. O ensaio de abatimento do tronco de cone, seguiu de acordo com instruções da NBR 16889 (ABNT, 2020), sendo realizado para cada amostra de concreto.

3.4.2. Determinação da massa específica

Foi realizado um ensaio de determinação da massa específica para cada traço empregado, seguindo as instruções da normativa NBR 9833 (ABNT, 2009). Para determinar a massa específica, deve-se calcular a massa do concreto, subtraindo a massa do recipiente vazio onde se realizou o adensamento do concreto, após isso com auxílio da Equação 2, calcular a massa específica.

$$P = \frac{m}{V} * 1000 \quad (2)$$

Onde:

- P = massa específica (Kg/m³);
- m = massa do concreto (Kg);
- V = volume do recipiente (m³).

3.5. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Os métodos empregados para o estudo das propriedades mecânicas dos concretos confeccionados estão apresentados na sequência, sendo todos os ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil, da Universidade de Caxias do Sul - CARVI, os ensaios realizados no estado endurecido do concreto, foram realizados aos 7 e 28 dias de cura para todos os traços empregados nesta pesquisa.

3.5.1. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007), os corpos de prova foram mantidos em cura até serem realizados os ensaios aos 7 dias e aos 28 dias. Para cada idade foram ensaiados dois corpos de prova de cada traço de concreto produzido.

Com a superfície do corpo de prova limpa e seca, posiciona-se o mesmo na prensa a fim de realizar a ruptura, conforme Figura 20. A prensa é iniciada com uma velocidade de

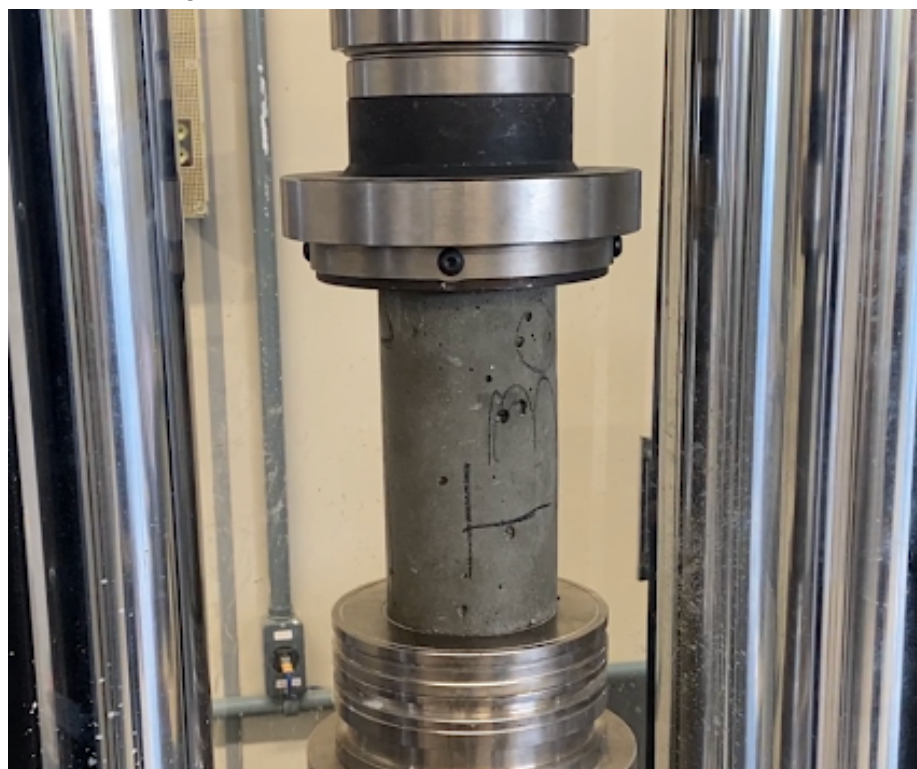
carregamento de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s, lembrando que essa velocidade deve ser mantida constante até a ruptura do corpo de prova. Os resultados do ensaio são calculados pela Equação 3.

$$F_c = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Onde:

- F_c = resistência à compressão (MPa);
- F = força (N);
- A = área da base (mm^2).

Figura 20: Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: O autor (2022).

3.5.2. Resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram executados de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011). O ensaio foi realizado em corpos de prova de dimensões 100 x 200 mm, retirados da cura em câmara úmida na idade de 28 dias. Para cada idade foram ensaiados dois corpos de prova de cada traço de concreto produzido.

Após o ajuste do corpo de prova, a compressão é aplicada lembrando que o corpo de prova não pode mover-se do seu posicionamento, a velocidade aplicada é de $(0,05 \pm 0,02)$ MPa/s, sendo aplicada até a ruptura do corpo de prova. Para realizar os cálculos de

resistência à tração por compressão diametral deve ser utilizada a Equação 4, e na Figura 21 podemos ver a posição dos corpos de prova durante o ensaio.

$$F_{ct, sp} = \frac{2*F}{\pi*d*l} \quad (4)$$

Onde:

- $F_{ct, sp}$ = resistência à tração por compressão diametral (MPa);
- F = força (N);
- d = diâmetro do corpo de prova (mm);
- l = comprimento do corpo de prova (mm).

Figura 21: Ensaio de compressão diametral.



Fonte: O autor (2022).

3.5.3. Módulo de elasticidade

Para a realização do ensaio de módulo de elasticidade foi utilizado os parâmetros da NBR 8522 (ABNT, 2017) onde foram moldados dois corpos de prova para cada traço, testados aos 28 dias após sua moldagem, para a realização deste ensaio os corpos de provas foram preparados como no ensaio de resistência à compressão axial.

O ensaio consiste em posicionar o corpo de prova a ser ensaiado no centro da máquina, ele irá receber uma tensão de até 30% da resistência característica do concreto (0,5 MPa) e permanecer aplicando a carga durante 60 segundos. Após, reduzir o carregamento com a mesma velocidade que será aplicada anteriormente, realizar mais dois ciclos de carga com períodos iguais, carregar novamente o corpo de prova e medir a deformação obtida após 30 segundos do ciclo e por fim, aumentar proporcionalmente o carregamento até que o corpo de prova se rompa. Os valores coletados no ensaio foram realizados em um equipamento específico de precisão no laboratório da UCS – CARVI, desta forma os resultados apresentaram uma confiabilidade e um erro relativo menor que 1%. Podemos ver na Figura 22 o corpo de prova durante o ensaio com os instrumentos de medição.

Figura 22: Ensaio do módulo de elasticidade.



Fonte: O autor (2022).

3.5.4. Absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazios

Usando as massas determinadas de acordo a NBR 9778 (ABNT, 2009), o ensaio foi realizado após os 28 dias de cura, foram colocadas as amostras em estufa com a temperatura de aproximadamente 105 ± 5 °C e mantidas por 72 horas, para este ensaio são utilizados três corpos de prova de cada traço, depois desse processo é determinada a

massa das amostras secas.

Depois de resfriados é realizado o processo de secagem e pesagem das amostras, as mesmas foram saturadas novamente por 72 horas em um tanque de água, em seguida dessa saturação se dá início a um novo processo de saturação onde as amostras foram fervidas por 5 horas. Após realizada a nova fervura as amostras ficaram dentro desse mesmo recipiente esfriando até chegar na temperatura ambiente.

Por fim, é realizada a pesagem das amostras saturadas, com auxílio de uma balança hidrostática de precisão, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009). Para fins de cálculo é realizado a média dos três corpos de prova ensaiados por traço, conforme as Equações 5, 6, e 7.

$$Abs = \frac{Msat - Mseca}{Mseca} * 100 \quad (5)$$

Onde:

- Abs = absorção de água por imersão (%);
- Msat = massa do corpo de prova saturado (Kg);
- Mseca = massa do corpo de prova seco (Kg).

$$I = \frac{Msat - Mseca}{Msat - M1} * 100 \quad (6)$$

Onde:

- I = índice de vazios;
- Msat = massa do corpo de prova saturado (Kg);
- Mseca = massa do corpo de prova seco (Kg);
- M1 = massa do corpo de prova saturado, imerso em água (Kg).

$$Ms = \frac{Mseca}{Msat - M1} \quad (7)$$

Onde:

- Msat = massa do corpo de prova saturado (Kg);
- Mseca = massa do corpo de prova seco (Kg);
- M1 = massa do corpo de prova saturado, imerso em água (Kg);
- Ms = massa do corpo de prova seco (Kg).

3.6. ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS

Foram realizadas análises no laboratório de materiais da Universidade de Caxias do Sul campus CARVI para o tratamento dos dados obtidos com os ensaios de resistência à compressão axial e diametral, módulo de elasticidade e absorção total dos corpos de prova, dados estes que foram realizados no estado endurecido dos concretos. Para a obtenção dos resultados para esta pesquisa utilizou o *software* editor de planilhas Excel.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo estão apresentados os resultados dos ensaios realizados no estado fresco e no estado endurecido, e suas comparações, esta análise foi realizada através de tabelas e gráficos para facilitar o entendimento e visualização dos resultados obtidos.

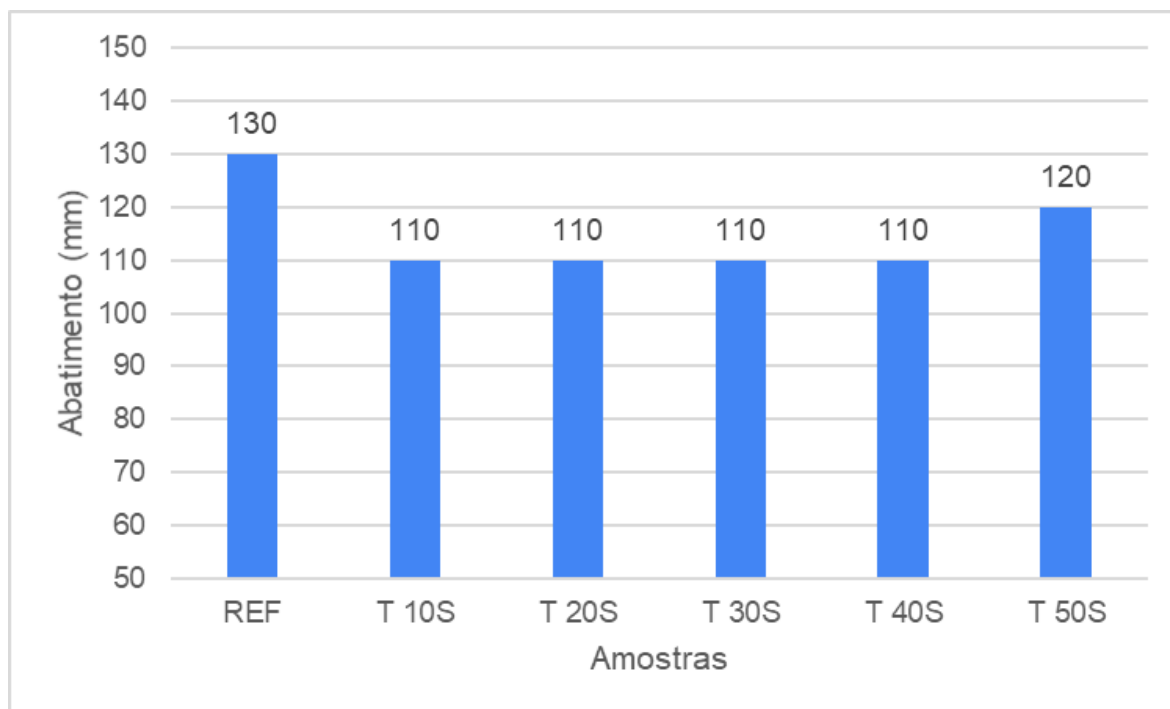
4.1. ESTADO FRESCO

Nesta parte foram analisados os resultados dos ensaios no estado fresco. Nesta pesquisa foram realizados os ensaios de abatimento de tronco de cone e determinação de massa específica.

4.1.1. Trabalhabilidade

O abatimento estabelecido neste trabalho é 120 ± 20 mm, a partir do ensaio de abatimento de tronco de cone realizado, também conhecido como *slump test*, foram verificadas a trabalhabilidade de cada traço de concreto. A Figura 23 apresenta o gráfico dos resultados obtidos neste ensaio em cada traço.

Figura 23: Gráfico do abatimento por traço



Fonte: Autor (2022).

É possível perceber que todos os traços alcançaram o abatimento estipulado, sem a necessidade do uso de aditivo. Podemos analisar que o traço referência obteve o maior abatimento em relação aos traços com a adição de vermiculita. Os traços T 10S, T 20S, T 30S e T 40S apresentaram o mesmo resultado, e o traço T 50S obteve um resultado 7,7% abaixo do traço referência. Para os traços T 30S, T 40S e T 50S foi necessário adicionar água para realizar a compensação da absorção de água da vermiculita, que chegava a 270,2%, podendo ser analisada a relação a/c na Tabela 17.

Tabela 17: Compensação da água e relação a/c

Traço	Relação A/C inicial	Água de compensação (g)	Relação A/C final
REF	0,586	0	0,586
T 10S	0,586	0	0,586
T 20S	0,586	0	0,586
T 30S	0,586	1047,0	0,684
T 40S	0,586	1402,6	0,717
T 50S	0,586	1938,3	0,768

Fonte: Elaborada pelo autor, (2022).

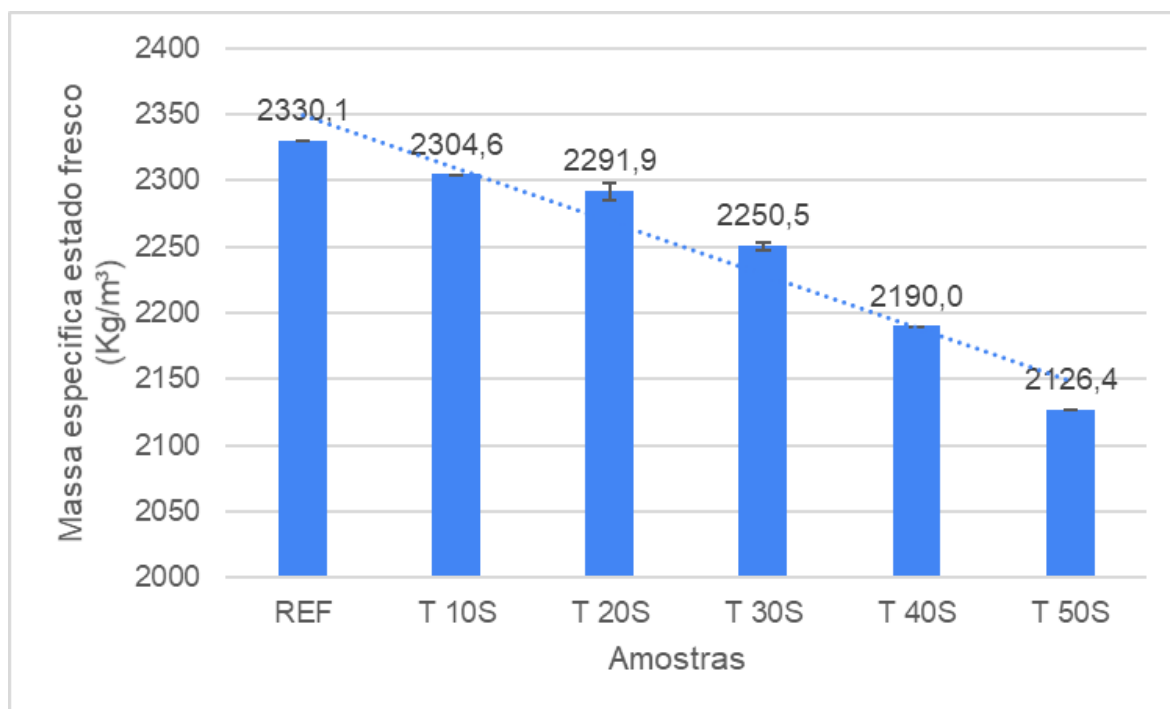
Verifica-se neste ensaio que a adição de vermiculita altera a sua trabalhabilidade, sendo possível analisar que quanto maior a substituição, maior será a quantidade necessária de adição de água para compensação por absorção. Entretanto, os resultados dos ensaios ficaram dentro do estabelecido, o que mostra que desde que o traço seja apropriado para utilização. Conforme Rossignolo (2003) e Silva (2003), em suas pesquisas também destacaram a influência dos agregados leves a reter a água com mais facilidade, e assim observando a necessidade de aumentar a quantidade de água no traço.

4.1.2. Massa específica

Como podemos observar pela Figura 24, o concreto REF foi o que apresentou a maior massa específica, e subsequentemente com a adição de maior quantidade de vermiculita, menor será a massa específica. Nos traços T 10S e T 20S apresentam valores próximos ao da referência, com uma diferença de 25,5 Kg/m³ e 38,2 Kg/m³, sendo 1,1% e 1,6% inferior em relação ao REF, respectivamente. O traço T 30S chegou a uma diferença de 79,6 Kg/m³, cerca de 3,41% abaixo do traço REF. Já os traços T 40S e T 50S podemos

visualizar que temos uma queda maior de massa específica, no T 40S obtivemos uma redução de 140,06 Kg/m³ que representa 6,01% do traço referência, e o T 50S chegou a uma redução de 203,72 Kg/m³, representando 8,74% de redução da sua massa específica. Verifica-se que quanto maior o teor de substituição de agregado miúdo leve, menor foi o valor obtido de massa específica.

Figura 24: Gráfico da massa específica



Fonte: Autor (2022).

Conforme estudos realizados por Rossignolo (2009) e Catoia (2012), destacam que a massa específica dos concretos com a utilização dos agregados leves é menor em comparação com concretos realizados com agregados naturais, isso acontece pois o agregado leve apresenta uma menor massa específica, visto o agregado leve ter características mais porosas do que o agregado natural, sendo assim absorve mais água do que o concreto convencional natural, resultando numa diferença de massa específica e uma atenção a mais na hora da mistura.

4.2. ESTADO ENDURECIDO

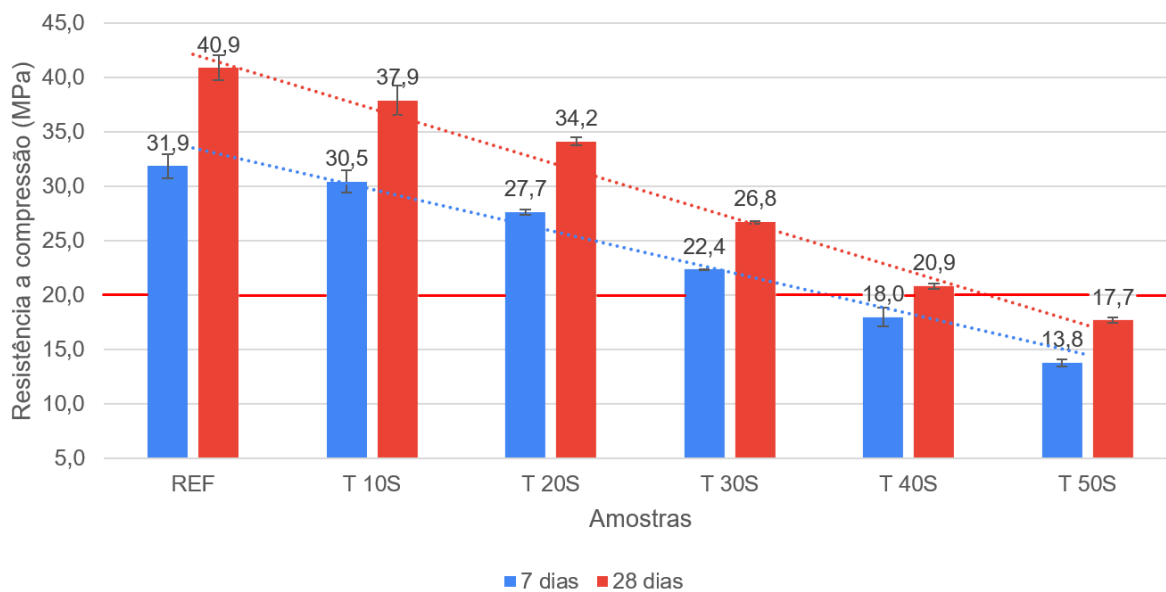
Nesta etapa foram analisados os resultados obtidos no concreto em seu estado endurecido em 7 e 28 dias, foram realizados os seguintes ensaios: resistência à compressão, resistência à compressão diametral, módulo de elasticidade, absorção de água total, índice de vazios e massa específica.

4.2.1. Resistência à compressão

Analisando os dados da Figura 25, podemos visualizar um aumento da resistência pelo ensaio de resistência à compressão aos 28 dias em todos os traços. Comparando o ensaio aos 7 dias, o traço de REF obteve a maior resistência cerca de 31,9 MPa, e o traço que obteve um menor valor foi o T 50S com 13,82 MPa, resultando em uma diferença de 56,67 % em relação ao traço de REF. Também podemos observar que de acordo com os resultados aos 7 dias, o traço REF, T 10S, T 20S, T 30S, T 40S e T 50S, apresentam resultados similares.

Analisando os resultados de resistência aos 28 dias, o traço com maior resistência foi o REF, com valor de 40,92 MPa e o menor valor de resistência foi observado no traço de T 50S, com 17,73 MPa, uma diferença entre os dois de surpreendentemente o mesmo que aos 7 dias, de 56,67%. Verificando a comparação dos outros traços estudados, as amostras do T 10S, T 20S e T 50S tiveram um aumento de resistência acima de 20%, sendo 24,5%, 23,4% e 28,3% respectivamente, o T 30S foi próximo, com 19,44% de acréscimo, e por fim o T 40S com apenas 15,8% de aumento de resistência aos 28 dias. A linha vermelha da Figura 24 representa a resistência mínima para ser considerado um concreto estrutural, sendo 20 MPa.

Figura 25: Gráfico da resistência à compressão (MPa)



Fonte: Autor (2022).

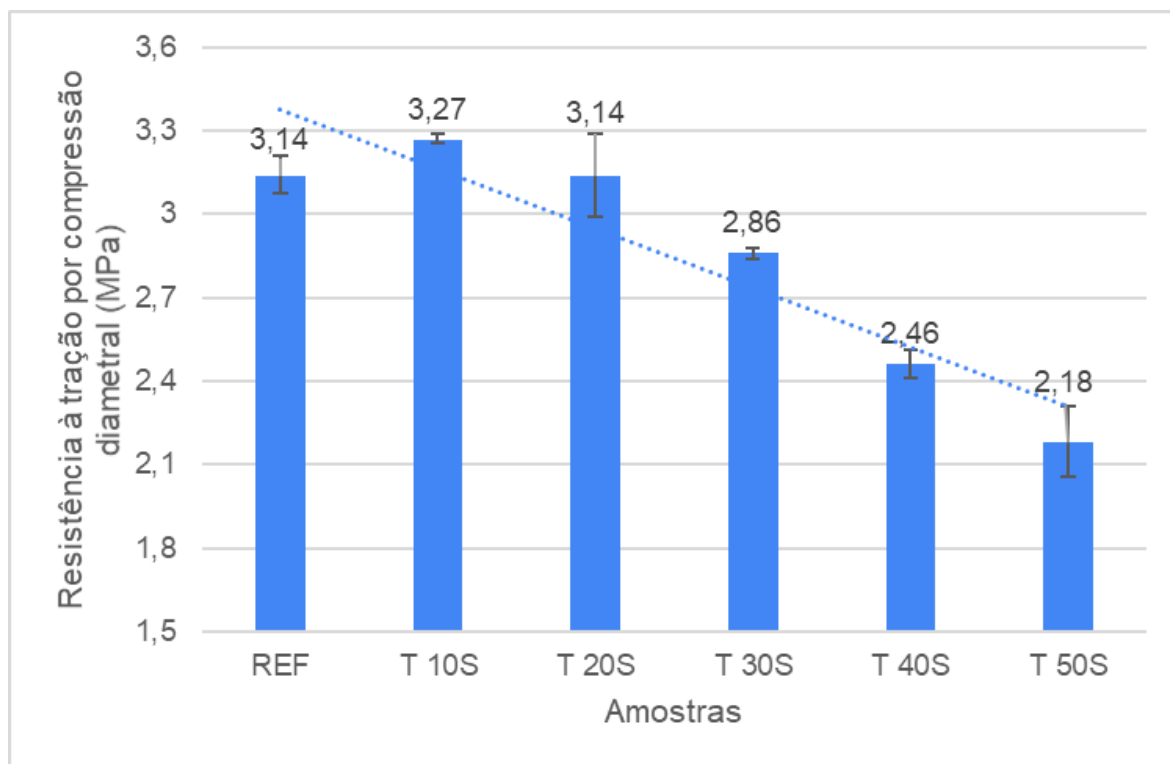
Segundo a norma NBR 8953 (ABNT, 2015), que estabelece o valor mínimo da resistência à compressão aos 28 dias para concreto estrutural, o traço T 50S apresenta o valor de 17,73 MPa, portanto não é possível utilizá-lo como concreto estrutural. O traço T 40S obteve 20,86 MPa, atendendo a resistência mínima para concreto estrutural. De acordo com Rossignolo (2003), a redução na resistência com a adição de vermiculita pode ser explicado pelo aumento da porosidade, provocado pela utilização de agregados de reduzida massa específica, alta capacidade de absorção e baixo módulo de elasticidade. Segundo Malaiskiene et al. (2011) e Angelin et al. (2013), nos concretos com agregados leves, são tradicionalmente menos resistentes que ao concreto referência da pesquisa, onde nos concretos leves existe a propagação das fissuras que ocorre, normalmente, nos agregados, ocasionando um acúmulo de tensões na matriz de cimento, provocando, assim, uma ruptura brusca do concreto.

Segundo a NBR 6118 (2018), um dos principais parâmetros da qualidade que devem ser considerados da durabilidade da estrutura durante a elaboração do projeto diz respeito ao cobrimento das armaduras e à classe de resistência mecânica do concreto. A cura adequada garante que o concreto tenha maior durabilidade perante aos agentes agressivos, pois impede o ingresso e percolação de materiais deletérios em sua microestrutura.

4.2.2. Resistência à tração por compressão diametral

Este ensaio seria realizado analisando os resultados aos 7 e aos 28 dias, mas por problemas na prensa da Universidade, não foi possível realizar os ensaios aos 7 dias. Utilizando resultados do ensaio aos 28 dias, podemos visualizar que obtivemos uma característica não esperada para o traço REF. Podemos observar que comparando os resultados do T 10S e T 20S, o traço REF obteve a mesma resistência que o T 20S, e 3,98% inferior que ao T 10S. Os resultados médios das amostras realizadas aos 28 dias estão apresentados na Figura 26.

Figura 26: Gráfico da resistência à tração por compressão diametral (MPa)



Fonte: Autor (2022).

Visualizando os resultados, o traço T 20S obteve maior resistência comparando aos demais traços, a amostra que representou a menor resistência foi o traço T 50S com 2,18 MPa, representando 33,33% do traço de melhor resultado e 30,57% do REF. Os resultados dos traços T 30S e T 40S obtiveram uma queda gradativa de acordo com o teor de substituição, chegando a 9,01% e 21,63%.

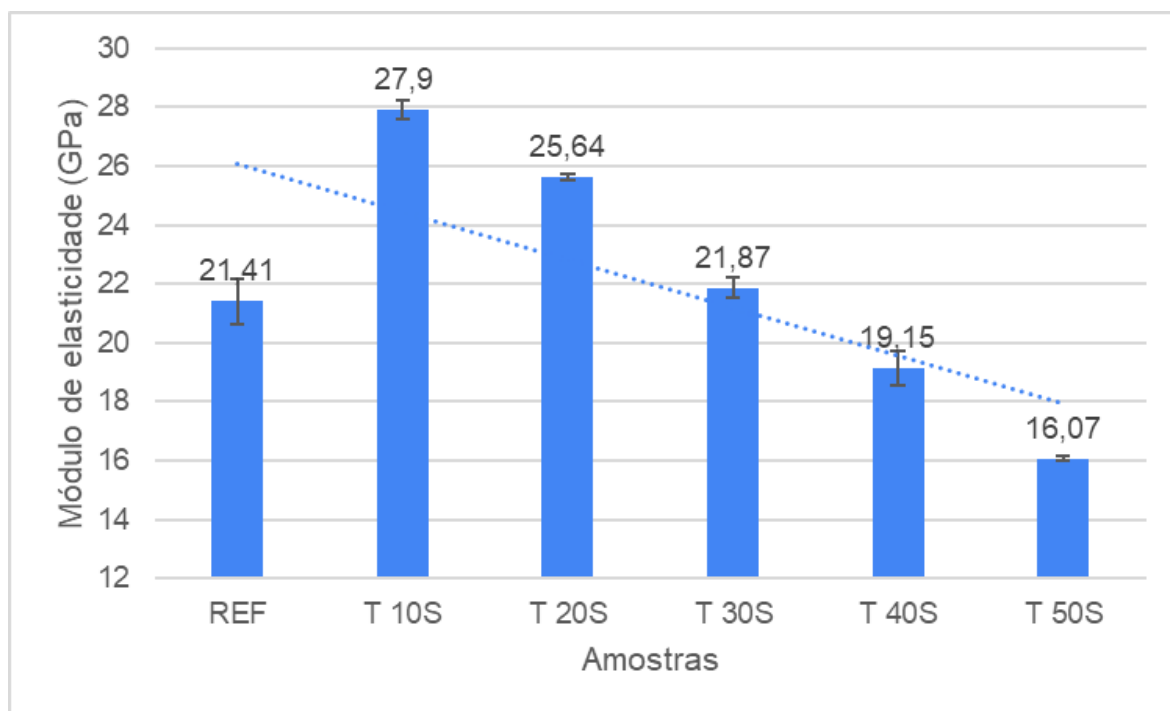
Este resultado condiz com os estudos sobre concretos leves realizados por Moravia (2007), Angelin (2014) e Borja (2011) onde os concretos com substituição obtiveram um

decréscimo gradual em relação com a quantidade substituída, relacionado aos vazios que se formam no interior do concreto. Apenas temos que levar em consideração que não descartamos a possibilidade da prensa utilizada estar com algum erro durante o ensaio REF.

4.2.3. Módulo de elasticidade

De acordo com os resultados, apresentados na Figura 27, nota-se que o traço de REF obteve o resultado do módulo de elasticidade não esperado, chegando a 21,41 GPa, sendo inferior aos T 10S, T 20S e T 30S, que atingiram 27,9 GPa, 25,64 GPa e 21,87 GPa respectivamente. O traço REF ficou 30,3% abaixo do resultado mais elevado T 10S. Observamos que nos resultados dos traços com a substituição de vermiculita, temos uma queda gradativa da resistência até chegar no resultado mais baixo deste ensaio que foi o T 50S, chegando a 16,07 GPa.

Figura 27: Gráfico do módulo de elasticidade



Fonte: Autor (2022).

Nota-se que o traço de T 10S apresentou a melhor resistência à compressão e seu módulo obteve um valor mais elevado referente ao REF, isso resulta em uma pequena deformação no material. Visto que o REF obteve o resultado semelhante ao T 20S no ensaio da resistência à compressão diametral, porém seu módulo tende a ser mais

deformável. Como esperado, os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos com ar incorporado foram inferiores aos dos concretos com menor substituição de agregado.

Ensaio com amostras de rocha demonstram que o módulo de elasticidade de agregados naturais de baixa porosidade, como granito, rochas vulcânicas e basalto, encontra-se na faixa de 70 a 140 GPa, ao passo que em arenitos, calcários e cascalhos de variedade porosa, pode ser de 21 a 49 GPa. Agregados leves são altamente porosos e dependendo da porosidade, seu módulo de elasticidade pode ser de apenas 7 GPa ou chegar a 28 GPa. Em geral, o módulo de elasticidade do concreto com agregado leve varia de 14 a 21 GPa, que está entre 50 a 75% do módulo para concreto de densidade normal com a mesma resistência. A resistência à compressão do concreto aumenta quando a matriz determina a resistência, entretanto, o módulo de elasticidade é reduzido, porque aumentos na microfissuração da zona de transição na interface afetam sensivelmente o comportamento tensão-deformação (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

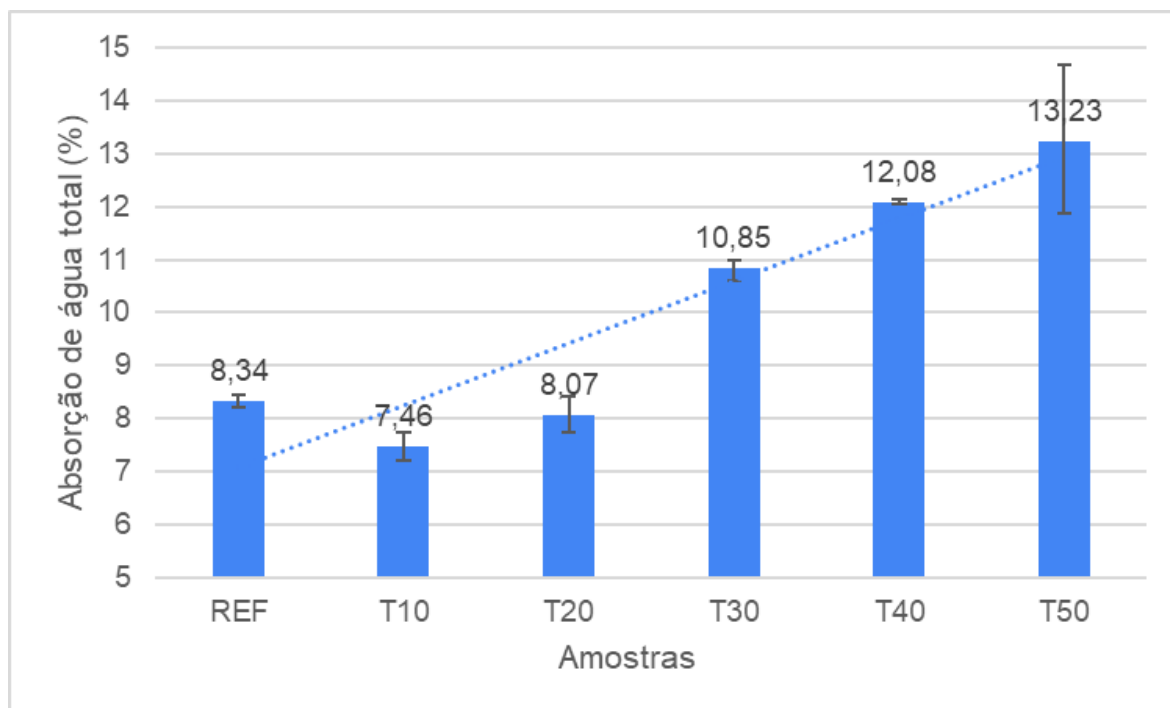
De acordo com a pesquisa de Mehta e Monteiro (2014), os agregados influenciam no módulo de elasticidade do concreto, através de suas densidades e resistências, porém os agregados não influenciam diretamente na resistência e sim indiretamente, pois quanto maior for o agregado, maior a chance de ter acúmulo de água em torno do mesmo. Eles destacam que um dos fatores que mais influencia no módulo de elasticidade é a porosidade do agregado, por isso, neste trabalho como o agregado utilizado é o agregado miúdo leve a sua porosidade é muito variável, afetando a diminuição do módulo de elasticidade.

Foi possível observar que concretos com maiores teores de ar incorporado apresentam menores resistências à compressão e módulos de elasticidade, como constataram Fausto e Moser (2011). Segundo Barbar (2016), podemos confirmar que concretos com maiores teores de ar incorporado apresentaram variabilidade nos resultados de ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade, independentemente da idade dos corpos de prova.

4.2.4. Absorção de água total, índice de vazios e massa específica

Analisando a Figura 28, nota-se que o traço T 10S obteve a menor absorção de água, e o traço T 50S obteve a maior. Nos traços T 10S e T 20S atingimos a porcentagem de absorção inferior ao encontrado no REF, chegando a -10,5% e -3,2%, já os traços T 30S e T 40S, obtiveram uma absorção quando comparada com o traço de REF a diferença foi de 30,1% e 44,9%, ou seja, superior ao traço de REF.

Figura 28: Gráfico de absorção de água total



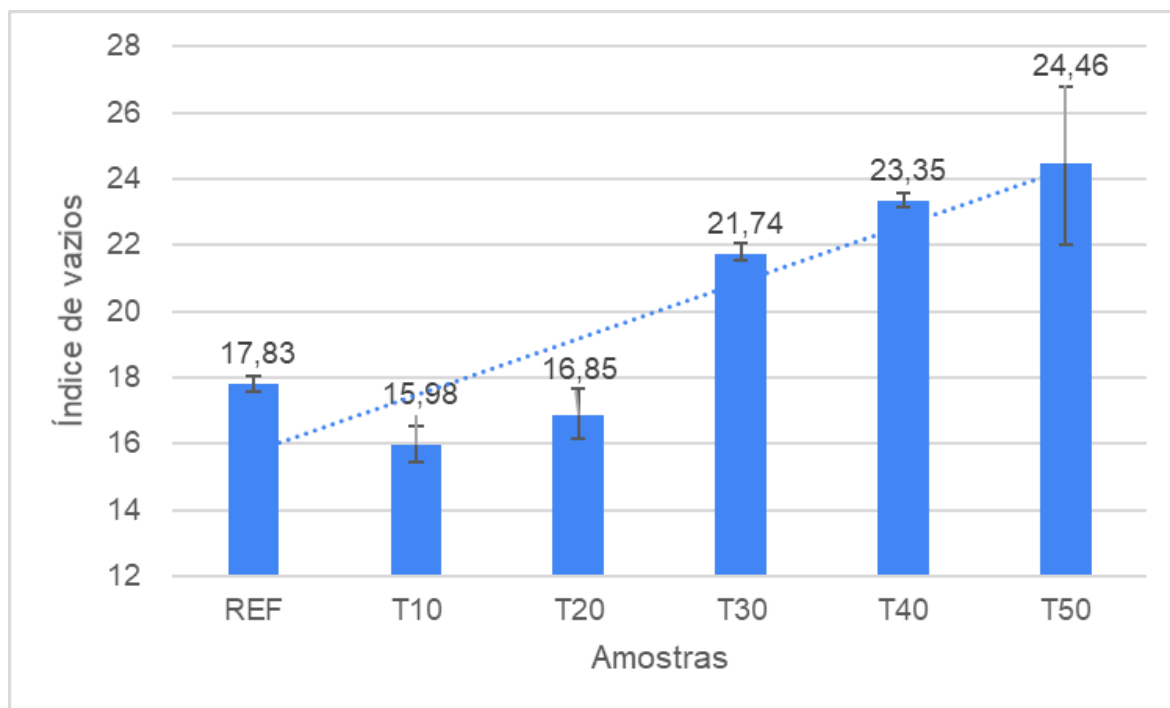
Fonte: Autor (2022).

Nos traços T 10S e T 20S os resultados de absorção de água foram próximos, cerca de 0,61% de diferença. De forma geral, podemos identificar uma maior tendência de absorção de água com o aumento do teor de substituição dos agregados miúdos leves, ou seja, maior será a taxa de absorção de água.

Analisando os resultados podemos identificar que quanto maior for a incorporação do agregado leve, maior é a quantidade de vazios permeáveis no concreto, justamente pela característica dele, onde retiramos o agregado miúdo natural e utilizamos o agregado miúdo leve, porém o volume se manteve o mesmo. Isso se entende pela baixa densidade da vermiculita e pela taxa de absorção mais elevada que o agregado natural, fato também observado por Rossignolo (2003) e Borja (2011).

Os resultados do ensaio de índice de vazios podem ser observados na Figura 29, podemos verificar que novamente obtivemos resultados com o REF apresentando características não esperadas, onde o T 10S e o T 20S obtiveram o índice de vazios inferior ao concreto convencional REF, sendo 10,36% e 5,52% inferiores respectivamente. Podemos perceber que como esperado, as amostras T 30S, T 40S e T 50S aumentaram seu índice de vazios gradativamente, representando um aumento de 21,88%, 30,91% e 37,17% em relação ao REF e 35,97%, 46,05% e 53,03% em relação ao T 10S com o melhor resultado.

Figura 29: Gráfico índice de vazios

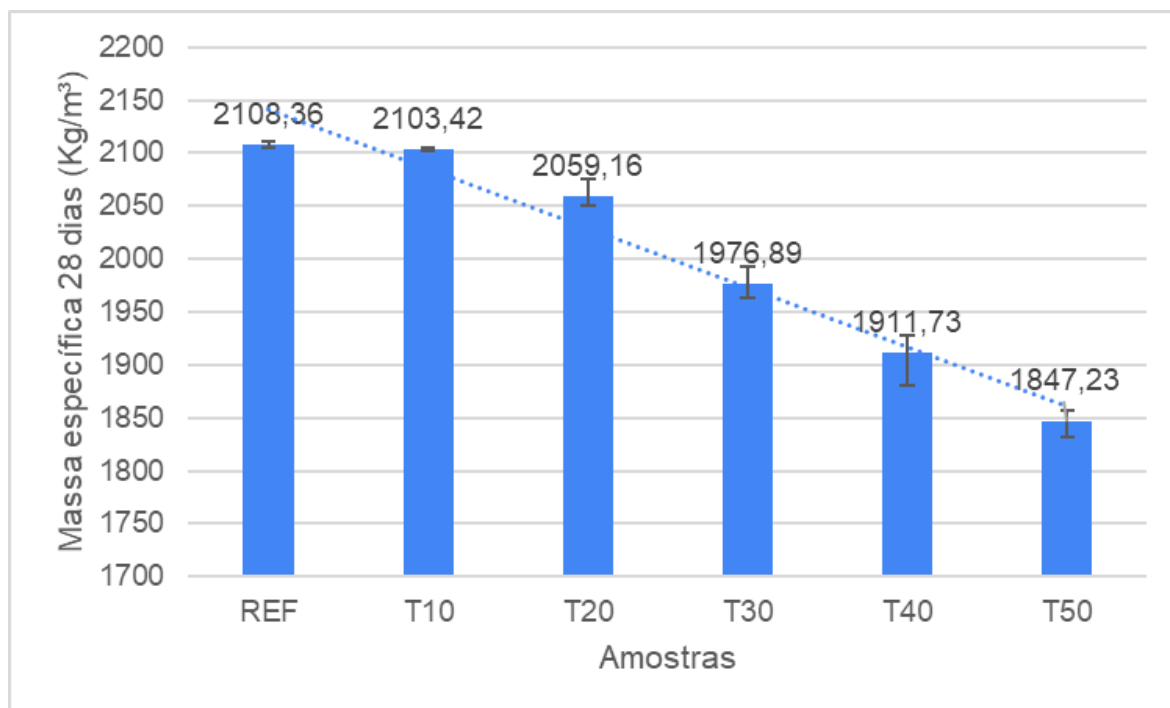


Fonte: Autor (2022).

Segundo Rossignolo (2003), o índice de vazios aumenta de acordo com o aumento de substituição dos agregados miúdos leves em relação ao concreto REF, este aumento está relacionado ao volume do agregado. Podemos observar que o T 20S e T 30S obteve um aumento elevado, sendo 29% de diferença entre estes dois traços, sendo que em relação aos seguintes, T 30S com o T 40S obteve aumento de 7,4% e o T 40S com o T 50S um aumento de 4,75%. Catoia (2012) e Moravia (2007), também observaram que o índice de vazios para concretos com agregados leves aumentam em relação aos concretos de referência, isso acontece devido a forma do agregado e por ele ser mais poroso do que o agregado natural.

Analisando a Figura 30, nota-se que o traço REF obteve a maior massa específica, com 2.108,36 Kg/m³, porém por uma margem muito pequena, o traço T 10S atingiu 2.103,42 Kg/m³, um valor 0,23% menor que o REF. Observa-se também que, como era de se esperar, o T 50S obteve o menor valor, chegando a 1.847,23 Kg/m³, tendo uma diferença de 261,13 Kg/m³ e resultando em 12,38% do traço REF. Entre os traços T 10S e T 50S podemos observar a queda gradativa correspondendo a porcentagem de vermiculita adicionada a mistura, analisando que a cada 10% de substituição do agregado miúdo natural pelo leve, podemos perceber uma redução de aproximadamente 2,5% a 3,1% de sua massa específica seca.

Figura 30: Gráfico de massa específica aos 28 dias



Fonte: Autor (2022).

Segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015) o concreto é classificado de acordo com sua massa específica, ou seja, ele pode ser classificado como concreto normal, concreto leve e concreto pesado ou denso. Dentro desta classificação, os traços T 30S, T 40S e T 50S apresenta-se uma faixa de valores de massa específica seca menor que 2.000 Kg/m³, atingindo 1.976,86 Kg/m³, 1.911,73 Kg/m³ e 1.847,23 Kg/m³ respectivamente para sua determinação final. Visto isso, os concretos desenvolvidos nestes traços na pesquisa foram classificados como concretos leves, permanecendo dentro da faixa de 900 a 2.000 Kg/m³.

Segundo a NM 35 (ABNT, 1995), nenhum dos traços atingiu a massa específica mínima para ser considerado concreto leve, o mais próximo seria o T 50S que chegou a 1.847,23 Kg/m³, apenas 7,23 Kg/m³ acima do mínimo ou 0,39 % acima da norma. Porém para ACI 213R-03 (2003), EUROCODE 2 (2015), RILEM (1975), e CEB-FIP (1977), neste trabalho obtive traços que são sim considerados concretos leves.

Segundo a norma vigente EUROCODE 2 (2015), ela classifica o concreto leve em classes de densidade dependendo do resultado da massa específica atingido, elas variam de 1,0 (801 Kg/m³ a 1.000 Kg/m³) a 2,0 (chegando a 1.801 Kg/m³ a 2.000 Kg/m³), e as amostras T 30S, T 40S e T 50S estão dentro deste intervalo podendo ser observado na Figura 29 e estando classificadas com uma classe de densidade 2,0. Estas classes são

avaliadas na norma EN 206-1 (2007), que explica as especificações, desempenho, produção e conformidade que este concreto poderá ser utilizado.

Segundo a norma norte-americana ACI 213R-03 (2003), para ser classificado como concreto leve, é necessário que a amostra tenha uma massa específica entre 1.120 Kg/m³ e 1.920 Kg/m³ e tenha uma resistência à compressão mínima aos 28 dias de 17 MPa. Portanto, nesta análise podemos confirmar que os traços T 40S e T 50S foram classificados como concretos leves, atingindo 1.911,73 Kg/m³ e 20,86 MPa e 1.847,23 Kg/m³ e 17,73 MPa respectivamente.

Para RILEM (1975) e CEB-FIP (1977), a sua classificação de concreto leve é baseada em a massa específica ser inferior a 2.000 Kg/m³, portanto segundo estas avaliações os concretos T 30S, T 40S e T 50S foram classificados como leve. Rossignolo (2009), em sua pesquisa afirma que os concretos leves apresentam massa específica e massa unitária menores que os concretos convencionais. Essa redução de massa ocorre devido às características dos agregados leves, visto que são menos densos que os agregados naturais. Podemos observar na Figura 31, essa tabela facilita a observação das classificações das normas estudadas e se o concreto desenvolvido está classificado como concreto leve.

Figura 31: Resultados e classificações das amostras

Norma	Classificação	T 10S	T 20S	T 30S	T 40S	T 50S
NM 35 (ABNT, 1995)	Massa específica <= 1.840 Kg/m ³	Não	Não	Não	Não	Não
ACI 213R-03 (2003)	Massa específica entre 1.120 e 1.920 Kg/m ³ e resistência à compressão mínima de 17 MPa	Não	Não	Não	Sim	Sim
EUROCODE 2 (2015)	Massa específica entre 801 e 2.000 Kg/m ³	Não	Não	Sim	Sim	Sim
RILEM (1975)	Massa específica < 2.000 Kg/m ³	Não	Não	Sim	Sim	Sim
CEB-FIP (1977)		Não	Não	Sim	Sim	Sim
Resultados aos 28 dias		T 10S	T 20S	T 30S	T 40S	T 50S
Massa específica (Kg/m ³)		2103,42	2059,16	1976,89	1911,73	1847,23
Resistência à compressão (MPa)		37,9	34,2	26,8	20,9	17,7

Fonte: Autor (2022).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio deste estudo foi possível analisar e avaliar a utilização de agregados miúdos naturais em um concreto convencional, comparando os teores de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de substituição de agregado miúdo leve. Cabe salientar que relacionando a outros trabalhos, nesta pesquisa foi adotado a compensação de massa por volume, portanto não foi adicionado material para que resulte em um concreto com maior volume comparado ao convencional, em outras referências foram substituídas em relação a massa do agregado retirado do concreto convencional, resultando em um volume maior. Outro ponto notável é que nesta pesquisa, foi optado pela substituição do agregado miúdo natural por um agregado miúdo leve, e em outros trabalhos foram substituídas o agregado graúdo. De uma forma mais detalhada, se conclui que:

- Com relação ao comportamento do concreto no estado fresco:

Analisando a trabalhabilidade notamos que quanto maior teor de substituição do agregado miúdo pelo agregado leve, apresenta-se uma perda de trabalhabilidade e com isso foi necessário adicionar mais água na mistura para garantir o abatimento. Verificando a massa específica dos traços percebeu que quanto maior o teor de substituição, menor será a massa específica, resultando que o concreto de fato ficará mais leve, isso acontece devido ao agregado miúdo leve utilizando, a vermiculita, ter características mais porosas em relação ao agregado natural.

- Com relação ao comportamento do concreto no estado endurecido:

Considerando os ensaios de resistência à compressão, observa-se que aos 7 dias há diferença entre os traços em função da porção de agregado natural substituído. Aos 28 dias podemos ver que todos os traços obtiveram um aumento de porcentagem de resistência relativamente semelhante. Verificando os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias observa-se que nos traços REF e T 20S obtiveram uma resistência de mesmo valor, isso pode ser entendido aos problemas na prensa no dia do ensaio. Porém, os demais traços atingiram o resultado esperado sem maiores surpresas. Considerando os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade nota-se que novamente o concreto REF obteve um valor não esperado, porém nos demais traços podemos visualizar que quanto maior o teor de substituição do agregado miúdo leve, menor será o módulo de elasticidade.

Para o ensaio de absorção de água total, índice de vazios e massa específica, as amostras com substituição do agregado miúdo natural, observamos que a absorção de água total é maior conforme o valor de vermiculita adicionada. Também se observa que nos menores teores de substituição o índice de vazios na mistura o resultado obtido foi inferior ao REF. Analisando esta pesquisa podemos afirmar que quanto maior o teor de substituição de agregado miúdo leve, menor é o valor de massa específica, também podendo ser observado no estado fresco.

- Com relação ao desempenho mecânico dos teores estudados:

Em trabalhos lidos como referências, notou-se que poucos utilizaram teores de substituição acima de 20%, portanto optou-se pela proposta de entender um pouco melhor sobre as características mecânicas de um concreto com substituição do agregado miúdo utilizando teores maiores de substituição. A vermiculita possui vantagens e desvantagens, e a partir da análise dos resultados experimentais realizados em concretos com diferentes proporções de substituição da areia natural por vermiculita expandida, podemos conhecer suas qualidades.

As resistências dos concretos diminuíram à medida que se aumentaram as porcentagens de substituição da areia por vermiculita expandida, fato justificado pela porosidade apresentada pela vermiculita, um agregado extremamente leve, apresentando um módulo de elasticidade inferior ao dos agregados convencionais sendo, dessa forma, a ligação mais fraca da mistura. Outro fator ligado ao desempenho é que o concreto com vermiculita apresenta menor trabalhabilidade que o concreto convencional e isso é devido à vermiculita reter água na sua estrutura, observamos que há um limite de absorção na qual podemos obter uma máxima resistência mecânica.

Por meio desta pesquisa, foi possível analisar o comportamento dos agregados miúdos leves em substituição do agregado miúdo natural na produção de concreto convencional. E analisando os resultados podemos verificar que o traço com melhores propriedades seria o T 40S, onde ele é classificado como concreto leve em quatro das cinco normas de classificação de concreto leve estudadas. Com a análise da massa específica do concreto com 40% de substituição, podemos concluir que em comparação com o REF, obtivemos uma redução de 9,33% de sua massa e com uma resistência de 20,86 MPa aos 28 dias, e assim concluímos que o concreto pode ser considerado um concreto estrutural pois está de acordo com a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) que exige uma resistência mínima de 20 MPa (para ambientes com classe de agressividade ambiental I). A utilização

deste concreto com a adição de vermiculita resultaria em melhor conforto térmico e acústico entre pavimentos, e resultaria em menos cargas na estrutura e assim reduzindo os esforços nas fundações e ocasionando a redução de barras de ferro necessárias para a estrutura.

5.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer desta pesquisa identificou-se alguns assuntos que poderiam ser melhor aprofundados, com o intuito de entender o comportamento do agregado miúdo leve. Deste modo, seguem algumas sugestões que podem ser aplicadas em projetos de pesquisa de trabalhos futuros:

- a) Analisar as propriedades do concreto com a utilização de 100% de vermiculita em substituição do agregado miúdo;
- b) Analisar a resistência à compressão acima dos 28 dias para verificar se a resistência continua aumentando;
- c) Avaliar a diferença financeira em relação à utilização do concreto convencional no quantitativo de aço na estrutura;
- d) Análise das propriedades térmicas e sonoras na utilização deste concreto na utilização em lajes;
- e) Analisar a trabalhabilidade de um concreto convencional utilizando vermiculita expandida e utilizando aditivos no lugar de água de compensação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGELIN, Andressa F. **Concreto leve estrutural - Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais**. 126f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) - Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2014.

ANGELIN, A.F.; RIBEIRO, L.C.L.J.; PIRES, M.S.G.; JACINTO, A.E.P.G.A.; LINTZ, R.C.C.; Barbosa, L.A.G. **Mechanical Evaluation of Concrete Containing Lightweight Aggregates**. Applied Mechanics and Materials, v. 405-408, p. 2699-2702, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR NM 35/95**: Agregados leves para concreto estrutural - Especificação. Rio de Janeiro, ABNT 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR NM 43**: CIMENTO PORTLAND - Determinação da Pasta de Consistência Normal. Rio de Janeiro, ABNT 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, ABNT 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR NM 52**: Agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR NM 53**: agregado graúdo – determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR NM 67**: concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 5674**: Manutenção de edificações - Requisitos para o sistema de gestão de manutenção. Rio de Janeiro, ABNT 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 5738**: Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, ABNT 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 5739:** concreto - ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto -Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7211:** agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7217 -** Determinação da Composição Granulométrica. Rio de Janeiro, ABNT 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7222:** concreto e argamassa - determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 8522:** concreto - determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 8953:** Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 9833:** concreto fresco – determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 9935:** Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro, ABNT 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 11579:** Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 um (n°200). Rio de Janeiro, ABNT 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 12655:** Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 12821:** Preparação de concreto em laboratório - Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15575**: Edificações habitacionais — Desempenho. Rio de Janeiro, ABNT 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 16607**: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, ABNT 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 16889**: Concreto - Determinação Da Consistência Pelo Abatimento Do Tronco de Cone. Rio de Janeiro - 2020.

RILEM. Recommendations of TC 116-PCD. **Tests for gas permeability of concrete**. *Revista Materials and Structures*. V.32, n. 217, Abril 1999.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide for structural lightweight aggregate concrete**. ACI 213R-03. USA, 2003.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Standard Specification for Portland Cement**. C150. USA, 1999.

ABCP - **Associação Brasileira de Cimento Portland** - Jaguaré, São Paulo - SP, Disponível em: <https://abcp.org.br/>

AMN - **Agência Nacional de Mineração** - Brasília, Distrito Federal - Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br>

AGNESINI, M.V.C.; GOMES NETO, D.P. **Microconcretos leves com argila expandida: influência da adição de sílica ativa no fator de eficiência em dosagem de pré-fabricados de pequena espessura: estudo de caso**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40. Rio de Janeiro, 1998. Anais.

AGNESINI, M.V.C. **Concretos com ar incorporado. Efeitos produzidos pela incorporação de ar sobre as propriedades dos concretos dosados com os agregados usualmente empregados na região de São Carlos**. São Carlos: EESC-USP, 1988.

ALBUQUERQUE, A. S. “*Agregados*”. In: BAUER, L.A.F. **Materiais de construção**. 4a ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1994. v.1.

AL-KHAIAT, H.; HAQUE, M.N. *Effect of initial curing on early strength and physical properties of lightweight concrete*. *Cement and Concrete Research*, v.26, n.6, 1998.

ANDRADE, Lucimara Aparecida Schambeck et al. **Reaproveitamento de rejeitos de EVA para a produção de placas utilizadas na construção civil**. *Revista Científica Linkania Master*, v. 3, n. 3, 2012.

ANDRADE, L. A. S.; MEDEIROS, R., **Reaproveitamento de rejeitos de E.V.A. para a produção de placas utilizáveis na construção civil**. *Revista Científica Indexada Linkania Master*, 2012.

Araújo, J. M. - **Curso de Concreto Armado, vol. 2**, Editora Dunas, Rio Grande, 1998.

BARBAR, J. S. **Influência do teor de ar incorporado no desempenho de concretos com diferentes teores de agregados**. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção. Vol 1**. 5ª Edição revisada. 2000 LTC Editora S.A.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994. v. 2,

BORJA, E.V. **Efeito da adição da argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves auto adensáveis**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

BREMNER, T.W. **Concreto de agregado leve**. Revista técnica, n.37, 1998.

BREMNER, T.W.; HOLM, T.A.; McINERMEY, J.M. **Influence of compressive stress on the permeability of concrete**. In: ACI SYMPOSIUM ON PERFORMANCE OF STRUCTURAL LIGHTWEIGHT CONCRETE. Dallas, Texas, 1991. Proceedings.

BREMNER, T.W., HOLM, T.A., DESOUZA, H. **Aggregate-matrix interaction in concrete subjected to severe exposure**. In: FIP-CPCI INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONCRETE SEA STRUCTURES IN ARCTIC REGIONS. Calgary, Canada, 1984. Proceedings.

CATOIA, Thiago. **Concreto Ultraleve Estrutural com Pérolas de EPS: Caracterização do material e estudo da sua aplicação em lajes**. 2012. 154 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

CHANDRA, S.; BERNTSSON, L. **Mix Proportioning. In: Lightweight aggregate concrete: science, technology and applications**. Building Materials Series. Norwich, NY. 2002.

COUTO, T.A.; **Reação Álcali-agregado, estudo do fenômeno em rochas silicosas**. 2008. Dissertação - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.

CUCHIERATO, G.; **Caracterização tecnológica de resíduos da mineração de agregados da região metropolitana de São Paulo visando seu aproveitamento econômico**. 2000. Dissertação de mestrado. Curso Recursos Minerais e Hidrogeologia. Universidade de São Paulo Instituto de Geociências.

Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (1992). **An introduction to the rock-forming minerals**. 2nd ed. Harlow, Essex, England : New York, NY: Longman Scientific & Technical.

DIERKES, W. **Borracha Reciclada: Uma Matéria-Prima de Valor**. Vredestein Rubber Resources. Maastricht, Holanda. Matéria Técnica, s.d. Disponível em:

EUROLIGHTCON – **Economic Design and Construction with Lightweight Aggregate Concrete**. LWAC Materials Properties, State-of-the-art. Project BE96-3942/R2, Noruega, 1998.

FAUSTO, A. P.; MOSER, D. E. **Concreto com ar incorporado: Efeitos na resistência mecânica**. In: 53o Congresso Brasileiro do Concreto CBC2011, 2011, Florianópolis. Anais..., Florianópolis, 2011.

FIORITI, C. F.; INO, A.; AKASAKI, J. L. **Análise experimental de blocos intertravados de concreto com adição de resíduos do processo de recauchutagem de pneus**. Acta Scientiarum – Technology, Maringá, v. 32, n. 3, 2010.

Florrance de Melo Rocha, B., Figueiredo, F. B., & Araujo Altran, D. (2017). **ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E APLICAÇÃO DO CONCRETO LEVE COM A UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO - EPS**. Colloquium Exactarum. ISSN: 2178-8332, 8(3). Recuperado de <https://revistas.unoeste.br/index.php/ce/article/view/1860>

GARLET, G. **Aproveitamento de resíduo de E.V.A. (Ethylene Vinyl Acetate) como agregado para concreto leve na construção civil**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia-UFRG, Rio Grande do Sul, 1998.

Global Minérios - **Mineradora Global Minérios** - Joinville, SC - Disponível em: <https://www.globalminerio.com.br/>

GRANZOTTO, L. SOUZA, R. A. D. **Mechanical properties of structural concrete with partial replacement of fine aggregate by tire rubber**. Acta Scientiarum – Technology, Maringá, v. 35, n. 1, 2013.

GUSMÃO, A. D. **Manual de gestão dos resíduos da construção civil**. Camaragibe: CCS Gráfica Editora, 2008.

HELENE, P.R.L. **Concreto de elevado desempenho para o ano 2000**. Revista Politécnica, n.207, 1992.

HELENE, P. **A nova NB 1/2003 (NBR 6118) e a Vida Útil das Estruturas de Concreto**. [S.l.]: [s.n.].

HOLM, T. A.; Bremner, T. W. **State-of-the-art report on high-strength, high durability structural low-density concrete for applications in severe marine**

enviroNBREnts. US Army Corps of Engineers – Engineer Research in Development Center, ERDC/SL TR-00-3, 2000.

HOLM, T. A.; Bremner, T. W. **High performance concrete: properties and applications**. Inglaterra, McGraw-Hill, 1994.

HOFF, G. C. **High strength lightweight concrete for artc applications**. In: ACI Symposium on Performance of Structural Lightweight Concrete, Dallas, 1991.

ISAIA, G.C. (Org.). **Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. vol. 2.

KAEFER, L. F. A evolução do concreto armado. PEF 5707 – Conceção, Projeto e Realização das estruturas: aspectos históricos. São Paulo- SP, 1998.

KULAIF, YARA. **Análise dos mercados de matérias primas minerais: estudo de caso da indústria de pedras britadas do estado de São Paulo**, São Paulo, 2001.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2a Edição. São Paulo, 2014.

MICHEVIZ, Juliana; SANTOS, Juliane da Costa; TEIXEIRA, Roger Alexandre Nonato da Luz. **Análise experimental de blocos de concreto com função estrutural produzidos com agregados leves**. 2011. 98 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

MITIDIARI, A. **Agregados leves em pré-moldados de concreto**. In: COLÓQUIO SOBRE PRÉ-MOLDADOS DE CONCRETO. IBRACON. São Paulo, 1976.

MONTEIRO, P.J.M. **Caracterização da microestrutura do concreto: Fases e interfaces; aspectos de durabilidade e de microfissuração**. São Paulo, 1993. Tese (livre docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Moravia, W.G. **Influência de parâmetros microestruturais na durabilidade do concreto leve produzido com argila expandida**. Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

NEVILLE, Adam Matthew. **Propriedades do Concreto**. Tradução: Salvador E. Giammusso, 2 ed. rev. Atual, São Paulo: Ed. PINI, 1997.

Neville, A. M.; Brooks, J.J. **Tecnologia do concreto**. 2a edição, Editora Bookman, Porto Alegre, 2013.

PEDROSO, Fábio Luis. **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem**. Concreto e Construções, Mar. de 2009.

PEREIRA, Murilo Giatti Furquim. **POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS LEVES NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS ESTRUTURAIS**. 2012. 67 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

PETRUCCI, Eládio G. R. **Concreto de cimento Portland**. 13. Ed. Ver. Por Vladimir Antônio Paulon – São Paulo: Globo, 1998.

REIS, E. (2002). **Vermiculita no Brasil – Situação atual**. Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) / Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE).

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de construção civil**. 4o Ed. Belo Horizonte. Editora UFMG, 2013

RILEN – INTERNATIONAL UNION OF TESTING AND RESEARCH LABORATORIES FOR MATERIALS AND STRUCTURES. **Terminology and Definitions of Lightweight Concrete**, 1975.

ROCHA, Bárbara Florraine de Melo; FIGUEIREDO, Filipe Bittencourt; ALTRAN, Daniele Araujo. **ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO LEVE COM AGREGADOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO-EPS**. In: **CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA**, 73., 2016, Foz do Iguaçu. CONTECC. Foz do Iguaçu: Soea, 2016.

ROSSIGNOLO, J.A.; **CONCRETO LEVE DE ALTO DESEMPENHO MODIFICADO COM SB PARA PRÉ-FABRICADOS ESBELTOS - DOSAGEM, PRODUÇÃO, PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA**. 2003. 220 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ROSSIGNOLO, J.A; AGNESINI, M.V.C. **Concreto estrutural leve**. In: ISAIA, G.C. (Ed) **Concreto: ensino, pesquisas e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. **Concreto Estrutural Leve**. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Ibracon, 2005.

ROSSIGNOLO, J.A.; Agnesini, M.V.C.; Morais, J.A. **Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates**. *Cement & Concrete composites*, v.25, 2003.

ROSSIGNOLO, João Adriano. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações**. São Paulo: PINI, 2009.

SANTIS, Bruno Carlos de. **Agregado leve de argila calcinada para uso em concreto estrutural: viabilidade de cerâmica vermelha no estado de São Paulo**. 2012. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SILVA, M. B. **Materiais de Construção**. São Paulo. 2a Ed. Rev. PINI, 1991.

SILVA, I.J. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura.** São Carlos, 2000. Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SILVA, Carolina Machado e. **Estudo de traço para produção de blocos de vedação utilizando como parte do agregado a vermiculita.** 2014. 24 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2014.

SOUZA SANTOS, P. **Ciência e tecnologia das argilas.** 2° ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1992

TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo: Pini; Brasília, DF: SENAI, 1992.

VIEIRA, M.G. **Betões de elevado desempenho com agregados leves – Durabilidade e microestrutura.** Dissertação (mestrado), Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2000.

VIEIRA, A. **Agregados de argila calcinada: produção e utilização em pavimentação rodoviária na região amazônica.** 2000. 1° Seminário de qualificação acadêmica ao doutorado - COPPE/UFRJ, 2000.

ZHANG, M. H.; GJØRV, O. E. **Microstructure of the Interfacial Zone Between Lightweight Concrete and Cement Paste.** Cement and Concrete Research, v. 20, n. 4, p. 610-618, jul. 1991.