

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

JÉSSICA SANTOS BORGES

CONCRETO LEVE COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR
ARGILA EXPANDIDA

Joinville

2023

JÉSSICA SANTOS BORGES

CONCRETO LEVE COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR
ARGILA EXPANDIDA

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Valéria Bennack

Joinville

2023

JÉSSICA SANTOS BORGES

CONCRETO LEVE COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR
ARGILA EXPANDIDA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 30 de novembro de 2023.

Banca Examinadora:

Dra. Valéria Bennack

Orientadora/Presidente

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Dra. Anelize Borges Monteiro

Membro

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Dr. Antônio Otaviano Dourado

Membro

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Dr. Luciano Senff
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Joinville, 2023

Dedico esse trabalho à Deus, Nossa Senhora e à minha família, por sempre estarem ao meu lado

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho acadêmico. Este TCC representa não apenas o meu esforço individual, mas também a colaboração e o apoio de muitas pessoas que foram fundamentais ao longo desta jornada.

Primeiramente, expresso minha profunda gratidão a minha orientadora Valeria Bennack, pela orientação dedicada, incentivo constante e valiosas sugestões que foram cruciais para o desenvolvimento e aprimoramento deste trabalho. Sua expertise e paciência foram verdadeiramente inspiradoras.

Aos professores e membros da banca examinadora, agradeço pela disposição em avaliar este trabalho, por fazerem parte de minha história acadêmica, contribuindo com suas críticas construtivas e lições de vida ao longo dos anos.

À minha família, principalmente aos meus pais, Angela Cruz dos Santos e Federico Borges Filho, que sempre esteve ao meu lado, oferecendo apoio emocional, compreensão nos momentos desafiadores e as duas mãos para a realização desse trabalho. Obrigado por serem a minha fonte inesgotável de motivação.

As minhas amigas, Rafaela Emmerich, Manuela Helena, Amanda Telesse, Beatriz Fieldkircher, Larissa Xavier, Leticia Meuer, Tatiana Koerner e Regiane Morato, compartilho minha gratidão pela troca de conhecimento, pelas discussões enriquecedoras e pelo suporte mútuo ao longo dessa jornada acadêmica.

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora, cuja sabedoria, orientação e proteção divina foram a luz que iluminou cada passo deste percurso acadêmico. A Ele e a Mãe, expresso minha profunda gratidão por guiar meus esforços e caminho, por interceder por mim em cada etapa e por conceder a força necessária para superar desafios.

Não posso deixar de mencionar o apoio da instituição de ensino e seus trabalhadores, que proporcionou o ambiente propício para o desenvolvimento deste trabalho e o crescimento acadêmico.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho, mesmo que não tenham sido mencionados nominalmente. Cada pequeno gesto de incentivo e suporte foi fundamental. A todos vocês, o meu sincero obrigado.

“Ainda que eu ande pelo vale da sombra da morte, não temerei mal nenhum, porque
Tu estás comigo; o teu bordão e o teu cajado me consolam”

Salmo 23:4

RESUMO

No cenário da construção civil, a busca por alternativas sustentáveis e economicamente viáveis é crucial, especialmente em estruturas de grandes proporções ou em solos com baixa resistência. Diante deste cenário, várias pesquisas surgiram, dentre elas as relativas à produção de concretos leves, principalmente com substituição parcial ou total de agregado por agregados leves, como a argila expandida, visando a redução de massa específica seca e aumento da resistência mecânica. Esse trabalho propõe avaliar a viabilidade da substituição parcial do agregado miúdo convencional pela argila expandida tipo 2,5 mm. O foco está em desenvolver um concreto leve, aspirando alcançar não apenas boa resistência, com valor superior a 25 MPa, mas também a classificação como concreto leve estrutural. Para atingir esse propósito, foram elaborados traços específicos para representar o concreto de controle, com 25% e 50% de substituição do agregado miúdo, respectivamente o T0, T25 e T50. As análises realizadas indicaram uma resistência superior à apresentada na literatura para ambos os traços com substituição, evidenciando uma massa específica seca característica de concreto leve. Embora alguns autores questionem sua adequação estrutural, a pesquisa contribui significativamente para a ampliação dos estudos que envolvem a argila expandida na substituição de agregados miúdos, destacando-se como uma alternativa promissora para a redução de custos finais em obras, sem comprometer a qualidade e a eficiência estrutural.

Palavras-chave: Concreto leve. Argila expandida. Substituição do agregado miúdo. Resistência mecânica.

ABSTRACT

In the civil construction scenario, the search for sustainable and economically viable alternatives is crucial, especially in large structures or in soils with low resistance. Given this scenario, several studies have emerged, among them those related to the production of light concrete, mainly with partial or total replacement of aggregate by light aggregates, such as expanded clay, aiming at the reduction of dry specific mass and increase in mechanical strength. This work proposes to evaluate the feasibility of the partial replacement of the conventional fine aggregate by 2.5 mm expanded clay. The focus is on developing a light concrete, aspiring to achieve not only good strength, with a value greater than 25 MPa, but also the classification as structural light concrete. To achieve this purpose, specific traits were elaborated to represent the control concrete, with 25% and 50% replacement of the fine aggregate, respectively T0, T25 and T50. The analyses carried out indicated a strength higher than that presented in the literature for both traits with substitution, evidencing a dry specific mass characteristic of light concrete. Although some authors question its structural adequacy, the research contributes significantly to the expansion of studies involving expanded clay in the replacement of small aggregates, standing out as a promising alternative for the reduction of final costs in works, without compromising quality and structural efficiency.

Keywords: Lightweight concrete. Expanded clay. Fine aggregate substitution. Mechanical resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Três processos de concreto leve	21
Figura 2 - Espectro dos agregados leves	22
Figura 3 - Gráfico relação água/cimento x resistência à compressão.....	24
Figura 4 - Padrão de fratura	25
Figura 5 - Tipos de argilas expandidas	30
Figura 6 - Cimento CP V-ARI	33
Figura 7 - Argila expandida tipo 2,5mm.....	35
Figura 8 - Separação do material para os traços T50, T25 e T0	38
Figura 9 - Corpos de prova após moldagem	39
Figura 10 - Corpos de prova após desmolde	40
Figura 11 - Corpos de prova na cura úmida	40
Figura 12 - Agitador mecânico e peneiras utilizadas no agregado graúdo	41
Figura 13 - Peneiras utilizadas nos agregados miúdos	42
Figura 14 - Ensaio de abatimento a) T0, b) T25 e c) T50	44
Figura 15 - Pesagem da massa do T0	46
Figura 16 - Ensaio de compressão T50.....	47
Figura 17 - Corpo de prova sendo imerso em água	48
Figura 18 - Ensaio de permeabilidade.....	50
Figura 19 - Argila expandida nas peneiras 180 µm e 75 µm	53
Figura 20 - Abatimento do T50.....	56
Figura 21 - Abatimento traços T0 e T25.....	57
Figura 22 - Comparativo de rompimento	63
Figura 23 - Comparativo visual de argila	63
Figura 24 - Base dos corpos de prova após 30 dias	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação com base na resistência.....	22
Tabela 2 - Classificação segundo a forma das partículas	26
Tabela 3 - Propriedades químicas e físicas da argila expandida tipo 2,5mm	34
Tabela 4 - Traço do concreto	37
Tabela 5 - Trabalhabilidade e uso do concreto segundo Slump Test	44
Tabela 6 - Classes de consistência	45
Tabela 7 - Granulometria da areia.....	51
Tabela 8 - Granulometria da argila expandida	52
Tabela 9 - Diâmetro máximo e módulo de finura.....	54
Tabela 10 - Massa unitária dos agregados miúdos	55
Tabela 11 - Resultados do ensaio de abatimento do tronco cone	55
Tabela 12 - Slump test de comparação.....	56
Tabela 13 - Massa aparente no estado fresco	57
Tabela 14 - Dados do ensaio de resistência à compressão axial	58
Tabela 15 - Resultado dos ensaios das propriedades físicas.....	61
Tabela 16 - Massa específica seca do concreto.....	64
Tabela 17 - Dados de início do ensaio de permeabilidade	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Granulometria dos agregados miúdos	52
Gráfico 2 - Granulometria dos agregados graúdos	53
Gráfico 3 - Curva granulométrica de passante do agregado miúdo.....	54
Gráfico 4 - Resistência à compressão axial média	59
Gráfico 5 - Comparativo da resistência à compressão	60
Gráfico 6 - Absorção de água	61
Gráfico 7 - Índice de vazios	62
Gráfico 8 - Comparativo de massa específica	64

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Massa unitária do agregado	43
Equação 2 - Resistência à compressão (F_c)	47
Equação 3 - Absorção (A)	48
Equação 4 - Índice de vazios (IV)	49
Equação 5 - Massa específica da amostra seca (ρ_s)	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

% – Porcentagem

°C – Graus Celsius

a/c – Relação água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

ARI – Alta resistência inicial

ASTM – American Society for Testing and Materials

CLE – Concreto Leve Estrutural

CL – Concreto leve

cm – Centímetros

CP – Corpo de prova

CP V – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

g/cm³ - Grama por centímetro cúbico

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

J/m²s°C/m – Joules por metro quadrado por segundo por grau Celsius por metro

kg – Quilograma

kg/m³ - Quilograma por metro cúbico

Lam – Laminar

LMCS – Laboratório de Materiais de Construção Sustentável

Mpa – MegaPascal

mm – Milímetros

µm – Micrômetros

m³ - Metro cúbico

N – Newton

NBR – Norma Brasileira

t/m² - Tonelada por metro quadrado

T0 – Traço 0 – Referência

T25 – Traço 25 – Com substituição parcial de 25%

T50 – Traço 50 – Com substituição parcial de 50%

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Objetivos	18
1.1.1. Objetivo geral.....	18
1.1.2. Objetivos específicos.....	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1. Concreto.....	19
2.1.1. Concreto leve.....	19
2.1.2. Resistência mecânica do concreto no estado endurecido	23
2.2. Agregados.....	25
2.2.1. Agregado leve.....	27
2.3. Concreto leve com argila expandida	30
3. METODOLOGIA.....	32
3.1. Característica dos materiais	32
3.1.1. Cimento Portland	32
3.1.2. Agregados graúdos	33
3.1.3. Agregados miúdos.....	34
3.1.4. Aditivo	35
3.2. Dosagem do concreto.....	36
3.3. Moldagem dos corpos de prova	38
3.4. Ensaios	40
3.4.1. Granulometria dos agregados.....	41
3.4.2. Massa unitária dos agregados miúdos	42
3.4.3. Concreto no estado fresco: <i>Slump Test</i>	43
3.4.4. Densidade da massa aparente no estado fresco	45
3.4.5. Concreto no estado endurecido: Ensaio de compressão axial	46
3.4.6. Propriedades físicas do concreto no estado endurecido	47
3.4.7. Ensaio de permeabilidade.....	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
4.1. Granulometria dos agregados	51
4.2. Massa unitária dos agregados miúdos.....	55
4.3. Concreto no estado fresco: <i>Slump Test</i>	55
4.4. Densidade da massa aparente no estado fresco	57
4.5. Concreto no estado endurecido: Ensaio de compressão axial	58

4.6. Propriedades físicas do concreto no estado endurecido	61
4.7. Ensaio de permeabilidade	65
5. CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS	69

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023) o Brasil abriga uma população de 203.080.756 pessoas, e em 2016 já possuía seis grandes concentrações urbanas (IBGE, 2016). Nestes centros urbanos, construtoras têm buscado alternativas para enfrentar desafios como a escassez de solos capazes de suportar as cargas que as edificações transferem, além de mitigar os efeitos do calor e do ruído urbano (Borja, 2011).

Uma das estratégias adotadas é a redução do peso nas estruturas, visto que, segundo Adão (2010, p. 18), um edifício médio pesa cerca de uma tonelada por metro quadrado (1 t/m^2), sendo, aproximadamente, a cada 1 m^3 de concreto igual a 80 kg de aço. O concreto tradicional possui massa específica seca que varia entre 2.000 kg/m^3 e 2.800 kg/m^3 , enquanto o concreto leve possui massa específica inferior a 2.000 kg/m^3 , conforme a NBR 12655 (ABNT, 2022).

Segundo Rossignolo (2003), os avanços tecnológicos durante as Guerras Mundiais impulsionaram o desenvolvimento de concretos leves, principalmente com a utilização de agregados leves, inicialmente destinados à construção naval. Posteriormente, esses estudos foram expandidos para diversas aplicações na construção civil, tanto *in loco* quanto em elementos pré-moldados.

A utilização dos agregados leves é vantajosa, uma vez que, devido a sua estrutura porosa, esses materiais apresentam menor massa específica em comparação aos agregados tradicionais. No entanto, Borja (2011) alerta que tal característica compromete o desempenho estrutural do concreto, reduzindo a resistência e limitando a patamares relativamente baixos em comparação ao concreto convencional. O concreto leve pode incorporar total ou parcialmente esses agregados leves.

Destaca-se entre esses agregados leves a argila expandida, amplamente pesquisada para ser utilizada na construção civil, principalmente em estudos voltados à substituição de agregados graúdos, enquanto são poucos os estudos sobre sua substituição como agregado miúdo, conforme aponta Silva (2020).

Estudos anteriores como Moravia *et al* (2006), França (2018) e Silva (2020) concluíram que a substituição total reduz a resistência à compressão significativamente, entretanto utilizaram argila expandida com granulometria

superior à usada neste estudo. Silva (2020) verificou que a substituição de 25% apresentou uma elevação na resistência em comparação ao concreto de controle.

Desse modo, esse trabalho, tem como foco a substituição parcial do agregado miúdo convencional pela argila expandida. A utilização desse agregado miúdo leve é fundamental não apenas para reduzir a massa específica do concreto, mas também para explorar as vantagens proporcionadas pela sua baixa densidade. A análise dos efeitos resultantes dessa substituição visa contribuir para um maior entendimento das propriedades e potencialidades do concreto leve na construção civil.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho consiste em avaliar a viabilidade, desenvolver e analisar um concreto leve com base na substituição do agregado miúdo convencional pela argila expandida.

Nesse contexto, os seguintes objetivos específicos são elencados.

1.1.2. Objetivos específicos

- Caracterizar os agregados graúdos e miúdos;
- Definir o traço de referência e substituir 25% e 50% de agregado miúdo por argila expandida;
- Verificar a resistência à compressão simples aos 28 dias;
- Realizar ensaios de massa específica seca, absorção de água e índice de vazios.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Concreto

Conforme determinado pela ABNT NBR 12655:2022, o concreto de cimento Portland é definido como uma mistura homogênea de cimento, agregados miúdos e graúdos, e água, podendo conter também componentes minoritários como aditivos químicos, sílica ativa e outros materiais. Além disso, a norma estabelece que o termo "concreto", nesse contexto, se refere especificamente ao "concreto de cimento Portland".

De acordo com Adão (2010), o concreto é um material consolidado na construção civil, apresentando resistência satisfatória aos esforços de compressão, mas limitada aos de tração em seu estado endurecido, segundo Petrucci (1993). O autor identifica alguns dos fatores que influenciam sua resistência mecânica, entre eles a relação água/cimento, a forma e graduação dos agregados, o tipo de cimento e a idade.

Outras características relevantes são a massa específica e a trabalhabilidade. A massa específica é, normalmente, a massa da unidade de volume, incluindo vazios, e essa categoriza o concreto como concreto leve, simples ou pesado (Petrucci, 1993). A trabalhabilidade, por sua vez, está relacionada à quantidade de água, tipo e granulometria dos agregados, presença de aditivos, finura do cimento e relação agregado-cimento (Neville, 2013).

Adão (2010) antecipou que o aprimoramento contínuo do concreto deve focar em características fundamentais, tais como resistência mecânica, trabalhabilidade e massa específica. Dentre as pesquisas em andamento, existem várias sobre o concreto leve, caracterizado por possuir uma menor massa específica. Entretanto, o desafio é no aumento da resistência mecânica desse tipo de concreto.

2.1.1. Concreto leve

Como uma variação do concreto tradicional, o concreto leve (CL) apresenta uma característica fundamental: a redução de peso em estruturas. Conforme

discutido por Petrucci (1993), uma das limitações do concreto convencional reside em seu peso elevado em comparação a outros materiais, impactando diretamente na velocidade de execução e na economia da construção, especialmente considerando novas propriedades, como o isolamento térmico. Atualmente, o CL é empregado em projetos que buscam reduzir o peso das estruturas, ao mesmo tempo em que proporciona melhorias significativas em termos de isolamento térmico e acústico.

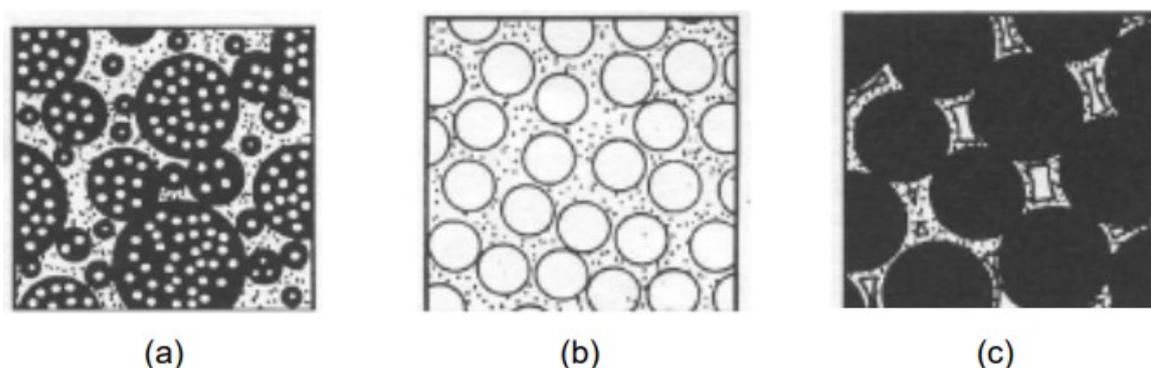
A ABNT NBR 12655:2022 classifica os diferentes tipos de concreto com base em sua massa específica seca, conforme estabelecido na ABNT NBR 9778:2005. De acordo com essa norma, o concreto leve é caracterizado por possuir uma massa específica seca inferior a 2.000 kg/m^3 . Como observa Petrucci (1993), o concreto leve apresenta características notáveis, incluindo sua leveza e alta capacidade de isolamento térmico. No entanto, é importante destacar que ao aprimorar uma dessas propriedades, a outra tende a diminuir (Petrucci, 1993).

Para alcançar uma massa específica seca inferior à do concreto convencional, é necessário aumentar a porosidade da estrutura. Essa porosidade é deliberadamente introduzida por meio da incorporação de vazios, seja no agregado, na argamassa ou nos interstícios entre as partículas dos agregados graúdos, como enfatizado por Neville (2013). Tanto Petrucci (1993) quanto Neville (2013), em suas obras, apresentam três processos ou métodos (Figura 1) amplamente reconhecidos para a obtenção de concreto leve:

- a) Agregados leves referem-se ao concreto desenvolvido mediante a substituição parcial ou total dos agregados tradicionais por agregados leves, podendo ser aplicado em concretos estruturais ou não estruturais (Borja, 2011). Esses agregados porosos leves são caracterizados por uma massa específica inferior a $2,6 \text{ g/cm}^3$ de acordo com Neville (2013);
- b) O método de "incorporação de ar," amplamente conhecida por nomes como "concreto poroso," "concreto celular," "concreto aerado" ou "concreto espumoso," é notável por sua extrema leveza, excelente desempenho como isolante térmico, embora apresente uma resistência mecânica relativamente baixa (Petrucci, 1993). Essa variante do concreto é obtida através da formação controlada de gases ou espumas estáveis, que ficam retidos no interior da massa do material;

- c) A técnica de "exclusão de finos," conhecida como "concreto sem finos," caracteriza-se pela ausência de agregados miúdos, resultando em um grande volume de vazios intersticiais na matriz do concreto, conforme destacado por Neville (2013). Nesse tipo de concreto, os agregados graúdos permanecem convencionais. Essas formulações são consideradas moderadamente leves e apresentam vantagens notáveis, tais como boa capacidade de isolamento térmico, embora sua resistência mecânica seja relativamente baixa (Petrucci, 1993).

Figura 1 - Três processos de concreto leve



Fonte: Moravia, 2007, *apud* Borja (2011).

Conforme Neville (2013), o concreto leve pode ser classificado segundo sua finalidade. Os concretos leves destinados a aplicações estruturais - concreto leve estrutural (CLE) - possui massa específica variada de 1.400 a 1.800 kg/m³, mas sua classificação primária é estabelecida com base na resistência à compressão aos 28 dias (Neville, 2013). A ASTM C 330-05 (*apud* Neville, 2013) estabelece que o concreto leve estrutural não deve ter resistência inferior a 17 MPa.

Neville (2013) também aborda o concreto destinado a aplicações em alvenaria, que apresenta massa específica variando de 500 a 800 kg/m³ e resistência entre 7 a 14 MPa. Além disso, destaca-se o concreto isolante, cuja principal propriedade é a condutividade térmica, a qual é inferior a 0,3 J/m²s°C/m, e resistência variando de 0,7 a 7 MPa (Neville, 2013). A classificação detalhada do concreto leve é apresentada na Tabela 1, conforme Souza Santos (1992, *apud* Pereira, 2008).

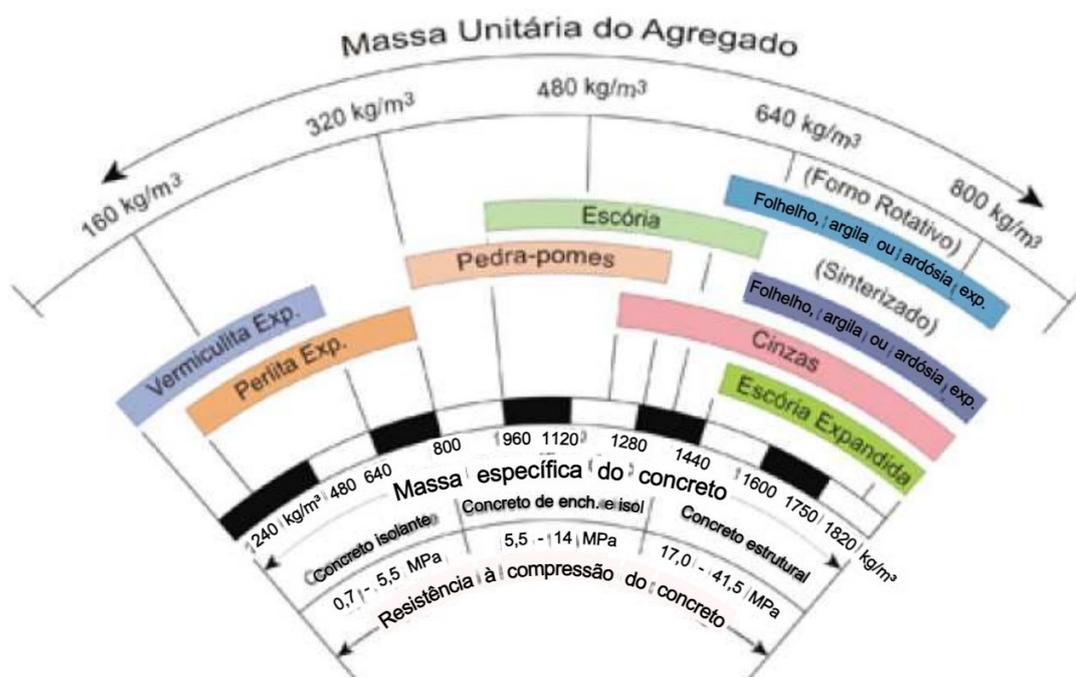
Tabela 1 - Classificação com base na resistência.

Classe	Resistência à compressão (MPa)
Estrutural	21 a 35
Baixa massa específica/alvenaria	7 a 30
Isolação	1,4 a 7

Fonte: Adaptado de Souza Santos, 1992, *apud* Pereira, 2008.

De acordo com Borja (2011), as massas específicas são frequentemente relacionadas à resistência à compressão do concreto. Massas específicas menores terão resistências inferiores e para resistências elevadas é necessário que o concreto seja de massa específica maior. Mehta & Monteiro (2008 *apud* Borja 2011) ilustram um espectro dos agregados leves (Figura 2) classificando-os com base em sua resistência, massa específica do concreto e massa unitária do agregado.

Figura 2 - Espectro dos agregados leves



Fonte: Mehta & Monteiro (2008 *apud* Borja, 2011).

Segundo Borja (2011) e Moravia *et al* (2006) a aplicação de concretos leves não apenas beneficia economicamente os custos da construção devido à redução do peso da estrutura, mas também diminui os esforços necessários dos operários

durante o manuseio, proporcionando um aumento da produtividade e redução dos custos finais associados ao processo de concretagem.

2.1.2. Resistência mecânica do concreto no estado endurecido

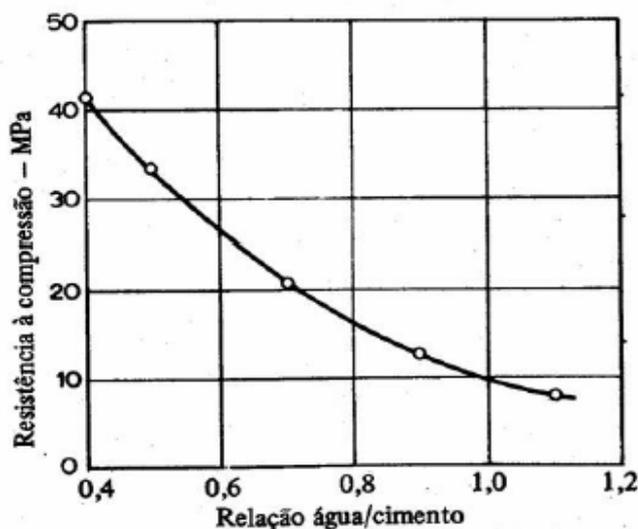
Segundo Neville (2013) a propriedade mecânica no estado endurecido que, normalmente, é considerada a mais importante é a resistência do concreto. Outras propriedades são tão importantes quanto, entretanto é a resistência à compressão que apresenta uma ideia geral da qualidade do concreto, por estar diretamente ligada à estrutura da pasta de cimento (Neville, 2013).

Fatores como relação água/cimento, idade, forma e graduação dos agregados, tipo do cimento, entre outros, afetam a resistência mecânica do concreto (Petrucci, 1993). Outros fatores como a presença de falhas, descontinuidades e poros também influenciam essa propriedade, já que estão muito ligadas à estrutura física do concreto endurecido (Neville, 2013).

A porosidade é um fator de fundamental importância, segundo Neville (2013). Quando o cimento se encontra totalmente hidratado, sólido, é formado um espaço residual no interior do volume total, devido à água excedente do processo de hidratação, que representa cerca de 18,5% ou mais do volume original (Neville, 2013). Os espaços residuais formam vazios ou poros capilares (Neville, 2013).

Neville (2013) comenta que, embora a porosidade seja fundamental, é difícil medi-la, entretanto pode ser determinada através da relação água/cimento (a/c). Deste modo a relação a/c é o principal fator de influência na resistência do concreto segundo Da Silva (2020), que adverte que uma relação insuficiente não permitirá que o cimento se hidrate totalmente e uma alta relação afetará a resistência e a permeabilidade. Na Figura 3 apresenta-se a dependência entre a resistência à compressão do concreto e a relação de água/cimento.

Figura 3 - Gráfico relação água/cimento x resistência à compressão



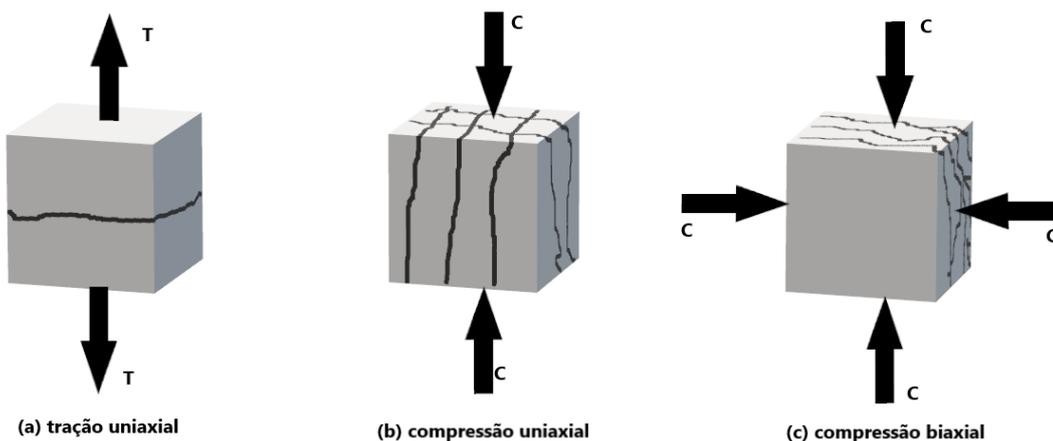
Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland (*apud* Da Silva, 2020)

Petrucci (1993) afirma que o concreto resiste bem aos esforços de compressão, entretanto mal aos de tração. Quando submetido a esforços de tração uniaxial, o material sofre fraturas microscópicas, e por mais que as fissuras sejam tridimensionais, a maior fragilidade do material é quando existem fissuras normais a direção do carregamento da força (Neville, 2013).

Já quando analisada a resistência à compressão do concreto, é possível analisar em uni ou biaxialmente. A compressão uniaxial, sofre fissuras em duas noções geométricas em relação a carga aplicada, fissuras paralelas que ocorrem devido a tensão de tração localizada, e fissuras inclinadas que são geradas devido ao colapso do desenvolvimento dos planos de cisalhamento (Neville, 2013). Essa compressão é semelhante a situação sofrida por um pilar.

Por outro lado, a compressão biaxial se assemelha a laje. Onde são geradas fraturas apenas no sentido paralelo à da carga aplicada (Neville, 2013). A Figura 4 representa os padrões de fratura do concreto com base em seu ensaio de resistência mecânica.

Figura 4 - Padrão de fratura



Fonte: Adaptado de Neville (2013).

Outros tipos de resistência do concreto podem ser analisadas através de ensaios, como compressão triaxial, fadiga, resistência ao impacto, resistência à abrasão, entre outros. De acordo com Neville (2013), aplicações de solicitações cíclicas, estruturas que tem sua superfície submetida ao desgaste e situações em que existe a possibilidade de impacto podem ocorrer, para isso é necessário submeter o concreto a ensaios que representem essas situações.

2.2. Agregados

Especificados pela ABNT NBR 12655:2022, os agregados são definidos como materiais granulares, geralmente inertes, com dimensões e propriedades adequadas para compor argamassas ou concretos. Estima-se que os agregados constituam aproximadamente $\frac{3}{4}$ do volume total do concreto (Neville, 2013). Além disso, “não só limitam a resistência do concreto, como também suas propriedades afetam significativamente a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto” (Neville, 2013).

O uso dos agregados não apenas traz benefícios econômicos ao reduzir o consumo de cimento na mistura, mas também suas propriedades físicas, térmicas e químicas influenciam, significativamente, no desempenho do concreto (Neville, 2013). O mesmo autor observa que, mesmo que se tenham todas as propriedades conhecidas do material granular, é difícil caracterizar um agregado de qualidade.

Os agregados podem ser classificados segundo suas características, dentre elas as dimensões, também chamadas de granulometria, que resulta na distinção entre agregados graúdos e miúdos. Segundo ABNT NBR 7211:2022, os agregados graúdos são definidos como grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 75mm e são retidos na peneira com abertura de malha de 4,75mm, enquanto os agregados miúdos são aqueles que passam pela malha de 4,75mm e são retidos na peneira de malha de 150 μm .

Outra forma de classificação dos agregados baseia-se em sua forma, uma característica externa que, como destacado por Neville (2013), é de difícil descrição para corpos tridimensionais, e para isso é importante definir suas características geométricas. Neville (2013) propôs seis classificações para descrever a forma das partículas, conforme ilustrado na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Classificação segundo a forma das partículas

Classificação	Descrição
Arredondado	Totalmente desgastado pela ação de água ou totalmente conformado por atrito
Irregular	Naturalmente irregular ou parcialmente conformado por atrito com arestas arredondadas
Lamelar	Material em que a espessura é menor que as outras duas dimensões
Anguloso	Possuem arestas bem definidas na interseção de faces razoavelmente planas
Alongado	Material, em geral, anguloso no qual o comprimento é consideravelmente maior que as outras duas dimensões
Lamelar e alongado	Material com o comprimento bem maior que a largura e está bem maior que a espessura

Fonte: Adaptado de Neville (2013)

A ABNT NBR 12655:2022 realiza a classificação dos agregados com base em sua massa específica: agregados leves e densos. De acordo com a norma, os agregados leves devem possuir massa específica igual ou inferior a 2.000 kg/m³, abrangendo materiais como argilas expandidas, escória siderúrgica, vermiculita,

entre outros (ABNT NBR 12655, 2022). Por outro lado, os agregados densos, também conhecidos como agregados pesados, possuem uma massa específica igual ou superior a 3.000 kg/m^3 (ABNT NBR 12655, 2022).

2.2.1. Agregado leve

Segundo Rossignolo (2003), desde o início do século XX, os agregados leves têm sido empregados na produção de concretos leves, graças aos seus expressivos resultados em aplicações estruturais e de vedação. No entanto, a partir da década de 1980, houve um aumento significativo na realização de pesquisas rigorosas sobre esse tipo de concreto (Rossignolo, 2003).

O autor destaca que a substituição dos agregados tradicionais por agregados leves não impacta apenas na massa específica do concreto, mas também afeta a trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de elasticidade, propriedades térmicas, retração, fluência e a espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

Os agregados leves podem ser classificados em naturais ou artificiais, sendo que os leves naturais têm uma aplicação limitada em concretos estruturais, devido às suas propriedades e à localização das jazidas (Rossignolo, 2003). Por outro lado, os agregados leves artificiais são produzidos por processos industriais e se subdividem com base na matéria-prima e no processo de fabricação - sinterização e forno rotativo (Rossignolo, 2003).

De acordo com Pereira (2008), a característica fundamental que distingue os agregados leves é a alta porosidade. Agregados mais porosos apresentam resistências menores em comparação a agregados com estruturas menos porosas (Rossignolo, 2003). Idealmente, é desejável que o agregado possua uma distribuição uniforme de poros, em oposição a uma baixa quantidade de poros de grandes diâmetros (Pereira, 2008).

Com relação aos agregados leves produzidos em forno rotativo, Borja (2011) ressalta que são reconhecidos por sua resistência e durabilidade, atribuídas à formação de uma fase vítrea de alta resistência. Esses agregados desenvolvem um sistema de poros internos uniformemente distribuídos, cujas dimensões variam de $5 \mu\text{m}$ a $300 \mu\text{m}$, demonstrando relativa ausência de fissuras.

Borja (2011) explica que durante o processo de peneiramento, os agregados podem se quebrar, expondo parte dos poros internos à superfície. Ressalta ainda que, quando não sofrem fratura, os poros internos absorvem água lentamente, exigindo mais tempo de exposição para atingir a saturação. O mesmo autor destaca que em contrapartida, os poros internos expostos são facilmente preenchidos.

A ACI 213 (2003, *apud* Borja, 2011) menciona que as propriedades dos agregados leves que exercem impacto direto sobre as propriedades do concreto são:

- Características físicas (forma, textura superficial e granulometria);
- Massa específica e massa unitária;
- Resistência;
- Porosidade total, umidade e absorção de água;
- Módulo de elasticidade.

Dois dos principais agregados leves utilizados na produção de concreto leve estrutural incluem a argila expandida e a ardósia expandida (Borja, 2011). A argila expandida reconhecida é por ser um agregado de baixa porosidade (Holme e Bremner, 1994, *apud* Rossignolo, 2003), além de oferecer propriedades destacadas, como isolamento termoacústico eficiente e desempenho satisfatório em condições de incêndio para o concreto leve estrutural (Adão, 2010).

2.2.1.1. Argila expandida

Em sua tese, Borja (2011) destacou que os agregados leves, para serem considerados adequados para o uso em concretos, devem possuir poros intersticiais encapsulados dentro da estrutura da partícula e envoltos por uma camada superficial vítrea. Essa característica é reconhecida no caso das argilas expandidas.

De acordo com Petrucci (1993), as argilas expandidas são argilas submetidas a um aquecimento rápido a temperaturas entre 1.000 e 1.200°C, o que resulta na formação de gases retidos em seu interior. A empresa brasileira Cinexpan, única que trabalha com argilas expandidas no Brasil (Silva, 2020), aumentou a variação inicial em 100°C, após aproximadamente 30 anos, indo de

1.100 para 1.200°C (Cinexpan, 2020). Esse material, com um núcleo permanentemente poroso, garante leveza e versatilidade.

O processo de fabricação das argilas expandidas ocorre em fornos rotativos, também conhecido como nodulação, conforme descrito por Rossignolo (2003). Agregados produzidos por esse processo apresentam granulometria variada, formato regularmente arredondado e um núcleo composto por uma massa esponjosa de células microscópicas, envolto por uma camada cerâmica vitrificada, resistente e com baixa permeabilidade (Rossignolo, 2003), como também atestado pela Cinexpan (2020).

A fornecedora brasileira classifica esse material em cinco tipos (Figura 5), cada um com aplicações específicas de acordo com suas propriedades físicas e granulometria. Sendo os tipos oferecidos pela Cinexpan, os seguintes:

- Tipo 3222: recomendado para enchimento de vazios com profundidade superior a 10 cm e paisagismo. Apresenta granulometria de 22/32 mm, equivalente à Brita 2, e densidade aparente de 450 kg/m³;
- Tipo 2215: indicado para enchimento de vazios entre 5 e 10 cm e para uso em paisagismo. Possui granulometria de 15/22 mm, comparável à Brita 1 e densidade aparente de 500 kg/m³;
- Tipo 1506: adequado para a produção de concreto leve e preenchimento de até 5 cm, com granulometria de 6/15mm, similar à Brita 0, e densidade aparente de 600 kg/m³;
- Tipo 0500: utilizado na fabricação de concreto leve e preenchimento de até 5 cm, com granulometria de 0/5mm, equivalente à areia grossa, e densidade aparente de 850 kg/m³. Esse tipo apresenta qualidade de acabamento com redução de peso;
- Tipo Lam 2,5: destinado à produção de churrasqueiras, lareiras e refratários pré-moldados, com granulometria de 0/2,5mm, semelhante à areia média, e densidade aparente de 750 kg/m³. Destaca-se pela qualidade de acabamento, redução de peso e maior resistência ao calor.

Figura 5 - Tipos de argilas expandidas



Fonte: Adaptado de Cinexpan (2023)

A argila expandida, de acordo com informações fornecidas pela Cinexpan (2020 e 2022), possui diversas aplicações, destacando-se especialmente nos setores da construção civil, agricultura e paisagismo. De acordo com Mendes *et al* (2016, *apud* França, 2018), 60% da produção desse material é direcionada para a construção civil. Sua aplicação nesse setor é justificada pela sua baixa porosidade, o que contribui para aumentar sua resistência mecânica, como descrito por Pereira (2008).

2.3. Concreto leve com argila expandida

A utilização de argila expandida como substituição parcial ou total do agregado graúdo tem sido amplamente estudada por diversos pesquisadores com o objetivo de reduzir o peso próprio dos elementos estruturais. Moravia *et al* (2006) e França *et al* (2018) destacam a viabilidade econômica desse material, que tende a reduzir os carregamentos atuantes nas estruturas, assim diminuindo os gastos com fundações, dimensões de estruturas, ferragens e transportes, em virtude de sua baixa massa específica.

Moravia *et al* (2006) analisaram a caracterização da microestrutura das argilas expandidas, para isso verificaram traços de concreto leve com agregado de dimensões máximas características de 19 mm. Apresentando três traços - pobre, médio e rico em consumo de cimento - executados para o concreto convencional (controle) e para o concreto leve com a substituição do agregado graúdo - brita calcária - pela argila expandida. Já França (2018) investigou substituições em níveis variados (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) com a argila expandida de granulometria 2215 (15/22mm). Ambos os estudos constataram em seus resultados uma redução na resistência com a inclusão desse agregado leve.

Borja (2011), por sua vez, explorou a utilização da argila expandida (0500 e 1506), com dimensões máximas de 4,8 mm e 19 mm, juntamente com adições minerais (cinza de biomassa de cana-de-açúcar e metacaulim), para a produção de concreto leve autoadensável. O autor obteve resultados satisfatórios em relação a resistência à compressão com o concreto atingindo os valores acima dos 25 Mpa, valor superior ao mínimo de Neville (2013) para concreto leve.

Também efetuando a substituição total do agregado graúdo pela argila expandida do tipo 1506, Simonetti e Albertim (2022) utilizaram fibra de aço (Wirand FS - 8), como adição ao traço e obtiveram aumento na resistência no entorno de 19%, por ser um material mais dúctil, pois a argila deixa o concreto mais frágil, contudo também obtiveram um acréscimo na massa específica.

Silva (2020) analisou a substituição do agregado miúdo pela argila expandida do tipo 0500 e seus resultados definiram que apenas os traços com maiores substituições (75% e 100%) foram considerados concretos leves e suas resistências à compressão foram reduzidas quando comparadas ao concreto de controle. Seu estudo também apresentou um traço com menor substituição parcial (25%) que obteve maior resistência e se comportou semelhante ao concreto convencional, mas não foi classificado como concreto leve como indicado no item 2.1.1.

Em seu trabalho, Silva (2020) cita que um dos motivos de sua pesquisa é por não existirem muitos estudos voltados à substituição de agregado miúdo por argila expandida, por outro lado, existem uma diversidade muito grande de trabalhos voltados a substituição do agregado graúdo.

Nesse contexto este trabalho visa ampliar as pesquisas sobre a substituição do agregado miúdo por agregado leve. Para isso o Capítulo 3 apresenta a metodologia aplicada para caracterizar os agregados graúdos e miúdos, desenvolvimento do traço e ensaios realizados.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a descrição do programa experimental elaborado para a análise do concreto objeto do estudo. Esse programa inclui o método de dosagem do concreto, bem como os ensaios realizados no estado fresco e endurecido, visando a definição das propriedades finais do material em estudo.

Para a comparação com o trabalho de Silva (2020) foi necessário adquirir alguns materiais, enquanto outros foram disponibilizados pelo Laboratório de Materiais de Construção Sustentável (LMCS) da Universidade Federal de Santa Catarina, campus Joinville.

3.1. Característica dos materiais

Considerando a ampla diversidade de materiais existentes, será apresentada a especificação de cada material utilizado, juntamente com a descrição dos ensaios conduzidos.

3.1.1. Cimento Portland

O cimento Portland utilizado foi o CPV, da fabricante Itambé (Figura 6), também empregado por Silva (2020) e recomendado pela Cinexpan (2023) para confecção de concreto leve estrutural. Também conhecido como cimento ARI, Alta Resistência Inicial, Neville (2013) destaca que seu diferencial em relação ao cimento Portland comum é a maior finura, determinada pela superfície específica (mínimo 325 m²/kg para o CPV), pois eles têm pouca diferença na composição química.

Figura 6 - Cimento CP V-ARI



Fonte: A autora (2023).

Como seu próprio nome informa, sua resistência é estabelecida antes dos outros tipos de cimento, ou seja, o Cimento ARI tem as exigências de resistência estabelecidas para 1, 3 e 7 dias, com mínimos, respectivamente, de 14 MPa, 24 MPa e 34 MPa (Neville, 2013).

3.1.2. Agregados graúdos

Por conta de sua disponibilidade e em virtude de suas dimensões a agregado graúdo escolhido foi a brita 0, também conhecida como pedrisco. Possuindo dimensões de 4,8 mm ao diâmetro máximo de 9,5 mm, é um material resultante da britagem de rocha (Passos, 2023). Segundo Silva (2020) dimensões reduzidas de agregados tendem a produzir concretos mais resistentes.

A Universidade Federal de Santa Catarina, no campus de Joinville, disponibiliza o material em baias ao lado do Laboratório de Materiais de Construção. Desta forma, foi realizado o ensaio de determinação da granulometria (ABNT NBR 17054:2022), detalhado no item 3.4.1.

3.1.3. Agregados miúdos

Nesse estudo, a atenção é na substituição do agregado miúdo convencional pelo agregado miúdo leve. Assim, foram selecionados dois materiais distintos e conhecidos para esse propósito: a areia e a argila expandida. Os agregados foram ensaiados de acordo com as normas ABNT NBR 17054:2022 (determinação da granulometria) e ABNT NBR 16972:2021 (determinação da massa unitária).

3.1.3.1. Areia

A areia utilizada neste estudo foi a média, disponibilizada nas baias do lado de fora do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Santa Catarina. Uma das preocupações foi a utilização do material seco, por se encontrar exposto a umidade, para assim não interferir nos resultados e relação água-cimento.

3.1.3.2. Argila expandida

A argila expandida escolhida foi a Tipo 2,5mm, também conhecida como Tipo Laminado 2,5mm. A Cinexpan (2000) afirma que é produzida em forno rotativo de alta tecnologia a uma temperatura de 1.200°C e sua granulometria varia, em milímetros, de 0 à 2,5. As propriedades químicas e físicas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades químicas e físicas da argila expandida tipo 2,5mm

PROPRIEDADES QUÍMICAS		PROPRIEDADES FÍSICAS	
Silício (em SiO ₂)	63,19%	Densidade aparente (kg/m ³)	750 ± 10%
Alumínio (em Al ₂ O ₃)	18,02%	Massa Específica (g/dm ³)	1,40
Ferro (em Fe ₂ O ₃)	7,63%	Classes granulométricas (mm)	0 - 2,5
Titânio (em TiO ₂)	0,92%	Resistência mecânica	2,3 MPa ou 23,5 Kgf/ cm ²
Cálcio (em CaO)	0,64%	Condutividade Térmica	0,10 a 0,16 W/(m.K)
Magnésio (em MgO)	3,26%	Isolamento acústico	média 44 dB
Sódio (em Na ₂ O)	0,61%		
Potássio (em K ₂ O)	4,91%		
Óxido de Fósforo (em P ₂ O ₅)	0,20%		
Óxido de Manganês (em MnO)	0,08%		
Óxido de Bário (em BaO)	0,09%		
Perda ao fogo	0,20%		

*Material quimicamente inerte

Fonte: Cinexpan (2000)

O fornecedor também indica que sua principal utilização é para churrasqueiras, lareiras e refratários (Cinexpan, 2023), isso por possuir uma qualidade no acabamento com redução de peso e maior resistência ao calor. Para concretos leves estruturais a Cinexpan indica a Tipo 1506 (granulometria de 6/15mm, equivalente a Brita 0) e a Tipo 0500 (granulometria de 0/5mm).

A argila expandida tipo 2,5mm se distingue das demais por possuir uma forma laminar (Figura 7), enquanto as outras exibem um formato arredondado, e uma granulometria menor em comparação com as demais opções fornecidas pela empresa, sendo apenas a Tipo 0500 uma alternativa próxima em tamanho. Além disso, todas possuem a mesma massa específica, 1.400 kg/m^3 (Cinexpan, 2000).

Figura 7 - Argila expandida tipo 2,5mm



Fonte: A autora (2023).

3.1.4. Aditivo

A Cinexpan (2023) também indica a utilização de aditivo plastificante, mas apenas para o concreto leve. Simonetti e Albertim (2022) acrescentam que sua adição é necessária, principalmente quando não utilizado adição de fibras. Da Silva (2020) afirma que existe dificuldade no adensamento e lançamento de concretos com agregados leves e o aditivo atua aumentando a coesão e a fluidez.

Com base nas indicações anteriores, optou-se pelo aditivo plastificante Sika Concreto Forte, por proporcionar ao concreto: aumento da trabalhabilidade, melhora no acabamento superficial e aumenta a resistência final à compressão. É recomendada pela fabricante a utilização de um litro para cada saco de cimento de 50 kg.

3.2. Dosagem do concreto

De acordo com Neville (2013), dois conjuntos de exigências tornam possível a determinação da dosagem do concreto: as propriedades no estado endurecido, exigidas pelos projetistas estruturais, e as propriedades no estado fresco, determinadas em relação ao tipo de obra e pelas técnicas de transporte e lançamento. O principal objetivo da dosagem é produzir um concreto econômico que atenda principalmente às seguintes propriedades: trabalhabilidade, resistência e durabilidade (Neville, 2013).

Como observado por Neville (2013), a determinação exata de um traço ideal é uma tarefa complexa devido à variabilidade dos materiais utilizados e à natureza das propriedades que muitas vezes não podem ser completamente quantificadas. Nesse sentido, a formulação de um traço eficiente envolve a consideração de uma hipótese inteligente que busca atingir uma combinação ótima de componentes (Neville, 2013).

Com base nisso o traço utilizado neste trabalho foi o utilizado por Silva (2020). Em sua monografia a autora, obteve seu traço para um concreto com um f_{ck} de 25 MPa e um *slump* de 75 mm, utilizando o método ACI 211.1-81. Esse método consiste na utilização de tabelas e gráficos elaborados a partir de valores médios de resultados experimentais (Silva, 2020).

A opção pelo traço de Silva (2020) foi fundamentada com o propósito de estabelecer uma comparação substancial. Notadamente, Silva (2020) empregou uma argila expandida cuja granulometria variava de zero a cinco milímetros, conforme dado fornecido pelo fabricante Cinexpan, enquanto este estudo optou por uma granulometria máxima de menor dimensão (0 à 2,5 mm). Destaca-se ainda a relevância da análise comparativa entre o emprego da argila expandida saturada, conforme abordado por Silva (2020), e a argila expandida em estado seco.

Para a realização dos ensaios neste trabalho, foram formulados três traços distintos de acordo com a Tabela 4. O primeiro traço, designado como T0, atuou como um padrão de referência, permitindo a verificação das propriedades mecânicas. Os dois traços subsequentes envolveram a substituição parcial da massa de areia por argila expandida, representando, respectivamente, substituições de 25% e 50% do agregado miúdo convencional pelo agregado leve.

Tabela 4 - Traço do concreto

Traço	Cimento	Areia	Argila Expandida	Brita
T0	1,00	1,51	0,00	1,72
	5,00 kg	7,55 kg	0,00 kg	8,60 kg
T25	1,00	1,13	0,38	1,72
	5,00 kg	5,65 kg	1,90 kg	8,60 kg
T50	1,00	0,76	0,75	1,72
	5,00 kg	3,80 kg	3,75 kg	8,60 kg

Fonte: Adaptado de Silva (2020).

Os trabalhos apresentados no item 2.3, Borja (2011), Silva (2020) e Simonetti e Albertim (2022), utilizaram uma relação água/cimento variando de 0,40 a 0,47. Nesse estudo foi utilizada a relação mais baixa, 0,40, com menor quantidade de água, para, assim, produzir um concreto com maior resistência. Outro material importante e recomendado pelo fornecedor da argila expandida foi o aditivo plastificante. Seguindo as instruções do fornecedor foi utilizada uma relação de um litro para cada 50 kg de cimentos, e adicionado depois de consumido 50% a 75% da água da mistura, desse modo foi utilizado 100 ml para o T25 e T50.

A presença da água exerce significativa influência nas propriedades do concreto, impactando tanto no estado fresco quanto no endurecido. Duas propriedades são a trabalhabilidade e a resistência à compressão. Segundo Neville (2013), o teor de água desempenha um papel na lubrificação entre as partículas. Partículas mais finas e agregados com formas irregulares demandam quantidades

diferenciadas, resultando em efeitos notáveis na trabalhabilidade do material (Neville, 2013).

Além disso, Neville (2013) informa sobre a porosidade, um elemento de fundamental importância para a resistência do concreto. A presença de mais vazios correlaciona-se inversamente com a resistência do material.

3.3. Moldagem dos corpos de prova

De acordo com a ANBT NBR 5738:2015, foram empregados corpos de provas cilíndricos com altura duas vezes maior que seu diâmetro, resultando em corpos de prova de 10x20. Para facilitar o desmolde dos corpos de prova (CP), uma fina camada de lubrificante foi aplicada no interior dos mesmos. Além disso, a execução dos ensaios contou com o uso de haste de adensamento de aço de superfície lisa, uma betoneira, balança de precisão, colher de pedreiro e baldes.

Após a preparação dos moldes dos CP, procedeu-se à pesagem dos materiais a serem utilizados em cada traço, que foram acomodados em baldes comuns (Figura 8). Os traços T25 e T50 seguiram o procedimento a seguir, com exceção do T0, que não continha argila expandida e aditivo plastificante. Inicialmente, o agregado graúdo foi adicionado à betoneira, seguido pela incorporação de cerca de $\frac{1}{3}$ do volume de água. Em seguida, adicionou-se areia, argila expandida e cimento, seguido por mais $\frac{1}{3}$ do volume de água. Nos traços T25 e T50 foi introduzido o aditivo e os materiais foram misturados na betoneira antes da adição do restante da água.

Figura 8 - Separação do material para os traços T50, T25 e T0



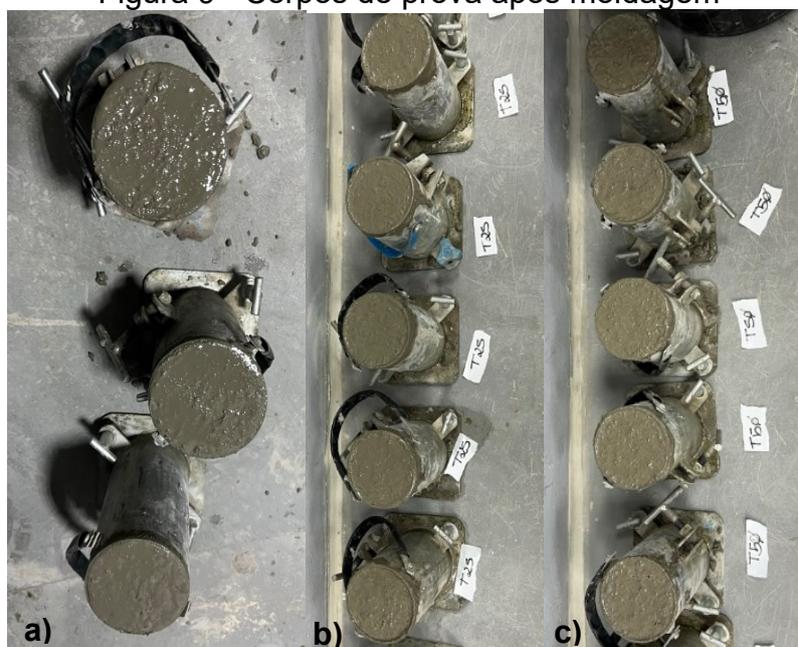
Fonte: A autora (2023).

Durante o processo de mistura, foram realizadas pausas para desalojar o material nas paredes da betoneira, assegurando assim a homogeneização de todo o material. O tempo de mistura foi determinado com base em análise tátil-visual, garantindo que a pasta apresentasse um aspecto visual satisfatório e que o concreto estivesse devidamente homogêneo. Tais pausas também foram oportunas para verificar o momento ideal para a última adição de água.

Foram utilizados para cada traço, cinco corpos de prova, totalizando quinze CPs. Seguindo ANBT NBR 5738:2015, cada corpo de prova foi preenchido em duas camadas, onde a cada metade do volume do molde a pasta foi golpeada 12 vezes com a haste, sendo os golpes distribuídos uniformemente, sem golpear a base do molde na primeira camada e a última camada preenchida com excesso de concreto. Para um fechamento de eventuais vazios, a norma menciona de bater levemente na face externa do molde (NBR 5738, 2015).

Após a preparação e seguindo a NBR 5738 (2015), os corpos de prova foram devidamente identificados e deixados para repouso por 24 horas (Figura 9), em um ambiente isolado e sem exposição a vibrações, antes de serem desmoldados (Figura 10). Em seguida, foram submetidos a mais 24 horas de descanso antes de serem submetidos ao processo de cura úmida (Figura 11).

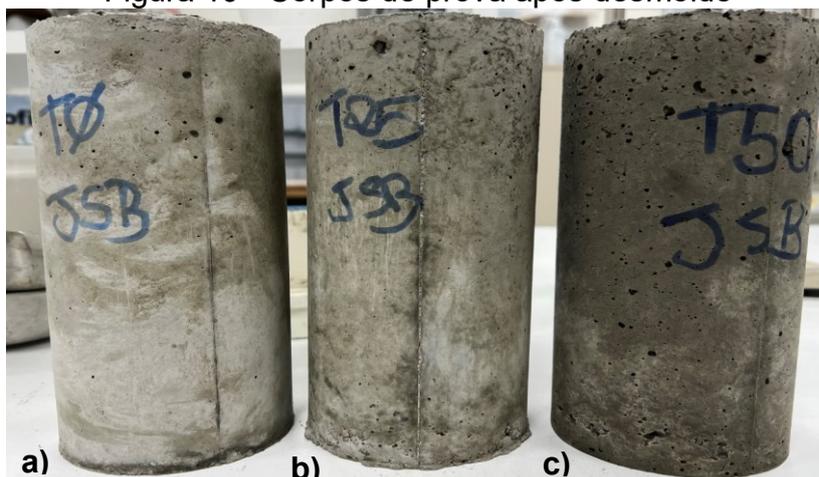
Figura 9 - Corpos de prova após moldagem



a) T0; b) T25; c) T50.

Fonte: A autora (2023).

Figura 10 - Corpos de prova após desmolde



a) T0; b) T25; c) T50.

Fonte: A autora (2023).

Figura 11 - Corpos de prova na cura úmida



Fonte: A autora (2023).

3.4. Ensaio

Para a análise das propriedades dos concretos produzidos, foram realizados ensaios tanto nos agregados quanto no concreto nos estados frescos e endurecidos. Todos os ensaios foram conduzidos de acordo com as normas estabelecidas, sendo elas: NBR 17054:2022, NBR 16972:2021, NBR 16889:2020, NBR 12644:2014, NBR 5739:2018 e NBR 9778:2005.

3.4.1. Granulometria dos agregados

O ensaio de determinação da composição granulométrica é estabelecido pela NBR 17054:2022, nele é determinada a porcentagem média retida e a retida acumulada em cada peneira e a dimensão máxima característica e o módulo de finura dos agregados. A norma é para granulometria dos agregados graúdos e miúdos e o ensaio foi realizado na brita 0, areia e argila expandida.

A primeira etapa para esse ensaio é deixar os agregados secos, para isso eles foram deixados em estufa até a realização do ensaio, sendo respeitado o período de 24 horas conforme a norma. E a segunda é separar as peneiras, pesá-las vazias e separar a quantidade mínima de cada agregado que será utilizado para a execução do ensaio.

Para a realização do ensaio no agregado graúdo foram utilizadas as peneiras de série normal 19 mm, 9,5 mm, 4,75 mm, 2,36 mm e 1,18 mm, além das peneiras de série intermediária 12,5 mm e 6,3 mm. Possuindo dimensão máxima de 9,5 mm, segundo a norma, era necessário no mínimo um quilo da massa do agregado para a realização do ensaio, entretanto foi ensaiada uma massa maior. Na Figura 12 pode-se observar as peneiras no agitador.

Figura 12 - Agitador mecânico e peneiras utilizadas no agregado graúdo



Fonte: A autora (2023)

Já para os agregados miúdos foram utilizadas as peneiras de série normal 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 600 μm , 300 μm e 150 μm , também foi acrescentada a peneira de malha 75 μm (Figura 13). A massa tanto da areia quanto da argila expandida foi de aproximadamente 400 gramas, 100 gramas a mais do que a NBR 17054 (2022) informa ser a massa mínima.

Figura 13 - Peneiras utilizadas nos agregados miúdos



Fonte: A autora (2023).

Após o fim do tempo de cada agregado no agitador, as peneiras foram pesadas, assim obtendo os resultados e podendo construir a curva de distribuição granulométrica, importante para a determinação dos tamanhos máximos e mínimos. Outro dado que pode ser obtido é o módulo de finura, que com base na tabela de limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo, que se encontra na norma, pode-se verificar se ele está de acordo ou não.

3.4.2. Massa unitária dos agregados miúdos

Sendo a relação entre a massa do agregado lançada em um recipiente e o volume desse recipiente, é uma propriedade utilizada para conversão do traço de massa para volume. A NBR 16972:2021 apresenta três métodos para a realização

do ensaio, foi escolhido o método C, que é empregado para determinar a massa unitária de material no estado solto.

O ensaio consiste em utilizar um recipiente de volume conhecido ou calculado, que terá sua massa vazia determinada e depois será preenchido até que transborde, com um auxílio de pá ou concha, despejado de uma altura que não supere 50 mm. Por fim será nivelada a camada superficial do agregado e pesado o recipiente. É necessário, segundo a norma, executar esse ensaio três vezes, e seu resultado é com base na média dos resultados individuais. A massa unitária pode ser calculada pela Equação 1.

Equação 1 - Massa unitária do agregado

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V}$$

Fonte: ABNT NBR 16972 (2021).

Onde:

- ρ_{ap} é a massa unitária do agregado, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m³);
- m_{ar} é a massa do recipiente com o agregado, expressa em quilogramas (kg);
- m_r é a massa do recipiente vazio, expressa em quilogramas (kg);
- V é o volume do recipiente, expresso em metros cúbicos (m³)

Segundo Borja (2011) a massa unitária do agregado leve, deve ser de aproximadamente $\frac{1}{3}$ a $\frac{2}{3}$ com relação ao agregado normal, quando em condições secas. Quando a variação é abaixo dessas é necessário um consumo maior de cimento para atingir as resistências requeridas (Borja, 2011)

3.4.3. Concreto no estado fresco: *Slump Test*

Sendo um dos métodos que avaliam a trabalhabilidade de aceitação universal, por sua simplicidade de execução (Neville, 2013), o ensaio de abatimento de cone, mais conhecido como *slump test*, é regido pela NBR 16889:2020, em que se mede a consistência do concreto fresco pela medida de seu assentamento.

O ensaio é executado em um cone com medidas específicas, que é preenchido em três camadas, sendo cada camada compactada com 25 golpes. Depois o molde lentamente erguido, o concreto liberado sofre um abatimento (Neville, 2013), o cone é colocado ao lado para medir a diferença da altura do cone com a altura do concreto depois do ensaio com uma régua. A diferença obtida pela régua é chamada de abatimento e é medida com aproximação de 5 mm (Figura 14).

Figura 14 - Ensaio de abatimento a) T0, b) T25 e c) T50



Fonte: A autora (2023).

Neville (2013) apresenta o grau de trabalhabilidade com base no abatimento do concreto e o fator de compactação (Tabela 5), entretanto a NBR 8953:2015, apresenta classes de consistência (Tabela 6). Ambos apresentam usos indicados.

Tabela 5 - Trabalhabilidade e uso do concreto segundo *Slump Test*

Grau de trabalhabilidade	Abatimento (mm)	Uso indicado
Muito baixo	0 - 25	Pavimentos vibrados por máquinas vibratórias mecanizadas. Os concretos mais trabalháveis deste grupo podem ser adensados com equipamentos manuais
Baixo	25 - 50	Pavimentos vibrados com equipamentos manuais. Os concretos mais trabalháveis deste grupo podem ser adensados manualmente em pavimentos que utilizem agregados de forma arredondada ou irregular. Concreto massa para fundações sem adensamento ou seções de concreto armado vibradas, com baixa taxa de armadura.

Médio	25 - 100	Os concretos de menor trabalhabilidade deste grupo podem ser adensados para o uso em lajes lisas utilizando agregados britados. Concreto com taxa de armadura normal, com adensamento manual e seções densamente armadas com vibração.
Alto	100 - 175	Para seções com congestionamento de armadura, usualmente de vibração inviável.

Fonte: Adaptado de Neville (2013).

Tabela 6 - Classes de consistência

Classe	Abatimento (mm)	Aplicações típicas
S10	$10 \leq a < 50$	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
S50	$50 \leq a < 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	$100 \leq a < 160$	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto
S160	$160 \leq a < 220$	Elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto
S220	≥ 220	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras

Fonte: Adaptado de NBR 8953 (2015).

3.4.4. Densidade da massa aparente no estado fresco

Para determinar a densidade de massa aparente do concreto no estado fresco, utiliza-se a NBR 12644:2014. Esse ensaio, mais utilizado para concretos leves, consiste em utilizar um recipiente cilíndrico com volume conhecido que será preenchido com a pasta (Figura 15), onde será medido o quociente da massa do concreto pelo valor do volume do recipiente. Esse ensaio também é um método de obter a consistência e a compacidade do concreto.

Figura 15 - Pesagem da massa do T0



Fonte: A autora (2023).

3.4.5. Concreto no estado endurecido: Ensaio de compressão axial

O ensaio de compressão axial foi executado com o auxílio da empresa Solosville, em conformidade com a NBR 5739:2005. Foram ensaiados três corpos de prova de cada traço aos 28 dias de idade em cura úmida, onde foi executada a retificação como preparação da a execução do ensaio.

Cada corpo de prova foi centralizado entre os pratos e foi submetido a força de compressão com velocidade e pressão constante, conforme estipulado pela norma. O carregamento foi cessado quando houve a ruptura do CP (Figura 16).

Figura 16 - Ensaio de compressão T50



Fonte: A autora (2023).

O equipamento fornece a força que está sendo aplicada ao corpo de prova, com a Equação 2, pode-se obter a resistência à compressão, expressa em MegaPascals (MPa).

Equação 2 - Resistência à compressão (F_c)

$$F_c = \frac{4F}{\pi \times D^2}$$

Fonte: ABNT NBR 5739 (2005).

Onde:

- F é a força máxima alcançada, expressa em Newton (N);
- D é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

3.4.6. Propriedades físicas do concreto no estado endurecido

Três propriedades de grande importância para o estudo do concreto com substituição da argila expandida (Silva, 2020), são encontradas na NBR 9778 (2005): absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica seca. São necessárias três pesagens, a primeira com a amostra seca depois de 72h na

estufa, a segunda saturada e imersa na água (Figura 17) e a terceira saturada. Para a obtenção da massa imersa, foi necessário a utilização da balança do Laboratório de Pavimentação, onde já existia uma estrutura semi-preparada.

Figura 17 - Corpo de prova sendo imerso em água



Fonte: A autora (2023).

3.4.6.1. Absorção de água (A)

Sendo a argila expandida um agregado poroso, ele tende a ter uma absorção maior do que os agregados convencionais, fazendo essa ser uma propriedade importante a ser observada no concreto. É um resultado obtido em porcentagem como observado na Equação 3.

Equação 3 - Absorção (A)

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \cdot 100$$

Fonte: ABNT NBR 9778 (2005).

Onde:

- m_{sat} é a massa da amostra saturada em água após imersão;
- m_s é a massa da amostra seca em estufa;

3.4.6.2. Índice de vazios (I_V)

Essa propriedade determina a porosidade do concreto, e pode ser obtida, em porcentagem, através da Equação 4.

Equação 4 - Índice de vazios (I_V)

$$I_V = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \cdot 100$$

Fonte: ABNT NBR 9778 (2005).

Onde:

- m_i é a massa da amostra saturada imersa em água.

3.4.6.3. Massa específica da amostra seca (ρ_s)

Sendo umas das propriedades que mais tem mudança significativa na incorporação de agregados leves. A massa específica seca (Equação 5), expressa em g/m^3 ou kg/m^3 , ajuda a definir se o concreto pode ser categorizado em concreto leve.

Equação 5 - Massa específica da amostra seca (ρ_s)

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i}$$

Fonte: ABNT NBR 9778 (2005).

3.4.7. Ensaio de permeabilidade

Segundo Neville (2013), existem vários ensaios de permeabilidade normalizados, contudo é citado que um ensaio simples de laboratório. Nesses ensaios os lados do corpo de prova são selados, e somente na sua superfície superior é aplicada água sob pressão. Suas condições de estabilidade podem ocorrer em até 10 dias e quando isso ocorrer mede-se a quantidade de água que flui por uma determinada espessura do concreto em determinado tempo (Neville, 2013).

Com base em Passos (2023), foi executada uma adaptação do ensaio, utilizando tubo PVC de 100 mm, fita de autofusão e luva PVC. Uma das pontas do tubo foi aquecida e encaixada no corpo de prova, para que não houvesse folga e consequentemente fuga da água pela lateral, ainda assim foi colocado um pouco de silicone no encontro do CP e do tubo. Para que a percolação ocorresse apenas pelo centro do corpo de prova, foi utilizado a fita de auto fusão e a luva para quando a água percorrer não entrar em contato direto com o CP. Pode-se visualizar o resultado na **Figura 18**.

Figura 18 - Ensaio de permeabilidade



Fonte: A autora (2023).

Foi ensaiado um corpo de prova de cada traço. Antes da execução, foi medida a temperatura da água, cada corpo de prova estava saturado em água, 500 ml foram despejados em cada equipamento e se manteve em observação.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios aqui descritos, bem como as suas análises e comparações com os resultados obtidos por Silva (2020).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção estão apresentados os resultados obtidos dos experimentos realizados, bem como as discussões a respeito das propriedades e desempenho do concreto leve.

4.1. Granulometria dos agregados

Sendo executados os ensaios com base na NBR 17054:2022, pode-se obter a Tabelas 7 e 8, que apresentam os resultados obtidos nos ensaio para a argila expandida e areia, respectivamente. Com base nas massas obtidas, seguem as porcentagens retida e a retida acumulada, assim como a obtenção do módulo de finura e diâmetro máximo característico.

Tabela 7 - Granulometria da areia

Peneira (mm)	Massa da peneira (g)	Massa da peneira+areia (g)	Massa da areia (kg)	Porcentual retido em cada peneira (%)	Porcentual retido acumulado (%)
4,750	451,19	451,6	0,41	0,10	0,10
2,360	368,12	369,13	1,01	0,25	0,35
1,180	360,54	367,2	6,66	1,66	2,02
0,600	321,28	394,09	72,81	18,18	20,20
0,300	316,01	403,53	87,52	21,86	42,06
0,150	295,57	431,49	135,92	33,94	76,00
0,075	294,39	381,33	86,94	21,71	97,71
Fundo	354,29	363,46	9,17	2,29	100,00
Massa total de areia			400,44	100,00	

Fonte: A autora (2023).

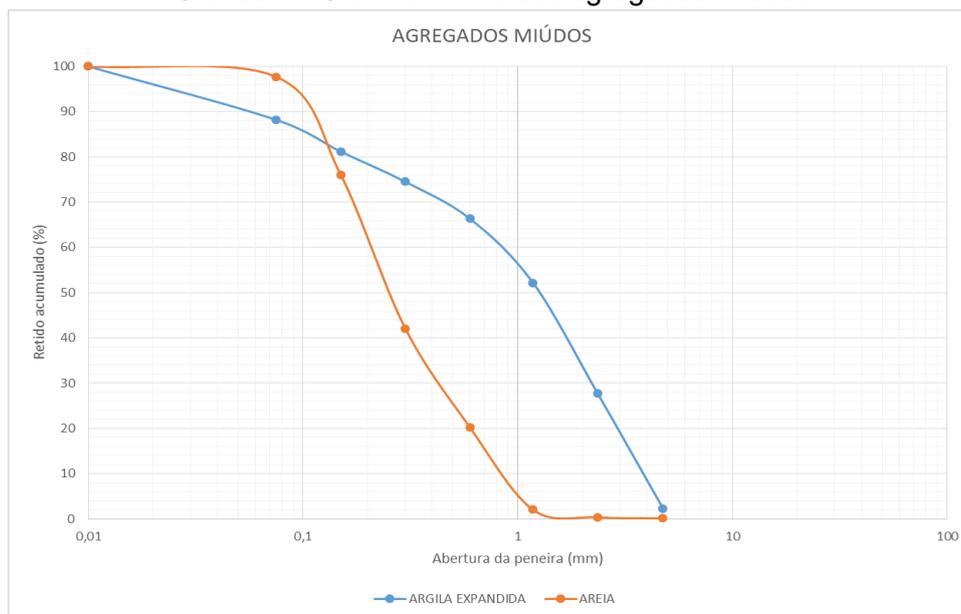
Tabela 8 - Granulometria da argila expandida

Peneira (mm)	Massa da peneira (g)	Massa da peneira+argila (g)	Massa da argila (g)	Percentual retido em cada peneira (%)	Percentual retido acumulado (%)
4,750	451,22	460,53	9,31	2,33	2,33
2,360	368,12	469,53	101,41	25,37	27,70
1,180	360,54	458,25	97,71	24,45	52,15
0,600	321,28	377,87	56,59	14,16	66,31
0,300	316,01	348,7	32,69	8,18	74,49
0,150	295,57	322,19	26,62	6,66	81,15
0,075	294,45	322,60	28,15	7,04	88,19
Fundo	354,29	401,48	47,19	11,81	100,00
Massa total de argila expandida			399,67	100,00	

Fonte: A autora (2023).

Como o mesmo ensaio foi feito para a areia e brita 0, pode-se simplificar a visualização através dos Gráfico 1 e 2, sendo eles separados em agregado miúdo e graúdo, sendo no miúdo a visualização da areia e da argila expandida juntas.

Gráfico 1 - Granulometria dos agregados miúdos



Fonte: A autora (2023).

Ao analisar o Gráfico 1 e a Tabela 8, percebemos que a argila expandida é um material com uma granulometria mais distribuída que a areia média, e enquanto a areia concentra sua maior parte retida, aproximadamente 95%, entre as peneira

75 μm a 600 μm , a argila tem predominância, aproximadamente 64%, nas peneiras 600 μm a 2,36 mm e tendo quase 12% passante pela peneira 75 μm (Figura 19).

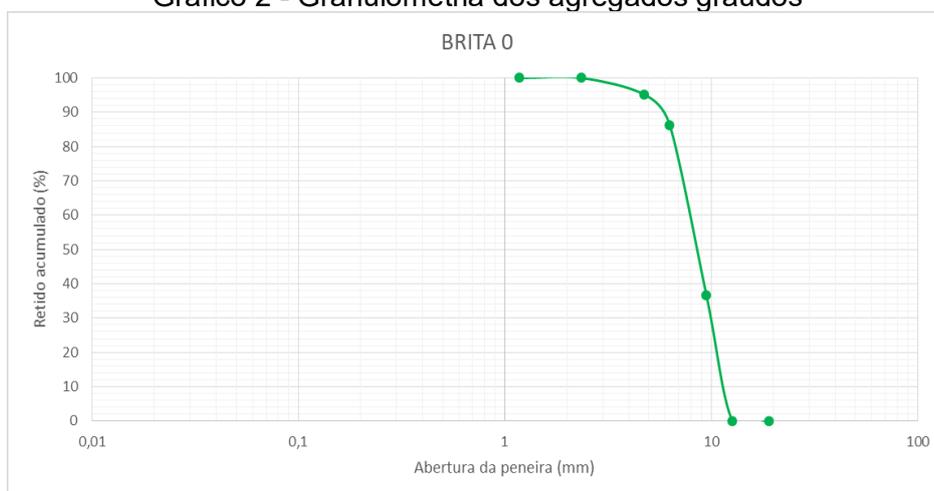
Figura 19 - Argila expandida nas peneiras 180 μm e 75 μm



Fonte: A autora (2023).

A análise do Gráfico 2, permite verificar que a granulometria dos agregados graúdos fica entre as peneiras 9,5 mm a 2,36 mm. Quando analisado os três agregados juntos, um complementa a quantidade granulométrica do outro, o que ao analisarmos o módulo de finura dos três na Tabela 9, percebe-se que a argila expandida está mais próxima da brita 0 do que da areia no modulo de finura.

Gráfico 2 - Granulometria dos agregados graúdos



Fonte: A autora (2023).

Tabela 9 - Diâmetro máximo e módulo de finura

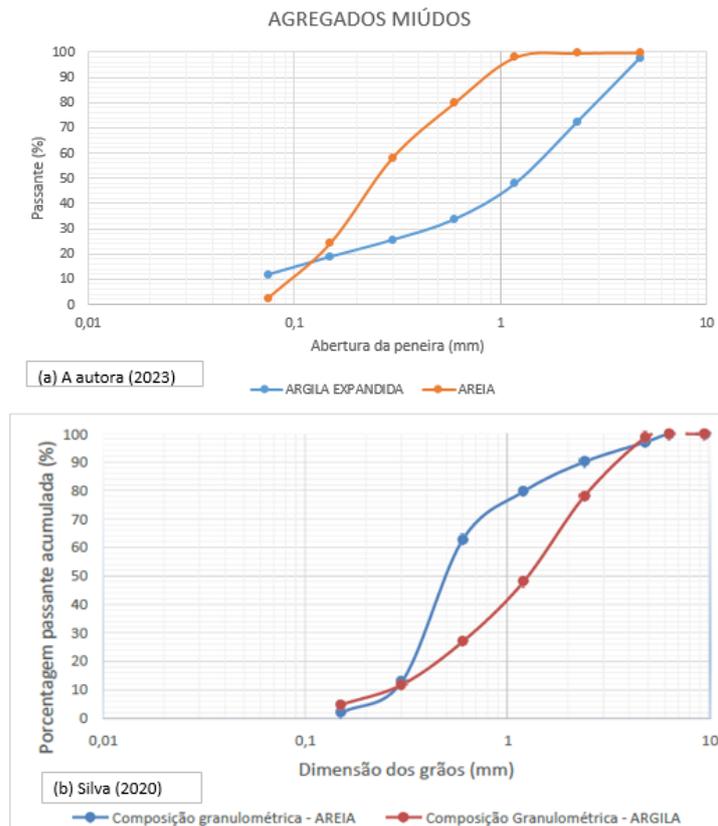
Agregado	Areia	Argila Expandida	Brita 0
Diâmetro máximo (mm)	4,75	4,75	9,50
Módulo de finura	1,41	3,04	3,32

Fonte: A autora (2023).

O valor de módulo de finura para a areia não está condizente com a norma da ABNT NBR 17054 (2022), que informa que para a zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20. Já para a argila expandida seu valor está dentro da zona utilizável superior que varia de 2,90 a 3,50.

Silva (2020) utilizou a argila expandida tipo 0500 e areia grossa, onde a maior parte dos grãos se encontrou entre 0,6 a 2,0 mm em ambos os agregados miúdos, seu módulo de finura é maior, entretanto os diâmetros máximos característicos são iguais. Mesmo possuindo similaridades, suas curvas granulométricas de material passante são levemente diferentes (Gráfico 3).

Gráfico 3 - Curva granulométrica de passante do agregado miúdo



Fonte: A autora (2023).

4.2. Massa unitária dos agregados miúdos

Conforme a NBR 16972:2021 foi executado o ensaio para os agregados miúdos: areia e argila. Com esse ensaio tem-se uma análise da densidade dos materiais como observado na Tabela 10.

Tabela 10 - Massa unitária dos agregados miúdos

Agregado	Massa (kg)	Massa unitária (kg/m ³)
Areia	7,54	1508
Argila expandida	2,88	576

Fonte: A autora (2023).

Como observado, a argila expandida possui uma densidade menor do que a areia, sendo aproximadamente 2,62 vezes menor do que o agregado convencional.

4.3. Concreto no estado fresco: *Slump Test*

Sendo o ensaio universalmente aceito para análise da trabalhabilidade do concreto (Neville, 2013), é um dos ensaios para verificação do concreto fresco, que tem seus valores apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados do ensaio de abatimento do tronco cone

Traço	Abatimento (mm)
T0	165
T25	205
T50	66

Fonte: A autora (2023).

Segundo mencionado no Capítulo 3, Silva (2020) fez seu traço para um *slump* de 75 mm, entretanto os resultados obtidos pela autora foram maiores do que o teórico, e o mesmo ocorreu aqui, utilizando o agregado leve argila expandida

2,5 mm. Contudo os resultados obtidos nesse trabalho foram próximos aos obtidos no ensaio de Silva (Tabela 12).

Tabela 12 - *Slump test* de comparação

Traço	Silva (2020)	A autora (2023)
TR0	180mm	165mm
TR25	200mm	205mm
TR50	180mm	66mm
TR75	180mm	-
TR100	30mm	-

Fonte: A autora (2023).

Assim como mencionado em Silva (2020), o TR100 teve um baixo abatimento em função da maior quantidade de agregado leve utilizado, pois por ter uma massa específica menor, a gravidade não provoca um efeito suficiente para diminuir a altura do concreto quando retirado o cone. Esse mesmo caso ocorre no T50 obtido nesse trabalho. Outra característica que influencia nos resultados, é por Silva (2020) ter utilizado a argila expandida já saturada, assim deixando o agregado leve mais pesado, diferente desse trabalho que foi utilizada a argila expandida seca.

Como recomendado pelo fornecedor da argila expandida, para utilização em concretos leves é necessário o uso de aditivo plastificante, melhorando a coesão e consistência da pasta. Entretanto, mesmo sua utilização não afetou o T50 deste trabalho (Figura 20).

Figura 20 - Abatimento do T50



Fonte: A autora (2023).

Segundo Neville (2013) item 3.4.4, os traços T0 e T25 (Figura 21) possuem alto grau de trabalhabilidade, por outro lado o T50 possui médio grau de trabalhabilidade. Já pela classe da NBR 8953, o T0 e T25 podem ser utilizados para elementos estruturais com lançamento bombeado, enquanto o T50 pode ser utilizado em alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações.

Figura 21 - Abatimento traços T0 e T25



Fonte: A autora (2023).

4.4. Densidade da massa aparente no estado fresco

Com o ensaio realizado de acordo com a norma NBR 12644:2014 é possível construir a Tabela 13 de densidade do concreto logo após sua homogeneidade, para cada traço de estudo.

Tabela 13 - Massa aparente no estado fresco

Traço	Massa (kg)	Massa unitária (kg/m ³)
T0	5,10	2096,18
T25	4,58	1882,45
T50	4,28	1759,15

Fonte: A autora (2023).

Com base nesse resultado verifica-se que o concreto de controle, T0, possui uma densidade maior do que os traços com substituição. Normalmente estruturas

mais densas tendem a ter uma resistência maior, logo é esperado que o concreto em seu estado endurecido tenha uma perda no ensaio de compressão axial quanto maior a substituição por argila expandida.

4.5. Concreto no estado endurecido: Ensaio de compressão axial

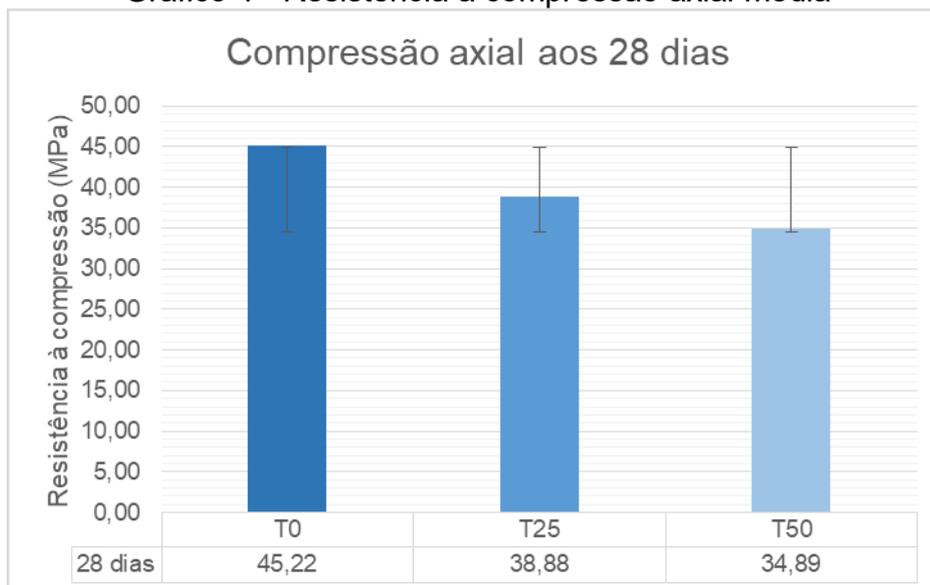
Sendo a propriedade mecânica de maior importância para a verificação de viabilidade do concreto, o ensaio de compressão axial foi executado pela Solosville, empresa que segue a NBR 5739:2018 e tem especialidade em ensaios de concreto. Com os resultados obtidos, sendo utilizado três CPs de cada traço, foi possível montar a Tabela 14 e o Gráfico 4.

Tabela 14 - Dados do ensaio de resistência à compressão axial

Traço	Força máxima (N)	Resistência à compressão (MPa)	Média da resistência à compressão (MPa)
T0	35,14	43,88	45,22
	37,08	46,30	
	36,43	45,49	
T25	30,25	37,77	38,88
	31,63	39,49	
	31,55	39,39	
T50	28,06	35,04	34,89
	27,84	34,76	
	27,92	34,86	

Fonte: A autora (2023).

Gráfico 4 - Resistência à compressão axial média



Fonte: A autora (2023).

Com base nos resultados obtidos houve um baixo desvio padrão, sendo o T50 o menor entre os três com 0,14 e T0 e T25 com desvios, respectivamente de 1,23 e 0,96. Os corpos de prova tiveram que ser retificados e utilizou um fator de correção de 0,98065, assim tendo os valores da coluna de Resistência à compressão.

No item 2.3 foram apresentados trabalhos que utilizaram a argila expandida, a maioria destes tiveram suas resistências reduzidas quanto maior o percentual de substituição. Deste modo e com a análise da densidade do concreto no estado fresco, era esperada a redução da resistência. Houve uma redução de 14,02% para o T25 e de 22,86% para o T50, em relação ao T0.

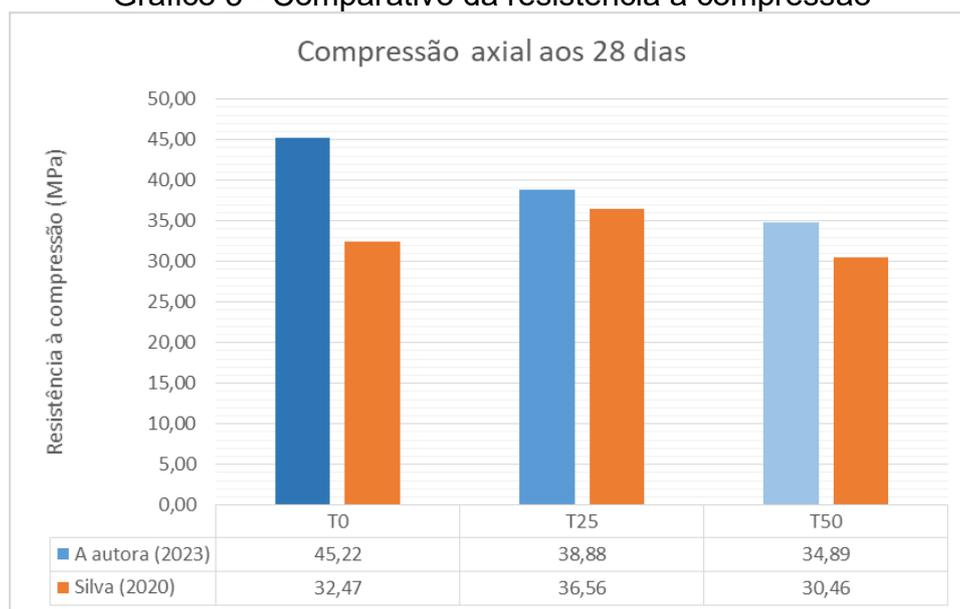
Também no Capítulo 2 foi relatado sobre a resistência para concretos leves estruturais, em que Neville (2013) aponta que não poderia ser inferior a 17 MPa e Souza Santos (1992, *apud* Pereira, 2008) apresentando entre 21 a 35 MPa. Sendo assim os dois traços de substituição atendem aos valores informados anteriormente. Assim, é necessário somente verificar se em relação à massa específica os valores atendem aos critérios para que sejam classificados como concreto leve estrutural.

Ao definir o traço para o concreto, Silva (2020) procurava uma resistência de 25 MPa, contudo foram obtidos resultados acima da estimativa. Quando se comparam os resultados, observa-se uma resistência maior do que a obtida por

Silva (Gráfico 5), logo, também, acima da resistência teórica. Os traços T25 e T50 obtiveram, respectivamente, 6,35% e 14,53% de aumento na resistência. Alguns fatores podem estar relacionados a essa diferença na resistência obtida, sendo eles:

- Relação água/cimento: foi utilizado o agregado leve seco, que pode ter absorvido parte da água da mistura, tornando o concreto mais resistente, sendo que Silva (2020) utilizou a argila expandida saturada;
- Granulometria: segundo Schwantes (2012, *apud* Silva, 2020) a granulometria tem influência na resistência à compressão quando utilizado agregados leves. Por possuir uma granulometria menor nos dois agregados miúdos, esse pode ter sido um dos fatores;
- Aditivo plastificante: como não foram utilizados os mesmos aditivos, pode ter sido um fator influenciador. O aditivo utilizado é conhecido pelo nome de Sika Concreto Forte, desse modo seu objetivo principal é a maior resistência do concreto.

Gráfico 5 - Comparativo da resistência à compressão



Fonte: A autora (2023).

Outra análise que pode ajudar na melhor análise da resistência é a verificação das propriedades físicas do concreto endurecido, dentre elas a absorção de água e índice de vazios. Com o índice de vazios pode-se analisar a porosidade do concreto, um dos fatores fundamentais para a resistência.

4.6. Propriedades físicas do concreto no estado endurecido

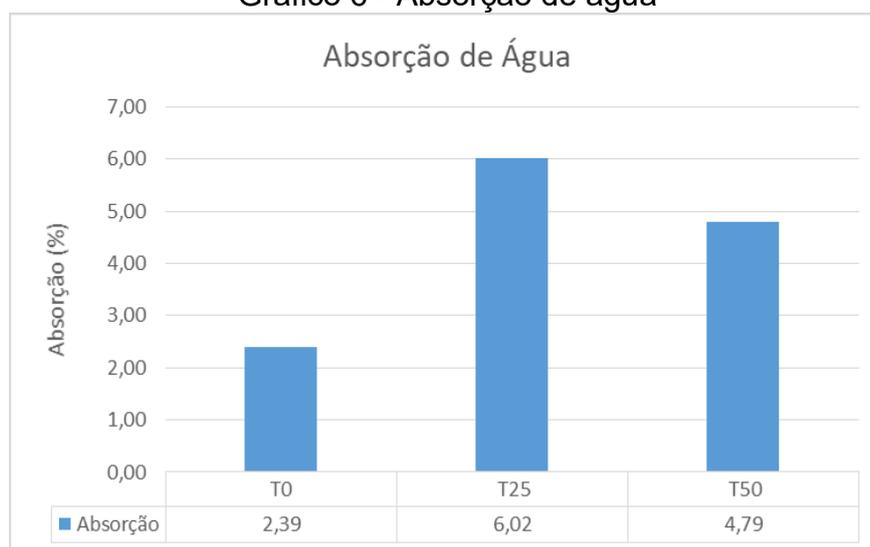
As propriedades físicas ajudam a compreender e determinar as mudanças significativas que ocorrem na substituição do agregado convencional para o agregado leve. Para a utilização das Equações 3, 4 e 5, mencionadas no capítulo 3.4, monta-se a Tabela 15. Com a utilização da Equação 3, e com os valores dos ensaios realizados obteve-se o Gráfico 6 para absorção de água.

Tabela 15 - Resultado dos ensaios das propriedades físicas

Traço	Massa seca	Massa imersa	Massa saturada
	m_i (kg)	m_{sat} (kg)	m_s (kg)
T0	3,56	2,00	3,65
T25	3,24	1,73	3,44
T50	2,90	1,46	3,04

Fonte: A autora (2023).

Gráfico 6 - Absorção de água

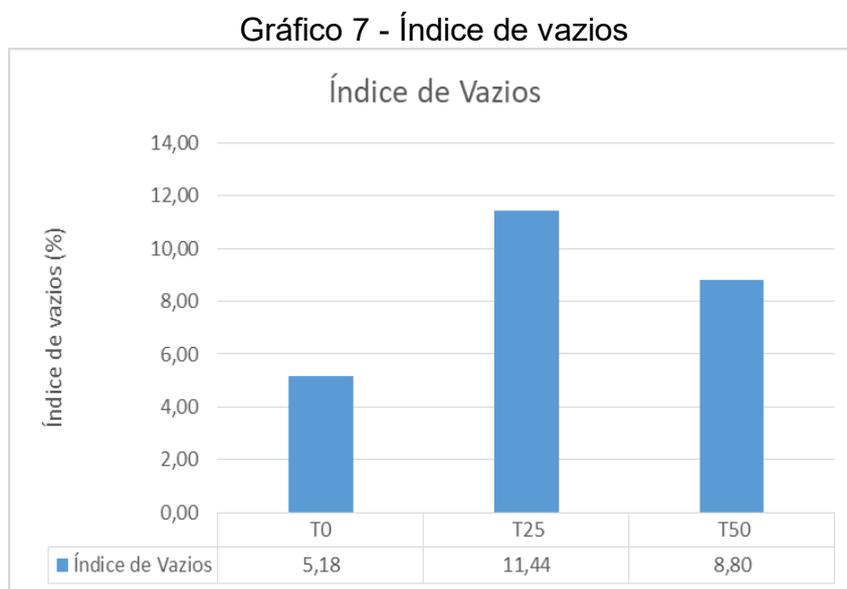


Fonte: A autora (2023).

Graficamente é possível ver que o T0 é o traço que menos absorveu água, o que é condizente por ser o traço que não contém a substituição e a argila expandida ser um material poroso, conseqüentemente o que mais absorve. Contudo é surpreendente o T25 absorver mais do que o T50, pelo fato de que o

esperado ser justamente a situação oposta. Em relação ao T0, houve um aumento de 251,88% no T25 e 200,42% no T50.

Ao analisarmos o índice de vazios conforme o Gráfico 7, observa-se uma correlação com o gráfico anterior, indicando que os resultados gráficos se mantêm consistentes. Notavelmente, o T0 exibe um percentual menor, seguido pelo T50, enquanto o T25 apresenta a maior taxa de vazios.

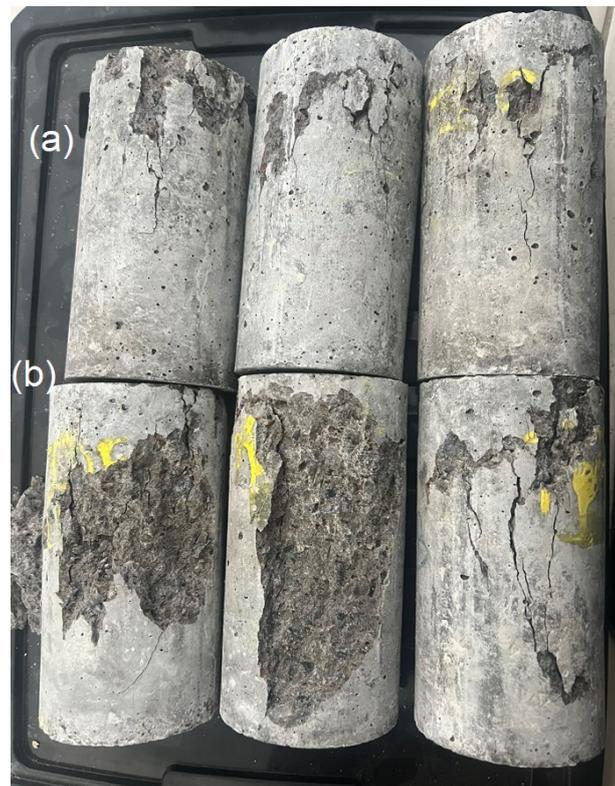


Fonte: A autora (2023).

O resultado inesperado observado no T50, em comparação com o T25, pode ser atribuído ao processo de adensamento ou, como observado, a massa unitária do agregado leve ser menor quando comparada ao convencional (Tabela 10). Além disso, a argila expandida possui um maior percentual de material retido nas peneiras de menor abertura (Tabela 7 e 8 e Figura 19). Essas características contribuí para um maior preenchimento de finos nos corpos de prova com maior massa de agregado substituído.

Outra observação em relação ao índice de vazios é que durante o rompimento dos corpos de prova, mesmo o T50 possuindo uma resistência menor, o T25 em seu rompimento teve seus pedaços significativos soltos, enquanto o T50 apresentou em sua maioria fissuras e fragmentos menores soltos como observado na Figura 22, enquanto na Figura 23 percebemos a quantidade de argila nos dois traços.

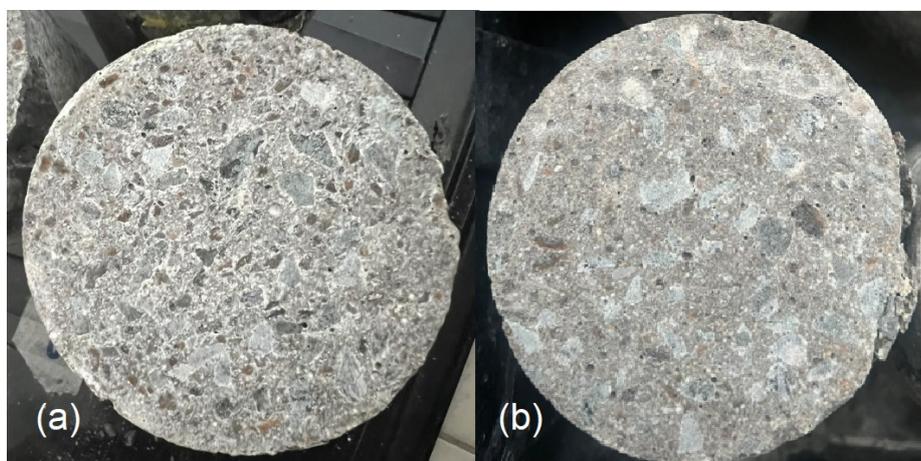
Figura 22 - Comparativo de rompimento



(a) Corpos de prova T50; (b) Corpos de prova T25.

Fonte: A autora (2023).

Figura 23 - Comparativo visual de argila



(a) Corpos de prova T50; (b) Corpos de prova T25.

Fonte: A autora (2023).

Sendo a propriedade que define se o concreto vai ser leve ou não, a massa específica seca para os traços é apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 - Massa específica seca do concreto

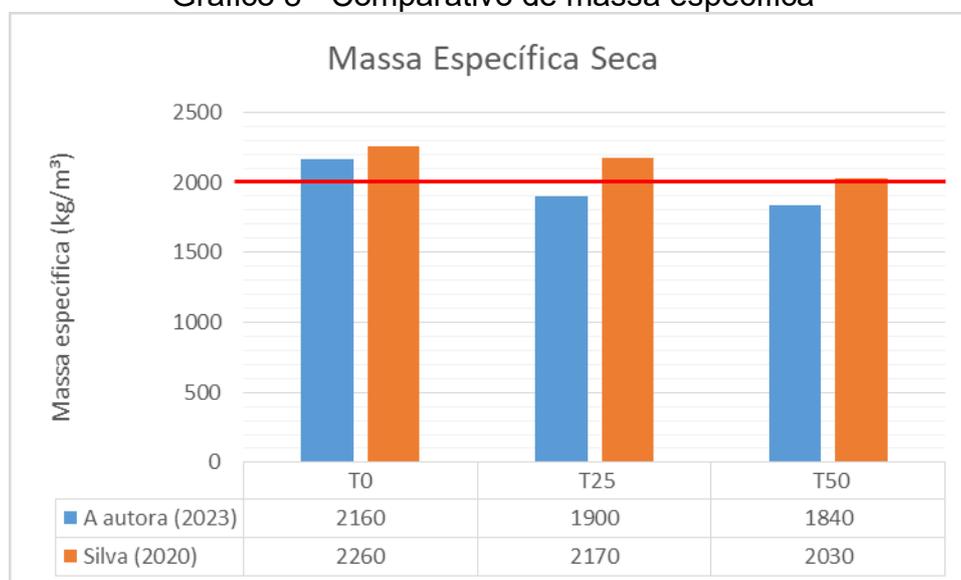
Traço	Massa específica (kg/m ³)
T0	2160
T25	1900
T50	1840

Fonte: A autora (2023).

Segundo a NBR 12655:2022, para se classificar como concreto leve sua massa específica deve ser inferior a 2.000 kg/m³, logo T25 e T50 se enquadram. Entretanto, segundo Neville (2013) para ser considerado um concreto leve estrutural é necessário ter massa específica inferior a 1.800 kg/m³, mesmo sendo o principal a resistência. Houve uma redução de 12% e 15% na massa específica, respectivamente, para o T25 e T50, em relação a T0.

Quando analisamos a massa específica seca obtida por Silva (2020), percebe-se que também houve redução nesses traços, sendo os traços TR25 e TR50 de Silva (2020), considerados concretos convencionais. No Gráfico 8 consegue-se uma percepção melhor dessa diferença.

Gráfico 8 - Comparativo de massa específica



Fonte: A autora (2023).

4.7. Ensaio de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi executado, entretanto para poder ter uma análise de 24h de cada corpo de prova individualmente, para verificação de possíveis vazamentos, foi despejada a água primeiro no CP T25, no dia seguinte o T50 e 48 horas depois do primeiro CP foi iniciado o ensaio no T0. A Tabela 17 permite uma visualização com data e temperatura da água no momento do início de cada ensaio.

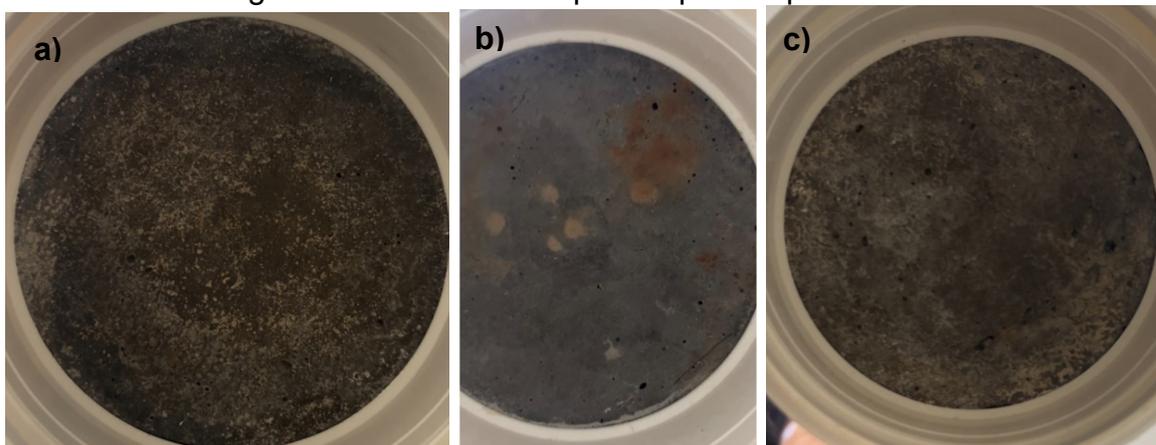
Tabela 17 - Dados de início do ensaio de permeabilidade

Traço	T0	T25	T50
Data (dia/mês)	20/10	18/10	19/10
Temperatura (°C)	21,8	21,5	22,6

Fonte: A autora (2023).

Mesmo após os 10 dias mencionados por Neville (2013), os CPs não apresentaram nenhuma gota de água em seus recipientes, contudo suas bases estavam úmidas conforme a Figura 24.

Figura 24 - Base dos corpos de prova após 30 dias



a) T0; b) T25; c) T50

Fonte: A autora (2023).

Esse caso ocorre pois a argila expandida não possui seus poros interligados, gerando assim uma baixa permeabilidade, mesmo sua porosidade possuindo valores acima de 50% (Rossignolo, 2003). Outro fator que influencia nesse

resultado é informado por Borja (2011), é que a adição de materiais finos torna mais impermeável o concreto, o que é possível observar, pois o T25 tem sua base com aparência de maior umidade do que o T50.

Este ensaio atesta a precisão dos ensaios de absorção de água e índice de vazios, evidenciado pela análise da Figura 24. Nela, observa-se que o T25 demonstra saturação completa, indicando um teor de umidade uniformemente distribuído. Em contraste, as amostras T0 e T50 apresentam apenas um umedecimento no centro, corroborando a assertiva de que não ocorreu qualquer desvio no processo experimental.

5. CONCLUSÃO

Ao revisitar os objetivos iniciais foi constatado que cada fase deste estudo proporcionou resultados promissores, evidenciando não apenas a eficácia da abordagem adotada, mas também a contribuição substancial para a área de concreto leve. A substituição do agregado miúdo convencional pelo agregado leve, argila expandida do tipo 2,5 mm, resultou em um concreto leve com resistência satisfatória, superando o valor estimado.

Na análise comparativa dos traços com substituição em relação ao traço de controle, no estado fresco, observou-se uma correlação entre os resultados obtidos e os futuros resultados no estado endurecido. O *slump test* revelou um resultado reduzido no T50 devido à falta de massa para reagir à gravidade, associada ao maior volume de agregado leve e à secagem em estufa que absorveu mais facilmente a água, mesmo com a utilização do aditivo plastificante.

O ensaio de densidade da massa aparente, também no estado fresco, apresentou resultados satisfatórios e previsões futuras, indicando uma diminuição da massa proporcional ao acréscimo do percentual de substituição do agregado miúdo. Essa tendência sugere uma síntese do futuro do concreto, apresentando uma massa específica menor com cada aumento na substituição, no estado endurecido.

No estado endurecido do concreto, os resultados dos ensaios de compressão axial e massa específica foram satisfatórios. A redução na resistência a compressão simples correlacionou-se com o aumento da substituição, mas os valores permaneceram acima do estimado e dentro da faixa para serem classificados como concreto leve estrutural, através de sua resistência e sua massa específica inferior a 2.000 kg/m³.

Contudo, ao considerar as propriedades físicas de absorção de água e índice de vazios, observou-se um resultado não esperado para T25 e T50. A adição de argila expandida, sendo um material fino, influenciou o efeito filler, preenchendo os espaços vazios do concreto, mesmo sem aumentar a densidade da mistura.

Comparativamente ao estudo de Silva (2020), que utilizou uma argila expandida com dimensão maior e agregado saturado, os resultados aqui obtidos foram superiores. Enquanto a autora não obteve massa específica para

substituições de 25% e 50% classificadas como concreto leve, este estudo alcançou tal classificação.

Com base nos resultados obtidos, é possível recomendar a substituição do agregado miúdo convencional pela argila expandida do tipo 2,5 mm para a utilização como concreto leve estrutural, para as duas substituições, sendo se o principal escolha for a resistência a T25, já se for por massa específica a T50. No entanto, é importante ressaltar a necessidade de pesquisas adicionais para resultado mais preciso.

Embora este estudo forneça resultados positivos, é imprescindível considerar suas limitações como oportunidades de aprendizado. Sugerimos que pesquisas subsequentes explorem mais profundamente como:

- A substituição total do agregado miúdo;
- A resistência ao calor, considerando a informação do fabricante da argila expandida, esse tipo de argila ser mais voltado na utilização de churrasqueiras e lareiras;
- Estudo sobre o custo ao utilizar esse tipo de concreto.

REFERÊNCIAS

ADÃO, Francisco Xavier. **Concreto armado: novo milênio: cálculo prático e econômico**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12644:2014**. *Concreto leve celular estrutural: Determinação da densidade de massa aparente no estado fresco*. Rio de Janeiro, 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12655:2022**. *Concreto de cimento Portland: Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2022.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16889:2020**. *Concreto: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro, 2020.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16972:2021**. *Agregados: Determinação da massa unitária e do índice de vazios*. Rio de Janeiro, 2021.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 17054:2022**. *Agregados: Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2022.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5738:2015**. *Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro, 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5739:2018**. *Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7211:2022**. *Agregados para concreto: Requisitos*. Rio de Janeiro, 2022.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9778:2005**. *Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, 2005.

BORJA, Edilberto Vitorino de. **EFEITO DA ADIÇÃO DE ARGILA EXPANDIDA E ADIÇÕES MINERAIS NA FORMULAÇÃO DE CONCRETOS ESTRUTURAIS LEVES AUTOADENSÁVEIS**. 2011. 230 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

CINEXPAN. **Argila Expandida: Tipo Laminado 2,5mm**. 02 de outubro de 2000. Várzea Paulista - SP. Disponível em: <<https://www.cinexpan.com.br/pdf/ficha-tecnica-tipo-laminado-2,5.pdf>>. Acesso em: 08 de outubro de 2023.

CINEXPAN. **Concreto leve estrutural com Argila Expandida CINEXPAN**. 2023. Disponível em: <https://www.cinexpan.com.br/concreto-leve-estrutural.html>. Acesso em: 08 de outubro de 2023.

CINEXPAN. **Construção Civil: Aplicações da Argila Expandida CINEXPAN para a construção civil**. 2023. Disponível em: <https://www.cinexpan.com.br/aplicacoes-construcao-civil.html>. Acesso em: 08 de outubro de 2023.

CINEXPAN. **O que é argila expandida? Conheça seus tipos, aplicações e benefícios**. Publicado em 10 de abril de 2020. Disponível em: <https://www.cinexpan.com.br/blog/index.php/2020/04/10/argila-expandida-o-que-e-tipos-uso-e-beneficios/>. Acesso em: 08 de outubro de 2023.

CINEXPAN. **Tipos e tamanhos de Argila Expandida CINEXPAN: confira a indicação para cada tipo**. Publicado em 07 de abril de 2022. Disponível em: <https://www.cinexpan.com.br/blog/index.php/2022/10/07/tipos-e-tamanhos-de-argila-expandida-cinexpan-confira-a-indicacao-para-cada-tipo/>. Acesso em: 08 de outubro de 2023.

FRANÇA *et al*, Alexandre Amaral Rei de. CONCRETO LEVE ESTRUTURAL COM ARGILA EXPANDIDA: DETERMINAÇÃO DO TRAÇO. **Revista Humanidades**, Brasil, v. 7, n. 2, p. 34-42, jul. 2018. Disponível em: https://www.revistahumanidades.com.br/arquivos_up/artigos/a172.pdf. Acesso em: 04 nov. 2023.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Arranjos Populacionais e Concentrações Urbanas no Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2016.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2022: Características da população e dos domicílios**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

MORAVIA, W. G.; OLIVEIRA, C. A. S.; GUMIERI, A. G.; VASCONCELOS, W. L.. Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve. **Cerâmica**, [S.L.], v. 52, n. 322, p. 193-199, jun. 2006.

NEVILLE, A. M.. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PASSOS, Júlia Clasen Palma. **ANÁLISE DA PERMEABILIDADE E DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO CONCRETO PERMEÁVEL COM DOSAGENS DE PEDRISCO E BRITA 1**. 2023. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2023.

PETRUCCI, Eladio G. R.. **Concreto de Pimento Portland**. 12. ed. São Paulo: Globo, 1993.

PEREIRA, Maurício Rodrigues. **ESTUDO DA ADIÇÃO DE ARGILA EXPANDIDA NA FORMULAÇÃO DE CONCRETOS LEVES**. 2008. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

ROSSIGNOLO, João Adriano. **CONCRETO LEVE DE ALTO DESEMPENHO MODIFICADO COM SB PARA PRÉ-FABRICADOS ESBELTOS – DOSAGEM, PRODUÇÃO, PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA**. 2003. 211 f. Tese (Doutorado em Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SILVA, Taylany Pereira da. **ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO POR ARGILA EXPANDIDA NO CONCRETO ESTRUTURAL**. 2020. 84 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2020.

SIMONETTI, Luis Felipe; ALBERTIM, Michel Fernando. Concreto leve com argila expandida e adição de fibra de aço. In: JEAN CARLOS RODRIGUES (org.). **Engenharia de materiais e meio ambiente: reciclagem, sustentabilidade, novos processos e desafios**. Ponta Grossa: Aya Editora, 2022. Cap. 4. p. 62-83. Disponível em: <https://ayaeditora.com.br/wp-content/uploads/Livros/L170C4.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2023.

SIKA BRASIL. **Sika® Concreto Forte - Ficha Técnica**. Versão 01.03. Dezembro 2020. Osasco - SP. Disponível em: <https://bra.sika.com/content/dam/dms/br01/o/sika_concreto_forte.pdf>. Acesso em: 08 de outubro de 2023.