



INSTITUTO FEDERAL DE SERGIPE
COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL
KAROLINE SILVA GAMA

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE UM CONCRETO LEVE COM ARGILA
EXPANDIDA E AGREGADO POLIMÉRICO

ESTÂNCIA
2023

KAROLINE SILVA GAMA

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE UM CONCRETO LEVE COM ARGILA
EXPANDIDA E AGREGADO POLIMÉRICO

Trabalho de conclusão de curso (TCC II) apresentado
ao Instituto Federal de Sergipe – Campus Estância,
como pré-requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Ma. Fernanda Martins Cavalcante
de Melo

ESTÂNCIA
2023

G184a Gama, Karoline Silva.
Análise das propriedades de um concreto leve com argila expandida e agregado polimérico. / Karoline Silva Gama. - Estância, 2023.
72 f.; il.

Monografia (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Civil. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – IFS, 2023.

Orientadora: Prof. ^a Ma. Fernanda Martins Cavalcante de Melo.

1. Agregado polimérico. 2. Argila expandida. 3. Agregado leve. 4. Sustentabilidade. 5. Concreto leve. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe - IFS. II. Melo, Fernanda Martins Cavalcante de. III. Título.

CDU: 624.012.82:691.32+502.171

KAROLINE SILVA GAMA

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE UM CONCRETO LEVE COM ARGILA
EXPANDIDA E AGREGADO POLIMÉRICO

Trabalho de conclusão de curso (TCC II) apresentado
ao Instituto Federal de Sergipe – Campus Estância,
como pré-requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Civil.

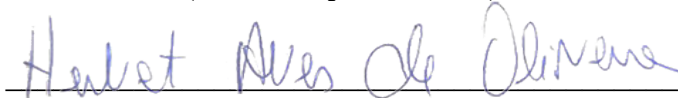
Orientadora: Prof.^a Ma. Fernanda Martins Cavalcante
de Melo

Aprovado em: 19/07/2023

BANCA EXAMINADORA



Prof.^a Ma. Fernanda Martins Cavalcante de Melo
(IFS - Campus Estância)



Prof. Dr. Herbet Alves de Oliveira
(IFS - Campus Estância)

Prof. Dr. David de Paiva Gomes Neto
(IFS - Campus Lagarto)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conduzir em todos os momentos com sabedoria e paciência.

Aos meus pais, Elisângela Serafim Gama e Antônio Carlos Nascimento Silva, que sempre estiveram ao meu lado me incentivando e ajudando nas horas mais difíceis e felizes da minha vida.

Ao meu companheiro Allan Batista Nascimento e a minha filha Heloísa Batista Gama, onde encontro forças para continuar.

As minhas irmãs, Karine Gama Silva e Kariane Gama Silva, por todo apoio e energia positiva.

A minha orientadora, Prof.^a Ma. Fernanda Martins Cavalcante de Melo, principalmente pela compreensão, paciência, dedicação e empenho para a realização desta pesquisa. Obrigada pela confiança e apoio de sempre!

A técnica de laboratório Juci, por todo auxílio e disponibilidade durante a execução dos ensaios.

Aos amigos que o curso proporcionou, Irla, Emerson, Dayvid, Vilmária e Handellon pela amizade e incentivo durante toda a graduação.

Aos colegas, Veluza, Karolaine, Jéssica, Maisa, Natanael e Antônio por toda ajuda no laboratório e na pesquisa.

A Prof.^a Ma. Vanessa Gentil de Oliveira Almeida Silva, pela doação da argila expandida.

FAMOSSUL, pelo fornecimento do resíduo de cola polimérica.

A Ouro Plastic, pelo apoio no processo de trituração do resíduo polimérico.

A empresa FM MIX, pela doação dos aditivos.

RESUMO

O segmento da construção civil é um dos responsáveis por grande parte dos impactos ambientais, visto que a demanda de extração de recursos naturais só aumenta. Por outro lado, este segmento tem se dedicado à produção de materiais sustentáveis. A utilização de resíduos em concretos é uma das alternativas que visa contribuir para um descarte adequado, como também, reduzir a extração de materiais naturais. Esses resíduos podem ser incorporados em concretos leves, o que possibilita a redução do peso específico das estruturas. Desse modo, essa pesquisa tem como objetivo analisar as propriedades do concreto leve com a incorporação de agregado graúdo de cola polimérica, em substituição parcial da argila expandida. Foram dosadas quatro formulações, com substituição do agregado graúdo de argila expandida (C1506) por agregado de cola polimérica em 0%, 10%, 20% e 30%. Os materiais componentes do concreto leve foram ensaiados de acordo com as prescrições normativas. Os concretos tiveram suas propriedades analisadas no estado fresco: consistência e massa específica aparente, e no estado endurecido: massa específica real, absorção de água, índice de vazios, resistência à compressão e resistência à flexão. Os valores obtidos foram tratados, com a análise de variância (ANOVA) seguida do Teste de Tukey, e comparados com os resultados presentes na literatura. Os resultados mostraram que a substituição da argila expandida pelo agregado de cola polimérica resultou em aumento do índice de consistência e não apresentou influência significativa nos valores de massa específica aparente e real, índice de vazios e absorção de água. Em relação à resistência à compressão e flexão, registrou-se redução para ambas propriedades. Conclui-se que a incorporação do resíduo de cola polimérica, em substituição parcial a argila expandida é uma alternativa técnica, pois foi possível produzir concreto leve, inclusive, com fins estruturais, e, sustentável, visto que é uma opção para destinação deste tipo de resíduo e contribuição para redução de recursos naturais, utilizados na produção de materiais para construção civil.

Palavras-chave: Agregado polimérico. Argila expandida. Agregado leve. Sustentabilidade. Concreto leve.

ABSTRACT

The civil construction segment is one of those responsible for most of the environmental impacts, as the demand for extracting natural resources only increases. On the other hand, this segment has been dedicated to the production of sustainable materials. The use of waste in concrete is one of the alternatives that aims to contribute to proper disposal, as well as to reduce the extraction of natural materials. These residues can be incorporated into lightweight concrete, which makes it possible to reduce the specific weight of structures. Thus, this research aims to analyze the properties of lightweight concrete with the incorporation of coarse aggregate of polymeric glue, in partial replacement of expanded clay. Four formulations were dosed, replacing the coarse expanded clay aggregate (C1506) by polymeric glue aggregate at 0%, 10%, 20% and 30%. The component materials of lightweight concrete were tested in accordance with normative prescriptions. The properties of the concretes were analyzed in the fresh state: consistency and apparent specific mass, and in the hardened state: actual specific mass, water absorption, void ratio, compressive strength and flexural strength. The values obtained were treated with analysis of variance (ANOVA) followed by Tukey's test, and compared with the results found in the literature. The results showed that the replacement of expanded clay by the polymeric glue aggregate resulted in an increase in the consistency index and did not present a significant influence on the values of apparent and real specific mass, voids index and water absorption. Regarding compressive and flexural strength, there was a reduction for both properties. It is concluded that the incorporation of polymeric glue residue, in partial replacement of expanded clay, is a technical alternative, as it was possible to produce lightweight concrete, including structural purposes, and sustainable, since it is an option for the disposal of this type of material. waste and contribution to the reduction of natural resources, used in the production of materials for civil construction.

Keywords: Polymeric aggregate. Expanded clay. Light aggregate. Sustainability. Lightweight concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Argilas expandidas	18
Figura 2 – Fluxograma do esquema experimental	37
Figura 3 – Argila expandida C1506	39
Figura 4 – Agregado de cola polimérica triturado	40
Figura 5 – Medição do abatimento	42
Figura 6 – Ensaio de massa específica aparente	42
Figura 7 – Etapas do ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica real	43
Figura 8 – Ensaio de resistência à compressão do concreto leve	44
Figura 9 – Ensaio de resistência à flexão	45
Figura 10 – Curva granulométrica do agregado miúdo	47
Figura 11 – Curva granulométrica da argila expandida	48
Figura 12 – Curva granulométrica do agregado de cola polimérica	50
Figura 13 – Resultados de índice de consistência dos concretos leves	51
Figura 14 – Resultados de massa específica aparente dos concretos leves	52
Figura 15 – Resultados de massa específica real dos concretos leves	53
Figura 16 – Resultados de índice de vazios dos concretos leves	54
Figura 17 – Resultados de absorção de água dos concretos leves	55
Figura 18 – Resultados de resistência à compressão dos concretos leves	56
Figura 19 – Resultados de resistência à flexão dos concretos leves	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1– Propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland CP V-ARI	38
Quadro 2 – Caracterização do agregado miúdo	38
Quadro 3 – Caracterização da argila expandida	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de polímeros utilizados para produção de concreto com agregado polimérico	20
Tabela 2 – Valores correspondentes de resistência à compressão e massa específica aparente para concreto com agregados leves	21
Tabela 3 – Valores de consistência do concreto leve com argila expandida e/ou agregado polimérico encontrados na literatura	23
Tabela 4 – Valores de massa específica aparente do concreto leve com argila expandida e/ou agregado polimérico encontrados na literatura	25
Tabela 5 – Valores de massa específica real do concreto leve com argila expandida e/ou agregado polimérico encontrados na literatura	26
Tabela 6 – Valores de índice de vazios do concreto leve com argila expandida e/ou agregado polimérico encontrados na literatura	28
Tabela 7 – Valores da absorção de água do concreto leve com argila expandida e/ou agregado polimérico encontrados na literatura	29
Tabela 8 – Valores de resistência à compressão do concreto leve com argila expandida e/ou agregado polimérico encontrados na literatura	32
Tabela 9 – Valores de resistência à flexão do concreto leve com argila expandida e/ou agregado polimérico encontrados na literatura	34
Tabela 10 – Propriedades físicas e químicas do agregado de cola polimérica	40
Tabela 11 – Proporções (kg/m ³) para dosagem dos concretos	41
Tabela 12 – Propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland CP V-ARI	47
Tabela 13 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo	47
Tabela 14 – Resultados dos ensaios de caracterização da argila expandida	48
Tabela 15 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado de cola polimérica	49
Tabela 16- Resultados da ANOVA.	50
Tabela 17 – Fator de Eficiência dos concretos leves	57
Tabela 18 – Classificação de concretos quanto ao Fator de Eficiência	57
Tabela 19 – Fator de Eficiência	58

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AE – Argila expandida

ANOVA – Análise de variância

AP – Agregado polimérico

CO₂ – Dióxido de carbono

CP V-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

EPS – Poliestireno expandido

EVA – Etileno acetato de vinila

g – Grama

g/cm³ – Grama por centímetro cúbico

HDPE – Polietileno de alta densidade

IFS – Instituto Federal de Sergipe

kg – Quilograma

kg/m³ – Quilograma por metro cúbico

mm – Milímetro

MPa – megapascal

NBR – Norma Brasileira

PC – Policarbonato

PET – Tereftalato de polietileno

PP – Polipropileno

PVC – Cloreto de polivinila

SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL	17
2.2	AGREGADO LEVE	17
2.2.1	Argila expandida	18
2.2.2	Agregado polimérico	19
2.3	CONCRETO LEVE	21
2.3.1	Propriedades do concreto leve com argila expandida e/ou agregado polimérico	23
2.3.1.1	<i>Consistência</i>	23
2.3.1.2	<i>Massa específica aparente</i>	25
2.3.1.3	<i>Massa específica real</i>	27
2.3.1.4	<i>Índice de vazios</i>	29
2.3.1.5	<i>Absorção de água</i>	30
2.3.1.6	<i>Resistência à compressão</i>	32
2.3.1.7	<i>Resistência à flexão</i>	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	MATERIAIS	39
3.1.1	Cimento	39
3.1.2	Agregado miúdo	39
3.1.3	Argila expandida	39
3.1.4	Agregado de cola polimérica	40
3.1.5	Água	41

3.1.6	Aditivo	41
3.2	MÉTODOS	42
3.2.1	Procedimento para preparação das formulações e moldagem dos corpos de prova	42
3.2.2	Ensaio de caracterização do concreto com argila expandida e agregado de cola polimérica	43
3.2.2.1	<i>Ensaio do concreto leve no estado fresco</i>	43
3.2.2.1.1	<u>Índice de consistência</u>	43
3.2.2.1.2	<u>Ensaio de massa específica aparente</u>	43
3.2.2.1.3	<i>Ensaio do concreto leve no estado endurecido</i>	44
3.2.2.1.4	<u>Ensaio de massa específica real, absorção de água e índice de vazios</u>	44
3.2.2.1.5	<u>Ensaio de resistência à compressão</u>	45
3.2.2.1.6	<u>Ensaio de resistência à flexão</u>	46
3.2.2.2	<i>Tratamento e análise de dados</i>	47
3.2.2.3	<i>Fator de eficiência</i>	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	47
4.1.1	Cimento Portland	47
4.1.2	Agregado miúdo	48
4.1.3	Argila expandida	49
4.1.4	Agregado de cola polimérica	50
4.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS LEVES	51
4.2.1	Ensaio para caracterização dos concretos leves no estado fresco	51
4.2.1.1	<i>Índice de consistência</i>	52
4.2.1.2	<i>Massa específica aparente</i>	52
4.2.1.3	<i>Massa específica real</i>	53
4.2.1.4	<i>Índice de vazios</i>	54
4.2.1.5	<i>Absorção de água</i>	55
4.2.1.6	<i>Resistência à compressão</i>	56
4.2.1.6.1	<u>Fator de Eficiência</u>	58
4.2.1.7	<i>Resistência à flexão</i>	59

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
5.1	CONCLUSÕES	61
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

O concreto convencional é um dos materiais mais consumidos na construção civil, cerca de 70% do volume de sua composição é constituído por agregados naturais, que ao decorrer dos anos, esses materiais vêm se esgotando pelo excesso de sua extração (SEBSADJI, 2022). A densidade do concreto convencional é de aproximadamente 2400 kg/m^3 , e por possuir um elevado peso próprio, a construção de grandes estruturas pode ser um desafio. Pensando nisso, o uso de agregados leves é uma alternativa para ter uma redução da densidade e, consequentemente, uma diminuição do peso próprio de elementos estruturais. Com isso, o uso desses agregados na mistura de um concreto irá reduzir o peso final do material, resultando em um concreto leve com densidades que variam de 1400 kg/m^3 a 2000 kg/m^3 (ELANGO et al., 2021).

A preparação da mistura desse tipo de concreto pode ser realizada usando agregados leves, naturais ou artificiais. A argila expandida é produzida artificialmente e é o agregado leve mais utilizado na produção do concreto (JUNAID et al., 2022; AHMAD; CHEN; SHAH, 2019). Além da argila expandida, o uso de agregados poliméricos também é uma alternativa para ser aplicada na mistura do concreto. A substituição de agregados naturais pelos agregados leves de argila expandida e de agregado polimérico diminui a extração dos recursos naturais, ajudando a reduzir o impacto ambiental em termos da emissão de dióxido de carbono (CO_2), pois para 1000 kg de agregado natural produzido, 20 kg de CO_2 é emitido devido aos diferentes processos como extração, britagem e transporte de agregados (CHINNU et al., 2021).

Pesquisas têm sido realizadas a fim de analisar a influência da argila expandida e agregados poliméricos nas propriedades físicas e mecânicas do concreto leve. O estudo de Alqahtani (2022) analisou a incorporação de agregados fabricados à base de polímeros como agregado gráudo no concreto e foram avaliadas as propriedades no estado fresco e endurecido, sendo os níveis de substituição de 25%, 50%, 75% e 100%. A consistência desse concreto aumentou, enquanto a densidade e a resistência à compressão diminuíram com o aumento da taxa de substituição dos agregados poliméricos. Concluiu-se que os agregados poliméricos podem ser usados para construção civil, especificamente para produção de concreto leve com fins não estruturais.

Moncada et al. (2019) fizeram a comparação entre o concreto convencional e o concreto leve de argila expandida e poliestireno expandido, em substituição ao agregado gráudo. Nos

resultados obtidos, o concreto convencional apresentou uma resistência à compressão maior em relação ao concreto leve e, por outro lado, em sua composição foram utilizados agregados que apresentavam massa específica elevada. Assim, o fator de eficiência (relação entre a resistência à compressão e a massa específica) do concreto convencional foi inferior ao concreto leve. Com relação a massa específica, o concreto leve apresentou uma diminuição significativa comparada ao concreto convencional, o que demonstra que esse tipo de concreto pode ser uma alternativa viável para reduzir o peso próprio de estruturas, minimizando os esforços solicitantes.

Desse modo, percebe-se que o uso de agregado polimérico e argila expandida para produção do concreto leve pode trazer benefícios econômicos e sustentáveis. No entanto, a escassez de pesquisas que abordam o uso combinado desses agregados é evidente. Assim, essa pesquisa tem como objetivo analisar as propriedades do concreto leve com a incorporação de agregado gráúdo de cola polimérica, em substituição parcial a argila expandida. O resíduo de cola polimérica é resultante do processo de colagens de portas e componentes de madeira de uma fábrica do município de Estância/SE. Todos os materiais componentes foram ensaiados de acordo com as prescrições normativas. As propriedades do concreto foram analisadas, no estado fresco: consistência e massa específica aparente, e no estado endurecido: massa específica real, absorção de água, índice de vazios, resistência à compressão e resistência à flexão.

1.1 JUSTIFICATIVA

A indústria de construção civil é um dos setores que mais consomem recursos naturais, acarretando, assim, impactos na natureza. Cerca de 65-70% do agregado natural é utilizado na produção do concreto (FARAJ; SHERWANI; DAREI, 2019). Por isso, a busca por materiais alternativos que possam substituir os agregados convencionais está cada vez mais presente.

Descartes incorretos dos resíduos poliméricos geram impactos negativos para a humanidade e o meio ambiente. Assim, a reciclagem desses materiais pode ser uma solução para resolver a preocupação da poluição ambiental, como também para contribuir com a redução de recursos naturais usados no concreto convencional, onde esses materiais podem ser substituídos por agregados poliméricos formando o concreto leve (BASHA et al., 2020).

Dessa maneira, essa pesquisa busca produzir concreto leve com argila expandida e analisar a influência da incorporação de resíduo de cola polimérica nas propriedades do concreto leve. Assim, apresenta-se uma opção para o destino final de um resíduo que é gerado na indústria do

município de Estância/SE, demonstrando um interesse na conservação ambiental e no desenvolvimento econômico da região.

1.2 OBJETIVOS

Serão apresentados a seguir os objetivos, geral e específicos, deste estudo.

1.2.1 Objetivo geral

A presente pesquisa tem como objetivo geral analisar as propriedades do concreto leve com a incorporação de agregado graúdo de cola polimérica, em substituição parcial da argila expandida.

1.2.2 Objetivos específicos

- Explorar o referencial bibliográfico a fim de conhecer o comportamento das propriedades do concreto leve com argila expandida e resíduo polimérico;
- Determinar as propriedades dos materiais componentes que irão compor o concreto leve, tal como sua influência nas características do material produzido;
- Obter formulações, com diferentes percentuais de resíduo de cola polimérica;
- Avaliar a influência da incorporação do resíduo de cola polimérica nas propriedades: consistência, massa específica aparente, massa específica real, absorção de água, índices de vazios, resistência à compressão e resistência à flexão do concreto leve produzido;
- Relacionar os dados experimentais obtidos nessa pesquisa, com valores disponíveis na literatura para metodologias semelhantes;
- Produzir materiais que irão contribuir para a sustentabilidade na construção civil.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentadas pesquisas bibliográficas de trabalhos científicos relacionados ao tema abordado, a fim de obter embasamento e referencial teórico que contribuirão com a análise dos resultados obtidos.

2.1 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O setor da construção civil promove desenvolvimento social e econômico, mas é um segmento que consome um elevado volume de recursos naturais, o que acarreta em impactos ambientais. Tendo em vista que a indústria de concreto é responsável pela maior parte desse consumo, o uso de materiais sustentáveis na sua produção é uma solução para este problema, exemplo disso, é o material polimérico reciclado que pode ser utilizado para substituir o agregado graúdo no concreto, o que torna uma aplicação viável na indústria de concreto e pode resolver o descarte em grandes quantidades deste tipo de resíduo (MANJUNATH, 2016).

Além disso, o armazenamento dos resíduos poliméricos em aterros pode ser perigoso, por ser um material que demora anos para se decompor e ao entrar em contato com a água da chuva apresenta riscos para o solo e água, pois contém substâncias tóxicas como cádmio e chumbo (FARAJ et al., 2020). Assim, uma solução sustentável para essa problemática é a reciclagem dos materiais poliméricos com o objetivo de substituir os agregados naturais na produção de concreto, o que contribui para economia de energia, redução do aquecimento global, poluição e descarte de resíduos (BELMOKADDEM et al., 2020).

Portanto, o consumo consciente de recursos naturais e o aproveitamento dos resíduos poliméricos tornou-se um alvo importante para a proteção do meio ambiente e para a sustentabilidade na indústria de construção civil (BEJAN et al., 2020).

2.2 AGREGADO LEVE

De acordo com a ABNT NBR 12655:2022 Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento, o agregado leve é um agregado de baixa massa específica, que não ultrapassa de 2 000 kg/m³, como, por exemplo, os agregados expandidos de argila, escória siderúrgica, ardósia, vermiculita, resíduo de esgoto sinterizado e outros.

A NBR NM 35:2008 Agregados leves para concreto estrutural – Especificação, destaca dois tipos de agregados leves: agregados preparados por expansão, calcinação ou sinterização de

produtos: escória de alto-forno, argila, diatomita, cinza volante (*fly-ash*), ardósia ou folhelho e agregados constituídos por materiais naturais como: pomes, escória vulcânica ou tufo. Porém, a argila expandida, pedra-pomes e xisto expandido são os agregados mais utilizados na produção do concreto leve, com densidades aparentes de 200-1000 kg/m³, 500-900 kg/m³ e 600-1000 kg/m³, respectivamente (MAGHFOURI et al., 2022).

Algumas propriedades, como a resistência mecânica, são modificadas pela textura superficial e forma dos agregados leves e tem relação com a quantidade de água essencial para obter uma trabalhabilidade esperada (ROSSIGNOLO, 2003). A utilização desses agregados leves na construção civil cresce cada vez mais por apresentarem benefícios como redução do peso próprio das estruturas e melhor desempenho no isolamento térmico e acústico (CHUNG et al., 2021).

2.2.1 Argila expandida

A argila expandida é um agregado leve natural e isolante, formada por uma camada microporosa rígida e resistente, com estrutura interna formada por uma massa cerâmica porosa. O processo de fabricação é realizado pelo aquecimento da argila em uma temperatura de 1200°C em forno rotativo de alta tecnologia. Não é um produto inflamável e demora a se decompor (CINEXPAN, 2022).

A argila expandida é um dos materiais que apresenta uma camada externa de baixa porosidade, e dessa maneira sua resistência é aumentada. Ao contrário disso, agregados com porosidade, diminui significativamente a resistência mecânica (ROSSIGNOLO, 2009).

Segundo Roces et al. (2021), por ser um material fabricado de forma padronizada, algumas das características da argila expandida, como: densidade do grão, diâmetro, espessura da casca, podem sofrer alterações de acordo com os critérios esperados para o emprego final do material. As principais aplicações desse agregado leve na construção civil estão associadas ao seu uso na produção de concreto leve e como enchimento leve em obras geotécnicas.

Existem dois tipos de processos mais utilizados na fabricação dos agregados leves artificiais, o obtido por sinterização e o que passa pelo processo de forno rotativo. No processo de sinterização, a matéria-prima é calcinada em forno rotativo ou estático. Logo depois, esse material é inserido em forma não compactada em uma grelha móvel e é submetido a altas

temperaturas, sendo fundido levemente, formando uma camada sinterizada, assim o material é britado e separado de acordo com a granulometria adequada (BORJA, 2011).

No processo de produção em forno rotativo, o material é submetido a altas temperaturas, parte do material se funde e forma uma massa viscosa e a outra fração se decompõe e libera gases, expandindo-se em até sete vezes do seu volume inicial. O agregado formado possui uma camada de proteção externa com baixa porosidade. Os agregados leves obtidos pelo processo de sinterização têm massa específica entre 650 kg/m^3 e 900 kg/m^3 e, além disso, apresentam poros conectados e valores altos de absorção de água. Os produzidos pelo processo de forno rotativo geralmente apresentam formato arredondado regular, granulometria variada e baixos valores de absorção de água oriundos de uma camada externa de material vítreo denominado de “encapado” (ROSSIGNOLO, 2009).

No Brasil, a argila expandida é produzida pela CINEXPAN – indústria e comércio LTDA, localizada na cidade de Várzea Paulista – SP, a produção da argila expandida é feita pelo processo de forno rotativo e a extração da matéria-prima é extraída no município de Jundiaí. Conforme apresentado na Figura 1, as argilas expandidas podem ser classificadas em cinco tipos: as usadas para enchimento de vazios e paisagismo: 3222 (22/32 mm) e a 2215 (15/22 mm); as usadas para produção do concreto leve e enchimento: 1506 (6/15 mm) e a 0500 (0/5 mm) e a usada na fabricação de churrasqueiras, lareiras e refratários: laminado (0/2,5 mm) (CINEXPAN, 2022).



Figura 1 - Argilas expandidas (CINEXPAN, 2022)

2.2.2 Agregado polimérico

Os polímeros se tornaram um produto popular entre consumidores e fabricantes por apresentarem algumas propriedades vantajosas, como baixa densidade, durabilidade e simplicidade de *design* (PONMALAR; REVATHI, 2022).

Os agregados poliméricos são materiais obtidos através do processo da reciclagem de resíduos poliméricos. Grande parte destes resíduos são descartados de maneira inapropriada, gerando emissões de gases tóxicos, que são uma ameaça para a biodiversidade e vida humana. A produção de polímero apresenta grande crescimento ao decorrer dos anos, desde o século 20. O mundo produz cerca de 150 milhões de toneladas por ano de materiais poliméricos, sendo 70% do polímero de uso único, ou seja, possuem uma vida útil muito curta e são descartados imediatamente após seu uso (PONMALAR; REVATHI, 2022).

A reciclagem e a incineração desses materiais ainda são em pequenas proporções, assim, o responsável pela maior parte do descarte desse material é o despejo em aterros. Segundo Castillo et al. (2020), a liberação de dióxido de carbono e produtos químicos perigosos são oriundos do processo de incineração, que mesmo eliminando 100% os resíduos, ainda liberam essas substâncias para o meio ambiente. O despejo em aterros, além de ocupar grandes volumes, causa danos para a fertilidade do solo, risco ao ecossistema e a vida humana (SHIULY et al., 2022), sendo assim, uma alternativa eficiente é a reciclagem desses materiais.

Na indústria de construção civil, os agregados poliméricos podem ser utilizados para substituir parcialmente ou totalmente agregados naturais na produção de concretos e argamassas. Suas propriedades podem apresentar melhoria devido à influência do polímero na hidratação do cimento, teor de água e porosidade das estruturas do material, e também às interações físicas e químicas entre o cimento e os polímeros (VARUN; KUMAR, 2021).

Portanto, estudos como o de Gopu et al. (2022) apresentam polímeros como: Policarbonato (PC), Polietileno de Alta Densidade (HDPE), Tereftalato de Polietileno (PET), Polipropileno (PP) e Cloreto de Polivinila (PVC), sendo utilizados para produção do concreto e avaliação da influência destes nas propriedades do material produzido.

Por possuírem baixa densidade e absorção de água, os resíduos poliméricos possuem algumas propriedades diferentes dos agregados naturais, uma delas é a superfície lisa, que reduz a ligação entre a matriz de cimento e o agregado polimérico (LI; LING; MO, 2020).

Na Tabela 1 estão representados alguns tipos de polímeros com diferentes granulometrias (0,1 mm – 11,4 mm) e percentuais (5% a 100%) utilizados em pesquisas experimentais para produção de agregado polimérico. No tópico 2.2.2 serão abordados como alguns desses tipos interferem nas propriedades do concreto. Observa-se que o tereftalato de polietileno (PET) é um dos polímeros mais utilizados como agregado para o concreto.

Tabela 1– Tipos de polímeros utilizados para produção de concreto com agregado polimérico

Autores	Polímero utilizado	Granulometria (mm)	Percentual de Polímero
Alqahtani (2022)	PET	10	0%; 25%; 50%; 75% e 100%
Kangavar et al. (2022)	PET	< 4,75	0%, 10%, 30% e 50%
Ghasemi, Nematzadeh e Fallahnejad (2022)	PET	6,0	0%, 5%, 10% e 15%
Olofinnade, Chandra e Chakraborty (2020)	Poliestireno e Polietileno	0,1 – 4,0	0%, 10%, 30% e 50%
Nematzadeh, Shahmansori e Fakoor (2020)	PET	4,0 – 7,0	0%, 5% e 10%
Faraj, Sherwani e Daraei (2019)	Polipropileno	4,0 – 8,0	0%, 10%, 20%, 30% e 40%
Jacob - Vaillancourt e Sorelli (2018)	Polipropileno, Polietileno, Poliestireno e Cloreto de polivinila	2,0 – 11,4	0%, 5%, 10% e 20%
Záleská et al. (2018)	Polipropileno	< 8,0	0%; 10%; 20% e 30%
Alqahtani et al. (2017)	Polietileno	10,0	0%, 25%, 50%, 75% e 100%
Colangelo et al. (2016)	Poliiolefina	< 6,0	0%, 10%, 20% e 30%

Fonte: A autora (2023)

Notas: PET –Polietileno tereftalato.

(-) intervalo de valores.

2.3 CONCRETO LEVE

De acordo com a ABNT NBR 8953:2015 que estabelece as classes do concreto em função de sua massa específica, resistência à compressão axial e consistência, o concreto leve possui

massa específica seca inferior a 2000 kg/m^3 , diferente do concreto convencional que tem massa específica seca compreendida entre 2000 kg/m^3 e 2800 kg/m^3 . A produção do concreto leve é constituída pelos agregados de massa leve e estes ocupam 50% do seu volume (CHUNG et al., 2021).

Para Rossignolo (2003), o concreto leve é caracterizado pela substituição total ou parcial de agregados comuns por agregados leves em que vão contribuir na redução da massa específica e realizar alterações nas características térmicas, além de modificar significativamente propriedades importantes como trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de deformação, retração e fluência.

A ABNT NBR NM 35:2008 apresenta os valores mínimos de resistência à compressão em função da massa específica aparente para concreto feito com agregados leves, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Valores correspondentes de resistência à compressão e massa específica aparente para concreto com agregados leves

Valores mínimos da resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Valores máximos da massa específica aparente (kg/m^3)
28	1840
21	1760
17	1680

Fonte: NM 35 (2008)

A relação entre a resistência à compressão e a massa específica é dada pelo fator de eficiência. Concretos convencionais contendo agregados com massa específica mais elevada apresentam um fator de eficiência inferior aos concretos leves. Mesmo o concreto convencional possuindo uma resistência à compressão maior, o fator de eficiência é maior para o concreto leve, pois apresenta redução da massa específica (MONCADA et al., 2019; SCOBAR, 2016)

São diversas as aplicações do concreto leve na construção civil, mas a maioria é em função da redução da massa específica do concreto, pois proporcionam viabilidade econômica e técnica, como em edificações de múltiplos pavimentos, construções pré-fabricadas que beneficiam o transporte e a montagem de peças, e estruturas especiais, como estruturas flutuantes, pontes e coberturas que precisam vencer grandes vãos (ROSSIGNOLO, 2009).

2.3.1 Propriedades do concreto leve com argila expandida e/ou agregado polimérico

A seguir serão apresentadas algumas propriedades do concreto leve no estado fresco: consistência e massa específica aparente, e no estado endurecido: massa específica real, absorção de água, índice de vazios, resistência à compressão e resistência à flexão, abordadas por diversos autores na literatura, a fim de verificar a influência do agregado polimérico e argila expandida em substituição parcial ou total dos agregados naturais na mistura do concreto leve, em que fará parte de análise e comparação dos resultados.

2.3.1.1 Consistência

De acordo com a ABNT NBR 11768-1:2019 – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 1: Requisitos, a consistência é uma propriedade do concreto no estado fresco, que tem capacidade de ser moldável.

A massa específica leve dos agregados e suas características físicas, como formato e textura lisa, são fatores que ocasionam a redução do índice de consistência (SHAFIGH et al., 2018; SILVA, 2020; ALQAHTANI, 2022). Para Rumsys et al. (2017), se a argila expandida for pré-umedecida pode melhorar a hidratação do cimento, caso contrário, o concreto pode ter sua trabalhabilidade comprometida se muita água for perdida pela absorção durante a mistura e bombeamento.

São apresentados na Tabela 3 os valores do índice de consistência, onde os percentuais de agregado polimérico e/ou argila expandida em substituição aos agregados naturais foram abordados em estudos de diferentes autores, no qual avaliaram a influência dessas substituições no índice de consistência do concreto leve. Observa-se que os resultados foram variados com substituição da argila expandida (↑31% - ↓ 83%) e do agregado polimérico (↑5% - ↓ 41%).

Tabela 3 – Valores de consistência do concreto leve com argila expandida e/ou agregado polimérico encontrados na literatura

Autores	Agregado utilizado/Agregado substituído	Percentual de resíduo	Consistência (mm)	↑/↓ máximo (%) - (% de resíduo)
Silva (2020)	AE/AC	0%; 25%; 50%; 75% e 100%	180; 200; 180; 180; 30	↓83(100%) ↑10 (25%)
Shafigh et al. (2018)	AE/AC	0%; 100%	105; 50	↓52(100%)
Borja (2011)	AE/AC	0%; 60-40%; 70-30%; 80-20%*	(75 a 100) **; 145; 100; 95	↓5(80-20%) ↑31 (60-40%)
Alqahtani (2022)	AP/AC	0%; 25%; 50%; 75% e 100%	245; 145; 175; 180; 195	↓41 (25%)
Madandous, Ranjbar e Mousavi (2011)	AP/AC	0%; 10%; 15%; 22,5% e 30%	645; 650; 645; 660; 680	↑5(30%)
Kou et al. (2009)	AP e AE/AC	0%; 5%; 15%; 30% e 45%	175; 175; 170; 175; 170	↓3 (15% e 45%)

Fonte: A autora (2023).

↑ acréscimo dos valores em relação à amostra de referência.

↓ decréscimo dos valores em relação à amostra de referência.

AP: Agregado polimérico; AE: Argila expandida; AC: Agregado convencional.

*60-40: 60% AE-0500 e 40% AE1506;

** Valor estimado para referência.

Shafigh et al. (2018) utilizaram em seu estudo a substituição do agregado natural por argila expandida, com isso analisaram que a consistência diminuiu em até 52% com nível de substituição do agregado de 100%. Ocorreu a redução porque a argila expandida é um material muito leve, assim acaba sofrendo flutuação. A dosagem de superplastificante na mistura foi reduzida para evitar segregação no concreto leve. Em contrapartida, Borja (2011) relatou um aumento do índice de consistência no seu estudo, onde este aumento pode ser atribuído ao deslizamento entre suas partículas durante a realização do abatimento devido sua forma mais arredondada.

Alqahtani (2022) analisou os teores do agregado de tereftalato de polietileno (PET) (0%; 25%; 50%; 75% e 100%) em substituição ao agregado graúdo. Este autor concluiu que os valores de

abatimento com as proporções apresentaram uma redução em comparação ao concreto leve de referência. A diferença dos resultados foi atribuída pela forma redonda e textura lisa do agregado leve utilizado no concreto de referência, diferente do agregado de PET, que é relativamente áspero. Além disso, uma graduação mal realizada pode favorecer a diminuição do índice de consistência e os valores mais altos podem ser vistos como uma vantagem para o bombeamento de concreto que precisa alcançar grandes distâncias.

Para Madandoust, Ranjbar e Mousavi (2011), o aumento do índice de consistência pode ser explicado pela natureza hidrofóbica do poliestireno expandido e pelo menor atrito interno resultante da substituição dos agregados miúdos e graúdos naturais por resíduos poliméricos com formato esférico e superfície relativamente lisa. Para as misturas com 10% e 15% a diminuição da consistência pode ser dada pela aplicação do aditivo superplastificante.

Kou et al. (2009) utilizaram os resíduos poliméricos de PVC em substituição ao agregado miúdo e argila expandida como agregado graúdo, em que observaram que para produção do concreto leve, altamente trabalhável (160-180 mm), foi necessário ajustar o uso do superplastificante nas misturas com 15%, 30% e 45%. Esse ajuste foi realizado porque os grânulos de PVC apresentam tamanhos maiores quando são comparados com a areia de rio.

2.3.1.2 Massa específica aparente

A ABNT NBR 9833:2009 – Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico, define a propriedade de massa específica aparente como a massa da unidade de volume do concreto fresco adensado, incluindo o volume das partículas (com vazios permeáveis e impermeáveis).

Algumas das causas mais frequentes para redução desta propriedade são a utilização de agregados de peso mais leve em comparação aos agregados naturais e o aumento da taxa de substituição desses agregados (ZÁLESKÁ et al. 2018).

Na Tabela 4 são apresentados os valores de massa específica aparente do concreto com a incorporação dos agregados leves de argila expandida e/ou poliméricos encontrados na literatura por diferentes autores, assim como, os decréscimos em relação ao concreto de referência. Observa-se nos resultados que houve uma redução tanto para as amostras com substituição da argila expandida (22% - 37%) quanto para o do agregado polimérico (23% - 44%).

Tabela 4 – Valores de massa específica aparente do concreto leve com argila expandida e/ou agregado polimérico encontrados na literatura

Autores	Agregado utilizado/Agregado substituído	Percentual de resíduo	Massa específica aparente (kg/m ³)	↑/↓ máximo (%) - (% de resíduo)
Ahmad, Chen e Shah (2019)	AE/AC	0%; 20,1%; 34,3%; 43,7% e 49,4%	1248; 1150; 998; 788	↓37(49,4%)
Angelin, 2014	AE/AC	0%; 25%; 50%; 75% e 100%	2303; 2289; 2250; 2012; 1788	↓22(100%)
Basha et al. (2020)	AP/AC	0%; 25%; 50%; 75% e 100%	2400; 2045; 1775; 1651; 1497	↓38(100%)
Záleská et al. (2018)	AP/AC	0%; 10%; 20%; 30%; 40% e 50%	1862; 1695; 1358; 1071; 1038	↓44(50%)
Colangelo et al. (2016)	AP/AC	0%; 10%; 20% e 30%	2156; 1987; 1840; 1660	↓23(30%)
Madandoust, Ranjbar e Mousavi (2011)	AP/AC	0%; 10%; 15%; 22,5% e 30%	2424; 2185; 2040; 1896; 1712	↓29(30%)
Kou et al. (2009)	AP e AE/AC	0%; 5%; 15%; 30% e 45%	1795; 1740; 1660; 1590; 1530	↓15(45%)

Fonte: A autora (2023).

↓ decréscimo dos valores em relação à amostra de referência.

↑ acréscimo dos valores em relação à amostra de referência.

AP: Agregado polimérico; AE: Argila expandida; AC: Agregado convencional.

Observou-se na pesquisa de Ahmad, Chen e Shah (2019) que houve uma redução de até 37% da massa específica aparente do concreto leve em relação ao percentual de 49,4% de argila expandida, em substituição ao agregado convencional. A diminuição nos valores das massas específicas aparente foi atribuída ao aumento da incorporação parcial da argila expandida na mistura e a estrutura porosa deste agregado.

Colangelo et al. (2016) utilizaram resíduo poliolefínico em substituição ao agregado graúdo e miúdo, foi registrado que a massa específica aparente do concreto leve diminuiu com o aumento

da incorporação desse resíduo polimérico na mistura. A maior redução foi para o concreto leve com 30% de teor do resíduo, sendo um decréscimo de 23% em comparação a amostra de referência. Essa redução é causada pelo aumento da porosidade do concreto, devido a morfologia heterogênea do polímero, como também, pela densidade mais leve do resíduo polimérico. A relação água/cimento e a quantidade de agregado plástico também tiveram influência significativa na redução da massa específica aparente do concreto leve (BASHA et al. 2020).

2.3.1.3 Massa específica real

Segundo ABNT NBR 9778:2009 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, determina a massa específica real como a razão entre a massa do material seco e seu volume ocupado, desconsiderando os vazios permeáveis.

Porosidade e vazios internos de agregado de peso baixo são fatores que contribuem para redução da massa específica real do concreto. Assim como, o aumento da taxa de substituição do agregado convencional pelos de massa específica leve (SILVA, 2020).

Na Tabela 5 são abordados os valores da propriedade da massa específica real do concreto leve de argila expandida e/ou agregados poliméricos encontrados na literatura como substitutos de agregados naturais. Observa-se que para todos os estudos houve diminuição da massa específica real com a substituição dos agregados leves de argila expandida (21% - 40%) e agregado polimérico (24% - 52%).

Tabela 5 – Valores de massa específica real do concreto leve com argila expandida e/ou agregado polimérico encontrados na literatura

(Continua)

Autores	Agregado utilizado/Agregado substituído	Percentual de resíduo	Massa específica (kg/m ³)	↑/↓ máximo (%) - (% de resíduo)
Silva (2020)	AE/AC	0%; 25%; 50%; 75% e 100%	2259; 2170; 2035; 1845; 1792	↓21(100%)

Tabela 5 – Valores de massa específica real do concreto leve com argila expandida e/ou agregado polimérico encontrados na literatura

(Conclusão)				
Autores	Agregado utilizado/Agregado substituído	Percentual de resíduo	Massa específica (kg/m ³)	↑/↓ máximo (%) - (% de resíduo)
Scobar (2016)	AE/AC	0%; 30%	2405; 1436	↓ 40 (30%)
Kangavar et al. (2022)	AP/AC	0%; 10%; 30%; 50%	2417; 2340; 2125; 1845	↓ 24(50%)
Dulsang et al. (2016)	AP/AC	0%; 3%; 5%; 7% e 10%	2400; 1580; 1390; 1280; 1145	↓ 52(10%)
Xu et al. (2012)	AP/AC	0%; 10%; 20%; e 25%	2400; 2060; 1890; 1720	↓ 28 (25%)
Kou et al. (2009)	AP e AE/AC	0%; 5%; 15%; 30% e 45%	1840; 1775; 1720; 1670; 1580	↓ 14(45%)

Fonte: A autora (2023).

↓ decréscimo dos valores em relação à amostra de referência.

↑ acréscimo dos valores em relação à amostra de referência.

AP: Agregado polimérico; AE: Argila expandida; AC: Agregado convencional.

Scobar (2016) apresenta em seu estudo o uso da argila expandida na produção do concreto leve, substituindo 30% ao agregado graúdo. Em relação ao concreto convencional, o concreto com argila expandida apresentou uma massa específica 40% menor. Por ser um agregado leve e poroso, a utilização da argila se torna uma alternativa viável para obras de construção civil, contribuindo para redução do peso próprio da obra e facilita o processo de produção, o transporte e o lançamento do concreto.

Kangavar et al. (2022) analisaram a substituição do agregado miúdo pelo resíduo de polietileno tereftalato (PET). Para os concretos com teores de 10% e 30%, os valores da massa específica real foi próximo ao valor da amostra de controle. Para o concreto com 50% de grânulos de PET, houve uma redução de 24% em relação a amostra de controle e essa diminuição foi atribuída ao peso mais leve do polímero em comparação ao agregado miúdo.

Dulsang et al. (2016) mostraram que o uso de resíduos de Etileno Acetato de vinila de (EVA) reciclados como agregado miúdo na produção do concreto leve pode reduzir a massa específica

real em até 52% em relação ao concreto convencional. A justificativa para redução da massa específica real está relacionada com o aumento do teor de resíduos de EVA e aos vazios internos do resíduo.

2.3.1.4 Índice de vazios

Segundo a ABNT NBR 9778:2009, esta propriedade é definida como a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra.

Os dados apresentados na Tabela 6 retratam que há poucos estudos abordando essa propriedade com percentuais de agregado polimérico e/ou argila expandida em substituição aos agregados naturais. Assim, foi observado que os valores de índice de vazios do concreto foram variados com substituição da argila expandida ($\uparrow 9,62\%$ - $\downarrow 5,66\%$) e do agregado polimérico ($\uparrow 14,61\%$ - $\downarrow 74,31\%$).

Tabela 6 – Valores de índice de vazios do concreto leve com argila expandida e/ou agregado polimérico encontrados na literatura

Autores	Agregado utilizado/Agregado substituído	Percentual de resíduo	Índice de vazios (%)	$\uparrow/\downarrow$ máximo (%) - (% de resíduo)
Silva (2020)	AE/AC	0%; 25%; 50%; 75% e 100%	13,25; 12,5; 13,22; 14,59; 14,66	$\downarrow 5,66$ (25%) $\uparrow 9,62$ (100%)
Rocha, Figueiredo e Altran (2016)	AP/AC	0%; 5%; 10% e 15%	10,16; 8,37; 2,61; 9,10	$\downarrow 74,31$ (10%)
Bacarini (2019)	AP/AC	0%; (60%EPS); (70%EPS); (60%EVA); (70%EVA).	15,2; 17,1; 16,9; 16,7; 17,8	$\uparrow 14,61$ (70%EVA)

Fonte: A autora (2023).

$\downarrow$ decréscimo dos valores em relação à amostra de referência.

$\uparrow$ acréscimo dos valores em relação à amostra de referência.

AP: Agregado polimérico; AE: Argila expandida; AC: Agregado convencional; EPS: Poliestireno Expandido; EVA: Etileno Acetato de Vinila.

Nos estudos de Silva (2020) e Bacarini (2019) foi constatado um crescimento no índice de vazios com taxa de substituição de 100% e 70%, respectivamente. A relação entre o volume dos poros permeáveis e o volume ocupado de uma amostra está relacionada com a absorção de

água, sendo que a água vai ocupar o espaço dos poros e vai fazer com que o índice de vazios seja aumentado (ANTUNES; GRASSI, 2016).

Bacarini (2019) utilizou dois tipos de agregados poliméricos para mistura do concreto, o Poliestireno expandido (EPS) e Etileno Acetato de Vinila (EVA) para substituir o agregado graúdo em 60% e 70%. Houve um acréscimo de 14,61% com 70% de EVA em relação à amostra de referência. O autor observou que o acréscimo no índice de vazios é dado pelo aumento do volume do agregado polimérico na amostra de concreto e este acréscimo é fundamentado pelo fato de que os vazios entre os grãos não são totalmente preenchidos pela argamassa de cimento.

2.3.1.5 Absorção de água

De acordo com a ABNT NBR 9778:2009, a absorção de água é uma propriedade que passa pelo processo em que a água é absorvida pelos poros permeáveis de um material sólido poroso.

O aumento da absorção de água do concreto leve com agregado polimérico pode ser influenciado pelo aumento do teor de substituição. Esse agregado gera vazios de ar e reduz a aderência entre a argamassa de cimento (ALI et al. 2018). Moravia et al. (2006) destacam que em comparação aos agregados convencionais, à argila expandida apresenta alta absorção de água, esse aumento da absorção de água do agregado está relacionado com a estrutura porosa dos seus grãos. Quanto maior for a porosidade desse agregado, maior será o valor de absorção.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados experimentais da absorção de água com a incorporação de agregados leves de argila expandida e/ou poliméricos por diferentes autores, assim como os acréscimos e decréscimos em relação ao concreto de controle. Observa-se que os resultados foram variados com substituição da argila expandida ($\uparrow 41,7\%$ - $\downarrow 8,2\%$) e do agregado polimérico ($\uparrow 53,3\%$ - $\downarrow 71,7\%$).

Tabela 7 – Valores da absorção de água do concreto leve com argila expandida e/ou agregado polimérico encontrados na literatura

(Continua)

Autores	Agregado utilizado/Agregado substituído	Percentual de resíduo	Absorção de água (%)	$\uparrow/\downarrow$ máximo (%) - (% de resíduo)
Silva (2020)	AE/AC	0%; 25%; 50%; 75% e 100%	5,9; 5,8; 6,5; 7,9; 8,2	$\downarrow 1,7(25\%)$ $\uparrow 28 (100\%)$

Tabela 7 – Valores da absorção de água do concreto leve com argila expandida e/ou agregado polimérico encontrados na literatura

(Conclusão)				
Autores	Agregado utilizado/Agregado substituído	Percentual de resíduo	Absorção de água (%)	↑/↓ máximo (%) - (% de resíduo)
Alves (2018)	AE/AC	0%; 25%; 50%	7,3; 6,7; 7,2	↓8,2 (25%)
Scobar (2016)	AE/AC	0%; 30%	5,6; 9,6	↑ 41,7(30%)
Colangelo et al. (2016)	AP/AC	0%; 10%; 20% e 30%	7,1; 9,0; 10,8; 15,2	↑ 53,3 (30%)
Rocha, Figueiredo e Altran (2016)	AP/AC	0%; 5%; 10% e 15%	4,6; 3,9; 1,3; 4,5	↓71,7 (10%)

Fonte: A autora (2023).

↓ decréscimo dos valores em relação à amostra de referência.

↑ acréscimo dos valores em relação à amostra de referência.

AP: Agregado polimérico; AE: Argila expandida; AC: Agregado convencional.

Silva (2020) analisou em sua pesquisa a adição da argila expandida em substituição ao agregado miúdo, à absorção de água das amostras com 25%; 50%; 75% e 100% foram analisadas. À medida que o volume de argila é aumentado, o valor da absorção de água aumenta, devido à argila expandida apresentar maior porosidade que o agregado miúdo. Mesmo utilizando agregados convencionais, a amostra de controle não ficou responsável pelo menor valor de absorção como o esperado. O traço com 25% de substituição obteve a menor taxa de decréscimo, com 1,87% em relação ao concreto de referência.

Alves (2018) relatou que para 50% de substituição de agregado graúdo por argila expandida, a absorção de água é semelhante ao valor da amostra de referência, essa proximidade pode ser atribuída ao fato de que a argila expandida apresenta uma superfície externa vitrificada, com poros concentrados no seu interior e não na sua superfície externa.

Scobar (2016) produziu concreto leve com a substituição dos agregados naturais por 30% de argila expandida e foi observado um acréscimo na absorção de água de 41,77% em relação à amostra de referência, devido à argila ser um agregado com porosidade, assim o concreto leve absorve mais água. O aumento dessa absorção de água pode comprometer a durabilidade do concreto e aumentar a corrosão da armadura de estruturas de concreto armado.

Colangelo et al. (2016) analisaram a influência de agregados de poliolefinas em substituição aos agregados naturais na produção do concreto leve e a absorção de água foi analisada a partir de amostras com 10%, 20% e 30% da substituição. A absorção de água teve um aumento de até 53,3 % em relação ao concreto de referência e esse aumento pode estar atribuído ao ar que fica aprisionado com o aumento do volume do agregado polimérico durante a mistura, como também a morfologia heterogênea do agregado polimérico.

Rocha, Figueiredo e Altran (2016) utilizaram o poliestireno expandido em proporções de 5%, 10% e 15% em substituição ao agregado gráudo natural. Para produção da mistura, além dos materiais necessários para se produzir um concreto leve, foram utilizados cola branca (PVA) para ajudar na aderência. O resultado para a amostra com 15% de agregado polimérico esteve bem próximo do valor da referência e essa proximidade é fundamentada pela aplicação da cola, que depois de seca, forma um material elástico que ocupa espaços na argamassa de cimento.

2.3.1.6 Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto é uma das propriedades que mais sofre alteração e sua definição é dada pela capacidade do material resistir a forças de compressão. Seu valor pode ser aumentado de acordo com o aumento do módulo de deformação do agregado (BAUER, 2019; PEREIRA, 2008).

A menor interação entre o agregado polimérico e a matriz de cimento, e a resistência baixa desse agregado são os principais fatores para redução da resistência à compressão. Além disso, o polímero é considerado material hidrofóbico, podendo retardar e impedir o contato entre o cimento e a água, contribuindo para diminuição da taxa de hidratação e a resistência mecânica (COLANGELO et al., 2016). Quanto maior for o volume de argila expandida na mistura de concreto leve, menor será a resistência à compressão, visto que o volume contribui para o aumento de vazios no concreto (AHMAD; CHEN; SHAH, 2019).

Na Tabela 8 são apresentados os valores de resistência à compressão, aos 28 dias de idade, encontrados na literatura. Observa-se que a incorporação dos agregados leves de argila expandida e/ou poliméricos no concreto leve apresenta decréscimo destes valores em relação à amostra de referência. Sendo uma redução de (23% - 78,8%) de substituição da argila expandida e (63,7% - 92,6%) de agregado polimérico.

Tabela 8 – Valores de resistência à compressão do concreto leve com argila expandida e/ou agregado polimérico encontrados na literatura

Autores	Agregado utilizado/Agregado substituído	Percentual de resíduo	Resistência à compressão (MPa)	↑/↓ máximo (%) - (% de resíduo)
Shafigh et al. (2018)	AE/AC	0%; 100%	70,9; 15	↓78,8 (100%)
Scobar (2016)	AE/AC	0%; 30%	18; 13,8	↓23 (30%)
Basha et al. (2020)	AP/AC	0%; 25%; 50%; 75% e 100%	46,8; 35; 26; 19; 17	↓63,7 (100%)
Záleská et al. (2018)	AP/AC	0%; 10%; 20%; 30%; 40% e 50%	50; 41; 29,7; 13; 4,7; 3,7	↓92,6(50%)
Dulsang et al. (2016)	AP/AC	0%; 3%; 5%; 7% e 10%	20; 20; 11,3; 7,2; 5,4	↓73 (10%)
Calderan (2019)	AP e AE/AC	0%; 100%AP; 100% AE	13; 2,7; 10,6	↓79,9(100%AP) ↓18,5(100%AE)
Kou et al. (2009)	AP e AE/AC	0%; 5%; 15%; 30% e 45%	40,8; 37; 33; 31,9; 21,5	↓47,30 (45%)

Fonte: A autora (2023).

↓ decréscimo dos valores em relação à amostra de referência.

↑ acréscimo dos valores em relação à amostra de referência.

AP: Agregado polimérico; AE: Argila expandida; AC: Agregado convencional.

Karthik et al. (2022) estudaram algumas proporções de mistura com argila expandida no concreto leve estrutural de alta resistência. Por ser um material leve, a argila expandida pode causar segregação no concreto, com isso foram utilizadas sílica ativa e superplastificante para evitar este problema. A resistência à compressão foi avaliada após os 28 dias de cura e os corpos de prova foram curados de duas maneiras: ao ar livre e curado em água. Os autores observaram que os corpos de prova curados ao ar livre tiveram sua resistência à compressão reduzida em cerca de 5% a 18%. A utilização da sílica ativa ajudou a preencher as lacunas e aumentar a resistência à compressão. Verificou-se que o tamanho das partículas da argila expandida pode afetar a densidade e a resistência à compressão do concreto leve.

Gomes Neto (1998) estudou microconcretos leves de alto desempenho, utilizando argila expandida e sílica ativa e constatou que a adição de sílica ativa favoreceu significativamente no

aumento da resistência à compressão para todas as idades e dosagens, atribuído, principalmente, a melhor formação da zona de transição entre agregado e a pasta de cimento.

Scobar (2016) investigou a influência da substituição do agregado graúdo convencional pela argila expandida com uma proporção de 30% e foi observado que o resultado da resistência à compressão do concreto leve com argila foi inferior em relação ao concreto convencional por causa da quantidade de poros no agregado e a menor interação entre a pasta de cimento e agregado.

Basha et al. (2020) utilizaram frações de 25%; 50%; 75% e 100% de agregado polimérico reciclado em substituição ao agregado graúdo. Para isso, um tipo de agregado foi desenvolvido em forma de grânulos com formato regular e uniforme, onde foi capaz de produzir concretos com boa compactação e estrutura menos porosa. A resistência do concreto teve um maior desempenho com 25% de substituição, mas esta resistência é cerca de 25% menor que a do concreto convencional. Logo, quanto maior for a quantidade de agregado polimérico reciclado, menor será a resistência à compressão do concreto. Esta redução pode estar relacionada com a baixa resistência do agregado polimérico em comparação ao agregado natural e, além disso, mesmo com a reduzida zona de transição entre a argamassa e o polímero, uma boa trabalhabilidade pode contribuir para uma melhor resistência.

Záleská et al. (2018) apresentaram em seu estudo o efeito da substituição parcial do agregado miúdo em 10%, 20%, 30 %, 40% e 50% por resíduos de polipropileno. Em comparação ao concreto com 0% do resíduo, a resistência à compressão do concreto leve com o agregado polimérico teve uma diminuição em consequência da baixa resistência entre a argamassa e a superfície do polímero devido à natureza hidrofóbica dos resíduos poliméricos, além de restringir a movimentação da água causando retardamento na hidratação do cimento.

Calderan (2019) analisou essa propriedade tanto para substituição da argila expandida, quanto para pérolas de poliestireno expandido (EPS), foi observado no comportamento das amostras que nenhuma atingiu resistência mínima de 20 MPa, essa redução foi atribuída pela qualidade dos materiais utilizados, falta de alinhamento do corpo de prova na prensa hidráulica, traço incorreto e falta de capeamento do corpo de prova. Os concretos leves tiveram resistência menor em relação ao concreto convencional, cerca de 18% para a amostra com argila expandida e 79% para amostra com pérolas de poliestireno expandido, sendo a possível causa dada pela menor interação entre pasta de cimento e agregado.

Kou et al. (2009) investigaram a influência de resíduos poliméricos reciclados em substituição ao agregado miúdo, sendo o agregado graúdo utilizado a argila expandida. A substituição revela alguns fatores que podem causar baixos valores na resistência à compressão do concreto, sendo: o módulo de elasticidade do agregado polimérico, que é menor do que a pasta cimentícia, o que gera rachaduras no agregado, a baixa adesão entre o agregado e a pasta de cimento, redução no empacotamento do concreto, por ser uma partícula mais densa, e esses agregados possuem baixa resistência.

2.3.1.7 Resistência à flexão

A resistência à flexão é uma propriedade definida pela capacidade de uma amostra receber um carregamento em pontos simétricos, até acontecer a ruptura. É influenciada principalmente pelo tamanho da expansão da fissura no concreto, que é ocasionada pela inserção da estrutura porosa interna nesse concreto e pelas condições de umidade do corpo de prova (NEVILLE, 2016; ZENG et al. 2023).

A redução desta propriedade na maioria dos estudos foi dada pela reduzida coesão entre os componentes do concreto e pelo aumento do volume (ALQAHTANI et al., 2017).

Os valores apresentados na Tabela 9 abordam valores da propriedade da resistência à flexão do concreto leve de argila expandida e/ou agregados poliméricos encontrados na literatura como substitutos de agregados naturais. Observa-se que os resultados foram variados, com redução de 48% com substituição do agregado natural pela argila expandida e uma variação de (↑38% - ↓85%) pelo agregado polimérico.

Tabela 9 – Valores de resistência à flexão do concreto leve com argila expandida e/ou agregado polimérico encontrados na literatura

(Continua)

Autores	Agregado utilizado/Agregado substituído	Percentual de resíduo	Resistência à flexão (MPa)	↑/↓ máximo (%) - (% de resíduo)
Shafigh, et al. (2018)	AE/AC	0% e 100%	6,31; 3,25	↓ 48(100%)
Basha, et al. (2020)	AP/AC	0%; 25%; 50%; 75% e 100%	4,0; 3,6; 3,1; 3; 2,6	↓35(100%)

Tabela 9 – Valores de resistência à flexão do concreto leve com argila expandida e/ou agregado polimérico encontrados na literatura

(Conclusão)				
Autores	Agregado utilizado/Agregado substituído	Percentual de resíduo	Resistência à flexão (MPa)	↑/↓ máximo (%) - (% de resíduo)
Hameed e Ahmed (2019)	AP/AC	0%; 1%; 3%; 5%; 7% e 10%	6,3; 7,8; 7,9; 4,8; 8,7; 6,27	↓24 (5%) ↑38 (7%)
Záleská, et al. (2018)	AP/AC	0%; 10%; 20%; 30%; 40% e 50%	8,2; 8,1; 7,2; 3,1; 1,5; 1,2	↓85(50%)
Alqahtani, et al. (2017)	AP e AE/AC	0%; 25%; 50%; 75% e 100%	4,8; 4,5; 3,8; 3,6; 3,5	↓27(100%)

Fonte: A autora (2023).

↓ decréscimo dos valores em relação à amostra de referência.

↑ acréscimo dos valores em relação à amostra de referência.

AP: Agregado polimérico; AE: Argila expandida; AC: Agregado convencional.

Basha et al. (2020) pesquisaram sobre a influência da resistência à flexão nas misturas de concreto com substituição de 25%, 50% e 100% do agregado graúdo pelo agregado de polietileno. Verificou-se que as amostras contendo 100% de resíduo apresentaram uma diminuição de 35% da resistência à flexão, em comparação à amostra de controle. A redução da resistência à flexão dos concretos leves foi justificada pela forma esférica do polímero e a baixa aderência entre a pasta de cimento e a superfície do polímero.

Hameed e Ahmed (2019) estudaram o comportamento do tereftalato de polietileno na mistura do concreto em substituição ao agregado graúdo. As amostras com 1%, 3% e 7% apresentaram aumento nos resultados da resistência à flexão, sendo aproximadamente 24%, 25% e 38%, respectivamente, e as amostras com 5% e 10% apresentaram uma diminuição de aproximadamente 24% e 0,48%, respectivamente, em relação à amostra convencional. O comportamento foi justificado pela formação de alguns vazios internos no concreto, como também, pela contribuição no crescimento de fissuras e trincas.

No estudo de Záleská et al. (2018) foram utilizados percentuais de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de agregado de polipropileno em substituição ao agregado miúdo. À medida que aumentava o percentual foi relatado uma redução na resistência à flexão de até 85% em relação ao concreto

de controle. As causas da diminuição dos valores foram relacionadas a resistência baixa do agregado polimérico, a reduzida união entre a superfície do resíduo e a pasta de cimento devido à natureza hidrofóbica do polímero, e também, o resíduo pode retardar a reação de hidratação do cimento, limitando o movimento da água.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 2 ilustra o fluxograma do esquema experimental que foi utilizado nesta pesquisa. Os ensaios e as moldagens das amostras foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Sergipe – Campus Estância, com o objetivo de analisar as propriedades do concreto leve com a incorporação de agregado graúdo de cola polimérica, em substituição parcial à argila expandida.

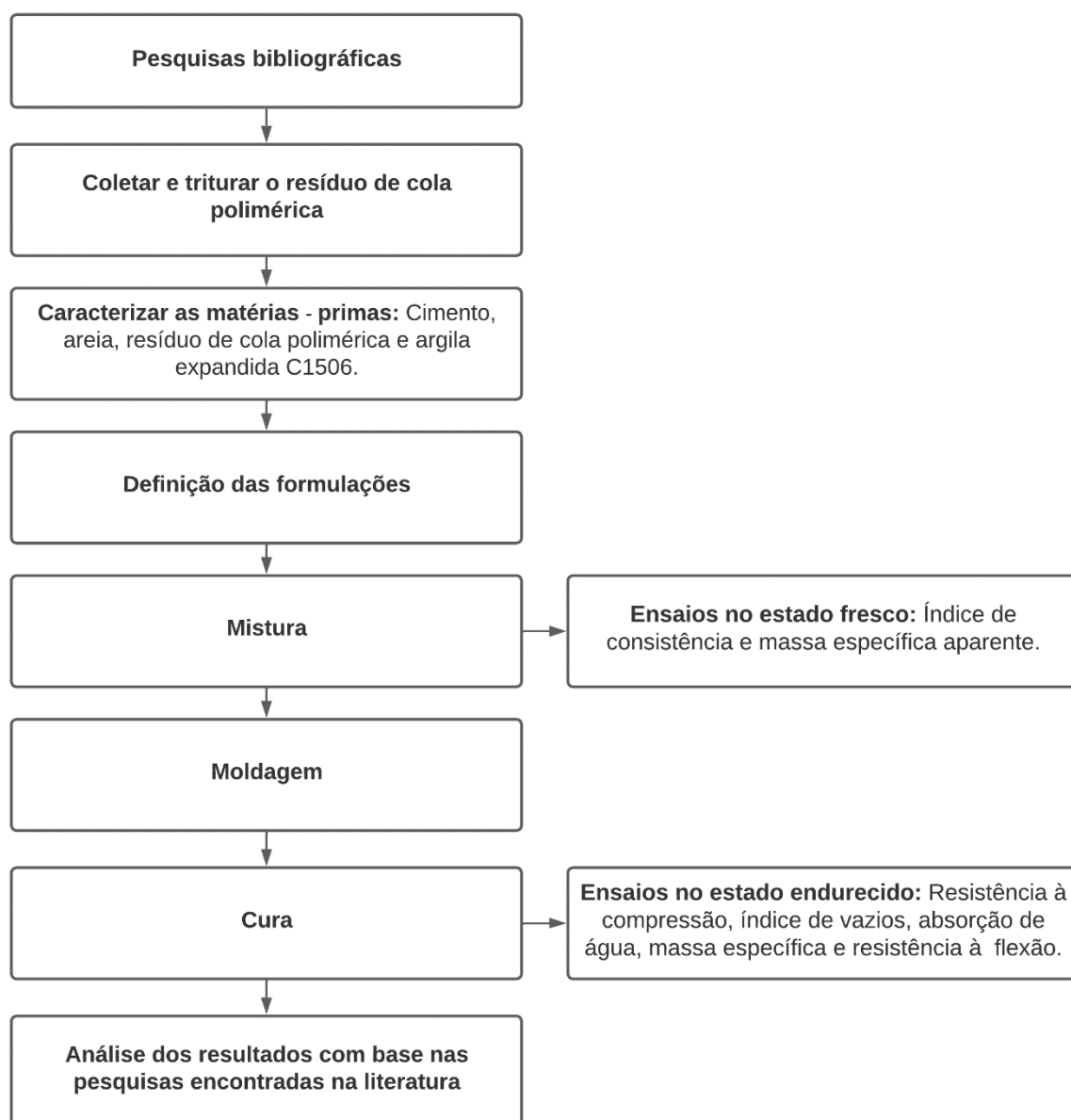


Figura 2 – Fluxograma do esquema experimental (A autora, 2023).

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para produção dos concretos leves foram caracterizados atendendo os requisitos das normas técnicas apresentadas a seguir:

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) e foi ensaiado de acordo com as prescrições da ABNT NBR 16697:2018 – Cimento Portland – Requisitos. Os ensaios para determinar as propriedades físicas e mecânicas do cimento foram realizados atendendo os requisitos das normas técnicas descritas no Quadro 1.

Características	Normas adotadas
Índice de Finura (%)	ABNT NBR 11579:2013
Consistência Normal (% de água)	ABNT NBR 16606:2018
Início de Pega (min.)	ABNT NBR 16607:2018
Massa Específica (g/cm ³)	ABNT NBR 16605:2017
Expansibilidade a quente (mm)	ABNT NBR 11582:2016
Resistência à compressão (MPa) – 7 dias	ABNT NBR 7215:2019

Quadro 1– Propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland CP V-ARI (A autora, 2023).

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo adotado foi a areia natural, proveniente de uma empresa local da cidade de Estância/SE. O material foi seco em estufa a (105±5°) C por 24h e, em seguida, foi armazenado em recipientes fechados para impedir possíveis contaminações e intempéries. A caracterização desse material foi realizada através de ensaios físicos de acordo com as condições exigidas pelas normas apresentadas no Quadro 2.

Características	Normas adotadas
Análise granulométrica	ABNT NBR 17054:2022
Absorção de água (%) Densidade (g/cm ³)	ABNT NBR 16916:2021
Massa unitária (g/cm ³) Índice de vazios (%)	ABNT NBR 16972:2021

Quadro 2 – Caracterização do agregado miúdo (A autora, 2023).

3.1.3 Argila expandida

O agregado graúdo utilizado foi a argila expandida, fabricada pela empresa Cinexpan, localizada em Várzea Paulista no estado de São Paulo, única fábrica produtora no Brasil. Foi usada a argila expandida C1506 (Ømáx. 15 mm) (Figura 3). Esse agregado leve foi caracterizado por meio dos ensaios apresentados no Quadro 3.

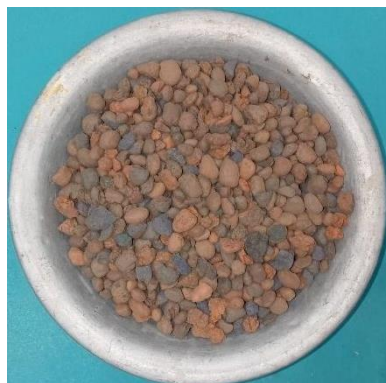


Figura 3 – Argila expandida C1506 (A autora, 2023)

Características	Normas adotadas
Análise granulométrica	ABNT NBR 17054:2022
Absorção de água (%) Densidade (g/cm ³)	ABNT NBR 16917:2021
Massa unitária (g/cm ³) Índice de vazios (%)	ABNT NBR 16972:2021

Quadro 3 – Caracterização da argila expandida (A autora, 2023).

3.1.4 Agregado de cola polimérica

Os resíduos de cola polimérica foram doados pela empresa Famossul, localizada na cidade de Estância/SE. A cola polimérica é adquirida em tonéis, na forma líquida e é utilizada no processo de colagem dos componentes de madeira. Porém, o equipamento não consegue extrair todo o conteúdo do recipiente, gerando sobras que são endurecidas. Depois da coleta, o resíduo foi transportado até a empresa Ouro Plastic, indústria responsável pela fabricação de artigos e equipamentos para embalagem, onde foi triturado para atender a granulometria de agregado graúdo (argila expandida), caracterizado de acordo com a ABNT NBR 17054:2022. Após essa etapa, o agregado de cola polimérica foi caracterizado por meio dos mesmos ensaios realizados na argila expandida, conforme Quadro 2.

O agregado de cola polimérica é um polímero do tipo poliuretano, não contém nenhuma porcentagem de solventes orgânicos e é um agregado que não se dissolve em água, conforme dados do fabricante listados na Tabela 10. O agregado, já triturado, é ilustrado na Figura 4. De acordo com a ABNT NBR 10004:2004 – Resíduos sólidos – Classificação, o agregado de cola polimérica foi classificado na Classe II B (Resíduo não perigoso – inerte).

Tabela 10 – Propriedades físicas e químicas do agregado de cola polimérica

Informações gerais	
Nome comercial	<i>Jowatherm Reaktant 605.20</i>
Tipo de polímero	Poliuretano
Cor	Amarelo
Forma	Sólido
Ponto de ebulição	Não classificado
Ponto de fusão	Não classificado
Ponto de inflamação	$\geq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$
Densidade em 20 °C	1,17 g/cm ³
Temperatura de ignição	341 °C
Percentagem de solventes orgânicos	0,0%
Solubilidade em/ miscibilidade com água	Insolúvel

Fonte: Adaptado de *Jowat SE*, 2023.

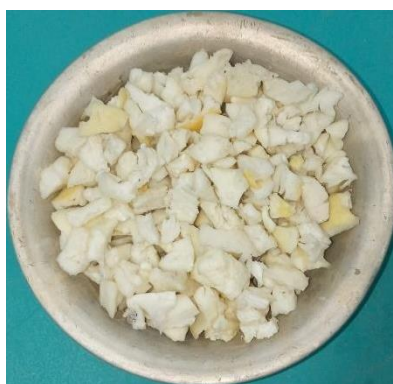


Figura 4 – Agregado de cola polimérica triturado (A autora, 2023).

3.1.5 Água

A água para produção do concreto leve foi obtida pelo sistema de abastecimento público, fornecida pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), empresa responsável pelo abastecimento de água do município de Estância/SE. De acordo com a ABNT NBR 15900-1:2009, a água do abastecimento público é considerada adequada para o uso em concreto e não necessita ser ensaiada.

3.1.6 Aditivo

Foram utilizados aditivos superplastificantes (MC- PowerFlow 1108) e plastificante multifuncional (Muraplast FK 391) a fim de alterar o índice de consistência do concreto leve no estado fresco. De acordo com as especificações da norma ABNT NBR 11768-1:2019 - Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 1: Requisitos, a quantidade utilizada não poderá ultrapassar 5% da massa de ligante total incluída no concreto.

3.2 MÉTODOS

As formulações, a moldagem dos corpos de prova e a caracterização do concreto leve com substituição parcial da argila expandida por agregado de cola polimérica foram desenvolvidas com base nas pesquisas experimentais obtidas na literatura, bem como pelas exigências especificadas pelas normas técnicas.

3.2.1 Procedimento para preparação das formulações e moldagem dos corpos de prova

Primeiramente, foi definido um traço comercial disponibilizado pela CINEXPAN de 1:2,1:0,8:0,47 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo: água) para o concreto de referência ($M_{100,0}$), a fim de obter uma resistência à compressão de 30 MPa, aos 28 dias. Para avaliação das propriedades dos concretos leves, foram dosadas quatro formulações (Tabela 11), contendo uma para o concreto leve de referência com a argila expandida, e três com 10%, 20% e 30% de incorporação de agregado de cola polimérica. Foram moldados um total de quarenta e oito corpos de prova cilíndricos, com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm, doze por formulação definida, seis para o ensaio de resistência à compressão e seis corpos de prova para os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica. Também foram moldados dezesseis corpos de prova prismáticos, quatro por formulação definida, para o ensaio de resistência à flexão.

Tabela 11 – Proporções (kg/m³) para dosagem dos concretos

Formulação	Cimento (kg)	Agregado miúdo (kg)	Argila expandida (kg)	Agregado de cola polimérica (kg)	Água (kg)	Aditivo Muraplast (kg)	Aditivo PowerFlow (kg)
$M_{100,0}$	363	762	290	-	170	2,90	1,82
$M_{90,10}$	363	762	261	25	170	2,90	1,82
$M_{80,20}$	363	762	232	50	170	2,90	1,82
$M_{70,30}$	363	762	203	75	170	2,90	1,82

$M_{x,y}$ – Mistura com x% de agregado graúdo de argila expandida e y% de agregado graúdo de cola polimérica.

Fonte: A autora (2023).

A mistura dos materiais foi preparada através da betoneira de eixo inclinado com capacidade de 200 l. Inicialmente, foi adicionado o cimento e parte da água, sendo misturados por 1 minuto, em seguida, ainda com a betoneira em funcionamento foi adicionado a areia e foram misturados por mais 1 minuto, após a mistura de 2 minutos, foi realizada uma pausa para efetuar a raspagem das partes internas da betoneira, a fim de retirar os materiais que ficaram presos, finalizada a raspagem, os aditivos são colocados com o restante da água e misturados por mais 1 minuto,

por fim, sem parar a betoneira, a argila expandida foi adicionada, misturados por mais 2 minutos, totalizando 5 minutos de tempo necessário para a mistura.

Após preparação da mistura, foi realizado o ensaio no estado fresco (consistência e massa específica aparente), depois os corpos de prova foram desmoldados, respeitando o período de 24h, identificados e colocados no processo de cura por imersão em água com adição de cal, durante 7 dias, prescrito pela ABNT NBR 5738:2016.

3.2.2 Ensaios de caracterização do concreto com argila expandida e agregado de cola polimérica

Serão apresentados a seguir os ensaios de caracterização adotados para análise das propriedades do concreto leve, no seu estado fresco e endurecido.

3.2.2.1 Ensaios do concreto leve no estado fresco

A seguir serão apresentados os ensaios adotados para caracterização do concreto leve no estado fresco, seguindo todas as diretrizes das normas.

3.2.2.1.1 Índice de consistência

O índice de consistência do concreto fresco foi determinado de acordo com os requisitos da ABNT NBR 16889:2020 – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco cone. O ensaio consiste no enchimento do molde com três camadas, cada camada é adensada com 25 golpes, em seguida o molde é retirado e o abatimento é conferido. O ensaio é apresentado na Figura 5.



Figura 5 – Medição do abatimento (A autora, 2023).

3.2.2.1.2 Ensaio de massa específica aparente

O ensaio de massa específica aparente foi determinado conforme a ABNT NBR 9833:2009. O ensaio consistiu no preenchimento de um recipiente cilíndrico em três camadas, com 25 golpes aplicados em cada camada, em seguida o concreto foi nivelado na borda e determinado sua massa, conforme Figura 6.



Figura 6 – Ensaio de massa específica aparente (A autora, 2023)

O cálculo da massa específica aparente é determinado pela Equação (1).

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V} \times 100 \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

ρ_{ap} : é a massa específica aparente do concreto, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3);

m : é a massa de concreto, expressa em quilogramas (kg);

V : é o volume do recipiente, expresso em metros cúbicos (m^3).

1.2.2.1 Ensaios do concreto leve no estado endurecido

Neste item serão apresentados os ensaios que foram realizados no concreto leve no estado endurecido, seguindo todas as diretrizes das normas.

1.2.2.1.1 Ensaio de massa específica real, absorção de água e índice de vazios

Os ensaios de massa específica real, absorção de água e índice de vazios foram determinados pela adaptação da ABNT NBR 9778:2009. O ensaio foi realizado após sete dias de cura das seis amostras por formulação, onde foram colocadas na estufa à temperatura de $(50)^\circ\text{C}$, por um período de 72h. Posteriormente, a saturação foi determinada pela imersão da amostra em água à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ durante mais 72h. Após essa etapa, as amostras foram pesadas na balança hidrostática e em seguida foram registradas as massas saturadas das amostras em balança convencional. As etapas do ensaio são apresentadas na Figura 7. O cálculo da massa

específica é determinado pela Equação (2), onde possibilitou o cálculo da absorção de água e do índice de vazios, conforme Equação (3) e (4) respectivamente.

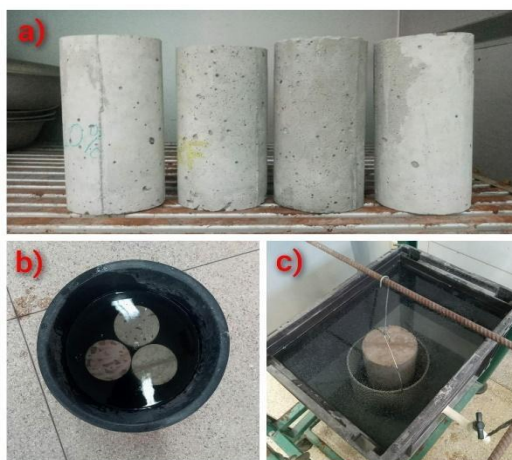


Figura 7– Etapas do ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica real, a) Amostras na estufa; b) Amostras submersas em água; c) Determinação da massa da amostra saturada imersa em água (A autora, 2023).

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad \text{Equação (2)}$$

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad \text{Equação (3)}$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

ρ_r : massa específica real (g/cm³);

m_s : massa da amostra seca em estufa (g);

m_i : massa da amostra saturada imersa em água (g);

A : absorção de água (%);

m_{sat} : massa da amostra saturada em água após imersão (g);

I_v : índices de vazios (%);

3.2.2.1.3 Ensaio de resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto leve no estado endurecido foi determinada de acordo com as recomendações da ABNT NBR 5739:2018. Foram moldados seis corpos de provas cilíndricos, cada corpo de prova recebeu duas camadas, sendo 12 golpes em cada camada, com auxílio de uma haste. As amostras foram identificadas e desmoldadas após 24h e em seguida

passaram pelo processo de cura úmida, onde ficaram imersas em água com adição de cal por 7 dias. As rupturas dos corpos de prova, após cura, foram realizadas em prensa hidráulica Pavitest HD-200T, conforme Figura 8.



Figura 8 – Ensaio de resistência à compressão do concreto leve (A autora, 2023).

3.2.2.1.4 Ensaio de resistência à flexão

O ensaio de resistência à flexão do concreto leve foi determinado pela ABNT NBR 12142:2010 – Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. O ensaio foi realizado adotando quatro amostras para cada formulação, na idade de 7 dias. Com isso, foi utilizada uma prensa hidráulica Pavitest HD-200T. Na Figura 9, foram traçadas linhas de referências na amostra, sendo na face de rasamento e na face oposta com o intuito de facilitar sua centralização no dispositivo de carregamento.



Figura 9 – Ensaio de resistência à flexão, a) Amostra na prensa hidráulica; b) amostras após rompimento (A autora, 2023).

3.2.2.2 *Tratamento e análise de dados*

Os resultados obtidos a partir dos ensaios das propriedades do concreto leve foram apresentados a partir da média aritmética de cada formulação, seguida de desvio padrão. A fim de investigar os resultados obtidos nos ensaios, foi verificada a normalidade dos dados e, deste modo, foi feita a verificação estatística mediante a metodologia de análise de variância (ANOVA), adotando-se uma probabilidade de significância (valor-p) menor que ou igual a 0,05 ($p \leq 0,05$), seguida do Teste de Tukey.

3.2.2.3 *Fator de eficiência*

O concreto leve foi analisado por alguns parâmetros, sendo um deles o fator de eficiência determinado pela relação entre a resistência à compressão (MPa) e a massa específica (kg/m^3) do concreto produzido. A partir dos resultados obtidos de resistência à compressão e massa específica, foi calculado o fator de eficiência para cada formulação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados neste capítulo os resultados, tanto dos materiais utilizados nesta pesquisa quanto dos concretos leves produzidos com estes.

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Nos tópicos a seguir serão apresentados os resultados obtidos dos ensaios de caracterização dos materiais componentes empregados nesse estudo para a produção dos concretos leves.

4.1.1 Cimento Portland

Na Tabela 12 estão os resultados obtidos através dos ensaios de caracterização do cimento Portland CP V-ARI. Os valores dos ensaios de caracterização do cimento estão de acordo com os parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 16697:2018 - Cimento Portland – Requisitos.

Tabela 12– Propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland CP V-ARI

Características	Resultados	Requisitos
Índice de Finura (%)	0	$\leq 6,0$
Consistência Normal (% de água)	30,3	-
Início de Pega (min.)	160	≥ 60
Massa Específica (g/cm ³)	3,08	-
Expansibilidade a quente (mm)	4,0	$\leq 5,0$
Resistência à compressão (MPa) – 7 dias	37,4	≥ 34

Fonte: A autora (2023).

4.1.2 Agregado miúdo

Na Tabela 13 estão os resultados obtidos através dos ensaios de caracterização do agregado miúdo.

Tabela 13 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo

Características	Unidade	Resultado
Composição granulométrica		
Módulo de finura	-	1,81
Diâmetro máximo	mm	1,18
Massa específica	kg/m ³	2670
Absorção de água	%	0,5
Massa unitária	----	----
Estado Solto	kg/m ³	1560
Estado Compactado	kg/m ³	1660
Índice de vazios	----	----
Estado Solto	%	36
Estado Compactado	%	31

Fonte: A autora (2023).

Na Figura 10 está apresentada a curva granulométrica do agregado miúdo. A granulometria dos grãos é de grande importância quanto à coesão das partículas com a pasta e o desempenho dos concretos leves. O comportamento da curva indica que o agregado tem uma distribuição granulométrica bem graduada, pois atende os limites especificados na Tabela 2 da ABNT NBR 7211:2022 e plotados na Figura 10. O módulo de finura do agregado miúdo se encontra na zona utilizável inferior, que varia de 1,55 a 2,20.

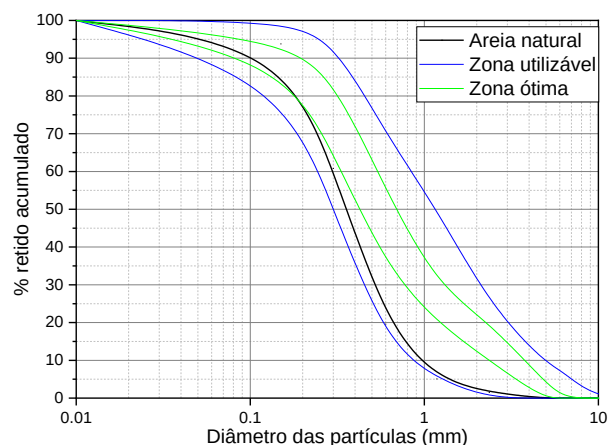


Figura 10 – Curva granulométrica do agregado miúdo (A autora, 2023)

4.1.3 Argila expandida

Os resultados obtidos através dos ensaios de caracterização da argila expandida (C1506) estão apresentados na Tabela 14. A massa específica encontrada da C1506 foi de 683 kg/m³ e, portanto, de acordo com a ABNT NBR 12655:2022 é classificado como agregado leve (≤ 2000 kg/m³).

Tabela 14 – Resultados dos ensaios de caracterização da argila expandida

Características	Unidade	Resultado
Composição granulométrica		
Módulo de finura	-	6,42
Diâmetro máximo	mm	19
Absorção de água	%	11,8
Massa específica	kg/m ³	680
Massa unitária	----	----
Estado Solto	kg/m ³	505
Estado Compactado	kg/m ³	531
Índice de vazios	----	----
Estado Solto	%	26
Estado Compactado	%	22

Fonte: A autora (2023).

A curva granulométrica da argila expandida é apresentada na Figura 11. A granulometria da argila C1506 se enquadra com os parâmetros da ABNT NBR NM 35:2008 para agregados leves, pois de acordo com a sua composição granulométrica, a C1506 se enquadra na faixa 7, cuja massa específica aparente máxima deve ser de 880 kg/m³. Assim, uma granulometria realizada corretamente contribui para um melhor adensamento do concreto, permitindo uma maior coesão entre as partículas.

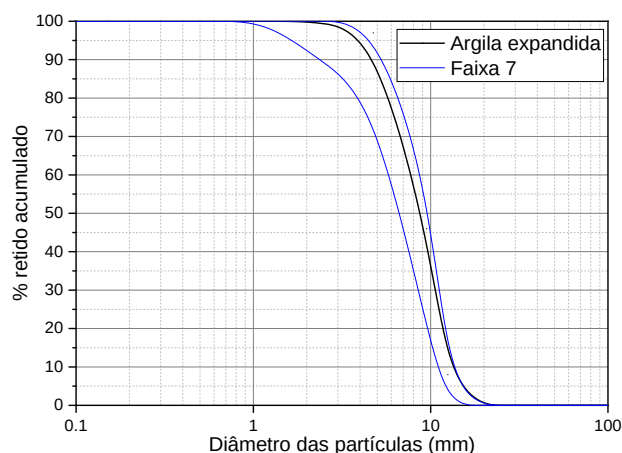


Figura 11 – Curva granulométrica da argila expandida (A autora, 2023)

4.1.4 Agregado de cola polimérica

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de caracterização do agregado de cola polimérica são apresentados na Tabela 15. A massa específica encontrada do agregado de cola polimérica foi de 1080 kg/m^3 e, portanto, de acordo com a ABNT NBR 12655:2022 é classificado como agregado leve ($\leq 2000 \text{ kg/m}^3$).

Tabela 15 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado de cola polimérica

Características	Unidade	Resultado
Composição granulométrica		
Módulo de finura	-	7
Diâmetro máximo	mm	19
Absorção de água	%	0
Massa específica	kg/m^3	1080
Massa unitária	----	----
Estado Solto	kg/m^3	432
Estado Compactado	kg/m^3	471
Índice de vazios	----	----
Estado Solto	%	60
Estado Compactado	%	56

Fonte: A autora (2023).

Em comparação com a argila expandida, o agregado de cola polimérica apresenta uma redução da massa unitária de 14%, um aumento de até 56% no índice de vazios, que pode ser atribuído ao formato lamelar e anguloso do agregado polimérico em comparação ao formato esférico e arredondado da argila expandida. Registrou-se um acréscimo de 8% no módulo de finura, pois só foram utilizados agregados poliméricos passantes na peneira de 19 mm e retidos na peneira de 12,5 mm (Figura 12). Em razão da natureza hidrofóbica do agregado de cola polimérica, a

sua absorção de água é equivalente a 0%, diferente da argila expandida, que apresentou um valor de 11,75% de absorção de água.

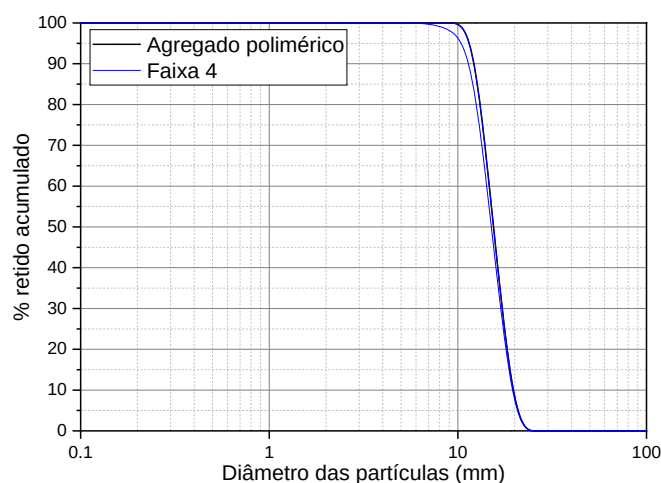


Figura 12 – Curva granulométrica do agregado de cola polimérica (A autora, 2023)

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS LEVES

Serão apresentados a seguir os ensaios de caracterização adotados para análise das propriedades do concreto leve, no seu estado fresco e endurecido. Foi realizada a análise de variância, seguida do teste de Tukey nas propriedades destacadas na Tabela 16, onde constata-se que existe uma diferença significativa entre as médias das formulações ensaiadas para a resistência à compressão e flexão, assim como, para o fator de eficiência. As demais propriedades apresentaram valor de p maior que 0,05 e $F < f_{crítico}$, portanto, não apresentaram diferença significativa. Para as propriedades determinadas no estado fresco, consistência e massa específica aparente, não foi aplicada a análise do teste de variância, considerando que foi realizada em uma única determinação. Nos tópicos seguintes estão elencadas as observações.

Tabela 16 – Resultados da ANOVA.

Propriedade	F	f _{crítico}	Valor - p
Massa específica real	0,57	3,71	0,6488
Absorção de água	2,15	4,10	0,1725
Índice de vazios	2,10	4,10	0,1803
Resistência à compressão	145,89	3,29	$2,55 \times 10^{-11}$
Resistência à flexão	4,24	3,86	0,03984
Fator de eficiência	148,4	3,24	$6,91 \times 10^{-12}$

Fonte: A autora (2023).

4.2.1 Ensaios para caracterização dos concretos leves no estado fresco

A seguir serão apresentados os ensaios adotados para caracterização dos concretos leves no estado fresco, seguindo todas as diretrizes das normas.

4.2.1.1 Índice de consistência

Na Figura 13 são apresentados os resultados do índice de consistência obtidos através dos ensaios realizados com as amostras de concreto leve.

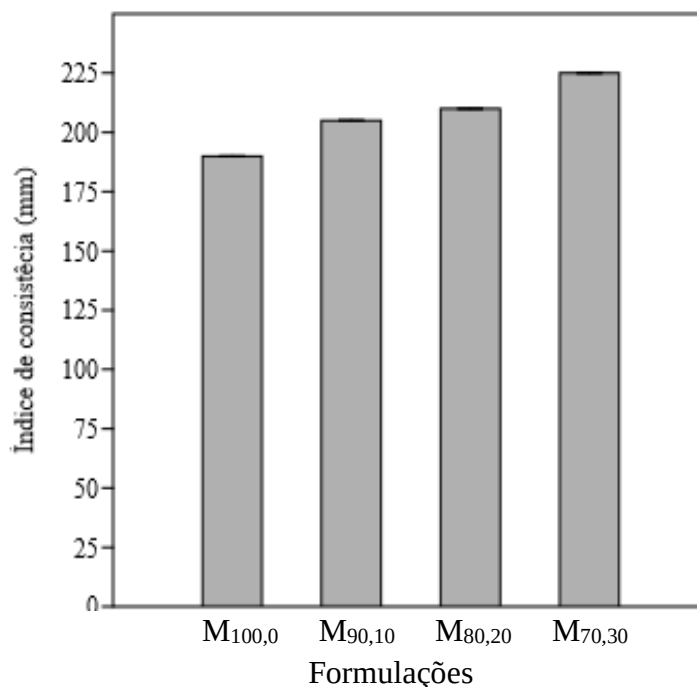


Figura 13 – Resultados dos índices de consistência dos concretos leves (A autora, 2023).

Na presente pesquisa houve um aumento de 7,9%, 10,5% e 18,4% para M_{90,10}, M_{80,20} e M_{70,30} em relação a M_{100,0}. Nota-se um acréscimo desta propriedade à medida que o teor de agregado de cola polimérica é aumentado. Nos estudos realizados (Tabela 3), foi observado que os valores de índice de consistência encontrados foram variados, sendo acréscimos e decréscimos.

Foi possível observar que a substituição parcial da argila expandida pelo agregado de cola polimérica nas formulações do concreto leve influenciou diretamente no aumento do índice de consistência. Para Madandoust, Ranjbar e Mousavi (2011) o aumento desta propriedade está relacionada com a natureza hidrofóbica do polímero e pelo menor atrito interno. Os valores altos do índice de consistência podem ser vistos como uma vantagem para o bombeamento de concreto que precisa alcançar grandes distâncias (ALQAHTANI, 2022).

4.2.1.2 Massa específica aparente

Na Figura 14 é apresentado os resultados de massa específica aparente dos concretos leves.

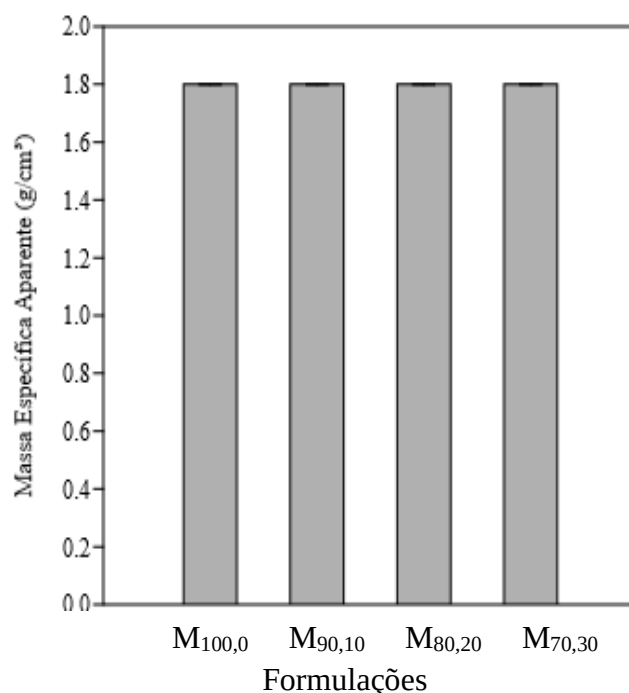


Figura 14 – Resultados de massa específica aparente dos concretos leves (A autora, 2023).

Diante dos resultados apresentados na Figura 14, percebe-se que a massa específica aparente para todas as formulações não sofreu influência do agregado polimérico. A massa específica aparente encontrada para todas as formulações foi de aproximadamente 1800 kg/m³. O que pode ser atribuído ao percentual utilizado, de até 30%, em valores de massa unitária (Tabela 13 e Tabela 15) dos agregados não tão discrepantes. A literatura registra (Tabela 4) que ambos os agregados de argila expandida e agregados poliméricos contribuem para redução da massa específica aparente dos concretos.

4.2.1.3 *Massa específica real*

Na Figura 15 estão os resultados médios de massa específica real dos concretos leves produzidos.

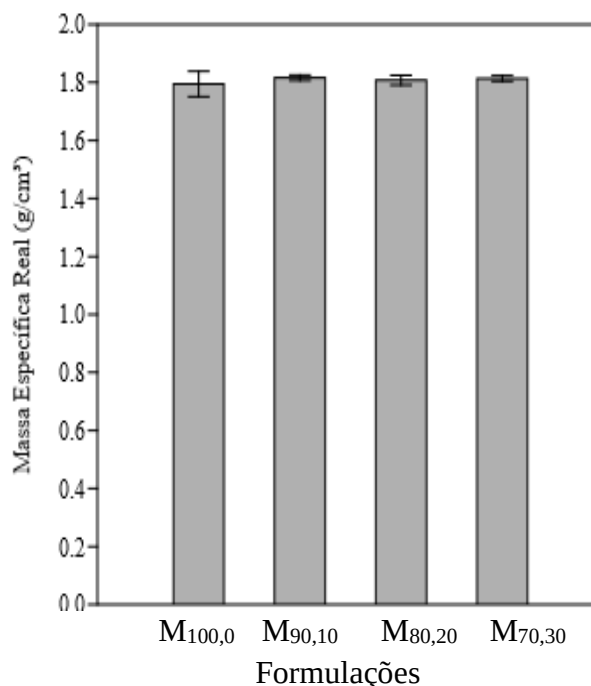


Figura 15 – Resultados de massa específica real dos concretos leves (A autora, 2023).

Foi observado que não houve diferença significativa entre as médias. Os valores de massa específica real dos concretos com a incorporação do agregado de cola polimérica foram próximos ao valor do concreto de referência. Todas as formulações obtiveram massa específica real inferior a 2000 kg/m^3 , e de acordo com a ABNT NBR 8953:2015, os concretos produzidos são considerados leves. Uma das justificativas para o concreto ter massa específica real inferior a 2000 kg/m^3 está relacionada a baixa densidade dos agregados em relação a agregados convencionais (DULSANG et al., 2016).

Assim, foi possível produzir concreto leve com até 30% de agregado de cola polimérica em substituição à argila expandida.

4.2.1.4 Índice de vazios

Na Figura 16 estão os resultados médios de índice de vazios dos concretos leves.

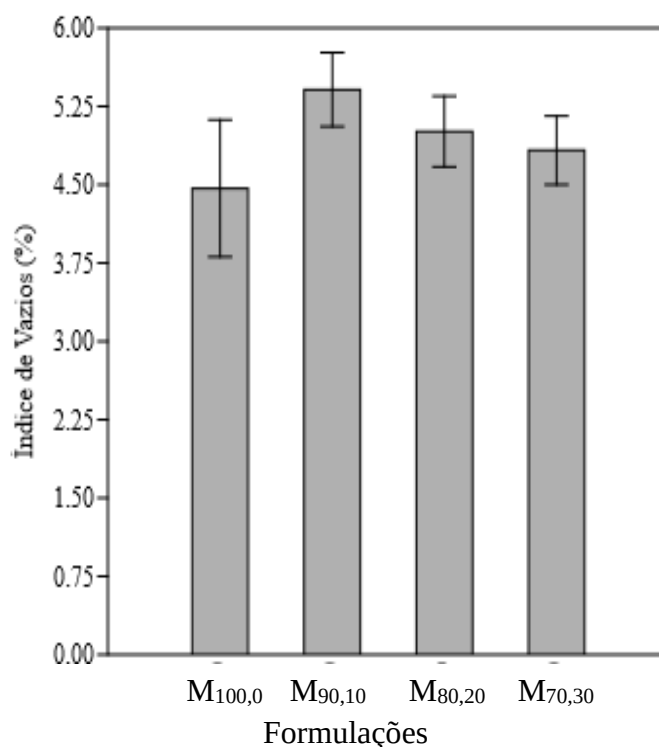


Figura 16 – Resultados de índice de vazios dos concretos leves (A autora, 2023).

De acordo com a análise de variância, as amostras não apresentaram variações significativas entre as formulações. Nos estudos realizados (Tabela 6), foi observado que o índice de vazios é aumentado à medida que o percentual de substituição de argila expandida ou agregado polimérico na formulação aumentava. Bacarini (2019) atribuiu em sua pesquisa que o aumento no índice de vazios de amostras com agregado polimérico está relacionado com os vazios entre os grãos que não são totalmente preenchidos pela argamassa de cimento.

Portanto, foi possível produzir concreto leve, com até 30% de agregado de cola polimérica em substituição à argila expandida, sem comprometimento do índice de vazios.

4.2.1.5 Absorção de água

Na Figura 17 são apresentados os resultados de absorção de água obtidos nos ensaios realizados com as amostras de concreto leve.

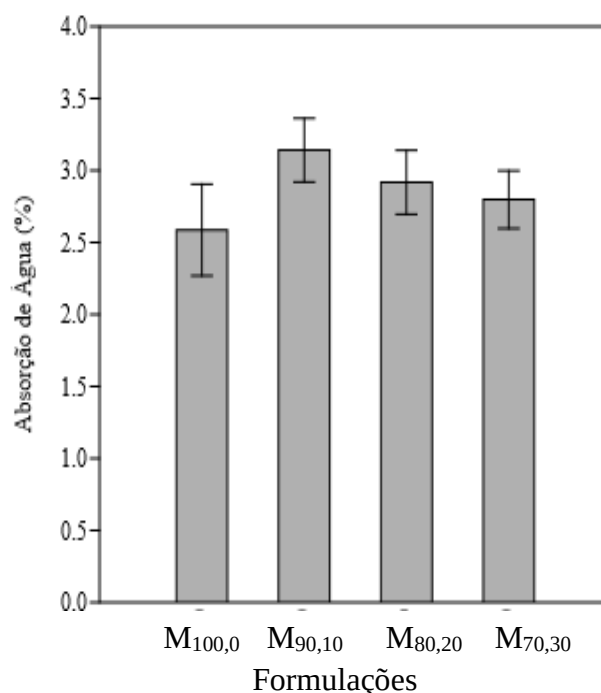


Figura 17 – Resultados de absorção de água dos concretos leves (A autora, 2023).

Os resultados obtidos através do ANOVA mostraram que os resultados da absorção de água não apresentaram diferença significativa entre as formulações. Embora a absorção de água da argila expandida (11,8%) seja maior que a do agregado polimérico (0%), o índice de vazios da argila expandida (22%) é menor que o do agregado polimérico (56%), ou seja, uma propriedade pode ter compensada a outra.

Colangelo et al. (2016) estudaram a propriedade de absorção de água do concreto leve feito com agregado polimérico, os resultados indicaram que houve um aumento significativo da absorção de água, chegando a 53,3% em relação a amostra de referência para substituição de 30% pelo agregado polimérico. O autor relatou que a justificativa para esse aumento seria pela quantidade de ar que fica aprisionado com o aumento do volume do agregado polimérico durante a mistura, assim como, a morfologia heterogênea desse agregado.

Assim, também foi possível produzir concreto leve, com até 30% de agregado de cola polimérica em substituição à argila expandida, sem comprometimento da absorção de água.

4.2.1.6 Resistência à compressão

São apresentados na Figura 18 os resultados da resistência à compressão para todas as formulações.

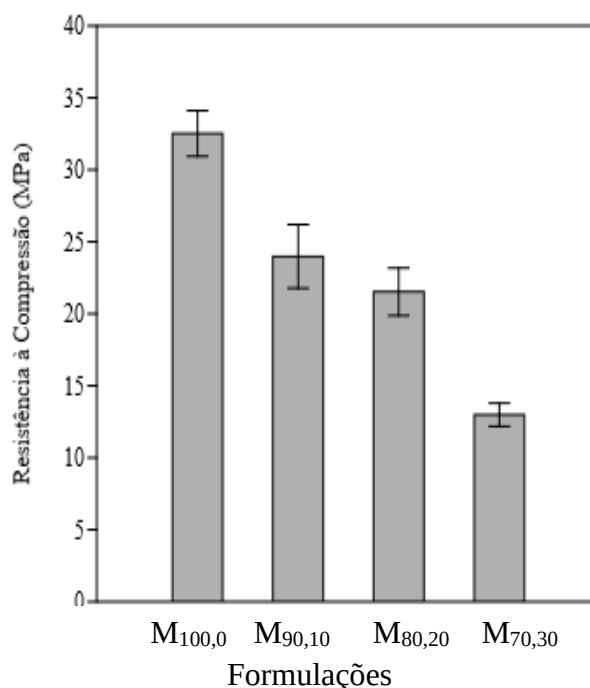


Figura 18 – Resultados de resistência à compressão dos concretos leves (A autora, 2023).

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 16, houve diferenças significativas entre as médias da resistência à compressão das amostras com agregado de cola polimérica em comparação a referência. As amostras M_{90,10}, M_{80,20} e M_{70,30} apresentaram um decréscimo significativo da resistência à compressão de 26,2%, 34,8% e 60%, respectivamente, quando comparadas a referência.

À medida que se aumenta a incorporação do agregado de cola polimérica na mistura, os valores da resistência à compressão são reduzidos. A amostra M_{70,30} apresentou uma diminuição significativa de 45,8% em relação a M_{90,10} e a amostra M_{70,30} mostrou um decréscimo de 38,7% quando comparada a M_{80,20}. A redução da resistência à compressão de amostras contendo agregado polimérico é fundamentada pela maior quantidade deste agregado, como também, pelo enfraquecimento da zona de transição entre a argamassa e o polímero, promovida pela baixa aderência do agregado (BASHA et al. 2020).

Com a redução da resistência à compressão das amostras contendo agregado de cola polimérica, podendo chegar a 60% em relação a amostra de referência, evidenciando o M_{70,30}, responsável pelo maior índice desse decréscimo, essa é a única formulação que não pode ser classificada como concreto estrutural, uma vez que, segundo a NBR 8953:2015, a resistência à compressão deve ser acima de 20 MPa para o concreto leve ser aplicado para fins estruturais. Assim, para a

formulação M_{70,30} determina-se a necessidade de um estudo de dosagem, caso pretenda-se o aumento da resistência à compressão do concreto leve.

Logo, foi possível produzir concreto leve estrutural, com até 20% de agregado de cola polimérica em substituição à argila expandida.

4.2.1.6.1 Fator de Eficiência

Na Tabela 17 estão apresentados os valores médios do Fator de Eficiência dos concretos leves.

Tabela 17 – Fator de Eficiência dos concretos leves

Formulações	Fator de Eficiência (MPa.dm ³ /kg)
M _{100,0}	18,1±0,9
M _{90,10}	13,3±1,2
M _{80,20}	11,8±0,9
M _{70,30}	7,2±0,4

Fonte: A autora (2023)

De acordo com a Tabela 17, pode-se observar que os fatores de eficiência encontrados para os concretos com o agregado de cola polimérica foram inferiores ao do concreto de referência, considerando a redução da resistência à compressão e os valores semelhantes da massa específica aparente dos concretos analisados. Vale destacar que o acréscimo para 20% de substituição da argila expandida pelo agregado polimérico (M_{80,20}) não resultou em diferença significativa em relação a M_{90,10}. Mas, para M_{70,30} a redução foi significativa em relação a M_{80,20} e M_{90,10}.

Rodrigues (2018) apresentou em seu estudo fatores de eficiência de traços utilizados em obras, diante desses dados, o autor classificou alguns concretos (Tabela 18). A partir dessa análise, foi possível concluir que, o fator de eficiência para as formulações M_{100,0}, M_{90,10} E M_{80,20} deste estudo, estão na faixa de concreto leve estrutural ($10 \leq FE < 25$), apenas o M_{70,30} que foi considerado somente como concreto leve ($FE < 10$).

Tabela 18 – Classificação de concretos quanto ao Fator de Eficiência

Concreto	Fator de Eficiência (MPa.dm ³ /kg)
CL	$FE < 10$
CLE	$10 \leq FE < 25$
CLAD	$FE \geq 25$

Fonte: Rodrigues (2018)

*CL- Concreto leve; CLE- Concreto leve estrutural;
CLAD- Concreto leve de alto desempenho.

Na Tabela 19 estão apresentados os valores calculados dos fatores de eficiência, considerando os valores mínimos da resistência à compressão aos 28 dias e os valores máximos da massa específica aparente (kg/m^3) para o concreto leve estrutural, determinados pela ABNT NBR NM 35:2008. Assim, observa-se que os valores encontrados neste estudo estão próximos com os valores da norma, com exceção da formulação $M_{70,30}$.

Tabela 19 – Fator de Eficiência

Valores mínimos da resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Valores máximos da massa específica aparente (kg/m^3)	Fator de Eficiência ($\text{MPa}\cdot\text{dm}^3/\text{kg}$)
28	1840	15,22
21	1760	11,93
17	1680	10,12

Fonte: NM 35 (2008), com adaptação da autora

4.2.1.7 Resistência à flexão

Na Figura 19 estão os resultados da resistência à flexão obtidos nos ensaios realizados com os concretos leves.

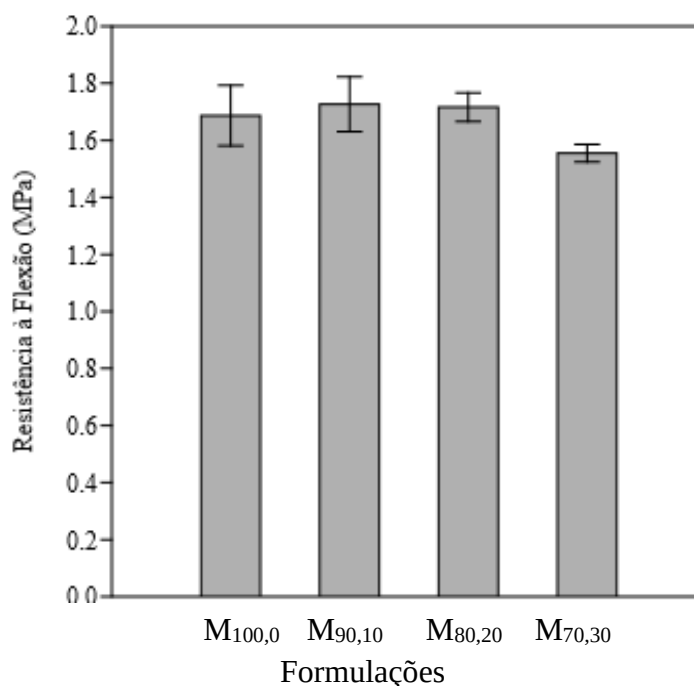


Figura 19 – Resultados de resistência à flexão dos concretos leves (A autora, 2023).

Para cada formulação os resultados foram comparados por meio da análise de variância. Foi observado na Tabela 16 que houve variação significativa entre as formulações. De acordo com o Teste de Tukey, apenas a amostra $M_{70,30}$ apresentou uma variação significativa em relação ao concreto de referência, sendo um decréscimo de 7,9% entre as médias. Záleská et al. (2018)

explica que esse comportamento pode ser atribuído pela baixa resistência do agregado polimérico, pela baixa aderência entre a superfície do resíduo e a pasta de cimento devido à natureza hidrofóbica do polímero, e também, o resíduo pode retardar a reação de hidratação do cimento, limitando o movimento da água.

Para Hameed e Ahmed (2019) a formação de vazios internos no concreto, bem como o crescimento de fissuras e trincas influenciam na resistência à flexão.

Consta-se que foi possível produzir concreto leve estrutural, com até 20% de agregado de cola polimérica em substituição à argila expandida, sem comprometimento da resistência à flexão e, até 30% de agregado de cola polimérica, com uma redução de apenas 8% dessa resistência, em relação ao concreto de referência.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo serão abordadas as principais conclusões obtidas nesta pesquisa, após a análise dos resultados de diferentes ensaios para caracterização dos concretos leves no estado fresco e endurecido, tal como, as sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

O objetivo geral da pesquisa foi analisar as propriedades do concreto leve com a incorporação de agregado graúdo de cola polimérica, em substituição parcial a argila expandida.

As caracterizações dos materiais utilizados para a produção das amostras de concreto leve foram obtidas através de ensaios experimentais realizados em laboratório e estabelecidos em normas técnicas para a determinação das propriedades físicas e mecânicas.

Os resultados obtidos e apresentados no capítulo 4 viabilizam uma sequência de considerações, de início, para as propriedades do concreto leve em seu estado fresco, é possível concluir que:

À medida que se aumentou a incorporação dos resíduos de cola polimérica em substituição à argila expandida na mistura, provocou um aumento do índice de consistência dos concretos leves em comparação à amostra de controle, resultando assim, na melhoria da trabalhabilidade.

Com base nos resultados da massa específica aparente, constatou-se que a presença do resíduo de cola polimérica na mistura de concreto leve manteve essa propriedade semelhante para todas as formulações.

No que diz respeito ao comportamento dos concretos leves em seu estado endurecido, analisou-se que a massa específica real dos concretos contendo agregado de cola polimérica apresentou valores bem próximos ao concreto somente com argila expandida. Portanto, todos os concretos são considerados leves por apresentarem massa específica inferior a 2000 kg/m^3 .

Ao analisar os resultados da absorção de água e índice de vazios do concreto, conclui-se que a substituição da argila expandida pelo polímero não apresentou influência significativa nestas propriedades.

Em relação aos resultados de resistência à compressão notou-se uma redução dessa propriedade proporcional ao aumento de teor de resíduo polimérico na mistura. Foi verificado que os

concretos leves com até 20% de substituição podem ser utilizados para fins estruturais e o concreto com 30% de incorporação para fins não estruturais.

Com base nos resultados do Fator de Eficiência, até 20% de substituição da argila expandida pelo agregado polimérico, os concretos podem ser classificados como leve estrutural.

Para os resultados de resistência à flexão, até 20% de substituição do agregado de cola polimérica pela argila, os concretos apresentaram valores bem próximos à amostra de controle. Com uma redução de apenas 8% para a formulação com 30% de agregado de cola polimérica.

Baseado nas análises obtidas através da realização dos ensaios de caracterização dos concretos leves, demonstra-se que a amostra $M_{80,20}$ apresentou os melhores resultados, considerando o critério de maior aproveitamento de resíduos e com desempenho semelhante à formulação $M_{90,10}$.

Por fim, destaca-se a possibilidade da utilização deste tipo de resíduo em substituição parcial a argila expandida na produção de concreto leve, com fins estruturais e não estruturais. Demonstrou-se, nesta pesquisa, uma alternativa técnica e sustentável, tendo em vista que a produção dos concretos leves apresenta propriedades que permitem seu uso, a fim de reduzir o peso específico de estrutura, deixando-as mais leves, podendo proporcionar o dimensionamento de fundações menos robustas.

Além de contribuir com a destinação do resíduo polimérico, o que minimiza a extração de recursos naturais, demonstrando um interesse na conservação ambiental e no desenvolvimento econômico da região.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A realização deste estudo motivou a percepção de lacunas de inviável cumprimento pleno em consequência do tempo disponível para a realização das pesquisas e de ensaios que viabilizassem maior aprofundamento de resultados. Desta forma, sugere-se para trabalhos futuros:

- Moldar mais formulações com combinações das diferentes granulometrias das argilas expandidas;
- Realizar o estudo detalhado de dosagem das formulações adotadas do concreto leve com agregado de cola polimérica, a fim de melhorar suas propriedades no estado fresco e endurecido, inclusive, com a utilização da sílica ativa;

- Ampliar a investigação para verificar a influência da utilização dos resíduos adotados nesta pesquisa, na resistência à tração, durabilidade e da microestrutura dos concretos leves produzidos.
- Realizar ensaios que auxiliam nas justificativas dos resultados obtidos, a exemplo da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

REFERÊNCIAS

- AHMAD, Muhammad R.; CHEN, Bing; SHAH, Syed A. S. Investigate the influence of expanded clay aggregate and silica fume on the properties of lightweight concrete. **Construction and Building Materials**. v. 220, 2019, p. 253-266.
- ALI, Mr. et al. Thermal-resistant lightweight concrete with polyethylene beads as coarse aggregates. **Construction and Building Materials**. v.164, 2018, p. 739-749.
- ALQAHTANI, Fahad K. et al. Novel lightweight concrete containing manufactured plastic aggregate. **Construction and Building Materials**. v. 148, 2017, p. 386-397.
- ALQAHTANI, Fahad K. Technical Assessment of Green lightweight concrete containing manufactured plastic aggregates. **Journal of Building Engineering**. v. 50, 2022, 104169.
- ANGELIN, Andressa Fernanda. Concreto leve estrutural – **Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais**. 2014. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas. Limeira, 2014.
- ANTUNES, Elaine Guglielmi Pavei; GRASSI, Rosielen Leopoldo. **Concreto leve: estudo de dosagens com argila expandida e poliestireno expandido moído**. 2016. Artigo submetido ao Curso de Engenharia Civil da UNESC como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Civil, UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 35**: Agregados leves para concreto estrutural – Especificação. Rio de Janeiro, 2008.
- _____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de provas cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.
- _____. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.
- _____. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR 9935**: Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.
- _____. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (n 200). Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 11582:** Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de *Le Chatelier*. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 11768-1:** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 12142:** Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 12821:** Preparação de concreto em laboratório – Procedimento. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 15900-1:** Água para amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16606:** Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16607:** Cimento Portland – Determinação da pasta dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16697:** Cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16889:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco cone. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **NBR 16916:** Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16917:** Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16972:** Agregados – Determinação da massa unitária e dos índices de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 17054:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2022.

BACARINI, Aline. **Aproveitamento de resíduos de EPS e EVA como agregados em concreto leve**. 2019. 42 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2019.

BASHA, Shaik I. et al. Mechanical and thermal properties of lightweight recycled plastic aggregate concrete. **Journal of Building Engineering**. v. 32, 2020, 101710 p.

BAUER, Luiz A. F. **Materiais de Construção**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019. v.1. 568 p.

BEJAN, Gabriel et al. Lightweight Concrete with Waste – Review. **Procedia Manufacturing**. v. 46, 2020, p. 136-143.

BELMOKADDEM, Mohammed et al. Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate. **Construction and Building Materials**. v. 257, 2020, 119559

BORJA, Edilberto Vitorino. **Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis**. 2011. 231 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

CALDERAN, Thaís Cravo. **Análise das propriedades mecânicas do concreto leve com a inserção de argila expandida e pérolas de EPS**. EPS. 2019. 36 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro universitário Antônio Eufrásio de Toledo de Presidente Prudente, Presidente Prudente/SP, 2019.

CASTILLO, Enriquedel R. et al. Light-weight concrete with artificial aggregate manufactured from plastic waste. **Construction and Building Materials**. v. 265, 2020, 120199.

CHINNU, S.N. et al. Recycling of industrial and agricultural wastes as alternative coarse aggregates: A step towards cleaner production of concrete. **Construction and Building Materials**. v. 287, 2021, 123056.

CHUNG, Sang Y. et al. Effect of different expanded aggregates on durability-related characteristics of lightweight aggregate concrete. **Materials Characterization**. v.173, 2021, 110907.

CINEXPAN. **Argila expandida**. Disponível em: <<https://www.cinexpan.com.br/>>. Acesso em: set. 2022.

COLANGELO, Francesco et al. Recycled polyolefins waste as aggregates for lightweight concrete. **Composites Part B**, v.106, 2016, p. 234-241.

DULSANG, Nattakan et al. Characterization of an environment friendly lightweight concrete containing ethyl vinyl acetate waste. **Materials and Design**. v. 96, 2016, p. 350-356.

ELANGO, K. S. et al. Properties of light weight concrete – A state of the art review. **Materials today: proceedings**. v. 46, 2021, p. 4059-4062.

FARAJ, Rabar H. et al. Use of recycled plastic in self-compacting concrete: A comprehensive review on fresh and mechanical properties. **Journal of Building Engineering**. v. 30, 2020, 101283.

FARAJ, Rabar H.; SHERWANI, Aryan F. H; DARAEI, Ako. Mechanical, fracture and durability properties of self-compacting high strength concrete containing recycled polypropylene plastic particles. **Journal of Building Engineering**. v. 25, 2019, p. 2-26.

GHASEMI, Ali H.; NEMATZADEH, Mahdi; FALLAHNEJAD, Hossein. Post-fire residual fracture characteristics and brittleness of self-compacting concrete containing waste PET flakes: Experimental and theoretical investigation. **Engineering Fracture Mechanics**. v. 261, 2022, 108263.

GOMES NETO, David de Paiva. **Dosagem de Microconcretos Leves de Alto Desempenho Para Produção de Pré-Fabricados de Pequena Espessura – estudo de caso**. 1998. 157 f. Dissertação de mestrado (Mestrado em Tecnologia do Ambiente Construído) - Universidade de São Paulo, São Carlos-SP. 1998.

GOPU, Ganesh N. et al. A review on mechanical properties of self-compacting concrete incorporated with various types of plastic waste aggregates. **Materials today: proceedings**. v. 64, 2022, p. 976-982.

JACOB-VAILLANCOURT, C.; SORELLI, L. Characterization of concrete composites with recycled plastic aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 182, 2018, p. 561-572.

JUNAID, Muhammad F. et al. Lightweight concrete from the perspective of sustainable reuse of waste by-products. **Construction and Building Materials**. v. 319, 2022, 126061.

KANGAVAR, Eyni M. et al. Investigation on the properties of concrete with recycled polyethylene terephthalate (PET) granules as fine aggregate replacement. **Case Studies in Construction Materials**. v. 16, 2022, p. 1-12.

KARTHIK, J. et al. Experimental study on lightweight concrete using Leca, silica fume, and limestone as aggregates. **Materials today: proceedings**. v. 66, 2022, p. 2478-2482.

KOU, S. et al. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. **Waste Management**. v. 29, 2009, p.621-628.

LI, Xuemiao; LING Tung C.; MO Kim H. Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete – A review. **Construction and Building Materials**. v. 240, 2020, 117869.

HAMEED, A. M.; AHMED, B. A. F. Employment the plastic waste to produce the light weight concrete. **Technologies and Materials for Renewable Energy**. Environment and Sustainability. v. 157, 2019, p. 30-38.

MADANDOUST, Rahmat; RANJBAR, Malek Muhammad; MOUSAVI, S. Yasin. An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. **Construction and Building Materials**. v. 25, 2011, p.3721-3731.

MAGHFOURI, Mehdi et al. Drying shrinkage properties of expanded polystyrene (EPS) lightweight aggregate concrete: A review. **Case Studies in Construction Materials**. v.16, 2022, e00919.

MANJUNATH, BT Ashwini. Partial Replacement of E-plastic Waste as Coarse-Aggregate in Concrete. **Procedia Environmental Sciences**. v. 35, 2016, p. 731-739

MONCADA, Julio E. C. M. et al. Estudo da adição de argila expandida e EPS como agregados na elaboração de concreto leve. **Revista Teccen**. v. 12 (1), 2019, p. 02-07.

MORAVIA, W. G. et al. Caracterização micro estrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve. **Departamento de Engenharia Metalúrgica**. v. 52, 2006, p. 193-199.

NEMATZADEH, Mahdi; SHAHMANSOURI, Amir Ali; FAKOOR, Maziar. Post-fire compressive strength of recycled PET aggregate concrete reinforced with steel fibers: Optimization and prediction via RSM and GEP. **Construction and Building Materials**. v. 252, 2020, p. 57-119.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2016. 912 p.

OLOFINNADE, Oluwarotimi; CHANDRA, Sarath; CHAKRABORTY, Paromita. Recycling of high impact polystyrene and low-density polyethylene plastic wastes in lightweight based concrete for sustainable construction. **Journal of Building Engineering**. v. 38, part. 5, 2020, p. 2151-2156.

PEREIRA, Maurício Rodrigues. **Estudo da adição de argila expandida na formulação de concretos leves**. 2008. 85 f. Dissertação de mestrado (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais.) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN. 2008.

PONMALAR S; REVATHI P; Waste recycled plastic granules substitute for aggregate in concrete – Review. **Materials today: proceedings**. v.65, 2022, p.1441-1448.

ROCES, Elías et al. Lightweight expanded clay aggregate properties based on laboratory testing. **Construction and Building Materials**. v. 313, 2021, 125486.

ROCHA, Bárbara F. M.; FIGUEIREDO, Filipe B.; ALTRAN, Daniele A. **Estudo das propriedades físicas e mecânicas do concreto leve com agregados de poliestireno expandido-EPS**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia. Foz do Iguaçu, 2016.

RODRIGUES, Adalberto Viana. **Aplicação de uma argila expansiva de jazida do rio grande do Sul à produção de agregados para concretos leves**. 2018. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – Porto Alegre, 2018.

ROSSIGNOLO, João Adriano. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – Dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. 2003. 220 f. Tese (Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2009, 144p.

RUMSYS, D. et al. Comparison of Material Properties of Lightweight Concrete with Recycled Polyethylene and Expanded Clay Aggregates. **Procedia Engineering**. v. 172, 2017, p. 937-944.

SCOBAR, Renan Luna. **Concreto Leve Estrutural: substituição do agregado graúdo convencional por argila expandida**. 2016. 47 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016.

SEBSADJI, Soumia K. Determining concrete properties for different optimized combined concrete mixtures: Novel mathematical approach. **Powder Technology**. v. 409, 2022, 117756.

SHAFIGH, P. et al. A comparison study of the fresh and hardened properties of normal weight and lightweight aggregate concretes. **Journal of Building Engineering**. v.15, 2018, p. 252-260.

SHIULY, Amit et al. Performance and optimisation study of waste plastic aggregate based sustainable concrete – A machine learning approach. **Cleaner Waste Systems**. v. 2, 2022, 100014.

SILVA, Taylany Pereira. **Estudo da substituição do agregado miúdo por argila expandida no concreto estrutural**. 2020. 87 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Tocantins, Palmas 2020.

VARUN, B.K; KUMAR, A. Strength characteristics of polymer modified high volume fly ash concrete. **Materials today: proceedings**. v. 46, 2021, p. 285-288.

XU, Yi et al. Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick. **Construction and Building Materials**. v. 27, 2012, p. 32-38.

ZÁLESKÁ, Martina et al. Structural, mechanical and hygrothermal properties of lightweight concrete based on the application of waste plastics. **Construction and Building Materials**. v. 180, 2018, p.1-11.

ZENG, Bo et al. Application of the novel-structured multivariable grey model with various orders to forecast the bending strength of concrete. **Chaos, Solitons & Fractals**. v. 168, 2023, 113200.