

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ JOAQUIM PAZ DA SILVA

ESTUDO DE PROPRIEDADES DO CONCRETO LEVE COM ARGILA EXPANDIDA

JATAÍ

2022

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico/Tecnológico - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: José Joaquim Paz da Silva

Matrícula: 20171020260215

Título do Trabalho: ESTUDO DE PROPRIEDADES DO CONCRETO LEVE COM ARGILA EXPANDIDA

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

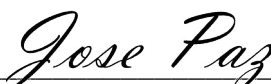
- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Jataí, 31/01/2023
Local Data



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

JOSÉ JOAQUIM PAZ DA SILVA

ESTUDO DE PROPRIEDADES DO CONCRETO LEVE COM ARGILA EXPANDIDA

Trabalho apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Jerônimo Ottoni de Carvalho Neto

JATAÍ

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)

Silva, José Joaquim Paz da.

Estudo de propriedades do concreto leve com argila expandida
[manuscrito] / José Joaquim Paz da Silva. -- Jataí: IFG,
Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, 2022.
66 f.; il.

Orientador: Prof. Jerônimo Ottoni de Carvalho Neto.
Bibliografias.

1. Concreto leve. 2. Argila expandida. 3. Resistência à compressão.
4. Massa específica. I. Carvalho Neto, Jerônimo Ottoni de. II. IFG,
Câmpus Jataí. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Téc.: Aquisição e Tratamento da Informação.
Bibliotecária – Rosy Cristina O. Barbosa – CRB 1/2380 – C. Jataí. Cód. F006/2023-1.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS JATAÍ

Folha de Aprovação

JOSÉ JOAQUIM PAZ DA SILVA

ESTUDO DE PROPRIEDADES DO CONCRETO LEVE COM ARGILA EXPANDIDA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 08 de dezembro de 2022, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Jeronimo Otoni de Carvalho Neto
Presidente da banca / Orientador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Esp. Ronan de Oliveira Lopes Junior
Membro Interno
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Me. Vítor Freitas Gonçalves
Membro Externo
Una Jataí

Documento assinado eletronicamente por:

- José Joaquim Paz da Silva, 20171020260215 - Discente, em 10/01/2023 14:47:27.
- Ronan de Oliveira Lopes Junior, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 15/12/2022 07:57:11.
- Vitor Freitas Gonçalves, Vitor Freitas Gonçalves - 2321 - PROFESSORES DO ENSINO MÉDIO - Ifg - Câmpus Jataí (10870883000306), em 13/12/2022 09:44:44.
- Jeronimo Otoni de Carvalho Neto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 12/12/2022 14:54:00.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 30/11/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 350680

Código de Autenticação: 62325817c4



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Av. Presidente Juscelino Kubitschek, nº 775, Residencial Flamboyant, JATAÍ / GO, CEP 75804-714
(64) 3605-0837 (ramal: 837)

DEDICATÓRIA

“Dar o exemplo não é a melhor maneira de influenciar os outros. É a única.”

Albert Schweitzer

“Conheço muitas razões pelas quais eu morreria, mas não conheço nenhuma pela qual eu mataria.”

Mahatma Gandhi

Dedico este trabalho à todos que promovem a paz.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Joaquim, minha mãe Guilhermina, minhas irmãs, meus cunhados, meus sobrinhos e ao meu amado filho Pedro Felipe. Estes me deram força nos meus momentos de angústia nessa jornada.

À Karol, que se alegrou comigo no dia do resultado do Enem e esteve comigo nos primeiros anos de curso. Agradeço também a Luciana que me ajuda sempre que preciso, doando tempo e dedicação.

Um agradecimento especial a todos os meus colegas de Faculdade, em especial àqueles mais próximos como Maicon, Cassiano, Luan, Michelle, Tefy e Thales. Meus queridos colegas, vocês são incríveis.

Aos professores: Carmencita, Aníbal Ataídes, Elenilson, Naara, Márcio, Sirlene, Carlos César, Aline, Vanderlúbio, Aníbal, Mayara, Sandro, Aladir, Carlos Roberto, Ruberley, Patrícia, Clarissa, Débora Braga, Carol, Eulher, Fabrício, Mônica, Fran, Rafael Pinto.

Meu agradecimento especial ao professor Ronan, que ajudou muito no trabalho, abrindo as portas da sua empresa para fazer o rompimento dos corpos de prova.

Ao professor Vitor Freitas, nosso psicólogo de sala de aula, por toda dedicação nas disciplinas em que ministrou aulas, bem como na contribuição final para o trabalho.

Um agradecimento ultra especial, ao professor Jerônimo, o Paizão, pela orientação no trabalho e dedicação ao longo do curso. A você, nobre Jerônimo, minha gratidão, respeito e admiração.

À professora Débora Silva todo meu respeito e admiração. Essa moça foi um anjo bom que Deus colocou no meu caminho, meu renovo no curso, me deu ânimo e disposição para continuar.

Aos colaboradores terceirizados do Instituto Federal por cuidar tão bem de nós e do edifício. Aos técnicos administrativos que fazem a máquina andar.

A todos vocês, minha eterna gratidão.

RESUMO

Na construção civil, a busca por materiais alternativos de baixa massa específica, que produzam redução do peso próprio das estruturas, vem sendo estudada por pesquisadores a fim de proporcionar a produção de concretos leves com propriedades mecânicas parecidas com o concreto convencional e que tenham resistência mínima exigida pela norma. Nesse sentido, buscou-se estudar neste trabalho, um concreto produzido com argila expandida em substituição ao agregado graúdo convencional (brita 1) e analisar sua resistência à compressão, abatimento, índice de absorção de água e massa específica, comparando-o com o concreto convencional. Viu-se nos experimentos, que o concreto produzido com argila expandida possui boa resistência à compressão aos 28 dias. Os resultados apresentados nos traços estudados foram de 35,76 MPa para o traço rico; 24,68 MPa para o padrão e 20,91 MPa para o traço pobre, sendo todos superior à exigida pela NBR 6118, 2014, que é de 20 MPa, para concreto estrutural. Essa resistência encontrada foi a resistência característica do concreto (f_{ck}), não foi calculada a resistência média do concreto (f_{cj}), na qual há uma majoração dos valores por meio de coeficiente de segurança para garantir a resistência buscada pelo projeto. No estado fresco, o concreto leve possui boa trabalhabilidade com uma baixa relação A/C e no estado endurecido possui índice de absorção de água superior ao concreto convencional, bem como massa específica cerca de 40% menor que a do concreto produzido com brita convencional. O concreto leve com argila expandida mostra-se como um material alternativo interessante para aquelas construções de grandes vãos, que exijam redução no peso próprio das estruturas. Essa redução no peso próprio produz um alívio nas fundações e uma economia como um todo na obra.

Palavras-chave: concreto leve; argila expandida; resistência à compressão; massa específica.

ABSTRACT

In civil construction, the search for alternative materials of low specific mass, which reduce the own weight of structures, has been studied by researchers in order to provide the production of lightweight concrete with mechanical properties similar to conventional concrete and with minimal resistance required by the standard. In this sense, this work sought to study a concrete produced with expanded clay replacing conventional coarse aggregate (gravel 1) and to analyze its compressive strength, slump, water absorption index and specific mass, comparing it with concrete conventional. It was seen in the experiments that the concrete produced with expanded clay has good compressive strength at 28 days. The results presented in the traits studied were 35.76 MPa for the rich trait, 24.68 MPa for the standard and 20.91 MPa for the poor trait, all of which are higher than that required by NBR 6118, 2014, which is 20 MPa, for structural concrete. This resistance found was the characteristic resistance of concrete (f_{ck}), the average resistance of concrete (f_{cj}) was not calculated, in which there is an increase in values by means of a safety coefficient to guarantee the resistance sought by the project. In the fresh state, lightweight concrete has good workability with a low A/C ratio and in the hardened state it has a higher water absorption rate than conventional concrete, as well as a specific mass about 40% lower than that of concrete produced with conventional crushed stone. Lightweight concrete with expanded clay is an interesting alternative material for those constructions with large spans, which require a reduction in the structure's own weight. This reduction in self-weight relieves the foundations and saves the work as a whole.

Keywords: lightweight concrete; expanded clay; compressive strength; specific mass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Massa unitária de agregados leves.....	23
Figura 2 - Granulometria da argila expandida.....	25
Figura 3 - Tipos de concreto leve.....	29
Figura 4 - Porto de Cosa.....	30
Figura 5 - Coliseu de Roma	30
Figura 6 - Panteão de Roma.....	30
Figura 7 - Catedral de Santa Sofia em Istambul.....	30
Figura 8 - Fábrica Rhodia Santo André - SP.....	32
Figura 9 - Escritório Cinasita Jundiaí - SP.....	32
Figura 10 - Escritório Camargo e Corrêa S/A.....	33
Figura 11 - Garagem Padrão Prefeitura Municipal de São Paulo - SP.....	33
Figura 12 - Anexo I Itamaraty.....	34
Figura 13 - Terminal de Carga Brasília.....	34
Figura 14 - Quartel General de Brasília - construção.....	34
Figura 15 - Edifício Marina City - Chicago, E.U.A.....	36
Figura 16 - Edifício Shell Plaza - Houston, E.U.A.....	37
Figura 17 - Standard Bank - África do Sul.....	37
Figura 18 - Sede da B.M.W - Suíça.....	37
Figura 19 - Ponte Stolma - Noruega (Detalhe do vão)	38
Figura 20 - Plataforma Heidrun TLP.....	38
Figura 21 - Pavilhão de Portugal - Lisboa.....	38
Figura 22 - Relação entre resistência à compressão e a granulometria da argila.....	40
Figura 23 - Tronco de cone.....	44
Figura 24 - Materiais usados na produção do concreto.....	47
Figura 25 - Abatimento tronco de cone.....	48
Figura 26 - Corpos de prova moldados (cura úmida)	48
Figura 27 - Disposição dos agregados.....	49
Figura 28 - Prensa hidráulica.....	49
Figura 29 - Corpos de prova após rompimento.....	50

Figura 30 - Estufa de secagem.....	51
Figura 31 - Peneirador mecânico.....	51
Figura 32 - Balança hidrostática.....	51
Figura 33 - Resistências à compressão do concreto com argila expandida.....	58
Figura 34 - Resistência à compressão do concreto convencional.....	59
Figura 35 - Resistências (comparativo).....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química, propriedades físicas e mecânicas da argila expandida.....	25
Tabela 2 – Absorção de água da argila expandida.....	26
Tabela 3 – Valores de referências da massa específica do concreto leve estrutural.....	27
Tabela 4 – Traços de CLE usados em algumas edificações em Brasília – DF.....	35
Tabela 5 – Relação entre resistência à compressão e consumo de cimento.....	40
Tabela 6 – Propriedades térmicas dos concretos leves.....	41
Tabela 7 – Composição granulométrica da argila expandida.....	52
Tabela 8 - Granulometria da Argila expandida.....	53
Tabela 9 – Composição granulométrica da brita nº 1.....	54
Tabela 10 – Composição granulométrica da areia natural.....	54
Tabela 11 – Determinação da absorção de água.....	55
Tabela 12 – Índice de absorção de água.....	56
Tabela 13 – Massa específica dos materiais.....	56
Tabela 14 – Resistência à compressão dos concretos leves.....	57
Tabela 15 – Resistência à compressão do concreto convencional.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

a.C: Antes de Cristo

A/C: Relação água cimento

AE: Argila expandida

AL: Agregado leve

CLE: Concreto leve estrutural

CPV ARI: Cimento Portland de alta resistência inicial

Kg/m³: Quilograma por metro cúbico

MPa: MegaPascal

NBR – Norma brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

γ - massa específica aparente

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 JUSTIFICATIVA.....	18
1.2 OBJEIVOS.....	19
1.2.1 Objetivo Geral.....	19
1.2.2 Objetivos Específicos.....	19
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 CONCRETO.....	20
2.2 AGREGADO.....	21
2.3 AGREGADO LEVES.....	22
2.4 ARGILA EXPANDIDA.....	23
2.5 CONCRETO LEVE.....	27
2.5.1 CLASSIFICAÇÃO.....	28
2.5.2 APLICAÇÕES.....	29
2.5.2.1 APLICAÇÕES NO BRASIL.....	31
2.5.2.2 APLICAÇÕES NO MUNDO.....	35
2.6 PROPRIEDADES DO CONCRETO LEVE ESTRUTURAL.....	39
2.6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	39
2.6.2 CONFORTO TÉRMICO.....	41
2.6.3 DOSAGEM.....	42
2.6.4 TRABALHABILIDADE.....	43
2.6.5 DURABILIDADE.....	44
2.6.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	45
CAPÍTULO 3 METODOLOGIA.....	46
CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
4.1 DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	52
4.1.1 ARGILA EXPANDIDA.....	52
4.1.2 BRITA Nº 1.....	53
4.1.3 AREIA NATURAL	54

4.1.4	ÍNDICE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	55
4.1.5	ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE.....	56
4.1.6	MASSA ESPECÍFICA.....	56
4.1.7	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	57
CAPÍTULO 5	CONCLUSÃO.....	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

O concreto é o principal componente utilizado para as construções, afirma Moura et al (2013). Depois da água, o concreto de cimento Portland constitui-se no material mais utilizado no mundo (ISAIA et al, 2020). É composto por cimento Portland, água e agregados (PETRUCCI, 1998). Podemos encontrá-lo nas mais diferentes obras de construção por todo o canto do planeta, devido à sua versatilidade (PEDROSO, 2009). Rodrigues (2018) afirma que o concreto a base de cimento Portland é o material produzido pelo homem de maior consumo, assim como seus componentes: cimento, areia e brita.

Devido à sua grande plasticidade, o concreto pode assumir diferentes formas de acordo com a criatividade do homem. De maneira sucinta, o concreto é uma pedra artificial que se molda à inventividade construtiva do homem e que, depois de endurecido, tem resistência similar às das rochas naturais, sendo que no seu estado fresco pode ser moldado de formas e tamanho variados (PEDROSO, 2009; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Outras razões para o uso tão difundido do concreto, além de sua versatilidade, são pela sua facilidade na execução de elementos, por ser o material mais barato, facilmente disponível nos canteiros e pela sua excelente resistência à água, ao contrário da madeira e do aço comum (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A busca por melhorias para o concreto fez com que surgissem inovações tecnológicas na sua composição, principalmente no que diz respeito ao peso próprio das estruturas. A partir dessas inovações, foram desenvolvidos concretos especiais, mais tecnológicos e eficientes, como os concretos leves (WEIRICH, 2017; ROSSIGNOLO, 2009). Uma das formas de obter o concreto leve é pela substituição dos agregados convencionais por agregados leves. A principal característica dos agregados leves é sua elevada porosidade, que resulta em concretos com baixa massa específica (NEVILLE, 2016). Entende-se por concreto estrutural leve o concreto cuja resistência à compressão aos 28 dias seja acima de 17 MPa (RODRIGUES, 2018) e massa específica inferior a 2000 kg/m³ (ABNT, 2015)

Nesse trabalho será estudado o concreto estrutural leve, produzido com argila expandida em substituição ao agregado graúdo convencional. Também será analisada, por meio de ensaio à

compressão, a sua resistência mecânica, bem como, se atingirá a resistência mínima exigida pela norma NBR 6118 (2014), para concreto estruturais, que é de 20 MPa.

Para poder ser usada como agregado leve, a argila natural passa por um processo de beneficiamento. A argila expandida é obtida pelo aquecimento, em fornos rotativos, de matérias-primas adequadas até a fusão incipiente em temperatura entre 1000 e 1200 °C (NEVILLE, 2016). Nessa faixa de temperatura, uma parte dos constituintes do material se funde gerando uma massa viscosa, enquanto a outra parte se decompõe quimicamente liberando gases que são incorporados a essa massa. Além disso, esse processo de fabricação promove a formação de uma camada vitrificada externa na partícula com baixa porosidade (ROSSIGNOLO, 2009).

1.1 JUSTIFICATIVA

A engenharia busca a cada dia produtos capazes de otimizar os processos construtivos, bem como reduzir custos. Para isso, pesquisas são desenvolvidas para encontrar novos materiais que possam garantir qualidade e segurança. Pesquisadores tem buscado em seus estudos maneiras de criar alternativas para substituir os materiais e métodos construtivos convencionais. Nesse sentido, o concreto leve com argila expandida em substituição ao agregado graúdo se tornou uma solução interessante, uma vez que por possuir massa específica menor que a brita convencional (basáltica), o peso da estrutura sofre uma importante redução.

De acordo com Torres (2002) o objetivo básico em usar um material leve é reduzir o peso próprio viabilizando o custo total das estruturas. O peso próprio das estruturas em concreto é elevado quando comparado às cargas aplicadas, especialmente em estruturas de grandes vãos (ROSSIGNOLO, 2009). Afirmar ainda o mesmo autor que em casos de pontes e edifícios de múltiplos pavimentos, melhorias consideráveis no desempenho das estruturas em concreto armado podem ser geradas com a redução do peso total.

Neville (2016) afirma que com concretos mais leves as formas necessitam suportar menor pressão, aumentando assim a produtividade devido a massa manipulada ser reduzida. Afirmar ainda que o concreto com menor massa específica resulta em melhor isolamento térmico. O menor peso resulta em economia nas armaduras, nas dimensões das fundações, o que é favorável

principalmente em construções altas e terrenos de fundações de pior qualidade (SILVA, 2007; PINHEIRO et al, 2013; TUTIKIAN et al, 2017).

Com esse trabalho busca-se verificar o comportamento do concreto leve usando argila expandida, em relação a sua resistência à compressão, utilizando dosagens diferentes de cimento. Pensando nos benefícios gerados com a utilização da argila expandida como agregado na produção do concreto, nasceu o interesse de pesquisar sobre a resistência à compressão desse concreto visto que, quanto mais eficiente for e mais leve ficar, mais economia no processo construtivo, principalmente nas fundações dos edifícios. Com a pesquisa pode-se determinar a viabilidade do uso da argila expandida na produção do concreto, principalmente no que diz respeito a resistência mínima estabelecida pela norma NBR 6118, (2014), bem como a diminuição do peso da estrutura.

1.3 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Determinar propriedades do concreto fresco e endurecido produzido com argila expandida e compará-las com o concreto convencional.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar sua consistência;
- Determinar sua resistência mecânica;
- Caracterizar os agregados.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo mostraremos o que a literatura nos traz a respeito da produção do concreto leve usando argila expandida em substituição ao agregado graúdo, trazendo todo o processo de fabricação do mesmo, aplicações e suas particularidades, com foco na sua utilização como concreto leve estrutural.

2.1 CONCRETO

O concreto é o material mais largamente usado em construção, normalmente feito com a mistura de cimento Portland com areia, pedra e água (MEHTA; MONTEIRO, 2014; PETRUCCI, 1998; BAUER, 2008; MOURA et al, 2013). Um quarto elemento está sendo muito usado atualmente que são os aditivos químicos. Esses produtos alteram as características do concreto e se bem utilizados, trazem benefícios para o mesmo (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O universo da construção civil mudou muito depois da descoberta do concreto de cimento Portland. Construções cada vez mais elaboradas e grandiosas apareceram com sua utilização, revolucionando a arte de construir. Com o emprego em larga escala do concreto, surgiram projetos e soluções estruturais baseadas nas características desse material, permitindo cada vez mais exequibilidade de obras arrojadas, dando maior liberdade aos arquitetos e engenheiros. (BAUER, 2008). Segundo Helene e Andrade (2010 pg. 905):

O concreto de cimento é o mais importante material estrutural e de construção civil da atualidade. Mesmo sendo o mais recente dos materiais de construção de estruturas, pode ser considerado como uma das descobertas mais interessantes da história do desenvolvimento da humanidade e sua qualidade de vida (HELENE E ANDRADE, 2010)

O concreto é um dos poucos materiais de construção que engenheiros e arquitetos ainda têm acesso direto na sua produção, seja em canteiros ou em usinas de concreto, podendo interferir nas suas especificações e produção, de acordo com Helene e Andrade (2010). Petrucci (1998) corrobora e diz ainda que o concreto exige do seu executor um perfeito conhecimento das propriedades e qualidade dos materiais constituintes, bem como o seu proporcionamento.

Para a fabricação do concreto é necessário que se crie uma pasta, que é a mistura da água e cimento. Essa pasta irá envolver os agregados, preencher os vazios existentes e aglutinar os

agregados no concreto endurecido, dando assim certa impermeabilidade, resistência e durabilidade (PETRUCCI, 1998).

Em um concreto de boa qualidade deve-se ter uma boa relação água/cimento, uma vez que, concreto muito fluido tende a perder resistência, enquanto muito endurecido perde-se trabalhabilidade. A trabalhabilidade do concreto é fundamental para se conseguir compactação que assegure a máxima densidade possível, afirma Bauer (2008). A resistência costuma fornecer uma ideia geral da qualidade do concreto, visto que está diretamente relacionada à estrutura da pasta de cimento (NEVILLE, 2016).

Possui o concreto, classificado pela sua massa específica, três tipos: concreto normal, de massa específica em torno de 2400 kg/m^3 (pode variar entre 2000 a 2800 kg/m^3); concreto pesado de massa específica acima de 2800 kg/m^3 e concreto leve, de massa específica menor que 2000 kg/m^3 . Quanto à sua resistência, conforme NBR 8953, 2015, também é classificado em três tipos: baixa resistência (menor que 20 MPa – não estrutural); moderada resistência (20 a 50 MPa – concreto estrutural grupo I) e alta resistência (acima de 50 MPa – Concreto estrutural grupo II).

Contudo, o concreto possui algumas limitações. Apesar de ter ótima resistência a compressão, na tração é pouco resistente (aproximadamente 1/10 da resistência à compressão), possui uma elevada relação peso próprio - resistência, fissuração nas regiões tracionadas, bem como necessita de formas e escoramentos na execução dos projetos.

2.2 AGREGADO

Agregado é o material particulado, incoesivo, de atividade química praticamente nula, constituído de misturas de partículas cobrindo extensa gama de tamanhos (BAUER, 2008). São componentes muito importantes na composição do concreto, influenciando tanto na qualidade como também e, principalmente, na sua resistência. Sabe-se que as características dos agregados têm significativa influência nas propriedades do estado fresco e endurecido do concreto (FABRO et al, 2011). Afirmam ainda os mesmos autores que a porosidade, a massa específica, a composição granulométrica, forma, textura, determinam as propriedades no estado fresco do concreto, influenciando o consumo da pasta.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) e Neville (2016) os agregados ocupam de 60 a 80 por cento do volume do concreto e que devido toda sua importante influência na resistência, estabilidade dimensional e durabilidade, os fazem tão respeitados como o cimento. Isaia (2008) complementa dizendo que os agregados devem ser escolhidos com toda atenção e critério técnico, uma vez que, são os elementos em maior quantidade na composição do concreto.

A influência do agregado na composição do concreto é muito grande visto que, podem atingir valores de resistência à compressão bem altos. De acordo com Neville (2016) uma boa média para a resistência à compressão do agregado é de aproximadamente 200 MPa, sendo que já foram observadas resistências de 530 MPa para um tipo de quartzito.

Os agregados são classificados, segundo a NBR 7211, como gráudo e miúdo de acordo com sua granulometria. Os miúdos possuem dimensão inferior a 4,75mm, já os gráudos possuem dimensão superior a 4,75mm (ABNT, 2019). Os agregados com massa unitária menor do que 1120 kg/m³ são chamados de leves, e aqueles com mais de 2080 kg/m³ são chamados de pesados (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.3 AGREGADOS LEVES

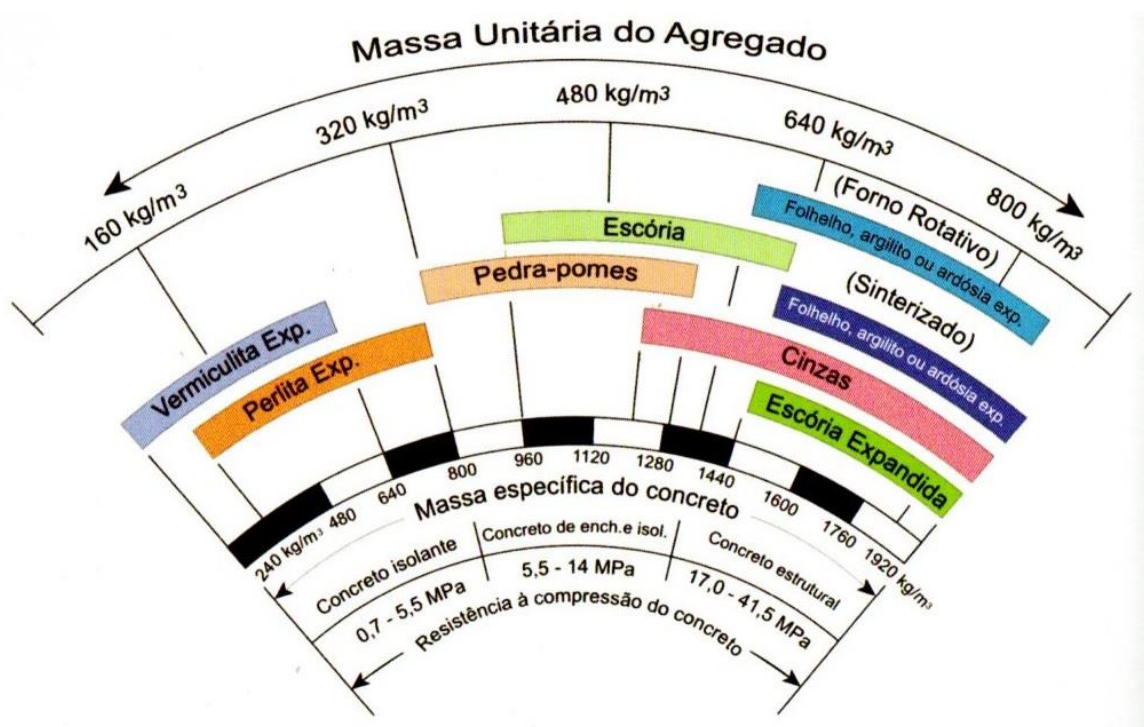
Os agregados leves (AL) são aqueles que possuem massa unitária entre 650 e 900 kg/m³ (ROSSIGNOLO, 2009). Essa massa menor é devido à microestrutura celular ou a porosidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Afirmam ainda os mesmos autores que agregados muito porosos geralmente são fracos e são utilizados para a produção de concretos isolantes não estruturais. Já os relativamente menos porosos são usualmente resistentes e possíveis de produzir concreto estrutural. A principal característica dos agregados leves é sua porosidade, que resulta em baixa massa específica (NEVILLE, 2016).

Quanto à sua origem, os agregados leves podem ser naturais ou artificiais, sendo os naturais obtidos por meio de extração direta em jazidas e, os artificiais, obtidos em processos industriais (ROSSIGNOLO, 2009). Contudo, é importante ressaltar, de acordo com Neville (2016), que os AL artificiais destinados ao uso em concreto estrutural são, independentemente de sua origem, produtos industrializados e, portanto, mais uniformes que os agregados naturais. Os agregados leves não são apenas um material de preenchimento, eles apresentam características importantes

para a composição do concreto, tais como: porosidade, resistência à compressão, distribuição granulométrica, absorção de água, peso, entre outros (GARCIA, 2017).

Devido sua alta porosidade, o AL absorve muita água. Essa absorção de água nos poros possibilita o ingresso limitado de pasta de cimento nos poros superficiais das partículas de agregados, em especial as maiores (NEVILLE, 2016). A Figura 1, abaixo, traz a massa unitária dos agregados leves, sua resistência à compressão, bem como sua classificação.

Figura 1 – Massa unitária de agregados leves



Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

2.4 ARGILA EXPANDIDA

Argila expandida (AE) é o único agregado leve produzido no Brasil, para a produção de concreto estrutural leve, sendo que 60% da produção desse material destina-se ao setor da construção civil nacional (ROSSIGNOLO, 2009). Afirma ainda o mesmo autor que a empresa Cinexpan Industria e Comércio LTDA era, o único fabricante no país à época.

Apesar de ser um material proveniente da decomposição, durante milhões de anos, das rochas feldspáticas, muito abundante na crosta terrestre, de acordo com Silva (2007), não é qualquer argila usada para a produção da AE. Devem ser, de acordo com Rossignolo (2009), argilas com características piro-expansivas. A AE é o produto obtido por aquecimento de alguns tipos de argila na temperatura em torno de 1200 °C (MORAVIA *et al*, 2006; ROSSIGNOLO, 2009; MONCADA *et al*, 2019). Exposta a esta temperatura, a argila emite gases expandindo-se em até sete vezes o seu volume inicial (MORAVIA *et al*, 2006; MONCADA *et al*, 2019). A utilização de agregados sintéticos em construção é antiga, e estudos já foram realizados abordando a contribuição do mesmo na produção de concreto, afirma Oliveira *et al* (2018).

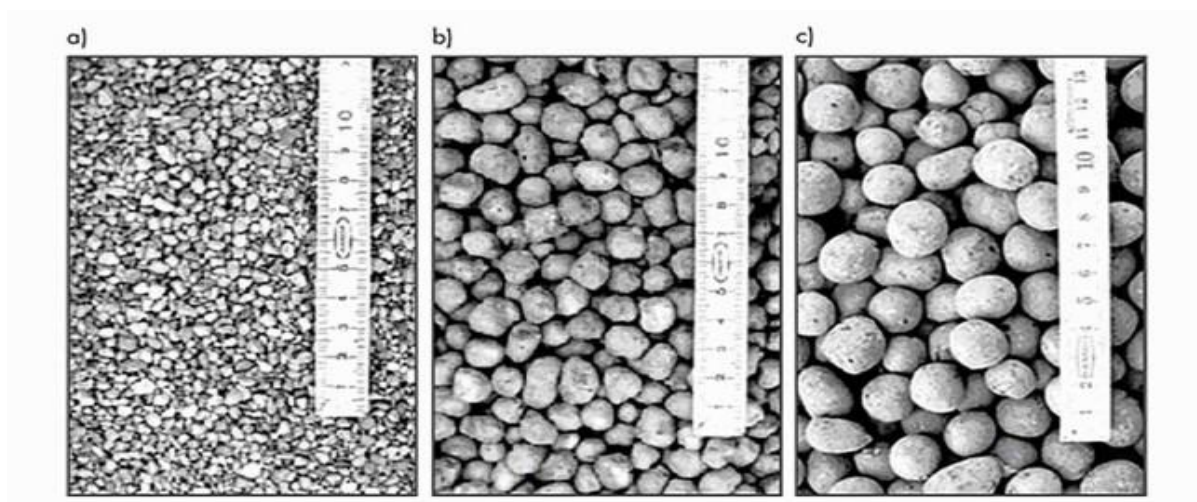
A produção da AE se dá por queima em forno rotativo (ROSSIGNOLO, 2009; MORAVIA *et al*, 2006; SANTOS *et al*, 2018; MONCADA *et al*, 2019). Porém, Moravia *et al* (2006) e Rossignolo (2009) afirmam que a AE pode ser obtida ainda por meio de sinterização contínua. Esse processo de sinterização é descrito por Neville (2016, pg. 722):

Nesse caso, o material umedecido é conduzido por uma grelha transportadora sobre queimadores de maneira que o calor penetre gradualmente na espessura total da camada de material. Sua viscosidade é tal que os gases são aprisionados. Assim como no forno rotativo, a massa resfriada é britada (NEVILLE, 2016)

Afirma ainda Neville (2016) que a massa unitária varia entre 650 a 900 kg/m³ para agregados produzidos na sinterização e entre 300 a 650 kg/m³ para agregados produzidos em fornos rotativos.

A AE é fabricada pela Cinexpan em diversas granulometrias e aplicadas nas mais variadas áreas. Na construção civil aplica-se três tipos de grãos, encontrados sob numeração 2215, 1506 e 0500, sendo equivalentes, respectivamente à brita 1, brita 0 e areia grossa (LOPES; OLIVEIRA; SCHIMANOWSKI, 2021). Nunes, Teixeira e Saraiva (2020) detalham dizendo que os tipos mais comuns da AE são AE0500 (com diâmetro até 5mm), a AE1506 (com diâmetro das partículas entre 6 e 15 mm) e a AE2215 (com diâmetro das partículas entre 15 e 22 mm). A Figura 2 mostra a AE em suas três principais medidas, usadas na construção civil.

Figura 2: Granulometria da argila expandida



Fonte: Rossignolo (2009)

A Tabela 1 mostra a composição química, bem como algumas propriedades físicas e mecânicas da Argila expandida.

Tabela 1: Composição química, propriedades físicas e mecânicas da argila expandida

COMPOSIÇÃO QUÍMICA			
Composição/ tipo de AE	AE 2215	AE1506	AE0500
Silício (em SiO_2)		63,19%	
Alumínio (em Al_2O_3)		18,02%	
Ferro (em Fe_2O_3)		7,63%	
Titânio (em TiO_2)		0,92%	
Cálcio (em CaO)		0,64%	
Magnésio (em MgO)		3,26%	
Sódio (em Na_2O)		0,61%	
Potássio (em K_2O)		4,91%	
Óxido de Fósforo (em P_2O_5)		0,20%	
Óxido de Manganês (em MnO)		0,08%	
Óxido de Bário (em BaO)		0,09%	
PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS			
Propriedades/ tipo de AE	AE 2215	AE1506	AE0500
Densidade aparente (kg/m^3)	$500 \pm 10\%$	$600 \pm 10\%$	$850 \pm 10\%$
Massa específica (kg/m^3)	640,00	1.110,00	1.560,00
Classes granulométricas (mm)	15–22	06–15	0–5
Resistência mecânica (MPa)	1,80	2,30	
Condutividade térmica (W/(m.K))		0,10–0,16	
Isolamento acústico médio (dB)		44,00	

Fonte: Cinexpan - Adaptada por Nunes, Teixeira e Saraiva (2021)

Em relação as propriedades físicas e mecânicas existe uma leve alteração em alguns fatores, isto porque, granulometrias diferentes possuem densidade aparente diferentes, massa específica diferentes e resistências também diferentes.

A massa específica da AE, quando comparado a agregados comuns como a brita empregada em concretos convencionais, pode ser até 2,5 vezes menor e isto é uma de suas vantagens como agregado, de acordo com Moncada et al (2019). No entanto, afirmam os mesmos autores que por possuir um interior poroso, a AE apresenta alta absorção de água. Rossignolo (2009) traz uma tabela corroborando e mostrando a absorção de água da AE de acordo com a granulometria e o tempo de exposição à água.

Tabela 2: Absorção de água da argila expandida

TEMPO	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%) (em massa)		
	Cinexpan 0500	Cinexpan 1506	Cinexpan 2215
30 min	1,8	2,7	4,0
1 hora	2,7	3,5	5,0
1 dia	6,0	7,0	10,3

Fonte: Rossignolo (2009), adaptada pelo autor

O preparo do concreto com argila expandida deve ser cuidadoso, uma vez que, devido sua alta absorção de água, pode afetar a trabalhabilidade, alterando a relação água/cimento da mistura, por isso, de acordo com Werich (2017), concretos com argila expandida necessitam de mais cimento na sua mistura para oferecer boa resistência.

Bogas e Gomes (2013) afirmam que a AE reduz de 30 a 50% o peso de uma estrutura e que a resistência à compressão do concreto pode alcançar até 45 MPa.

2.5 CONCRETO LEVE ESTRUTURAL

ACI 213-R-87 (1999) define concreto leve estrutural (CLE) como aquele feito com agregado leve, de massa específica seca aos 28 dias entre 1440 a 1850 kg/m³ e resistência à compressão superior a 17 MPa. Rossignolo (2009) considera que os CLE apresentam massa específica abaixo de 2000 kg/m³ e apresenta em na Tabela 3 algumas normas e seus limites de massa específica para classificar o concreto leve estrutural.

Tabela 3: Valores de referência da massa específica do concreto leve estrutural

REFERÊNCIA	MASSA ESPECÍFICA APARENTE (Kg/m ³)
NM 35 (1995)	$1680 < \gamma < 1840$
ACI 213R-03 (2003)	$1120 < \gamma < 1920$
EUROCODE 2 (2007)	$900 < \gamma < 2000$
NS 3473 E (1998)	$1200 < \gamma < 2200$
CEB-FIP (1997)	$\gamma < 2000$
RILEM (1975)	$\gamma < 2000$

Fonte: Rossignolo (2009), adaptada pelo autor

O concreto estrutural leve por ser um concreto como os outros, deve atender todas as especificações do concreto normal, uma vez que, o objetivo de ser leve é a redução do seu peso. Sobre isso Mehta e Monteiro (2014, pg. 386) o definem como:

O concreto estrutural leve é um concreto estrutural em todos os sentidos, exceto que, por razões de economia do custo total, o concreto é feito com agregados leves, celulares, sendo portanto, seu peso específico aproximadamente dois terços do peso específico do concreto feito com agregados naturais típicos (MEHTA E MONTEIRO, 2014)

Complementam ainda Mehta e Monteiro (2014) que o objetivo primordial do concreto leve é o baixo peso e não a resistência e mesmo que o agregado leve tende a reduzir bastante a resistência do concreto, as especificações exigem uma resistência à compressão mínima aos 28 dias, assegurando assim a qualidade estrutural do concreto.

2.5.1 CLASSIFICAÇÃO

A massa específica do concreto pode ser reduzida substituindo parte de materiais da mistura por vazios e isto pode ser feito de 3 formas, de acordo com Neville (2016, pg. 719)

Existem três possíveis locais para o ar: nas partículas dos agregados, conhecidos como agregados leves; na pasta de cimento, sendo o material resultante denominado concreto celular; e entre as partículas de agregados graúdos, não utilizando agregados miúdos. Esse último é denominado concreto sem finos (NEVILLE, 2016)

Neville (2016) explica essas três formas de classificar o concreto leve estrutural, sendo que concreto celular consiste na introdução de vazios estáveis na pasta de cimento endurecida e que esses vazios podem ser produzidos por gás ou por ar, daí as denominações concreto gasoso e concreto aerado. Afirma ainda que o concreto celular pode conter ou não agregados, sendo o concreto sem agregado utilizado como isolante térmico.

Outro tipo de concreto, com massa específica reduzida, de acordo com Neville (2016) é o concreto sem finos. Este consiste na exclusão dos agregados miúdos, ficando constituídos de cimento, água e agregado graúdo, sendo, portanto, um aglomerado de partículas de agregados graúdos e pasta de cimento, existindo dessa forma, grandes vazios no corpo do concreto e por conseguinte uma menor massa específica. Atualmente, o concreto sem finos tem sido muito utilizado, mas com o nome de concreto permeável.

A outra forma de reduzir o peso do concreto é substituindo o agregado graúdo convencional por agregados graúdos porosos e baixa massa específica (NEVILLE, 2016). A Figura 3 mostra esses três tipos de concretos.

Figura 3: Tipos de concreto leve



a) concreto aerado

b) concreto sem finos

c) concreto leve estrutural

Fonte: Rossignolo (2009)

A ACI 213R – 87 (1997) também classifica o CLE (Concreto leve estrutural) por meio da sua massa específica, em três categorias:

- 1 – concreto com massa específica ficando abaixo de 800 kg/m^3 , com resistência a compressão aos 28 dias entre 0,69 a 6,89 MPa, utilizado principalmente para fins de isolamento térmico;
- 2 – concreto de resistência moderada, com massa específica ficando entre 800 kg/m^3 e 1350 kg/m^3 , com resistência a compressão aos 28 dias entre 6,89 a 17,2 MPa, sendo suas características de isolamento intermediária;
- 3 – concreto estrutural, com massa específica ficando entre 1350 kg/m^3 e 1900 kg/m^3 , com resistência aos 28 dias acima de 17,2 MPa

Já a NBR 8953 ABNT (2015) define como concreto estrutural leve aquele com massa específica inferior a 2000 kg/m^3 e resistência à compressão igual o superior a 20 MPa.

2.5.2 APLICAÇÕES

A primeira indicação conhecida da aplicação dos concretos com agregados leves data de aproximadamente 1100 a.C, quando construtores pré-colombianos, numa região mexicana, utilizaram mistura de pedra pomes para construção de elementos estruturais (ROSSIGNOLO, 2009). Continua afirmando o mesmo autor que os relatos históricos de aplicações de concretos leves apareceram principalmente com os romanos em obras como Porto de Cosa (Figura 4), Coliseu

de Roma (Figura 5), Panteão de Roma (Figura 6) e, também no símbolo religioso importante do império romano no oriente, a Catedral de Santa Sofia, em Istambul (Figura 7).

Figura 4: Porto de Cosa



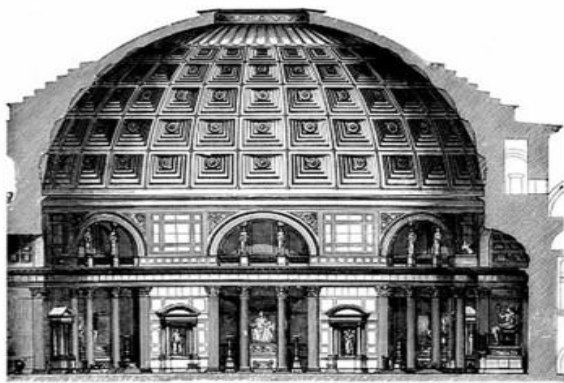
Fonte: Rossignolo (2009)

Figura 5: Coliseu de Roma



Fonte: Rossignolo (2009)

Figura 6: Panteão de Roma



Fonte: Rossignolo (2009)

Figura 7: Catedral de Santa Sofia em Istambul



Fonte: Rossignolo (2009)

A partir do século XX começou a se produzir concretos leves estruturais com agregados artificiais com altas resistências aos 28 dias, de acordo com Rossignolo (2009). Afirmo ainda que:

Apesar de o concreto leve estrutural apresentar aplicações nos mais diversos setores da construção civil, sua viabilidade técnica e econômica é maior em estruturas nas quais grande parte das solicitações deve-se ao peso próprio, como pontes e edificações de múltiplos pavimentos, em construções que envolvem transporte de componentes, caso dos sistemas pré-fabricados, em estruturas flutuantes como plataformas e tanques (ROSSIGNOLO, 2009, pg. 91)

Mehta e Monteiro (2014) corroboram a fala de Rossignolo (2009) dizendo que a maioria das aplicações do CL em todo o mundo está ligada a produção de elementos pré-fabricados, devido aos menores custos de manuseio, transporte e construção. Continuam dizendo Mehta e Monteiro (2014), que além da redução do peso do concreto, está a resistência superior dos elementos de cisalhamento à carga devido a terremotos, considerando que os esforços sísmicos são em função direta do peso próprio da estrutura.

2.5.2.1 APLICAÇÕES NO BRASIL

De acordo com Rossignolo (2009), pode se afirmar que no Brasil a utilização dos concretos com agregados leves ainda é modesta, frente ao seu potencial de utilização, estando concentrado no estado de São Paulo e estados vizinhos, devido a fábrica produtora de argila expandida estar localizada em Várzea Paulista – SP, facilitando a difusão do produto. França, Rocha e Feres (2018) complementam dizendo que a utilização de CLE ainda é pouco difundida no Brasil, havendo até resistência na adesão dessa técnica atribuída pela pouca disponibilidade de informações durante a formação de novos profissionais, ficando essa tecnologia restrita a empresas especializadas no segmento.

Segundo Rossignolo (2009), desde o início da produção da argila expandida no Brasil, em 1968, a maioria das aplicações dos concretos leves estruturais na construção civil nacional se dá em elementos estruturais pré-fabricados, em edificações de múltiplos pavimentos moldados *in loco*, especialmente em lajes. Afirma ainda que, entre 1968 e 1973, as primeiras aplicações do concreto com argila expandida ocorreu com a empresa CINASA – Construção Industrializada Nacional, na produção de elementos estruturais pré-fabricados, com massa específica variando entre 1800 kg/m³ e 2000 kg/m³, com resistência entre 16 a 26 MPa. A Figura 8 mostra a estrutura da fábrica da Rhodia em Santo André – SP, construída utilizando o CLE. A Figura 9 mostra o escritório da Cinasita em Jundiaí – SP, utilizando em seus elementos estruturais o concreto leve. No escritório da Camargo e Corrêa S/A (Figura 10), em São Paulo – SP a cobertura foi executada utilizando CLE. A Figura 11 traz a Garagem Padrão da Prefeitura Municipal de São Paulo – SP, construída utilizando elementos pré-fabricados em concreto leve estrutural

Figura 8: Fábrica Rhodia Santo André- SP



Fonte: Rossignolo (2009)

Figura 9: Escritório Cinasita Jundiaí - SP



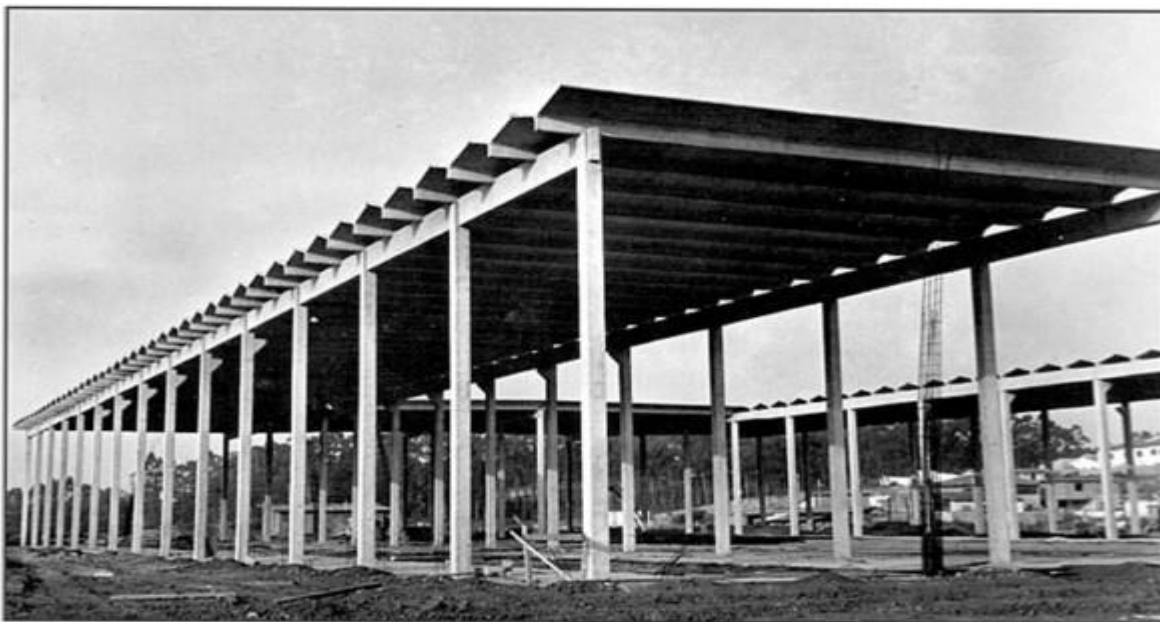
Fonte: Rossignolo (2009)

Figura 10: Escritório Camargo e Corrêa S/A



Fonte: Rossignolo (2009)

Figura 11: Garagem Padrão Prefeitura Municipal de São Paulo - SP



Fonte: Rossignolo (2009)

Rossignolo (2009) ainda cita a construção do ginásio do Clube Atlético Santista 1971 utilizando concreto leve com resistência a compressão de 18 MPa e massa específica de 1800 kg/m³, nas duas vigas principais (tipo verendez), com 75 m de comprimento (dois vãos de 25 m e dois balanços de 12,5 m) e, também, nas vigas de piso e da cobertura com 34 m de vão.

Na construção de Brasília, entre 1968 e 1972, o concreto com argila expandida foi utilizado em diversas edificações especialmente nas obras executadas pela Construtora Rabello S/A, de acordo com Rossignolo (2009). Entre elas estão: 120 edifícios de três pavimentos de 75 m²; dezenas de edifícios de 170 m²; terminal de Carga Rodoviário de Brasília – DF (Figura 13); anexo I do Itamaraty (Figura 12); Quartel General da 12^a Região Militar- Forte Apache – para o Ministério do Exército (Figura 14).

Figura 12: Anexo I Itamaraty



Figura 13: Terminal de Carga de Brasília



Fonte: Rossignolo (2009)

Figura 14: Quartel General de Brasília - construção



Fonte: Rossignolo (2009)

O autor ainda traz uma Tabela 4 contendo traços de concreto, tipos do concreto, relação água cimento, consumo de cimento e resistência à compressão de acordo com o tipo de cura, de algumas edificações na construção de Brasília – DF.

Tabela 4: Traços de CLE usados em algumas edificações em Brasília -DF

Tipo	Traço (em massa)	Consumo de cimento (Kg/m ³)	Relação A/C	Resistência à compressão (MPa)				
				Cura a vapor			Cura normal	
				6 hs	15 hs	28 dias	3 dias	28 dias
CL0	1: 1,13: 1,59	480	0,46	9,0	13,0	33,4	20,0	34,5
CL1	1: 1,13: 1,59	410	0,48	8,5	11,3	30,5	19,8	32,5
CL2	1: 1,35: 2,05	380	0,53	6,7	9,0	28,8	18,9	30,9
CL3	1: 1,43: 2,22	365	0,56	4,5	6,7	27,1	17,3	30,0
CL4	1: 1,60: 2,58	315	0,58	3,4	4,5	26,6	14,8	28,5
CL5	1: 1,66: 2,73	300	0,60	2,3	2,8	24,3	13,5	27,1
CL6	1: 1,70: 2,92	285	0,62	2,3	2,6	24,0	13,0	25,0
CL7	1: 1,75: 2,74	300	0,63	2,2	2,6	26,5	13,0	26,6
CL8	1: 1,88: 2,83	280	0,65	1,4	2,2	24,8	12,4	24,9

Fonte: Rossignolo (2009), adaptada pelo autor

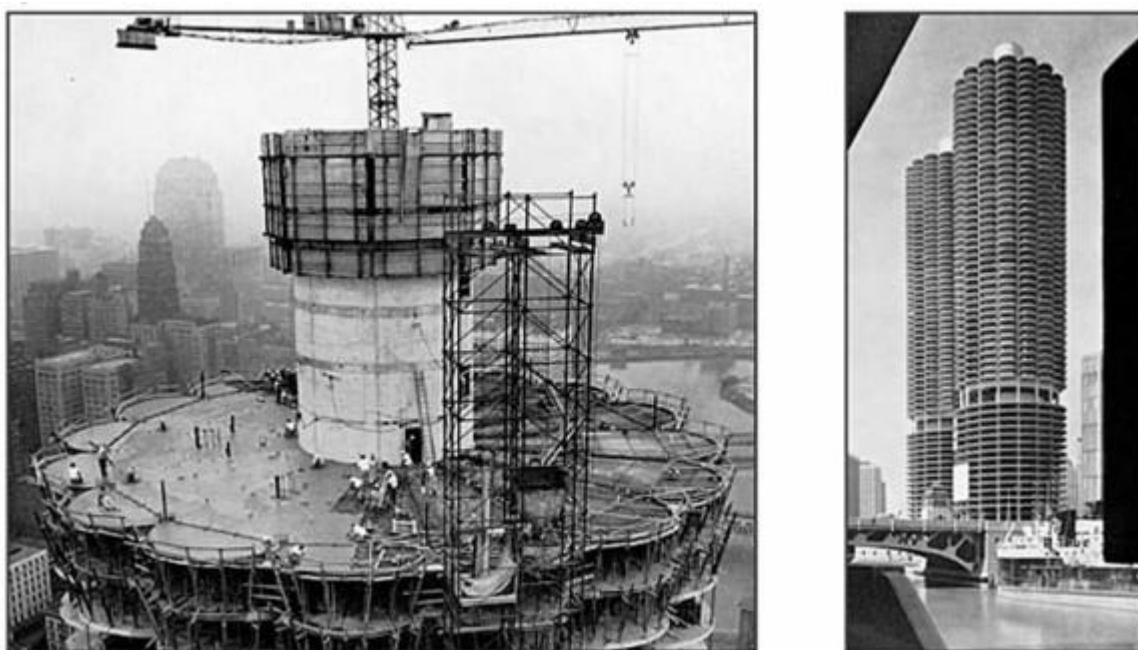
2.5.2.2 APLICAÇÕES NO MUNDO

Pelo mundo as aplicações do CLE aparecem em milhares de obras espalhadas por inúmeros países, se valendo de todos os benefícios da utilização do CLE, principalmente a redução da massa específica.

De acordo com Rossignolo (2009) locais com solo de baixa capacidade de suporte de solicitações, facilidade de transporte e montagem, obras com grandes vãos e estruturas flutuantes são os locais de mais utilização do CLE pelo mundo. O autor afirma também que edificações, pontes de grande importância utilizaram o concreto leve. Estruturas flutuantes, como tanques e plataformas petrolíferas se valeram dessa tecnologia. As figuras abaixo mostram a envergadura das

obras, dando com isso, valor e confiança ao CLE, mostrando que se bem utilizado, contribuem de maneira relevante a construção civil. A Figura 15 mostra os edifícios Marina City em Chicago, nos Estados Unidos (execução e conclusão em 1962). Edifício Shell Plaza, (Figura 16) em Houston, E.U.A. Edifício Standard Bank, em Johannesburg, África do Sul, (Figura 17). Edifício administrativo da BMW, em Munique, Suíça, concluída em 1972, (Figura 18). Ponte Stolma, na Noruega, (Figura 19). Plataforma petrolífera Heidrun TLP, na Noruega, (Figura 20), Pavilhão de Portugal, Lisboa, (Figura 21).

Figura 15: Edifício Marina City, Chicago, E.U.A



Fonte: Rossignolo (2009)

Figura 16: Edifício Shell Plaza, Houston, E.U.A



Fonte: Rossignolo (2009)

Figura 17: Standard Bank, África do Sul



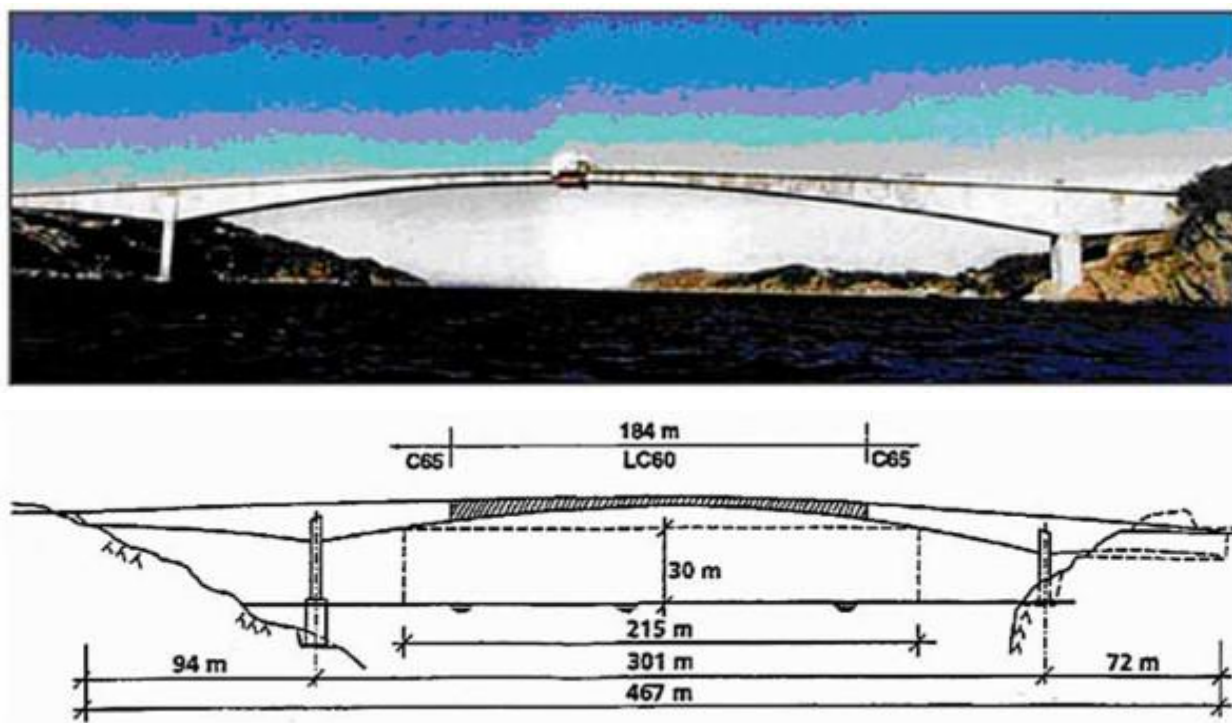
Fonte: Rossignolo (2009)

Figura 18: Sede da BMW, Suíça



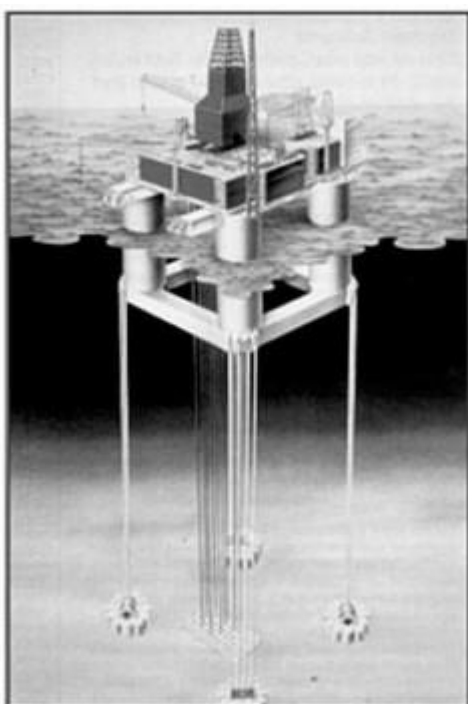
Fonte: Rossignolo (2009)

Figura 19: Ponte Stolma, na Noruega (Detalhe do vão)



Fonte: Rossignolo (2009)

Figura 20: Plataforma Heidrun TLP



Fonte: Rossignolo (2009)

Figura 21: Pavilhão de Portugal, Lisboa



Fonte: Rossignolo (2009)

2.6 PROPRIEDADES DO CONCRETO LEVE ESTRUTURAL

Muitos fatores influenciam o desempenho dos concretos leves, de acordo com Schwantes (2012). Como os agregados usualmente representam mais de 50% do volume dos concretos convencionais, sua substituição por agregados leves promove alterações consideráveis nas propriedades dos concretos (ROSSIGNOLO, 2009). Será destacadas algumas propriedades mais importantes, tanto no estado fresco, como trabalhabilidade, como no estado endurecido como: resistência a compressão, conforto térmico, dosagem e durabilidade.

2.6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência a compressão talvez seja a propriedade de maior importância na produção do concreto. Com o CLE não é diferente, haja vista, a substituição da brita convencional por um agregado leve de menor resistência. Nesse sentido Mehta e Monteiro (2014, pg. 390) afirmam:

Resistência a compressão de projeto de 20 a 34 MPa aos 28 dias são comuns, apesar de que, usando-se alto teor de cimento e agregado leve de boa qualidade e de pequena dimensão (isto é, 9 a 13mm, no máximo), é possível, em algumas usinas de pré-fabricados e de protendido, produzir concreto de 40 a 48 MPa. Agregados leves com microporosidade controlada foram desenvolvidas para produzir concretos leves de 70 a 75 MPa, cuja massa específica geralmente é de 1840 a 2000 kg/m³ (MEHTA E MONTEIRO, 2014)

Rossignolo (2009) cita um estudo de Zhang e Gjorv de 1991 em que foi obtido uma resistência de 102 MPa com um concreto com massa específica de 1735 kg/m³ e um consumo de cimento de 550 kg/m³, sendo que com esse consumo de cimento, o concreto com agregados convencionais atingiu 140 MPa.

No Brasil, o maior valor registrado de resistência à compressão de concreto com argila expandida é de 73 MPa, em estudo de Gomes Neto em 1998 (ROSSIGNOLO, 2009). No entanto, segundo o mesmo autor, para se obter esse valor, foi usado 1200 kg/m³ de cimento e argila de dimensão máxima de 6,3 mm, sendo inviável economicamente o uso desse concreto para alta resistência. Contudo, segundo Rossignolo (2009), para resistência de até 50 MPa e massa específica entre 1400 e 1800 kg/m³, o concreto com argila expandida brasileira tem se mostrado viável do ponto de vista financeiro. Angelin (2014) afirma que os concretos leves apresentam valores de resistência à compressão estáveis mais rapidamente e baixa elevação aos 28 dias, quando

comparado aos convencionais. Afirmar ainda Angelin (2014), que a resistência mecânica dos concretos leves é mais eficiente na argamassa devido à similaridade dos valores do módulo de deformação do agregado e da argamassa e que a ruptura no concreto leve ocorre devido ao colapso na argamassa, e a linha de fratura atravessa os agregados. Na Tabela 5 é feita uma relação entre resistência e consumo cimento.

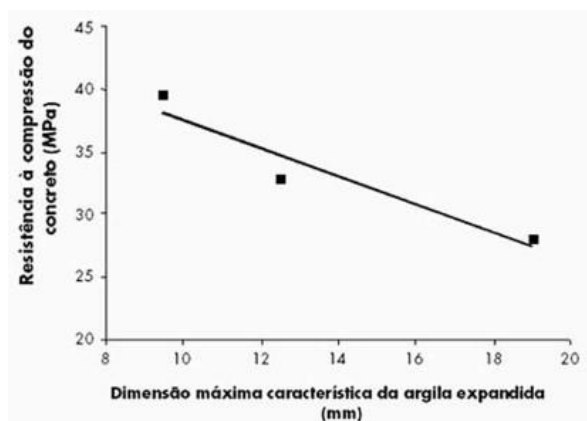
Tabela 5: Relação entre resistência à compressão e consumo de cimento

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	CONSUMO DE CIMENTO (kg/m ³)	
	AGREGADO LEVE SOMENTE	AGREGADO LEVE E AREIA NATURAL
17,24	240 - 305	240 - 305
20,68	260 - 335	250 - 335
27,58	320 - 395	290 - 395
34,47	375 - 450	360 - 450
41,37	440 - 500	420 - 500

Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

Outro fator importante na resistência à compressão dos CLE é a dimensão do agregado. Rossignolo (2009) afirma que a granulometria dos agregados tem mais influência nos valores de massa específica e da resistência à compressão do que nos concretos convencionais, isto porque a resistência a compressão dos agregados leves, como é o caso da argila expandida, são inversamente proporcionais à sua dimensão, ou seja, quanto menor a dimensão do agregado, maior será sua resistência. A Figura 22 mostra essa relação entre dimensão do agregado e sua resistência.

Figura 22: Relação entre resistência à compressão e a granulometria da argila



Fonte: Rossignolo (2003)

2.6.2 CONFORTO TÉRMICO

Considerando que os agregados representam a maior parte do concreto, é natural a grande influência do tipo de agregado nas propriedades térmicas, bem como na sua resistência mecânica nos concretos (SOUZA e MORENO JR, 2010).

O aprisionamento do ar na estrutura celular dos agregados leves reduz a absorção e a transferência de calor em relação aos agregados convencionais, fazendo com isso, o concreto leve, um importante material para ser utilizado na vedação das fachadas e na cobertura das edificações, uma vez que, reduz a transferência de calor para o ambiente interno (ROSSIGNOLO, 2009; SACHT; ROSSIGNOLO; SANTOS, 2010).

Os concretos leves geralmente apresentam maior resistência ao fogo do que os concretos tradicionais, sendo que esta melhor performance pode ser atribuída à contribuição dos seguintes fatores: menor condutividade térmica, menor coeficiente de expansão térmica e maior estabilidade dos agregados leves quando expostos a altas temperaturas (ROSSINGOLO, 2003). Neville (2016) afirma que a baixa condutividade térmica do concreto com agregados leves reduz a elevação da temperatura da armadura na ocorrência de incêndios. Na Tabela 6 mostra essas propriedades térmicas dos concretos leves.

Tabela 6: Propriedades térmicas dos concretos leves

<i>Propriedades</i>	<i>Concreto leve</i>	<i>Concreto normal</i>
Massa específica (kg/m^3)	1850	2400
Resistência à compressão (MPa)	20 - 50	20 – 70
Calor específico ($\text{cal/g.}^\circ\text{C}$)	0,23	0,22
Condutividade térmica (W/m.K)	0,58 - 0,86	1,4 – 2,9
Difusão térmica (m^2/h)	0,0015	0,0025 – 0,0079
Expansão térmica ($\text{microstrain} \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	9	11

Fonte: Rossignolo (2003)

2.6.3 DOSAGEM

De forma geral, os métodos utilizados para dosagem dos concretos convencionais podem ser aplicados para os concretos com agregados leves (ROSSIGNOLO, 2003). Contudo, existe uma dificuldade no uso da relação água/cimento (a/c) em se determinar quanto de água de amassamento seria absorvida pelo agregado, uma vez que, trata-se de um agregado poroso e com nível de absorção de água (10 a 20%) elevado (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016). Segundo Rossignolo (2009) no caso dos agregados leve, deve ser considerada a água absorvida após a preparação do concreto e esse fenômeno pode ser eliminado com a pré-saturação dos agregados. Essa pré-saturação pode ser obtida pela imersão do agregado em água. Rossignolo (2009, pg. 51) afirma que

Para concretos com relação a/c em torno de 0,4 e abatimento do tronco de cone entre 100mm e 200mm, é possível adotar o valor de absorção de água dos agregados após uma hora de imersão como referência para a determinação da quantidade de água a ser adicionada no momento da mistura. Por motivos práticos, esse procedimento é utilizado também para concretos leves com características diferentes das especificadas anteriormente (ROSSIGNOLO, 2009)

Afirma ainda, Rossignolo (2009) que o procedimento mais comum é acrescentar à mistura a quantidade de água que será absorvida pelo agregado, mantendo assim, a relação água/cimento constante.

Alves (2014) afirma que as principais operações de dosagem de concreto consistem na composição da mistura sólida, no consumo de cimento e na dosagem de água. Mehta e Monteiro (2014) dizem que o proporcionamento dos materiais do concreto é um processo por meio do qual é obtido a melhor proporção entre cimento, agregados e água para a produção de concreto que atenda a certas especificações prévias. Afirmam ainda, os mesmos autores que, um dos propósitos da dosagem é obter um produto que tenha desempenho, sendo que a trabalhabilidade do concreto fresco e a resistência do concreto endurecido normalmente são os requisitos mais importantes. Alves (2014) afirma que, quando prevalece a resistência à compressão do concreto, procura-se uma dosagem com consumo mínimo de cimento, de forma a atender à resistência especificada. Nesse sentido, a dosagem também deve atender os requisitos de desempenho ao mínimo custo possível usando componentes com base não só naqueles mais adequados, mas também que sejam disponíveis a preços razoáveis (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

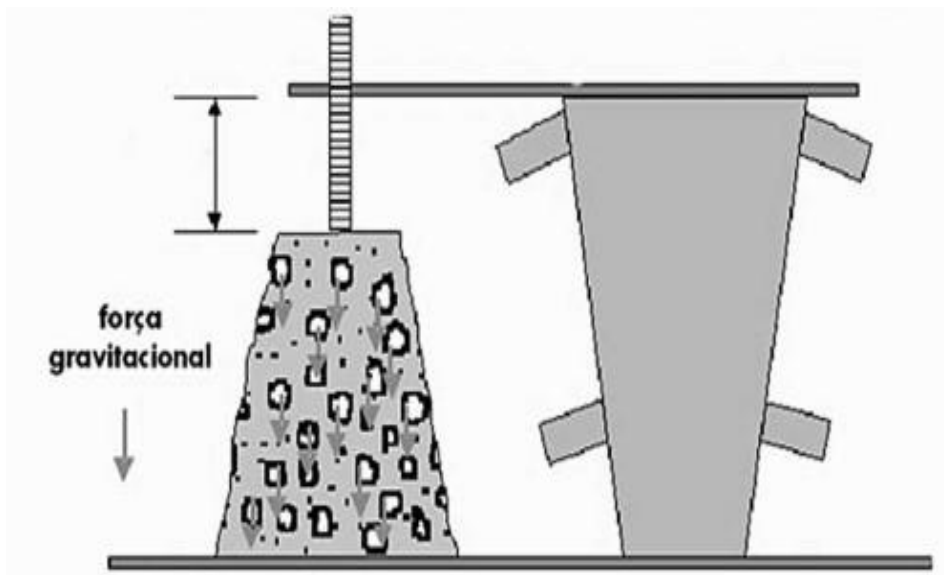
2.6.4 TRABALHABILIDADE

Trabalhabilidade é a propriedade do concreto no estado fresco que determina uma maior ou menor capacidade de ser empregado com determinada facilidade, sem perda de sua homogeneidade (PEREIRA, 2008). A faixa de variação dos valores de abatimento dos concretos leves é normalmente menor que a utilizada para os concretos convencionais, tendo a absorção de água dos agregados muita influência, de acordo com Rossignolo (2009). Mehta e Monteiro (2014), Neville (2016) completam dizendo que devido à baixa densidade e à textura áspera característica do agregado poroso, a trabalhabilidade do concreto necessita de uma atenção especial. Afirmam ainda, Mehta e Monteiro (2014) que em geral, lançamento, compactação e acabamento do concreto com agregado leve requerem esforço relativamente menor, ou seja, mesmo abatimentos de 50 a 70mm podem ser suficientes para obter uma trabalhabilidade similar à do concreto normal, com abatimento de 100 a 125mm. Neville (2016) afirma que a trabalhabilidade com agregados leves para o mesmo abatimento do convencional é melhor e que o fator compactação do concreto com agregado leve é influenciado pela ação da gravidade. Mehta e Monteiro (2014, pg. 389) corroboram dizendo:

O abatimento alto e a vibração excessiva são dois fatores normalmente responsáveis pela sedimentação da argamassa mais pesada, ficando em falta na superfície, onde é mais necessária para o acabamento. Esse fenômeno, chamado de flutuação do agregado graúdo e é inverso do que acontece com o concreto normal, onde a segregação resulta num excesso de argamassa na sua superfície (MEHTA E MONTEIRO, 2014)

Neville (2016) concorda e acrescenta que uma vibração prolongada pode resultar segregação muito mais rapidamente do que com concretos normais. Angelin (2014) afirma que a granulometria do agregado influencia na trabalhabilidade e que quanto menor for o agregado, maior será a quantidade de água para envolver os mesmos. A Figura 23 mostra a relação dos agregados sob ação da gravidade.

Figura 23: Tronco de cone



Fonte: Rossignolo (2009)

2.6.5 DURABILIDADE

Não há efeitos adversos graves na durabilidade devido utilização dos agregados leves, exceto quando a agregado saturado estiver sujeito à ação do gelo e degelo (NEVILLE, 2016). Contudo, Mehta e Monteiro (2014) afirmam que a resistência ao gelo e degelo do concreto leve com ar incorporado é similar à do concreto normal. Afirmam ainda que “a pressão hidráulica causada pela expulsão da água do agregado pode ser acomodada pelo ar incorporado presente na argamassa de cimento, prevenindo, então, dano ao concreto” (pg.392).

Rossignolo (2009) afirma que é recorrente a ideia de que o uso de agregados porosos aumenta a permeabilidade do concreto aos agentes agressivos. No entanto, Mehta e Monteiro (2014) dizem que apesar do concreto leve normalmente apresentar maior absorção de água que o concreto convencional, não significa que ele apresente maior permeabilidade e consequente menor durabilidade. O concreto leve geralmente apresenta menor permeabilidade que o concreto convencional, pois a permeabilidade está principalmente relacionada com a microfissuração que, no concreto convencional, ocorre primeiramente na zona de transição pasta-agregado, pela diferença do módulo de elasticidade entre os dois materiais (CATÓIA, 2012). No concreto leve,

de acordo com Rossignolo e Agnesini (2005), o valor do módulo de elasticidade do agregado é próximo ao da matriz de cimento, apresentando reduzida microfissuração.

Neville (2016) corrobora os autores acima afirmando que a baixa permeabilidade do concreto com agregados leves é resultado de diversos fatores, entre eles, a relação água/cimento da pasta ser menor; a alta qualidade da região de interface ao redor do agregado, não havendo facilidade de fluxos em seu entorno; compatibilização dos módulos de elasticidade das partículas, implicando uma limitada microfissuração, quando aplicado cargas, bem como variação de temperatura. Afirmar ainda Neville (2016) que a liberação de água pelo agregado permite a continuidade da hidratação, com uma consequente redução da permeabilidade.

2.6.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Catóia (2012) afirma que os agregados leves possuem módulo menor que o concreto convencional. No concreto com agregados leves, o módulo de elasticidade do agregado é bem menor do que o módulo dos agregados normais, afirmam Neville (2016) e Catóia (2012). Rossignolo (2009) afirma que normalmente o valor do módulo de deformação do concreto leve varia entre 50% e 80% do valor do módulo de deformação do concreto convencional, para valores de resistência à compressão variando entre 20 e 50 MPa, e que essa relação se aplica também a concreto com argila expandida brasileira. Sendo, portanto, mais deformável que o concreto convencional, quando submetido as mesmas tensões, de acordo com Scobar (2016).

CAPÍTULO 3 METODOLOGIA

O objetivo desta pesquisa foi estudar propriedades do concreto leve com argila expandida, utilizando para tal, atividades sistemáticas para se chegar ao objetivo (LAKATOS e MARCONI, 2008). A confecção dos traços e a produção dos corpos de prova ocorreu no laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Goiás, Campus Jataí –GO. A produção, os ensaios e a caracterização dos materiais ocorreram de acordo com as normas da ABNT vigentes.

A pesquisa se deu em duas etapas, sendo a primeira, a revisão da literatura existente, que de acordo com Cervo, Bervian e Da Silva (2007) procura explicar um problema a partir de referências teóricas publicadas em artigos, livros, dissertações e teses. A segunda etapa foi experimental, manipulando diretamente as variáveis relacionadas com o objeto de estudo (CERVO; BERVIAN; DA SILVA, 2007), ou seja, caracterização dos materiais empregados na produção do concreto, determinação da resistência à compressão do concreto produzido com argila expandida, bem como a avaliação de sua massa específica e do seu índice de absorção de água. A pesquisa, além da bibliográfica e experimental, é do tipo quantitativa havendo estudo de tabelas e valores para comparação. Neves (1996) afirma que estudos quantitativos seguem com rigor um plano previamente estabelecido baseado em hipóteses claramente indicadas e variáveis que são objetos de definição operacional.

Os corpos de prova foram confeccionados com cimento CPV ARI, assim como agregados miúdos de areia natural, adquiridas no comércio local, juntamente com a argila expandida produzida pela Cinexpan. A Figura 24 mostra os materiais utilizados.

Figura 24 – Materiais usados na produção do concreto



Fonte: Autor

Para a produção do concreto leve, a argila foi pré-saturada, ficando submersa por 24 horas. Esse procedimento foi feito para não interferir na relação A/C, conforme Rossignolo (2009). Os traços utilizados se basearam no estudo experimental de Helene e Terzian (1992), que definiram o traço 1:5,0 como sendo o traço normal ou padrão e a partir deste definiram o traço rico (1:3,5) e o traço pobre (1:6,5). Nesse estudo foram produzidos concretos com 3 traços diferentes: 1:3,0 (traço rico), 1:4,5 (traço padrão) e 1:6,0 (traço pobre). O traço rico foi produzido usando um teor de argamassa de 55%, e traço unitário de 1: 1,2: 1,8 e sua relação A/C: 0,40 (determinada experimentalmente). O traço padrão teve um teor de argamassa de 57%, traço unitário de 1: 2,14: 2,36 e relação A/C: 0,51. Já no traço pobre usou-se um teor de argamassa de 59%, traço unitário de 1: 3,13: 2,87, e 0,63 de relação A/C.

Foram produzidos corpos de prova de concreto convencional com as mesmas proporções de materiais do traço rico, ou seja, 1:3,0, com teor de argamassa de 55%, traço unitário de 1: 1,2: 1,8 e relação A/C de 0,42, para posterior comparação.

O abatimento dos concretos produzidos foi determinado de acordo com a NBR 16889 (ABNT 2020), e o valor adotado foi de 120 ± 20 mm. Os valores obtidos no estudo experimental foram: 115 mm (traço pobre); 115 mm (traço padrão); 105 mm (traço rico) e 105 mm para o traço rico convencional. A Figura 25 traz como foi a medição.

Figura 25 – Abatimento tronco de cone



Fonte: Autor

Na figura 26, são apresentados corpos de prova moldados. Após 24 horas foram desenformados e levados para a cura úmida, permanecendo submerso até a data do rompimento, sendo que com 7 e 28 dias foram prensados de acordo com a NBR 5739 (ABNT,2018).

Figura 26 – Corpos de prova moldados (cura úmida)



Fonte: Autor

Na Figura 27, pode ser observada a disposição da argila expandida nos corpos de prova. Nota-se que houve uma boa distribuição do agregado, como também um bom adensamento.

Figura 27 – Disposição dos agregados



Fonte: Autor

Para a realização dos ensaios de resistência à compressão, seguindo a NBR 5739 (ABNT,2018), foi utilizada uma prensa hidráulica EMIC CM100C (Figura 28), do laboratório de análise de concreto da empresa Rio Claro Concretos, que gentilmente preparou os corpos de prova, capeando-os e depois rompendo-os.

Figura 28 - Prensa hidráulica



Fonte: Autor

A Figura 29 traz um corpo de prova rompido. Nota-se que a ruptura se deu de maneira cisalhada de acordo com a NBR 5739 (ABNT,2018). No entanto, houve também corpos de prova que tiveram rupturas no topo e/ou na base abaixo do capeamento.

Figura 29 – Corpo de prova após rompimento



Fonte: Autor

Foi elaborado um estudo caracterizando os agregados na produção do concreto, tanto leve quanto convencional. Nesse estudo, realizado nos laboratórios do Instituto Federal, foram encontradas a massa específica e índice de absorção de água, usando os procedimentos da NBR 9778 (ABNT, 2009), bem como a granulometria dos materiais, seguindo NBR 17054 (ABNT,2022). Os equipamentos utilizados para o estudo foram: balança hidrostática (Figura 32), peneirador mecânica da marca SOLOTEST (Figura 31), estufa de secagem e esterilização da marca SOLAB SL100 (Figura 30).

Figura 30 – Estufa de secagem



Fonte: Autor

Figura 31 – Peneirador mecânico



Fonte: Autor

Figura 32 – Balança hidrostática



Fonte: Autor

CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Nesse tópico serão mostrados os resultados das análises granulométricas dos componentes que foram usados na fabricação do concreto estrutural leve, bem como do concreto convencional.

4.1.1 ARGILA EXPANDIDA

A realização do ensaio de determinação da composição granulométrica seguiu os procedimentos indicados em norma. A argila expandida analisada foi a Cinexpan 2215, com diâmetro máximo de 19 mm de acordo com o fabricante e que, segundo a NBR 17054 (ABNT,2022) é aquele compreendido na faixa de 9,5 a 25 mm – correspondente a brita 1.

Foi feito o peneiramento com duas amostras de argila expandida e os resultados obtidos estão representados na Tabela 7 abaixo, como também o comparativo dos limites granulométricos com a brita na faixa de 9,5 a 25 mm.

Tabela 7: Composição granulométrica da argila expandida

Peneira (mm)	% Retida Acumulada	NBR 17054 %
25,0	0	0-5
19,0	23	2-15
12,5	98	40-65
9,5	99	80-100
6,3	99	92-100
4,76	99	95-100
2,36	99	-
1,18	99	-
0,600	99	-
0,300	99	-
0,150	99	-
Fundo	100	-

Fonte: Autor

De acordo com a NBR 17054 (ABNT,2022) na peneira de 25 mm, a argila expandida se encontra dentro do esperado, no entanto, nas peneiras de 19 mm e 12,5 mm não atendeu o preconizado pela norma. Esses resultados se mostraram parecidos com os encontrados por Rossignolo (2009), conforme Tabela 8.

Tabela 8: Granulometria da argila expandida

Peneira (mm)	% Retida Acumulada	NBR 17054 %
25,0	0	0-5
19,0	8	2-15
12,5	96	40-65
9,5	97	80-100
6,3	97	92-100
4,76	98	95-100
2,36	98	-
1,18	98	-
0,600	99	-
0,300	99	-
Fundo	100	-

Fonte: Rossignolo (2009) adaptada pelo autor

Isso pode ser explicado pelo fato de que, na produção da argila, não haver um controle no tamanho e formato, fazendo com que apareçam várias unidades com irregularidades.

4.1.2 BRITA 1 CONVENCIONAL

A Tabela 9 abaixo mostra a composição granulométrica da Brita nº 1 (convencional), oriunda da Pedreira Rio Claro, no município de Jataí – GO, que foi utilizada na produção do concreto convencional, para posterior comparação com o concreto leve.

Tabela 9: Composição granulométrica da brita nº 1

Peneira (mm)	% Retida Acumulada	NBR 17054 %
25,0	0	0-5
19,0	1	2-15
12,5	53	40-65
9,5	85	80-100
6,3	97	92-100
4,76	98	95-100
2,36	99	-
1,18	99	-
0,600	99	-
0,300	99	-
0,150	99	-
Fundo	100	-

Fonte: Autor

Nesse caso, o peneiramento atendeu os parâmetros estabelecidos pela NBR 17054 (ABNT, 2022).

4.1.3 AREIA NATURAL

O ensaio granulométrico da areia natural, vinda do município de São Simão, apresentou os resultados mostrados na Tabela 10 abaixo.

Tabela 10: Composição granulométrica da areia natural

Peneira (mm)	% Retida Acumulada	NBR 17054 %
6,3	0	0
4,76	2	5
2,36	4	20
1,18	10	30
0,600	30	55
0,300	81	85
0,150	99	95
Fundo	100	-

Fonte: autor

Em conformidade com o estabelecido pela NBR 17054 (ABNT, 2022) e que será utilizada no preparo do concreto leve assim como no concreto convencional. A areia apresentou um módulo de finura de 2.26, dentro do estipulado pela norma que é entre 2.20 a 2.90.

4.1.4 ÍNDICE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Obtivemos o índice de absorção de água da argila expandida bem como do concreto no estado endurecido, de acordo com NBR 9778 (ABNT, 2009). Para tal, utilizamos uma porção pequena de argila expandida e para o concreto endurecido utilizamos corpos de prova cilíndrico de 150 x 300 mm.

Para encontrar a absorção de água da argila, a mesma foi deixada submersa por 24 horas em um tanque de água. Passado esse período, uma porção dessa argila foi pesada e depois levada a uma estufa com temperatura de 105° C e ali permaneceu por cerca de 72 horas para retirar toda umidade. Os resultados estão apresentados na tabela abaixo.

Tabela 11: Determinação da absorção de água

Argila	Peso (gramas)
Saturada	142,83
Seca	127,90

Fonte: Autor

Esses resultados mostraram um índice de umidade de 11,67% e foram parecidos aos resultados obtidos por Rossignolo (2009) e Mehta e Monteiro (2014), dizendo que com um dia de submersão em água, a argila obteve um índice de 10,3% de umidade. Já o índice de absorção de água da brita 1 convencional ficou em 1,14%.

Os valores encontrados para absorção de água dos concretos endurecidos foram de 9,02% e 5,02% para o concreto leve e convencional respectivamente. Valores estes, próximos ao encontrados por Angelin (2014) e Scoabar (2016), conforme Tabela 12.

Tabela 12 – Índice de absorção de água

Concreto	Angelin (2014) (%)	Scobar (2016) (%)
Leve	9,15	9,60
Convencional	4,02	5,59

Fonte: Autor

4.1.5 ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE

Os abatimentos encontrados no concreto com argila deram valores parecidos com os do concreto convencional, variando entre 105 e 115mm nos 3 traços produzidos. Com esses “slumps” foram produzidos concretos com boa trabalhabilidade, com boa compactação, inclusive melhor que a do concreto convencional de acordo com Neville (2016). De acordo com a figura 26 pôde-se notar que não houve flutuação dos agregados, ou seja, não houve a sedimentação da argamassa, conforme afirma Mehta e Monteiro (2014).

4.1.6 MASSA ESPECÍFICA

Nos laboratórios do Instituto Federal, seguindo os procedimentos previsto em norma NBR 9778 (ABNT,2009), foram encontradas a massa específica da brita 1, da areia grossa e do cimento CPV ARI. Da argila expandida usou-se a massa específica fornecida pelo fabricante. Os valores encontrados ficaram parecidos com os de Angelin (2014): areia (2,65 g/cm³), brita (2,90 g/cm³) e cimento (3,15 g/cm³). Os valores estão na Tabela 13.

Tabela 13 – Massa específica dos materiais

Agregado	Massa específica (g/cm³)
Cimento	3,04
Areia grossa	2,64
Brita 1	2,90
Argila expandida	0,64

Fonte: Autor

No concreto endurecido a massa específica encontrada foi de 2360 kg/m³ para o concreto convencional e 1462 kg/m³ para o concreto leve. Nesse estudo, a massa específica do concreto ficou 38% menor que a do concreto convencional. Angelin (2014) encontrou massa específica de 1687 kg/m³, para o concreto leve e 2400 kg/m³ para o concreto convencional. Já Scobar (2016) encontrou em seus estudos massa específica de 1436 kg/m³, para o leve e 2404 kg/m³ para o concreto convencional.

4.1.7 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão foi determinada segundo as prescrições da NBR 5739 (ABNT, 2018). Utilizou-se corpos de prova cilíndrico 100 x 200mm e de 150 x 300mm. Para cada dosagem foram produzidos quatro corpos de prova de 100 x 200mm e três de 150 x 300 mm para rompimento com 7 e 28 dias. Os valores menores obtidos, foram descartados, utilizando, portanto, somente os valores de maior resistência para todos os traços. O consumo de cimento na produção do concreto leve ficou acima dos 300 kg/m³, conforme recomendou Angelin (2014), para assegurar a trabalhabilidade, proteção à armadura e de ancoragem da armadura. A Tabela 14 traz os resultados obtidos com os ensaios nos 3 tipos de traços elaborados.

Tabela 14 – Resistência à compressão dos concretos leves

Tipo	Traço	Relação A/C	Cons. de cimento (Kg/m ³)	Resistência a compressão (MPa) 7 dias	Resistencia a compressão (MPa) 28 dias
Rico	1:1,20:1,80	0,40	554	31,79	35,76
Padrão	1:2,14:2,36	0,51	405	26,79	24,68
Pobre	1:3,13:2,87	0,63	319	21,43	20,91

Fonte: Autor

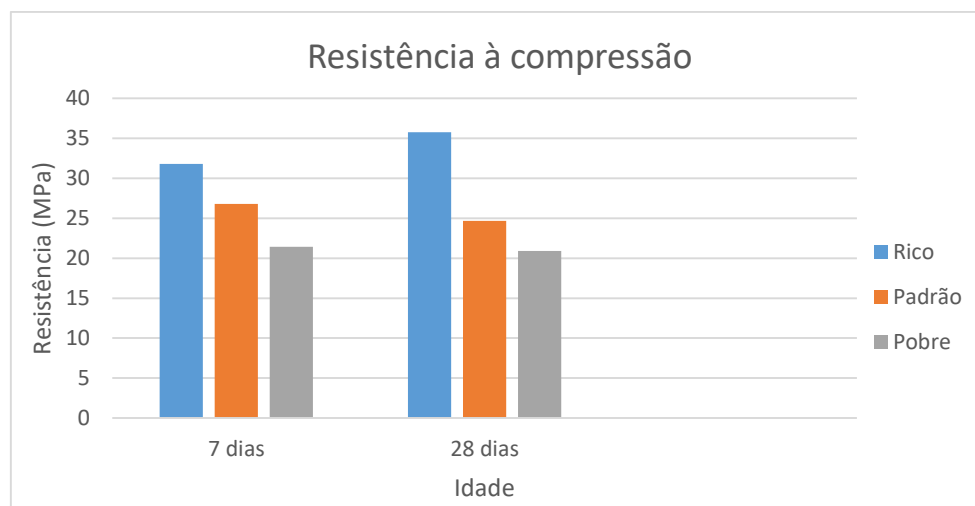
A resistência do traço rico apresentou bons números e como se esperava, com uma pequena relação A/C foi produzido um ótimo concreto. Houve um discreto aumento na resistência de 7 para

28 dias, também esperado, uma vez que o cimento CPV ARI apresenta alta resistência inicial e ao longo da cura a resistência aumenta de maneira mais lenta. Já o traço padrão e o pobre, apesar de apresentar resistência mínima de 20 MPa, mostraram um dado diferente do esperado, uma variação para baixo na resistência, ficando inversamente proporcional à idade, ou seja, resistência com 7 dias maior que com 28 dias. Uma variação pequena. Contudo fora dos padrões esperados. Esse comportamento, de pouca variação, também foi obtido por Angelin (2014), indicando que aos 7 dias os concretos leves apresentam estabilização dos valores de resistência à compressão. A mesma autora afirma que em outro estudo dela própria, essa estabilização dos valores é uma característica dos concretos com agregados leves pois, segundo ela, aos 7 dias de idade, a resistência à compressão da matriz de cimento ultrapassa a resistência à compressão do agregado, principalmente utilizando cimento de alta resistência inicial. Outro dado interessante que se observou foi que no concreto produzido com argila expandida a linha de fratura atravessou os agregados, conforme mostrou Angelin (2014) que diz que a ruptura ocorre devido ao colapso na argamassa.

Esses resultados encontrados dizem respeito ao fck do concreto aos 7 e 28 dias. Não consideramos o fcj do concreto, ou seja, o fck acrescido de uma margem de segurança, conforme descrito na NBR 12655 (ABNT, 2022).

A Figura 33 traz o gráfico de resistências à compressão do concreto com argila expandida, ilustrando melhor a Tabela 14.

Figura 33 – Resistência à compressão do concreto com argila expandida



Fonte: Autor

Também foi produzido um traço de concreto com agregado convencional, usando traço rico para saber a resistência à compressão do mesmo. Nesse caso, os resultados se mostraram dentro do esperado e, também, dentro da normalidade, ou seja, uma alta resistência com 7 dias, haja vista a característica do cimento CPV ARI, bem como uma resistência bem maior com 28 dias, sendo nesse caso, a resistência proporcional a sua idade. A tabela 15 mostra o resultado obtido.

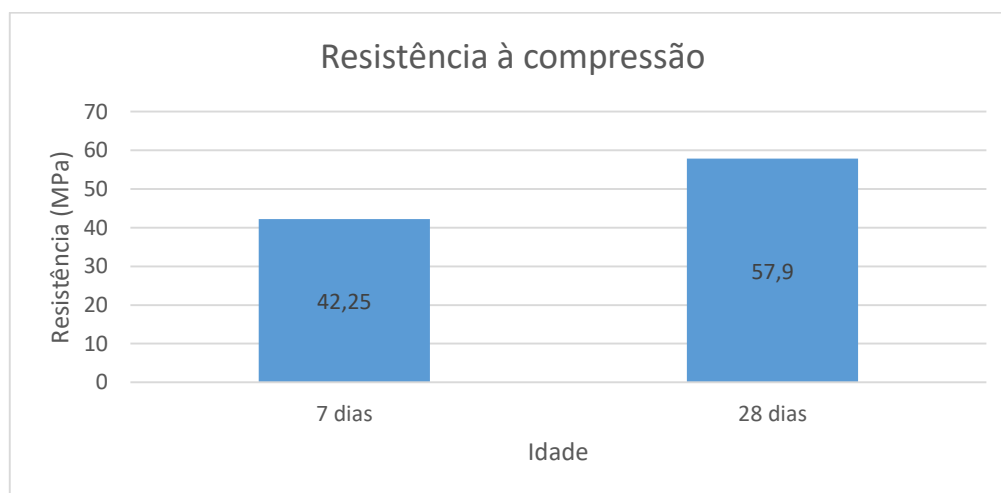
Tabela 15 – Resistência à compressão do concreto convencional

Tipo	Traço	Relação A/C	Consumo de cimento (Kg/m³)	Resistência à compressão (MPa) 7 dias	Resistência à compressão (MPa) 28 dias
Rico	1:1,2:1,8	0,42	548	42,25	57,90

Fonte: Autor

A Figura 34 mostra por meio de um gráfico a Tabela 15, para melhor visualização dos resultados.

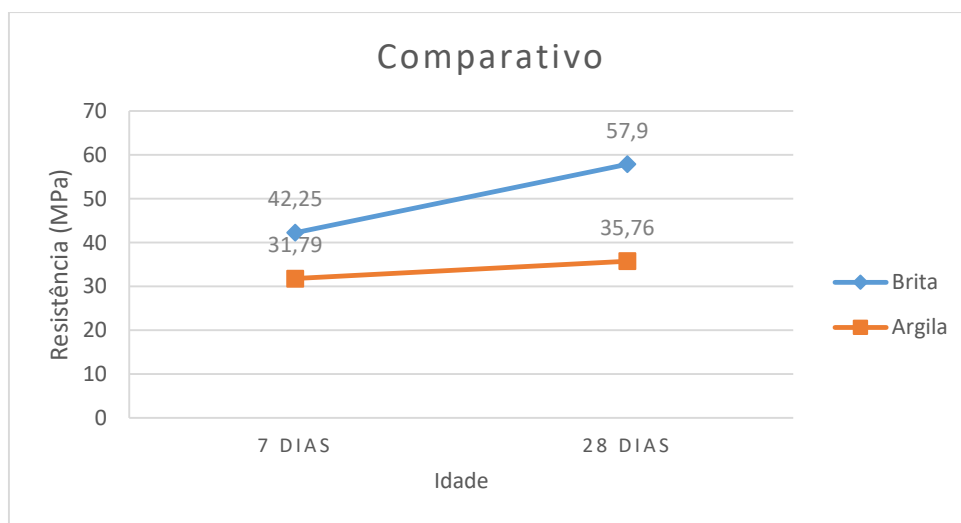
Figura 34 – Resistência à compressão do concreto convencional



Fonte: Autor

Fazendo a comparação dos concretos produzido com a argila expandida e com a brita convencional, pode-se notar uma grande diferença nas resistências. A resistência do agregado convencional é muito superior à argila. Contudo, o concreto produzido com argila expandida tem uma ótima resistência podendo ser usado com tranquilidade para fins estruturais. Abaixo um gráfico comparativo somente com o traço rico.

Figura 35 – Resistências (Comparativo)



Fonte: Autor

CAPÍTULO 5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados encontrados pode-se concluir que o concreto leve produzido com argila expandida tem resistência à compressão menor que o concreto convencional, porém, nos traços elaborados, possuem resistências mínimas de 20 MPa. O cimento CPV ARI possivelmente interferiu nessas resistências uma vez que, em outros estudos pesquisados com outros tipos de cimento, como por exemplo o CP II, não foi atingido a resistência mínima. A argila expandida apropriada para se obter boas resistências à compressão é a 1506, referente a brita 0 convencional porém, mesmo usando, no nosso estudo a argila expandida 2215, referente a brita 1, foram obtidas resistências mínimas exigidas pela norma.

Em relação a caracterização da argila foi visto que ela possui uma granulometria mais uniforme, isto devido ao seu processo de fabricação. Por isso no peneiramento uma alta retenção na peneira 19 e 12,5mm. Em relação a absorção de água é bem mais alta que a brita convencional, no entanto dentro dos valores mostrados nas pesquisas de outros autores, em torno de 10%. A massa específica do concreto endurecido também ficou dentro do esperado, com valores abaixo de 2000 kg/m³, para o concreto leve e próximo a 2400 kg/m³ para o concreto convencional.

Os traços para a produção dos concretos, tiveram relações A/C dentro do intervalo de 0,40 até 0,63 e com isso boa trabalhabilidade, mostrando abatimentos entre 105 e 115mm.

O concreto leve mostrou resistência à compressão bem menor que o convencional como também uma variação bem pequena em relação a sua idade, inclusive, nos resultados obtidos, mostrando resistência no 7º dia maior que no 28º dia, nos traços padrão e pobre. Esse dado é um fator importante e deve ser alvo de pesquisas futuras. Já no concreto convencional, ocorreu a normalidade, ou seja, uma grande diferença na resistência de acordo com o tempo de cura.

Apesar de uma resistência menor que o concreto convencional, o concreto leve se mostra uma boa opção para a construção civil, quando se busca uma redução no peso próprio das estruturas, impactando diretamente nas fundações e consequentemente, reduzindo os custos na construção de uma forma mais global.

Por fim, concluímos também que o estudo atendeu os objetivos procurados e que precisamos buscar mais informações sobre o concreto leve estrutural produzido com argila expandida, sobre sua viabilidade em relação à economicidade na construção, para que sua

utilização seja mais difundida, uma vez que, o mesmo se mostra, se bem dosado, uma excelente opção quando se busca redução de peso na estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. D. **Manual de tecnologia do concreto**. Série Compêndios 5. 4 ed. Goiânia: PUC Goiás, 2014.

ANGELIN A. F. **Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais**. 2014. 98f. Dissertação (Mestrado) – Universidade estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia. Limeira SP, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**. Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**. Ensaio de Compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**. Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT 12655** – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT 16889** - Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17054** – Agregados – Determinação da Composição Granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

BAUER, L.A.F. **Materiais de Construção- Novos Materiais para a Construção Civil**. V.1. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BOGAS, A. GOMES, A. **Compressive behavior and failure modes of structural lightweight aggregate concrete – Characterization and strength prediction**. Materials and Design, v.46, pp.832–834, 2013.

CATÓIA, T. **Concreto ultraleve estrutural com pérolas de EPS: caracterização do material e estudo de sua aplicação em lajes**. 2012. 154f. Tese (Doutorado em engenharia de estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2012.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.; DA SILVA, R. **Metodologia científica**. 6 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

FABRO, F. et al. Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto. **Revista Ibracon**. v.4, n.2, pg. 191-212, junho, 2011.

FRANÇA, A. A. R., ROCHA, R. O., FERES, C. I. M. A. Concreto leve estrutural com argila expandida: determinação do traço. **Revista Humanidades**. v.7, n.2.pg. 34-42, 2018.

GARCIA, P. H. **Abordagem inversa para obtenção de propriedades mecânicas de agregados em concretos leves por meio de simulação computacional**. 2017. 88f. Dissertação (Mestrado em modelagem computacional) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de cimento Portland. **Revista Ibracon**. N. v. pg.905-944. São Paulo, 2010.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. 1 ed. São Paulo: Pini, 1992.

ISAIA, G. et al. Concreto eco amigável para estruturas sustentáveis. **Revista Mix Sustentável**. v.7, n.1, pg.33-46. Florianópolis, 2020.

ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Vol. 1 e 2. São Paulo, Ibracon, 2008.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Metodologia científica**. 5 ed. São Paulo: Atlas S.A., 2008.

LOPES, D. C.; OLIVEIRA, T. G.; SCHIMANOWSKI, Z. R. E. Uso de Resíduo em Concreto Leve: Uma Opção Sustentável. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**. v.10, n. esp, pg. 02-16. Rio Grande do Sul, julho, 2021.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto- Estrutura Propriedades e Materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MONCADA, J. E. C. M. et al. Estudo da adição de argila expandida e EPS como agregados na elaboração de concreto leve. **Revista Teccen**. n.12, v.1, pg. 02-07, jan./jun. 2019 .

MORAVIA, W. G. et al. Caracterização Microestrutural da Argila Expandida para Aplicação como Agregado em Concreto Estrutural Leve. **Revista Matéria**. n.52, pg. 193-199. Belo Horizonte, 2006.

MOURA, R. C. A. et al. **O concreto como material de construção**. Cadernos de Graduação – Ciências e Tecnologias. n.17, v.1, pg.49-53, Sergipe, 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5 ed. São Paulo: Pini, 2016.

NUNES, J. J. B. C.; TEIXEIRA, A. M. A. J.; SARAIVA, R. M. D. C. Caracterização Morfológica do Agregado Leve de Argila Expandida Brasileira com a Utilização do AIMS. **Revista Ambiente Construído**. v.21, n. 03, pg. 203-227, Porto Alegre. Jul./Set., 2021.

OLIVEIRA, H. A. et al. Estudo da Variação Granulométrica de Agregado Sintético para Fabricação de Placas pré-moldadas de Concreto não Estrutural. **Revista Matéria**. n.1, v.23, 2018.

PEREIRA, M. R. **Estudo da adição de argila expandida na formulação de concretos leves**. 2008. 82f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2008.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 13 ed. São Paulo: Globo, 1998.

PINHEIRO, L. M. Concreto leve estrutural com pérolas de EPS. **Revista Concreto e Construções**. n.72, pg. 134-141, São Paulo, 2013.

RODRIGUES, A. V. **Aplicação de uma argila expansiva de jazida do Rio Grande do Sul à produção de agregados para concretos leves**. 2018. 112f. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. Concreto estrutural leve. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. Cap.43, v.2, pg. 1333-1362. São Paulo, 2005.

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

_____. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. 2003. 220f. Tese (Doutorado em ciências e engenharia de materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A.; SANTOS, W. N. Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida. **Revista Matéria**. v.15, n.1, pg. 31-39, São Carlos, 2010.

SCHWANTES, C. G. G. **Concreto estrutural leve: resistência à compressão e modulo de elasticidade usando argila expandida com agregado graúdo**. 2012. 74f. Monografia (Trabalho de conclusão de curso em engenharia civil) – Universidade Federal do rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SCOBAR, R.L. **Concreto leve estrutural**: substituição do agregado graúdo convencional por argila expandida. 2016. 48f. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016.

SILVA, B. M. M. **Betão leve estrutural com agregados de argila expandida**. 2007. 180f. Dissertação (Mestrado em estruturas de engenharia civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Lisboa, 2007.

SOUZA, A. A. A.; MORENO JR, A. L. Avaliação do tipo de agregado e da reidratação do concreto submetido à elevadas temperaturas. **Revista Ibracon**. v.3, n.4, pg. 477-493, 2010.

TORRES, A. J. **Influência da alta temperatura nas propriedades mecânicas do concreto leve de alto desempenho**. 2002. 149f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

TUTIKIAN, B. F. et al. Desenvolvimento de concretos leves para o Concrebol. **Revista Concreto e Construções**. n.85, pg. 84-90, São Paulo, 2017.

WEIRICH, J. B. **Análise da perda de resistência do concreto leve com argila expandida e fibras de polipropileno, após a exposição a elevadas temperaturas**. 2017. 94 f. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Pato Branco, 2017.