

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS – UNIS/MG
ENGENHARIA CIVIL**

IGOR CRUZ SILVA

**CONCRETO LEVE COM ARGILA EXPANDIDA E POLIESTIRENO EXPANDIDO:
Estudo de dosagens, comparativo de resistência à compressão e quantitativo de material**

**Varginha/MG
2019**

IGOR CRUZ SILVA

**CONCRETO LEVE COM ARGILA EXPANDIDA E POLIESTIRENO EXPANDIDO:
Estudo de dosagens, comparativo de resistência à compressão e quantitativo de material**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de Bacharelado, sob orientação da Professora Esp. Luana Ferreira Mendes.

**Varginha/MG
2019**

IGOR CRUZ SILVA

**CONCRETO LEVE COM ARGILA EXPANDIDA E POLIESTIRENO EXPANDIDO:
Estudo de dosagens, comparativo de resistência à compressão e quantitativo de material**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de Bacharelado, sob orientação da Professora Esp. Luana Ferreira Mendes.

Aprovado em: ___/___/___

Profa. Esp. Luana Ferreira Mendes (Orientadora)

Componente da banca examinadora I

Componente da banca examinadora II

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças para enfrentar mais este desafio e desenvolver este trabalho, a minha família, a minha namorada, aos meus colegas de classe e aos professores por todo apoio e incentivo para vencer mais uma fase deste ciclo.

"A mudança não acontecerá se nós esperarmos por outra pessoa ou se esperarmos por algum outro momento. Nós somos as pessoas pelas quais esperávamos. Nós somos a mudança que buscamos."

Barack Obama.

RESUMO

Dentre os materiais com função estrutural o concreto é um dos mais utilizados no mundo e uma de suas características é o seu peso próprio elevado. Na tentativa de reduzir os esforços estruturais gerados pelo peso próprio do concreto e conseqüentemente baixar os custos das edificações, as construtoras têm reconhecido a necessidade da utilização de concreto leve na construção civil. A forma mais habitual de se obter concretos leves é introduzindo ar em sua composição e uma das alternativas para realização dele é utilizando agregados porosos em sua mistura. O presente trabalho tem como objetivo analisar e comparar as resistências à compressão dos traços de concreto convencional e concreto leve com a substituição do agregado graúdo por argila expandida e poliestireno expandido. A caracterização dos agregados foi verificada conforme a NBR NM 248 (2003), NBR NM 45 (2006), NBR NM 53 (2009) e a NBR 9776 (1987). Para determinação das propriedades das dosagens, verificou-se a consistência e a resistência à compressão conforme a NBR NM 67 (1998) e NBR 5739(1994). Os resultados indicaram as análises realizadas entre os concretos convencionais e os concretos leves. Através dessa comparação foi possível analisar a viabilidade do concreto leve com a utilização da argila expandida e do poliestireno expandido como agregado graúdo tanto na resistência à compressão quanto consumo de materiais, obtendo resultados satisfatórios quanto a utilização da argila expandida.

Palavras-chave: Concreto leve. Argila expandida. Poliestireno expandido.

ABSTRACT

Among the structural function materials, concrete is one of the most used in the world and one of its characteristics is its high self-weight. To reduce the structural efforts generated by the concrete's own weight and consequently lower the costs of buildings, construction companies have recognized the need to use lightweight concrete in civil construction. The most common way to obtain lightweight concrete is to introduce air into its composition and one of the alternatives for making it is to use porous aggregates in its mixture. The present work aims to analyze and compare the compressive strengths of conventional and lightweight concrete traces with the replacement of coarse aggregate by expanded clay and expanded polystyrene. The characterization of the aggregates was verified according to NBR NM 248 (2003), NBR NM 45 (2006), NBR NM 53 (2009) and NBR 9776 (1987). To determine the properties of the dosages, consistency and compressive strength were verified according to NBR NM 67 (1998) and NBR 5739 (1994). The results will indicate the analyzes carried out between conventional and lightweight concretes. Through this comparison it was possible to analyze the viability of lightweight concrete using expanded clay and expanded polystyrene as coarse aggregate in both compressive strength and material consumption.

Keywords: *Lightweight concrete. Expanded clay. Expanded polystyrene.*

LISTA DE FIGURA

Figura 1 - Edifício empresarial Rochaverá Corporate Towers, em São Paulo, SP.	24
Figura 2 - Argila Expandida.....	25
Figura 3 - Ginásio do Clube Atlético Santista.....	26
Figura 4 - Flocos de isopor utilizado na fabricação do concreto leve	28
Figura 5 - Areia média, fina e grossa.....	31
Figura 6 - Brita	32
Figura 7 - Curva granulométrica.....	34
Figura 8 - Frasco de Chapman.....	41
Figura 9 - Gráfico para a determinação da relação água/cimento (a/c) em função das resistências do concreto e do cimento aos 28 dias de idade.....	46
Figura 10 - Equipamentos para a realização do ensaio de abatimento	50
Figura 11 - Esboço dos tipos de ruptura.....	53
Figura 12 - Fluxograma dos processos de pesquisa.....	55
Figura 13 - Peneiras utilizadas para a caracterização da areia	57
Figura 14 - Material retido em cada peneira	58
Figura 15 - Peso do recipiente	59
Figura 16 - Agregado graúdo sem exceder os 15mm acima da borda superior	59
Figura 17 - Frasco de Chapman.....	60
Figura 18 - Frasco pronto para a leitura do volume.....	61
Figura 19 - Argila seca.....	62
Figura 20 - Argila saturada com a superfície seca.....	62
Figura 21 - Amostra submersa em água.....	63
Figura 22 - Massa submersa em água da argila.....	63
Figura 23 - Areia no estado úmido	64
Figura 24 - Areia no estado seco	64
Figura 25 - Separação e pesagem dos materiais	66
Figura 26 - Separação e pesagem dos materiais	67
Figura 27 - Medição do Slump Test	68
Figura 28- Corpos de prova.....	68
Figura 29 - Corpos de prova na câmara úmida.....	69
Figura 30 - Corpo de prova	70
Figura 31- Concreto TCA	82

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica da areia	73
Gráfico 2 - Curva granulométrica da brita	74
Gráfico 3 - Curva granulométrica da argila expandida	75
Gráfico 4 - Curva granulométrica do poliestireno expandido	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Teores dos componentes do cimento.....	29
Tabela 2 - Resistência do cimento Portland de alta resistência inicial	30
Tabela 3 - Brita e suas granulometrias.....	32
Tabela 4 - Série de peneiras	35
Tabela 5 - Massa mínima, por amostra de ensaio.....	35
Tabela 6 - Classes de agressividade ambiental.....	43
Tabela 7 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto.....	43
Tabela 8 - Valores de Sd em função do rigor da produção	45
Tabela 9 - Estimativa do consumo de água por metro cúbico de concreto em função do Diâmetro Máximo Característico do Agregado e do abatimento da mistura	47
Tabela 10 - Volume de agregado graúdo compactado por m ³ de concreto.....	48
Tabela 11 - Tolerância de tempo para o ensaio de compressão em função da idade de ruptura	52
Tabela 12 - Quantidade de corpos de prova	70
Tabela 13 - Composição granulométrica, módulo de finura e diâmetro máximo da areia	72
Tabela 14 - Composição granulométrica da brita, módulo de finura e diâmetro máximo da brita	73
Tabela 15 - Composição granulométrica, módulo de finura e o diâmetro máximo da argila expandida.....	74
Tabela 16 - Composição granulométrica, módulo de finura e o diâmetro máximo do agregado	75
Tabela 17 - Massa unitária dos agregados	76
Tabela 18 - Massa específica da areia.....	77
Tabela 19 - Massa específica do agregado seco, massa específica do agregado na condição saturado superfície seca e massa específica aparente	78
Tabela 20 - Absorção de água dos agregados	78
Tabela 21 - Traço em massa do concreto convencional	79
Tabela 22 - Traço em massa do concreto leve com 100% de argila expandida.....	80
Tabela 23 – Traço em volume do concreto leve com 100% de poliestireno expandido	80
Tabela 24 – Índice de consistência	81
Tabela 25 – Traço em volume do concreto leve com poliestireno expandido corrigido	81
Tabela 26 – Traço em massa do concreto leve com argila expandida corrigido.....	82

Tabela 27- Resistência à compressão axial e massa específica do concreto convencional e concretos leves.....	83
Tabela 28 - Traço em massa do concreto leve com a argila expandida com alteração do consumo de cimento	84
Tabela 29 - Resistência à compressão axial e massa específica do concreto convencional e o concreto leve com argila expandida.....	84
Tabela 30 - Fator de eficiência	85
Tabela 31 - Comparativo entre concretos leves.....	86
Tabela 32 - Comparativo entre concretos leves com poliestireno expandido	87
Tabela 33 - Quantitativo de materiais	88
Tabela 34 - Quantitativo de material para a viga de 3 metros.....	89
Tabela 35 - Quantitativo de material para a viga de 4 metros.....	89
Tabela 36 - Quantitativo de material para a viga de 5 metros.....	90
Tabela 37 - Área de aço das vigas dimensionadas	90

LISTA DE ABREVIACÕES

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ACI – American Concrete Institute;

As – Área de aço;

cm³ – Centímetros cúbicos;

dm³ – Decímetros cúbicos;

EPS – Poliestireno expandido;

F_{ck} – Resistência característica do concreto à compressão

g – Gramas;

Kg/m³ – Quilogramas/metro cúbico.

kN/m³ – Quilo newton/metro cúbico;

Km – Quilômetros;

m – Metros;

mm – Milímetros;

MPa – Mega pascal;

μm – Micrómetro;

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo geral.....	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
3. REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1 Concreto convencional	19
3.2 Concreto leve	19
3.2.1 Tipos de concretos leves	20
3.2.2 Dosagem do concreto leve	21
3.2.3 Propriedades do concreto leve	22
3.2.3.1 Massa específica e resistência a compressão	22
3.2.3.2 Resistência ótima.....	22
3.2.4 Aplicação do concreto leve	23
3.3 Argila expandida	24
3.3.1 Argila expandida como agregado no concreto leve	25
3.4 Poliestireno expandido	26
3.4.1 Poliestireno expandido no concreto leve.....	27
3.5 Cimento Portland	28
3.6 Cimento Portland CPV	29
3.6.1 Classes de resistência	30
3.7 Caracterização dos agregados	30
3.7.1 Agregados – Amostragem.....	32
3.7.2 Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório.....	33
3.7.3 Agregados - Determinação da composição granulométrica	33
3.7.4 Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios	36
3.7.4.1 Método C	37
3.7.5 Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.....	37
3.7.5.1 Procedimento	38
3.7.5.2 Massa específica do agregado seco	39
3.7.5.3 Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca.....	39
3.7.5.4 Massa específica aparente.....	39

3.7.6 Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman	40
3.7.6.1 Execução do ensaio	40
3.7.6.2 Resultados	41
3.7.7 Índice de forma	42
3.8 Concreto de cimento Portland, preparo, controle, recebimento e aceitação	42
3.9 Dosagem do concreto leve.....	44
3.9.1 Dosagem experimental do concreto – ABCP/ACI	44
3.9.2 Determinação da resistência de dosagem.....	45
3.9.3 Fator água/cimento.....	45
3.9.4 Estimativa do consumo de água	46
3.9.5 Estimativa do consumo de cimento	47
3.9.6 Estimativa do consumo de agregado graúdo	48
3.9.7 Estimativa do consumo de agregado miúdo	48
3.10 Moldagem do concreto leve	49
3.10.1 Amostragem.....	49
3.11 Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone	50
3.12 Cura do concreto	51
3.13 Resistência a compressão.....	51
3.13.1 Cálculo da resistência.....	52
3.13.2 Apresentação dos resultados.....	53
3.14 Propriedades do concreto leve.....	53
3.14.1 Massa específica e resistência a compressão.....	53
3.14.2 Resistência ótima	54
4. METODOLOGIA	55
4.1 Caracterização dos agregados.....	56
4.1.1 Composição granulométrica	56
4.1.2 Determinação da massa unitária	58
4.1.3 Determinação da massa específica do agregado miúdo	60
4.1.4 Massa específica do agregado graúdo.....	62
4.1.5 Absorção de água.....	64
4.2 Dosagem dos traços.....	65
4.3 Produção dos traços em laboratório	66

4.3.1 Mistura dos materiais	66
4.3.1.1 Concreto convencional	66
4.3.1.2 Concreto leve	67
4.3.3 Ensaio de consistência.....	67
4.3.4 Adensamento dos corpos de prova	68
4.3.5 Procedimento de cura.....	69
4.4 Resistência a compressão.....	69
4. Análise dos resultados	71
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
5.1 Composição granulométrica.....	72
5.2 Massa unitária	76
5.3 Massa específica do agregado miúdo	77
5.4 Massa específica do agregado graúdo	77
5.5 Absorção de água dos agregados.....	78
5.6 Dosagem experimental.....	79
5.6.1 Concreto convencional.....	79
5.6.2 Concreto leve com argila expandida.....	79
5.6.3 Concreto leve com poliestireno expandido	80
5.7 Propriedades no estado fresco.....	80
5.8 Propriedades no estado endurecido	83
5.9 Fator de eficiência.....	85
5.10 Comparativo entre traços de concreto leve.....	85
5.10.1 Argila expandida.....	85
5.10.2 Poliestireno expandido	86
5.11 Comparativo de quantitativo entre o concreto leve e o concreto convencional..	87
5.11.1 Quantitativo de material	87
5.11.2 Redução no consumo de material em vigas	88
5.11.3 Redução do consumo de aço em vigas	90
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	92

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é um ramo onde existem altos investimentos econômicos e tecnológicos. Ao longo dos anos, pesquisas foram desenvolvidas e testes foram aplicados a esse ramo que permitiram novas descobertas e assim que foi surgindo novas descobertas surgiu uma proposta que teria como objetivo o intuito de diminuir os esforços estruturais e baixar o custo da edificação, e as empresas responsáveis por executar as construções, começaram a perceber que estaria se tornando viável a utilização do concreto leve como função estrutural na construção civil (BELINE, 2017).

Segundo Rossignolo (2009), o concreto leve estrutural vem sendo utilizado em vários setores da construção civil. O concreto leve apresenta diversos benefícios dentre eles, a diminuição da massa específica do concreto, a redução de esforços estruturais, a economia de fôrmas e a redução de custos com transporte e montagem. Para que o concreto seja caracterizado como leve é necessário que seja utilizado algum tipo de agregado leve dentro de sua composição, como por exemplo o poliestireno expandido e a argila expandida.

A utilidade do poliestireno expandido na construção civil vem mostrando para o mercado vários modos de ser utilizado e que traga benefícios ao ramo, as suas principais características é a sua baixa massa específica, podendo gerar a redução de custos por diminuir a carga na estrutura em geral, além do benefício de ser um ótimo isolante térmico e acústico (ISOFÉRES, 2016). Diante de tantas possibilidades do uso do poliestireno expandido dentro da construção civil, destaca-se o seu uso na preparação do concreto leve, que pode ser utilizado em obras de pequeno, médio e grande porte. Com o poliestireno sendo utilizado em vários setores na construção civil veio surgindo outros tipos de materiais que poderiam ser utilizados de forma que iriam trazer benefícios ao local onde ele seria utilizado, um desses materiais é argila expandida que tem algumas características semelhantes ao poliestireno expandido.

Conforme Moravia (2007), a argila expandida é produzida por aquecimento de determinados tipos de argila em temperatura de aproximadamente 1200°C. Ao atingir essa temperatura, parte dos constituintes da argila se funde e outra parte se decompõe quimicamente liberando gases que não são expelidos devido à fase líquida que envolve a partícula. Desta forma, os gases são incorporados pela massa sintetizada e a partícula pode expandir em até sete vezes o seu volume inicial. A argila expandida é encontrada em diversos tamanhos, mas é bastante utilizada em indústrias têxteis, jardinagem e paisagismo, isolamento térmico e enchimento leve. Nesses casos o processo produtivo não interfere nas características

necessárias, entretanto para a utilização em concretos leves estruturais, a absorção de água pelo agregado influencia no produto.

Perante os benefícios que os agregados leves podem trazer a construção civil, foi definido a proposta do presente trabalho, fazer um estudo da viabilidade do uso do concreto leve com o poliestireno expandido e a argila expandida.

O objetivo deste trabalho trata-se de analisar as características físicas e propriedades mecânicas dos traços de concreto leve com substituição total do agregado graúdo por argila expandida e o poliestireno expandido.

No capítulo 3 será apresentado o referencial teórico necessário para entender e compreender os conceitos importantes sobre a proposta do trabalho, nele contém as definições, itens a serem verificados e os métodos utilizados para obter os dados para se chegar ao objetivo final.

O capítulo 4 encontra-se a metodologia, na qual consta toda a parte de execução dos ensaios de laboratório que estão descritos no referencial. Na metodologia está sendo demonstrado os processos necessários, materiais a ser utilizados nos ensaios de caracterização, procedimentos para a produção do concreto em laboratório, o passo a passo do ensaio de consistência, a forma utilizada para o adensamento dos corpos de prova, o tipo de cura adotada, modo de romper os corpos de prova e o que irá conter nos resultados e discussões

Os resultados e as discussões estão dispostos no capítulo 5. Nele estão sendo demonstrado todos os resultados encontrados nos ensaios de caracterização, contém o traço do concreto convencional e os traços do concreto leve, traços onde irá conter a substituição dos agregados graúdos por argila expandida e poliestireno expandido, também irá conter a análise dos resultados obtidos, comparando a resistência a compressão, a massa específica, o fator de eficiência dos concretos dosados e um comparativo de quantitativo de material por metro cúbico de concreto e em vigas dimensionadas apenas para comparar o consumo de material. Tal comparativo será realizado levando em consideração os traços que obtiverem a resistência a compressão ideal para que seja considerado um concreto estrutural.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral estudar e analisar as propriedades do concreto leve com o poliestireno expandido e a argila expandida em substituição total do agregado graúdo convencional.

2.2 Objetivos específicos

- Desenvolvimento do referencial teórico;
- Caracterizar por meio de testes em laboratório a argila expandida;
- Caracterizar por meio de testes em laboratório o poliestireno expandido;
- Realizar um estudo de dosagem para comparar o concreto com agregados convencionais e o concreto leve com a utilização de argila expandida e o poliestireno expandido;
- Analisar as características dos concretos convencional e concreto leve com argila expandida e poliestireno expandido no estado fresco;
- Analisar as características dos concretos convencional e concreto leve com argila expandida e poliestireno expandido no estado endurecido;
- Comparar os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão com trabalhos já publicados;
- Comparar os resultados dos consumos de materiais para um metro cúbico de concreto e em vigas dimensionadas com vãos de 3, 4 e 5 metros;

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Concreto convencional

Segundo Pedroso (2009) o concreto é um material compósito que consiste de um meio aglomerante no qual estão aglutinadas partículas de diferentes naturezas: O aglomerante é o cimento em presença de água; O agregado é qualquer material granular, como areia, pedregulho, seixos, rocha britada, escória de alto-forno e resíduos de construção e de demolição, se as partículas de agregado são maiores do que 4,75mm, o agregado é dito graúdo; caso contrário, o agregado é miúdo; Os aditivos e adições são substâncias químicas adicionadas ao concreto em seu estado fresco que lhe alteram algumas propriedades, adequando-as às necessidades construtivas. O segredo para que mistura se comporte como descrito acima está justamente na presença do cimento. As reações químicas entre os minerais do cimento e a água (reações de hidratação) resultam na pasta que se solidificará com o tempo, reunindo em torno de si os agregados.

Para Carvalho (2014), o concreto é um material composto de cimento, agregado graúdo e miúdo e água. As diferentes misturas que podem ser realizadas contendo os componentes do concreto tem como resultado os seguintes dados:

- Pasta: cimento + água;
- Argamassa: pasta + agregado miúdo;
- Concreto; argamassa + agregado graúdo;
- Microconcreto: concreto em que o agregado graúdo tem dimensões reduzidas;
- Concreto de alto desempenho: considera-se, em geral, o concreto em que a resistência à compressão supera os 50 MPa;

Como o cimento é um material relativamente caro, o principal objetivo da utilização dos agregados de maiores dimensões é reduzir os custos sem que a qualidade do material seja prejudicada.

3.2 Concreto leve

Os concretos leves têm como característica a redução da massa específica comparando com o concreto convencional, tal redução causada pela substituição do agregado convencional pelo agregado leve ou por ar. O concreto leve pode ser subdividido em concreto com agregados

leves, concreto celular ou aerado e concreto sem finos. De modo geral, são caracterizados por apresentar massa específica aparente abaixo de 2000 kg/m^3 e é considerado o único com possibilidade de atingir a resistência necessária para ser considerado um concreto estrutural (Rossignolo, 2009).

Segundo o Angelin (2014 apud. ACI 213R-03, 2003), o concreto leve estrutural deve apresentar resistência à compressão aos 28 dias acima de 17 MPa, devido à substituição de parte de materiais sólidos por ar. Já a norma brasileira, NBR 6118 (2014), prescreve que a resistência mínima de um concreto estrutural deve ser 20 MPa independente se for leve ou o convencional.

3.2.1 Tipos de concretos leves

De acordo com Moravia (2007) os principais tipos de concreto leve são: concreto aerado, concreto sem finos e concreto com agregado leve. Como base, para todos os tipos, a redução da massa específica do concreto é obtida pela presença de vazios na sua estrutura. É claro que podem ser obtidos concretos leves com a combinação desses tipos, como por exemplo, o concreto sem finos combinado com agregados leves.

3.2.1.1 Concreto aerado

Para Moravia (2007) o concreto aerado consiste em um tipo de concreto onde são introduzidas bolhas de ar na mistura de cimento e areia, de modo a produzir um material com estrutura celular. Por essa razão, o concreto é denominado concreto celular ou aerado. Levando ao pé da letra, o termo concreto não é apropriado, pois geralmente não é utilizado agregado graúdo. Existem dois métodos, aplicados em concreto, para se produzir as bolhas, o primeiro método a aeração é obtida através de uma reação que provoca o desprendimento de um gás no interior da argamassa fresca (cimento, água, areia), de modo que, após a pega, ela contenha uma grande quantidade de bolhas. A argamassa deve ter uma consistência adequada para que o gás consiga expandi-la sem escapar de seu interior. No segundo método, a aeração é produzida pela adição de um agente espumante na argamassa.

Em geral, utiliza-se uma forma de proteína hidrolisada, ou sabão de resina, que introduz e estabiliza bolhas de ar durante a mistura, a partir de uma rotação elevada. Em alguns processos, adiciona-se numa betoneira comum, durante a mistura, uma espuma estável, previamente formada (NEVILLE, 1982).

3.2.1.2 Concreto sem finos

Segundo Maycá (2008), o concreto sem finos é produzido apenas com aglomerante e agregado graúdo, sendo sua resistência está diretamente relacionada à resistência do agregado e ao consumo de cimento. Este concreto pode produzir materiais como painéis divisórios, estrutura de drenagem e sub-base de quadras de esporte.

O custo de concretos sem finos é relativamente baixo, pois o teor de cimento pode chegar a valores pequenos. Isso se deve à ausência das grandes áreas superficiais da areia que deveriam ser envolvidas pela pasta de cimento.

A massa específica desses concretos depende, principalmente, do tipo de agregado graúdo. Podemos obter concretos com menor massa específica utilizando agregados com o mesmo tamanho de grão. Para agregados convencionais, a massa específica dos concretos sem finos varia entre 1600 e 2000 kg/m³ (NEVILLE, 1982).

3.2.2 Dosagem do concreto leve

Conforme Rossignolo (2009), para a dosagem do concreto leve pode-se utilizar os mesmos métodos utilizados para concretos convencionais, porém são necessárias adaptações devido a algumas características descritas a seguir. A absorção de água dos agregados leves leva a uma alteração no fator água/cimento e afeta as características de trabalhabilidade e a resistência final. O agregado leve é o responsável pela resistência do concreto, visto que a resistência da argamassa e da zona de transição é superior, portanto, quanto maiores forem as dimensões do agregado, menor é sua resistência.

De forma geral, os métodos utilizados para dosagem dos concretos convencionais podem ser aplicados para os concretos com agregados leves. No entanto, quatro fatores devem ser considerados (Rossignolo & Agnesini, 2011):

- A necessidade de projetar um concreto com massa específica particular;
- A absorção de água dos agregados leves;
- A variação da massa específica do agregado leve em função de sua dimensão;
- A influência das características dos agregados leves nas propriedades dos concretos.

3.2.3 Propriedades do concreto leve

As propriedades dos concretos estão relacionadas com o desempenho de seus constituintes e a ligação entre eles. Sendo os agregados 50% da mistura do concreto, a substituição dos mesmos por agregados leves propicia alterações significativas das propriedades do concreto (Rossignolo, 2009).

3.2.3.1 Massa específica e resistência a compressão

Essas são as propriedades mais utilizadas para caracterizar os concretos leves estruturais e estão diretamente relacionados com o tipo e a granulometria do agregado leve utilizado.

Segundo Rossignolo (2009), os concretos leves apresentam estabilização dos valores finais de resistência à compressão mais rapidamente, e, baixa elevação após 28 dias de idade quando comparados aos convencionais. Os concretos com agregados convencionais, como a brita, possuem módulo de deformação do agregado maior que o da argamassa, devido a tal característica a sua ruptura se inicia na zona de transição, o que resulta em uma linha de ruptura que circula o agregado. Quanto aos concretos com agregados leves, a resistência mecânica é mais eficiente na argamassa devido à similaridade entre os valores do módulo de deformação do agregado e da argamassa e da melhor qualidade da zona de transição pasta-agregado. A ruptura no concreto leve não ocorre devido à diferença entre as deformações dos agregados e da pasta de cimento.

3.2.3.2 Resistência ótima

De acordo com Rossignolo (2009) resistência ótima é a relação entre a resistência do concreto leve e da argamassa que pode ser descrita em duas fases. A primeira fase é similar ao comportamento do concreto com agregado convencionais, em que a resistência do concreto é determinada principalmente pela resistência da argamassa. Na segunda fase, o módulo de deformação do agregado leve é menor que o da argamassa e, com isso, a resistência do concreto leve é controlada pela resistência do agregado. Essas duas tendências distintas do comportamento da resistência à compressão do concreto, em relação à resistência da argamassa, indicam a mudança no tipo de distribuição interna das tensões, e o valor da resistência à

compressão do concreto leve no ponto em que ocorre essa mudança pode ser denominado resistência ótima.

Esse conceito contribui significativamente para aperfeiçoar a dosagem de concretos leves, pois concretos traçados para atingir valores de resistência à compressão acima desse valor apresentam elevados valores de consumo de cimento.

Segundo Ozorio (2016) o fator de eficácia é determinado pela relação entre a resistência a compressão e a massa específica do concreto, é um parâmetro usual para caracterizar os concretos leves, sendo ele um importante método para demonstrar se a resistência ótima é real.

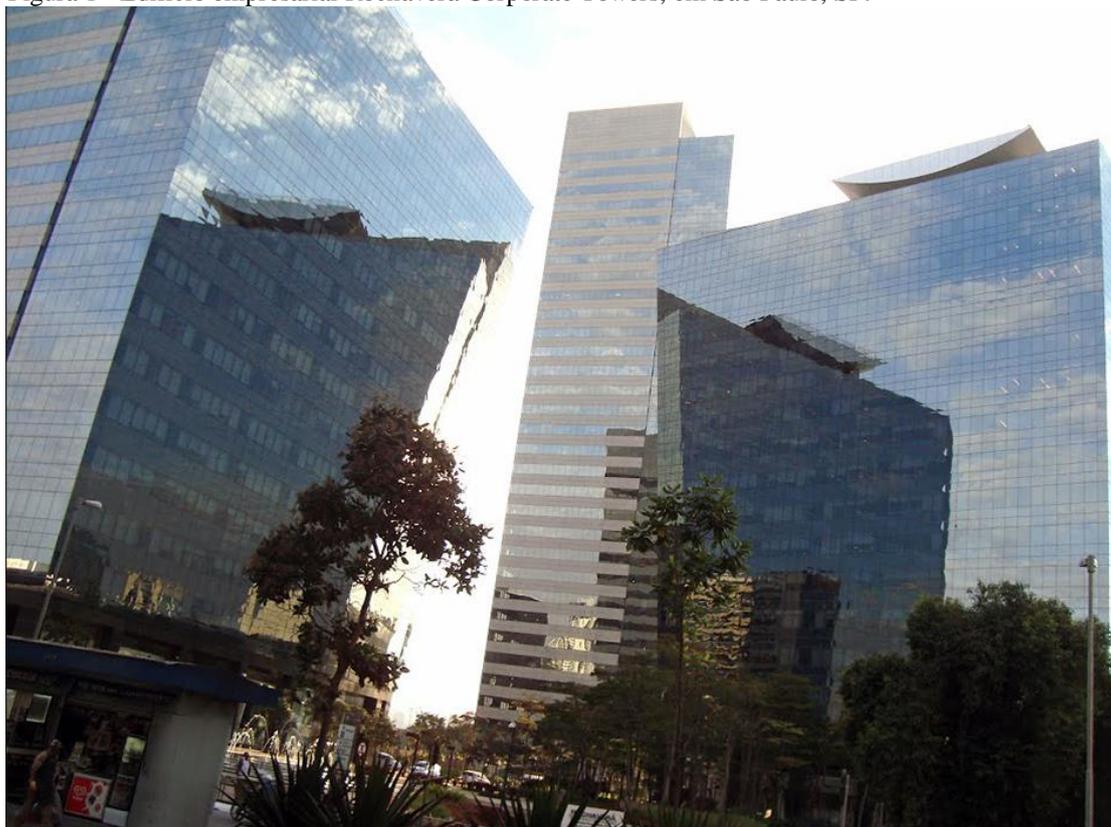
3.2.4 Aplicação do concreto leve

O concreto leve estrutural teve sua eficiência comprovada através dos anos não somente na construção civil, mas também em navios, plataformas marítimas, pontes, coberturas e recuperação estrutural.

Ao adicionar agregados leves ao concreto, conseqüentemente ele se torna mais caro devido ao agregado leve ser um material que necessita de processo industrial. Por isso, nem sempre é a melhor escolha. Segundo Rossignolo (2009), “Ele deve ser utilizado quando reduzir o peso da obra é muito importante”. Em peças pré-fabricadas, o peso é muito relevante, pois quanto mais leve for a estrutura, mais peças poderão ser transportadas em um mesmo meio de transporte.

No Brasil, costuma-se utilizar o concreto leve em edificações com elementos pré-fabricados. Em São Paulo, o edifício empresarial Rochaverá Corporate Towers tem os painéis na fachada confeccionados com concreto leve utilizando a argila expandida como agregado leve e são revestidos com rocha ornamental, com o intuito de aliviar as cargas estruturais e facilitar a montagem (Figura 1).

Figura 1 - Edifício empresarial Rochaverá Corporate Towers, em São Paulo, SP.



Fonte: Método Engenharia (2012).

3.3 Argila expandida

De acordo com Moravia et al. (2006), argila expandida “é o produto obtido por aquecimento de alguns tipos de argila na temperatura em torno de 1200°C.”

Segundo Rossignolo (2009) a expansão das matérias-primas naturais pode ser obtida, através de dois processos: sinterização ou forno rotativo. A sinterização consiste em um processo onde a matéria é misturada com uma quantidade adequada de combustível, que pode ser coque ou carvão moído, e sofre expansão com o aumento da temperatura devido à formação de gases, porém esse método cria poros abertos, o que faz com que o produto resultante absorva mais água. No processo de forno rotativo, a massa de argila se funde formando uma massa viscosa e a outra parte se decompõe liberando gases, gerando um agregado com uma camada de proteção externa e o interior poroso.

De acordo com Escobar (2016) a argila expandida (Figura 2) é encontrada com vários tipos, mas é comumente utilizada em indústrias têxteis, jardinagem e paisagismo, isolamento térmico e enchimento leve. Nesses casos o processo produtivo não interfere nas características necessárias, entretanto para a utilização em concretos estruturais, a absorção de água pelo

agregado influencia no produto. Os agregados fabricados por esse método costumam apresentar granulometria variada, formato arredondado e interior formado por uma massa esponjosa microcelular.

Figura 2 - Argila Expandida



Fonte: Global Minérios (2017).

3.3.1 Argila expandida como agregado no concreto leve

Para Escobar (2016) a utilização do concreto com argila expandida promove menores esforços nas estruturas, conforto térmico e acústico, economia em fôrmas e cimbramentos além da diminuição de custos com transporte e montagem de construções pré-fabricadas.

De acordo com Rossignolo (2009) afirma que no Brasil existem edificações onde foram utilizados concretos leves de argila expandida. Como exemplos, a Fábrica da Rhodia em Santo André – SP, Fábrica da Mangels em São Bernardo – SP, Escola na Vila Sônia, em São Paulo – SP, Ginásio do Clube Atlético Santista (Figura 3) e o tabuleiro do Elevado Paulo de Frontin no Rio de Janeiro, além de obras na construção da cidade de Brasília.

Figura 3 - Ginásio do Clube Atlético Santista



Fonte: Rossignolo (2009).

A argila expandida é produzida no Brasil pela empresa CINEXPAN Indústria e Comércio Ltda, na cidade de Várzea Paulista, localizada a 50 Km da cidade de São Paulo, sendo sua matéria prima extraída no município de Jundiaí e processada em fornos rotativos. Segundo a CINEXPAN, a produção de argila expandida, atualmente, é em sua maior parte destinada a indústria da construção civil (cerca de 60%), sendo o restante, absorvidos pelos setores de lavanderia, paisagismo, refratários e demais aplicações. As principais características químicas na composição da argila expandida são predominância dos elementos de sílica, alumínio e ferro. Os agregados usualmente empregados em concretos estruturais são denominados comercialmente como Cinexpan 0500, Cinexpan 1506, e Cinexpan 2215. Em construções de edifícios de múltiplos andares as estruturas de concreto leve com massa específica em torno de 1.800kg/m^3 apresentam uma redução de 30% no custo da fundação, em comparação com as estruturas em concreto com massa específica normal.

3.4 Poliestireno expandido

O poliestireno expandido mais conhecido como EPS vem sendo aplicado no canteiro de obras e tem oferecido bons resultados na sua aplicação. Dentre suas aplicações ele oferece vantagens como isolamento térmico e acústico se usado em paredes e lajes, na promoção da leveza se agregado ao concreto usado para a construção de lajes. (BERLOFA, 2009, P. 13)

Conforme a ABRAPEX (2000), o poliestireno expandido é um plástico celular derivado do petróleo, que no estado compacto, é um material rígido, incolor e transparente.

Por meio do processo de polimerização do estireno em água, juntamente com a adição de um elemento expansivo, o pentano que é o mais usual, ele sofre mudanças que o transformam em poliestireno expandido. (HIGGINS, 1982).

Segundo a Abrapex (2008) esse material ganhou nos últimos anos uma posição estável na construção de edifícios, não apenas por suas características isolantes, mas também por sua leveza, resistência, facilidade de trabalhar e baixo custo.

Nas fabricas responsáveis por produzir o poliestireno expandido, a matéria prima é sujeita a um processo de transformação física, não alterando as suas propriedades químicas. Esta transformação processa-se em três etapas (AMBIENTE BRASIL, 2006):

a) A pré-expansão: a expansão do poliestireno (PS) é efetuada numa primeira fase num pré-expansor através de aquecimento por contato com vapor de água.

b) O armazenamento intermediário: o armazenamento é necessário para permitir a posterior transformação do poliestireno expandido. Durante esta fase de estabilização, o granulado de EPS arrefece o que cria uma depressão no interior das células.

c) A moldagem: o granulado estabilizado é introduzido em moldes e novamente exposto a vapor de água.

O material resultante destas três etapas de transformação consiste em 98% de ar e apenas 2% de matéria sólida na forma de poliestireno. Os produtos finais de EPS são inodoros, não poluentes, fisicamente estáveis, são 100% reaproveitáveis e recicláveis e podem voltar à condição de matéria-prima (ABRAPEX, 2000).

3.4.1 Poliestireno expandido no concreto leve

O concreto é preparado de acordo com sua utilização, a principal diferenciação a ser considerada na engenharia civil é a densidade dele.

Segundo Brasipor apud Soares (2011) o concreto leve é formado a partir da inserção de flocos de poliestireno expandido (Figura 4) na massa do concreto convencional, desse modo o concreto fica consideravelmente mais leve mantendo a sua resistência, podendo ser utilizado de várias formas desde que não haja grandes esforços sobre ele.

Segundo Catoia (2012), o concreto leve com poliestireno expandido embora seja inovador, é formado basicamente pelos mesmos materiais do concreto leve com a adição do Poliestireno Expandido que pode substituir o agregado graúdo ou miúdo.

Figura 4 - Flocos de isopor utilizado na fabricação do concreto leve



Fonte: Clube do concreto (2018).

3.5 Cimento Portland

O cimento Portland é o basicamente um pó fino com propriedades de ligação e aglomerantes que endurece através da mistura com água. Depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido a mistura com a água o cimento não se decompõe. O cimento Portland, misturado com água, agregado miúdo e graúdo, resulta nos concretos e nas argamassas usadas na construção civil em geral (ABCP, 2002).

Segundo a NBR 5732 (1991), o cimento, aglomerante hidráulico, ou seja, que resiste satisfatoriamente à água após endurecimento, é conseguido a partir da moagem de clínquer, ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio, também sendo admitida a adição de materiais pozzolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos, nos teores especificados, dependendo do tipo de cimento.

É composto por aproximadamente 97% de clínquer, sendo este o principal constituinte do cimento, e 3% de gesso responsável por regular o tempo de pega. A partir da transformação térmica de uma mistura pulverizada, denominada de cru ou farinha, clínquer é produzido, sendo

submetido a 7 elevadas temperaturas de aproximadamente 1.450°C em fornos rotativos (ABCP, 2002).

Conforme Paula (2009) diz, para a produção do clínquer primeiramente a matéria-prima é misturada e moída finamente, em seguida é submetida a um processo de aquecimento, onde evapora-se a água e outros materiais voláteis. Posteriormente, a descarbonatação do material calcário ocorre na faixa de temperatura entre 500°C a 900°C, com produção de óxido de cálcio (CaO) e liberação de CO² gasoso, processo denominado na indústria cimenteira de calcinação. A formação do quarteto C4AF, C3A, C2S e C3S, que constituirá o clínquer, se dá pela reação entre o óxido de cálcio e as substâncias sílica-aluminosas na temperatura entre 850°C até 1.450°C.

Diante de todos os tipos de cimento o que contém as características que irá trazer o maior número de benefícios para o concreto leve é o cimento CPV-ARI, devido a sua alta resistência inicial e o seu tempo de início de pega, tal característica é importante para que não deixe as partículas de agregado leves não subirem no corpo do concreto.

3.6 Cimento Portland CPV

Segundo a NBR 5733 (1991) o cimento Portland de alta resistência inicial conhecido como cimento Portland CPV é um aglomerante hidráulico que atende às exigências de alta resistência inicial, obtido pela moagem de clínquer Portland, constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio hidráulicos, ao qual se adiciona, durante o processo de produção a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. A composição do cimento deve estar compreendida entre os limites fixados na Tabela 1.

Tabela 1 - Teores dos componentes do cimento

Sigla	Componentes (% em massa)	
	Clínquer + sulfato de cálcio	Material carbonático
CPV-ARI	100-95	0-5

Fonte: NBR 5733 (1991).

De acordo com Pereira (2013) o cimento CPV-ARI é um dos tipos de cimentos que não contém adições em sua composição (em casos excepcionais pode conter até 5% de material carbonático). O que o difere dos demais tipos de cimento é seu processo de dosagem e produção

do clínquer. As alterações nas dosagens de calcário e argila na produção do clínquer garante ao CPV-ARI uma alta resistência inicial do concreto podendo atingir em torno de 26 MPa de resistência já no primeiro dia de aplicação do concreto.

3.6.1 Classes de resistência

O cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) é definido, para efeito da verificação de conformidade, pela Tabela 4, segundo a resistência à compressão obtida aos 7 dias após a montagem da forma. A conformidade do cimento produzido deve ser verificada regularmente, através de uma quantidade de amostras pré-determinada. As resistências à compressão devem ser obtidas de um controle estatístico, dentro da hipótese de uma distribuição gaussiana, assegurando-se os limites indicados na Tabela 2, com 97% de probabilidade, isto é, a probabilidade de o limite inferior não ser atingido é de 3%, assim como do limite superior ser superado é, também, de 3% (NBR 5733, 1991).

Tabela 2 - Resistência do cimento Portland de alta resistência inicial

Classes de resistência	Resistência à compressão aos 7 dias de idade (MPa)	
	Limite inferior	Limite superior
CP-V-ARI	34	-

Fonte: NBR 5733 (1991).

3.7 Caracterização dos agregados

A partir da norma NBR 7211 (2009), agregados utilizados para a produção de concreto, possui características que podem ser extraídas através de ensaios de caracterização. Dentre essas características temos a dimensão máxima característica que consiste na grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura nominal, da malha da peneira da série normal ou intermediária na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

Conforme a NBR NM 52 (2009), o agregado miúdo são denominados os que passam na peneira com abertura de malha de 9,5 mm, e que passam quase totalmente na peneira 4,75 mm e, em sua maior parte, na peneira 75 μ m, ou se define como a porção que passa na peneira de 4,75 mm e fica retida quase totalmente na peneira de 75 μ m.

A NBR 7211 (2009) fixa as características exigíveis na recepção e produção de agregados, miúdos e grãos, de origem natural, encontrados fragmentados ou resultante da britagem de rochas. Dessa forma, define areia ou agregado miúdo como areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira de 4,8 mm e ficam retidos na peneira de 0,075 mm. Define ainda agregado grão como pedregulho ou brita proveniente de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira de 4,8 mm.

Encontrado com facilidade no mercado da construção civil, a areia, contendo o tipo fina, média e grossa (Figura 5), é denominada como agregado miúdo, devido a ter as partículas que a compõe contendo a circunferência muito pequena.

Figura 5 - Areia média, fina e grossa



Fonte: Chico da areia (2017).

O agregado grão segundo a NBR NM 53 (2009), é o material cuja maior parte de suas partículas fica retida na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, ou a porção retida nessa mesma peneira.

As propriedades físicas e químicas dos agregados e das misturas ligantes são essenciais para a vida das estruturas em que são usados. São inúmeros os exemplos de falência de estruturas em que é possível chegar-se à conclusão que a causa foi a seleção e o uso inadequado dos agregados.

O agregado grão tem uma diversidade muito grande, porem só alterando o tipo do material que irá o compor. Mas para ser o agregado grão é necessário que seja respeitado

todos os requisitos normativos. O agregado graúdo mais utilizado na construção civil é a brita (Figura 6), bastante utilizada produção de concreto.

Figura 6 - Brita



Fonte: Mapa da obra (2016).

A brita contém diferentes tipos, variando apenas o diâmetro do material (Tabela 3), cada tipo do material é recomendado para uma função, como por exemplo a brita 1 é recomendado para ser componente do concreto que irá preencher vigas, pilares e outros elementos estruturais.

Tabela 3 - Brita e suas granulometrias

Pó de pedra	> de 4,8mm
Brita 0 ou Pedrisco	de 4,8 mm a 9,5 mm
Brita 1	de 9,5 mm a 19 mm
Brita 2	de 19 mm a 25 mm
Brita 3	de 25 mm a 50 mm
Brita 4	de 50 mm a 76 mm

Fonte: NBR NM 53 (2009).

3.7.1 Agregados – Amostragem

Segundo a NBR NM 26 (2001), ela estabelece os procedimentos para a amostragem de agregados, desde a sua extração e redução até o armazenamento e transporte das amostras representativas de agregados para concreto, destinadas a ensaios de laboratório. A investigação preliminar e a amostragem desempenham um papel muito importante na construção.

Dependendo do tipo de construção, o agregado deve ser definido a fim de garantir a durabilidade da estrutura. Portanto, a investigação deve ser feita por uma única pessoa, responsável e especializada. Efetuar a amostragem quando o material estiver úmido, caso essa condição não se verifique, umedecer levemente para evitar a segregação da parte pulverulenta.

De acordo com a NBR NM 27 (2001) a amostragem de campo remetida ao laboratório, ou amostra de ensaio, deve ser reduzida às frações prescritas pelos respectivos métodos de ensaio. A amostra de ensaio é definida pela NBR NM 26 (2001) como a porção obtida por redução da amostra de campo, conforme a NBR NM 27 (2001), utilizada em ensaios de laboratório.

3.7.2 Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório

De acordo com NBR NM 27 (2001) em certas circunstâncias não é recomendada a redução da quantidade de amostras coletadas, por exemplo quando o agregado contém partículas de maior dimensão. A inclusão ou exclusão ao acaso de uma ou duas partículas da amostra selecionada pode influenciar consideravelmente na interpretação das características da amostra de campo. Nestes casos a amostra de campo deve ser ensaiada na sua totalidade.

Normalmente as especificações para os agregados requerem uma amostra com quantidade adequada para a execução dos ensaios. Amostras com o volume de material maior tende a ter uma quantidade maior de dados, tornando o estudo mais representativo. Os procedimentos prescritos na NBR NM 27 (2001) estabelecem como devem ser feitas as reduções de material nas amostras para a realização dos ensaios em laboratório, mantendo o valor representativo que a amostra de campo. Os métodos de ensaios requerem uma quantidade mínima de material.

3.7.3 Agregados - Determinação da composição granulométrica

O ensaio de granulometria é utilizado para determinar a distribuição granulométrica, ou em outras palavras, a percentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de grãos representa na massa seca total utilizada para o ensaio.

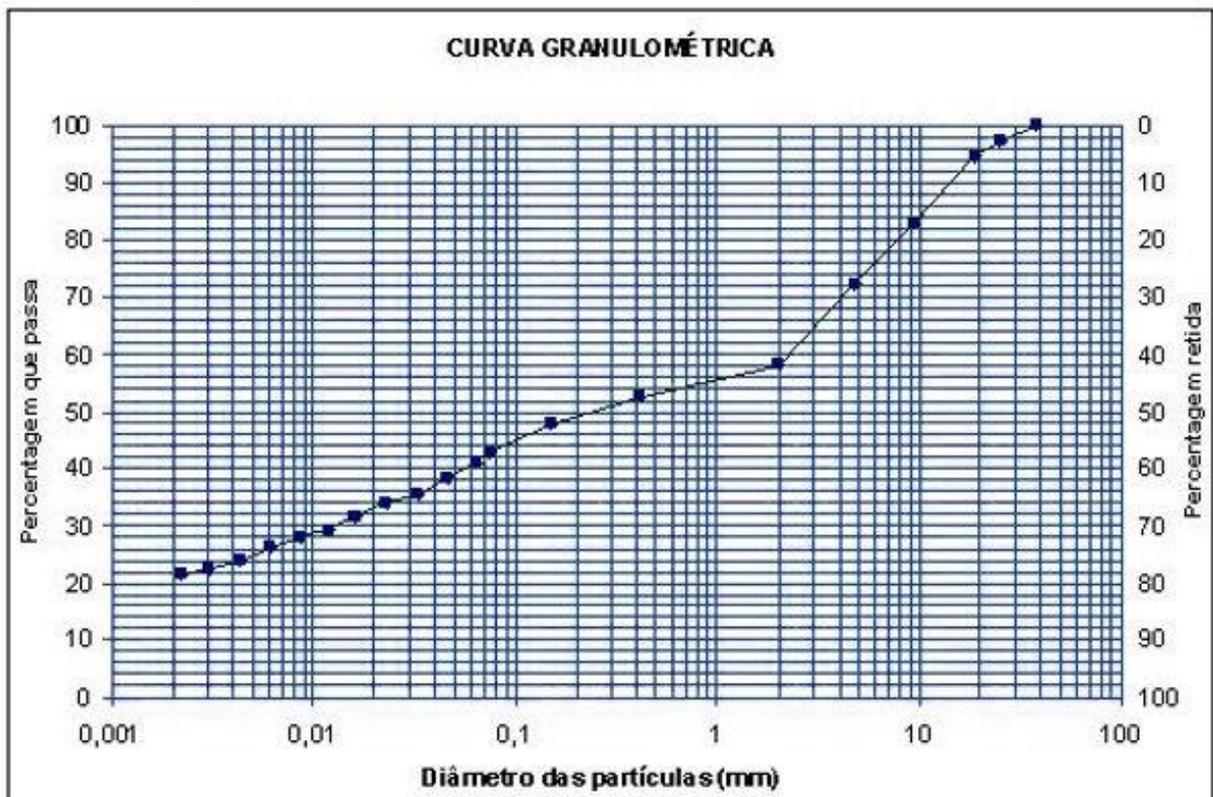
Para Helene (1992) a granulometria ótima é a que, para a mesma resistência (mesmo fator água/cimento) e mesma consistência, corresponde ao menor consumo de cimento, ou seja, irá gerar um concreto mais econômico.

Além disso, também são definidos, no ensaio de granulometria, o módulo de finura e a dimensão máxima do agregado.

A composição granulométrica tem grande influência nas propriedades das argamassas e concretos. Os índices granulométricos são determinados através do peneiramento, através de peneiras com determinada abertura constituindo uma série padrão.

Tem por objetivo conhecer a distribuição granulométrica do agregado e representá-la através de uma curva demonstrado na Figura 7, onde o eixo y mostra a porcentagem passante nas peneiras e no eixo x encontra-se o diâmetro das partículas. Possibilitando assim a determinação de suas características físicas. A porcentagem de massa retida em cada peneira é o que torna possível confeccionar a curva granulométrica.

Figura 7 - Curva granulométrica



Fonte: Ecivil (2019).

Segundo a NBR NM 248 (2003), as peneiras a serem utilizados no processo de peneiramento são divididas em série normal e série intermediária, a Tabela 4 demonstra respectivamente cada uma delas.

Tabela 4 - Série de peneiras

Série normal	Série intermediária
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
--	31,5 mm
--	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 µm	-
300 µm	-
150 µm	-

Fonte: NBR NM 248 (2003).

A quantidade de material a ser coletado para a realização do estudo granulométrico deve ser seguida pela NBR NM 26 (2001), norma no qual é responsável por prescrever os modos de amostragem de material. Após realizada a coleta a amostra é enviada ao laboratório, depois de umedecida para evitar segregação e de cuidadosamente misturada, formar duas amostras para o ensaio, seguindo os procedimentos descritos na NBR NM 27 (2001). A massa mínima por amostra é determinada de acordo com a Tabela 5 encontrada na NBR NM 248 (2003).

Tabela 5 - Massa mínima, por amostra de ensaio

Dimensão máxima nominal do agregado (mm)	Massa mínima da amostra de ensaio do agregado (kg)
<4,75	0,3*
9,5	1
12,5	2
19,0	5
25,0	10
37,5	15
50,0	20
63,0	35
75,0	60
90,0	100
100,0	150
125,0	300

(*) Após a secagem

Fonte: NBR NM 248 (2003).

Conforme é dito na NBR NM 248 (2003), o procedimento do ensaio é dividido em etapas. Na primeira etapa é realizada pesagem do agregado úmido, posteriormente ele é colocado em estufa, após a secagem é necessário que deixe o material secar em temperatura ambiente. Com isso é possível adquirir a massa úmida do agregado e a massa seca. A segunda etapa é responsável pela separação por tamanho das partículas que compõem o agregado, as peneiras devem ser limpas e empilhadas de forma gradual, seguindo os quesitos normativos. Colocando o material seco sobre a peneira de maior abertura e realizando a vibração do material, é possível encontrar a porcentagem de material retida em cada peneira.

3.7.4 Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios

A NBR NM 45 (2006) estabelece o método para a determinação da massa unitária e do volume de vazios de agregados miúdos, graúdos ou de mistura dos dois, em estado compactado ou solto. Este método se aplica a agregados com dimensão máxima característica igual ou menor que 75 mm.

A massa unitária de acordo com NBR NM 45 (2006) é a relação entre a massa do agregado lançado no recipiente de acordo com esta norma e o volume desse recipiente.

Para a realização dos ensaios estabelecidos nesta norma deve ser utilizada a aparelhagem descrita a seguir e demais instrumentos e acessórios comuns aos laboratórios de ensaios.

- a) Balança: Com resolução de 50g;
- b) Haste de adensamento: Haste reta de aço, com 16 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento, tendo um de seus extremos terminado em forma semi-esférica, com diâmetro igual ao da haste;
- c) Recipiente: Recipiente fabricado com material não atacável pela umidade. Deve ser suficientemente rígido e provido de alças;
- d) Pá ou concha: Deve ser de tamanho adequado para encher o recipiente com os agregados em ensaio;
- e) Placa de calibração: Constituída por uma placa de vidro com 6 mm de espessura e com comprimento pelo menos 25 mm maior do que o diâmetro do recipiente;
- f) Estufa: Capaz de manter a temperatura no intervalo de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$;

Segundo a NBR NM 45 (2006), o método C deve ser empregado para determinar a massa unitária de material no estado solto.

3.7.4.1 Método C

O método C descrito na NBR NM 45 (2006) prescreve que devesse determinar e registrar a massa do recipiente vazio. A seguir, encher o recipiente até que ele transborde, utilizando uma pá ou uma concha, despejando o agregado de uma altura que não supere 50 mm acima da borda superior do recipiente. Evitar ao máximo a segregação dos agregados que compõem a amostra. Nivelar a camada superficial do agregado com as mãos ou utilizando uma espátula, de forma a rasá-la com a borda superior do recipiente. Determinar e registrar a massa do recipiente mais seu conteúdo.

A massa unitária determinada pelo método C deve ser calculada pela seguinte equação 1, A massa unitária determinada por este ensaio se aplica a agregados secos em estufa, até constância de massa.

$$\rho_{ap} = \frac{M_{ar} - M_r}{V}$$

Equação 1.

Onde:

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

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

M_r : é a massa do recipiente vazio, em quilogramas;

V : é o volume do recipiente, em metros cúbicos;

3.7.5 Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água

Conforme a NBR NM 53 (2009), ela estabelece um método de determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água dos agregados graúdos, na condição saturados superfície seca, destinados ao uso em concreto.

A massa específica segundo a NBR NM 52 (2009), é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis e a massa específica aparente é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, incluindo os poros permeáveis.

O método utilizado para determinar a massa específica, massa específica aparente e a absorção de água dos agregados graúdos depende de alguns aparelhos. São eles prescritos pela NBR NM 53 (2009):

- a) Balança: Com capacidade mínima para 10 kg e resolução de 1 g. Deve estar equipada com um dispositivo adequado para manter o recipiente que contém a amostra suspenso na água, no centro do prato da balança;
- b) Recipiente: O recipiente, para conter a amostra deve ser constituído de um cesto de arame com abertura de malha igual ou inferior a 3,35 mm e capacidade para 4 dm³ a 7 dm³, para agregados de dimensão máxima característica de 37,5 mm. Para agregados de maior dimensão é necessário um recipiente de maior capacidade. Deve ser construído de forma a impedir a perda de material ou a retenção de ar quando submerso;
- c) Tanque de água: Recipiente estanque para conter água onde será submerso o recipiente descrito no item (b) com a amostra.

3.7.5.1 Procedimento

Conforme a NBR NM 53 (2009) prescreve, os procedimentos a serem executados devem seguir uma ordem, de forma que torne o ensaio mais preciso.

Ainda de acordo com NBR NM 53 (2009), a primeira etapa consiste em pesar a amostra, a seguir, devesse submergir o agregado em água à temperatura ambiente por um período de 24 horas podendo ter uma variação de 4 horas para mais ou para menos. Retirar a amostra da água e envolvê-la em um pano absorvente até que toda a água visível seja eliminada, ainda que a superfície das partículas se apresente úmida. Os fragmentos grandes devem ser limpos individualmente. É necessário evitar a evaporação da água dos poros do agregado durante a operação de enxugamento da amostra. Imediatamente após ser enxugada, pesar a amostra com precisão de 1 g. Colocar a amostra no recipiente, submergi-la em água mantida a (23 ± 2) °C e pesar em água com precisão de 1 g, lembrando que a balança deve ser previamente zerada com o recipiente vazio e imerso em água.

3.7.5.2 Massa específica do agregado seco

Para o cálculo da massa específica do agregado seco é utilizado a seguinte equação 2 encontrada na NBR NM 53 (2009).

$$d = \frac{m}{m - m_a}$$

Equação 2.

Onde:

d: é a massa específica do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;

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

m_a: é a massa em água da amostra, em gramas.

3.7.5.3 Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca

Para o cálculo da massa específica do agregado na condição saturado superfície seca é utilizado a seguinte equação 3 encontrada na NBR NM 53 (2009).

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a}$$

Equação 3.

Onde:

d_s: é a massa específica do agregado na condição saturado superfície seca, em gramas por centímetro cúbico;

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

m_a: é a massa em água da amostra, em gramas.

3.7.5.4 Massa específica aparente

Para o cálculo da massa específica aparente é utilizado a seguinte equação 4 encontrada na NBR NM 53 (2009).

$$d_a = \frac{m}{m_s - m_a}$$

Equação 4.

Onde:

da: é a massa específica aparente do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;

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

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

ma: é a massa em água da amostra, em gramas.

3.7.6 Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman

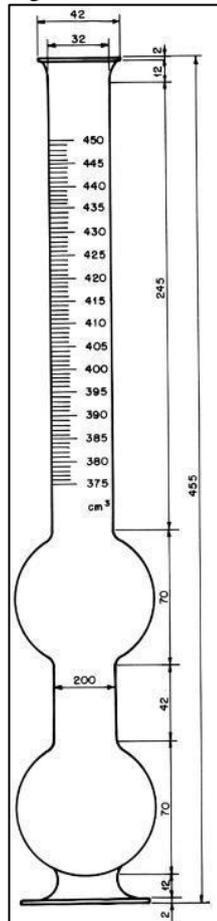
Segundo a NBR 9776 (1987), é estipulado o método de determinação da massa específica de agregados miúdos para concretos, por meio do frasco de Chapman.

Ainda de acordo com a NBR 9776 (1987), o método de determinação da massa específica utilizando o frasco de Chapman necessita de uma balança, que deve ter capacidade mínima de 1kg e sensibilidade de 1g ou menos. Necessita do frasco, deve ser de vidro e composto de dois bulbos e de um gargalo graduado. No estrangulamento existente entre os dois bulbos deve haver um traço que corresponde a 200 cm³, e acima dos bulbos situa-se o tubo graduado de 375 cm³ a 450 cm³, conforme Figura 8. O frasco deve ser inicialmente aferido, verificando-se os devidos volumes correspondentes às graduações.

3.7.6.1 Execução do ensaio

Os procedimentos prescritos na NBR 9776 (1987), é dividido em basicamente, colocar água no frasco (Figura 8) até a marca de 200 cm³, deixá-lo em repouso para que a água fique aderida as faces internas e escorram totalmente. Em seguida introduzir, cuidadosamente 500g de agregado miúdo seco no frasco o qual deve ser devidamente agitado para eliminação de bolhas de ar. A leitura do nível atingido pela água no gargalo do frasco indica o volume, em cm³, ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo, alertando que as faces devem estar devidamente secas e sem grãos aderentes.

Figura 8 - Frasco de Chapman



Fonte: NBR 9776 (1987).

3.7.6.2 Resultados

A massa específica do agregado miúdo é dada pela equação 5 encontrada na NBR 9776 (1987).

$$\gamma = \frac{500}{L - 200}$$

Equação 5.

Onde:

Y: Massa específica do agregado miúdo, deve ser expressa em g/cm³;

L: Leitura do frasco (volume ocupado por água-agregado miúdo);

3.7.7 Índice de forma

A NBR 7809 (2006) estabelece o método para determinação do índice de forma de agregados graúdos com dimensão máxima característica maior que 9,5 mm, utilizando o paquímetro como aparelho principal.

Para os efeitos de entendimento a NBR 7809 (2006) descreve as seguintes definições, nas quais são necessárias para melhor entendimento da norma em questão:

- a) Índice de forma do agregado: Média da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos do agregado, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica que o compõe.
- b) Comprimento de um grão: Maior dimensão possível de ser medida em qualquer direção do grão.
- c) Espessura de um grão: Menor distância possível entre planos paralelos entre si em qualquer direção do grão.

As definições citadas acima são de suma importância na hora da dosagem e execução do concreto, podendo alterar totalmente o resultado dele. Com isso deve sempre ficar atento aos valores obtidos para posteriormente tomar a decisão correta ao escolher o tipo de agregado graúdo para utilizar em seu projeto.

3.8 Concreto de cimento Portland, preparo, controle, recebimento e aceitação

De acordo com a NBR 6118 (2014) as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, apresentem segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil de projeto.

De acordo com a NBR 6118 (2014), a agressividade ambiental é classificada de acordo com o apresentado na Tabela 8 nos projetos das estruturas correntes. A agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas de concreto. Nos projetos das estruturas correntes, a agressividade ambiental deve ser classificada de acordo com o apresentado na Tabela 6 e pode ser avaliada, simplificada, segundo as condições de exposição da estrutura ou de suas partes.

Tabela 6 - Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana (a, b)	Pequeno
III	Forte	Marinha (a) Industrial (a, b)	Grande
IV	Muito forte	Industrial (a, c) Respingos de maré	Elevado

a) Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos.

b) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

c) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes e indústrias químicas.

Fonte: Adaptado NBR 6118 (2014).

Os requisitos da Tabela 7 são válidos para concretos preparados com cimento Portland que atendam todos os pré-requisitos normativos seguindo o tipo e classe, e o consumo mínimo de cimento por metro cúbico de concreto, conforme a NBR 12655 (2015).

Tabela 7 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto kg/m ³	CA e CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

CA Componentes e elementos estruturais de concreto armado.

CP Componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: NBR 12655 (2015).

3.9 Dosagem do concreto leve

Entende-se por estudo de dosagem dos concretos de cimento Portland os procedimentos necessários para a obtenção da melhor proporção entre os materiais que compõe o concreto. Essa proporção ideal pode ser expressa em massa ou em volume, sendo preferível e sempre mais rigorosa a proporção expressa em massa seca de materiais.

Segundo Escobar (2016), a dosagem do concreto leve é determinada pela combinação mais econômica dos constituintes que incluem principalmente cimento Portland, agregados e água, de forma que as propriedades desejadas sejam atingidas tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Conforme Rossignolo (2009), para a dosagem do concreto leve pode-se utilizar os mesmos métodos utilizados para concretos de agregados de peso normal, porém são necessárias adaptações devido a algumas características descritas a seguir. Há a necessidade de projetar-se um concreto com massa específica particular, pois durante sua produção é observado a flutuação do agregado durante a vibração, o inverso do que ocorre com o concreto convencional, onde existe concentração de argamassa na superfície. A absorção de água dos agregados leves leva a uma alteração no fator água/cimento e afeta as características de trabalhabilidade e a resistência final. O agregado leve é o responsável pela resistência do concreto, visto que a resistência da argamassa e da zona de transição é superior, portanto, quanto maiores forem as dimensões do agregado, menor é sua resistência.

3.9.1 Dosagem experimental do concreto – ABCP/ACI

De acordo com o método de dosagem da ABCP/ACI, a dosagem experimental do concreto é a dosagem em que os materiais e o concreto obtido da dosagem são ensaiados em laboratório. O estudo deve ser realizado com os mesmos materiais e condições semelhantes com a obra. Pode ser utilizada para concretos classe C15 ou superior, com consumo mínimo de cimento variando de 260kg/m^3 a 360kg/m^3 , dependendo da classe de agressividade ambiental, conforme indicado na Tabela 8.

O concreto na forma endurecida contém algumas propriedades, mas a que mais influência na qualidade dele é o fator água/cimento, quanto menor for o fator maior vai ser a resistência do concreto estudado. A resistência à compressão axial e a durabilidade são as

propriedades que devem ser mais estudadas do concreto, por isso é realizado um estudo minucioso de todo o processo, desde a dosagem até a produção do concreto.

3.9.2 Determinação da resistência de dosagem

Devido à variabilidade das resistências, o valor de resistência utilizada para a dosagem de um concreto é dado pela equação 6 estipulada pelo método da ABCP/ACI.

$$fcd = fck + 1,65 \times Sd$$

Equação 6.

Onde:

Fcd: Resistência utilizada para a dosagem do concreto (MPa);

Fck: Resistência característica do concreto;

Sd: Desvio padrão;

Segundo o método da ABCP/ACI o valor do desvio padrão Sd, é encontrado de acordo com a medição dos componentes do concreto e a verificação do teor de umidade, ou seja, em função do rigor da produção do concreto, encontrado na Tabela 10.

Tabela 8 - Valores de Sd em função do rigor da produção

Sd	Condição	Classe	Tipo de concreto
4	A	C10 a C80	Quando todos os materiais forem medidos em peso e houver medidor e água, corrigindo-se as quantidades de agregado miúdo e água em função de determinações frequentes e precisas do teor de umidade dos agregados.
5,5	B	C10 a C25	Quando o cimento for medido em peso e os agregados em volume, e houver medidor de água, com correção do volume do agregado miúdo e da quantidade de água.
7	C	C10 a C15	Quando o cimento for medido em peso e os agregados em volume, e houver medidor de água, corrigindo-se a quantidade de água em função da umidade dos agregados simplesmente estimada.

Fonte: Adaptado método ABCP/ACI (2019).

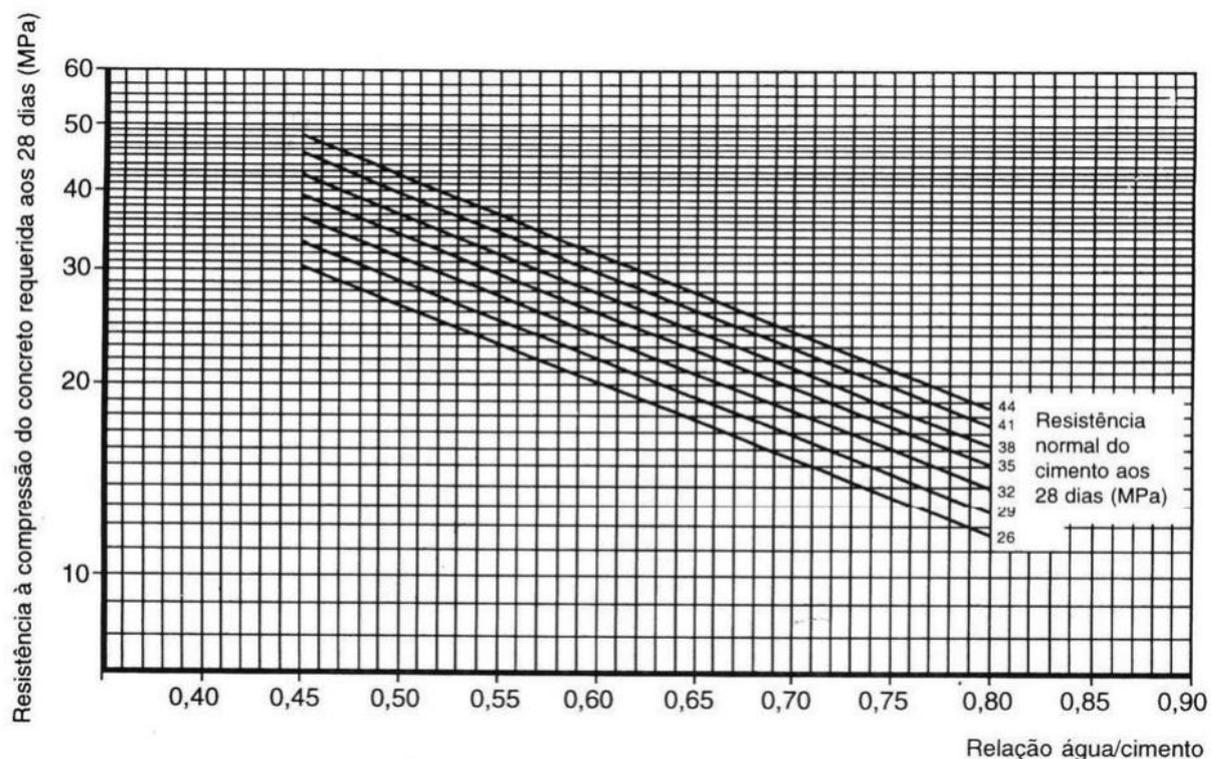
3.9.3 Fator água/cimento

Segundo a NBR 6118 (2014), a durabilidade das estruturas é altamente dependente das características do concreto e da espessura e qualidade do concreto do cobrimento da armadura.

Os ensaios realizados para comprovar o desempenho e a durabilidade da estrutura frente ao tipo e nível de agressividade previsto em projeto devem estabelecer os parâmetros mínimos a serem atendidos. Na falta destes e devido à existência de uma forte correspondência entre a relação água/cimento, a resistência à compressão do concreto e sua durabilidade, permite-se adotar os requisitos mínimos expressos na Tabela 9.

Ainda de acordo com o método de dosagem ABCP/ACI, a fixação deste parâmetro é feita tomando como referência os critérios de durabilidade e a resistência mecânica requerida pelo concreto nas idades de interesse. A resistência à compressão é o principal parâmetro da resistência mecânica a ser considerado. O valor da relação água/cimento é estimado com base na curva de Abrams (Figura 9), que por sua vez, deve ser determinado em função do tipo de cimento.

Figura 9 - Gráfico para a determinação da relação água/cimento (a/c) em função das resistências do concreto e do cimento aos 28 dias de idade



Fonte: Rodrigues (1998).

3.9.4 Estimativa do consumo de água

A quantidade de água necessária para que a mistura fresca adquira uma determinada consistência, é medida pelo abatimento do tronco de cone, segundo Rodrigues (1998), depende

basicamente da granulometria, da forma e textura dos grãos, mais especificamente, da área específica do agregado total da mistura.

Considerando a dificuldade em expressar o consumo de água na mistura por meio de uma lei matemática, Rodrigues (1998) apresenta como estimativa inicial do consumo de água por metro cúbico de concreto, os valores que consta na Tabela 9.

Tabela 9 - Estimativa do consumo de água por metro cúbico de concreto em função do Diâmetro Máximo Característico do Agregado e do abatimento da mistura

ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO				
	(Φ _{max})				
	9,5mm	19mm	25mm	32mm	38mm
40 a 60mm	220 l/m ³	195 l/m ³	190 l/m ³	185 l/m ³	180 l/m ³
60 a 80mm	225 l/m ³	200 l/m ³	195 l/m ³	190 l/m ³	185 l/m ³
80 a 100mm	230 l/m ³	205 l/m ³	200 l/m ³	200 l/m ³	190 l/m ³

OBSERVAÇÕES

1 – Os valores acima são recomendados para concretos confeccionados com agregado graúdo britado (basalto), agregado miúdo (areia de rio), consumo de cimento por metro cúbico de concreto da ordem de 300kg/m³ e abatimento, medido pelo tronco de cone, entre 4mm a 100mm;

2 – Quando usado seixo rolado como agregado graúdo, os valores do consumo de água podem ser reduzidos de 5% a 10%;

3 – As areias pertencentes à zona 1 da NBR 7211 (muito fina), podem gerar aumentos de até 10% no consumo de água por metro cúbico de concreto;

Fonte: Rodrigues (1998).

3.9.5 Estimativa do consumo de cimento

Após ser feita a estimativa do consumo de água por metro cúbico de concreto e adotada a relação água/cimento, o método de dosagem experimento da ABCP estipula que o consumo de cimento pode ser obtido pela equação 7.

$$C_c = \frac{C_a}{(a/c)}$$

Equação 7.

Onde:

C_c = Consumo de cimento por metro cúbico de concreto (kg/m³);

C_a = Consumo de água por metro cúbico de concreto (l/m³);

(a/c) = Relação água/cimento;

3.9.6 Estimativa do consumo de agregado graúdo

De acordo com o método da ABPC/ACI, o consumo de agregado graúdo por metro cúbico de concreto (m³) é obtido em função da dimensão máxima característica do agregado graúdo e do módulo de finura da areia. A Tabela 10 fornece o volume aparente de agregado graúdo compactado por metro cúbico de concreto em função dos dois parâmetros.

Tabela 10 - Volume de agregado graúdo compactado por m³ de concreto

M.F.	Dimensão máxima característica do agregado graúdo, D _{máx.} (mm)			
	9,5	19	25	32
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780
2,4	0,585	0,710	0,735	0,76
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740
2,8	0,545	0,670	0,695	0,72
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700
3,2	0,505	0,630	0,655	0,68
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660

Fonte: Adaptado método ABCP/ACI.

3.9.7 Estimativa do consumo de agregado miúdo

Segundo o método da ABPC/ACI, o consumo de agregado miúdo por metro cúbico de concreto (m³) fresco é obtido pela diferença entre a soma dos volumes absolutos dos demais constituintes já calculados em relação a 1 m³ de concreto. O volume de agregado miúdo é dado pela equação 8.

$$V_a = 1 - \left(\frac{C_c}{\rho_c} + \frac{C_b}{\rho_b} + C_w \right)$$

Equação 8.

Onde:

V_a: Volume absoluto de areia;

C_c: Consumo de cimento;

ρ_c: Massa específica do cimento;

C_b: Consumo de brita;

pb: Massa específica da brita;

Cw: Consumo de água;

Portanto o consumo de areia (Ca) segundo o método da ABCP/ACI é obtido através da equação 9.

$$Ca = Va \times pa$$

Equação 9.

Onde:

Ca: Consumo de areia;

Va: Volume absoluto de areia;

pa: Massa específica da areia;

3.10 Moldagem do concreto leve

De acordo com a NBR NM 67 (1998), descreve o método responsável por determinar a consistência do concreto fresco através da medida de seu assentamento, em laboratório e obra. O método é aplicável aos concretos plásticos e coesivos que apresentem um assentamento igual ou superior a 10 mm. O método não se aplica a concreto cujo agregado graúdo apresente dimensão nominal máxima superior a 37,5 mm. Quando a dimensão nominal máxima do agregado for superior a 37,5 mm, o ensaio deve ser realizado sobre a fração do concreto que passa pela peneira de 37,5 mm, obtida de acordo com a NBR NM 36 (1998).

A amostragem do concreto a ser analisada deve contém uma quantidade que represente todo o lote e deve ser obtida de acordo com a NBR NM 33 (1998).

3.10.1 Amostragem

A NBR NM 33 (1998) estabelece o procedimento responsável pela a coleta e a preparação de amostras de concreto fresco, no qual serão realizados ensaios que permitam determinar suas propriedades.

De acordo com a NBR NM 33 (1998) as amostras devem ser obtidas aleatoriamente, logo após ter sido adicionado todos os componentes e posteriormente feita a homogeneização do concreto, principalmente após a incorporação total da água de mistura.

A moldagem dos corpos de prova para ensaios de resistência deve ser iniciada no máximo 15 min após moldagem da primeira amostra

3.11 Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone

A NBR NM 67 (1998) prescreve o método e a aparelhagem necessária para a realização do ensaio. Os equipamentos a serem utilizados são basicamente a colher, haste de compactação, a placa de base e o molde (Figura 10). O molde para a realização do ensaio deve ser feito de metal e que não seja facilmente atacado pelo material estudado, deve conter a espessura igual ou superior a 1,5 mm. O molde pode ser confeccionado com ou sem costura, porém seu interior deve ser liso e livre de defeitos criados por rebites, parafusos, soldas e dobraduras.

Figura 10 - Equipamentos para a realização do ensaio de abatimento



Fonte: Didática São Paulo (2019).

A NBR NM 67 (1998) descreve como devem ser os equipamentos para a execução do ensaio. As bases superior e inferior devem ser abertas e paralelas entre si, formando ângulos retos com o eixo do cone. O molde deve ser provido, em sua parte superior, de duas alças,

posicionadas a dois terços de sua altura. A haste de compactação demonstrada na Figura 10 deverá ser seção circular, reta, feita de aço ou outro material adequado, com diâmetro de 16 mm, comprimento de 600 mm e extremidades arredondadas. A placa de base que consta na Figura 10, utilizada para o apoio do molde deve ser metálica, plana, quadrada ou retangular, com lados de dimensão não inferior a 500 mm e espessura igual ou superior a 3 mm.

3.12 Cura do concreto

De acordo com Neville e Brooks (2013), a cura do concreto é conhecida um processo que tem por finalidade evitar a evaporação prematura da água necessária para a hidratação do cimento, que é responsável pela pega e endurecimento do concreto. O objetivo da cura é manter o concreto saturado, ou o mais próximo possível até que os espaços inicialmente ocupados pela água sejam ocupados pelos produtos da hidratação do aglomerante, neste caso o cimento. A cura do concreto deve ser iniciada imediatamente após o endurecimento superficial.

Segundo a NBR 14931 (2004) enquanto o concreto não atingir endurecimento satisfatório, o concreto deve ser curado e protegido contra agentes prejudiciais para:

- a) Evitar a perda de água pela superfície exposta;
- b) Assegurar uma superfície com resistência adequada;
- c) Assegurar a formação de uma capa superficial durável.

Os agentes deletérios mais comuns ao concreto em seu início de vida são, mudanças bruscas de temperatura, secagem, chuva forte, água torrencial, congelamento, agentes químicos, bem como choques e vibrações de intensidade tal que possam produzir fissuras na massa de concreto ou prejudicar a sua aderência à armadura. O endurecimento do concreto pode ser acelerado por meio de tratamento térmico ou pelo uso de aditivos que não contenham cloreto de cálcio em sua composição e devidamente controlado, não se dispensando as medidas de proteção contra a secagem. Elementos estruturais de superfície devem ser curados até que atinjam resistência característica à compressão (f_{ck}), de acordo com a NBR 12655 (2015), igual ou maior que 15 MPa.

3.13 Resistência a compressão

A resistência mecânica à compressão é a principal propriedade do concreto no seu estado endurecido. É de conhecimento que o concreto é excelente quando submetido a esforços

de compressão e é insuficiente sob esforços de tração, afirma ainda que a resistência à tração é da ordem da décima parte da resistência à compressão (PETRUCCI, 2005).

A resistência pode ser definida como a tensão última aplicada ao elemento que provoca a desagregação do material que o compõe, ou ainda, como a capacidade do material de suportar ações aplicadas sem que ele entre em colapso (ISAIA, 2005).

A resistência a compressão de qualquer tipo de concreto, seja ele estrutural ou não, geralmente é realizado o rompimento do corpo de prova na idade de 28 dias. De acordo com a NBR 5739 (1994), até a idade de ensaio, os corpos de prova devem ser mantidos em processo de cura úmida ou saturada, nas condições preconizadas, conforme o caso, pelas NBR 5738 (2015), NBR 7680 (2015) e NBR 9479 (2006). Uma observação que deve ser levado em conta, a cura deve ser dita úmida quando a superfície do corpo de prova for mantida permanentemente úmida. A cura deve ser dita saturada quando o corpo-de-prova for mantido permanentemente imerso em água.

Conforme está prescrito na NBR 5739 (1994) os corpos de prova devem ser rompidos à compressão em uma dada idade especificada, com as tolerâncias de tempo descritas na Tabela 11. Em se tratando de corpos de prova moldados de acordo com a NBR 5738 (2015), a idade deve ser contada a partir do momento em que o cimento é posto em contato com a água de mistura.

Tabela 11 - Tolerância de tempo para o ensaio de compressão em função da idade de ruptura

Idade de ensaio	Tolerância permitida
24h	± 30 min ou 2,1%
3 dias	± 2 h ou 2,8%
7 dias	± 6 h ou 3,6%
28 dias	± 20 h ou 3,0%
60 dias	± 36 h ou 2,5%
90 dias	± 2 d ou 2,2%

Fonte: NBR 5739 (1994).

3.13.1 Cálculo da resistência

A resistência à compressão deve ser obtida, dividindo-se a carga da ruptura pela área da seção transversal do corpo-de-prova, devendo o resultado ser expresso com aproximação de 0,1

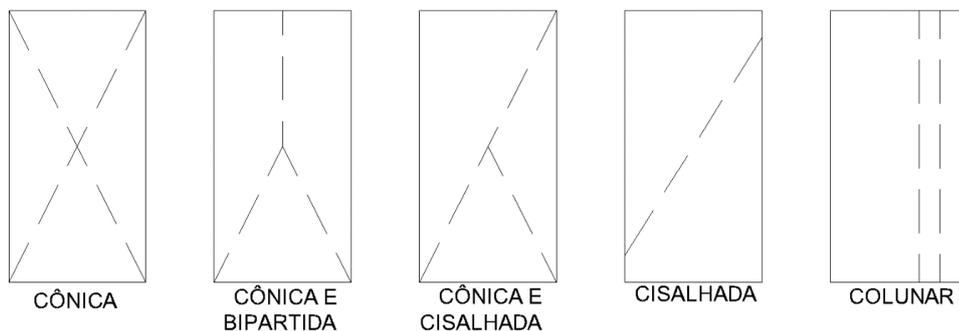
MPa. Em se tratando de corpos de prova extraídos, devem ser efetuadas as correções prescritas pela NBR 7680 (2015).

3.13.2 Apresentação dos resultados

O certificado de resultados de ensaio de corpos de prova moldados segundo a NBR 5738 (2015) deve conter as seguintes informações:

- a) número de identificação do corpo-de-prova;
- b) data de moldagem;
- c) idade do corpo-de-prova;
- d) data do ensaio;
- e) resistência à compressão, expressa com aproximação de 0,1 MPa;
- f) tipo de ruptura do corpo-de-prova (Figura 11).

Figura 11 - Esboço dos tipos de ruptura



Fonte: NBR 5739 (1994).

3.14 Propriedades do concreto leve

As propriedades dos concretos estão relacionadas com o desempenho de seus constituintes e a ligação entre eles. Sendo os agregados 50% da mistura do concreto, a substituição dos mesmos por agregados leves propicia alterações significativas das propriedades do concreto (Rossignolo, 2009).

3.14.1 Massa específica e resistência a compressão

Essas são as propriedades mais utilizadas para caracterizar os concretos leves estruturais e estão diretamente relacionados com o tipo e a granulometria do agregado leve utilizado.

Os concretos leves apresentam estabilização dos valores finais de resistência à compressão mais rapidamente, e, baixa elevação após 28 dias de idade quando comparados aos convencionais.

Segundo Rossignolo (2009), os concretos com agregados convencionais, como a brita, possuem módulo de deformação do agregado maior que o da argamassa, devido a tal característica a sua ruptura se inicia na zona de transição, o que resulta em uma linha de ruptura que circula o agregado. Quanto aos concretos com agregados leves, a resistência mecânica é mais eficiente na argamassa devido à similaridade entre os valores do módulo de deformação do agregado e da argamassa e da melhor qualidade da zona de transição pasta-agregado. A ruptura no concreto leve não ocorre devido à diferença entre as deformações dos agregados e da pasta de cimento.

3.14.2 Resistência ótima

De acordo com Rossignolo (2009) resistência ótima é a relação entre a resistência do concreto leve e da argamassa que pode ser descrita em duas fases. A primeira fase é similar ao comportamento do concreto com agregado convencionais, em que a resistência do concreto é determinada principalmente pela resistência da argamassa. Na segunda fase, o módulo de deformação do agregado leve é menor que o da argamassa e, com isso, a resistência do concreto leve é controlada pela resistência do agregado. Essas duas tendências distintas do comportamento da resistência à compressão do concreto, em relação à resistência da argamassa, indicam a mudança no tipo de distribuição interna das tensões, e o valor da resistência à compressão do concreto leve no ponto em que ocorre essa mudança pode ser denominado resistência ótima.

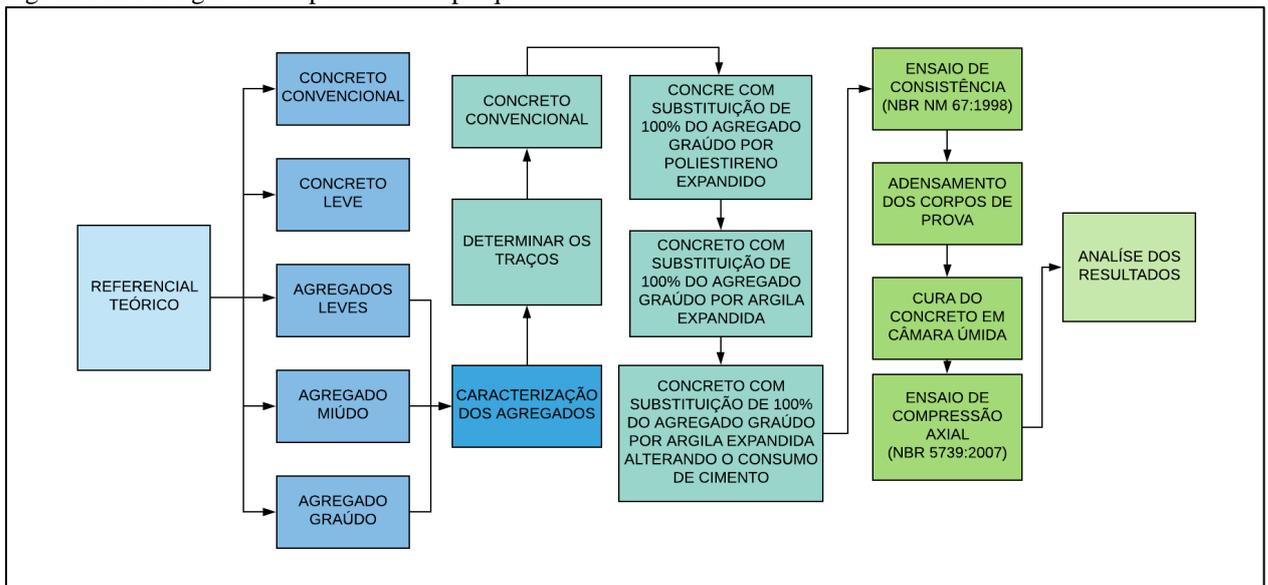
Esse conceito contribui significativamente para aperfeiçoar a dosagem de concretos leves, pois concretos traçados para atingir valores de resistência à compressão acima desse valor apresentam elevados valores de consumo de cimento.

Segundo Ozorio (2016) o fator de eficiência é determinado pela relação entre a resistência a compressão e a massa específica do concreto, é um parâmetro usual para caracterizar os concretos leves, sendo ele um importante método para demonstrar se a resistência ótima é real.

4. METODOLOGIA

Os procedimentos utilizados foram divididos em etapas, demonstrado pelo fluxograma apresentado na Figura 12. Foram utilizados para entendimento do trabalho referências em livros, teses, artigos, e normas técnicas brasileiras publicadas pela ABNT. No fluxograma, está sendo mostrado as etapas que foram executadas durante o trabalho.

Figura 12 - Fluxograma dos processos de pesquisa



Fonte: O autor (2019).

A primeira etapa desta pesquisa consiste na busca de referências que ajude a entender o tema como um todo, principalmente, acerca de concreto convencional, concreto leve, poliestireno expandido, argila expandida. Posteriormente, foi realizado os ensaios de determinação granulométrica, massa unitária, massa específica e absorção de água, tanto nos agregados específicos como nos mais conhecidos que são a brita e areia.

Após realizado os estudos necessários dos materiais que serão utilizados na produção do concreto convencional e do concreto leve, serão definidos os traços variando a proporção de cada material. O cimento CPV-ARI será utilizado na produção dos traços. Cabe salientar que foi escolhido o cimento CPV-ARI devido as suas características que são benéficas ao concreto leve, como por exemplo a resistência inicial, o tempo de início e final de pega.

Logo após realizar a caracterização dos agregados serão definidos os traços no qual será determinado através do método ABCP, lembrando que quando este método é utilizado para a dosagem de um concreto não convencional é necessário que sejam feitas algumas adaptações como por exemplo a mudança da massa específica do concreto. O primeiro traço trata-se do

concreto convencional, com base na NBR 6118 (2014), que recomenda F_{ck} mínimo de 20 MPa para concreto convencional com fins estruturais. O segundo traço, será composto pela substituição total do agregado graúdo por argila expandida. Já o terceiro será composto por 100% de poliestireno expandido no lugar do agregado graúdo.

Após a produção do concreto em laboratório, é necessário efetuar as correções do traço que possivelmente serão necessárias e logo após realizar o ensaio de abatimento (Slump test) de acordo com a NBR NM 67 (1998) no concreto em estado fresco e posteriormente serão moldados vinte e quatro corpos de prova cilíndricos conforme NBR 5738 (2015), para cada composição. Os corpos de prova serão submetidos aos ensaios de resistência à compressão axial conforme NBR 5739 (2007). Os corpos de prova serão levados a prensa com o tempo de cura de 7, 14, 21 e 28 dias. Para caracterização dos materiais realizou-se os ensaios de granulometria conforme NBR NM 248 (2003), massa unitária segundo NBR NM 45 (2006), massa específica do agregado miúdo segundo a NBR 9776 (1998), massa específica do agregado graúdo segundo a NBR NM 53 (2009) e a absorção de água dos agregados foi obtida de acordo com a NBR NM 53 (2009).

A última etapa aborda a análise dos resultados obtidos, comparando a resistência a compressão, a massa específica, o fator de eficácia e um comparativo de custo levando em consideração os que obtiverem a resistência a compressão ideal para que seja considerado um concreto estrutural de acordo com a hipótese inicial.

4.1 Caracterização dos agregados

Para a caracterização dos agregados, foram seguidas as normas brasileiras descritas nos próximos tópicos.

4.1.1 Composição granulométrica

Para realizar o ensaio de granulometria corretamente as amostras dos agregados a serem ensaiados devem ser devidamente colocados na estufa, para realizar a secagem. Posteriormente é coletada a amostra necessária para a realização do ensaio, respeitando os seguintes itens:

- a) Dimensão máxima do agregado menor que 4.8mm e massa mínima da amostra deve ser igual a 0,5kg,

- b) Dimensão máxima do agregado = 6,3mm e massa mínima da amostra deve ser igual a 3kg,
- c) Dimensão máxima do agregado maior que 9,5mm e menor que 25mm e massa mínima da amostra deve ser igual a 5kg.

Utilizando a areia como exemplo, foi verificado quais as peneiras seriam colocadas no vibrador. Após selecionar as peneiras (Figura 13), de acordo com o agregado, deve encaixá-las em ordem crescente da base para o topo, para a amostra de areia as peneiras colocadas no vibrador foram de 4,75mm, 2,36mm, 1,2mm, 0,6mm, 0,3mm, e a de 0,15mm de abertura.

Para os demais agregados foram utilizadas outras peneiras, variando de acordo com o diâmetro característico do material. Para a brita foram separadas as peneiras com abertura de 19mm até 2,36mm. Para a argila expandida foram necessárias somente duas peneiras, a de 25mm de abertura e a de 19mm. Para o poliestireno expandido foram as com abertura de 19mm até 4,75mm.

Figura 13 - Peneiras utilizadas para a caracterização da areia



Fonte: O autor (2019).

Utilizando como exemplo a areia o material a ser ensaiado, é colocado a amostra na peneira superior e é realizado o peneiramento, que pode ser manual ou mecânico. Como é possível ver na Figura 14 abaixo o material retido em cada peneira separados de acordo com abertura de cada uma delas. Todos os recipientes demonstrados na Figura 14 foram devidamente pesados e aferidos, assim tendo maior exatidão na hora de confeccionar a tabela de resultados e a curva granulométrica do agregado.

Figura 14 - Material retido em cada peneira



Fonte: O autor (2019).

Logo após realizar a separação, pesa-se o material que ficou retido em cada peneira. Com os valores em mãos é possível obter os dados necessários para confeccionar a curva granulométrica de cada agregado.

4.1.2 Determinação da massa unitária

Após realizar a secagem dos agregados, o recipiente deve ser limpo e posteriormente é realizado a pesagem. A Figura 15 apresenta a massa do recipiente.

Figura 15 - Peso do recipiente



Fonte: O autor (2019).

O volume do recipiente deve ser verificado. Logo após verificar o volume, lançar o material a uma altura de 10 a 12 cm do topo do recipiente até preenchê-lo completamente. Quando for agregado miúdo é necessário que haja o nivelamento da amostra, já o agregado graúdo é necessário que a superfície não exceda 15mm acima da borda superior do recipiente (Figura 16).

Figura 16 - Agregado graúdo sem exceder os 15mm acima da borda superior



Fonte: O autor (2019).

Posteriormente os agregados devem ser pesados, tendo assim todos os valores necessários para determinar a massa unitária.

4.1.3 Determinação da massa específica do agregado miúdo

Para determinar a massa específica do agregado miúdo por meio do frasco de Chapman, é necessário que a amostra seja colocada em estufa para a secagem. Após realizar a secagem da amostra, é necessário realizar a pesagem do material.

O frasco de Chapman (Figura 17) deve ser verificado para que as faces laterais não estejam úmidas. Se caso as laterais estiverem úmidas, elas deverão ser devidamente secas, porque a umidade nas laterais interfere diretamente no resultado do ensaio.

Figura 17 - Frasco de Chapman



Fonte: O autor (2019).

Após fazer as verificações, foi adicionado água até a marca de 200cm^3 . Logo após, colocado 500g do agregado cuidadosamente dentro do frasco. Agitou-se o recipiente para que as partículas de ar saiam, deixando de repouso para que o ensaio fique com maior exatidão. Foi

realizado a leitura do frasco, coletando a informação necessária para o cálculo da massa específica. A Figura 18 demonstra o estado do material após ser colocado no frasco, podendo assim fazer a leitura do volume.

Figura 18 - Frasco pronto para a leitura do volume



Fonte: O autor (2019).

Como pode ser observado na Figura 18, após colocar a quantidade exata de areia dentro do frasco é possível ver o quanto o nível da água subiu. Após verificar se todas as bolhas de ar saíram, consegue-se ver qual o volume que o material atingiu. Tal dado é o que será utilizado para achar a massa específica.

4.1.4 Massa específica do agregado graúdo

O primeiro passo consiste em pesar a amostra seca, a seguir, deve submergir o agregado em água por um período de 24 horas, deve ficar atento para que todo o material fique submerso. A Figura 19 mostra a argila no estado seco.

Figura 19 - Argila seca



Fonte: O autor (2019).

O segundo passo foi retirar a amostra da água e realizar a secagem superficial da amostra. Imediatamente após ser secada superficialmente, pesar a amostra como mostra a Figura 20.

Figura 20 - Argila saturada com a superfície seca



Fonte: O autor (2019).

O próximo passo consiste em colocar a amostra no recipiente, deve submergi-la em água (Figura 21).

Figura 21 - Amostra submersa em água



Fonte: O autor (2019).

Após submergi-la em água deve-se pesar a amostra submersa (Figura 22), lembrando que a balança deve ser previamente zerada com o recipiente vazio e imerso em água.

Figura 22 - Massa submersa em água da argila

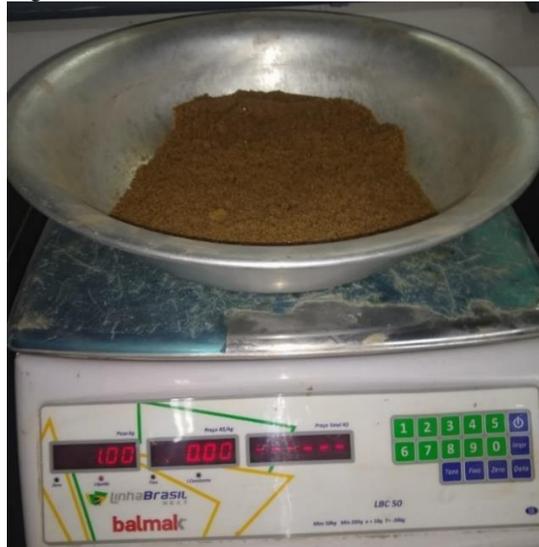


Fonte: O autor (2019).

4.1.5 Absorção de água

Para realizar o ensaio de absorção nos agregados, deve ser realizado a pesagem da amostra úmida. Como a areia é um material que tem a absorção de água medianamente alta, foi utilizada como exemplo de execução do ensaio. A Figura 23 mostra o peso úmido da areia.

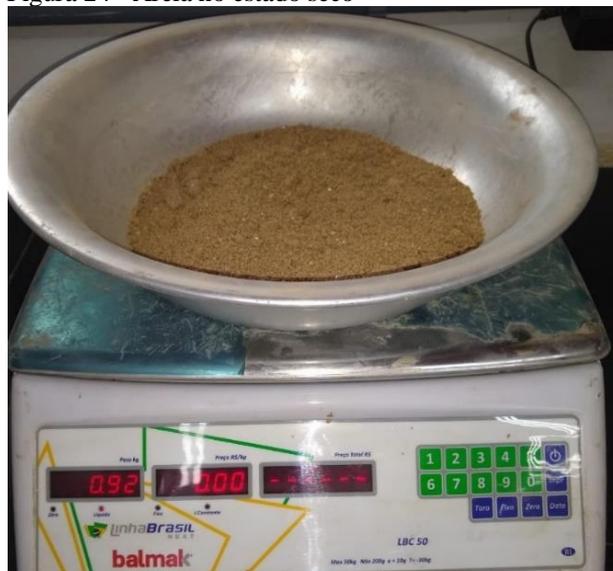
Figura 23 - Areia no estado úmido



Fonte: O autor (2019).

Após realizar a pesagem da amostra úmida, foi necessário colocar o material na estufa e deixar secar durante 24 horas. Foi retirado o material depois do período de secagem e realizada a pesagem (Figura 24).

Figura 24 - Areia no estado seco



Fonte: O autor (2019).

4.2 Dosagem dos traços

A determinação dos traços foi baseada na adaptação do método ABCP/ACI. Para efeito de comparação foram definidos quatro traços para atingir a resistência a compressão de 25 MPa, no qual, o primeiro é para o concreto convencional, o segundo contendo a substituição de 100% do agregado graúdo por poliestireno expandido, o terceiro com 100% de substituição da brita por argila expandida e o quarto foi mantido a substituição de 100% da argila expandida no lugar da brita, porém foi alterado o consumo de cimento. Lembrando que os traços serão executados utilizando o cimento CPV-ARI.

Na dosagem do concreto convencional foram necessários alguns dados obtidos na caracterização dos agregados, os dados obtidos utilizados na dosagem experimental foram, a massa específica da areia, módulo de finura da areia, diâmetro máximo do agregado graúdo, massa unitária da brita, massa específica da brita, e a massa específica do cimento que é estabelecida pelo fornecedor. Para finalizar a dosagem é necessário determinar alguns dados que se encontram em tabelas. De acordo com a escolha da resistência a compressão do concreto foi possível obter o fato a/c , encontrado na Figura 9. Segundo a Tabela 9 foi possível obter o consumo estimado de água, utilizando o diâmetro máximo do agregado e o abatimento. A Tabela 10 conseguiu fornecer o volume de agregado graúdo em 1m^3 de concreto, para isso foi necessário que o módulo de finura da areia e o diâmetro máximo do agregado fosse encontrado. Os demais dados foram obtidos de acordo com as equações que se encontram no item 3.9.7.

Os traços que terá o poliestireno expandido como agregado será feita apenas a substituição do volume de brita do traço do concreto convencional. Como o poliestireno expandido é um material muito leve não foi possível realizar os ensaios de caracterização por completo, então os dados que foram necessários para a caracterização foram obtidos através de referências. Já os traços que terão a argila expandida como agregado graúdo foi seguido o passo a passo da dosagem do concreto convencional.

Algumas dosagens foram estudadas, com o objetivo de ter um maior entendimento das principais metodologias utilizadas para a fabricação de concretos leves estruturais. Rossignolo (2009) recomenda desenvolver traços que combinem diferentes granulometrias de argila expandida, na substituição de agregados graúdos, para que o agregado se acomode melhor no corpo do concreto.

Segundo Angelin (2014) apud Malaiskiene et al. (2011) e Utama et al. (2012), outro elemento fundamental para a fabricação de concretos leves estruturais é a administração do teor

de argamassa, que devem apresentar valores acima de 65%, além de consumo de cimento superior à 500 kg/m³.

4.3 Produção dos traços em laboratório

4.3.1 Mistura dos materiais

Para a mistura dos materiais, seguiram-se as prescrições da NBR 12821 (2009). Devido à alta absorção de água pelos agregados leves, de forma a compensar esse efeito, fez-se um umedecimento deles por 24 horas, antes de serem utilizados na produção dos concretos.

O cimento CPV-ARI a ser utilizado para a confecção dos concretos é produzido por uma empresa bem conhecida, a InterCement, empresa na qual conta com todos os tipos de cimento em seu catálogo. O CPV-ARI vendido pela InterCement é nomeado da seguinte forma Cauê CPV-ARI e ele é encontrado em sacos de 40kg.

4.3.1.1 Concreto convencional

O processo de pesagem dos materiais deve ser feito com exatidão levando em consideração todas as características do ambiente no dia em que será feito o concreto. A figura 25 demonstra a separação dos materiais já pesados.

Figura 25 - Separação e pesagem dos materiais



Fonte: O autor (2019).

Já o processo da mistura, com a betoneira inclinada previamente umedecida, ocorreu da seguinte forma: primeiramente foi adicionado o agregado graúdo convencional, em seguida a

água, logo após, o cimento CPV-ARI e a areia foram colocados na betoneira. Em seguida houve a mistura dos materiais na betoneira de eixo inclinado por aproximadamente 5 minutos.

Após o término do processo de mistura do concreto, foi observado que o concreto apresentou a coesão ideal, sem serem observados os fenômenos de segregação e exsudação entre os materiais.

4.3.1.2 Concreto leve

O processo de mistura dos materiais, na fabricação dos concretos leves, ocorreu de forma idêntica ao utilizado para a confecção do concreto convencional, sendo com substituição total do agregado convencional por argila expandida e poliestireno expandido.

A Figura 26 representa os materiais separados para a produção do concreto leve com argila expandida, material no qual foi realizado o processo de saturação com o objetivo de minimizar a absorção da água que seria utilizada para a hidratação ideal do cimento que irá compor a mistura.

Figura 26 - Separação e pesagem dos materiais



Fonte: O autor (2019).

4.3.2 Ensaio de consistência

A realização do ensaio de consistência será dividido em algumas etapas, a primeira etapa é verificar se o concreto aparenta estar com todos os materiais devidamente misturados e apresentando ser coesivo, já no próximo passo deve-se ficar atento para que a base utilizada no ensaio esteja em um local plano. A terceira etapa consiste em lançar o concreto dentro do cone, tomando cuidado para que o concreto esteja devidamente adensado. Após esta etapa do adensamento da mistura o cone é removido. A última fase consiste em realizar a leitura do valor encontrado na medição.

A Figura 27 está representando a leitura da medição do ensaio de consistência, o valor encontrado deve estar no intervalo de mais ou menos 1cm do valor adotado na dosagem do concreto.

Figura 27 - Medição do Slump Test



Fonte: O autor (2019).

4.3.3 Adensamento dos corpos de prova

Segundo a revisão bibliográfica, foi adotado o adensamento através de golpes com a haste, para os corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, com a finalidade de evitar a formação de vazios. A Figura 27 representa os corpos de prova após o adensamento do concreto, colocados em um lugar plano evitando assim causar falhas no corpo de prova.

Figura 28- Corpos de prova



Fonte: O autor (2019).

4.3.4 Procedimento de cura

Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados, e, em seguida foram devidamente identificados e submetidos ao processo de cura na câmara úmida. Os corpos de prova permaneceram em cura até a data da realização dos ensaios, 7, 14, 21 e 28 dias após a desmoldagem, de acordo com as prescrições da NBR 5738 (2015). A figura 28 mostra os corpos de prova identificados e colocados na câmara úmida para o início da cura. Assim que a idade do corpo de prova estiver completa será levado a prensa hidráulica para obter a resistência à compressão.

Figura 29 - Corpos de prova na câmara úmida



Fonte: O autor (2019).

4.4 Resistência a compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS localizado em Varginha-MG.

A resistência à compressão dos concretos foi determinada segundo as prescrições da NBR 5739 (2007), para cada dosagem e idade, foram moldados 6 corpos de prova. Na tabela 12 abaixo está sendo representado a quantidade de corpos de prova para cada traço que será produzido. O consumo de cimento está sendo utilizado para diferenciar os traços.

Tabela 12 - Quantidade de corpos de prova

Traço	Consumo de cimento (kg/m ³)	Cimento	Tempo de Cura			
			7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
Convencional	315.4	CPV	6	6	6	6
100% de argila expandida (1)	334.0	CPV	6	6	6	6
100% de argila expandida (*)	400.0	CPV	6	6	6	6
100% de poliestireno expandido	362.0	CPV	6	6	6	6
TOTAL			24	24	24	24

(*) - Traço proposto após a obtenção dos resultados da dosagem 1;

Fonte: O autor (2019).

O processo que antecede a ruptura dos corpos de prova foi o de coletar algumas informações, como o diâmetro, altura e o peso do corpo de prova, podendo assim conseguir determinar alguns dados importantes para efeito de comparação. Na Figura 30 abaixo podemos observar como exemplo, um corpo de prova que foi levado a prensa para a ruptura.

Figura 30 - Corpo de prova



Fonte: O autor (2019).

4.5 Análise dos resultados

Nas análises dos resultados estão sendo demonstrado todos os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais, contém os traços que serão produzidos onde irá conter a substituição dos agregados graúdos por argila expandida e poliestireno expandido, também irá conter a análise dos resultados obtidos, comparando a resistência a compressão, a massa específica, o fator de eficiência dos concretos dosados e um comparativo de quantitativo de material por metro cubico de concreto e em vigas pré dimensionadas apenas levando em consideração o estado limite último, para obter um levantamento da quantidade de material a ser utilizado, essas vigas vão variar o comprimento entre 3, 4 e 5 metros. Os comparativos serão realizados levando em consideração os traços que obtiverem a resistência a compressão ideal para que seja considerado um concreto estrutural.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Composição granulométrica

A composição granulométrica dos agregados foi realizada seguindo os parâmetros dispostos no item 3.7.3 onde foi possível constatar as porcentagens retidas em cada peneira, retida acumulada, módulo de finura e dimensão máxima.

Na Tabela 13, é demonstrado as porcentagens retidas e acumulada da areia, o módulo de finura que foi encontrado de acordo com o somatório das porcentagens acumuladas e o diâmetro máximo das partículas. Através dos valores encontrados é possível identificar qual o tipo de areia e quais benefícios ela pode trazer para o concreto. A quantidade de partículas finas na areia é de grande importância, devido a ela conseguir se aderir melhor as deficiências que pode haver nas partículas de agregado graúdo

Tabela 13 - Composição granulométrica, módulo de finura e diâmetro máximo da areia

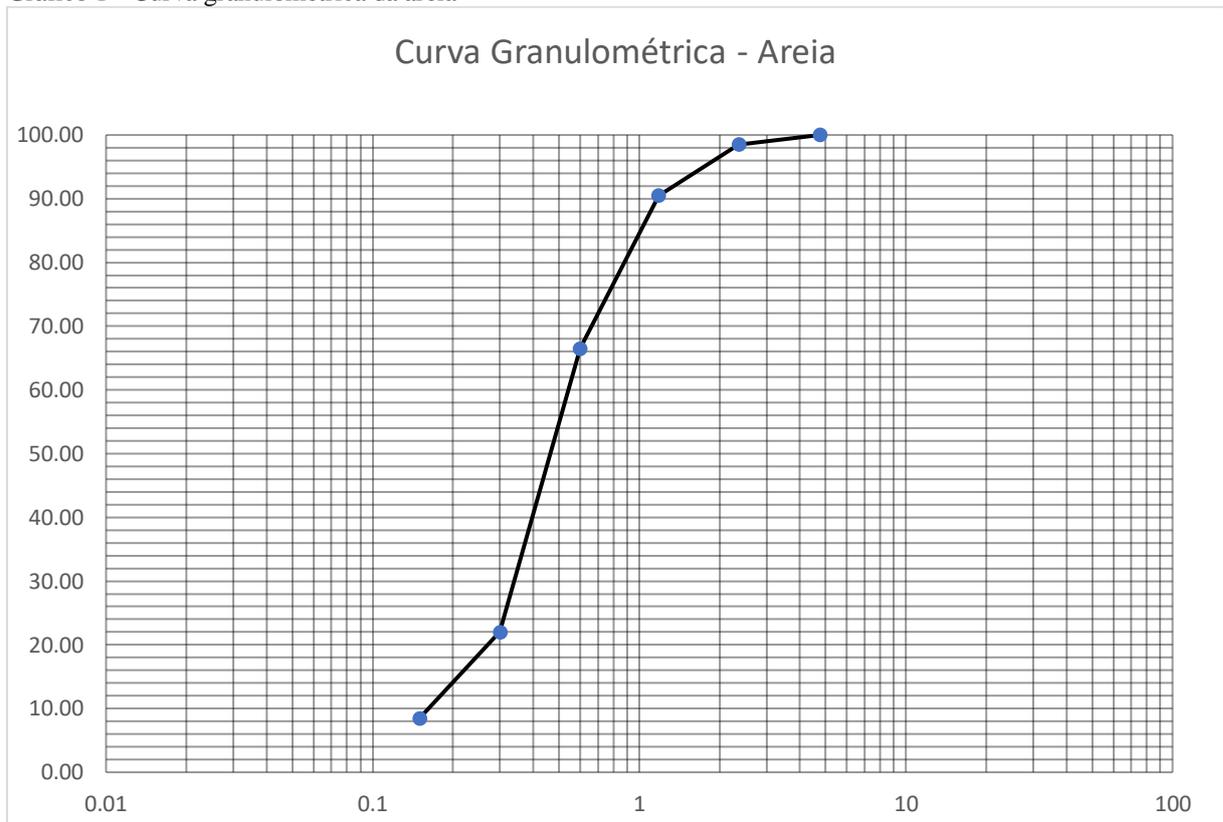
Φ Peneira (mm)	Massa Retirada (g)	% Retida Em Cada Peneira	% Retida Acumulada
4,75	0	0,00	0,00
2,36	30	1,50	1,50
1,2	160	8,00	9,50
0,60	480	24,00	33,50
0,3	890	44,50	78,00
0,15	270	13,50	91,50
Fundo	170	8,50	100,00
Σ	2000	100,00	214,00
Diâmetro Máximo (mm)	2,36	Módulo de Finura	2,14

Fonte: O autor (2019).

Conforme os valores apresentados na Tabela 13, o módulo de finura da areia é 2,14, e segundo o método da ABCP o valor mínimo para o módulo de finura é 2,2 como mostra a Tabela 10 (no item 3.9.6), devido a isso o valor utilizado para a dosagem deve ser o valor mínimo requerido. O diâmetro máximo foi determinado de acordo com a maior abertura da peneira que houve material retido, atribuindo-se o valor de 2,36 mm.

O Gráfico 1, mostra a curva granulométrica da areia, mostrando a distribuição das porcentagens retidas em cada peneira. Pode ser observado que a quantidade de material que fica retido entre as peneiras com abertura de 0,6mm e 0,3mm são as com a maior quantidade, o que justifica a maior linha reta.

Gráfico 1 - Curva granulométrica da areia



Fonte: O autor (2019).

Na Tabela 14, encontra-se as porcentagens retidas e acumulada da brita, o módulo de finura e o diâmetro máximo das partículas do agregado. O diâmetro máximo do agregado influencia muito na produção do concreto. O agregado que tem uma partícula com o diâmetro acima de 19mm requer certos cuidados, porque interfere diretamente na qualidade do mesmo.

Tabela 14 - Composição granulométrica da brita, módulo de finura e diâmetro máximo da brita

Φ Peneira (mm)	Massa Retirada (g)	% Retida Em Cada Peneira	% Retida Acumulada
19	50	1,00	1,00
12,5	500	10,00	11,00
9,5	870	17,40	28,40
6,30	2750	55,00	83,40
4,8	270	5,40	88,80
2,36	430	8,60	97,40
Fundo	130	2,60	100,00
Σ	5000	100,00	310,00

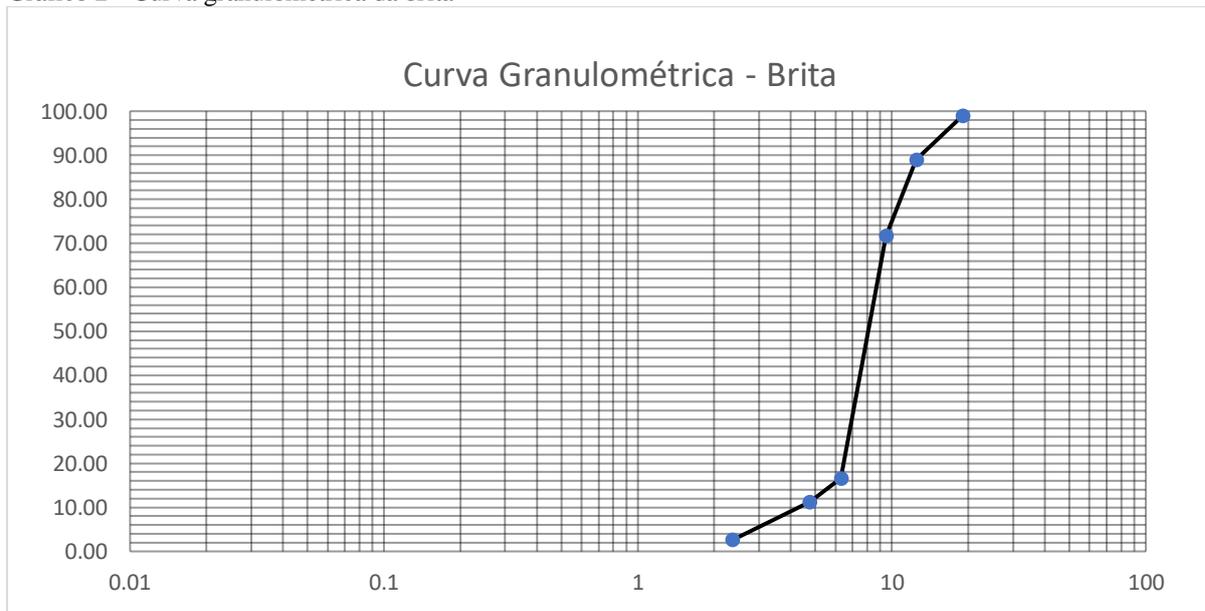
Diâmetro Máximo (mm)	19mm	Módulo de Finura	3,10
----------------------	------	------------------	------

Fonte: O autor (2019).

O diâmetro máximo da brita, seguindo o mesmo conceito utilizado na areia foi de 19mm e o módulo de finura que relacionado ao somatório das porcentagens de massa retida em cada peneira é de 3,10.

O Gráfico 2 apresenta a curva granulométrica da brita, onde pode-se perceber que entre os diâmetros de 12,5mm até 6,3mm há uma constância na linha, causado pela grande quantidade de material retido na peneira com abertura de 6,3mm.

Gráfico 2 - Curva granulométrica da brita



Fonte: O autor (2019).

Como mostra a Tabela 15, foram os dados obtidos no ensaio de granulometria da argila expandida. A Tabela 15 mostra as porcentagens retidas em cada peneira e a porcentagem acumulada. O módulo de finura e o diâmetro máximo do agregado por possível de ser encontrado.

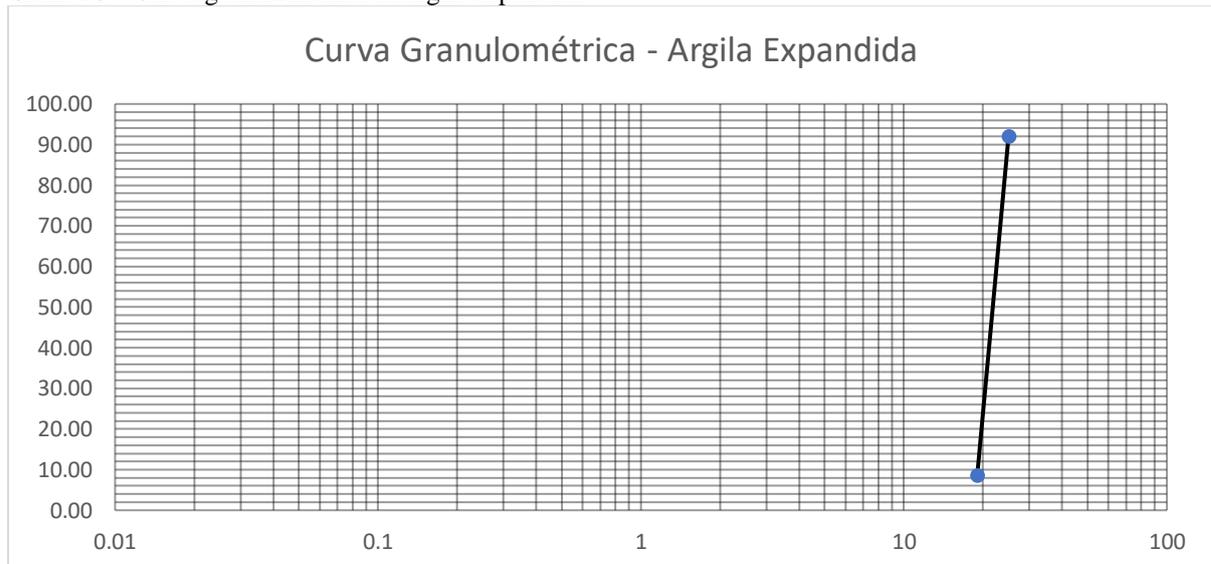
Tabela 15 - Composição granulométrica, módulo de finura e o diâmetro máximo da argila expandida

Φ Peneira (mm)	Massa Retirada (g)	% Retida Em Cada Peneira	% Retida Acumulada
25	160	8,00	8,00
19	1670	83,50	91,50
Fundo	170	8,50	100,00
Σ	2000	100,00	99,50
Diâmetro Máximo (mm)	25mm	Módulo de Finura	0,995

Fonte: O autor (2019).

Para efeitos de análise, é possível observar que, por a argila expandida apresentar apenas dois diâmetros de grãos tem como efeito um baixo módulo de finura. O diâmetro máximo por ser um material que tem um controle na hora da fabricação é de 25mm. O Gráfico 3 mostra a curva granulométrica da argila expandida, no qual está bem aparente a uniformidade dos grãos, por ser um agregado que é fabricado é possível que mantenha um certo diâmetro.

Gráfico 3 - Curva granulométrica da argila expandida



Fonte: O autor (2019).

O ensaio de granulometria do poliestireno expandido foi realizado com um volume muito maior de material, devido a sua grande leveza. A composição granulométrica do isopor é representada pelos dados representados na Tabela 16, o módulo de finura e o diâmetro máximo do agregado também se encontra na tabela citada acima. O Gráfico 4 representa a curva granulométrica do poliestireno expandido.

Tabela 16 - Composição granulométrica, módulo de finura e o diâmetro máximo do agregado

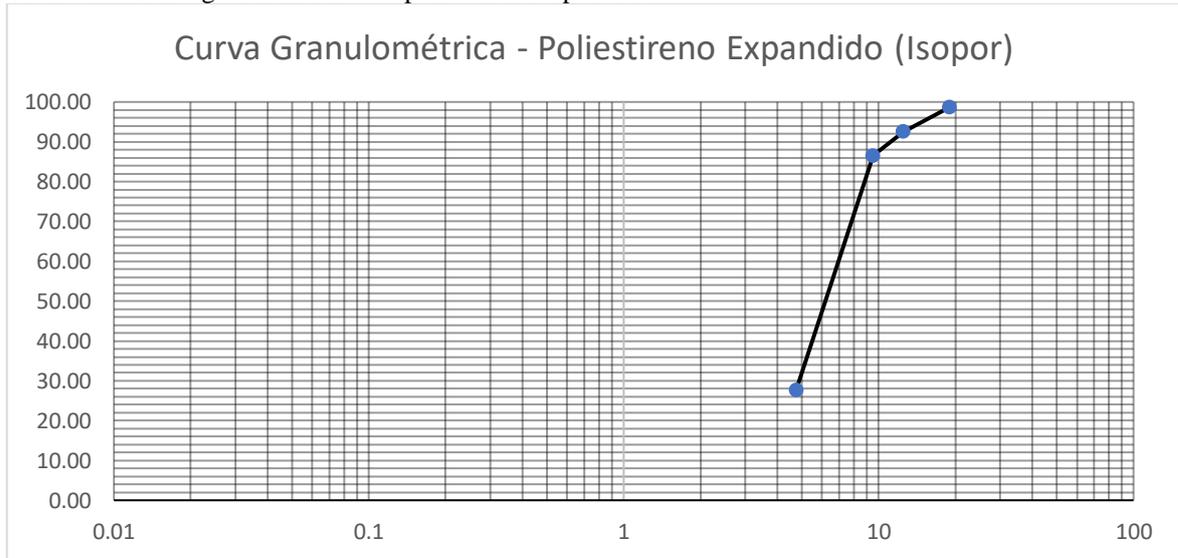
Φ Peneira (mm)	Massa Retirada (g)	% Retida Em Cada Peneira	% Retida Acumulada
19	0,66	1,31	1,31
12,5	3,08	6,12	7,44
9,5	3,02	6,00	13,44
4,75	29,6	58,85	72,29
Fundo	13,94	27,71	27,71
Σ	50,3	100,00	94,47'

Diâmetro Máximo (mm)	19mm	Módulo de Finura	0,94
----------------------	------	------------------	------

Fonte: O autor (2019).

O poliestireno expandido quando triturado, pode apresentar uma grande variação nos diâmetros das partículas. O diâmetro máximo do poliestireno expandido é de 19mm e o módulo de finura de 0,94, o que mostra a baixa variação nas massas retidas. Mesmo tendo o diâmetro máximo igual ao da brita, não quer dizer que ele terá a mesma distribuição das partículas dentro do corpo do concreto, pois, a massa específica dos dois agregados são extremamente diferentes.

Gráfico 4 - Curva granulométrica do poliestireno expandido



Fonte: O autor (2019).

5.2 Massa unitária

A massa unitária dos agregados foi definida de acordo com o item 3.7.4. A Tabela 17 contém os dados necessários para encontrar a massa unitária de cada agregado. Nela encontra-se o volume do recipiente, o peso do recipiente, o peso do agregado, e eventualmente a massa unitária de cada um. Com os valores encontrados nos ensaios de massa unitária foi possível comparar com dados encontrados na literatura, e estão bem parecidos.

Tabela 17 - Massa unitária dos agregados

Agregado	Volume do Recipiente (m ³)	Peso do recipiente (kg)	Peso do agregado (kg)	Massa Unitária (kg/m ³)
Areia	0,0146	7,10	29,18	1512,329
Brita	0,0146	7,10	28,22	1446,575
Argila expandida	0,0146	7,10	15,58	580,822
Poliestireno expandido	0,0146	7,10	7,33	15,753

Fonte: O autor (2019).

Como podemos observar na Tabela 17 acima, a massa unitária da argila expandida e do poliestireno expandido, são muito menores que os agregados convencionais, onde deixa evidente que se forem utilizados de forma correta faz com que ocorra a redução da massa específica do concreto.

Para efeitos de comparação entre o poliestireno expandido e a brita, podemos determinar que a massa unitária do isopor é cerca de 90 vezes menor que a massa unitária da brita, com isso é possível ver o quão leve o poliestireno expandido é. Fazendo outro comparativo, levando em conta a argila expandida e a brita, podemos observar que a argila expandida é cerca de 2,5 vezes mais leve que a brita, o que traria alguns benefícios ao processo de utilização da argila expandida.

5.3 Massa específica do agregado miúdo

O método de determinação da massa específica do agregado miúdo por meio do frasco de Chapman, descrito no item 3.7.6, foi utilizado para encontrar a característica em questão da areia. A Tabela 18 mostra a leitura que foi realizada do frasco, e a massa específica encontrada com a utilização da equação 5. Os valores encontrados nas referências utilizadas estão bem próximos dos dados encontrados no ensaio, o que torna o ensaio confiável.

Tabela 18 - Massa específica da areia

Agregado	L (cm ³)	Massa específica (g/cm ³)
Areia	392	2,604

Fonte: O autor (2019).

O poliestireno expandido, por ser um material que possui a massa específica muito baixa, necessita de uma aparelhagem com alta precisão e de grande valor, o que torna o ensaio inviável de ser realizado. A massa específica do poliestireno expandido de acordo ABRAPEX (200) fica entre 0,013 g/cm³ e 0,016 g/cm³, ou seja, é um material extremamente leve.

5.4 Massa específica do agregado graúdo

Seguindo os procedimentos descritos no item 3.7.5, foi possível obter a massa específica dos agregados graúdos. A Tabela 19 represente os dados coletados em cada procedimento do ensaio de determinação das massas específicas.

Tabela 19 - Massa específica do agregado seco, massa específica do agregado na condição saturado superfície seca e massa específica aparente

Agregado	Massa ao ar da amostra seca (g) gramas;	Massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g)	Massa em água da amostra (g)	Massa específica do agregado seco (g/cm ³)	Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (g/cm ³)	Massa específica aparente (g/cm ³)
Brita	500,19	503,18	321,84	2,805	2,775	2,758
Argila	500,33	560,22	19,98	1,042	1,037	0,926

Fonte: O autor (2019).

Comparando os dados obtidos no ensaio, podemos observar que ambas massas específicas da brita são relativamente maiores que a argila expandida. Mesmo a argila expandida absorvendo uma quantidade de água superior à da brita, ela ainda apresenta massas bem menores que a brita.

Há uma diferença muito grande entre as massas submersas em água dos agregados, o que justifica a grande diferença entre os resultados. A argila expandida no seu interior conta com grande quantidade de partículas de ar, com isso na hora da execução do ensaio a argila mesmo saturada ela permanece menos densa que a água, ou seja, ela flutua. A justificativa para as partículas de ar em sua composição devesse a alta porosidade dos grãos de argila expandida, com isso pode-se concluir que quanto maior for a partícula de argila maior vai ser a quantidade de ar dentro dos grãos, e conseqüentemente o aumento da porosidade.

5.5 Absorção de água dos agregados

A absorção de água dos agregados afeta diretamente no resultado do concreto. Por isso os procedimentos necessários para realizar o ensaio devem ser com o máximo de precisão possível. A Tabela 20 apresenta os valores de massa seca do agregado e os valores de massa úmida. Com os dados em mão foi possível encontrar a taxa de absorção de água de cada agregado.

Tabela 20 - Absorção de água dos agregados

Agregado	Massa Úmida (g)	Massa seca (g)	Absorção de água (%)
Areia	1000	920	8,696
Argila Expandida	1000	820	21,951
Brita	1000	994,06	0,598

Fonte: O autor (2019).

Como já era de se esperar a areia por ser um agregado miúdo e com partículas pequenas apresentaria uma taxa de absorção mediana. Já a argila por ser um agregado graúdo a tendência era de ter a absorção de água baixa, mas devida a sua grande porosidade a argila absorve e mantém uma quantidade elevada de água no seu interior.

A falta do poliestireno expandido na Tabela 20, é devido ao material não poder ser colocado em estufa. O método utilizado para determinar a absorção requer um equipamento de alta custo e precisão. E por ser um material incapaz de segurar a água dentro do seu interior pode-se dizer que é um material que não tem uma taxa de absorção que irá interferir na produção do concreto.

5.6 Dosagem experimental

5.6.1 Concreto convencional

Com a caracterização dos agregados finalizada, foi determinado o traço do concreto convencional (TCC) seguindo o método da ABCP/ACI. A dosagem foi realizada utilizando os dados obtidos nos ensaios de caracterização, a consistência adotada foi de 9cm podendo ter uma variação de 1cm para mais ou para menos. A resistência característica é de 25MPa.

A Tabela 21 apresentar o traço encontrado após realizar as análises dos resultados da caracterização.

Tabela 21 - Traço em massa do concreto convencional

Traço em massa final - Concreto convencional				
Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Consumo de cimento (kg/m ³)
1	2,56	3,35	0,65	315,4

Fonte: O autor (2019).

5.6.2 Concreto leve com argila expandida

O traço que irá conter 100% de argila expandida (TCA) no lugar da brita está representado na Tabela 22, na qual está demonstrado a proporção de cada material. Pode-se observar na tabela abaixo, que com a substituição de 100% da brita pela a argila expandida ocorre uma redução no consumo de areia e no consumo de agregado graúdo, devido divergência das características da argila expandida para a brita.

Tabela 22 - Traço em massa do concreto leve com 100% de argila expandida

Traço em massa - Concreto leve - Argila Expandida - 100%				
Cimento (kg)	Areia (kg)	Argila (kg)	Água (kg)	Consumo de cimento (kg/m ³)
1	2,35	1,43	0,65	307.40

Fonte: O autor (2019).

5.6.3 Concreto leve com poliestireno expandido

A dosagem que irá conter o poliestireno expandido (TCEPS) foi passada de traço em massa para traço em volume. Tal conversão foi necessária devido há grande leveza do poliestireno expandido o que causa uma certa dificuldade na hora de realizar a pesagem. Com o traço convencional convertido para volume obtivemos os dados demonstrados na Tabela 23 onde mostra o traço que irá conter a substituição total do agregado graúdo por poliestireno expandido.

Tabela 23 – Traço em volume do concreto leve com 100% de poliestireno expandido

Traço em volume – Concreto leve – Poliestireno Expandido – 100%				
Cimento (L)	Areia (L)	Poliestireno (L)	Água (L)	Consumo de cimento (kg/m ³)
1,0	2,37	3,24	0,65	315.4

Fonte: O autor (2019).

5.7 Propriedades no estado fresco

As caracterizações das propriedades dos concretos no estado fresco foram realizadas no laboratório de Materiais da Construção Civil do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS.

Com os traços dosados em mãos, foi realizado todo o processo de produção, com isso foi possível ver o quão preciso é o método de dosagem para os concretos convencionais, já para os concretos leves ficou claro que é necessário ter algumas adaptações. Para que o concreto esteja de acordo com o método utilizado ele deve apresentar a coesão, consistência e trabalhabilidade ideal para a moldagem dos corpos de prova. Não devem apresentar fenômenos como exsudação e a segregação dos agregados.

Levando em consideração o índice de consistência que é determinado pelo o slump test, tal ensaio é de suma importância para que seja comprovado a eficácia da dosagem. Também é utilizado para verificar se há um excesso de água no corpo do concreto e se há ou não uma predominância de materiais finos no material produzido. A Tabela 24 demonstra os primeiros

valores encontrados no ensaio de consistência. O traço convencional representado pela sigla TCC, o traço de concreto leve com argila expandida representado pela sigla TCA e a sigla TCEPS representa o traço com poliestireno expandido.

Tabela 24 – Índice de consistência

TRAÇO	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA (cm)	CONSUMO DE CIMENTO (kg/m ³)	MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³)
TCC	9	315.40	23.60
TCA	15	307,40	15.10
TCEPS	12	315.40	12.30

Fonte: O autor (2019).

Diante dos valores obtidos nos ensaios de consistência representados pela Tabela 24, foi constatado a eficiência do método de dosagem ABCP para concretos convencionais, mas para os traços de concreto leves foi necessário que tivesse algumas correções nos traços determinados.

O traço com poliestireno expandido a princípio apresentou ótimas características como por exemplo a coesão, mas a consistência não atingiu o intervalo necessário que era de 9cm podendo variar de 1cm para mais ou para menos. Para corrigir o traço foi feita a adição proporcional de cimento a mistura, com isso obtivemos o resultado ideal e o traço corrigido. No traço corrigido está claro que o poliestireno expandido por ser um agregado muito leve ele não contribui na consistência do concreto, devido a tal característica foi observado a diminuição do consumo de água, o novo traço (TCEPSC) com as correções já feitas será demonstrado na Tabela 25.

Tabela 25 – Traço em volume do concreto leve com poliestireno expandido corrigido

Traço em volume – Concreto leve – Poliestireno Expandido – 100% - Com correções				
Cimento (L)	Areia (L)	Poliestireno (L)	Água (L)	Consumo de cimento (kg/m ³)
1,0	1,92	2,77	0,54	361,20

Fonte: O autor (2019).

No traço que tem a argila expandida ficou claro que tinha um excesso de agregado graúdo, ou seja, a falta de finos iria ocasionar em um concreto com proporções que não o beneficiaria, na Figura 31 é evidente a desproporcionalidade da mistura o que tornaria a moldagem dos corpos de prova complicada devido ao tamanho das partículas que a argila expandida apresenta. Assim que foi detectado tal problema foi feita as correções necessárias,

foi adicionado cimento e areia com o intuito de elevar o número de finos no corpo do concreto, e claro, tendo em mente as características no estado fresco que é atingir a coesão e a consistência ideal.

Figura 31- Concreto TCA



Fonte: O autor (2019).

Com as correções feitas foi realizado novamente o ensaio de consistência e tendo assim o resultado esperado. O valor obtido na medição foi de 10cm, valor no qual está no intervalo de mais ou menos 1cm. Após as correções, sem problemas foram moldados os corpos de prova e com isso obtive o traço corrigido (TCAC) demonstrado na Tabela 26 nela pode-se observar a redução do consumo de água e o aumento no consumo de cimento.

Tabela 26 – Traço em massa do concreto leve com argila expandida corrigido

Traço em massa – Concreto leve – Argila Expandida – 100%				
Cimento (kg)	Areia (kg)	Argila (kg)	Água (kg)	Consumo de cimento (kg/m ³)
1	2,11	1,13	0,45	334

Fonte: O autor (2019).

5.8 Propriedades no estado endurecido

As análises de resistência à compressão axial e avaliação da massa específica, foram realizadas no Laboratório de Materiais da Construção Civil do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS seguindo os quesitos normativos descritos pela NBR 5739 (1994)

Como foi dito no item 4.6.5 após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados, e, em seguida, submetidos ao processo de cura úmida. Os corpos de prova permaneceram em cura até as datas da realização dos ensaios. Com os corpos de provas devidamente curados, os mesmos foram levados a prensa hidráulica nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias, com isso obtivemos os valores médios do traço convencional (TCC), do traço com argila expandida corrigido (TCAC) e do traço com o poliestireno expandido corrigido (TCEPSC), todos os dados estão sendo demonstrados na Tabela 27.

Tabela 27- Resistência à compressão axial e massa específica do concreto convencional e concretos leves

Traço	Resistência a Compressão (MPa)				Consumo de Cimento (Kg/m ³)	Massa Específica (kN/m ³)
	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias		
TCC	20.50	25.00	28.50	29.20	315.40	23.60
TCAC	18.32	18.72	19.22	20.00	334.00	15.10
TCEPSC	3.42	3.87	4.12	5.11	361.20	12.30

Fonte: O autor (2019).

Analisando os dados obtidos do traço com poliestireno expandido (TCEPSC), é possível perceber que o mesmo não chegou nem próximo a resistência para que ele foi determinado, tal erro poder ter sido causado pela alta quantidade de agregado que foi adicionado no mesmo, causando uma proporção inadequada para que o concreto atingisse a resistência ideal. Outra possível causa pode ser devido a deformabilidade do poliestireno expandido, o que deixa o concreto mais maleável deixando-o com menor resistência. Diante de tal problema, tem-se algumas soluções sendo uma delas, a utilização de outro método de dosagem.

O concreto leve com a argila expandida (TCAC) apresentou um ótimo dado aos 7 dias, mas nas outras idades é possível ver que a resistência não atingiu o esperado. Teve um ganho de resistência, mas não tão eficiente quanto ao concreto convencional. Diante dessa situação foi proposto um novo traço com argila expandida alterando apenas o consumo de cimento com o intuito de elevar a resistência.

O novo traço de argila expandida (TCAII) está sendo demonstrado na Tabela 28. Com o aumento do consumo de cimento conseqüentemente o consumo dos outros materiais serão

alterados, houve a redução do consumo de areia, de argila expandida e a redução do consumo de água o que ocasiona na diminuição do fator água cimento. Com o novo traço definido, o mesmo foi produzido em laboratório tendo os ensaios no estado fresco realizados, com isso foi possível obter que a resistência estava no intervalo de 9cm mais ou menos 1cm.

Tabela 28 - Traço em massa do concreto leve com a argila expandida com alteração do consumo de cimento

Traço em massa – Concreto leve – Argila Expandida – 100%				
Cimento (kg)	Areia (kg)	Argila (kg)	Água (kg)	Consumo de cimento (kg/m ³)
1	1.82	1,00	0,40	400

Fonte: O autor (2019).

Com o segundo traço de argila já produzido os corpos de prova foram moldados e levados ao processo de cura úmida e posteriormente foram rompidos. Após esses processos obtive os valores de resistência a compressão e a massa específica do concreto produzido.

Comparando os valores obtidos do concreto leve (TCAII) com o concreto convencional (TCC) demonstrados na Tabela 29, está evidente que o aumento do consumo de cimento interfere diretamente na resistência à compressão do concreto. O concreto leve (TCAII) aos 7 dias teve a resistência a compressão 20% maior que a do concreto convencional (TCC), característica que já tinha sido observada no traço do concreto leve (TCA) que apresentou uma boa resistência à compressão com 7 dias. Já nas demais idades aconteceu o que era de se esperar, o concreto leve adquiriu resistência, mas não tão eficaz quanto o concreto convencional.

Tabela 29 - Resistência à compressão axial e massa específica do concreto convencional e o concreto leve com argila expandida

Traço	Resistência a Compressão (MPa)				Consumo de Cimento (Kg/m ³)	Massa Específica (kN/m ³)
	7 dias	14 dias	21 dias	7 dias		
TCC	20.50	25.00	28.50	29.20	315.40	23.60
TCAII	25.67	27.26	28.87	30.28	400	16.30

Fonte: O autor (2019).

Com o aumento do consumo de cimento era de se esperar que a massa específica iria aumentar consideravelmente, mas levando em consideração que esta alteração, a redução do consumo dos demais agregados foi efetiva, com isso a massa específica sendo comparada com o concreto leve (TCA) teve um aumento de 8%, o que não tira a principal característica desse material. Segundo Angelin (2014 apud Rossignolo, 2009), considera-se a estabilização dos valores de resistência à compressão aos 7 dias de idade uma característica dos concretos com

agregados leves, pois normalmente aos 7 dias de idade, os valores da resistência à compressão da matriz de cimento ultrapassam os valores da resistência à compressão do agregado, principalmente com a utilização de cimento de alta resistência inicial, ou seja, a resistência final do concreto não se beneficia na mesma proporção com o aumento da resistência à compressão da matriz de cimento.

5.9 Fator de eficiência

Ao considerar um concreto com resistência a compressão de 25 MPa e a massa específica seguindo as recomendações das normas igual 25 kN/m³ e o fator de eficiência de 10 MPa.dm³/kg, como parâmetro de concreto com características estruturais para comparação, os resultados demonstrado na Tabela 30 deixa claro que os traços estudados e desenvolvidos tem eficiência superior ao traço considerado.

Tabela 30 - Fator de eficiência

Traço	Resistência à compressão (MPa)	Massa específica (kg/m ³)	Fator de eficiência (MPa.dm ³ /kg)
	28 dias		
TCC	29.20	23.60	12.37
TCAII	30.28	16.30	18.58

Fonte: O autor (2019).

Agora comparando os traços descritos na tabela acima é possível observar a eficácia do concreto leve (TCAII), sendo que o fator de eficiência dele é cerca de 50,15% maior que o do concreto convencional (TCC), dessa forma a viabilidade da aplicação do material é justificada.

5.10 Comparativo entre traços de concreto leve

5.10.1 Argila expandida

Durante o processo de pesquisa realizado pela Angelin (2014), com o tema abordado concreto leve estrutural com ênfase nos desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais tem-se um estudo completo sobre as características da argila e um estudo de dosagem, fabricação do concreto leve com argila expandida e a análise dos resultados oriundos da parte mecânica do concreto produzido.

Realizando um comparativo dos resultados obtido neste trabalho com a dissertação redigida por Angelin (2014) é possível perceber o quão expansivo vem se tornando o mundo com concreto leve, tendo ele várias formas de serem executados, e diversos tipos de material sendo utilizados na confecção, como por exemplo, o uso da sílica ativa e aditivos para concreto. Diante dos resultados que serão utilizados no comparativo que foram coletados por Angelin (2014) foram descritos cinco traços utilizando a argila como agregado, dentre esses traços o mais próximo ao que foi produzido no presente trabalho foi o T5, traço no qual o processo de execução contou com substituição de 100% argila expandida no lugar do agregado graúdo convencional, com isso foi possível obter as características físicas e mecânicas da dosagem estudada. Na Tabela 31 consta os dados obtidos por Angelin (2014) em seu estudo experimental e os dados do presente trabalho que serão utilizados para o comparativo.

Tabela 31 - Comparativo entre concretos leves

Traço	Argila Expandida (%)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Massa específica (kN/m ³)	Resistência à compressão (MPa)		Fator de eficiência (MPa.dm ³ /kg)
				7 dias	28 dias	
T5	100	580	16.87	26	32	18.97
TCAII	100	400	16.30	25.67	30.28	18.58

Fonte: Angelin (2014). O autor (2019).

Comparando os dados descritos na Tabela 31, o consumo de cimento do traço (T5) proposto por Angelin (2014) é cerca de 31% maior que o traço (TCAII) produzido neste trabalho, esta diferença deveria ocasionar em um aumento considerável no ganho de resistência do concreto e com o aumento dessa característica o material a ser produzido se torna mais caro o que vai contra um conceito base na construção civil. Mesmo com a diferença do consumo de cimento a massa específica e as resistências à compressão dos dois traços que estão sendo comparados tiveram uma variação de apenas 3,35%, o que ainda deixa ainda mais claro que o concreto leve se torna cada vez mais viável e claro se ele for utilizado de forma correta.

5.10.2 Poliestireno expandido

A pesquisa realizada por Ozorio (2016), com o tema abordado concreto leve com perolas de EPS contém todos os processos, estudos sobre as características do poliestireno expandido, fabricação do concreto leve com as pérolas e a análise dos resultados físicos e mecânico do concreto produzido.

Realizando um comparativo dos resultados obtido neste trabalho com a dissertação redigida por Ozorio (2016) é possível perceber que o ramo que o poliestireno expandido vem se tornando cada vez maior, sendo um deles a utilização deste material como agregado para concreto leve.

Através dos resultados que foram coletados por Ozorio (2016) durante o seu processo experimental foram descritos diversos traços utilizando o poliestireno expandido como agregado, dentre esses traços o mais próximo ao que foi produzido no presente trabalho foi o T1, traço no qual o processo de execução contou com substituição de 100% de poliestireno expandido no lugar do agregado graúdo convencional, com isso foi possível obter as características físicas e mecânicas da dosagem estudada.

Na Tabela 32 consta os dados obtidos por Ozorio (2016) em seu estudo experimental e os dados do presente trabalho que serão utilizados para o comparativo.

Tabela 32 - Comparativo entre concretos leves com poliestireno expandido

Traço	Poliestireno Expandido (%)	Massa específica (kN/m ³)	Resistência à compressão (MPa)		Fator de eficiência (MPa.dm ³ /kg)
			7 dias	28 dias	
T1	100	14.54	17.60	20.00	13.76
TCEPSC	100	12.36	3.42	5.12	4.14

Fonte: Ozorio (2016). O autor (2019).

Comparando os dados descritos na Tabela 32, fica evidente que se o poliestireno expandido for utilizado de forma correta ele pode trazer benefícios ao concreto, mas se utilizado de forma inadequada ele trará características prejudiciais ao material. A massa específica das duas misturas estão dentro do que é proposto pela literatura, mas o erro na dosagem está claro. O método ABCP não foi desenvolvido para realizar dosagem com agregados extremamente leves como o poliestireno expandido, com isso ele acaba se tornando inviável devido ao elevado consumo de cimento que terá que ser proposto, então algumas referências recomendam que seja utilizado dosagens já conhecidas e testadas.

5.11 Comparativo de quantitativo entre o concreto leve e o concreto convencional

5.11.1 Quantitativo de material

Após constatar que a dosagem do concreto leve com a argila expandida (TCAII) poderia ser utilizado como concreto estrutural realizou-se um levantamento de quantitativo para que

fosse realizada a comparação deste com o concreto convencional. A Tabela 33 demonstra a quantidade de cada material necessária para produzir 1m³ de concreto, utilizando-se a argila expandida e o agregado convencional.

Tabela 33 - Quantitativo de materiais

Materiais	Traço		
	TCC	TCAII	
Cimento (kg/m ³)	315	400	
Areia (kg)	807	728	
Agregado Graúdo	Brita (kg)	1057	x
	Argila Expandida (kg)	x	400
Água (litros)	205	160	

Fonte: O autor (2019).

Na Tabela 33 está o consumo de materiais para produzir 1m³ de concreto, através desses dados é possível fazer um comparativo. Levando em consideração o consumo de cimento é evidente que o concreto leve consome 27% a mais de cimento que o concreto convencional, está diferença segundo Rossignolo et al. (2003) a resistência do concreto leve é mais eficiente na argamassa, mistura na qual é composta por cimento e areia. Já na redução dos outros materiais é justificada de acordo com o diâmetro do agregado graúdo pois é onde a argila ocupa mais espaço no corpo do concreto.

Para melhor exemplificar a redução do consumo de materiais, nada mais justo que aplicar em uma situação real de utilização os dados obtidos através dos ensaios realizados, com isso será proposto o dimensionamento de uma viga variando o seu comprimento e consequentemente as demais características do elemento.

5.11.2 Redução no consumo de material em vigas

O concreto leve com argila expandida produzido neste trabalho obteve características iniciais para ser considerado como função estrutural. Realizou-se o dimensionamento de uma viga que faz parte da estrutura de uma residência, variando apenas comprimento, os vãos propostos foram de 3, 4 e 5 metros. Tal proposta foi com o intuito de comprovar que a substituição do agregado graúdo convencional por argila expandida aliviaria a estrutura e consequentemente acarretaria a diminuição do consumo de aço e materiais na produção do elemento estrutural.

Com o dimensionamento das vigas feito, foi realizado um levantamento do consumo de materiais e foi constatado que o consumo varia de acordo com o tamanho do elemento. A Tabela 34 está demonstrando o levantamento realizado para a viga com o vão de 3 metros. Através desta análise foi constatado que há um aumento de 20,63% no consumo de cimento no concreto leve com a argila expandida, mas nos outros materiais houve uma redução de 11,30% no consumo de areia e 26,92% no consumo de água, já no agregado graúdo a redução é de 165,08% devido aos tamanhos das partículas e a sua massa específica.

Tabela 34 - Quantitativo de material para a viga de 3 metros

VIGA 3 metros - Concreto Convencional		VIGA 3 metros - Concreto Leve		Redução dos materiais (%)
Consumo de material		Consumo de material		
Material	Quantidade (kg)	Material	Quantidade (kg)	
Cimento	50.00	Cimento	63.00	20.63
Areia	128.00	Areia	115.00	11.30
Brita	167.00	Argila	63.00	165.08
Água	33.00	Água	26.00	26.92

Fonte: O autor (2019).

Na Tabela 35 consta o levantamento realizado para a viga com o vão de 4 metros onde está evidente que há um aumento de 21,19% no consumo de cimento, e nos outros materiais houve uma redução de 10,70% no consumo de areia e 27,08% no consumo de água.

Tabela 35 - Quantitativo de material para a viga de 4 metros

VIGA 4 metros - Concreto Convencional		VIGA 4 metros - Concreto Leve		Redução dos materiais (%)
Consumo de material		Consumo de material		
Material	Quantidade (kg)	Material	Quantidade (kg)	
Cimento	93.00	Cimento	118.00	21.19
Areia	238.00	Areia	215.00	10.70
Brita	311.00	Argila	118.00	163.56
Água	61.00	Água	48.00	27.08

Fonte: O autor (2019).

Na Tabela 35 está sendo descritos o quantitativo de material para a viga com o vão de 5 metros onde pode-se perceber que houve um aumento de 20.63% no consumo de cimento, e os outros materiais tiveram a redução semelhante a viga de 3 metros, tiveram as reduções nos consumos de materiais parecidas.

Tabela 36 - Quantitativo de material para a viga de 5 metros

VIGA 5 metros - Concreto Convencional		VIGA 5 metros - Concreto Leve		Redução dos materiais (%)
Consumo de material		Consumo de material		
Material	Quantidade (kg)	Material	Quantidade (kg)	
Cimento	150.00	Cimento	189.00	20.63
Areia	382.00	Areia	344.00	11.05
Brita	500.00	Argila	189.00	164.55
Água	97.00	Água	76.00	27.63

Fonte: O autor (2019).

5.11.3 Redução do consumo de aço em vigas

A diminuição da massa específica do concreto resulta em um alívio nos carregamentos que irá existir em uma estrutura, com isso é possível analisar se realmente o concreto leve iria fazer uma grande diferença no consumo de aço de um elemento, para isso foi realizado o dimensionamento levando em consideração o estado limite último, apenas para determinar as áreas de aço que seriam necessárias para suportar os carregamentos. Após realizar o dimensionamento foi encontrado a área de aço necessária para que a viga aguentasse todos os esforços. A Tabela 37 apresenta as áreas de aço encontradas nos dimensionamentos das vigas. As vigas com a nomenclatura 3CC, 4CC e 5CC são as que foram dimensionadas utilizando o concreto convencional e com a sigla 3CA, 4CA e 5CA foram dimensionadas utilizando o concreto leve com a argila expandida.

Tabela 37 - Área de aço das vigas dimensionadas

Viga	As (cm ²)	Redução das As (%)
3CC	2.24	12.38
3CA	2.00	
4CC	3.01	14.54
4CA	2.63	
5CC	3.98	16.32
5CA	3.43	

Fonte: O autor (2019).

Após encontrar a área de aço foi constatado que a redução da área de aço está diretamente relacionada com o tamanho da estrutura, o que comprova que com a redução da massa específica do concreto pode haver uma economia considerável no consumo de aço da estrutura.

Com as áreas de aço já encontradas foi determinado o diâmetro, quantidade de barras longitudinais e posteriormente foi determinado as armaduras transversais. Através desse levantamento foi feito um levantamento do consumo ferragem para as vigas de 3, 4 e 5 metros e com base nos dados obtidos foi feita uma cotação dos valores na empresa Medida Certa Ferro e Aço, situada na cidade de Varginha-MG. Na cotação enviada pela a empresa ficou evidenciado que há uma redução no valor do aço que iria compor as vigas. A presente cotação consta em anexo.

A redução no consumo de aço é consequência da diminuição do carregamento, mas isso não quer dizer que a estrutura será mais barata, pois depende de outros fatores, sendo um deles o valor do agregado leve, que no caso é a argila expandida que por ser um material industrializado ainda tem o seu valor um relativamente alto comparando com o agregado graúdo convencional e com isso faz com que esse tipo de material seja utilizado em casos específicos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os objetivos inicialmente estipulados, o programa experimental utilizado mostrou-se adequado para a análise das características, propriedades dos agregados escolhidos, análise dos traços dosados pelo método da ABCP que foi necessário realizar algumas adaptações para que fosse utilizado na dosagem dos concretos leves, estudo das propriedades no estado fresco e endurecido e no levantamento do quantitativo dos materiais a serem utilizados na produção de um metro cubico e em vigas de três, quatro e cinco metros.

Com todos os comparativos realizados foi possível verificar a eficiência do concreto leve, ou seja, ele poderá trazer inúmeros benefícios ao ramo da construção civil. No qual o mais importante seria o alívio que traria as edificações que optarem por utilizá-lo. Mas como é um material pouco conhecido ele acaba se tornando um produto relativamente caro devido ao custo do agregado leve.

Conclui-se que o concreto convencional por ser o mais utilizado em todo o mundo tem o custo baixo, já o concreto leve por ser um produto que ainda não está tão conhecido no mercado atual possui o valor total maior que o concreto convencional. A diferença de valor entre os dois concretos pode ser revertida se forem utilizados em locais em que o peso próprio do concreto convencional interfira altamente na estrutura como um todo, sendo assim o concreto leve uma ótima opção para que haja uma diminuição do custo.

A partir do conjunto de informações das dosagens estudadas no programa experimental, observou-se que o concreto leve com a argila expandida pode ser utilizado em elementos estruturais e pré-moldados, devido, principalmente, à diminuição no tempo de moldagem devido ao uso do cimento CPV-ARI e da sua massa específica, sugere-se, então, sua aplicação em elementos estruturais ou de vedação, como painéis de concreto e lajes alveolares. Já o concreto leve com o poliestireno expandido não obteve os resultados que se esperava, então sugere-se que se utilize outro método de dosagem para que possa haver um resultado mais satisfatório. Durante o desenvolvimento desta pesquisa, uma série de aspectos referentes ao desenvolvimento dos concretos leves mostrou-se merecedores de aprofundamento científico futuro. Com isso, a seguir, apresentam-se algumas propostas de desenvolvimentos futuros, realizar um estudo de métodos de dosagem para concretos leves, um estudo em que realize as verificações necessárias para que os concretos leves sejam utilizados elementos estruturais de concreto armado e uma pesquisa que estude a viabilidade da utilização de agregados leves reciclados em concretos

REFERÊNCIAS

ABRAPEX. Associação Brasileira do Poliestireno Expandido. **O EPS na Construção Civil: Características do poliestireno expandido para utilização em edificações**. São Paulo, 2000.

ABRAPEX Associação Brasileira do Poliestireno Expandido. **Aplicações do EPS**. São Paulo, 2008. Disponível em: < <http://www.abrapex.com.br/02Caracter.html>>. Acesso em: 23 abr. 2019.

AMBIENTE BRASIL. **Isopor (Poliestireno Expandido – EPS)**. 2006. Disponível em: < https://ambientes.ambientebrasil.com.br/residuos/isopor/isopor_poliestireno_expandido_-_eps.html> . Acesso em: 25 mar. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106)

American Concrete Institute – ACI. **Guide For structural lightweight aggregate concrete**, ACI 213R-03. ACIA Manual of Concrete Practice, 2003.

ANGELIN, A. F. **Concreto leve estrutural – Desempenho físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais**. Limeira – SP. 2014. Disponível em: < http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/267702/1/Angelin_AndressaFernanda_M.pdf>. Acesso em: 20 set. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26: Agregados - Amostragem**. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório**. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 33: Concreto - Amostragem de concreto fresco**. 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 36: Concreto fresco – Separação de agregados grandes por peneiramento**. 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente**. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732: Cimento Portland Comum**. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial.** 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para Concreto - Especificação.** 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.** 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio.** 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9479: Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova.** 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.** 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578: Cimento Portland Composto.** 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento.** 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12821: Preparação de concreto em laboratório — Procedimento.** 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931: Execução de estruturas de concreto - Procedimento.** 2004.

BELINE, Ederaldo Luiz. **Estudo de traço de concreto leve pela substituição total dos agregados nobres por EPS.** Campo Mourão: 2017. 10 p.

BERLOFA, Aline. **A viabilidade do uso do poliestireno expandido na indústria da construção civil,** 2009. 74p. (Trabalho de conclusão de curso. FATEC Zona Leste).

CARVALHO, Roberto Chust e FILHO, Jasson Rodrigues de Figueiredo, **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado** – segundo a NBR 6118 2014. 4ª Edição. EDUFSCAR. São Carlos – SP. 20017.

CATOIA, T. **Concreto ultraleve estrutural com pérolas de EPS: caracterização do material e estudo de sua aplicação em lajes.** 2012. 157p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Escola de engenharia de São Carlos da universidade de São Paulo.

Clube do concreto. Disponível em: <<http://www.clubedoconcreto.com.br/2017/06/concreto-leve-com-eps-tracos.html>>. Acesso em: 20 mai. 2019.

Chico da areia. Disponível em: <<https://www.chicodareia.com.br/blog/3-tipos-de-areias-e-suas-funcionalidades>>. Acesso em: 11 mai. 2019.

Didática São Paulo Disponível em: <<https://www.didaticasp.com.br/conjunto-slump-test>>. Acesso em: 9 de abr, 2019.

ECivil. Disponível em: <<https://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-curva-granulometrica.html>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

ESCOBAR, R. L. **CONCRETO LEVE ESTRUTURAL: substituição do agregado graúdo convencional por argila expandida**. Campo Mourão – PR, 2016. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6892/1/CM_COECI_2016_1_29.pdf>. Acesso em 20 set. 2019.

Global Minerios. Disponível em: <<https://www.globalminerio.com.br/argila-expandida.html>>. Acesso em: 11 mai. 2019.

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

HIGGINS, Rita Ann. **Propriedades e estruturas dos materiais de engenharia**. São Paulo: Difel, 1982.

ISAIA, Geraldo Cechella. **CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações**. V. 01, São Paulo: IBRACON, 2005, 792 p.

ISOFÉRES. **Lajes nervuradas**. Disponível em: <<http://www.isoferes.com.br/index-lajes-isopor.html>>. Acesso em: 10 mai. 2019.

Mapa da obra. Disponível em: <<https://www.mapadaobra.com.br/capacitacao/conheca-os-tipos-de-brita/>>. Acesso em: 12 mai. 2019.

Malaiskiene, J.; Vaiciene, M.; Zurauskiene, R. **Effectiveness of technogenic waste usage in products of building ceramics and expanded clay concrete**. In: Construction and Building Materials, VGTU (Vilnius ediminas Technical University), Lithuania, 2011.

MAYCÁ, J.; Recena, F.A.P.; Cremonini, R.A. **Contribuição ao estudo da argila expandida nacional como alternativa de agregado graúdo para concretos leves estruturais**. Curso de especialização em construção civil – NORIE/UFRGS, 2008.

Método Engenharia. Disponível em: <<http://www.metodo.com.br/empreendimentos/metodo-engenharia/rochavera-corporate-towers>>. Acesso em: 12 mai. 2019.

MORAVIA, Wagner G. et al. **Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve**. Cerâmica. Belo Horizonte, v.52, p193-199, 2006.

MORAVIA, Weber Guadagnin. **Influência de parâmetros microestruturais na durabilidade do concreto leve produzido com argila expandida**. 170 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp129802.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2019.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2.ed. São Paulo: PINI, 1982. 828p.

OZORIO, B. P. M. **Concreto leve com pérolas de EPS: estudo de dosagens e de características mecânicas**. São Carlos – SP. 2016. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-07032017-102857/publico/DO2016_BiancaPereiraMoreiraOzorio.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2019.

PAULA, L. G. **Análise Termo econômica do Processo de Produção de Cimento Portland dom Coprocessamento de Misturas de Resíduos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá. 179p. Itajubá. 2009.

PEREIRA, Caio. **Tipos de cimento: Características e especificações**. Escola Engenharia, 2013. Disponível em: <<https://www.escolaengenharia.com.br/tipos-de-cimento/>>. Acesso em: 22 mai. 2019.

PEDROSO, Fábio Luiz. **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. Concreto e Construções**, São Paulo, v. 53, n. 27, p.14- 19, jan. 2009. Trimestral. Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_53.pdf>. Acesso em: 15 set. 2019;

PETRUCCI, Eladio G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 14ª ed., revisado por Vladimir A. Paulon, São Paulo: Editora Globo, 2005, 307 p.

RODRIGUES, Publio Penna Firme. **Parâmetros de Dosagem do Concreto**. ET-67. 3ª Ed. São Paulo: IBRACON - Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

Rossignolo, J. A. & Agnesini, M. V. C., 2011. **Concreto Leve Estrutural. In: Concreto: Ciência e Tecnologia**. :IBRACON, pp. 1532-1572.

Rossignolo, J.A.; Oliveira, I.L. Efeito do Metacaulim nas propriedades do concreto leve estrutural. Acta Scientiarum - Technology, v.29, 2007.

Rossignolo, J.A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações**. São Paulo, PINI, 2009.

SOARES, D. M. **O uso do EPS na construção civil**. Faculdade de Tecnologia da Zona Leste, São Paulo, 2011, 60 p.

Utama, N.A.; Mclellan, B.C.; Gheewala, S.H.; Ishihara, K.N. **Embodied impacts of traditional clay versus modern concrete houses in a tropical regime**. Building and Environ, p.362-369, 2012.

ANEXO