



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

TAYLANY PEREIRA DA SILVA

ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO POR ARGILA
EXPANDIDA NO CONCRETO ESTRUTURAL

Palmas – TO
2020

TAYLANY PEREIRA DA SILVA

**ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO POR ARGILA
EXPANDIDA NO CONCRETO ESTRUTURAL**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Tocantins, como requisito parcial à obtenção de título de Bacharel em Engenharia Civil.
Orientadora: Prof. Dra. Orieta Soto Izquierdo

**Palmas – TO
2020**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

S586e Silva, Taylany Pereira da.
Estudo da substituição do agregado miúdo por argila expandida no concreto estrutural. / Taylany Pereira da Silva. – Palmas, TO, 2020.
85 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Civil, 2020.
Orientadora : Orieta Soto Izquierdo

1. Concreto estrutural. 2. Concreto leve estrutural. 3. Agregados leves. 4. Argila expandida. I. Título

CDD 624

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).


TAYLANY PEREIRA DA SILVA

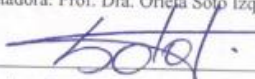
**ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO POR ARGILA
EXPANDIDA NO CONCRETO ESTRUTURAL**

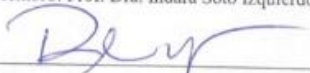
Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Tocantins, como requisito parcial à obtenção de título de Bacharel em Engenharia Civil.
Orientadora: Prof. Dra. Orieta Soto Izquierdo

Palmas, 02 / Março / 2020

DE ACORDO (Banca Examinadora)


Orientadora: Prof. Dra. Orieta Soto Izquierdo


Membro: Prof. Dra. Indara Soto Izquierdo


Membro: Prof. Dr. Fábio Henrique de Melo Ribeiro

Aos meus pais, base sustentadora da minha vida,
que com muito empenho e dedicação tornaram
possível a realização desse sonho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, meu grande amigo, que durante todos esses anos cuidou para que pudesse concluir essa fase tão importante em minha vida.

Aos meus pais, Edetina Pereira Campos Póvoa e Osmar da Silva Póvoa, por acreditarem no meu potencial e investirem arduamente para que se tornasse possível a obtenção desse título.

Ao meu irmão, Matheus Pereira Póvoa, que tanto me ajudou, sempre presente em todos os momentos.

À minha orientadora, Dra. Orieta Soto Izquierdo, minha grande inspiração, pelo apoio, atenção e compartilhamento de conhecimento.

Aos meus amigos, companheiros de graduação, que sempre estiveram ao lado desde o início de tudo, Octávio Henrique Bernardes Barros e Vinícius Sena Maciel, também ao meu amigo Dalmo Santana, que trabalhou incansavelmente comigo no laboratório durante a execução deste trabalho.

À minha irmã de coração, Letícia Hellen Pereira Rodrigues, pelo companheirismo e amizade, que fizeram toda diferença durante esse percurso e aos meus amigos na fé, irmãos em Cristo, Welida Cordeiro de Freitas Braga, Helve de Almeida Braga, Rosberg Noletto da Silva, Patrícia Ladeira Silva, Guiomar Auxiliador de Menezes e Lilyane da Silva Coelho Menezes, que direta ou indiretamente investiram para que essa etapa fosse concluída.

SILVA, Taylany Pereira. **Estudo da substituição do agregado miúdo por argila expandida no concreto estrutural**. 2020. 85f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2020.

RESUMO

O estudo de materiais que melhorem as propriedades do concreto, material de construção mais utilizado no mundo, tem crescido consideravelmente. A utilização de agregados leves, como a argila expandida, tem se tornado uma solução viável para diminuir os aspectos negativos apresentados pelo concreto com agregados convencionais. Desse modo, este trabalho tem como objetivo principal analisar a influência do teor de substituição do agregado miúdo por argila expandida nas propriedades mecânicas de um concreto estrutural. Para isso, optou-se por trabalhar com a dosagem em massa 1:1,51:1,72 (cimento, areia e brita) para cinco traços diferentes: 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de argila expandida em substituição ao agregado miúdo convencional (areia). Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais utilizados, consistência no estado fresco e propriedades físicas e mecânicas no estado endurecido do concreto. Os resultados apresentaram que todos os traços alcançaram resistência à compressão acima de 20 MPa, sendo considerados como concretos estruturais, e o traços TR75 e TR100 obtiveram massa específica menor que 2000 kg/m³, sendo classificados como concretos leves estruturais. Foram realizados testes estatísticos com a ANOVA, que demonstrou que a argila expandida interferiu significativamente nas propriedades do concreto e o teste de Tukey que identificou que os traços com maiores teores de argila foram mais influenciados pela substituição do agregado miúdo. Por fim, é possível concluir que a substituição do agregado miúdo por argila expandida em concretos estruturais, em consonância com os agregados naturais, e também nos concretos leves estruturais, é uma alternativa promissora para produção de concretos com ganhos significativos.

Palavras-Chave: Concreto estrutural. Concreto leve estrutural. Agregados leves. Argila expandida.

SILVA, Taylany Pereira. **Study of the replacement of fine aggregate with expanded clay in structural concrete**. 2020. 85f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2020.

ABSTRACT

The study of materials that improve the properties of concrete, the most widely used building material in the world, has increased considerably. The use of light aggregates, such as expanded clay, has become a viable solution to reduce the aspects described by concrete with used aggregates. In this way, this work has as main objective to analyze the influence of the content of substitution of the kid by expanded clay in the mechanical properties of a structural concrete. For this, choose to work with mass dosage 1: 1.51: 1.72 (cement, sand and gravel) for five different strokes: 0%, 25%, 50%, 75% and 100% expanded clay instead to the conventional fine aggregate (sand). Characterization tests were performed on the materials used, consistency in the fresh state and chemical and mechanical attributes in the state resistant to concrete. The results showed that all the traces reached the resistance above 20 MPa, being considered as applied concrete, and the TR75 and TR100 obtained specific mass less than 2000 kg / m³, being classified as light concrete. Statistical tests were carried out with ANOVA, which demonstrated that expanded clay interferes with the characteristics of the concrete and Tukey test that identifies the features with higher clay contents that were more influenced by the substitution of fine aggregate. Finally, it is possible to conclude that the substitution of fine aggregate by expanded clay in choosing concrete, in line with natural aggregates, and also in light concrete sheets, is a promising alternative for the production of concretes with applied dimensions.

Keywords: Structural concrete. Structural lightweight concrete. Light aggregates. Expanded clay.

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1 - Gráfico relação água/cimento x resistência à compressão.....	17
Figura 2 - Micrografia da zona de transição na interface pasta/agregado no concreto ..	19
Figura 3 - Micrografia dos agregados produzidos por sinterização e forno rotativo.....	28
Figura 4 - Tipos de solos do município de Palmas - TO	30
Figura 5 - Relação entre o fator de eficiência e a massa específica	31
Figura 6 - Condutividade térmica em função da massa específica.....	34
Figura 7 - Cimento utilizado para produção do concreto	37
Figura 8 - Determinação da composição granulométrica e do material pulverulento	38
Figura 9 - Ensaio de determinação da massa unitária	39
Figura 10 - Argila a ser utilizada na produção do concreto com substituição.....	40
Figura 11 - Determinação da massa específica	41
Figura 12 - Determinação do inchamento	41
Figura 13 - Determinação do material pulverulento.....	42
Figura 14 - Ensaio de abatimento do tronco de cone no traços TR25 e TR100.....	44
Figura 15 - Processo de mistura dos componentes do concreto	45
Figura 16 - Processo de moldagem dos corpos de prova cilíndricos.....	45
Figura 17 - Corpos de prova utilizados para determinação de propriedades físicas	46
Figura 18 - Secagem dos corpos em estufa por 72h.....	47
Figura 19 - Pesagem dos corpos de prova em estado seco e saturado.....	47
Figura 20 - Prensa hidráulica universal utilizada nos ensaios mecânicos	48
Figura 21 - Ensaio de resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias no traço TR100	49
Figura 22 - Ensaio de módulo de elasticidade no traço TR75 e TR50.....	50
Figura 23 - Ensaio de abatimento do tronco do cone nos traços TR0 e TR25	57
Figura 24 - Ensaio de abatimento do tronco do cone nos traços TR50 e TR75	57
Figura 25 - Ensaio de abatimento do tronco do cone nos traços TR100.....	58
Figura 26 - Distribuição da argila na massa do concreto TR100	67
Gráfico 1 - Composição granulométrica dos agregados miúdos.....	53
Gráfico 2 - Composição granulométrica do agregado graúdo.....	53
Gráfico 3 - Ensaio de absorção de água	61
Gráfico 4 - Relação entre absorção de água e índice de vazios.....	62
Gráfico 5 - Resistência à compressão aos 7 e 28 dias.	66
Gráfico 6 - Módulo de Elasticidade.....	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação da areia conforme dimensão granulométrica.....	25
Quadro 2 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo	26
Quadro 3 – Quantidade de corpos de prova a serem utilizados.....	48
Quadro 4 – Quantidade de corpos de prova a serem utilizados.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização dos agregados.....	52
Tabela 2 - Caracterização dos agregados miúdos.....	54
Tabela 3 - Caracterização do agregado graúdo.....	54
Tabela 4 - Ensaio de abatimento do tronco do cone.....	56
Tabela 5 - Ensaio de massa específica seca.....	59
Tabela 6 - Ensaio de absorção de água.....	60
Tabela 7 - Ensaio de índice de vazios.....	61
Tabela 8 - Resistência à compressão aos 7 dias	63
Tabela 9 - Resistência à compressão aos 28 dias	64
Tabela 10 - Fator de Eficiência (FE)	67
Tabela 11 - Módulo de elasticidade aos 28 dias	68
Tabela 12 - Critério de Chauvenet para resistência à compressão 7 dias.....	71
Tabela 13 - Critério de Chauvenet para resistência à compressão 28 dias	71
Tabela 14 - Resumo de análise da ANOVA para resistência à compressão aos 7 dias..	72
Tabela 15 - Análise do teste de Tukey para resistência à compressão aos 7 dias	72
Tabela 16 - Resumo de análise da ANOVA para resistência à compressão aos 28 dias	73
Tabela 17 - Análise do teste de Tukey para resistência à compressão aos 28 dias	74
Tabela 18 - Resumo de análise da ANOVA para resistência à compressão 7 e 28 dias	74
Tabela 19 - Critério de Chauvenet para o módulo de elasticidade	75
Tabela 20 - Resumo de análise da ANOVA para o módulo de elasticidade	75
Tabela 21 - Análise do teste de Tukey para o módulo de elasticidade.....	76
Tabela 22 - Critério de Chauvenet para a absorção de água.....	77
Tabela 23 - Critério de Chauvenet para índice de vazios	77
Tabela 24 - Critério de Chauvenet para massa específica seca	78
Tabela 25 - Resumo de análise da ANOVA para a absorção de água.....	78
Tabela 26 - Análise do teste de Tukey para a absorção de água	79

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ANOVA	Análise de Variância
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IPT/EPUSP	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo/ Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
NBR	Norma Técnica Brasileira
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
TR0	Traço de referência com 0% de substituição da areia pela argila expandida
TR25	Traço com 25% de substituição da areia pela argila expandida
TR50	Traço com 50% de substituição da areia pela argila expandida
TR75	Traço com 75% de substituição da areia pela argila expandida
TR100	Traço com 100% de substituição da areia pela argila expandida

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Considerações gerais	12
1.2. Objetivos.....	13
1.2.1. <i>Objetivo geral</i>	13
1.2.2. <i>Objetivos específicos.....</i>	13
1.3. Justificativas.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. Concreto	15
2.1.1. <i>Resistência do concreto</i>	16
2.1.2. <i>Zona de transição e sua influência nas propriedades do concreto</i>	18
2.1.3. <i>Métodos de dosagem do concreto.....</i>	19
2.2. Agregados no concreto	20
2.2.1. <i>Classificação dos agregados</i>	21
2.2.2. <i>Propriedades dos agregados</i>	22
2.2.3. <i>Correlação com as propriedades do concreto.....</i>	24
2.2.4. <i>Areia.....</i>	25
2.2.5. <i>Argila expandida.....</i>	27
2.3. Concreto com argila expandida.....	30
2.3.1. <i>Resistência à compressão e massa específica</i>	31
2.3.2. <i>Influência na microestrutura do concreto</i>	32
2.3.3. <i>Conforto térmico.....</i>	33
2.4. Pesquisas de diferentes autores com o uso da argila no concreto	34
3. METODOLOGIA.....	37
3.1. Caracterização dos materiais utilizados	37
3.1.1. <i>Aglomerante.....</i>	37
3.1.2. <i>Agregado graúdo</i>	37
3.1.3. <i>Agregado miúdo.....</i>	39
3.1.4. <i>Aditivo.....</i>	42
3.2. Dosagem.....	42
3.3. Determinação das propriedades no estado fresco	43
3.3.1. <i>Consistência.....</i>	43
3.4. Determinação das propriedades no estado endurecido.....	44

3.4.1. <i>Propriedades físicas</i>	SUMÁRIO	45
3.4.1.1. <i>Massa específica, absorção de água e índice de vazios</i>		46
3.4.2. <i>Propriedades mecânicas</i>		48
3.4.2.1. <i>Resistência à compressão e módulo de elasticidade</i>		48
3.5. Análise dos resultados		50
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES		52
4.1. Caracterização dos materiais utilizados		52
4.2. Determinação das propriedades do concreto no estado fresco		55
4.2.1. <i>Consistência</i>		55
4.3. Determinação das propriedades do concreto no estado endurecido		58
4.3.1. <i>Massa específica seca</i>		58
4.3.2. <i>Absorção de água e índice de vazios</i>		59
4.3.3. <i>Resistência à compressão</i>		62
4.3.4. <i>Relação entre a resistência à compressão e a massa específica</i>		67
4.3.5. <i>Módulo de elasticidade</i>		68
4.4. Análise Estatística		70
4.4.1. <i>Análises estatísticas dos resultados de resistência à compressão</i>		70
4.4.2. <i>Análises estatísticas dos resultados de módulo de elasticidade</i>		75
4.4.3. <i>Análises estatísticas dos resultados de absorção, índice de vazios e massa</i>		76
5. CONCLUSÕES		80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		82

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações gerais

Segundo Metha e Monteiro (2008), o concreto é um material compósito que consiste essencialmente de um meio aglomerante em que são incluídas partículas granulares. A ABNT NBR 8953 (2015) classifica os concretos conforme a resistência característica à compressão (f_{ck}) aos 28 dias. Os concretos com classe de resistência superior aos 20 MPa são considerados estruturais.

O concreto, produzido essencialmente com areia e brita como agregados e água e cimento como aglomerantes, apesar de ser um material amplamente empregado na indústria da construção civil apresenta uma série de deficiências. Para Pereira (2012), quando comparado ao aço, a baixa relação resistência/peso do concreto pode constituir um problema econômico na construção de edifícios de múltiplos pavimentos, pontes com grandes vãos e estruturas flutuantes.

Para Mehta e Monteiro (2008), embora o concreto seja o material mais amplamente usado, sua microestrutura é heterogênea e altamente complexa. As relações microestrutura – propriedade do concreto ainda não estão completamente desenvolvidas, no entanto, certo conhecimento sobre os elementos essenciais da microestrutura é necessário antes se discutir os fatores de influência nas propriedades importantes para a engenharia do concreto.

Nos últimos anos, com o advento dos avanços tecnológicos, o estudo de materiais que melhorem essa relação, aumentando a resistência e diminuindo o peso próprio das estruturas, tem crescido consideravelmente, principalmente no âmbito acadêmico. A utilização de agregados leves no composto concreto tem se tornado uma solução viável para diminuir as nuances negativas apresentadas pelo uso de agregados convencionais.

Os agregados leves são caracterizados principalmente por possuírem uma baixa massa específica comparado aos agregados convencionais. Segundo Pereira (2012) essa diferença atribui uma variação de 80 a 900 kg/m³ na massa específica do concreto, a depender do processo de fabricação do material.

Entre os principais agregados leves mais utilizados na atualidade está a argila expandida. Produto do aquecimento de alguns tipos de argila com temperatura em torno de 1200°C, esse material tem sido objeto de vários estudos e pesquisas como alternativa para substituição do agregado convencional sem o comprometimento da resistência mecânica.

Tradicionalmente, os agregados leves proporcionam ao concreto a redução de sua massa específica e alterações das propriedades térmicas. Além dessas características citadas, a utilização dos agregados leves, principalmente os miúdos, ocasionam mudanças significativas nas propriedades dos concretos, como trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de elasticidade, retração e fluência, além da redução da espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral analisar a influência do teor de substituição do agregado miúdo por argila expandida nas propriedades mecânicas de um concreto estrutural.

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar a caracterização física da argila expandida e dos agregados naturais através dos procedimentos descritos pelas normas vigentes;
- Definir a dosagem do concreto estrutural de referência e com teores de 25%, 50% 75% e 100% de argila expandida substituindo o agregado miúdo (areia);
- Determinar, analisar e comparar estatisticamente as propriedades físicas e mecânicas, tanto no estado fresco como no estado endurecido, do concreto de referência e do concreto de substituição com argila expandida;
- Verificar se é possível alcançar um concreto estrutural leve com o máximo teor de substituição da argila.

1.3. Justificativas

Nas últimas décadas, pesquisadores da área da construção civil têm buscado estudar e criar alternativas aos materiais e métodos construtivos convencionais, é o caso do concreto leve utilizando argila expandida como agregado, pois apresenta inúmeras vantagens sem prejudicar as principais características exigidas dos concretos estruturais.

Nesse contexto, segundo Pereira (2012), a utilização de argila expandida para a confecção de concretos estruturais têm permitido ganhos na redução do peso próprio e

manutenção da capacidade portante das estruturas. Rossignolo (2009) acrescenta que a argila expandida brasileira apresenta-se como uma alternativa técnica e economicamente viável na produção de concretos leves estruturais com valores de resistência de até 50 MPa e massa específica seca de 1400 kg/m³ a 1800 kg/m³.

Rossignolo (2011) alerta ainda que a substituição dos agregados convencionais por agregados leves em concretos estruturais pode provocar alterações significativas nas propriedades mecânicas e nas características das misturas, destacando-se a trabalhabilidade, a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

No que diz respeito à substituição do agregado miúdo, existem poucos estudos e pesquisas que deem subsídio a utilização da argila expandida. Diferentemente, pode-se encontrar diversos trabalhos de pesquisa que viabilizam a substituição do agregado graúdo.

Desta forma, visto a importância do concreto estrutural na indústria da engenharia civil, optou-se pelo estudo do mesmo afim de alcançar um concreto leve estrutural com a substituição total da argila expandida.

Este trabalho pretende contribuir para o entendimento das características físicas e mecânicas de um concreto estrutural produzidas pela substituição parcial e total do agregado convencional miúdo por argila expandida 0,500 e assim apresentar este concreto como uma alternativa promissora para o uso e aplicação na indústria de produção de concreto, contribuindo para a conscientização do meio técnico da necessidade e importância de produzir e utilizar cada vez mais concretos leves estruturais na construção civil, devido ao crescimento dos avanços tecnológicos e diminuição acelerada dos recursos naturais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atualmente, o desenvolvimento do concreto está intimamente ligado ao estudo de sua microestrutura, permitindo uma melhor caracterização de cada constituinte e de seu relacionamento com os demais. A identificação dos mecanismos responsáveis pela resistência, estabilidade dimensional e durabilidade das misturas, atua de maneira a melhorar as características dos concretos. Dessa forma, o presente referencial teórico busca explicar as características do concreto e de sua estrutura com substituição do agregado miúdo, bem como apresentar todo embasamento teórico para viabilização da aplicabilidade de argilas expandidas em concretos.

2.1. Concreto

Segundo Mehta e Monteiro (2008) o concreto é um material composto que consiste essencialmente de um meio aglomerante, dentro do qual estão mergulhados partículas ou fragmentos de agregados. A função da pasta é envolver os agregados, que dão corpo à mistura, preenchendo os vazios formados. No estado endurecido, essa mistura gera um sistema com certa impermeabilidade, resistência aos esforços mecânicos e durabilidade.

Almeida (2002) acredita que, apesar do concreto simples possuir boa resistência à compressão, facilidade de adaptação às formas mais diversas, segurança contra fogo e ser um material de baixo custo de construção e manutenção, é também um material que apresenta desvantagens significantes.

Algumas limitações enfrentadas pelo concreto são o elevado peso próprio, baixa resistência à tração, fissuração e a necessidade de utilização de fôrmas e escoramentos para a sua moldagem.

A baixa resistência à tração pode ser contornada com o uso de adequada armadura, em geral constituída de barras de aço, obtendo-se o concreto armado. Além de resistência à tração, o aço garante ductilidade e aumenta a resistência à compressão, em relação ao concreto simples (PINHEIRO, 2004).

Diversas adições ou aditivos químicos são estudados para melhorar as propriedades do concreto. A utilização de agregados leves, como a argila expandida, pode ser uma excelente alternativa para a diminuição do elevado peso próprio do concreto, aumento da resistência e consequente diminuição das fissuras.

A ABNT NBR 12655 (2015) descreve os tipos de concreto baseado em suas principais características e aplicabilidades. O concreto convencional, por exemplo, como o nome diz, é convencional por utilizar a mistura padrão de água, cimento, areia e brita, sem aditivos. O concreto armado se diferencia pela utilização de armadura de aço enquanto o protendido possui cabos de alta resistência.

O concreto para fins estruturais é classificado pela ABNT NBR 8953 (2015) como sendo aquele que alcança classe de resistência à compressão superior aos 20 MPa na idade de 28 dias. Sua composição é semelhante ao concreto convencional, no entanto pode fazer uso de aditivos.

Para Verzegnassi (2015), os concretos de alta resistência inicial também são muito comuns e adquirem essa qualidade por meio do uso de aditivos. Já os concretos de alto desempenho, que também fazem uso de aditivos especiais, assim os utilizam para diminuir os índices de porosidade e permeabilidade. Existem outras diversas variedades de concreto, que dependem basicamente da necessidade ao qual foi submetido.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), o concreto pode ainda ser classificado em três grandes categorias com base em sua massa específica, o concreto de densidade normal, na ordem de 2400 kg/m^3 , composto por agregados convencionais, é o mais comumente utilizado para estruturas.

Sach (2008) descreve que, com massa específica na ordem de 1800 kg/m^3 , estão os chamados concretos leves, mais utilizados para peças que priorizam a leveza, podendo ser compostos por agregados leves, naturais ou sintéticos. Já os concretos pesados, de densidade superiores a 3200 kg/m^3 , são direcionados a estruturas que necessitam de grande massa, como as utilizadas para blindagem contra radiação.

O concreto leve estrutural, segundo Rossignolo (2009), constituído basicamente pela substituição parcial ou total dos agregados convencionais por agregados leves é caracterizado por uma massa específica aparente abaixo de 2000 kg/m^3 . Tendo como objetivo primário a densidade e não a resistência, suas especificações limitam a massa específica máxima permitida para o concreto e estabelecem também resistências mínimas a serem seguidas, conforme suas respectivas normas.

2.1.1. Resistência do concreto

A resistência é uma das propriedades mais importantes do concreto. Por fatores como controle de qualidade, por exemplo, chega a ser a mais valorizada por projetistas e engenheiros. Segundo Mehta e Monteiro (2005, p.49), “a resistência de um material é definida como a

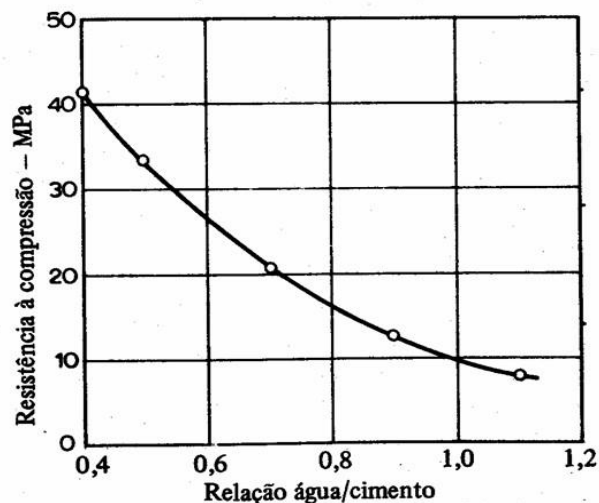
capacidade de resistir à tensão sem se romper. Algumas vezes, a ruptura é identificada com o surgimento de fissuras”. No concreto, a resistência está relacionada à tensão necessária para causar a ruptura, ou seja, a tensão máxima que o concreto pode resistir sem romper-se.

A resistência do concreto pode não ter nenhuma relação com a resistência dos agregados, visto que em muitos casos a resistência do agregado é bem mais elevada, comparada a matriz e a zona de transição na interface do concreto, comenta Mehta e Monteiro (2005). Outras características como textura, dimensão, forma, granulometria e mineralogia são conhecidas por afetar a resistência do concreto em vários graus. O efeito dessas características na resistência do concreto pode alterar, por exemplo, a relação água/cimento.

Schwantes (2012) descreve que a granulometria dos agregados tem maior influência na resistência à compressão dos concretos com utilização de agregados leves do que em concretos convencionais, uma vez que o valor da massa específica dos agregados leves, como a argila expandida, é inversamente proporcional à dimensão. Mehta e Monteiro (2008) complementam ainda que a resistência à compressão dos concretos com agregados leves está diretamente relacionada com o teor de cimento.

A relação água/cimento é o principal fator de influência na resistência do concreto, para tanto, necessita de bastante atenção no processo de dosagem, pois caso seja menor do que o necessário, o cimento não é totalmente hidratado e se for superior ao ideal, a resistência e a permeabilidade são afetadas, já que se criam vazios e canalículos, quando essa água em excesso é transportada para a superfície e evapora. A Figura 1 ilustra essa relação entre o fator a/c e a resistência à compressão.

Figura 1 - Gráfico relação água/cimento x resistência à compressão



Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland

Vale salientar que, quanto menor o fator água/cimento mais duráveis serão as estruturas, como elucida o gráfico da Figura 1, onde claramente pode-se perceber a diminuição da resistência do concreto com o aumento do fator água/cimento.

2.1.2. Zona de transição e sua influência nas propriedades do concreto

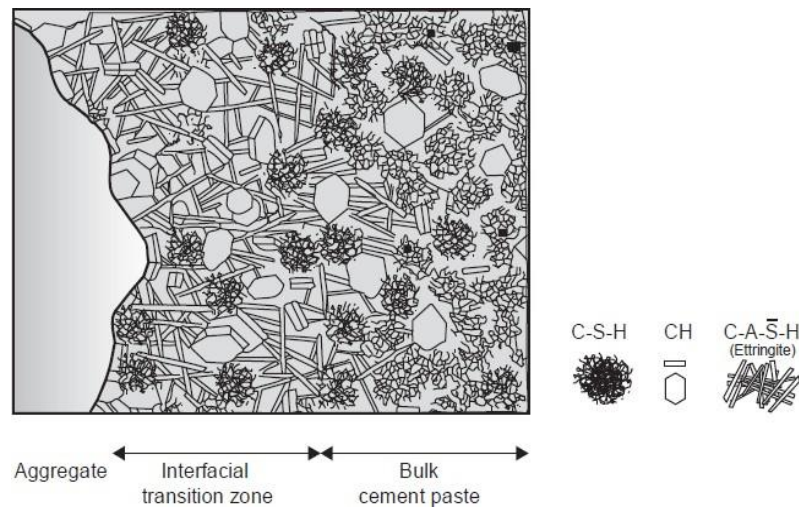
Monteiro (1993) menciona que, antes que qualquer pesquisa seja feita para aprimorar a microestrutura da matriz de cimento, visando o beneficiamento das propriedades do concreto, devem ser priorizados estudos que abordem a melhoria da microestrutura da zona de transição interfacial que existe entre o agregado e a matriz de cimento, já que muitas propriedades importantes do concreto são consideravelmente influenciadas pelas características dessa zona de transição.

A zona de transição é a interface entre o agregado e a pasta, como ilustra a Figura 2. É geralmente o elo mais frágil do concreto. Considerada como a fase limitante da resistência do concreto. Mehta e Monteiro (2008) ressaltam ainda que, é por causa da presença da zona de transição que se dá a ruptura do concreto em nível de tensão consideravelmente mais baixo do que a resistência de qualquer um dos outros dois componentes principais.

Diversas pesquisas apresentam a forte relação existente entre a espessura e a qualidade da zona de transição interfacial e algumas propriedades dos concretos, tais como resistência mecânica, módulo de deformação, mecanismo de propagação de fissuras e permeabilidade de agentes agressivos nos concretos, comenta Monteiro (1993) e Paulon (2005), justificando, assim, a grande importância do estudo da zona de transição interfacial agregado-matriz dos concretos.

Vale salientar que, a utilização de materiais alternativos, como argila expandida, por exemplo, pode alterar de maneira significativa o desempenho das propriedades do concreto no que tange a sua interferência junto a pasta cimento/água. O tópico 2.3.1 descreverá mais claramente como esse material pode melhorar as características do concreto, por seu favorecimento à zona de transição.

Figura 2 – Micrografia da zona de transição na interface pasta/agregado no concreto



Fonte: Mehta e Monteiro, 2008, p. 43.

2.1.3. Métodos de dosagem do concreto

Segundo Neville (1997) dosagem é o estudo direcionado para a escolha dos materiais constituintes e a fixação de suas proporções ou quantidades relativas nas misturas de concreto para assegurar um determinado desempenho.

Boggio (2000) afirma que a atividade de dosagem possui grande importância pois não somente estabelece as proporções dos materiais constituintes do concreto como também determina as características necessárias para que seja alcançado um desempenho satisfatório do produto final, em termos de qualidade e economia.

Boggio (2000) constata ainda que, a trabalhabilidade é a propriedade fundamental do concreto fresco a ser considerada no processo de dosagem, bem como a resistência em seu estado endurecido, por se tratar das principais propriedades a serem analisadas no concreto, estando diretamente ligadas ao bom funcionamento do material.

Durante muitos anos a dosagem de concreto foi considerada bastante simples. Os métodos empíricos, fundamentados em experiências anteriores, sem ter necessariamente um embasamento científico, eram os mais utilizados, pois inicialmente atendia aos objetivos de trabalhabilidade no concreto fresco e resistência à compressão no seu estado endurecido. No entanto, esses métodos foram gradualmente sendo substituídos pelos chamados racionais ou experimentais, estes baseados em regras e procedimentos deduzidos de leis científicas e fundamentos em ensaios experimentais.

O método da ABCP/ACI adaptado do método da ACI 211.1-81 para a realidade nacional pelo engenheiro Público Penna Firmes Rodrigues, e o método IPT/EPUSP desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo e adaptado pelos professores da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, devido ao peso das instituições que os desenvolveram, tem apresentado uma grande difusão quanto ao seu conhecimento e uso.

O método ABCP/ACI considera tabelas e gráficos elaborados a partir de valores médios de resultados experimentais. Já o IPT/EPUSP parte da resistência característica do concreto aos 28 dias, do diâmetro máximo dos agregados e da consistência do concreto para se obter as proporções de areia e pedra britada para cada unidade de cimento, além da obtenção do fator água/cimento.

2.2. Agregados no concreto

Agregados são materiais granulares rotineiramente utilizados na construção civil, principalmente para “dar corpo” ao concreto, junto à pasta aglomerante. São exemplos de agregados, a pedra britada, o cascalho e as areias naturais ou obtidas por moagem de obras, além de argilas e dos substitutivos como resíduos inertes reciclados, escórias de aciaria, produtos industriais, entre outros.

Para a ABNT NBR 7211:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, p. 4) “o agregado é resultante da britagem de rochas cujo beneficiamento resulta numa distribuição granulométrica constituída por agregados graúdos e miúdos ou por mistura intencional de agregados britados e areia natural ou britada”.

Na construção civil, segundo Bauer (2000), agregados são materiais minerais, sólidos inertes, sem forma e volumes definidos que, de acordo com suas propriedades são utilizados para a fabricação de materiais resistentes como por exemplo o concreto.

Falcão Bauer (2000, p. 63) cita que, “o agregado é um material particulado, incoesivo, de atividade química praticamente nula, constituído de misturas de partículas cobrindo extensa gama de tamanhos”.

Antigamente, esse material era adicionado ao meio ligante para incorporar a mistura, “dar corpo”, e reduzir o custo. Hoje, com a evolução da tecnologia e consequente disponibilização do vasto conhecimento acerca do setor de construção, esses materiais passam a ter grande importância para a engenharia, no que se diz respeito a incessante busca de novas metodologias que melhor viabilizam o mercado construtor.

De acordo com suas devidas dimensões e propriedades, os agregados influenciam diretamente na retração e resistência do concreto, além de poder definir várias outras características desejadas dependendo do estudo aprofundado do material e de sua interferência junto ao meio ligante.

Segundo a ABNT NBR 7211 (2005) os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, e não devem conter substâncias de natureza e em quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade ou, quando for requerido, o aspecto visual externo do concreto. O exame petrográfico realizado de acordo com a ABNT NBR 7389 (2009) e interpretado por profissional capacitado, fornece alguns dos subsídios necessários para o cumprimento destas condições.

Não se limitando ao exame petrográfico, os lotes de agregados utilizados em obras de engenharia devem ser analisados conforme a ABNT NBR NM 26 (2001). Esta estabelece que somente deve ser aceito o lote que cumprir todas as prescrições da norma e as eventuais prescrições especiais contratadas. Ressaltando ainda que, consumidor e produtor são responsáveis pela realização de coletas e ensaios por laboratório idôneo ou de uma das partes desde que haja consentimento mútuo.

Os usos dos agregados estão relacionados ao seu tamanho e granulometria. Chegam ao consumidor final misturados ao cimento (quando da preparação do concreto), ou sem nenhuma mistura aglomerante. Entretanto, é misturado ao concreto que os maiores volumes de agregados chegam ao consumidor final. É na produção de concretos e argamassas onde, em conjunto com um aglomerante (pasta de cimento Portland/água), constituem uma rocha artificial, com diversas utilidades na engenharia, cuja principal aplicação é compor os diversos elementos estruturais de concreto armado.

Além do uso para fabricação de concreto, os agregados podem ainda ser vistos em obras de engenharia, como base para pavimentação, drenos, lastro de ferrovias, gabiões, argamassas, além de outros. Fragmentos de rochas com tamanho e propriedades adequadas são utilizados em quase todas as obras de infra – estrutura civil.

2.2.1. Classificação dos agregados

Existem diversas classificações para os agregados. Estes, podem ser classificados segundo a sua origem: naturais, encontrados sob forma definitiva de utilização, artificiais,

obtidos pelo britamento de rochas e industrializados, como o próprio nome sugere, obtidos por processos industriais.

A ABNT NBR 7211 (2005) apresenta a classificação dos agregados quanto a dimensão de suas partículas, podendo ser subdivididos em grãos e miúdos. Os agregados grãos são aqueles cujos grãos passam pela peneira ABNT 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT 4,8 mm. Já os miúdos os grãos que passam pela peneira ABNT de 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,150 mm.

Os agregados podem ainda ser classificados quanto à massa específica, em leves, médios e pesados, além de também, principalmente por parte de geólogos, serem classificados quanto a sua composição mineralógica.

Os agregados apresentam uma grande variação de suas características, sendo necessário na tecnologia do concreto o estudo e controle de qualidade tanto antes como durante a execução da obra. Para tanto, é de suma importância a análise e estudo aprofundado das propriedades que constituem os agregados miúdos e grãos.

2.2.2. Propriedades dos agregados

Segundo Falcão Bauer (2000) os agregados constituem cerca de 80% do peso e 20% do custo de concreto estrutural sem aditivos.

Os agregados possibilitam que algumas propriedades da rocha artificial a ser formada apresentam melhor desempenho, tais como: redução da retração da pasta de cimento, aumento da resistência ao desgaste, melhor trabalhabilidade e aumento da resistência ao fogo.

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 provocados por causa da seleção e o uso inadequado dos agregados.

Metha e Monteiro (1994, p.21), afirma que “o agregado é o principal responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto”. Dessa maneira, entende-se que as características mais importantes de um agregado são sua massa específica e unitária, forma, textura, granulometria, resistência à compressão e abrasão, absorção de água, umidade e sanidade. Quanto a composição química, comparada a característica física, desde que não sejam detectados elementos reativos com a pasta de cimento ou o meio ambiente, não possui importância relevante.

Para a Revista Especialize On-line IPOG (2015), o conhecimento de certas características dos agregados é uma exigência para a dosagem dos concretos. A massa

específica é diretamente proporcional a resistência à compressão do concreto. A forma do grão do agregado, caracterizada pela granulometria e textura, também influi nas propriedades do concreto. As características dos agregados, importantes para a tecnologia dos concretos, são decorrentes da microestrutura do material.

Em seu livro, *Materiais de Construção*, Falcão Bauer (2005) lista diversas propriedades físicas para os agregados, das quais as mais importantes, para efeito de dosagem do concreto, serão apresentadas neste trabalho.

O volume ocupado pelas partículas do agregado, os poros existentes dentro das partículas, a massa específica e unitária além de outras propriedades, são determinantes para o processo de dosagem do concreto.

- a) Massa Específica. É definida como a massa do material por unidade de volume, excluindo os poros internos das partículas (vazios).
- b) Massa Unitária. É a massa por unidade de volume aparente, isto é, inclui o volume de vazios em sua medida. Seu conhecimento possibilita na dosagem do concreto a transformação de um traço em massa para volume e/ou o inverso. É de grande importância para a análise do consumo de materiais a serem utilizados.
- c) Índice de Vazios. Relação entre o volume total de vazios e o volume total grãos. A mistura de agregados miúdos e graúdos no concreto tem como principal objetivo a diminuição do índice de vazios. No caso do agregado miúdo, o espaço entre os grãos é menor em relação aos graúdos, no entanto, o agregado graúdo é de suma importância para a resistência do concreto no estado endurecido, como já explanado acima. Quando mais compacto e menos poroso, maior a resistência à compressão, permeabilidade e durabilidade no concreto.
- d) Compacidade. É utilizada para determinar o grau de compactação de um determinado material granular, não coesivo. É a relação entre o volume total de grãos e o volume total do agregado.
- e) Área Específica. Soma das áreas das superfícies de todos os grãos contidos na unidade de massa do agregado. A superfície específica serve para determinar a finura de materiais granulares.
- f) Durabilidade. É a propriedade relativa a resistência do agregado ao ataque de elementos agressivos.

- g) Umidade e Inchamento. É a porcentagem de água retida em uma determinada quantidade de material granular. O conhecimento do teor da umidade dos agregados é muito importante, já que a quantidade de água que os mesmos transportam para o concreto altera o fator água/cimento, ocasionando decréscimo da resistência mecânica do concreto. Neville (1997, p.148) aponta que “Areias podem sofrer um fenômeno conhecido como “inchamento”, que é o aumento de volume de uma dada massa de areia devido às películas de água, deslocando as partículas e tendendo a separá-las”.

2.2.3. Correlação com as propriedades do concreto

As propriedades exigíveis para que o concreto tenha um bom índice de qualidade estão diretamente relacionadas as características dos agregados. Falcão Bauer (2005) elucida resistência à compressão, durabilidade, trabalhabilidade, permeabilidade e ascensão capilar como as propriedades do concreto que dependem das características dos grãos acrescentados à pasta de cimento e água.

- a) Resistência à compressão. A distribuição granulométrica adicionada a mistura água/cimento deverá ser tal que permita uma máxima compacidade no concreto. A resistência à compressão depende do fator água/cimento que por sua vez depende da distribuição granulométrica. Vale ressaltar ainda que, quando maior o índice de água adicionada ao concreto menor a sua resistência característica.
- b) Durabilidade. Para que o concreto seja durável, é necessário que o agregado permaneça inerte. Não devendo reagir com agentes ao qual o concreto esteja exposto e nem ter componentes mineralógicos que reajam com o meio ambiente e/ou ao cimento.
- c) Trabalhabilidade. A característica que mais afeta a trabalhabilidade de um concreto é a forma do grão. A distribuição granulométrica também é determinante para a trabalhabilidade do concreto, visto que a obtenção do fator água/cimento depende diretamente da distribuição dos grãos.
- d) Permeabilidade. Os agregados devem ser distribuídos de maneira que se obtenha uma mistura final de máxima compacidade, para conseguir concretos menos permeáveis e de baixa trabalhabilidade.

- e) Ascensão Capilar. A ascensão capilar diminui quando aumenta o diâmetro médio dos capilares.

2.2.4. Areia

As areias são provenientes de rios, cavas, britagem, escória, praias e dunas. Podem ser classificadas por sua granulometria e processos de dosagem.

“Areia, geologicamente, é um sedimento clássico inconsolidado, de grãos em geral quartzosos de diâmetros entre 0,06 e 2,0 mm. Considerada como material de construção, areia é o agregado miúdo. Os diâmetros limites adotados para classificar um agregado como areia variam conforme o ponto de vista em que se encara a questão” Falcão Bauer (2008, p. 78).

Segundo a ABNT NBR 7211 (2005), os agregados miúdos são aqueles cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm. A areia, agregado miúdo, pode ainda ser subdividida em três tipos distintos que se baseiam em granulometrias que variam de 0,06mm a 2,0mm, como ilustra o Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação da areia conforme dimensão granulométrica

Classificação da Areia	
Areia Fina	0,06 - 0,2 mm
Areia Média	0,2 - 0,6 mm
Areia Grossa	0,6 - 2,0 mm
*Conforme ABNT NBR 7211/83	

Fonte: NBR 7211/2005

Para Oliveira (2017), é importante que no canteiro de obra ocorra o controle tecnológico mais efetivos e o investimento no processo de produção e classificação da areia e demais insumos, pois como a exemplo da areia, os principais locais de produção de agregado miúdo são em várzeas, depósitos lacustres e leitos de rios aonde a quantidade de materiais deletérios encontrados pode ser superior ao estabelecido.

O principal uso da areia na construção civil é como agregado para o concreto, argamassa, filtros, bases de pavimentos de concreto e asfalto, dentre outras diversas aplicações. Por ser um material de grande importância na execução de obras de engenharia, como um dos principais constituintes do concreto, material mais utilizado no mundo, a falta de um melhor controle tecnológico pode gerar uma interpretação equivocada quanto a propriedade do concreto em seu estado endurecido.

A considerável influência que os agregados podem exercer na resistência, trabalhabilidade e durabilidade, demonstram a importância que exercem, merecendo uma maior atenção na sua seleção (METHA e MONTERIO, 2005). Vale ressaltar que dependendo do traço a areia pode ocupar até 70% do volume da massa.

A ABNT NBR 7211 (2005) prescreve requisitos básicos para a utilização dos agregados no concreto. Na areia, agregado miúdo, devem ser considerados fatores como granulometria, substâncias nocivas e durabilidade.

Para Martins (2008), a composição granulométrica, isto é, a proporção relativa expressa em forma de porcentagem (%) em que se encontram os grãos de certos agregados, tem importante influência sobre a qualidade dos concretos, agindo na compactidade e resistência.

Segundo Metha e Monteiro (1994), composição granulométrica é a distribuição das partículas dos materiais granulares entre várias dimensões, e é usualmente expressa em termos de porcentagens acumuladas maiores ou menores do que cada uma das aberturas de uma série de peneiras, ou de porcentagens entre certos intervalos de abertura das peneiras.

A distribuição granulométrica deve atender a limites estabelecidos, como mostra o Quadro 2. Podem ser utilizados materiais com distribuição granulométrica diferente das zonas estabelecidas, desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade, relata a ABNT NBR 7211 (2005).

Quadro 2 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

NOTAS

- O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
- O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
- O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: NBR 7211:2005

Para Neville (1997), o resultado de uma análise granulométrica pode ser interpretado muito mais facilmente quando representado graficamente. Com a curva granulométrica é possível ver se a granulometria da amostra se enquadra nas especificações normativas, ou se é

muito grossa ou muito fina, ou deficiente em um determinado tamanho. Nas curvas granulométricas normalmente usadas, as ordenadas representam as porcentagens acumuladas passantes e as abscissas, as aberturas das peneiras em escala logarítmica. Como as aberturas das peneiras, em uma série padrão, estão em uma razão constante, um gráfico logarítmico mostra estas aberturas com espaçamentos iguais.

Quanto a substâncias nocivas e durabilidade, estão relacionadas ao estado do material quando recebido para utilização. A ABNT NBR 7211 (2005) estabelece limites máximos percentuais de substâncias nocivas presentes nos agregados miúdos, que como já citado acima, pode, em excesso, alterar as propriedades finais do material junto ao concreto. No que se refere a durabilidade, em agregados provenientes de regiões litorâneas, ou extraídos de águas salobras ou ainda quando houver suspeita de contaminação natural ou industrial, os teores de cloretos e sulfatos não devem exceder os limites máximos estabelecidos por norma.

2.2.5. Argila expandida

De acordo com Moravia (2006), a argila expandida é o produto do aquecimento de alguns tipos de argila com temperatura em torno de 1200°C.

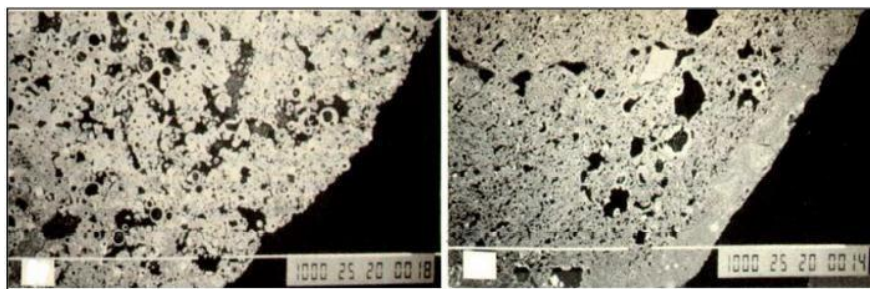
Segundo Gomes Neto (1998 apud Rossignolo, 2009) a expansão das matérias-primas naturais pode ser obtida, basicamente, através de dois processos industriais: sinterização ou forno rotativo. A sinterização consiste num processo onde a matéria-prima é misturada com uma quantidade adequada de combustível, 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.

Scobar (2016) ressalta que, no processo de forno rotativo, a massa de argila se funde formando uma massa viscosa e a outra parte se decompõe liberando gases, derivando um agregado com uma camada de proteção externa e o interior poroso. Na

Figura 3 é possível visualizar a diferença na micrografia da argila produzida tanto no processo de sinterização, figura à esquerda, quanto no forno rotativo, figura à direita.

Essa estrutura porosa se mantém após o resfriamento, de modo que a massa unitária do material resultante torna-se menor do que antes do aquecimento, podendo ser utilizada como agregado graúdo e miúdo na fabricação de concretos leves, com o objetivo de reduzir o peso próprio das estruturas.

Figura 3 – Micrografia dos agregados produzidos por sinterização e forno rotativo



Fonte: Rossignolo, 2009, p. 35.

“A argila é um material muito fino, constituído de grãos lamelares de dimensões inferiores a dois micrometros, formada, em proporções muito variáveis de silicato de alumínio e óxidos de silício, ferro, magnésio e outros elementos. Para se prestar para a produção de argila expandida, precisa ser dotada da propriedade de piroexpansão, isto é: de apresentar a formação de gases quando aquecida a altas temperaturas (acima de 1000 °C). Nem todas as argilas possuem essa propriedade.” Falcão Bauer (2008, p. 71).

Sua expansão ocorre quando pelotas de argila são colocadas em fornos rotativos, onde ao aquecer, os gases expandem-se formando grãos porosos de diversos diâmetros, a então argila expandida. O peso específico unitário é da ordem de 4000 N/m³ e a absorção de água, reduzida pela camada que cobre a argila, é de 19%. O peso específico absoluto está entre 10 a 14 KN/m³.

A argila expandida utilizada neste trabalho será a argila CINEXPAN, única empresa no Brasil que trabalha com expansão de matérias primas naturais.

A argila expandida CINEXPAN é um agregado leve que se apresenta em forma de bolinhas de cerâmica, com uma estrutura interna formada por uma espuma cerâmica com microporos e com uma casca rígida e resistente. Em seu processo de produção, as argilas são colocadas no forno rotativo de 60 m de comprimento, a temperaturas de até 1.250°C, com aditivos piroexpansivos. Após este processo de calcinação, a Argila expandida CINEXPAN passa por um resfriamento controlado para a vitrificação da sua superfície, o que garante a sua resistência.

Como bem dito, a CINEXPAN é a única empresa brasileira que trabalha com expansão de argilas. No entanto, seus produtos são comercializados no Brasil inteiro. Em Palmas, o produto é comercializado pela floricultura Renda Portuguesa.

O principal uso que se faz para a argila expandida é como agregado leve para o concreto, seja concreto de enchimento, seja concreto estrutural ou de pré-moldados. O concreto de argila expandida, de acordo com Falcão Bauer (2008), apresenta muito baixa condutividade térmica. Blocos e painéis pré-moldados usando argilas expandidas são ótimos isolantes térmicos ou

acústicos, no que são auxiliados pela baixa densidade do material, que pode variar de 6,0 a 15,0 KN/m³.

2.2.5.1. Disponibilidade

A EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, classifica os solos segundo o sistema brasileiro de classificação de solos (SiBCS), onde, através da avaliação dos dados morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos do perfil, são realizadas as devidas classificações. Aspectos ambientais do local do perfil, tais como clima, vegetação, relevo, material originário, condições hídricas, características externas ao solo e relações solo-paisagem, são também utilizadas.

Segundo dados do SiBCS, os solos de maior ocorrência no Brasil são os latossolos, sendo mais frequentes em regiões equatoriais e tropicais, podendo, no entanto, ocorrer em zonas subtropicais. Estão distribuídos sobre amplas e antigas superfícies de erosão: tabuleiros, chapadas, planaltos, terraços fluviais, estando associados normalmente a relevos planos e suave ondulados e, mais raramente, a áreas mais acidentadas.

Os latossolos são solos de intemperização intensa, chamados popularmente de solos velhos, sendo definidos pelo SiBCS (Embrapa, 2006) pela presença de horizonte diagnóstico latossólico e características gerais como: argilas com predominância de óxidos de ferro, alumínio, silício e titânio, argilas de baixa atividade (baixa CTC), fortemente ácidos e baixa saturação de bases. Apresentam teor de silte inferior a 20% e argila variando entre 15% e 80%. São solos com alta permeabilidade à água, podendo ser trabalhados em grande amplitude de umidade.

Segundo dados da EMBRAPA, as unidades pedogenéticas de maior evidência na região do Tocantins são os latossolos vermelho-amarelo e latossolos vermelho-escuro com texturas variáveis de média a argilosa, associados a areias quartzosas, podzólico vermelho-amarelo e cambissolo. Os latossolos ocorrem quase sempre nos chapadões ou superfícies de erosão estabilizadas antigas, assim como, também, nas pediplanícies.

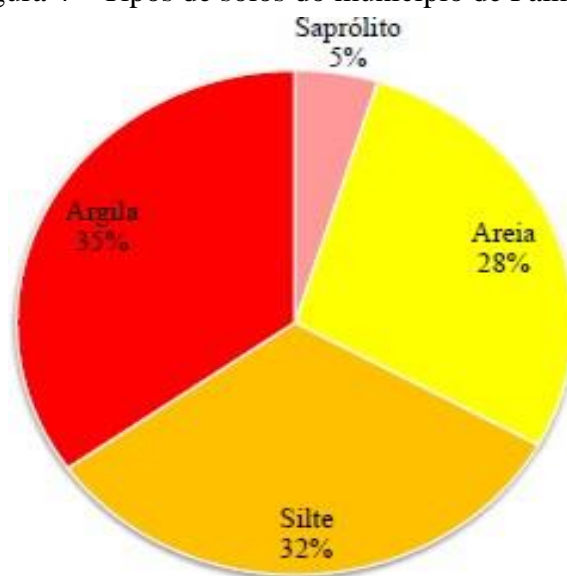
Santos (2000) aponta que o solo de Palmas, capital do Tocantins, possui 33,87% de latossolos vermelho-amarelo e 15,93 % de latossolos vermelho-amarelo em associação com plintossolos pétricos.

A textura ou granulometria refere-se à proporção de argila, silte e areia do solo. Dessas frações, a argila é a que possui maior superfície específica e é de natureza coloidal com alta retenção de cátions e adsorção de fósforo. A fração argila representa a maior parte da fase sólida

do solo e é constituída de uma gama variada de minerais (minerais de argila) que apresentam cargas elétricas negativas responsáveis pela capacidade de troca de cátions (CTC).

Castro (2018) realizou estudos geotécnicos em distintos pontos da cidade de Palmas, Figura 4, onde obteve as proporções quantitativas de cada tipo constituinte do solo na capital do Tocantins. Vale salientar que, existem diversas classificações para o solo e que na engenharia a mais comumente utilizada é a classificação quanto à textura do material.

Figura 4 – Tipos de solos do município de Palmas - TO



Fonte: Castro, 2018, p. 180.

O Brasil tem um grande potencial produtor de argila expandida, já que a maior parcela do solo brasileiro é constituído por latossolos, solos estes que possuem em uma grande parcela de argila. A principal unidade de produção de argila expandida no território brasileiro, como já apresentado anteriormente, é a CINEXPAN S.A., pertencente ao grupo Rabello. Situada em São Paulo – SP.

2.3. Concreto com argila expandida

A utilização de agregados leves ocasionam mudanças significativas em importantes propriedades dos concretos, como redução da massa específica e alterações das propriedades térmicas, trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de deformação, retração e fluência, além da redução da espessura da zona de transição entre agregado e a matriz de cimento.

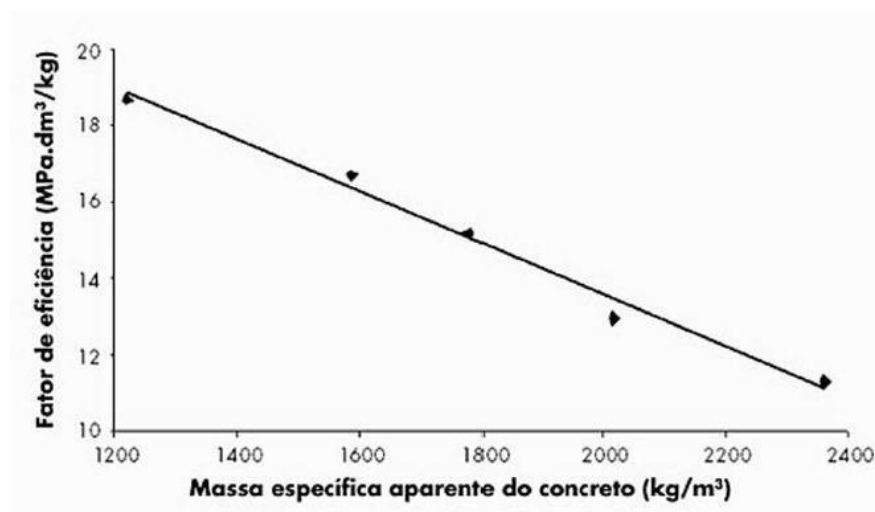
A norma americana ACI 213R-87 (Guide for Structural Lightweight - American Concrete Institute, 1999) estabelece que, os níveis de resistência à compressão exigidos pela indústria de construção para as forças habituais de projeto de concreto moldado no local, pré-moldado ou protendido, podem ser obtidos economicamente com os agregados leves estruturais em uso hoje.

2.3.1. Resistência à compressão e massa específica

A dimensão e a granulometria dos agregados têm mais influência nos valores da massa específica e da resistência à compressão em concretos leves do que, comparativamente, nos concretos convencionais, diagnosticou Rossignolo (2009). Isso porque os valores da massa específica e da resistência à compressão dos agregados leves, como é o caso da argila expandida brasileira, são inversamente proporcionais a sua dimensão.

A relação entre os valores de resistência à compressão e massa específica, denominada Fator de Eficiência (FE), é um parâmetro importante no desenvolvimento de projetos estruturais, especialmente naqueles em que o peso da estrutura tem bastante influência nas cargas permanentes. De forma geral, os concretos com agregados leves apresentam valores de FE superiores aos obtidos para os concretos convencionais, em condições similares de dosagem. A Figura 5 ilustra o efeito da redução do valor da massa específica do concreto, com a substituição do agregado convencional por argila expandida.

Figura 5 – Relação entre o fator de eficiência e a massa específica



Fonte: Rossignolo, 2009, p. 63.

Ainda segundo Rossignolo (2009), a resistência à compressão, a massa específica e a relação entre essas duas propriedades (Fator de Eficiência) são os parâmetros mais utilizados na caracterização dos concretos leves estruturais, estando diretamente relacionados com o tipo e a granulometria do agregado leve utilizado.

2.3.2. Influência na microestrutura do concreto

Alguns estudos sobre a microestrutura de concretos com agregados leves convencionais (CHEN; SCHNEIDER, 1998; ROSSIGNOLO, 2003; VIEIRA, 2000; WASSERMAN; BENTUR, 1996, 1997, 1998) demonstraram que a interação desse tipo de agregado e a pasta de cimento é diferente da ocorrida nos concretos com agregados convencionais.

Para Rossignolo (2009), a interação entre os agregados leves e a pasta de cimento, depende essencialmente do teor de umidade e porosidade permeável na região externa do agregado. Quando os agregados leves utilizados forem saturados ou tiverem uma camada externa com baixa porosidade permeável, a microestrutura da zona de transição será muito próxima a observada em concreto convencionais. Já para agregados leves com baixo teor de umidade e com porosidade permeável na face externa, como a argila expandida brasileira, acontecerá o efeito denominado “filtragem” ou “densificação”, que é quando há uma redução da espessura da zona de transição assim como a quantidade de poros e de hidróxido de cálcio (CH) em decorrência da diminuição do fator água/cimento nessa região, causada pela absorção de água pelo agregado.

Em seus estudos, Zhang e GjϕRv (1990) identificaram que a interface entre o agregado leve e a pasta de cimento apresenta baixa porosidade e caracteriza-se pela alta ancoragem mecânica entre o agregado leve e a pasta de cimento, consequência da absorção de água e da rugosidade da superfície do agregado.

Para Sacht (2008), a absorção de um agregado leve tem um efeito direto no controle do abatimento e da trabalhabilidade de um concreto leve. O estado do agregado (seco, pré-saturado ou saturado) também é de grande importância, já que para alguns pesquisadores, os agregados leves devem estar completamente secos, levando em consideração a quantidade de água que irão absorver durante a mistura e o transporte. Porém, isso pode ser feito excepcionalmente, com agregados leves de baixa absorção.

Existem outros pesquisadores que preferem agregados encharcados em água, de tal forma que não absorvam nenhuma água da mistura. Essa água absorvida, segundo Sacht (2008),

pode ser considerada como um suprimento para a hidratação tardia em traços com relação água/cimento baixa, o que diminui significativamente a retração autógena.

A granulometria do agregado e o fator água/cimento exercem influência na trabalhabilidade dos concretos e devem ser considerados em conjunto, pois quanto menor for a granulometria do agregado maior será a quantidade de água necessária para envolver os grãos do mesmo, formando uma película d'água responsável por uma boa trabalhabilidade, descreve Moravia (2006).

Holm e Bremner (2000) examinaram estruturas de concreto com agregados leves expostas em ambientes marinhos e verificaram que o agregado leve apresentava boa aderência à pasta e que a quantidade de sílica presente na interface pasta/agregado era maior do que a presente na pasta de cimento.

Os estudos realizados por Wasserman e Bentur (1996) e Elsharif, Cohen e Olek (2005) indicaram que a redução da espessura da zona de transição pasta/agregado melhora o desempenho das propriedades relacionadas à resistência mecânica e à durabilidade dos concretos leves.

O estudo da microestrutura da argila expandida é de grande importância na fabricação do concreto, através deste, obtêm-se informações necessárias para compreensão das reações físico-químicas que ocorrem na sua interface com a matriz de cimento.

2.3.3. Conforto térmico

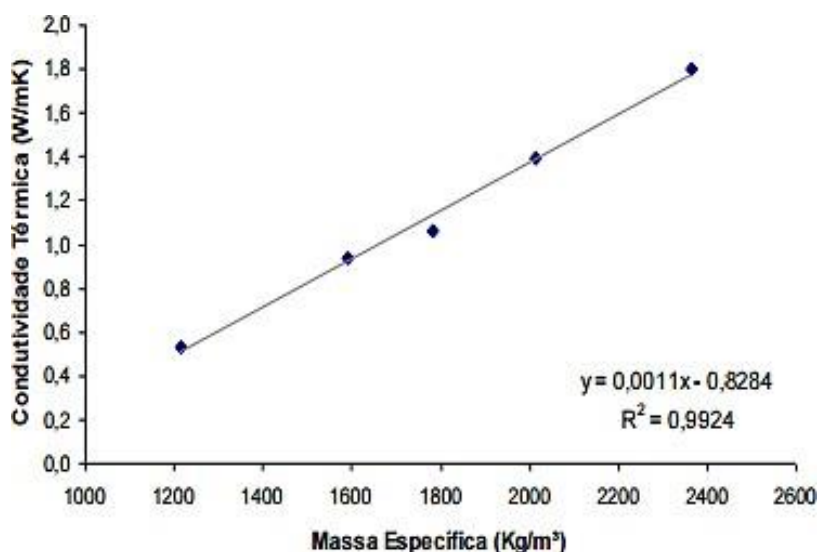
O conforto térmico é um importante fator a ser considerado na escolha dos materiais e em considerações relativas à projetos de construção civil, para garantir que a edificação possua o maior nível de habitabilidade sem a necessidade de utilização de equipamentos eletrônicos.

Como apresentado acima, a argila expandida possui a característica de aprisionar o ar em seu interior. Desta maneira, sua utilização como agregado reduz a absorção de calor em relação aos agregados convencionais, no que diz respeito à estruturas com concreto.

Por esta razão, algumas edificações utilizam o concreto com argila expandida na vedação de fachadas e na cobertura para reduzir a absorção e transferência do calor proveniente da radiação solar. (Holm e Bremner, 2000 apud Rossignolo 2003).

A Figura 6 mostra o aumento da condutividade térmica de acordo com o aumento de massa específica, ou seja, os valores da condutividade térmica são influenciados pelo valor da massa específica do concreto, especificamente pelo teor de argila expandida (SACHT, 2008).

Figura 6 – Condutividade térmica em função da massa específica



Fonte: Scobar, 2016, p. 27.

2.4. Pesquisas de diferentes autores com o uso da argila no concreto

Scobar (2016), em seus estudos acerca da substituição do agregado graúdo por argila expandida em concreto leve estrutural, concluiu que o concreto com substituição apresentava uma resistência à compressão menor do que o concreto convencional. Como justificativa, Scobar (2016) ressalta ainda que, a dimensão do agregado pode interferir na resistência final do concreto e que o concreto com substituição, em sua maioria, apresenta resistência menor que o concreto convencional, o que não inviabiliza a utilização do material.

Pereira (2012) reitera que, embora os valores de resistência à compressão do concreto leve estejam comparativamente muito aquém dos alcançados pelo concreto tradicional, a literatura demonstra, de uma forma geral, que o concreto leve analisado pode, e deve ser considerado de característica estrutural. Cabe ainda ressaltar que essa classificação foi balizada na norma norte americana para concretos compostos por agregados leves (ACI 213R-87), pois não há uma norma brasileira que discorra sobre essa tecnologia.

A norma americana ACI 213R-87 (1999) estabelece que forças de projeto de 3.000 a 5.009 psi (20,68 a 34,47 MPa) são comuns. E para usinas pré-moldadas e pré-esforçadas, as resistências de projeto de 5.000 psi (34,47 MPa) são usuais. A norma apresenta ainda que o concreto com agregado leve, após a cura, deverá ter uma resistência à compressão especificada de pelo menos 3.000 psi (20,68 MPa). Esse limite estabelecido pela norma americana depende

do tipo de concreto e do tipo de aplicação, no entanto, em todos os casos, o valor mínimo para resistência é de 20,68 MPa.

Schwantes (2012) também realizou estudos com a utilização da argila expandida como substituição ao agregado graúdo, no entanto, com a adição de sílica de casca de arroz. Como resultado, Schwantes (2012) alcançou resistência à compressão acima do mínimo estabelecido pela norma americana ACI 213R-87 (1999) e percebeu o aumento da resistência com elevação da idade do corpo de prova, sendo o valor alcançado de 31,6 MPa aos 28 dias. Fato relevante é que, o concreto mais resistente foi justamente o que não recebeu adição de sílica de casca de arroz. Quanto ao módulo de elasticidade, Schwantes (2012) obteve valores entre 52 e 66% dos módulos estimados para concreto convencional, conforme a ABNT NBR 6118 (2004).

Baseado nas suposições de Scobar (2016), que percebeu conforme seus experimentos a interferência da dimensão do agregado na resistência do concreto com substituição, Angelin (2014) obteve resistência à compressão na ordem de 28 MPa, utilizando traços com argila expandida de diâmetro reduzido e com adição de sílica ativa.

Sacht (2008), em seu trabalho sobre desempenho térmico de concretos, observou que a partir da diminuição dos valores de massa específica do concreto, devido a substituição da brita basáltica por argila expandida, houve um decréscimo da condutividade térmica. Isso, devido ao ar aprisionado na estrutura celular dos agregados leves dificultarem a transferência e absorção de calor.

Em seu livro “Concreto Leve Estrutural”, Rossignolo (2009) cita 102 MPa como marco no valor da resistência à compressão para concretos com agregados leves. Esse valor foi obtido por Zhang e GjφRv (1991) para concretos leves com massa específica de 1735 kg/m³ e consumo de cimento de 550 kg/m³, o que representa um fator de eficiência de 58,7 MPa.dm³/kg, similar ao de um concreto com agregados convencionais com valor de resistência à compressão igual a 140 MPa.

No Brasil, o maior valor registrado de resistência à compressão de concreto com argila expandida é de 73 MPa, apresentado por Gomes Neto (1998) em concretos com massa específica de 1720 kg/m³. Entretanto, esse valor foi obtido em uma mistura com consumo de cimento de 1200 kg/m³ e agregado com dimensão máxima característica de 6,3 mm. De fato, a argila expandida brasileira tem-se mostrado viável economicamente em concretos com resistência à compressão abaixo de 50 MPa, para valores de massa específica do concreto entre 1400 kg/m³ e 1800 kg/m³.

Existem algumas construções onde foram utilizados concretos leves de argila expandida no Brasil. 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 e o tabuleiro do Elevado Paulo de Frontin no Rio de Janeiro, além de obras na construção da cidade de Brasília.

Rossignolo (2003) cita em seus estudos, no entanto, que desde o início da produção de agregados leves no Brasil, o concreto com utilização desse tipo de material foi motivo de poucos estudos e encontra utilização modesta na construção civil, mesmo havendo algumas aplicações, como as estruturas listadas acima.

Os poucos estudos que existem hoje no Brasil acerca da utilização da argila expandida no concreto se restringem a substituição do agregado graúdo, como apresentado nos estudos e experimentos de outros autores neste tópico. De fato, o concreto com substituição do agregado graúdo traz muitas melhorias ao concreto, como elucida Rossignolo (2009) quando cita que a utilização da argila ao invés da brita possibilita o aumento da coesão, a redução da segregação e o aumento da resistência à compressão do concreto, em relação aos concretos com agregado miúdo leve. Em contrapartida, a utilização de agregados miúdos convencionais ocasiona o aumento da massa específica do concreto, em comparação com o agregado miúdo leve.

O presente trabalho não busca comparar a substituição do agregado graúdo com a substituição do miúdo, mas testificar as possíveis melhorias que a substituição do agregado miúdo pode trazer comparadas as do concreto convencional, fatos que poderão ser comprovados a partir de experimentos futuros.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a descrição do programa experimental desenvolvido para análise do concreto estudado neste trabalho. Conseqüentemente, é retratada a caracterização dos materiais constituintes do concreto de referência e do concreto com substituição da argila expandida. São relatados o método de dosagem e os ensaios no estado fresco e endurecido para definição das propriedades finais. Também é explicada a análise dos resultados pelos testes estatísticos utilizados.

3.1. Caracterização dos materiais utilizados

3.1.1. Aglomerante

Para produção dos corpos de prova foi utilizado como aglomerante o cimento Portland CPV ARI (Extra Forte), como indicado pelo catálogo do fabricante da argila expandida para utilização no concreto. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra o material tilizado.

Figura 7 – Cimento utilizado para produção do concreto



Fonte: autor

3.1.2. Agregado graúdo

Como agregado graúdo foi utilizada a brita 0. A escolha não foi só em função da sua disponibilidade local, mas também em virtude de sua dimensão máxima característica que, conforme descrito anteriormente, dimensões reduzidas de agregados tendem a produzir concretos mais resistentes. Os ensaios realizados com a finalidade de caracterizar o agregado graúdo utilizado no concreto seguiram as recomendações de execução das Normas Brasileiras mencionadas a seguir:

- ABNT NBR NM 248 (2003) – Agregados – Determinação da composição granulométrica;
- ABNT NBR NM 45 (2006) - Agregados - Determinação da massa unitária;
- ABNT NBR NM 46 (2003) - Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem.

A Figura 8 ilustra a realização dos ensaios de composição granulométrica e de determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem, também conhecido por material pulverulento. Ambos foram realizados seguindo as normas vigentes apresentadas.

O ensaio de composição granulométrica foi realizada através do peneiramento do material por intermédio de um agitador mecânico, afim de obter a curva granulométrica. Já o ensaio de material pulverulento foi realizado a lavagem do material, dispensando o passante na peneira de 75 um, com a finalidade de obter o teor de material fino presente na amostra.

Figura 8 – Determinação da composição granulométrica e do material pulverulento



Fonte: autor

Na Figura 9 é ilustrado o ensaio de determinação da massa unitária, parâmetro importante na hora de dosar o concreto.

Figura 9 – Ensaio de determinação da massa unitária



Fonte: autor

3.1.3. Agregado miúdo

O concreto foi analisado de duas maneiras distintas, com sua formulação convencional e também com substituição do agregado miúdo por argila expandida. Para tanto, foram utilizados dois tipos de agregados miúdos: areia e argila expandida.

A areia grossa foi uma das opções de agregado miúdo, tanto para análise do concreto de referência quanto para análise de proporções diferentes de substituição no concreto. O motivo da escolha se baseia no fato de sua dimensão ser o mais próximo da dimensão da argila utilizada.

A argila expandida foi a 0,500; produzida pela CINEXPAN, única empresa no Brasil que trabalha com produção e venda de argilas expandidas. Sua dimensão é a mais recomendada para utilização em concretos com substituição de agregado miúdo, conforme Rossignolo (2008). A Figura 10 exemplifica o tipo de argila utilizada.

Figura 10 – Argila a ser utilizada na produção do concreto com substituição



Fonte: autor

Os ensaios realizados com a finalidade de caracterizar os agregados miúdos (areia e argila expandida) utilizados no concreto seguiram as recomendações de execução das Normas Brasileiras mencionadas a seguir:

- ABNT NBR NM 248 (2003) – Agregados – Determinação da composição granulométrica.
- ABNT NBR NM 30 (2001) – Agregado miúdo – Determinação da absorção de água;
- ABNT NBR NM 52 (2009) – Agregado miúdo – Determinação de massa específica;
- ABNT NBR NM 46 (2003) - Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem
- ABNT NBR 6467 (2006) - Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio

Na Figura 11 é possível visualizar o ensaio de determinação da massa específica, relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis.

O ensaio de inchamento do agregado miúdo foi realizado baseado na necessidade de comparar o comportamento de areia e argila enquanto em contato com a água, visto que foi apresentado no Capítulo 2 que alguns agregados miúdos possuem essa capacidade de inchar. O ensaio é ilustrado através da Figura 12.

Figura 11– Determinação da massa específica



Fonte: autor

Figura 12– Determinação do inchamento



Fonte: autor

A Figura 13 apresenta ainda o ensaio de material pulverulento realizado na areia e na argila.

Todos os outros ensaios listados anteriormente foram realizados, a fim de caracterizar os agregados miúdos objetos de estudo neste trabalho. Seus respectivos resultados serão apresentados no capítulo seguinte.

Figura 13 – Determinação do material pulverulento



Fonte: autor

3.1.4. Aditivo

Foi utilizado um aditivo plastificante polifuncional, como indicado no catálogo da argila expandida CINEXPAN. Os concretos com agregados leves apresentam dificuldade no adensamento e lançamento, nesse sentido, o aditivo atua aumentando a coesão e a fluidez. Além de possibilitar a melhora da resistência final. O aditivo escolhido foi o MIRA SET 48 e a proporção utilizada foi a indicada no catálogo do fabricante de 0,7% sobre o peso do cimento.

3.2. Dosagem

A dosagem é um processo que consiste em definir um traço através do qual se obtém a quantidade de cada componente da mistura do concreto. O concreto final deve atender a certos requisitos considerados importantes como trabalhabilidade, resistência e durabilidade.

De posse dos resultados obtidos por intermédio dos ensaios de caracterização dos materiais utilizados, foi possível, através do método ACI 211.1-81, calcular o traço em massa utilizado neste trabalho. O método ACI 211.1-81 consiste na utilização de tabelas e gráficos elaborados a partir de valores médios de resultados experimentais.

Os requisitos iniciais para obtenção de um concreto que atendesse as necessidade do presente trabalho, baseado no ideal de alcançar um concreto leve estrutural, foram um fck de 25MPa e um slump de 75mm.

De posse desses valores, através de articulações matemáticas e os parâmetros estipulados pelo método escolhido (ACI 211.1-81), foi possível a obtenção de um traço em massa de 1:1,51:1,72 (cimento, areia e brita) e uma relação a/c de 0,40.

Vale salientar que, a dosagem foi realizada para um concreto de referência, no qual, foram aplicadas proporções de 25, 50, 75 e 100% de substituição do agregado miúdo por argila expandida. As proporções foram escolhidas com o intuito de identificar qual o traço de substituição do agregado miúdo resultaria em um melhor comportamento por parte do concreto. Isso se fez necessário devido à falta de estudos na área que respaldariam a utilização de apenas uma proporção específica. A opção por várias proporções de substituição pode, inclusive, auxiliar em futuras pesquisas com utilização da argila expandida no concreto.

Para melhor entendimento, os traços moldados foram divididos com a seguinte nomenclatura:

- TR0 (traço de referência com 0% de substituição da areia pela argila expandida)
- TR25 (traço com 25% de substituição da areia pela argila expandida)
- TR50 (traço com 50% de substituição da areia pela argila expandida)
- TR75 (traço com 75% de substituição da areia pela argila expandida)
- TR100 (traço com 100% de substituição da areia pela argila expandida)

3.3. Determinação das propriedades no estado fresco

Os ensaios realizados para obtenção das propriedades do concreto em seu estado fresco foram baseados na ABNT NBR 12655 (2015).

3.3.1. Consistência

Os ensaios de consistência foram realizados pelo método de abatimento do tronco de cone, conforme a ABNT NBR NM 67 (1998). Neste ensaio, o concreto foi colocado dentro de um cone em 3 camadas, sendo que cada terço de camada foi compactada com 25 golpes. Feito isso, o concreto foi retirado do molde com o tronco de cone na posição invertida e então medido seu abatimento. A Figura 14 demonstra o processo de realização do ensaio.

Figura 14– Ensaio de abatimento do tronco de cone no traços TR25 e TR100



Fonte: autor

3.4. Determinação das propriedades no estado endurecido

Na determinação das propriedades físicas e mecânicas do concreto em seu estado endurecido, os corpos de prova utilizados como amostragem foram moldados e curados conforme a ABNT NBR 5738 (2015) para realização de respectivos ensaios laboratoriais, no intuito de alcançar características que viabilizam a inserção deste concreto no mercado. O corpo de prova utilizado foi o cilíndrico, com 10cm de diâmetro e 20cm de altura, como ilustra a Figura 16.

Foi realizada a etapa da mistura para todos os traços de concretos estudados na betoneira de eixo inclinado, como apresenta a Figura 15.

O processo de adensamento foi manual, com haste metálica de 16mm de diâmetro e 600mm de comprimento. No molde foram colocadas duas camadas da amostra e executados 15 golpes por camada, visando evitar a segregação no concreto.

Em seguida, após 24 horas da moldagem dos corpos de prova, os concretos foram submetidos à cura úmida submersos em água para uma idade de 7 e 28 dias. Transcorrido esse tempo foram realizados os ensaios no estado endurecido. Todas as misturas e ensaios no estado fresco e endurecido foram realizados no laboratório de materiais do curso de engenharia civil da Universidade Federal do Tocantins (UFT).

Figura 15 – Processo de mistura dos componentes do concreto



Fonte: autor

Figura 16 – Processo de moldagem dos corpos de prova cilíndricos



Fonte: autor

3.4.1. Propriedades físicas

As propriedades físicas determinadas nos corpos de prova dos diferentes traços foram: massa específica, absorção de água e índice de vazios. A seguir é explicada sua determinação.

A Figura 17 ilustra os corpos de prova utilizados para as determinações dos ensaios propostos nesse item.

Figura 17 – Corpos de prova utilizados para determinação de propriedades físicas



Fonte: autor

3.4.1.1. Massa específica, absorção de água e índice de vazios

A absorção de água por imersão, o índice de vazios e a massa específica seca do concreto são propriedades de grande importância para o estudo do concreto com substituição da argila. Já que elas estão diretamente relacionadas com a resistência à compressão do concreto, como já citado no referencial teórico.

Os ensaios de massa específica seca, absorção de água e índice de vazios foram realizados para 15 corpos de prova de concreto na idade de 28 dias, conforme a ANNT NBR 9778 (2005). Os corpos foram pesados em seu estado seco (após passar pela estufa) e na sequência submersos em água por 72h. Feito isso, os moldes de concreto foram também pesados em seu estado saturado.

A Figura 18 elucidada o processo de secagem dos corpos de prova analisados durante 72h. Já na Figura 19 é possível visualizar os processos de pesagem, tanto em estado seco como saturado.

Figura 18 – Secagem dos corpos em estufa por 72h



Fonte: autor

Figura 19 – Pesagem dos corpos de prova em estado seco e saturado



Fonte: autor

O Quadro 3 descreve como foi feita a divisão de corpos de prova segundo cada tipo de concreto analisado.

Quadro 3 – Quantidade de corpos de prova a serem utilizados

Quantidade de CP's por traço	CP's analisados aos 28 dias
TR0	3
TR25	3
TR50	3
TR75	3
TR100	3

Fonte: autor

3.4.2. Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas determinadas nos corpos de prova analisados foram resistência à compressão e módulo de elasticidade. Ambos os ensaios foram realizados através da prensa hidráulica universal Quanteq, que possui uma carga máxima para ensaios de até 200 toneladas. A Figura 20 ilustra a prensa utilizada.

Figura 20 – Prensa hidráulica universal utilizada nos ensaios mecânicos



Fonte: autor

3.4.2.1. Resistência à compressão e módulo de elasticidade

No ensaio de resistência à compressão, respaldado pela ABNT NBR 5739 (1994), os corpos de prova foram ensaiados após submetidos à cura úmida de 7 e 28 dias de idade. Optou-

se pela análise das duas idades a fim de verificar o comportamento do concreto com o aumento da idade. Foram ensaiados 3 corpos de provas para cada traço estudado e para cada idade do concreto, totalizando 30 corpos de prova para este ensaio. O Quadro 4 discrimina a quantidade de corpos de provas para cada situação.

Neste processo de rompimento das amostras, ilustrado na Figura 21, o corpo de prova foi colocado na prensa hidráulica universal e a força exercida necessária para romper o concreto dividida pela área do topo do corpo de prova foi a resistência à compressão encontrada. Foram ensaiados 3 corpos de provas para cada traço estudado e para cada idade do concreto.

Figura 21 – Ensaio de resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias no traço TR100



Fonte: autor

O módulo de deformação tangente inicial foi obtido segundo ensaio descrito na ABNT NBR 8522 (2008). O ensaio consistiu em três ciclos de carregamento até 30% da capacidade de carga total estimada do corpo de prova, mantido o carregamento por 60 segundos, após esse tempo, foi descarregado até 0,5 MPa e mantido por mais 60 segundos. O módulo de elasticidade foi calculado a partir da inclinação de reta tangente imaginária, traçada paralela à reta secante construída com dados da curva tensão-deformação, obtida no ensaio. É possível visualizar o ensaio produzido através da Figura 22.

Figura 22 – Ensaio de módulo de elasticidade no traço TR75 e TR50



Fonte: autor

Foram ensaiados 3 corpos de prova para o concreto de referência e 3 para cada proporção a ser substituída pela argila (25, 50, 75 e 100%), totalizando 15 corpos de provas para cada idade (7 e 28 dias).

O Quadro 4 apresenta o total de corpos de provas moldados para o ensaio de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Quadro 4 – Quantidade de corpos de prova a serem utilizados

Quantidade de CP's por traço	Ensaio de resistência à compressão		Ensaio de módulo de elasticidade	
	CP's analisados aos 7 dias	CP's analisados aos 28 dias	CP's analisados aos 7 dias	CP's analisados aos 28 dias
TR0	3	3	3	3
TR25	3	3	3	3
TR50	3	3	3	3
TR75	3	3	3	3
TR100	3	3	3	3
Total	15	15	15	15

Fonte: autor

3.5. Análise dos resultados

Para que haja uma boa compreensão dos resultados alcançados é necessário que os dados passem por processos de análise estatística, afim de chegar a conclusões mais precisas

sobre a substituição do agregado miúdo por argila expandida no concreto. Os resultados deste trabalho passaram primeiro pelo Critério de Chauvenet, e posteriormente pelos testes de Análise de Variância (ANOVA) e Tukey.

É comum encontrar alguns valores medidos que extrapolam a tendência dominante de uma determinada amostra. Estes valores podem ser, de fato, medições erradas, como podem também representar certo fenômeno físico de interesse. Por este motivo, estes valores que fogem à tendência dominante, não podem ser descartados sem recorrer a um critério consistente para sua eliminação. Neste caso, o critério de Chauvenet auxiliou no processo de análise de possíveis rejeições nas amostras em estudo.

A aplicação do critério de Chauvenet consiste basicamente em calcular a média (\bar{x}) e o desvio padrão (Sd). Com o desvio individual dos valores em relação à média ($D_i = x_i - \bar{x}$) calcula-se a relação entre o desvio e o desvio padrão, D_i/Sd . O R (D_i/Sd) calculado deve ser menor que o R_c tabelado para que o dado esteja apto a manter-se na amostra.

Assim que os dados foram analisados pelo critério de Chauvenet, as amostras então passaram pelo teste de Análise de Variância (ANOVA). A análise visa verificar se existe uma diferença significativa entre as médias obtidas na amostra, no entanto, não possibilita identificar quais médias estão diferindo uma das outras, por isso foi realizado em conjunto com o teste de Tukey. Ambos os testes foram realizados por intermédio do software Excel.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são mostrados os resultados obtidos descritos na metodologia experimental proposta no capítulo anterior. No que tange à análise dos resultados, os mesmos foram submetidos a análise estatística para as devidas considerações, bem como gráficos, tabelas, quadros e figuras auxiliarão no processo de explanação dos valores obtidos para a obtenção de conclusões mais precisas.

4.1. Caracterização dos materiais utilizados

Os ensaios realizados para caracterização dos agregados utilizados foram respaldados por suas respectivas NBRs, como apresentado no Capítulo 3. A areia e a argila foram submetidas a ensaios de massa específica, absorção de água, determinação de material pulverulento e coeficiente de inchamento, enquanto a brita, massa específica, massa unitária e também determinação do material pulverulento. Vale salientar que, ambos passaram pela determinação da composição granulométrica, como ilustram os Gráficos 1 e 2.

A determinação da composição granulométrica foi realizada seguindo os procedimentos da norma ABNT NBR NM 248: 2003. A curva granulométrica indicada no Gráfico 1 indica que os agregados miúdos utilizados, tanto a argila 0,500 quanto a areia grossa, mesmo a argila sendo mais graduada que a areia, são similares, pois a maior parte dos grãos de ambas se encontra entre 0,6 e 2,0 mm. Já o Gráfico 2 apresenta a distribuição granulométrica do agregado graúdo, que para a proposta experimental em questão foi adotado como sendo a brita 0.

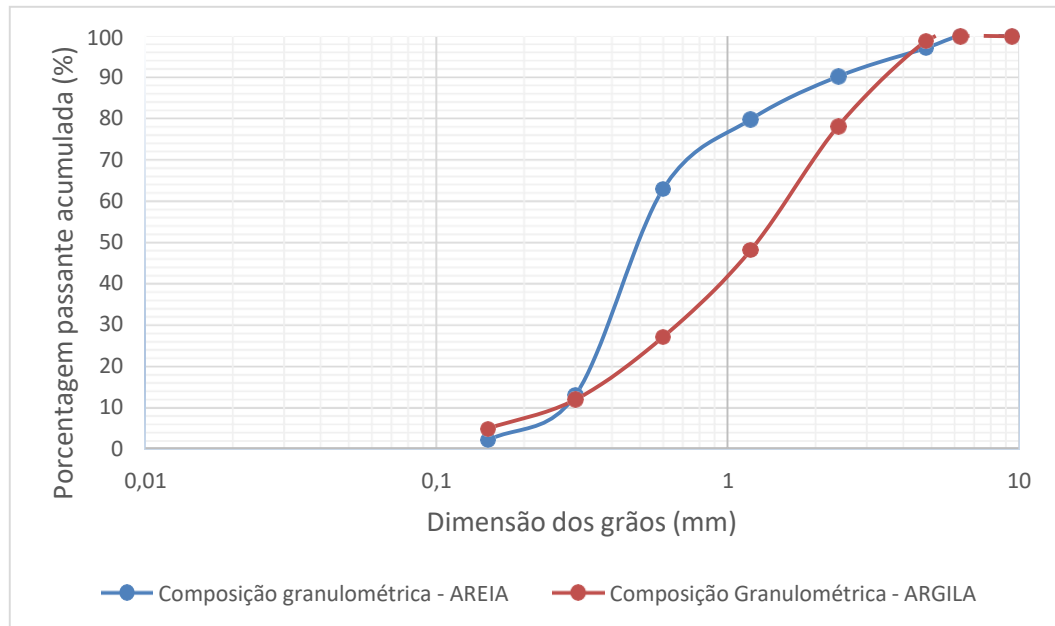
A partir dos valores obtidos na curva granulométrica, foi possível calcular os valores de módulo de finura e o diâmetro máximo característico. Os resultados estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização dos agregados

	AREIA	ARGILA	BRITA
Módulo de Finura	2,55	3,31	1,23
Diâmetro máximo característico	4,8	4,8	12,5

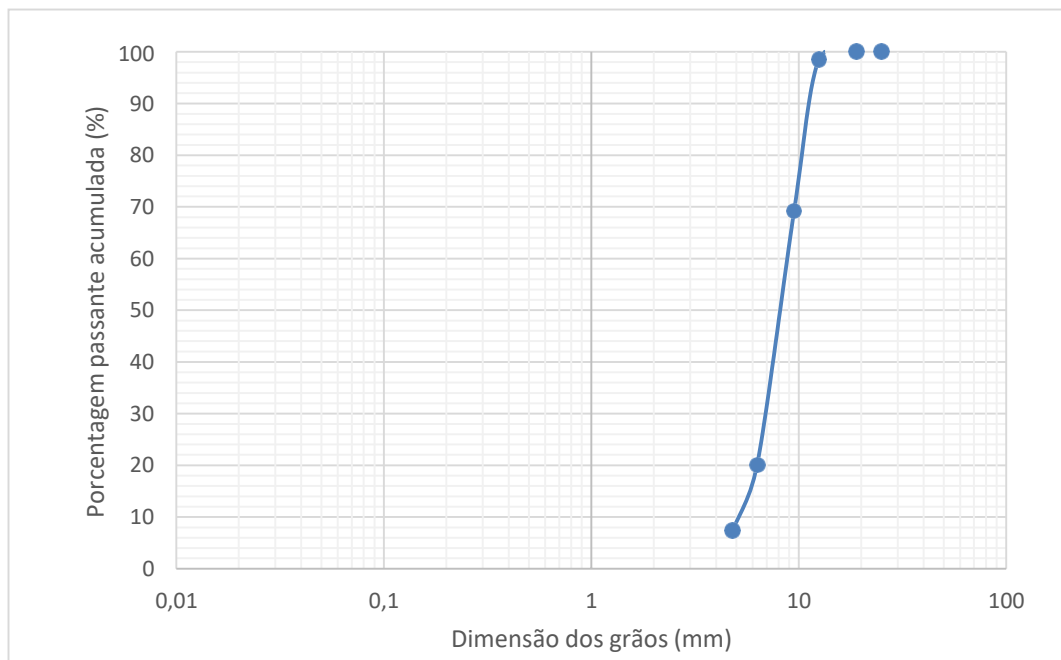
Fonte: o autor

Gráfico 1 – Composição granulométrica dos agregados miúdos



Fonte: o autor

Gráfico 2 – Composição granulométrica do agregado graúdo



Fonte: o autor

De acordo com a Tabela 1, é possível notar que a argila possui um módulo de finura elevado comparado aos demais materiais. No entanto, ainda assim está nos padrões estabelecidos pela ABNT NBR 7211 (2005) que preconiza valores aceitáveis de módulo de finura dos agregados tanto graúdos quanto miúdos, para utilização no concreto.

Os módulos de finura da argila expandida e também da areia apresentaram-se na zona utilizável superior que varia entre 2,90 a 3,50.

Foram realizados outros ensaios de caracterização para os agregados utilizados, além da composição granulométrica, como já apresentado no início do tópico. Os resultados estão apresentados na Tabela 2 e na Tabela 3.

Tabela 2 - Caracterização dos agregados miúdos

Determinação	AREIA	ARGILA
Massa Específica (g/cm³)	2,35	1,67
Absorção de Água (%)	0,18	6,39
Material pulverulento (%)	0,44	1,49
Coefficiente de inchamento (%)	1	1

Fonte: o autor

Tabela 3 - Caracterização do agregado graúdo

Determinação	Resultado
Massa Específica (g/cm³)	2,65
Massa Unitária (g/cm³)	1,43
Material pulverulento (%)	0,4

Fonte: o autor

Os resultados obtidos para a massa específica e unitária dos agregados foram utilizados não apenas para análise característica, mas também nos cálculos de consumo de materiais que entraram na composição do concreto. O traço em volume calculado seguindo a metodologia ACI 211.1-81 foi de 1:1,51:1,72 (cimento, areia, brita). Vale comentar também que, a massa específica da argila é bem menor comparada aos demais agregados, por justamente se tratar de um agregado leve.

O ensaio de absorção de água foi bastante significativo para o seguimento da proposta experimental. No capítulo 2 foi explanado que algumas argilas expandidas possuem características diferentes a depender do processo de expansão ao que foi submetida. Algumas argilas podem ser porosas e outras não. Para tanto, foi essencial a análise do comportamento da argila escolhida para sua utilização nesta pesquisa, sendo que os resultados apresentaram um alto teor de absorção por parte do material. Sendo assim, foi imprescindível a utilização do agregado de forma saturada no concreto, visto que o alto teor de absorção poderia retirar água

da mistura e alterar a relação a/c definida pelo traço apresentado, ademais de comprometer a trabalhabilidade do mesmo.

A determinação do inchamento também é de suma importância para a medição dos traços de concreto em volume. Neville (1997) comenta ainda que algumas areias podem sofrer o fenômeno do “inchamento”. No entanto, para os resultados obtidos, areia e argila se comportaram de formas semelhantes.

A ABNT NBR 7211 (2005) determina que para materiais finos que passam através da peneira 75 μm por lavagem, conforme procedimento de ensaio estabelecido na NBR NM 46 (2003), a quantidade máxima relativa à massa do agregado miúdo é de 3% para concreto submetido a desgaste superficial e de 5% para concretos protegidos do desgaste superficial. Assim, podemos concluir que ambas as amostras, argila e areia, podem ser utilizadas na dosagem e concretos destinados a ambientes internos e externos.

4.2. Determinação das propriedades do concreto no estado fresco

Os fatores que afetam as propriedades do concreto feito com agregados leves são praticamente iguais aos que afetam o concreto convencional. A baixa densidade e a textura áspera do agregado poroso, demandam uma maior atenção à trabalhabilidade. Por esse motivo todos os traços foram analisados em seu estado fresco através do ensaio proposto na metodologia.

4.2.1. Consistência

No ensaio de abatimento do tronco do cone, conhecido como “slump test”, os parâmetros de dosagem utilizados foram fixados previamente para um slump de 75mm, como foi explicado no capítulo anterior, onde foi calculado o traço de estudo. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos nos cinco traços analisados.

Tabela 4 - Ensaio de abatimento do tronco do cone

Traço	Resultado
TR0	180mm
TR25	200mm
TR50	180mm
TR75	180mm
TR100	30mm

Fonte: o autor

É possível notar que fora o TR100, todos os demais traços obtiveram resultados de abatimento bem acima do estipulado na dosagem, o que mostra a Figura 23 e a Figura 24, com o TR25 chegando a 200mm, por exemplo. Tanto os valores elevados quanto o de TR100 de 30mm são ocasionados pela adição do aditivo plastificante polifuncional na mistura.

Verzegnassi (2015) comenta que para a determinação dos valores de abatimento de um concreto leve deve-se levar em conta o valor da massa específica do agregado leve. No caso do abatimento medido pelo método do tronco de cone, os concretos com 100% de argila apresentam valores de abatimento menores em relação aos concretos de referência, isto ocorre em função da menor massa específica, provocando um menor efeito da ação da gravidade sobre a massa do concreto. Esse efeito menor da gravidade sobre os concretos leves, afeta fortemente as condições de transporte, lançamento e adensamento destes concretos.

Segundo Rossignolo (2009) esse fenômeno pode ser evitado pela dosagem de concretos com coesão e consistência adequados, pelo controle do fator água/cimento e do teor de agregados miúdos.

Por essa razão, além da argila saturada, foi utilizado também o aditivo plastificante polifuncional MIRA SET 48, buscando facilitar o adensamento e o lançamento, melhorando a coesão e a consistência do concreto. É importante ressaltar que o catálogo da CINEXPAN, fornecedora da argila, aconselha o uso desse tipo de aditivo nos concretos com argila, como já comentado no tópico anterior Capítulo 3.

Neste caso, o aditivo funciona de forma a melhorar a trabalhabilidade no concreto. O TR100 por exemplo, que só possui argila, mesmo com aditivo ainda obteve um abatimento de 30mm, como ilustra a Figura 25. Isso mostra a dificuldade do adensamento desse tipo de concreto com agregados leves. Os demais traços obtiveram valores bem elevados em relação ao previsto 75mm.

Figura 23 - Ensaio de abatimento do tronco do cone nos traços TR0 e TR25



Fonte: o autor

Figura 24 - Ensaio de abatimento do tronco do cone nos traços TR50 e TR75



Fonte: o autor

Figura 25 - Ensaio de abatimento do tronco do cone nos traços TR100



Fonte: o autor

4.3. Determinação das propriedades do concreto no estado endurecido

A utilização de agregados leves ocasionam mudanças significativas em importantes propriedades dos concretos. Resistência à compressão e massa específica são as propriedades mais influenciadas pela utilização desse tipo de agregado no concreto, seguido de absorção de água, índice de vazios e módulo de elasticidade também, que também são afetadas consideravelmente.

4.3.1. Massa específica seca

Os resultados para a massa específica seca são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Ensaio de massa específica seca

Traço	CP	Massa Específica Seca (g/m ³)	Média (g/m ³)	Sd (%)	C.V (%)
TR0	1	2,26	2,26	0,01	0,58
	2	2,27			
	3	2,24			
TR25	1	2,17	2,17	0,01	0,26
	2	2,18			
	3	2,16			
TR50	1	2,04	2,03	0,01	0,45
	2	2,03			
	3	2,03			
TR75	1	1,86	1,84	0,02	1,1
	2	1,85			
	3	1,82			
TR100	1	1,78	1,79	0,01	0,49
	2	1,79			
	3	1,80			

Fonte: o autor

Nota-se como a medida que aumenta a porcentagem de substituição da argila nos traços a massa específica diminuiu, como era esperado. Enquanto o traço de referência apresentou massa específica de 2,26 g/m³, o concreto com 100% de substituição de argila não ultrapassou os 1,8 g/m³. Resultado importante, já que algumas bibliografias como a norma americana ACI 213R-87 (1999), e as normas brasileiras ABNT NBR NM 35 (1995) e ABNT NBR 8953 (2015) definem concretos com massas específicas secas menores que 2000 kg/m³ (2,0 g/m³) como concretos leves.

A massa específica, bem como a resistência à compressão, é uma das propriedades mais afetadas pela utilização de agregados leves justamente pela massa específica desses materiais serem menor que os convencionais. Sendo assim, os resultados obtidos são importantes e significativos, já que de acordo com os resultados apresentados na Tabela 5 é possível obter um concreto leve com 75% e 100% de substituição do agregado miúdo pela argila expandida.

4.3.2. Absorção de água e índice de vazios

Os resultados do ensaio de absorção de água estão apresentados na Tabela 6, enquanto os de índice de vazios na Tabela 7.

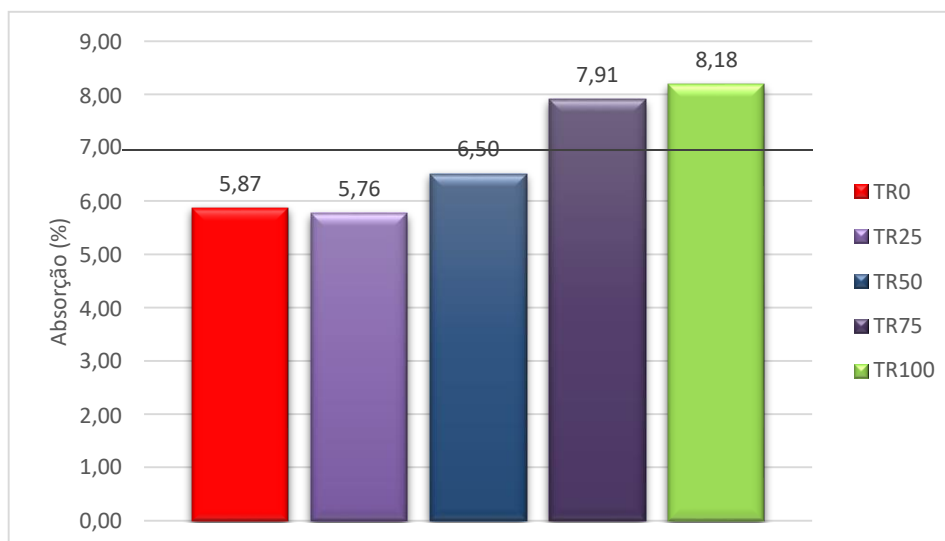
Tabela 6 - Ensaio de absorção de água

Traço	CP	Absorção (%)	Média (%)	Sd (%)	C.V (%)
TR0	1	5,72	5,87	0,26	4,35
	2	5,72			
	3	6,16			
TR25	1	5,98	5,76	0,28	4,92
	2	5,87			
	3	5,44			
TR50	1	6,43	6,5	0,07	1,06
	2	6,56			
	3	6,51			
TR75	1	7,8	7,91	0,11	1,4
	2	7,91			
	3	8,02			
TR100	1	8,25	8,18	0,1	1,18
	2	8,23			
	3	8,07			

Fonte: o autor

A Tabela 6 mostra que os valores de absorção de água nos traços estudados aumenta na medida que aumenta o teor de substituição da argila no concreto, resultados esperados já que a argila expandida apresenta maior porosidade que a areia. O traço TR0 surpreendentemente não apresentou o menor percentual de absorção, como o esperado, por se tratar de um concreto com agregados convencionais, e os demais serem com a argila expandida. O menor percentual de absorção, mesmo bem próximo ao traço referência, foi do TR25, enquanto o maior foi o do TR100. No Gráfico 3 é possível visualizar o afirmado.

Gráfico 3 - Ensaio de absorção de água



Fonte: o autor

Na Tabela 7 é possível visualizar que no ensaio de índice de vazios o comportamento foi bem semelhante ao de absorção de água. O concreto TR25 obteve o menor índice comparado aos demais traços. Sendo que mais uma vez o TR100 obteve o maior resultado de análise.

Tabela 7 - Ensaio de índice de vazios

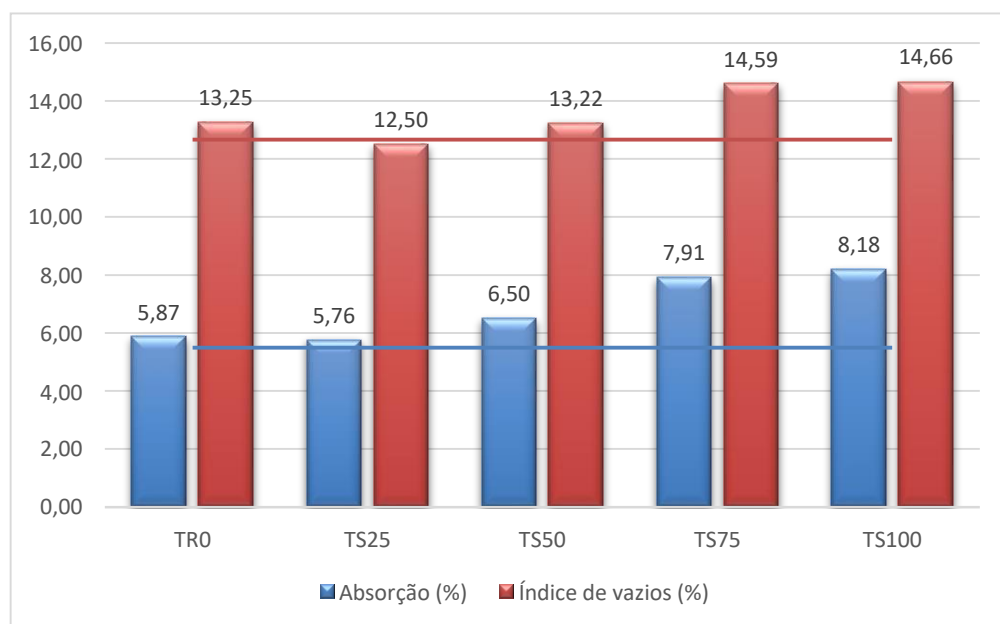
Traço	CP	Índice de Vazios (%)	Média (%)	Sd (%)	C.V (%)
TR0	1	12,96	13,25	0,5	3,76
	2	12,97			
	3	13,83			
TR25	1	12,97	12,5	0,64	5,12
	2	12,76			
	3	11,77			
TR50	1	13,14	13,22	0,08	0,63
	2	13,31			
	3	13,22			
TR75	1	14,53	14,59	0,05	0,37
	2	14,62			
	3	14,62			
TR100	1	14,71	14,66	0,11	0,75
	2	14,74			
	3	14,54			

Fonte: o autor

Os concretos com maiores proporções de argila expandida tendem a obter uma absorção de água maior que os demais por se tratar de um agregado poroso, e de massa específica leve.

Nos resultados obtidos, tanto para absorção de água, quando para índice de vazios, foi possível concluir que quanto maior o índice de vazios maior a absorção e menor a massa específica seca. Portanto podemos afirmar que a massa específica dos concretos estudados é inversamente proporcional às duas outras propriedades apresentadas nesse tópico. O Gráfico 4 ilustra a relação existente entre a absorção de água e o índice de vazios.

Gráfico 4 - Relação entre absorção e índice de vazios



Fonte: o autor

4.3.3. Resistência à compressão

A resistência à compressão é uma propriedade de extrema importância para a avaliação das estruturas de concreto, uma vez que está diretamente relacionada com a qualidade do material ao qual foi proposto.

Para avaliação da proposta experimental do presente estudo, o ensaio de resistência à compressão foram pautados pela NBR 5739 (1994) e analisados às idades de 7 e 28 dias. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de 7 dias.

Tabela 8 - Resistência à compressão aos 7 dias

Traço	CP	Rc (MPa)	Média (MPa)	Sd (MPa)	C.V (%)
TR0	1	34,81	34,52	1,11	3,21
	2	33,30			
	3	35,46			
TR25	1	30,86	28,45	2,22	7,82
	2	26,47			
	3	28,04			
TR50	1	32,89	33,54	0,75	2,24
	2	33,36			
	3	34,36			
TR75	1	24,61	23,24	4,28	18,41
	2	18,44			
	3	26,66			
TR100	1	26,66	25,26	1,34	5,32
	2	23,98			
	3	25,15			

Fonte: o autor

Na Tabela 8 é possível perceber a diminuição da resistência com a substituição da argila no concreto, iniciando com um fck de 34,52 MPa para o concreto de referência e chegando a 25,26 MPa no concreto com 100% de substituição de argila expandida. Fato que já era esperado, pois segundo Rossingnolo (2009) o agregado leve tem grande fragilidade comparado ao agregado convencional, sendo transferida ao concreto esta característica do agregado leve.

Outro fator a ser apreciado nos resultados da Tabela 8 é que todos os traços estudados alcançaram resistência superior aos 20 MPa na idade de 7 dias, podendo ser classificados como concretos estruturais. No entanto, a areia sendo substituída pela argila expandida provocou a diminuição da resistência à compressão nos concretos. Mesmo com essa diminuição, foi possível alcançar um concreto estrutural com a substituição de 100 % de argila.

Nota-se na tabela como o traço TR50 apresentou maior resistência que o traço TR75, comportamento não esperado, já que se espera que a medida que aumente a adição de argila expandida na massa do concreto a resistência à compressão diminua. Apesar desses resultados darem diferentes a análise estatística, apresentada a seguir no Tópico 4.4, mostrará que esses resultados não são significativamente diferentes. Por tanto conclui-se que a resistência à compressão dos corpos de prova com substituição de 50 e 75% não apresentaram diferenças significativas. A mesma conclusão foi obtida entre os traços TR75 e TR100. Apesar do traço TR100 ter tido maior conteúdo de argila que o TR75 a resistência à compressão foi maior que a deste último, mas a análise estatística constatou que esses valores não foram

significativamente diferentes. A análise estatística mostrou que a substituição de argila expandida pelo agregado miúdo no concreto influenciou na resistência à compressão aos 7 dias de idade. A resistência à compressão do traço de referência foi significativamente diferente que a dos traços TR25, TR75 e TR100, sendo a do traço de referência maior, fato que é esperado.

Como já dito, os traços foram analisados a idade de 7 e 28 dias, visto a necessidade de analisar o comportamento do material com a variação do tempo de cura. A Tabela 9 apresenta os resultados dos ensaios de compressão aos 28 dias.

Tabela 9 - Resistência à compressão aos 28 dias

Traço	CP	Rc (MPa)	Média (MPa)	Sd (MPa)	C.V (%)
TR0	1	32,30	32,47	0,16	0,48
	2	32,61			
	3	32,50			
TR25	1	36,78	36,56	0,56	1,52
	2	35,93			
	3	36,98			
TR50	1	30,00	30,46	2,63	8,65
	2	28,09			
	3	33,30			
TR75	1	23,40	23,41	0,32	1,35
	2	23,10			
	3	23,73			
TR100	1	21,79	22,26	0,65	2,90
	2	23,00			
	3	22,00			

Fonte: o autor

Analisando os resultados da Tabela 9, pode-se dizer que alguns traços como o TR0, TR50 e TR100 obtiveram uma resistência à compressão aos 28 dias inferior que aos 7 dias. Não é menos certo que o cimento ARI CPV utilizado na mistura aumenta a resistência na idade inicial e que não são esperados grandes ganhos de resistência com o tempo, no entanto, também não é esperado que ocorra sua diminuição, o que aconteceu com esses traços, mas estatisticamente estas diferenças não foram significativas.

Os concretos que diminuíram sua resistência com a idade podem ter como justificativa a dificuldade apresentada no processo de adensamento dos concretos com agregados leves. Os traços que apresentaram redução com a idade foram justamente os que apresentaram maiores índices de vazios o que pode ter influenciado mais alguns corpos de prova do que outros. No

entanto, Verzegnassi (2015) justifica que, nas primeiras idades do concreto, a resistência da argamassa e dos agregados está próxima, principalmente quando se utiliza cimentos de alta resistência inicial. Porém quando as resistências evoluem com a hidratação do cimento, a resistência do agregado se torna parte importante do sistema.

Para Rossignolo (2003), após os 28 dias de idade, os concretos leves apresentam baixa elevação dos valores de resistência à compressão, comparativamente aos concretos tradicionais. Esse efeito pode ser atribuído à baixa resistência mecânica dos agregados leves, principalmente limitante da resistência mecânica dos concretos leves.

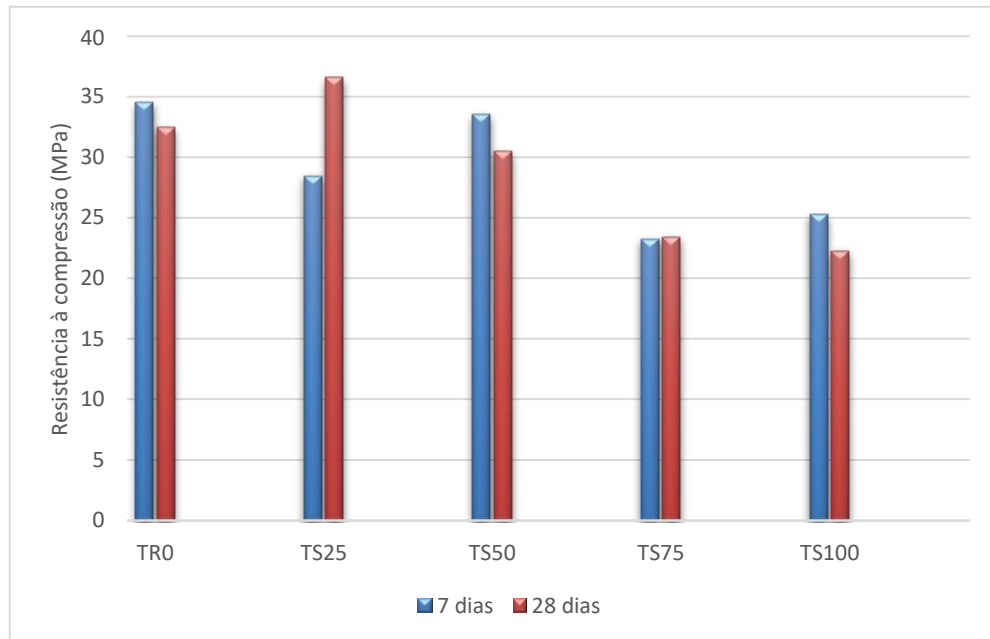
O maior ganho de resistência aos 28 dias foi do traço TR25, como ilustra o Gráfico 5, chegando a ultrapassar o TR0, traço de referência. O concreto com substituição de 25% de argila foi o que mais ganhou resistência com o tempo, chegando a 36,56 MPa. Este ganho foi comprovado estatisticamente como sendo significativamente diferente.

Os traços TR75 e TR100 não alcançaram o f_{ck} de projeto (25 MPa), mesmo chegando bem próximo com 23,41 e 22,26 MPa, respectivamente. Os demais supriram o esperado, ainda que alguns até com valores bem acima dos 25 MPa. No entanto, Scobar (2016) ressalta que, em sua maioria, concretos com agregados leves apresentam resistência menor que o concreto de referência, o que não inviabiliza a utilização do material.

Aprecia-se nos resultados da Tabela 9 que a partir do traço TR25 a resistência à compressão começa a diminuir com o aumento da proporção de argila expandida no concreto, fato que é esperado. Por tanto com a análise estatística mostrada a seguir, pode-se concluir que aos 28 dias de idade a argila influenciou na resistência à compressão do concreto, sendo essa resistência menor na medida que aumenta o teor de argila no concreto. Não obstante, apesar desse decréscimo da resistência foi possível alcançar uma resistência superior aos 20 MPa com a substituição de 75 e 100% de argila, podendo ser considerado como um concreto estrutural e além disso leve como já foi dito no tópico 4.3.1.

É importante constatar que, o concreto que obteve o maior slump, 200mm do traço TR25, foi o que obteve maior resistência aos 28 dias, mesmo o valor estando bem próximo ao traço de referência. Rossignolo (2009) elucida em seu livro que quando os agregados leves, no caso a argila, for utilizado saturado, a microestrutura da zona de transição será muito próxima à observada em concretos de referência.

Gráfico 5: Resistência à compressão aos 7 e 28 dias



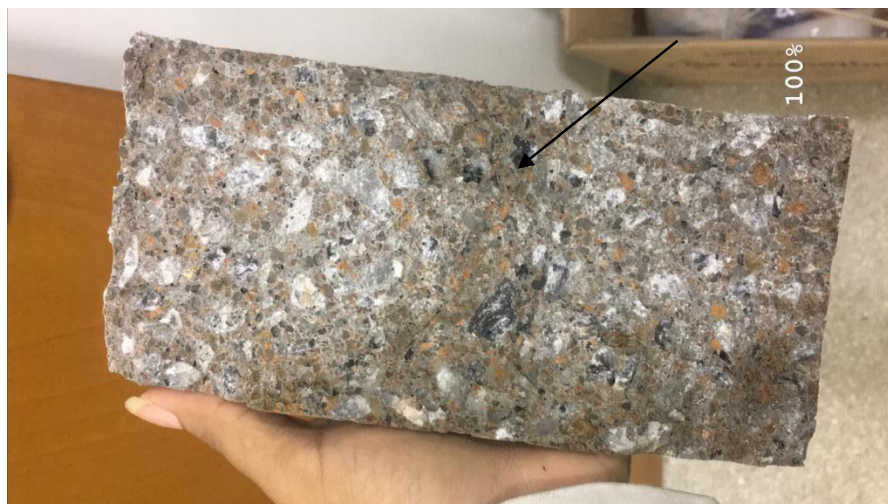
Fonte: o autor

Os concretos com agregados leves tendem a obter resistências menores comparado ao de referência, como já dito, no entanto, a união do agregado leve com o convencional pode trazer um ganho de resistência significativa para o concreto, justamente o que aconteceu com o TR25, com substituição de 25% de agregado convencional por argila expandida. É importante salientar que, todos esses dados foram analisados através de testes estatísticos e serão explanados no tópico seguinte.

A norma americana ACI 213-87 (1999) estabelece que a resistência mínima para concretos estruturais com agregados leves deve ser de 20,68 MPa, viabilizando assim, a utilização de qualquer um dos traços estudados no presente trabalho como concreto estrutural leve.

A Figura 26 mostra a distribuição da argila na massa do concreto.

Figura 26 – Distribuição da argila na massa do concreto TR100



Fonte: autor

4.3.4. Relação entre a resistência à compressão e a massa específica

Baseado nos ensaios realizados foi possível perceber a diminuição da resistência à compressão nos traços com a utilização da argila expandida, exceto no traço TR25. A Tabela 10 ilustra essa relação entre a resistência à compressão e a massa específica.

Tabela 10 - Fator de Eficiência (FE)

Traço	Massa Específica Seca Kg/m³	Resistência à Compressão (MPa)	Fator Eficiência (Mpa.dm³/kg)
TR0	2259,28	32,47	14,37
TR25	2169,63	36,56	16,85
TR50	2034,53	30,46	14,97
TR75	1844,84	23,41	12,69
TR100	1791,80	22,26	12,43

Fonte: o autor

O fator de eficiência (FE), relação entre a resistência à compressão e a massa específica, esclarece melhor esse efeito de diminuição da eficiência no concreto com o aumento dos percentuais de argila. O TR75, mesmo não sendo o traço com maior percentual de argila, obteve

o menor fator de eficiência. Enquanto o maior fator de eficiência foi do traço com menor percentual de argila, TS25, e não do traço referência.

Segundo Assunção (2016), a resistência à compressão e a massa específica seca são influenciadas pelo tipo, as dimensões e a granulometria do agregado leve. Esse efeito é maior no concreto leve estrutural que no concreto convencional. Isso se justifica porque estes parâmetros nos agregados leves são inversamente proporcionais às suas dimensões.

A norma americana ACI 213R-87 (1999) classifica os concretos leves estruturais como sendo aqueles com massa específica entre 1350 kg/m^3 e 1900 kg/m^3 e resistência à compressão mínima aos 28 dias de 20,68 MPa. As normas brasileiras apresentadas no presente estudo também consideram valores semelhantes, com massa específica seca menor que 2000 kg/m^3 e resistência à compressão maior que 20 MPa. Sendo assim, TS75 e TS100 podem ser considerados concretos leves estruturais, enquanto os demais apenas concretos estruturais.

4.3.5. Módulo de elasticidade

A determinação do módulo de deformação tangente inicial, ou apenas módulo de elasticidade, foi realizado conforme ABNT NBR 8522 (2008). A Tabela 11 apresenta os resultados para módulo de elasticidade dos traços analisados aos 28 dias.

Tabela 11 - Módulo de elasticidade aos 28 dias

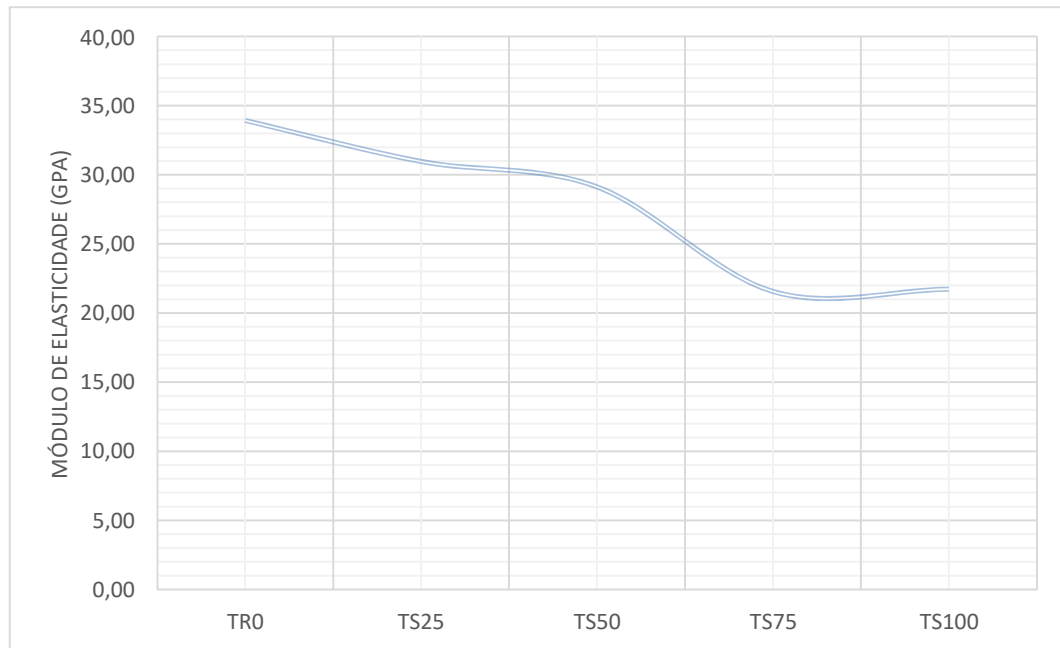
Traço	CP	Ec (GPa)	Média(MPa)	Sd (MPa)	C.V (%)
TR0	1	36,5	33,93	2,55	7,51
	2	31,4			
	3	33,9			
TR25	1	30,7	30,97	2,21	7,14
	2	28,9			
	3	33,3			
TR50	1	29,3	29,13	0,66	2,28
	2	28,4			
	3	29,7			
TR75	1	22,0	21,57	0,75	3,48
	2	22,0			
	3	20,7			
TR100	1	19,6	21,73	2,01	9,26
	2	23,6			
	3	22,0			

Fonte: o autor

Segundo Metha e Monteiro (2008) as características elásticas de um material são uma medida de sua rigidez. Apesar do concreto não possuir um comportamento linear, é necessário estimar o módulo de elasticidade para se determinar as tensões induzidas pelas deformações associadas aos efeitos ambientais.

Através da Tabela 11 é possível concluir que os valores de módulo de elasticidade diminuíram gradativamente com as substituições da argila. O traço convencional TR0 alcançou o maior módulo enquanto o TR100, traço com 100% de argila, o menor valor. No entanto, essa queda nos resultados era esperada, já que normalmente os módulos observados em outros trabalhos sempre diminuem comparados aos concretos de referência. O gráfico 6 ilustra melhor esse processo de “queda” nos resultados.

Gráfico 6 - Módulo de elasticidade



Fonte: o autor

De acordo com ACI 213R-87 (1999), o módulo de elasticidade do concreto depende da relação entre a quantidade de argamassa e agregado. O concreto convencional possui um maior módulo de elasticidade do que o concreto leve, pois o módulo do agregado convencional é maior que o do agregado leve. Geralmente, o módulo de elasticidade do concreto leve varia entre 50 e 75% do concreto convencional para concretos de mesma resistência à compressão.

Metha e Monteiro (2008) consideram ainda que, os agregados leves são altamente porosos e dependendo do grau de porosidade seu módulo de elasticidade pode ser tão baixo

quando 7 GPa. Geralmente, o módulo de deformação de um concreto leve varia de 14 a 21 GPa, o que foi possível observar nos traços TR75 e TR100 com maior substituição de argila.

Pelos dados apresentados é possível constatar que os módulos de elasticidade dos traços com argila expandida foram menores que o concreto de referência, e como já argumentado, muito se deve ao baixo módulo de elasticidade do agregado leve em relação ao natural.

Segundo Metha e Monteiro (2008), em materiais homogêneos existe uma relação direta entre massa específica e módulo de deformação. Em materiais heterogêneos, multifásicos como o concreto, a fração volumétrica, a massa específica e o módulo de deformação dos principais constituintes e as características da zona de transição é o que definem o seu comportamento elástico. Sendo a massa específica, inversamente proporcional à porosidade, obviamente que os fatores que afetam a porosidade do agregado, da matriz da pasta de cimento e da zona de transição serão importantes.

4.4. Análise Estatística

Todos os dados obtidos nos ensaios de caracterização do concreto passaram pelas análises estatísticas do Critério de Chauvenet, ANOVA e teste de Tukey.

4.4.1. Análises estatísticas dos resultados de resistência à compressão

A Tabela 12 e a Tabela 13 apresentam a análise realizada pelo Critério de Chauvenet dos dados de resistência à compressão na idade de 7 e 28 dias e suas respectivas situações referentes ao estado limite de aceitação para a amostra.

Tabela 12 - Critério de Chauvenet para resistência à compressão 7 dias

Traço	CP	Xi	X	(Xi-X)	Sd	R	Rc	Situação
TR0	1	34,81		0,29		0,26	1,38	OK
	2	33,3	34,52	1,22	1,11	1,10	1,38	OK
	3	35,46		0,94		0,85	1,38	OK
TR25	1	30,86		2,41		1,08	1,38	OK
	2	26,47	28,45	1,98	2,22	0,89	1,38	OK
	3	28,04		0,41		0,18	1,38	OK
TR50	1	32,89		0,65		0,87	1,38	OK
	2	33,36	33,54	0,18	0,75	0,24	1,38	OK
	3	34,36		0,82		1,09	1,38	OK
TR75	1	24,61		1,37		0,32	1,38	OK
	2	18,44	23,24	4,80	4,28	1,12	1,38	OK
	3	26,66		3,42		0,80	1,38	OK
TR100	1	26,66		1,4		1,04	1,38	OK
	2	23,98	25,26	1,28	1,34	0,95	1,38	OK
	3	25,15		0,11		0,08	1,38	OK

Fonte: o autor

Tabela 13 - Critério de Chauvenet para resistência à compressão 28 dias

Traço	CP	Xi	X	(Xi-X)	Sd	R	Rc	Situação
TR0	1	32,30		0,17		1,08	1,38	OK
	2	32,61	32,47	0,14	0,16	0,89	1,38	OK
	3	32,50		0,03		0,19	1,38	OK
TR25	1	36,78		0,22		0,39	1,38	OK
	2	35,93	36,56	0,63	0,56	1,14	1,38	OK
	3	36,98		0,42		0,75	1,38	OK
TR50	1	30,00		0,46		0,18	1,38	OK
	2	28,09	30,46	2,37	2,64	0,90	1,38	OK
	3	33,30		2,84		1,08	1,38	OK
TR75	1	23,40		0,01		0,03	1,38	OK
	2	23,10	23,41	0,31	0,32	0,98	1,38	OK
	3	23,73		0,32		1,02	1,38	OK
TR100	1	21,79		0,47		0,73	1,38	OK
	2	23,00	22,26	0,74	0,65	1,14	1,38	OK
	3	22,00		0,26		0,41	1,38	OK

Fonte: o autor

Neste caso, todos os dados obtidos foram mantidos, já que não houve nenhum valor que excedesse o Rc. Sendo assim, prosseguiu-se a análise realizando o teste de ANOVA.

A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos pelo teste da ANOVA para a amostra de resistências à compressão aos 7 dias.

Tabela 14 - Resumo de análise da ANOVA para resistência à compressão aos 7 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	295,69	4	73,92	13,76	0,00	3,48
Dentro dos grupos	53,70	10	5,37			
Total	349,39	14				

Fonte: o autor

Na Tabela 14 é possível concluir que a substituição do agregado miúdo por argila expandida no concreto apresenta diferença significativa na resistência à compressão aos 7 dias de idade. Isso porque F , o fator de análise, foi maior que o F crítico. Caso ocorresse o inverso, era aceita a hipótese nula, e não haveria significância entre os dados analisados.

Como na análise aos 7 dias foi rejeitada a hipótese nula teve-se a necessidade da realização do teste de Tukey, com o intuito de saber quais traços apresentam diferença significativa sobre os demais. Para tanto, foram realizadas as comparações entre todas as combinações de dois traços.

O teste de Tukey tem como base a DMS (diferença mínima significativa), parâmetro a ser analisado junto à diferença entre as médias afim de identificar a existência de significância ou não entre os objetos analisados. A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos para análise da resistência à compressão aos 7 dias.

Tabela 15 - Análise do teste de Tukey para resistência à compressão aos 7 dias

	$ X_a - X_b $	dms
TR0-TR25	6,07	4,82
TR0-TR50	0,99	4,82
TR0-TR75	11,29	4,82
TR0-TR100	9,26	4,82
TR25-TR50	5,08	4,82
TR25-TR75	5,22	4,82
TR25-TR100	3,19	4,82
TR50-TR75	10,30	4,82
TR50-TR100	8,27	4,82
TR75-TR100	2,03	4,82

Fonte: o autor

Na Tabela 15 é possível notar que as duplas onde existiram maior diferença no percentual de areia ou argila foram as que possuíram valores mais significativos.

No teste de Tukey, dms é o parâmetro a ser analisado comparado à diferença entre as médias dos traços. Basicamente, é feito a diferença entre a média da dupla e se o valor obtido $(Xa - Xb)$ for maior que o parâmetro tabelado dms , relação entre o número de médias e o número de graus de liberdade do resíduo, então esses valores diferem um do outro.

TR0 e TR75, por exemplo, foi a dupla que apresentou a diferença mais significativa entre as demais. Isso indica que a substituição de argila expandida no concreto influenciou significativamente à resistência à compressão aos 7 dias no traço TR75. Como é possível perceber pela Tabela 15 essas diferenças são maiores e mais significativas entre os traços que possuem mais e menos percentual de argila.

Como já apresentado anteriormente, os traços TR75 e TR100 foram os que obtiveram menores resistências comparados aos demais traços. Sendo que 25% e 50% obtiveram comportamentos bem semelhantes ao traço referência.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos na análise da ANOVA para a resistência à compressão aos 28 dias por intermédio da Tabela 16.

Tabela 16 - Resumo de análise da ANOVA para resistência à compressão aos 28 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	444,03	4	111,01	71,16	2,62E-07	3,48
Dentro dos grupos	15,60	10	1,56			
Total	459,63	14				

Fonte: o autor

Através do teste de ANOVA realizado foi possível concluir que a utilização da argila nos concretos observados também apresentou diferença significativa na resistência à compressão aos 28 dias. O valor de F foi maior que o F crítico e até maior que o F analisado aos 7 dias. Com isso foi necessário à realização do teste de Tukey, apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 - Análise do teste de Tukey para resistência à compressão aos 28 dias

	Xa - Xb	dms
TR0-TR25	4,09	2,6
TR0-TR50	2,01	2,6
TR0-TR75	9,06	2,6
TR0-TR100	10,21	2,6
TR25-TR50	6,10	2,6
TR25-TR75	13,15	2,6
TR25-TR100	14,30	2,6
TR50-TR75	7,05	2,6
TR50-TR100	8,20	2,6
TR75-TS100	1,15	2,6

Fonte: o autor

Os resultados obtidos no teste de Tukey aos 28 dias demonstram o que já foi observado na análise aos 7 dias. TR75 e TR100 foram os traços que mais obtiveram diferença significativa comparado aos traços com menor teor de argila, como TR0 e TR25. Isso significa que os traços TR0 e TR25 apresentaram comportamento bem semelhante na resistência à compressão tanto aos 7 quanto aos 28 dias, enquanto os traços com maiores substituições obtiveram valores mais distantes. Com isso é possível concluir que a substituição da argila no concreto influenciou consideravelmente na resistência à compressão.

A Tabela 18 discrimina os resultados do teste de ANOVA para os ensaios de 7 e 28 dias afim de identificar se houve diferença significativa na resistência à compressão no concreto com o aumento da idade.

Tabela 18 - Resumo de análise da ANOVA para resistência à compressão aos 7 e 28 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,45E-03	1	2,45E-03	7,96E-05	0,99	5,32
Dentro dos grupos	246,58	8	30,82			
Total	246,58	9				

Nota-se que a substituição do agregado miúdo por argila expandida não ocasionou diferença significativa na resistência à compressão do concreto com o aumento da idade. Visto que apresentou $F < F_{\text{crítico}}$, portanto, aceita-se a hipótese nula, ou seja, não houve alterações expressivas no comportamento do concreto. A argila expandida não influenciou na resistência à compressão de forma relevante com o aumento do tempo de cura, o que já foi comentado anteriormente.

Como foi considerado hipótese nula no teste de ANOVA, não foi necessário a realização do teste de Tukey.

4.4.2. Análises estatísticas dos resultados de módulo de elasticidade

A Tabela 19 ilustrada apresenta a análise do critério de Chauvenet para os resultados obtidos em laboratório do módulo de elasticidade dos concretos analisados.

Tabela 19 - Critério de Chauvenet para o módulo de elasticidade

Traço	CP	Xi	X	(Xi-X)	Sd	R	Rc	Situação
TR0	1	36,50		2,57		1,01	1,38	OK
	2	31,40	33,93	2,53	2,55	0,99	1,38	OK
	3	33,90		0,03		0,01	1,38	OK
TR25	1	30,70		0,27		0,12	1,38	OK
	2	28,90	30,97	2,07	2,21	0,93	1,38	OK
	3	33,30		2,33		1,05	1,38	OK
TR50	1	29,30		0,17		0,25	1,38	OK
	2	28,40	29,13	0,73	0,67	1,10	1,38	OK
	3	29,70		0,57		0,85	1,38	OK
TR75	1	22,00		0,43		0,58	1,38	OK
	2	22,00	21,57	0,43	0,75	0,58	1,38	OK
	3	20,70		0,87		1,15	1,38	OK
TR100	1	19,60		2,13		1,06	1,38	OK
	2	23,60	21,73	1,87	2,01	0,93	1,38	OK
	3	22,00		0,27		0,13	1,38	OK

Fonte: o autor

Pelo critério de Chauvenet todos os resultados apresentados em laboratório estão aptos a manter-se na amostra, visto que não apresentaram nenhum valor R excedente ao parâmetro Rc. Feito o teste de Chauvenet, todos os dados passaram pela análise de variância (ANOVA).

Nos resultados obtidos na Tabela 20 é possível observar que as substituições no agregado miúdo alteraram significativamente o módulo de elasticidade ($F > F_{\text{crítico}}$).

Tabela 20 - Resumo de análise da ANOVA para o módulo de elasticidade

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	373,58	4	93,40	28,38	1,95E-05	3,48
Dentro dos grupos	32,91	10	3,29			
Total	406,49	14				

Fonte: o autor

Como não se tratou de uma hipótese nula e os valores apresentaram significância, foi realizado o teste de Tukey, apresentado na Tabela 21 para melhor interpretação da interferência da substituição no comportamento dos traços.

Tabela 21 - Análise do teste de Tukey para o módulo de elasticidade

	Xa - Xb	dms
TR0-TR25	2,97	3,77
TR0-TR50	4,80	3,77
TR0-TR75	12,37	3,77
TR0-TR100	12,20	3,77
TR25-TR50	1,83	3,77
TR25-TR75	9,40	3,77
TR25-TR100	9,23	3,77
TR50-TR75	7,57	3,77
TR50-TR100	7,40	3,77
TR75-TR100	0,17	3,77

Fonte: o autor

Os resultados obtidos para o teste de Tukey demonstraram o que já havia sido observado no ensaio de resistência à compressão, mas que também acontece no módulo de elasticidade. Os traços que apresentam maiores proporções de argila foram os mais influenciados pela substituição do agregado no módulo de elasticidade. É possível dizer também que, fora o TR25 que demonstrou um comportamento bem semelhante ao TR0, todos os traços com argila expandida obtiveram interferência nos valores de módulo de elasticidade comparados ao traço referência.

De forma resumida, estatisticamente, os traços com maiores percentuais de substituição de argila apresentaram significativa influência no módulo de elasticidade pela substituição do agregado convencional.

4.4.3. Análises estatísticas dos resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica

Pelo Critério de Chauvenet foi realizado a análise de aceitação ou rejeição dos dados das amostras dos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica. A Tabela 22 apresenta os resultados do teste para as amostras do ensaio de absorção de água.

Tabela 22 - Critério de Chauvenet para a absorção de água

Traço	CP	Xi	X	(Xi-X)	Sd	R	Rc	Situação
TR0	1	5,72		0,14		0,56	1,38	OK
	2	5,72	5,87	0,15	0,26	0,60	1,38	OK
	3	6,16		0,29		1,15	1,38	OK
TR25	1	5,98		0,21		0,76	1,38	OK
	2	5,87	5,76	0,11	0,28	0,38	1,38	OK
	3	5,44		0,32		1,13	1,38	OK
TR50	1	6,43		0,07		1,06	1,38	OK
	2	6,56	6,50	0,06	0,07	0,92	1,38	OK
	3	6,51		0,01		0,14	1,38	OK
TR75	1	7,80		0,11		1,00	1,38	OK
	2	7,91	7,91	0,00	0,11	0,01	1,38	OK
	3	8,02		0,11		1,00	1,38	OK
TR100	1	8,25		0,07		0,70	1,38	OK
	2	8,23	8,18	0,04	0,10	0,45	1,38	OK
	3	8,07		0,11		1,15	1,38	OK

Fonte: o autor

Como é possível visualizar, todos os dados foram aptos a permanecer na amostra. Não houve nenhum valor de R que excedesse o parâmetro de Chauvenet Rc. O mesmo aconteceu para os outros dois ensaios descritos na Tabela 23 e na Tabela 24.

Tabela 23 - Critério de Chauvenet para índice de vazios

Traço	CP	Xi	X	(Xi-X)	Sd	R	Rc	Situação
TR0	1	12,96		0,29		0,58	1,38	OK
	2	12,97	13,25	0,29	0,50	0,57	1,38	OK
	3	13,83		0,58		1,15	1,38	OK
TR25	1	12,97		0,47		0,73	1,38	OK
	2	12,76	12,50	0,26	0,64	0,41	1,38	OK
	3	11,77		0,73		1,14	1,38	OK
TR50	1	13,14		0,08		1,00	1,38	OK
	2	13,31	13,22	0,08	0,08	1,00	1,38	OK
	3	13,22		0,00		0,01	1,38	OK
TR75	1	14,53		0,06		1,15	1,38	OK
	2	14,62	14,59	0,04	0,05	0,66	1,38	OK
	3	14,62		0,03		0,49	1,38	OK
TR100	1	14,71		0,05		0,45	1,38	OK
	2	14,74	14,66	0,08	0,11	0,70	1,38	OK
	3	14,54		0,13		1,15	1,38	OK

Fonte: o autor

Tabela 24 - Critério de Chauvenet para massa específica seca

Traço	CP	Xi	X	(Xi-X)	Sd	R	Rc	Situação
TR0	1	2,26		0,01		0,40	1,38	OK
	2	2,27	2,26	0,01	0,01	0,74	1,38	OK
	3	2,24		0,01		1,14	1,38	OK
TR25	1	2,17		0,00		0,02	1,38	OK
	2	2,18	2,17	0,01	0,01	0,99	1,38	OK
	3	2,16		0,01		1,01	1,38	OK
TR50	1	2,04		0,01		1,13	1,38	OK
	2	2,03	2,03	0,01	0,01	0,78	1,38	OK
	3	2,03		0,00		0,35	1,38	OK
TR75	1	1,86		0,02		0,88	1,38	OK
	2	1,85	1,84	0,00	0,02	0,20	1,38	OK
	3	1,82		0,02		1,09	1,38	OK
TR100	1	1,78		0,01		1,00	1,38	OK
	2	1,79	1,79	0,00	0,01	0,01	1,38	OK
	3	1,80		0,01		1,00	1,38	OK

Fonte: o autor

Com os dados aprovados, foi realizado o teste de variância ANOVA, como ilustrado na Tabela 25.

Tabela 25 - Resumo de análise da ANOVA para a absorção de água

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	15,52	4	3,88	112,82	2,82E-08	3,48
Dentro dos grupos	0,34	10	0,03			
Total	15,86	14				

Fonte: o autor

Através dos resultados estatísticos foi possível constatar que a absorção de água é influenciada de forma significativa no concreto pela argila expandida, assim como já desenvolvido durante o referencial teórico.

O parâmetro de análise F foi maior que o Fcrítico. Sendo assim, houve a necessidade de realizar o teste Tukey para identificar quais traços foram significativamente mais influenciados. Os resultados do teste de Tukey para o ensaio de absorção de água está apresentado na Tabela 26.

Tabela 26 - Análise do teste de Tukey para a absorção de água

	Xa - Xb	dms
TR0-TS25	0,11	0,36
TR0-TS50	0,63	0,36
TR0-TS75	2,04	0,36
TR0-TS100	2,32	0,36
TS25-TS50	0,74	0,36
TS25-TS75	2,15	0,36
TS25-TS100	2,42	0,36
TS50-TS75	1,41	0,36
TS50-TS100	1,68	0,36
TS75-TS100	0,27	0,36

Fonte: o autor

O teste de Tukey apontou que os traços mais afetados pela substituição do agregado miúdo foram o TR50, TR75 e TR100, por serem os traços que mais se distanciaram do TR0 no comportamento em relação ao teste de absorção. Já o TS25 se comportou bastante semelhante ao TR0.

Como já apresentado anteriormente, absorção de água, índice de vazios e massa específica são propriedades diretamente relacionadas. Para tanto, os resultados dos testes de ANOVA e Tukey nos dois outros ensaios apontaram o mesmo comportamento. Tanto massa específica quanto o índice de vazios foram influenciadas significativamente nos traços com maiores percentuais de argila.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um estudo sobre um concreto dosado com agregados convencionais, produzido com teores diferentes de argila expandida, que obteve características nas condições fresca e endurecida que diferenciam em relação ao concreto referência.

Quando avaliado na condição fresca, tanto o concreto de referência quanto os concretos com substituições proporcionais de argila, apresentaram uma trabalhabilidade bem comum aos concretos com utilização de aditivos plastificantes polifuncionais. No entanto, o TS100, traço com 100% de argila, obteve um abatimento bem abaixo do que comparado aos demais traços. Isso acontece porque segundo Mehta e Monteiro (2008), a utilização de agregados normais em consonância com agregados leves tende a aumentar a massa específica e diminuir a incorporação de ar. A consequência imediata pode ser a diminuição da trabalhabilidade da mistura. Como no traço TS100 só tinha argila, aumentou trabalhabilidade significativamente.

Nas análises na condição endurecida foi possível perceber que o comportamento dos traços, em praticamente todos os ensaios, obteve uma influência significativa da utilização da argila expandida na composição do concreto, comprovado pelo teste de ANOVA e Tukey.

A massa específica obteve uma “queda” considerável em seus valores com o aumento dos teores de argila, conseqüentemente, a absorção de água e o índice de vazios se comportaram de forma inversa. No caso da massa específica, os traços com mais da metade de argila expandida foram considerados concretos leves enquanto os outros, concretos convencionais. Já a absorção e índice de vazios se comportaram bem semelhante ao comum para concretos com agregados leves.

Na avaliação do módulo de elasticidade foi constatado o dito por Mehta e Monteiro (2008) quando citam 14 a 21 GPa, como sendo os valores de módulo de elasticidade mais comuns para concretos leves. Os traços TR75 e TR100, concretos leves, obtiveram valores bem semelhantes.

Nos ensaios de resistência à compressão foi possível observar que houve um ganho de resistência significativo para o concreto com 25% de argila de 7 para 28 dias. Sendo o concreto com maior valor de resistência à compressão, também foi o que apresentou melhor trabalhabilidade. Viabilizando a utilização dos agregados naturais em conjunto com os leves. Já que o traço TS25 não só obteve a melhor resistência como também se comportou de forma bem semelhante ao TR0 nos demais ensaios.

Com o ensaio de resistência à compressão e a análise estatística foi possível concluir que a argila influenciou na resistência à compressão do concreto, diminuindo o valor na medida

que aumenta a substituição de argila expandida pela areia no concreto. Mesmo assim, em todos os traços estudados foi possível alcançar um concreto que os enquadre como concretos estruturais inclusive nas primeiras idades do concreto. Além disso, com a substituição de 75 e 100% de argila não só foi possível alcançar um concreto estrutural senão que também leve, premissa importante que oferece este trabalho e que server como partida para futuras pesquisas.

Com a realização desta pesquisa e com os resultados obtidos é possível recomendar a substituição do agregado miúdo por argila expandida em concretos estruturais, em consonância com os agregados naturais, e também nos concretos leves estruturais. É importante que sejam realizadas mais pesquisas que possibilitem alcançar conclusões mais precisas.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se o estudo de uma dosagem específica para o concreto leve estrutural com 100% de argila expandida como substituição ao agregado miúdo. Como já bem dito aqui, este trabalho se limitou a fazer um comparativo com uma dosagem específica para um concreto convencional. É muito provável que analisado separadamente este concreto apresente um comportamento bem equiparável a um concreto convencional estrutural. A quantidade de cimento, a escolha de uma argila com uma camada diferente, são vários as possibilidades de melhorar o comportamento desse concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007

_____. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 6467**: Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. **NBR 7211**: Agregados para Concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 7222**: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

_____. **NBR 7680**: Concreto — Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR 8522**: Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

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

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. **NBR NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BAUER, Falcão L. A. **Materiais de Construção**: Novos Materiais para Construção Civil. 5. Ed. Universidade Federal de Uberlândia (UFU – MG): LTC, 2000. Vol. 1.

BOGGIO, Aldo J. **Estudo Comparativo de Métodos de Dosagem de Concretos de Cimento Portland**. 2000. 180 f. Dissertação (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

CALMON, João Luís; FILHO, Luís Carlos Pinto da Silva. **Efeito das Adições na Fluência do Concreto**: Uma Revisão Crítica. In: IBRACON, 2008, Natal. Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto. Natal: IBRACON, 2008.

CASTRO, Bruno C. **Uso de Resistividade Elétrica Em Investigação Geotécnica**: Ocaso De Palmas-TO. 2018. 271 f. Dissertação (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.

DE OLIVEIRA JÚNIOR, Glênio B. **Descrição Tátil-Visual dos Solos Superficiais Localizados na Porção Oeste do Plano Diretor de Palmas-TO, entre o Ribeirão Sussuapara e o Córrego da Prata**. 2018. 51 f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2018.

JÚNIOR, Enio R. Propriedades dos Materiais Constituintes do Concreto. **Revista Especialize On-line IPOG**. Goiânia, v. 01, n. 10, p. 15, dez. 2015.

MARTINS, Paulo Benjamim Moraes. **Influência da granulometria do agregado miúdo na trabalhabilidade do concreto**. 2008. 80f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2008.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto**: Microestruturas, Propriedades e Materiais. 3. Ed. São Paulo: IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, 2008.

MIRANDA, Christian Matias. **Estudo de tijolos de solo-cimento com substituição do solo por resíduos da construção civil na sua composição**. 2019. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2019.

MONTEIRO, Paulo José Melaragno. **Caracterização da Microestrutura do Concreto**: fases e interfaces: aspectos de durabilidade e de microfissuração. 1993. 138 f. Tese (Livre-docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

MORAVIA, Weber G. Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve. **Cerâmica**, Belo Horizonte, v. 52, n. 322, 2006. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/ce/v52n322/30586.pdf>>. Acesso em: 15 Fev. 2019.

PAULON, Valdimir Antônio. A Microestrutura do Concreto Convencional. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Ibracon, 2005. v. 1, p. 583-604.

PEREIRA, Murilo G. F. **Potencial de Utilização de Agregados Leves na Produção de Concretos Estruturais**. 2012. 70 f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) –

Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

PINHEIRO, Saulo T. **Cartografia Geotécnica para a Cidade de Palmas-TO: Descrição Táctil Visual do Solo da Região Sudeste, entre as Avenidas LO-03 E LO-27.** 2018. 93 f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2018.

ROSSIGNOLO, João A. **Concreto Leve Estrutural: Produção, propriedades, microestrutura e aplicações.** Edição. São Paulo: Pini, 2009. 144 p.

_____. **Concreto Leve de Alto Desempenho Modificado com SB Para Pré-Fabricados Esbeltos: Dosagem, produção, propriedades e microestrutura.** 2003. 211 f. Dissertação (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

_____. **Concreto Leve Estrutural: Influência da argila expandida na microestrutura da zona de transição pasta/agregado. Ambiente Construído,** Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 119-127, out./dez. 2009.

_____. **Avaliação da zona de transição interfacial pasta-agregado leve em concretos com sílica ativa e látex SBR. Revista Matéria,** Rio de Janeiro, v. 12, n. 3, p. 532-540, 2007.

SACHT, Helenice M. **Painés de Vedação de Concreto Moldados in loco: Avaliação de desempenho térmico e desenvolvimento de concretos.** 2008. 286 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SANTOS, L. F. **Cartografia Geotécnica do Município de Palmas/TO: Área a Oeste do meridiano 48° W.** Gr. 2000. 176 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília. 2000.

SILVA, Ingrid Ribeiro de Oliveira. **Estudo comparativo de argamassas de assentamento na alvenaria estrutural de blocos de concreto.** 2019. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2019.

SCHWANTES, Caetano G. G. **Concreto Estrutural Leve: Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade Usando Argila Expandida como Agregado Graúdo.** 2012. 74f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SCOBAR, Renan L. **Concreto Leve Estrutural: Substituição do agregado graúdo convencional por argila expandida.** 2016. 46 f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016.

VERZEGNASSI, Emerson. **Estudo das Propriedades no Estado Fresco e Endurecido do Concreto Leve Autoadensável.** 2015. 145 f. Dissertação (Mestrado) -Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2015.