



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIAS E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL

ÍTALO SOUZA GAIÃO

**CONCRETO ESTRUTURAL LEVE CONTENDO ARGILA EXPANDIDA E ADIÇÃO
MINERAL DE METACAULIM E RESÍDUO DE TIJOLOS CERÂMICOS**

CAMPINA GRANDE – PB

2019

ÍTALO SOUZA GAIÃO

**CONCRETO ESTRUTURAL LEVE CONTENDO ARGILA EXPANDIDA E ADIÇÃO
MINERAL DE METACALIM E RESÍDUO DE TIJOLOS CERÂMICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, para encerramento do componente curricular e conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Profa. Dra. Aline Figueirêdo Nóbrega de Azerêdo

CAMPINA GRANDE – PB

2019

É concedida à Universidade Federal de Campina Grande permissão para reproduzir cópias desta monografia e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho acadêmico pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Assinatura

ÍTALO SOUZA GAIÃO

**CONCRETO ESTRUTURAL LEVE CONTENDO ARGILA EXPANDIDA E ADIÇÃO
MINERAL DE METACULIM E RESÍDUO DE TIJOLOS CERÂMICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a
Universidade Federal de Campina Grande –
UFCG, para encerramento do componente
curricular e conclusão da graduação em
Engenharia Civil.

Aprovada em: ____ de _____ de ____.

BANCA EXAMINADORA

Nota: _____

**Titulação – Nome – Instituição
(Presidente – Orientador)**

Nota: _____

**Titulação – Nome – Instituição
(1º Examinador)**

Nota: _____

**Titulação – Nome – Instituição
(2º Examinador)**

Nota: _____

**Titulação – Nome – Instituição
(3º Examinador)**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu o dom da vida e me abençoa todos os dias com o seu amor infinito.

Aos meus pais, Elizanete e Wilmar, por todo o esforço que fizeram para tornar possível a realização deste sonho, pelo amor incondicional, exemplo e por todo o apoio que me deram.

Obrigado às minhas irmãs, Emily e Ana Cecília, pelo carinho, apoio e torcida.

À minha madrastra, Regilane, sempre presente com seu cuidado e acolhimento.

À minha companheira, Gabriela, pelo seu amor, força e suporte que me deu durante esta etapa. Obrigado por estar sempre ao meu lado e por suportar minha ausência em diversos momentos.

Aos meus avós, Manoel e Lourdes Gaião, Francisco Diniz (in memorian) e Geralda Ramalho (in memorian) por serem a base firme e concreta que me proporcionam chegar até aqui.

Aos meus sogros, Érico e Márcia, pelo acolhimento, apoio e por me receberem como um verdadeiro filho.

Aos meus cunhados, Tássio e Caio, pela presença, pelo apoio e pelas brincadeiras diárias.

Aos amigos, especialmente Ricardo, Fllávio e Victor, que não negaram força para ajudar e estiveram sempre na torcida desta conquista.

À professora Dr.^a Aline Figueirêdo Nóbrega de Azerêdo pela orientação necessária e por toda ajuda oferecida à realização deste trabalho, pela dedicação, ensinamentos e os bons conselhos. E ao seu pai, Nelson Alves da Nóbrega por todo o apoio prestado para a realização deste trabalho.

Agradeço à instituição UFCG, que me proporcionou a chance de expandir os meus horizontes e me formar em Engenharia Civil.

E à Colinas Engenharia LTDA, especificamente Ibysson e Tairone, pela oportunidade de crescimento e aprendizado concedida.

RESUMO

Nos dias atuais busca-se cada vez mais aplicar o conceito de desenvolvimento sustentável em todos os ramos de indústrias. Na construção civil isto não é diferente. A busca por minimização dos custos de execução de uma obra está associada diretamente ao consumo de concreto, de aço e às dimensões das peças utilizadas. Além disso, o aproveitamento de resíduos gerados na própria indústria da construção civil vem chamando cada vez mais a atenção dos pesquisadores. O concreto estrutural leve com utilização de adição mineral surge como um material inovador e alternativo ao concreto convencional. Com base nisso, o presente trabalho estudou concretos estruturais leves contendo argilas expandidas de duas granulometrias distintas conjuntamente com o uso de metacaulim e resíduo de tijolos cerâmicos, substituindo parcialmente o cimento Portland. Os materiais foram caracterizados quanto às propriedades físicas e mineralógicas e se estudou misturas de concreto substituindo o cimento Portland por 10% de adição mineral. Analisou-se a influência das adições minerais em propriedades como resistência à compressão, massa específica fresca, massa específica endurecida, módulo de deformação, absorção de água e índice de vazios. Os limites de abatimento de tronco de cone e o fator água/cimento foram fixados para todos os traços estudados. Verificou-se que a adição de 10% do metacaulim se mostrou benéfica no ganho de resistência e na manutenção do índice de vazios e absorção de água. No entanto, a adição de resíduo de tijolo cerâmico não apresentou melhoras significativas nas propriedades do concreto.

Palavras-chave: concreto estrutural leve, metacaulim, resíduo de tijolos cerâmicos, argila expandida.

ABSTRACT

Nowadays, we seek to apply the concept of sustainable development in all branches of industry. In construction this is no different. The search for minimization of the execution costs of a work is directly associated with the consumption of concrete, steel and the dimensions of the parts used. In addition, the use of waste generated in the construction industry itself has increasingly attracted the attention of researchers. Lightweight structural concrete with use of mineral addition emerges as an innovative and alternative material to conventional concrete. Based on this, the present work studied light structural concrete containing expanded clays of two distinct granulometries together with the use of metakaolin and residue of ceramic bricks, partially replacing the Portland cement. The materials were characterized for physical and mineralogical properties and if concrete mixtures were studied replacing the Portland cement with 10% mineral addition. The influence of the mineral additions on properties such as compressive strength, fresh specific mass, specific hardened mass, modulus of deformation, water absorption and voids index were analyzed. Cone trunk abatement limits and water / cement factor were set for all traits studied. It was verified that the addition of 10% of the metacaulim proved to be beneficial in the resistance gain and the maintenance of the void index and water absorption. However, the addition of ceramic brick residue did not show significant improvements in concrete properties.

Key words: light structural concrete, metakaolin, ceramic brick residue, expanded clay.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Micrografia (MEV) ilustrando a entrada de pasta de cimento nos poros	24
Figura 2 – Classificação dos concretos leves e suas massas específica seca	25
Figura 3 – Efeito da frequência de vibração durante o adensamento dos agregados leves.	26
Figura 4 – Fluxograma do procedimento experimental.....	30
Figura 5 – Cimento CP-V ARI MAX utilizado no estudo	31
Figura 6 – Gráfico de desempenho do cimento CP-V ARI MAX.....	32
Figura 7 – Processo de moagem do RTCM.....	33
Figura 8 – Curva granulométrica do RTCM e MC	34
Figura 9 – Histograma do RTCM e MC.....	34
Figura 10 – Difração de raios-x do RTCM.....	37
Figura 11 – Difração de raios-x do MC.....	37
Figura 12 – Agregados leves do tipo argila expandida utilizado no estudo	38
Figura 13 – Composição granulométrica da AE-2215 e AE-3222.....	42
Figura 14 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo	46
Figura 15 – Curva de inchamento do agregado miúdo.....	47
Figura 16 – Traço realizado a partir da dosagem para concreto convencional	49
Figura 17 – Pesagem dos materiais em balança digital	52
Figura 18 – Pesagem da areia em balança mecânica.....	52
Figura 19 – Separação dos materiais utilizados nas amostras	53
Figura 20 – Ensaio de abatimento de tronco de cone da referência AE-3222.....	54
Figura 21 – Corpos de prova em cura.....	55
Figura 22 – Prensa hidráulica de compressão	56
Figura 23 – Processo de retificação dos corpos de prova.....	57
Figura 24 – Corpo de prova após rompimento	57
Figura 25 – Valores de abatimento obtido para as amostras	58
Figura 26 – Massas específicas no estado fresco	59
Figura 27 – Absorção de água das amostras.....	60
Figura 28 – Índice de vazios das amostras	60
Figura 29 – Massa específica real endurecida das amostras	62
Figura 30 – Resultados de resistência à compressão.....	63
Figura 31 – Fator de eficiência para as amostras.....	64
Figura 32 – Módulo de deformação das amostras.....	65

Figura 33 – Deformação das amostras com aplicação das tensões. 75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de referência da massa específica.....	20
Tabela 2 – Valores normativos referentes à resistência à compressão e	20
Tabela 3 – Características físicas das adições minerais	33
Tabela 4 – Fluorescência de raios-x do RTCM e do MC	35
Tabela 5 – Requisitos químicos para os materiais pozolânicos.....	35
Tabela 6 – Requisitos físicos para os materiais pozolânicos.....	36
Tabela 7 – Resultados para análise dos requisitos físicos das adições minerais	36
Tabela 8 – Massa específica dos agregados leves	39
Tabela 9 – Módulo de deformação dos agregados leves	39
Tabela 10 – Análise química dos agregados leves	40
Tabela 11 – Limites da composição granulométrica do agregado graúdo	41
Tabela 12 – Valores obtidos para granulometria, módulo de finura	42
Tabela 13 – Limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo	44
Tabela 14 – Valores obtidos para granulometria, módulo de finura	45
Tabela 15 – Classificação da areia quanto ao módulo de finura	46
Tabela 16 – Traço, em volume, determinado pelo método da ABCP	48
Tabela 17 – Limite de abatimento no slump-test	50
Tabela 18 – Consumo de materiais para os traços.....	51
Tabela 19 – Tolerância de tempo para ensaio de compressão em.....	56
Tabela 20 – Resumo com resultados obtidos	74

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ACI – American Concrete Institute

AE – Argila Expandida

ARI – Alta Resistência Inicial

ASTM - American Society for Testing and Materials

CEB-FIP – Comité Euro-International Du Béton and Fédération Internationale De La Précontrainte

CP – Cimento Portland

DRX – Difração de Raios-X

EUROCODE - Código Europeu

FE – Fator de Eficiência

FIP - Fédération Internationale De La Précontrainte

LABEME – Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas

MC – Metacaulim

MF – Módulo de Finura

NBR - Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

NS – Norwegian Council for Building Standartization

PCE – Polímeros policarboxilatos

RILEM – International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Sctructures

RTCM – Resíduo de Tijolos Cerâmicos Moído

LISTA DE SÍMBOLOS

f_c – Resistência à compressão dos corpos de prova

E_c – Módulo de deformação

$D_{máz}$ – Diâmetro máximo característico

kg/m³ - Quilograma por metro cúbico

kg/dm³ - Quilograma por decímetro cúbico

g/cm³ - Grama por centímetro quadrado

cm²/g – Centímetro quadrado por grama

V_h/V_s – Volume úmido sobre volume seco

h - Umidade

MPa.dm³/kg – Megapascal vezes decímetro cúbico por quilograma

MPa – Megapascal

GPa – Gigapascal

cm - Centímetro

mm – Milímetro

μm – Micrômetro

kg - Quilograma

γ – Massa específica

α – Teor de Argamassa

σ – Tensão

$F_{a/c}$ – Fator água cimento

C₂S – Silicato dicálcico

SiO₂ – Sílica

Al₂O₃ – Alumina

Fe_2O_3 – Óxido de ferro

CaO – Óxido de cálcio

MgO – Óxido de magnésio

SO_3 – Trióxido de enxofre

Na_2O – Óxido de sódio

K_2O – Óxido de potássio

TiO_2 – Dióxido de titânio

Hz – Hertz

° - Graus

°C – Graus Celsius

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVOS	17
1.1.1. Objetivo Geral	17
1.1.2. Objetivos Específicos	17
1.2. JUSTIFICATIVA	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1. PROPRIEDADES DO CONCRETO LEVE	19
2.2. INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS CONSTITUINTES NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO	21
2.2.1. Cimento	21
2.2.2. Agregado Miúdo.....	22
2.2.3. Agregado Graúdo	22
2.2.4. Aditivos	26
2.3. USO DE ADIÇÃO MINERAL NOS CONCRETOS	26
2.3.1. Metacaulim	27
2.3.2. Resíduo de Tijolos Cerâmicos	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	31
3.1.1. Cimento	31
3.1.2. Água	32
3.1.3. Adição mineral	32
3.1.4. Agregados leves.....	38
3.1.5. Agregado miúdo	43
3.1.6. Aditivos	47
3.2. MÉTODOS	48
3.2.1. Dosagem do Concreto	48
3.2.2. Ensaio do Concreto no Estado Fresco e Endurecido	53
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1. ANÁLISE DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	58
4.2. ANÁLISE DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	59
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
REFERÊNCIAS	68
APÊNDICE	74

1. INTRODUÇÃO

Após a água, o concreto é o material que mais se consome no mundo. Suas características de durabilidade, resistência e plasticidade tornam o concreto a melhor solução quando o quesito analisado é a vida útil da construção e capacidade de criação de elementos dos mais diversos formatos. Sua versatilidade não é alcançada por outros materiais. (ZAMARION, 2009). O concreto é composto convencionalmente por cimento, agregados miúdos e graúdos (areia e brita, respectivamente) e água, podendo também conter outros materiais que agregam melhorias em suas características mecânicas, chamados de aditivos e adições. Por ser um material maleável, capaz de adquirir grande resistência e apropriado para atender situações diversas nas construções, facilita o aumento em seu uso, favorecendo o mesmo a ser o mais importante das construções (LIMA, 2014).

É estimado que, anualmente, são consumidos 11 bilhões de toneladas de concreto, onde segundo a Iberoamericana de Hormigón Premesclado (FIHP), dá um consumo de 1,9 toneladas de concreto por habitante por ano (PEDROSO, 2009).

SÜSSEKIND (1980) destaca as principais vantagens associadas ao concreto ao citar: economia, basicamente a mais importante dentre todas; adaptação a qualquer tipo de forma e facilidade de execução, permitindo total liberdade à concepção arquitetônica; excelente solução para se obter de modo direto, e sem necessidade de posteriores ligações, uma estrutura monolítica, hiperestática, apresentando, por esta razão, maiores reservas de segurança; manutenção e conservação praticamente nulas, em associação à grande durabilidade; e resistência a efeitos térmicos, atmosféricos e a desgastes mecânicos.

Assim, por tratar-se de um material com grande aplicabilidade, principalmente no Brasil, diversos estudos são realizados anualmente a fim de se obter melhorias em suas propriedades físicas e mecânicas, além de tentar trazer a diminuição dos custos de preparo.

Por outro lado, obras em que são utilizadas estruturas de concreto, o peso próprio deste material representa grande parcela da carga final atuante, sendo assim, a utilização de concretos com redução da massa específica se torna um grande interesse para aqueles que os utilizam. Apresenta-se então, como boa alternativa para esta diminuição, o concreto estrutural leve, que possui peso específico menor que o concreto convencional.

Com o crescimento da industrialização no mundo, conseqüentemente também se tem tido um aumento na geração de resíduos por parte das indústrias. As indústrias da construção civil também se encontram nesse cenário, cujo a geração de resíduos de construção aumenta quando se tem mais obras de engenharia sendo realizadas. Pode-se então destacar resíduos advindos dos materiais utilizados em obras, tais como: tijolos, concretos, argamassas, cerâmicas e sobras de outros materiais. Além disso, o ramo da construção também tem se mostrado com um grande potencial para absorver os resíduos, sejam eles gerados pelas próprias construções ou vindos de indústrias dos mais diversos tipos. Esses resíduos são, principalmente, bem aproveitados na composição de argamassas e concretos. Assim, o uso desses resíduos na produção de concretos e argamassas visa contribuir para um maior desenvolvimento sustentável e um maior aproveitamento desses materiais.

Vários estudos já têm mostrado que diversos resíduos industriais têm potencial para serem usados nas argamassas e concretos, principalmente como adições pozolânicas, melhorando inclusive as propriedades finais do produto. Segundo Borja (2011) a substituição parcial do cimento através da inclusão de adições minerais, que podem ser oriundas de subprodutos industriais ou agrícolas, além de não comprometer seu desempenho também favorece na redução do custo final, podendo ainda apresentar atividade pozolânica, além de uma destinação nobre deste resíduo, contribuindo, assim, na redução do passivo ambiental. Na Paraíba merece destaque os resíduos cerâmicos gerados pelas fábricas de tijolos, conhecidas também como olarias. Estudos têm mostrado que esse material se apresenta como uma ótima adição pozolânica para uso em concretos e argamassas.

Dessa forma, diante da evidente melhoria em se trabalhar conjuntamente com utilização de agregados leves unidos às adições minerais em substituição parcial do cimento, o presente trabalho tem como objetivo estudar concretos estruturais leves, através do uso de argila expandida, associado à adição mineral de metacaulim ou resíduos de tijolos cerâmicos.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Estudar as propriedades de um concreto estrutural leve contendo argila expandida e adição mineral de metacaulim ou resíduo de tijolos cerâmicos.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Estudar misturas de concreto contendo argila expandida e com 10% de adição mineral substituindo parcialmente o cimento Portland;
- Analisar propriedades do concreto nos seguintes estados:
 - a) Fresco: abatimento de tronco de cone e massa específica; e
 - b) Endurecido: absorção de água, índice de vazios, massa específica resistência à compressão, fator de eficiência e módulo de deformação.

1.2. JUSTIFICATIVA

A redução das cargas atuantes sobre os elementos de uma construção é de fundamental importância para minimizar os custos no orçamento final. Menor carga atuante sobre a estrutura representa elementos com dimensões inferiores que serão capazes de suportar a estrutura, que, por sua vez, significa menor volume de concreto e menor quantidade de armadura utilizada.

O desenvolvimento sustentável também representa uma tendência mundial, para todos os ramos da sociedade. Assim, o aproveitamento de resíduos na construção se mostra como uma solução que pode representar um menor impacto tanto para o ecossistema quanto para a sociedade em si, colaborando na preservação do meio ambiente.

Com o objetivo de atrair atenção para o tema, o trabalho apontará os benefícios e resultados da utilização de um agregado leve, ao mesmo tempo em que sugere um desenvolvimento sustentável com o uso de adição mineral advinda de resíduos de tijolos cerâmicos em comparação ao uso do metacaulim.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nos dias atuais, percebe-se o concreto como sendo um dos materiais mais utilizados para execução das mais diversas obras e dos mais variados portes, moldados in loco ou não. Este elemento estrutural tão utilizado é constituído basicamente pela mistura entre cimento, água, agregado graúdo e agregado miúdo, que, por sua vez, ao ser utilizado juntamente ao aço, acaba por tornar-se o que conhecemos como concreto armado.

Neville (1997) aborda uma simples definição para o material, ao afirmar que, em seu sentido mais geral, o concreto é qualquer produto ou massa produzido a partir de um meio cimentante, através da reação entre um cimento hidráulico e água. No entanto, nos dias atuais, mesmo esta definição tem uma abrangência muito grande. Ele afirma que, o concreto pode ser produzido com vários tipos de cimento e também conter pozolanas, como cinza volante, escória de alto forno, sílica ativa, adições minerais, agregados de concreto reciclado, aditivos, polímeros e fibras.

Desta forma, pode-se observar que, com o passar o tempo e com a utilização de aditivos e adições para modificação das propriedades físicas do concreto, foi possível se obter um material cada vez mais diversificado, de modo que, atualmente, é possível conseguir uma diversidade de tipos de concretos específicos para cada necessidade de construção. E dentre esses diversos tipos, um que tem ganhado cada vez mais destaque é concreto leve.

Silva (2008) destaca que, uma das variáveis mais importantes para a concepção estrutural de um edifício é o seu peso próprio, pois uma redução dessa característica pode resultar em economia de armaduras, diminuição das seções transversais dos elementos estruturais e economia nas fundações. A massa específica é um condicionante do fator de eficiência, definido como a relação entre a resistência e a massa específica do concreto (HOLM; BREMNER, 1994). A utilização de agregados leves é uma das formas de diminuir esta propriedade. Em elementos pré-fabricados, por exemplo, a redução do peso próprio do concreto estrutural é de extrema importância em seu transporte, uma vez que, quanto mais leve for a estrutura mais peças poderão ser transportadas em um mesmo caminhão.

O concreto estrutural leve, como o próprio nome sugere, caracteriza-se por ser um concreto de menor peso, ou ainda, pela sua leveza advinda da redução de sua massa específica, quando comparado ao concreto convencional. Esta diminuição, em sua massa específica, ocorre com a substituição em diferentes porcentagens, ou em sua totalidade, da

brita, material comumente utilizado como agregado graúdo, por agregados graúdos mais leves, a exemplo da argila expandida.

Rossignolo (2009) destaca que, o concreto leve diferencia-se do concreto tradicional não apenas pela redução da massa específica e suas alterações nas propriedades térmicas. Ele afirma que a utilização do agregado graúdo leve ocasiona mudanças bastantes relevantes em outras propriedades que também são importantes, sendo elas: trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de deformação, retração e fluência.

Neste contexto, é importante reconhecer que o concreto leve estrutural representa uma ótima alternativa para a construção civil, isto porque, dentre os benefícios promovidos pela redução da massa específica do concreto, têm-se: redução da carga atuante na estrutura da edificação; por consequência, redução da quantidade e do custo com emprego de armadura na estrutura; redução na dimensão dos elementos de fundações; economia em fôrmas; possibilidade de construção sobre solos com menores capacidades de carga; e, para elementos pré-fabricados, diminuição dos custos com transporte e montagem, além de poder melhorar as propriedades acústicas e térmicas das edificações. Estas últimas propriedades merecem destaque, visto que, com a norma de desempenho das edificações NBR 15575 (ABNT, 2003), em vigor desde 2013, requisitos mínimos quanto à essas características têm sido cada vez mais exigidas nas edificações.

2.1. PROPRIEDADES DO CONCRETO LEVE

Segundo Rossignolo (2009), para caracterizar determinado concreto como concreto leve estrutural este deve apresentar massa específica seca inferior de 2000 kg/m^3 . A Tabela 1 apresenta os valores limites para massa específica citados em alguns documentos normativos ou de referência para os concretos leves.

Tabela 1 – Dados de referência da massa específica dos concretos estruturais leves

Referência	Massa específica (kg/m ³)
NM 35 (1995)	1680 < γ < 1840
ACI 213R-87 (2003)	1120 < γ < 1920
EUROCODE 2 (2007)	900 < γ < 2000
NS 3473 E (1998)	1200 < γ < 2200
CEB-FIP (1977)	γ < 2000
RILEM (1975)	γ < 2000

Fonte: ROSSIGNOLO (2009)

A norma brasileira NBR NM 35 (ABNT, 1995) especifica que, os agregados miúdos leves, quando empregados na produção de concretos leves, não devem apresentar massa unitária no estado solto acima de 1120 kg/m³, e 880 kg/m³ para os agregados graúdos, estabelecendo uma relação entre a resistência à compressão mínima e massa específica máxima para concretos estruturais leves, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores normativos referentes à resistência à compressão e massa específica aparente para concretos estruturais leves

Resistência à compressão, aos 28 dias (MPa)	Massa específica aparente (kg/m ³)
≥ 28	≤ 1840
≥ 21	≤ 1760
≥ 17	≤ 1680

Fonte: NM 35 (ABNT 1995).

O teor de argamassa também se altera com a utilização de agregados leves. Segundo Giacomini (2005) os concretos estruturais leves requerem um maior teor de argamassa do que concretos convencionais, pois necessitam melhorar sua trabalhabilidade, isto ocorre devido à menor massa específica dos agregados. O autor reitera que em concretos estruturais leves o teor de argamassa seca corresponde, no mínimo, a 65%.

Utiliza-se também, para classificação dos concretos estruturais leves o Fator de Eficiência (FE), parâmetro que relaciona o valor de resistência à compressão (f_c) e de massa específica endurecida (γ), apresentada na Equação (1).

$$\text{Fator de eficiência} = \frac{f_c}{\gamma} \quad [\text{MPa} \cdot \text{dm}^3/\text{kg}] \quad (1)$$

Para determinação do módulo de deformação Rossignolo (2005) propõe a Equação (2) para determinação desta propriedade, específica para concretos contendo argila expandida brasileira, sendo (f_c) a resistência à compressão e (γ) massa específica endurecida

$$E_c = 0,049 * \gamma^{1,5} * f_c^{0,5} \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

Rossignolo (2009) afirma que, para concretos leves o valor do módulo de deformação varia entre 50% e 80% do valor do módulo de deformação de concretos com massa específica normal, para resistência à compressão entre 20 MPa e 50 MPa.

2.2. INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS CONSTITUINTES NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

2.2.1. Cimento

Utilizado com finalidade de unir os componentes do traço, o cimento Portland possui a função de aglomerante hidráulico, sua obtenção é feita através da moagem do clínquer, que são nódulos de 5 a 25mm de diâmetro compostos essencialmente de silicatos de cálcio e alumínio aquecidos a altas temperaturas (MEHTA & MONTEIRO, 2008). Em contato com água, o cimento iniciará uma reação físico-química resultando uma pasta homogênea, capaz de endurecer e conservar sua estrutura. Na forma de concreto, torna-se uma pedra artificial, que pode ganhar formas e volumes, de acordo com as necessidades de cada obra.

Dentre as principais características do cimento, três merecem destaque: sua finura, sua composição química e sua compatibilidade com os aditivos.

Quanto à finura, sabe-se que o tamanho de suas partículas influi de forma significativa na velocidade da reação de hidratação. Quanto maior for a superfície específica das partículas, mais rapidamente ocorre o processo de hidratação do cimento, aumentando-se sua resistência à compressão, principalmente nas primeiras idades. Isso acontece porque, aumenta-se a superfície de contato entre as partículas de cimento e a água, com conseqüente aceleração do processo de endurecimento da pasta de cimento. Entretanto, sabe-se também que se o cimento

for muito fino, o consumo de água aumenta, interferindo nas propriedades de resistência mecânica.

Em relação a composição química, durante a hidratação há liberação de grande quantidade de calor, atingindo diretamente o comportamento de pega e endurecimento do concreto. Isso devido à reação com a água, os componentes do cimento tentam atingir estados estáveis de baixa energia, e para isso, liberam energia na forma de calor. Portanto, o calor de hidratação do cimento depende de sua composição química. Cimentos com elevados teores de C_2S , por exemplo, apresentam baixa liberação de calor e conseqüente endurecimento lento (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

No que diz respeito à compatibilidade entre o cimento e aditivo, é importante considerar-se a compatibilidade química, que é influenciada pelas composições químicas do cimento e do aditivo. Além disso, sabe-se que quanto mais fino for o cimento, maior será a quantidade de superplastificante necessária para obter-se uma mesma trabalhabilidade, uma vez que a finura do cimento influencia diretamente na eficiência do aditivo (AITCIN, 1998).

2.2.2. Agregado Miúdo

Segundo a norma NBR 7211 (2005), 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 μ m, em ensaio realizado de acordo com a NBR NM 248 (2003), com peneiras definidas pela norma NBR NM ISO 3310-1 (2010).

Uma vez fixado o teor de água e outras proporções da mistura, determina-se a trabalhabilidade pelo tamanho máximo do agregado, sua granulometria, forma e textura. Quanto maior a relação água/cimento, mais fina será a granulometria necessária para uma maior trabalhabilidade. O tamanho das partículas dos agregados, em especial, dos agregados miúdos, influenciam de forma efetiva na obtenção de uma determinada consistência do concreto (NEVILLE, 1997).

2.2.3. Agregado Graúdo

A norma NBR 7211 (2005) define, também, agregado graúdo como sendo os agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos

na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1.

A principal aplicação dos agregados, seja a areia ou a pedra, na fabricação do concreto é de natureza econômica, tendo em vista tratarem-se materiais de baixo custo unitário. No entanto, os agregados possibilitam que algumas propriedades da rocha artificial a ser formada apresentem melhor performance, tais como: redução da retração da pasta de cimento, aumento da resistência ao desgaste, melhor trabalhabilidade e aumento da resistência ao fogo.

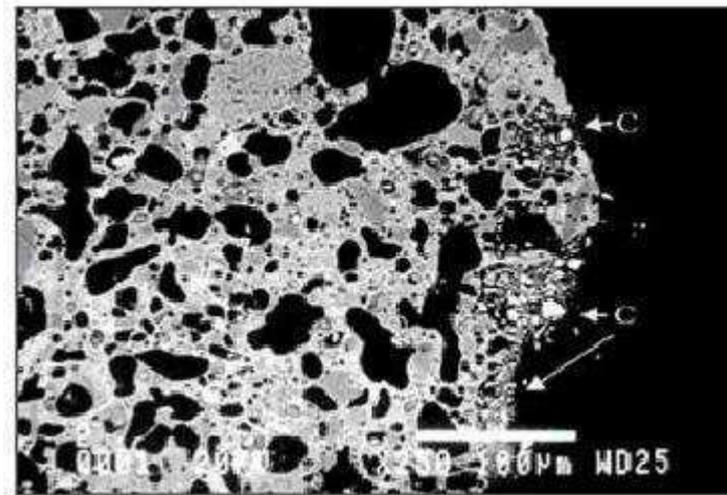
Os agregados graúdos leves podem ser classificados em naturais, obtidos por meio da extração direta em jazidas e classificadas quanto à sua granulometria, tendo pouca aplicação em concretos estruturais em função da variabilidade de suas propriedades e disponibilidades; e, artificiais, obtidos em processos industriais e classificados com base na matéria-prima e processo de fabricação (MAYCÁ, 2008).

A substituição do agregado graúdo convencional pelo agregado leve deve levar em conta características importantes do material que afetará diretamente o comportamento final do concreto. Deve-se, então, dar a devida atenção às características como: forma, textura superficial, estrutura interna, resistência mecânica, porosidade e absorção de água.

Isto porque, segundo Rossignolo (2009), a forma e a textura superficial dos agregados leves influenciam em propriedades importantes do concreto, como, por exemplo, a resistência mecânica. Estas duas características dos agregados leves dependerão, sobretudo, do processo pelo qual o mesmo foi fabricado. Assim, aqueles que passam pelo processo de fabricação por sinterização possuem altas taxas de absorção de água e uma maior necessidade de adição de água na mistura para obtenção da trabalhabilidade desejada, isto porque, os agregados obtidos através deste processo possuem elevada rugosidade, formas angulares e uma superfície porosa ocasionando boa aderência à pasta de cimento.

A Figura 1 representa o processo de entrada do cimento nos poros externos dos agregados leves obtidos por sinterização. Por outro lado, os agregados leves que passam pelo processo de fabricação em fornos rotativos, caso das argilas expandidas, geralmente apresentam forma esférica e uma fina camada externa com baixa porosidade. Dessa forma, através desse processo, obtêm-se agregados leves que possibilitam melhor trabalhabilidade a uma baixa relação água/cimento. Contudo, há uma maior facilidade de segregação devido à sua forma esférica.

Figura 1 – Micrografia (MEV) ilustrando a entrada de pasta de cimento nos poros externos de agregados leves produzidos por sinterização



Fonte: Zhang; Gjrv (1992)

Tratando-se da estrutura interna, têm-se que, agregados produzidos a partir da mesma matéria prima e pelo mesmo processo de fabricação, agregados com estrutura mais porosa são menos resistentes que os agregados com estrutura pouco porosa, bem como, a distribuição desses poros em seu interior, sendo preferível uma maior uniformidade de pequenos poros em vez de poucos poros de grande diâmetro. (ROSSIGNOLO, 2009)

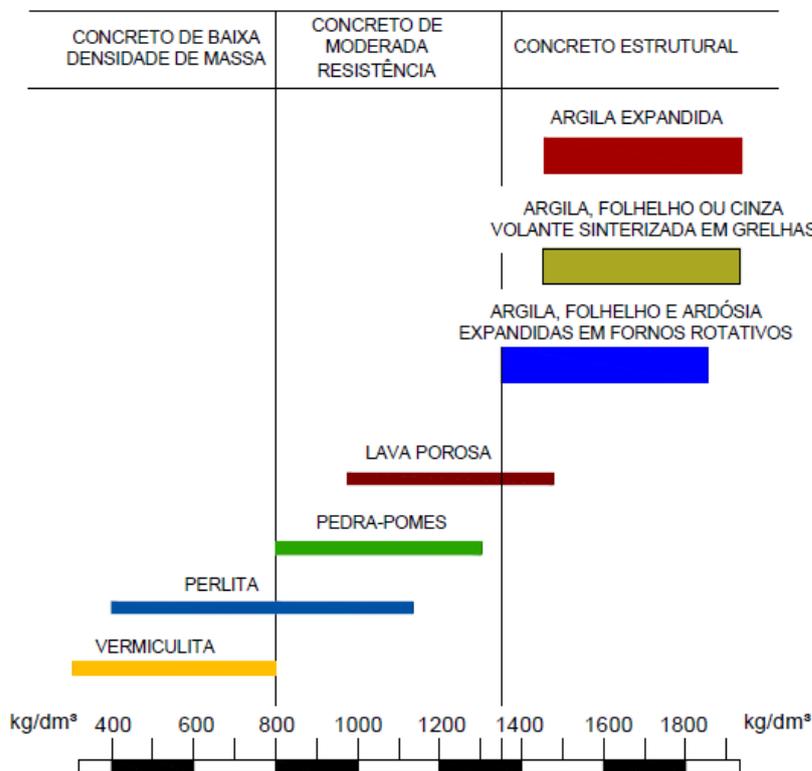
Rossignolo (2009) destaca ainda que, as propriedades dos concretos no estado fresco e no processo de hidratação são afetadas de forma significativa por características como: porosidade, absorção de água dos agregados leves, uso de aditivos, temperatura, entre outros. Essa alta absorção de água por parte do agregado leve pode ser desfavorável a algumas propriedades do concreto em seu estado endurecido, como o aumento da retração por secagem, aumento da massa específica e a redução da resistência ao fogo. Dessa forma, é recomendado que, para agregados leves com altos valores de absorção seja realizado a pr-saturação a fim de evitar prejuízo na trabalhabilidade do concreto no estado fresco. No entanto, a absorção de água pelo agregado leve apresenta aspectos positivos, como melhoramento da "cura interna" do concreto.

Segundo Newman (1993), o desempenho estrutural do concreto tende a ser reduzido em função da estrutura porosa do agregado leve, o que limita a sua resistência a patamares relativamente baixos em comparação ao concreto convencional. Deste modo, o concreto estrutural leve pode conter na sua composição apenas agregados leves, ou, por outras razões diversas, uma combinação de agregados leves e normais.

Na fabricação deste tipo de concreto os materiais utilizados no traço, tais como cimento Portland, agregado miúdo e água são os mesmos utilizados em traços de concretos tradicionais, com exceção do agregado graúdo, onde há uma substituição da brita, material comumente utilizado, por um agregado leve, podendo ser agregados leves naturais como diatomita, cinzas vulcânicas, ou ainda, agregados leves artificiais, a exemplo da argila expandida e ardósia expandida.

A massa específica seca do concreto leve está diretamente relacionada, além de outros fatores, ao agregado leve utilizado. Neville (1997) prevê as faixas de massa específica para o concreto de acordo com o agregado leve utilizado. Essa classificação dos concretos leves e suas massas específicas secas inerentes a cada tipo de agregado leve é ilustrado na Figura 2.

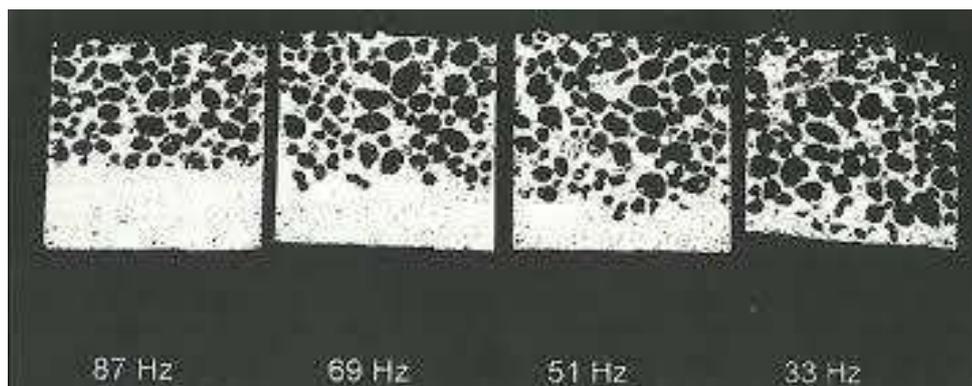
Figura 2 – Classificação dos concretos leves e suas massas específica seca



Fonte: NEVILLE (1997)

A frequência de vibração dos concretos com agregados leves também é um fator a ser levado em consideração uma vez que, segundo Rossignolo (2009), vibradores com altas frequências apresentam segregação maiores dos agregados leves, conhecido como “flutuação”, quando comparados a vibradores com baixas frequências de vibração. O efeito da frequência de vibração durante o adensamento dos agregados leves está representado na Figura 3.

Figura 3 – Efeito da frequência de vibração durante o adensamento dos agregados leves.



Fonte: VIEIRA (2000)

2.2.4. Aditivos

Os aditivos químicos são materiais muitas vezes em forma líquida e solúveis em água, adicionados à mistura do concreto em pequenas quantidades capazes de alterar as propriedades do concreto seja no estado fresco ou endurecido. Segundo Borja (2011), apesar de serem divididos em diversas categorias, estes possuem dois objetivos fundamentais, o de ampliar as qualidades de um concreto, ou de minimizar seus pontos fracos. Comumente os aditivos são utilizados para modificar propriedades como trabalhabilidade, impermeabilidade, aceleração ou retardamento do endurecimento do traço, entre outros.

O desempenho dos aditivos incorporados ao concreto depende de vários fatores tais como natureza e quantidade de aditivo, composição e superfície específica do cimento, natureza e proporcionamento dos agregados, sequência de adição de água e do aditivo à mistura, compatibilidade entre adições (no caso de haver mais de uma), relação água/cimento e condições de cura (MAILVAGANAM, 1999).

2.3. USO DE ADIÇÃO MINERAL NOS CONCRETOS

De acordo com a ASTM C 125, qualquer material, que não seja água, agregados, cimentos hidráulicos ou fibras, utilizado como ingrediente no concreto ou argamassa e adicionado à massa imediatamente antes ou durante a mistura pode ser definido como uma adição. (MEHTA & MONTEIRO, 2008). No entanto, esta definição torna-se muito ampla, visto que se faz necessário a distinção entre misturas químicas e misturas físicas

A NBR 11172 (ABNT, 1990) recomenda a utilização do termo adição para designar o produto de origem mineral adicionado aos cimentos, argamassas e concretos, com a finalidade de alterar suas características. A adição mineral tem por finalidade somar ou substituir parcialmente o cimento, podendo melhorar, em seu estado fresco, propriedades como plasticidade, coesão, exsudação, segregação e consumo de água, e, em seu estado endurecido, propriedades como resistência mecânica e durabilidade.

Analisando-se o processo de redução da massa específica através das substituições dos agregados convencionais por agregados leves Rossignolo & Agnesini (2005) afirma que, podem ocasionar alterações significativas em outras importantes características do concreto, destacando: resistência mecânica, absorção de água e módulo de deformação. Afirma ainda que, a utilização de adições minerais pozolânicas destaca-se dentre as formas de ajustar o desempenho do concreto leve, compensando eventuais alterações nas propriedades citadas em decorrência do uso do agregado leve.

Vários tipos de adições que podem ser utilizadas para este fim, tais como: metacaulim, sílica ativa, cinzas volantes, escória de alto-forno, cinzas de casca de arroz, fíler calcário e resíduo de tijolos cerâmicos. Neste trabalho serão usados o metacaulim e o resíduo de tijolo cerâmico.

2.3.1. Metacaulim

O metacaulim é uma pozolana originada da calcinação de uma argila caulínica ou simplesmente caulim que é constituído essencialmente por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). Ele é considerado um material pozolânico de alta reatividade para uso na construção civil. Sua composição rica em sílica e alumina favorece a obtenção de um material com excelente atividade pozolânica (SANTOS, 1992). Segundo o mesmo autor, um caulim com alto teor de sílica comprometerá sua reatividade, enquanto que teores maiores de alumina fornecerão maiores atividades pozolânica ao metacaulim.

De acordo com Rossignolo & Oliveira (2006), propriedades como o desempenho da resistência à compressão, da resistência à tração por compressão diametral e, especialmente, da absorção de água por imersão e da carbonatação dos concretos leves sofreram melhoras significativas com a adição de 10% de metacaulim. No entanto, a utilização do metacaulim não promoveu alterações significativas no valor do módulo de deformação dos concretos.

Comportamento semelhante é relatado por Lacerda (2005), ao afirmar que o metacaulim melhora as propriedades do concreto em níveis semelhantes aos da sílica ativa, não só considerando propriedades como a resistência mecânica, mas, propriedades como resistência a penetração de agentes agressivos.

No entanto, Souza Rezende (2012) destaca que, os melhores resultados são apresentados aos 49 dias de cura e com uso de metacaulim entre percentuais de 10% e 20% com substituição da massa do cimento. Borja (2011) afirma que, a inclusão das adições minerais, no caso o metacaulim, demonstra atividade pozolânica e manutenção das propriedades mecânicas através do efeito filer.

Quanto ao consumo de água com a utilização de adição mineral em concretos, Souza (2003) afirma que, para obtenção da mesma consistência, há um aumento da demanda de água quando comparado com concretos sem uso de adições minerais. Souza (2003) reitera que têm-se buscado utilizar elevados teores de substituição desta pozolana em estruturas de concreto.

2.3.2. Resíduo de Tijolos Cerâmicos

A indústria da construção civil se apresenta como um dos maiores consumidores de componentes cerâmicos. Estes componentes estão presentes em diversas etapas de uma construção, como: telhas, lajotas, tijolos, placas de revestimento entre outros. Dessa, com a utilização em grandes quantidades desses produtos há também uma considerável geração de resíduos, tanto durante sua fabricação quanto em sua destinação final.

Considerada como uma das mais antigas classes de materiais tecnologicamente úteis, as cerâmicas foram largamente utilizadas para prover isolamento térmico e elétrico e vêm emergindo como importante material estrutural (BRITO, 2005).

Segundo Vieira (2005), a indústria cerâmica vermelha na região do Nordeste do Brasil é uma das principais atividades industriais, com poucas contribuições para o crescimento de forma sustentável, ainda que alguns pesquisadores sugiram que seus resíduos, quando moídos, possam promover melhorias em algumas propriedades de misturas de cimento contendo esta adição.

Dessa forma, têm-se buscado cada vez mais formas de reutilização dos resíduos gerados na construção civil em componentes da própria construção civil, reduzindo o impacto gerado ao meio ambiente com o descarte de forma errada destes resíduos.

Sales & Alfares Filho (2014) afirmam que, a adição mineral de resíduos cerâmicos não apresenta significativas reduções quanto à resistência mecânica, rigidez e compacidade dos concretos. Reiteram ainda a viabilidade de sua aplicação em concretos, destacando vantagens relacionadas à preservação ambiental pela utilização desses resíduos.

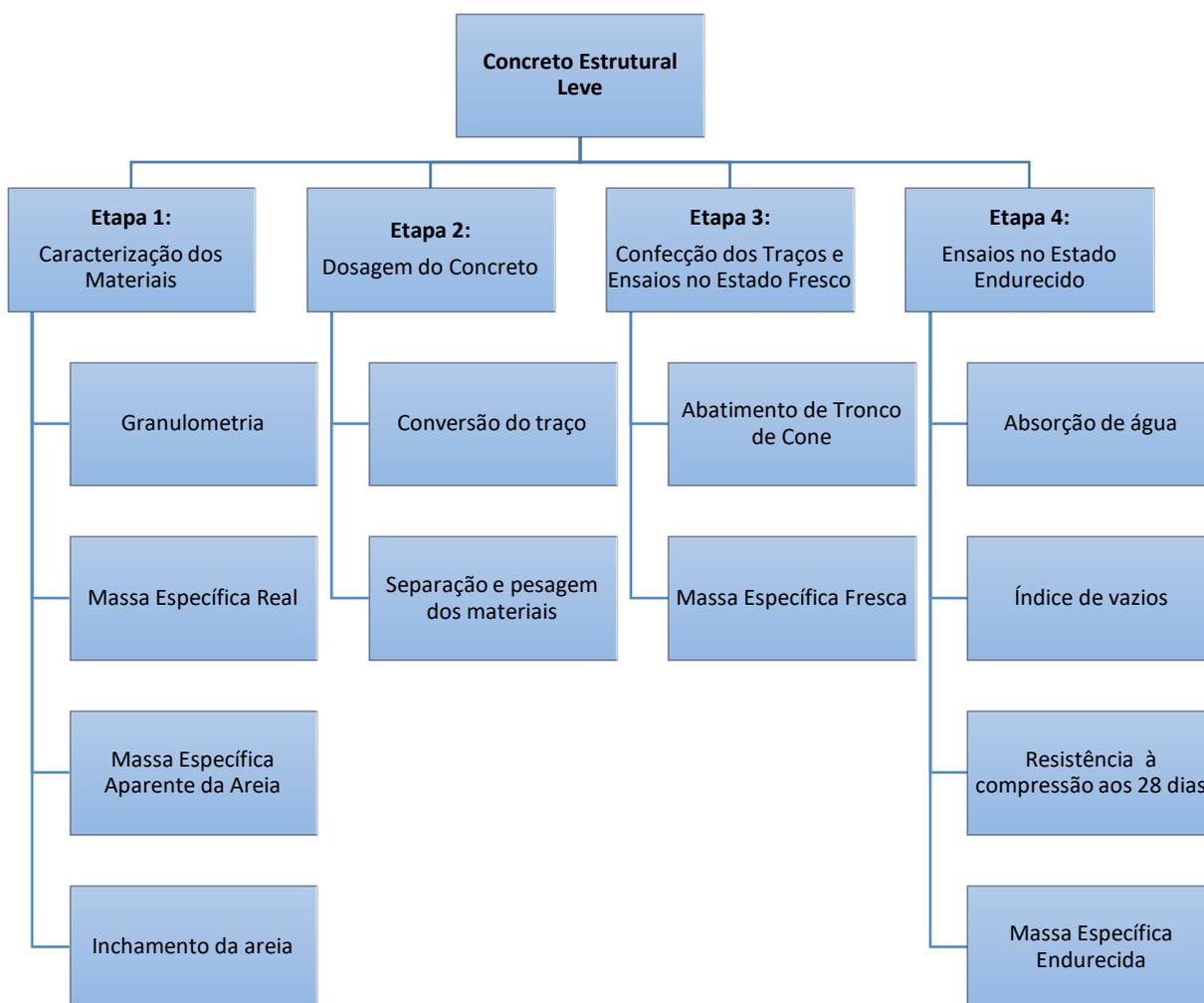
De acordo com Gonçalves, Toledo Filho & Fairbairn (2006), com o aumento do teor de substituição de cimento por resíduo cerâmico afirmam que há uma redução do teor de água quimicamente combinada, relativo ao hidróxido de cálcio, sendo 10% de substituição o teor que apresenta a maior quantidade de água quimicamente combinada.

Vieira (2005) reitera que, com a substituição de teores de 20% e 40% houve uma redução na resistência à compressão simples, no entanto, o autor afirma que esta redução não foi proporcional ao teor de substituição utilizado, uma vez que, amostras contendo 40% de substituição retiveram 89% da resistência das amostras de referência.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para obtenção dos objetivos definidos neste trabalho executou-se quatro etapas de estudos experimentais. A primeira etapa consistiu na escolha e caracterização dos materiais a serem utilizados para a dosagem do concreto. A segunda etapa realizou-se a dosagem dos traços utilizando os agregados leves, com finalidade de obter-se uma trabalhabilidade adequada. Sequencialmente, na terceira etapa realizou-se a confecção das amostras e os ensaios do concreto no estado fresco e, por fim, na quarta etapa realizou-se os ensaios do concreto no estado endurecido, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: O autor (2019)

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1. Cimento

Para produção do concreto estrutural leve empregou-se o cimento Portland CP V-ARI MAX fabricado pela marca Nacional e vendido em sacos de 40 kg, conforme Figura 04. Suas propriedades atendem desde estruturas em concreto armado até argamassas de assentamento e revestimento, concreto massa e concreto para pavimentos.

Realizou-se o ensaio de massa específica do cimento de acordo com a NBR NM 23 (ABNT, 2000) e obteve-se o valor de 3,02 g/cm³.

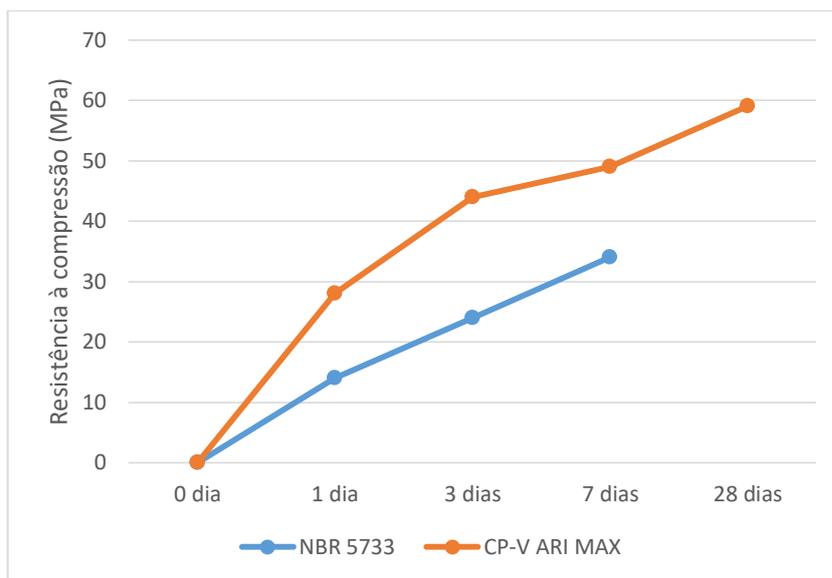
Figura 5 – Cimento CP-V ARI MAX utilizado no estudo



Fonte: Norte (2019)

Segundo a fabricante, o cimento utilizado neste estudo possui desempenho melhor que o estabelecido pela NBR 5733 (ABNT, 1991) em todas suas idades, podendo alcançar o valor de aproximadamente 60 MPa aos 28 dias, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Gráfico de desempenho do cimento CP-V ARI MAX



Fonte: Nacional (2019)

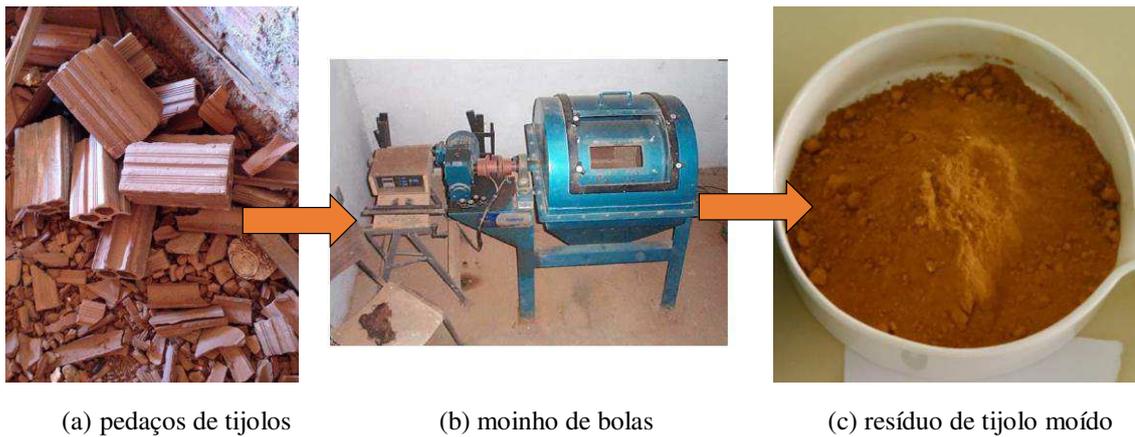
3.1.2. Água

A água utilizada na produção do concreto leve segue os mesmos requisitos de qualidade exigidos para a água utilizada para concretos convencionais, assim, segundo a NBR 15900-1, a água provinda do abastecimento da rede pública é considerada adequada para uso em concreto e não necessita ser ensaiada. Tomou-se cuidado apenas em utilizar a água em temperatura ambiente, uma vez que, a tubulação de água do laboratório BK-UFCG estava exposta ao sol deixando-a em temperaturas muito elevadas.

3.1.3. Adição mineral

A adição mineral de resíduos de tijolos cerâmico moído (RTCM) passou por um processo de moagem através de um moinho de bolas, representado na Figura 7, e foi obtido através do Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas (LABEME) da UFPB. O metacaulim (MC) utilizado neste estudo foi obtido através de doação da empresa de concreto usinado SUPERMIX.

Figura 7 – Processo de moagem do RTCM



Fonte: Filho, J. S. A (2018)

Determinou-se a massa específica das adições minerais através da NBR NM 23 (ABNT, 2000), a área específica através do método BET. Na Tabela 3 são apresentados os dados referentes a essas características dos materiais.

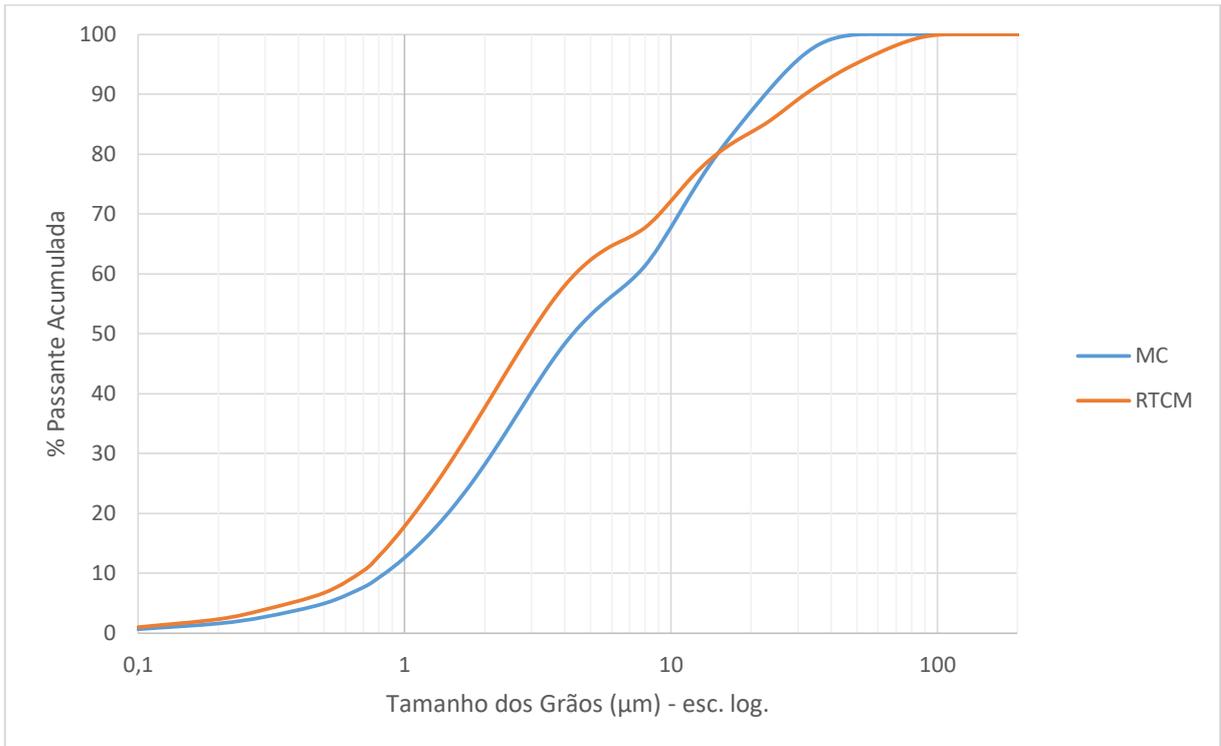
Tabela 3 – Características físicas das adições minerais

Adição Mineral	Massa Específica (g/cm ³)	Área Específica (cm ² /g)
RTCM	2,61	138.000
MC	2,59	183.000

Fonte: Filho, J. S. A (2018) e O autor (2019)

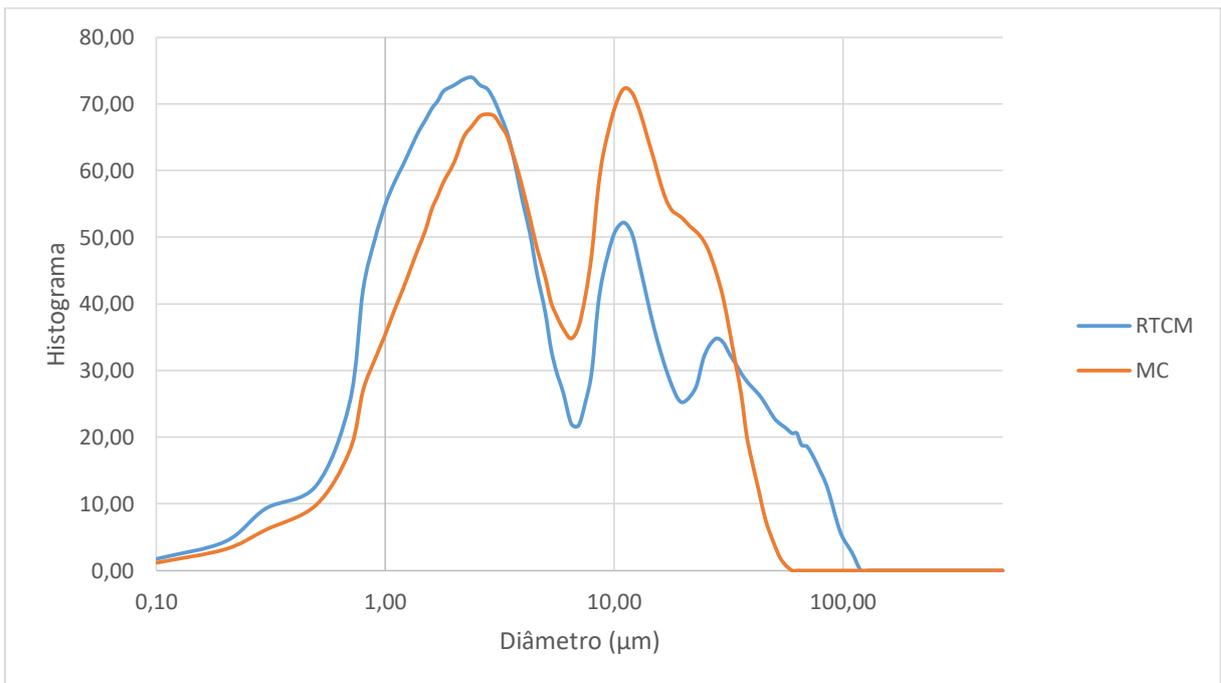
A curva granulométrica e o histograma do RTCM e MC estão apresentados nas Figuras 8 e 9, respectivamente.

Figura 8 – Curva granulométrica do RTCM e MC



Fonte: Filho, J. S. A et. al. (2018) e O autor (2019)

Figura 9 – Histograma do RTCM e MC



Fonte: Filho, J. S. A et. al. (2018) e O autor (2019)

Segundo Filho (2018), o RTCM possui um diâmetro médio de 10,46 μm ; 10% das partículas acumuladas são menores que 0,7 μm ; 50% são menores que 3 μm e 90% são menores que 32 μm . Analisando-se a Figura 8, para o MC, tem-se que possui um diâmetro

médio 8,57 μm ; 10% das partículas acumuladas são menores que 0,8 μm ; 50% são menores que 4,3 μm e 90% são menores que 23 μm .

Na tabela 4 são apresentados os resultados obtidos na fluorescência de raios-x das adições minerais.

Tabela 4 – Fluorescência de raios-x do RTCM e do MC

Material	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO₃ (%)	Na₂O (%)	K₂O (%)	TiO₂ (%)	Outros
RTCM	56,49	24,18	12,15	0,21	2,40	-	1,35	0,74	2,07	0,424
MC	49,74	36,74	7,24	0,57	1,63	0,23	-	1,83	1,71	0,32

Fonte: Filho, J. S. A et. al. (2018) e O autor (2019)

De acordo com a Tabela 4 pode-se afirmar que, o RTCM utilizado para este estudo é composto por cerca de 56% de dióxido de silício (SiO₂) e cerca de 24% de óxido de alumínio (Al₂O₃). Além disso, possui também, em sua composição, cerca de 12% de óxido de ferro (Fe₂O₃). A soma da porcentagem desses três óxidos representa cerca de 93% da composição química da adição mineral advinda do RTCM.

Observa-se ainda que, conforme Tabela 4, o metacaulim utilizado neste estudo é composto por cerca de 50% de dióxido de silício (SiO₂) e cerca de 37% de óxido de alumínio (Al₂O₃). A soma da porcentagem desses dois óxidos resulta em um valor maior que 85%.

As adições minerais foram caracterizadas quanto aos requisitos químicos e físicos estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014) para serem considerados como materiais pozolânicos. As Tabelas 5 e 6 apresentam os requisitos químicos e físicos, respectivamente, estabelecidos por norma a fim de determinar se o material pode ou não ser considerado como material com atividade pozolânica.

Tabela 5 – Requisitos químicos para os materiais pozolânicos

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	E	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 70	≥ 70	≥ 50	NBR NM 22 (2012)
SO ₃	≤ 4	≤ 5	≤ 5	NBR NM 16 (2012)

Fonte: NBR 12652 (ABNT, 2014)

Tabela 6 – Requisitos físicos para os materiais pozolânicos

Propriedade	Classe do material pozolânico	Método de Ensaio
	N, C e E.	
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90 %	NBR 5752 (2014)
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	≥ 6 MPa	NBR 5751 (2014)

Fonte: NBR 12652 (ABNT, 2014)

Os resultados obtidos para a caracterização da atividade pozolânica das adições minerais estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados para análise dos requisitos físicos das adições minerais

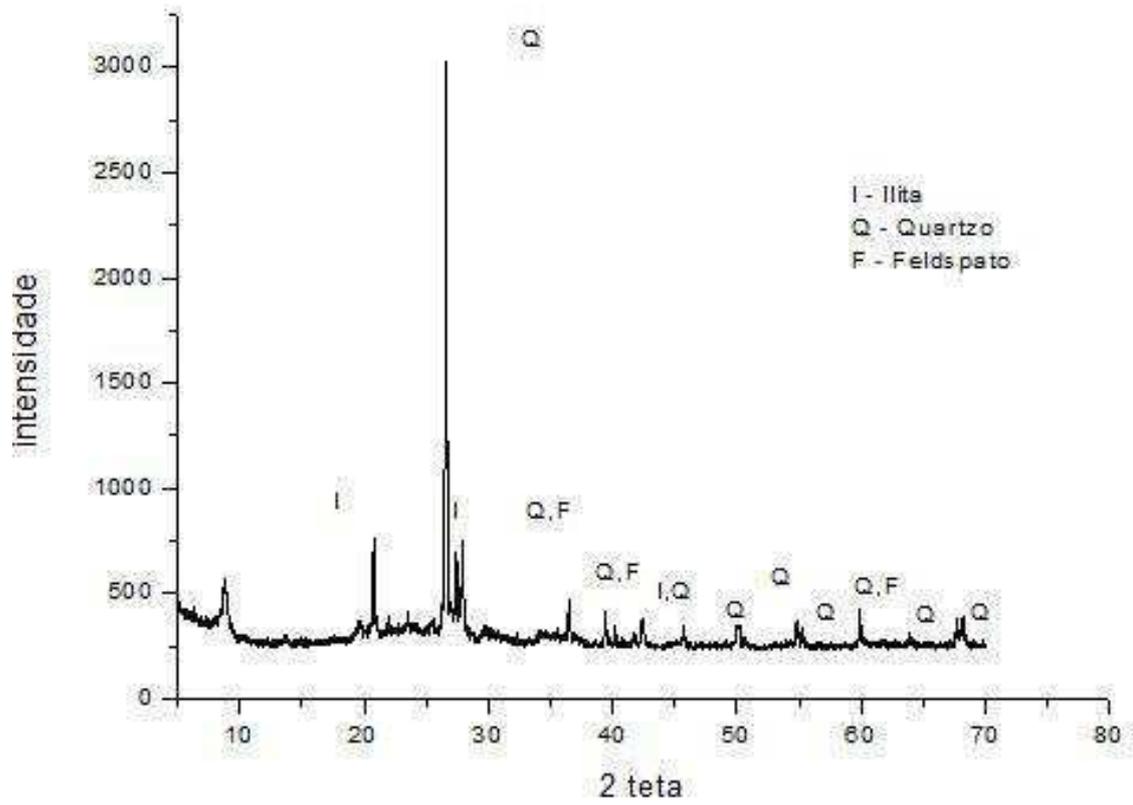
Propriedade	Resistência à Compressão da Argamassa utilizando Cimento Portland (MPa)	Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	Atividade pozolânica com cal aos sete dias (MPa)
Referência	27,69	-	-
RTCM	22,36	81%	4,25
MC	33,32	120%	7,00

Fonte: O autor (2019)

Assim, pode-se afirmar que, o metacaulim atende os requisitos físicos estabelecidos por norma, podendo ser considerado um material com atividade pozolânica. No entanto, analisando-se o RTCM, percebe-se que o mesmo não atingiu nenhum dos requisitos físicos estabelecidos pela norma, não podendo ser considerado um material com atividade pozolânica segundo a mesma, o que implica dizer que provavelmente o RTCM contribuirá mais pelo efeito fíler no concreto.

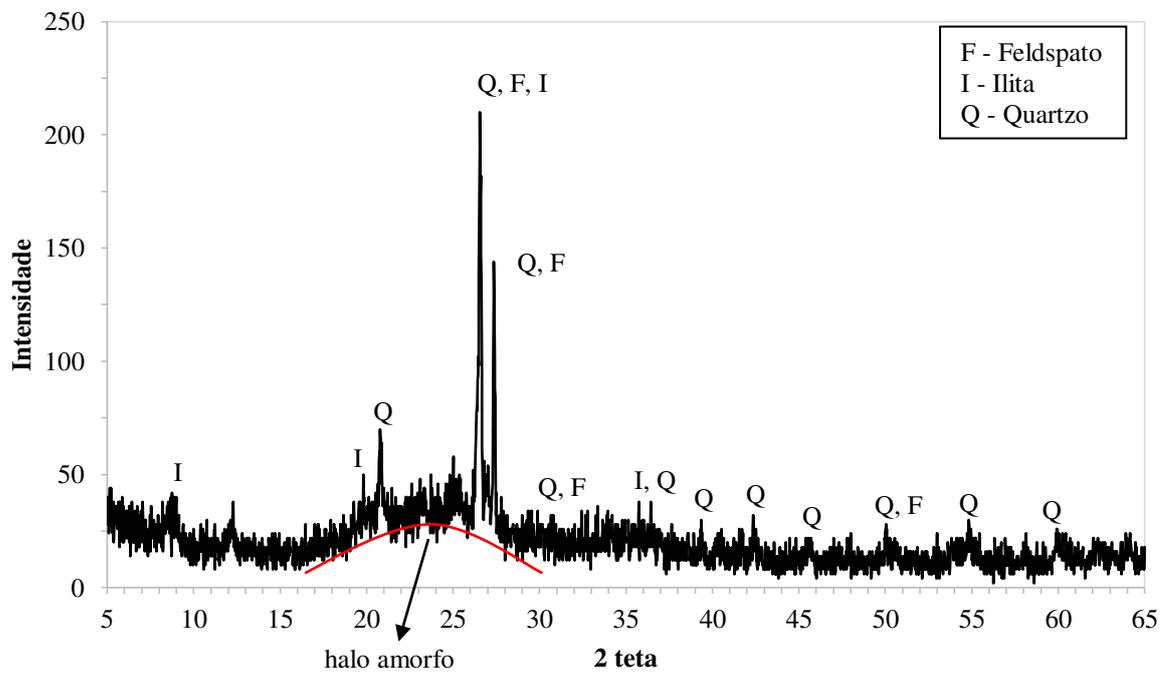
As Figuras 10 e 11 são apresentados os difratogramas do RTCM e do MC.

Figura 10 – Difração de raios-x do RTCM



Fonte: Filho, J. S. A (2018)

Figura 11 – Difração de raios-x do MC



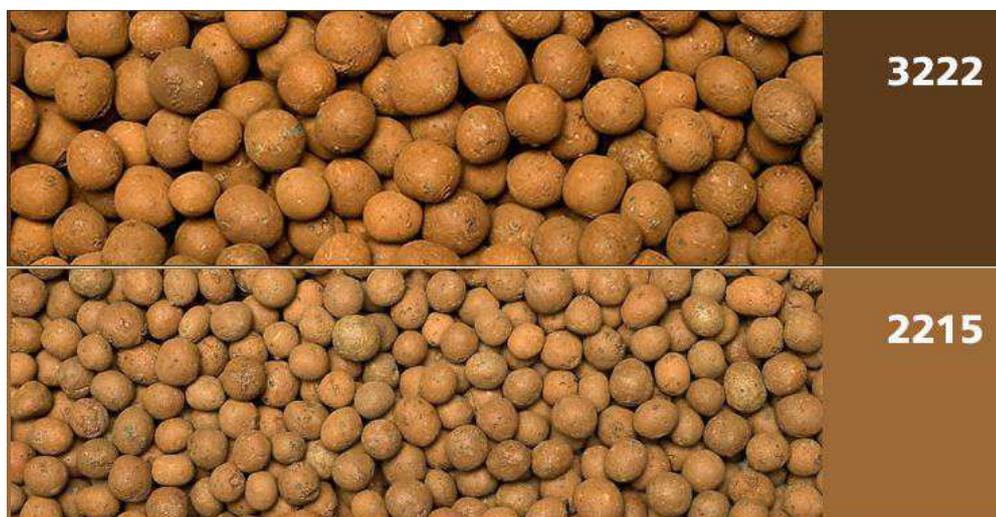
Fonte: O autor (2019)

No difratograma percebe-se que tanto o RTCM quanto o MC são compostos majoritariamente por quartzo. Outras fases constituintes como a ilita e feldspato também foram detectadas pelo DRX. No entanto, para o DRX do MC pode ser visto um halo entre 20 e 30°, indicando uma certa amorficidade do material.

3.1.4. Agregados leves

As argilas expandidas utilizadas nesta pesquisa são produzidas pela CINEXPAN e denominadas neste trabalho como AE-2215 e AE-3222, conforme Figura 12. São produzidas pelo processo de forno rotativo a temperaturas de até 1.250°C e seguido de um processo de resfriamento para vitrificação de sua superfície.

Figura 12 – Agregados leves do tipo argila expandida utilizado no estudo



Fonte: Cinexpan (2019)

Para caracterização dos agregados leves utilizados neste estudo determinou-se a distribuição granulométrica, segundo NBR NM 248 (ABNT, 2003), módulo de finura e diâmetro máximo de acordo com a norma NBR NM 7211 (ABNT, 2009).

Para determinação da massa específica destes agregados não foi possível realizar o procedimento determinado pela norma NBR NM 53 (ABNT, 2009), uma vez que, os agregados leves boiam quando imersos em água. Desta forma, a determinação da massa específica ocorreu através da relação entre a massa de agregado leve e a diferença entre volume inicial e volume final ocupado pelo material quando imerso em água, em um recipiente com dimensões e volume conhecidos. Os valores obtidos para o ensaio estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Massa específica dos agregados leves

Argila Expandida	Massa Específica (g/cm ³)
AE-2215	0,62
AE-3222	0,58

Fonte: O autor (2019)

Os valores apresentados na Tabela 8 eram esperados, uma vez que, estão próximos aos valores apresentados na ficha técnica do produto, apresentada pela fabricante. Os resultados obtidos também se encontram próximos aos valores fornecidos por Rossignolo (2009). A ficha técnica fornece os valores de massa específica para AE-2215 e AE-3222 de, respectivamente, 0,64 g/cm³ e 0,56 g/cm³.

Ainda de acordo com a ficha técnica fornecida pela fabricante, têm-se que os agregados leves AE-2215 e AE 3222 possuem, respectivamente, a massa unitária de 0,45 g/cm³ e 0,50 g/cm³.

A partir dos valores determinados de massa específica dos agregados, pode-se obter o valor do módulo de deformação para os agregados leves segundo a FIP (1983), apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Módulo de deformação dos agregados leves

Argila Expandida	Módulo de Deformação (GPa) (FIP, 1983)
AE-2215	3,18
AE-3222	2,42

Fonte: O autor (2019)

De acordo com Holm & Brremner (1994) agregados leves utilizados em concretos estruturais variam entre 10 GPa e 18GPa. Os autores afirmam ainda que, agregados leves com baixa resistência mecânica têm pouca participação na transmissão das tensões internas no concreto. Agregados leves com módulo de deformação maiores contribuem para maiores valores de resistência à compressão e módulo de deformação do concreto.

A Tabela 10 apresenta a análise química fornecida pela fabricante dos agregados leves.

Tabela 10 – Análise química dos agregados leves

Argila Expandida	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO₃ (%)	Na₂O (%)	K₂O (%)	TiO₂ (%)	Outros
AE-2215 e AE-3222	63,19	18,02	7,63	0,64	3,26	-	0,61	4,91	0,92	0,82

Fonte: Cinexpan (2019)

De acordo com a Tabela 10, têm-se que os agregados leves utilizados neste estudo são compostos em 63% de sílica (SiO₂) e cerca de 18% de óxido de alumínio (Al₂O₃). Além disso, possui também, em sua composição, cerca de 7,6% de óxido de ferro (Fe₂O₃). A soma da porcentagem desses três óxidos representa cerca de 88% da composição química do agregado leve.

A norma NBR 7211 (ABNT, 2009) especifica os limites da composição granulométrica para o agregado graúdo, como pode ser visto na Tabela 11.

Tabela 11 – Limites da composição granulométrica do agregado graúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica d/D^a				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 – 5
63 mm	-	-	-	-	5 – 30
50 mm	-	-	-	0 – 5	75 – 100
37,5 mm	-	-	-	5 – 30	90 – 100
31,5 mm	-	-	0 – 5	75 – 100	95 - 100
25 mm	-	0 – 5	5 – 25 ^b	87 – 100	-
19 mm	-	2 – 15 ^b	65 ^b – 95	95 - 100	-
12,5 mm	0 - 5	40 ^b – 65 ^b	92 – 100	-	-
9,5 mm	2 – 15 ^b	80 ^b - 100	95 - 100	-	-
6,3 mm	40 ^b – 65 ^b	92 - 100	-	-	-
4,75 mm	80 ^b - 100	95 – 100	-	-	-
2,36 mm	95 – 100	-	-	-	-

^aZona granulométrica correspondente à menor (d) e a maior (D) dimensões do agregado graúdo.

^bEm cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com 2). Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009)

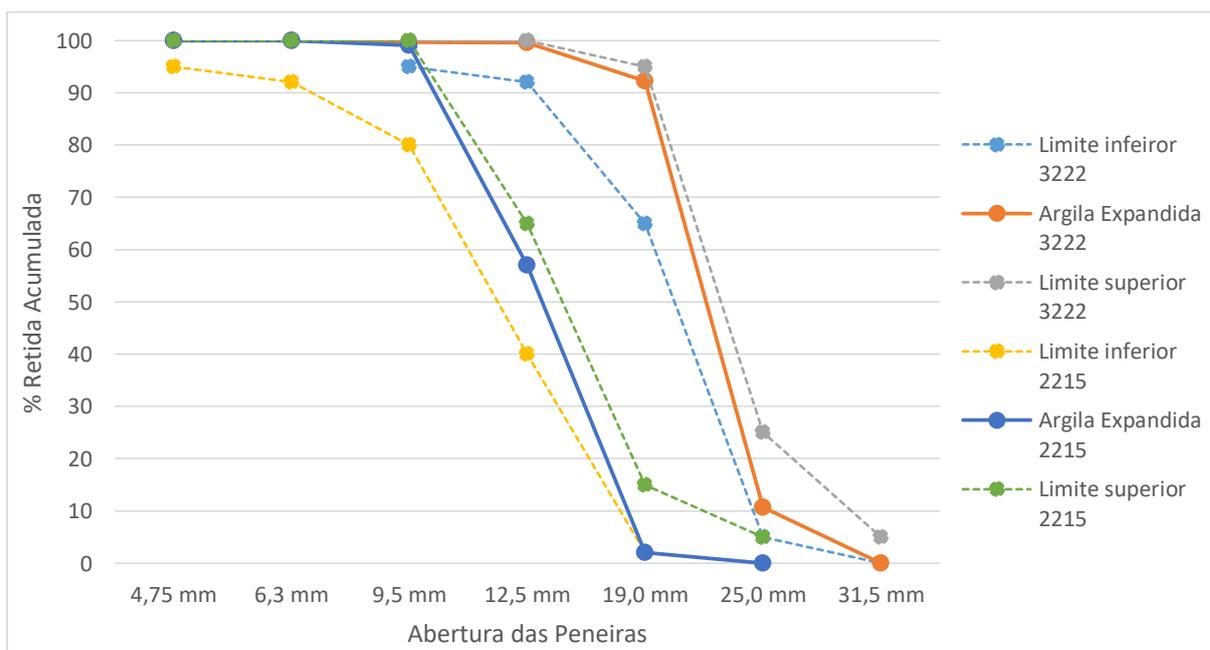
Na Tabela 12 são apresentados os valores obtidos no ensaio granulométrico de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), bem como os valores de dimensão máxima característica de cada argila expandida. As suas curvas granulométricas são apresentadas na Figura 13.

Tabela 12 – Valores obtidos para granulometria, módulo de finura e dimensão máxima dos agregados leves

Peneira # (mm)	% Retida acumulada	
	AE-2215	AE-3222
76,2	0,0	0,0
38,1	0,0	0,0
25,0	0,0	10,66
19,1	2,04	92,26
9,5	99,11	99,69
4,8	100,0	100,0
2,4	100,0	100,0
Resíduo	0,0	0,0
Dimensão máxima característica: NBR 7211 (ABNT, 2009)	19,1 mm	25,0 mm

Fonte: O autor (2019)

Figura 13 – Composição granulométrica da AE-2215 e AE-3222



Fonte: O autor (2019)

De acordo com a Figura 13, observa-se que os agregados leves utilizados neste estudo estão situados dentro dos limites de composição granulométrica determinados pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

3.1.5. Agregado miúdo

Para a confecção das amostras utilizou-se como agregado miúdo a areia média advinda do leito do rio Paraíba, obtida através de fornecedores locais.

A massa específica do agregado miúdo foi determinada através do método de chapman pela norma NBR 9776 (ABNT, 1987), devido ao circulador de ar regulável estar danificado, aparelho necessário para execução da massa específica em conformidade com a NBR NM 53 (ABNT, 2002). A massa específica determinada através deste método foi de 2,625 g/cm³.

Para a massa unitária, determinada através da NBR NM 45 (ABNT, 2006) obteve-se o valor de 1,479 g/cm³.

A avaria com o circulador de ar regulável também impediu que fosse executado o ensaio de absorção de água do agregado miúdo, segundo a NBR NM 30 (ABNT, 2000).

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), os agregados com variabilidade em suas características podem ser utilizados como agregado miúdo para concreto, desde que, não ultrapassem os limites estabelecidos na Tabela 13.

Tabela 13 – Limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR 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

Nota 1: O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.

Nota 2: O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 e 2,20.

Nota 3: O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009)

A distribuição granulométrica foi determinada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Na Tabela 14 são apresentadas as porcentagens retidas acumuladas, o módulo de finura e a dimensão máxima.

Tabela 14 – Valores obtidos para granulometria, módulo de finura e dimensão máxima do agregado miúdo

Peneira # (mm)	% Retida acumulada
4,8	2,79
2,4	8,81
1,2	18,61
0,6	42,79
0,30	77,81
0,15	96,26
Resíduo	100,00

Dimensão máxima característica:
 $D_{m\acute{a}x} = 4,8 \text{ mm}$ (NBR 7211)

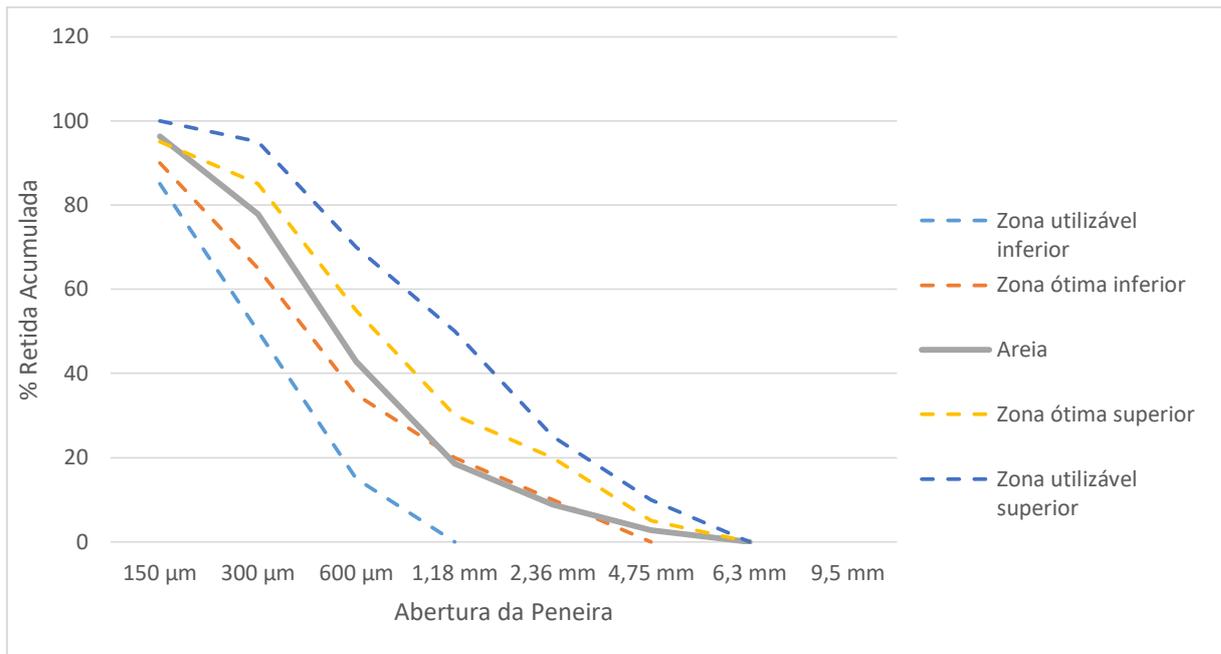
Módulo de finura: MF = 2,47 (NBR 7211)

Fonte: O autor (2019)

Conforme Tabela 14, obteve-se a dimensão máxima característica de 4,8 mm e módulo de finura igual a 2,47.

A Figura 14 apresenta a distribuição granulométrica do agregado miúdo utilizado neste estudo em comparação com os limites definidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Figura 14 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: O autor (2019)

De acordo com a Figura 14, pode-se afirmar que, o agregado miúdo utilizado situa-se na zona ótima de utilização, entre os limites inferiores e superiores da zona ótima.

A Tabela 15 apresenta a classificação do agregado miúdo quanto ao seu módulo de finura.

Tabela 15 – Classificação da areia quanto ao módulo de finura

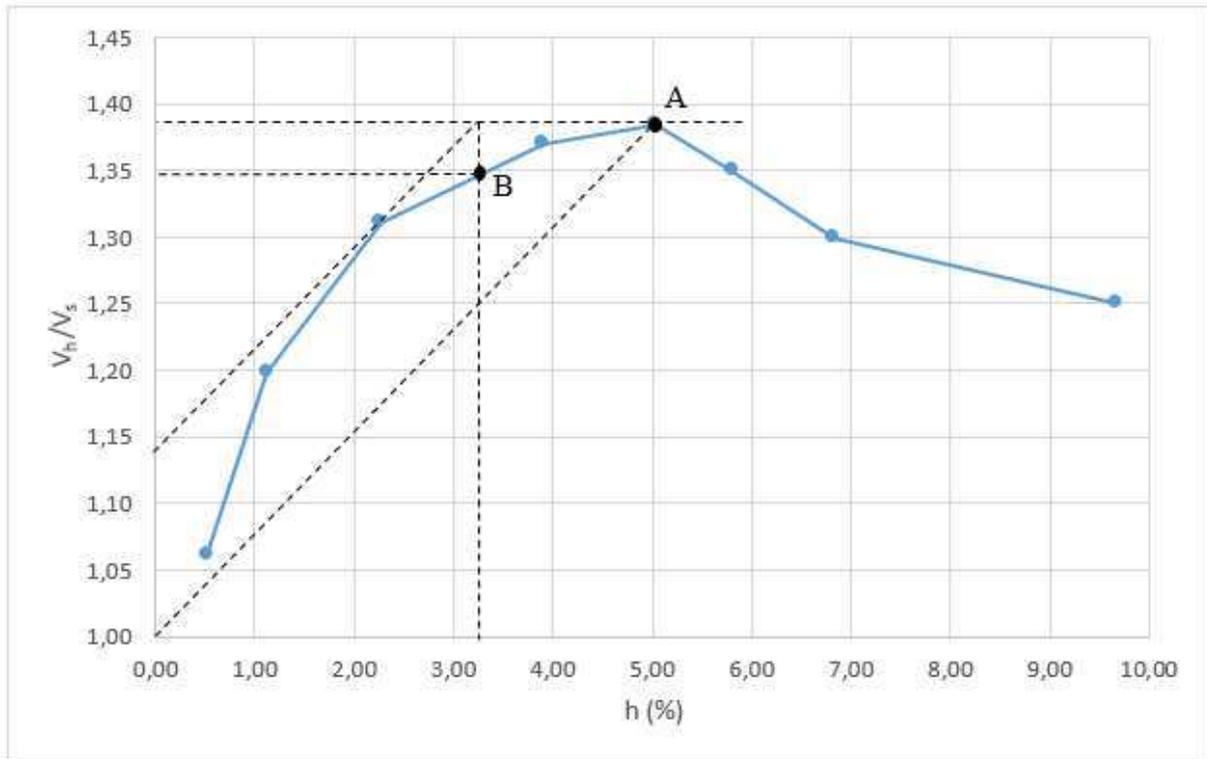
Tipos	Módulo de Finura (MF)
Areia Fina	$MF < 2,4$
Areia Média	$2,4 < MF < 3,3$
Areia Grossa	$MF > 3,3$

Fonte: LUCENA (2017)

Assim, a partir do valor do módulo de finura obtido e de acordo com Lucena (2017) pode-se caracterizar o agregado miúdo utilizado nesse estudo como uma areia média. Além disso, com o módulo de finura e de acordo com a Tabela 13 o agregado miúdo está situado na zona ótima.

O inchamento da areia foi determinado de acordo com a norma NBR 6467 (ABNT, 2006). A Figura 15 apresenta a curva de inchamento para o agregado miúdo utilizado neste estudo.

Figura 15 – Curva de inchamento do agregado miúdo



Fonte: O autor (2019)

Dessa forma, percebe-se que, de acordo com a curva de inchamento o valor da umidade crítica é de 3,3% e o coeficiente de inchamento médio é 1,36.

3.1.6. Aditivos

Visando obter um concreto mais fluido ou diminuir o fator água/cimento, utilizou-se o aditivo do tipo superplastificante sintético MC PowerFlow 3100 fabricado pela empresa MC Bauchemie a base de polímeros policarboxilatos (PCE), possibilitando uma melhor trabalhabilidade do concreto sem afetar às propriedades finais no estado endurecido. De acordo com a ficha técnica disponibilizada pelo fabricante, o aditivo utilizado neste estudo possui massa específica igual a 1,07 g/cm³.

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Dosagem do Concreto

Por se tratar de um concreto ainda sem método de dosagem definido por estudos nacionais tentou-se, inicialmente, a dosagem através de métodos utilizados em concretos convencionais. Utilizou-se a dosagem a partir do método da ABCP, definindo 0,56 como fator água/cimento e resistência de projeto de 30 MPa. O consumo de materiais apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 – Traço, em volume, determinado pelo método da ABCP

Tipo de Argila Expandida	% de Adição Mineral	Consumo de materiais por m ³				Teor de Argamassa α (%)
		Cimento (kg)	Adição Mineral (kg)	Areia (kg)	Agregado Leve (kg)	
AE-2215	0	360	0	348,36	350	67,0
	10	324	36	348,36	350	
AE-3222	0	360	0	348,36	326,25	68,6
	10	324	36	348,36	326,25	

*Fator água/cimento

Fonte: O autor (2019)

No entanto, durante a execução do traço percebeu-se que o mesmo possuía baixa quantidade de argamassa e elevada quantidade de agregado leve, conforme pode ser percebido na Figura 16. Obteve-se um valor de abatimento de tronco de cone de 235 mm. Assim, percebe-se que o método de dosagem pela ABCP, utilizado para dosagem dos concretos convencionais, não se adequa para dosagem de concretos leves.

Figura 16 – Traço realizado a partir da dosagem para concreto convencional



Fonte: O autor (2019)

A partir disso, devido ao método de dosagem para concretos leves não ser muito bem definido na literatura técnica nacional, buscou-se utilizar um traço utilizado em estudos semelhantes. O traço utilizado, em volume, consiste no seguinte: 1 (aglomerante) : 2,31 (areia) : 2,93 (agregado leve) : 0,55 (água) (ROSSIGNOLO & OLIVEIRA, 2006).

O valor de abatimento foi fixado de acordo com a Tabela 17, que apresenta os limites de abatimento no slump-test de acordo com o tipo de obra e serviço a ser realizado.

Tabela 17 – Limite de abatimento no slump-test

Tipo de Obra/Serviço	Consistência Trabalhabilidade	Concreto com controle razoável agregados medidos em volume Vibração manual ou mecânica	
		Mínimo (cm)	Máximo (cm)
Fundações e muros não armados	Firme	2,0	6,0
Fundações e muros armados	Firme a plástico	3,0	7,0
Estruturas usuais e Lastros	Plástico	5,0	7,0
Peças com alta densidade de armaduras	Plástico a mole	7,0	9,0
Concreto aparente	Plástico a mole	6,0	8,0
Concreto bombeado até 40 m	Mole	8,0	10,0
Concreto bombeado + 40 m	Muito mole	9,0	13,0

Fonte: Ripper (1995)

De acordo com a Tabela 17 o valor do abatimento foi fixado de forma que o concreto fosse utilizado em peças com alta densidade de armaduras. Assim, fixou-se o slump em 80 ± 10 mm e para os casos em que não se atingiu esse parâmetro utilizou-se o aditivo superplastificante para que essa exigência fosse cumprida.

Executou-se o traço obtido por referência literária adaptando-se o fator água cimento para os limites de abatimento desejados. A Tabela 18 apresenta o consumo de materiais para os traços em massa utilizados nesse estudo.

Tabela 18 – Consumo de materiais para os traços

Tipo de Argila Expandida	% de Adição Mineral	Consumo de materiais por m ³				Teor de Argamassa α (%)	$F_{a/c}$ *
		Cimento (kg)	Adição Mineral (kg)	Areia (kg)	Agregado Leve (kg)		
AE-2215	1 : 2,01 : 0,62 : 0,53					82,9	0,53
	0	358,7	0	720,99	223,11		
	10	322,83	35,87	720,99	223,11		
AE-3222	1 : 2,01 : 0,54 : 0,53					84,8	
	0	358,7	0	720,99	194,89		
	10	322,83	35,87	720,99	194,89		

*Fator água/cimento

Fonte: O autor (2019).

Visando facilitar a execução dos traços em laboratório BK, os materiais foram previamente pesados com o auxílio de uma balança digital com capacidade de 10kg no laboratório CW, apresentado na Figura 17. O único material pesado no momento de execução do traço foi o agregado miúdo, através de uma balança mecânica sem precisão, conforme Figura 18. O agregado miúdo permaneceu em estufa com temperatura de 105 ± 5 °C até duas horas antes da execução do traço, garantindo que o mesmo estaria na condição seca no momento de realizar a pesagem.

Figura 17 – Pesagem dos materiais em balança digital



Fonte: O autor (2019)

Figura 18 – Pesagem da areia em balança mecânica



Fonte: O autor (2019)

Após a pesagem, cada material foi colocado em sacos plásticos com identificação do material e da massa contida, de acordo com a Figura 19. Realizou-se este procedimento devido ao laboratório BK-UFCG, onde executou-se as amostras, não conter balança digital precisa com capacidade maior que 2 kg.

Figura 19 – Separação dos materiais utilizados nas amostras



Fonte: O autor (2019)

3.2.2. Ensaios do Concreto no Estado Fresco e Endurecido

3.2.2.1. Estado Fresco

Os materiais foram misturados em uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 120 litros, previamente umedecida para evitar absorção da água utilizada no traço. Obedeceu-se a seguinte ordem de mistura:

- 1° – Aglomerante e agregado miúdo e 50% da água;
- 2° - Adição mineral;
- 3° - 50% restante da água, agregado leve e aditivo superplastificante, caso necessário; (ROSSIGNOLO, 2003).

Os agregados leves foram utilizados nos traços em condição saturada superfície seca, através da imersão em água por um período de 24h antes da confecção dos traços. Após isso, realizou-se a secagem da superfície com a utilização de panos absorventes, evitando que os agregados absorvessem a água definida para realização do traço.

O abatimento de tronco de cone, apresentado na Figura 20, foi executado seguindo a NBR NM 67 (ABNT, 1998) e os procedimentos de moldagem e de cura dos corpos de prova foram executados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015).

Figura 20 – Ensaio de abatimento de tronco de cone da referência AE-3222



Fonte: O autor (2019)

Para cada traço executado moldou-se seis corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, sendo três para determinação da massa específica do concreto no estado endurecido e três para determinação da resistência à compressão. Os corpos de prova permaneceram em cura, conforme Figura 21, até a idade de 28 dias. A massa específica das amostras no estado fresco foi determinada de acordo com a NBR 9833 (ABNT, 2008).

Figura 21 – Corpos de prova em cura



Fonte: O autor (2019)

3.2.2.2. Estado Endurecido

Para determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica endurecida executou-se a determinação do peso na condição seca, na condição saturada e saturado superfície seca, conforme NBR 9778 (ABNT, 2005). No entanto, não foi possível executar a saturação por fervura sugerida pela norma devido à ausência de equipamentos que permitissem a realização do ensaio completo.

O ensaio de compressão foi realizado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 1994) aos 28 dias, obedecendo a tolerância de tempo para execução do ensaio, conforme Tabela 19. A prensa utilizada para medição da resistência foi uma prensa hidráulica manual com marcador analógico, apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Prensa hidráulica de compressão



Fonte: O autor (2019)

Tabela 19 – Tolerância de tempo para ensaio de compressão em função da idade de ruptura

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

Fonte: NBR 5739 (ABNT, 1994)

Além disso, com finalidade de nivelar as superfícies dos corpos de prova, antes da execução do ensaio de compressão, todos os corpos de provas passaram pelo procedimento de retificação na SUPERMIX através de uma retificadora de corpos de prova automática, ilustrada na Figura 23.

Figura 23 – Processo de retificação dos corpos de prova



Fonte: O autor (2019)

O procedimento de retificação foi de extrema importância nesse estudo, uma vez que, devido à baixa densidade dos agregados leves, estes apresentavam a tendência de flutuar após a moldagem dos corpos de prova, tornando a superfície dos mesmos totalmente desregulada. Os corpos de prova foram submetidos até o limite da sua capacidade de resistência, permitindo seu total rompimento, conforme ilustrado na Figura 24.

Figura 24 – Corpo de prova após rompimento

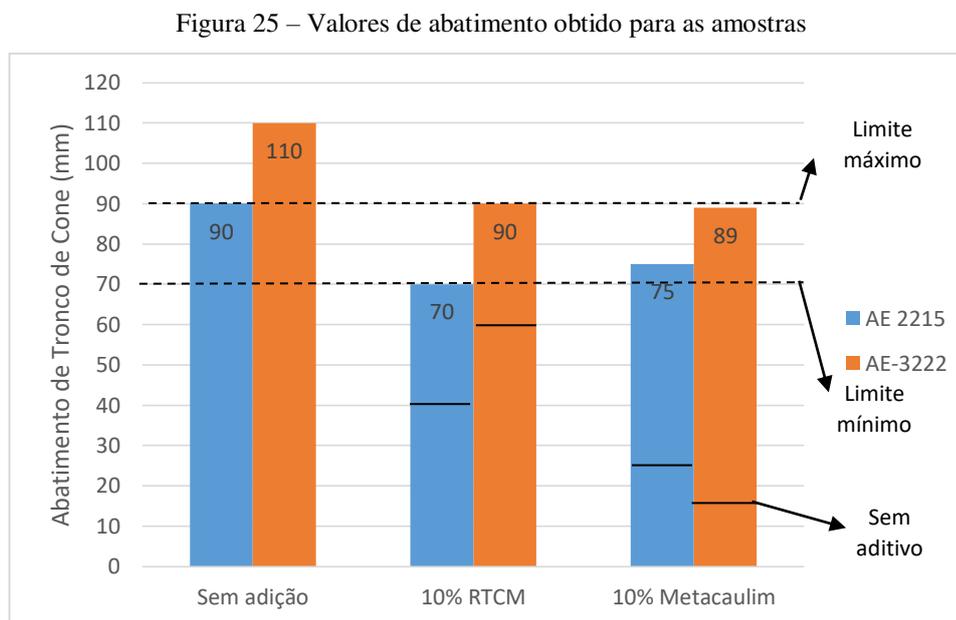


Fonte: O autor (2019)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ANÁLISE DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Os valores obtidos de abatimento de tronco de cone para as amostras são apresentados na Figura 25.

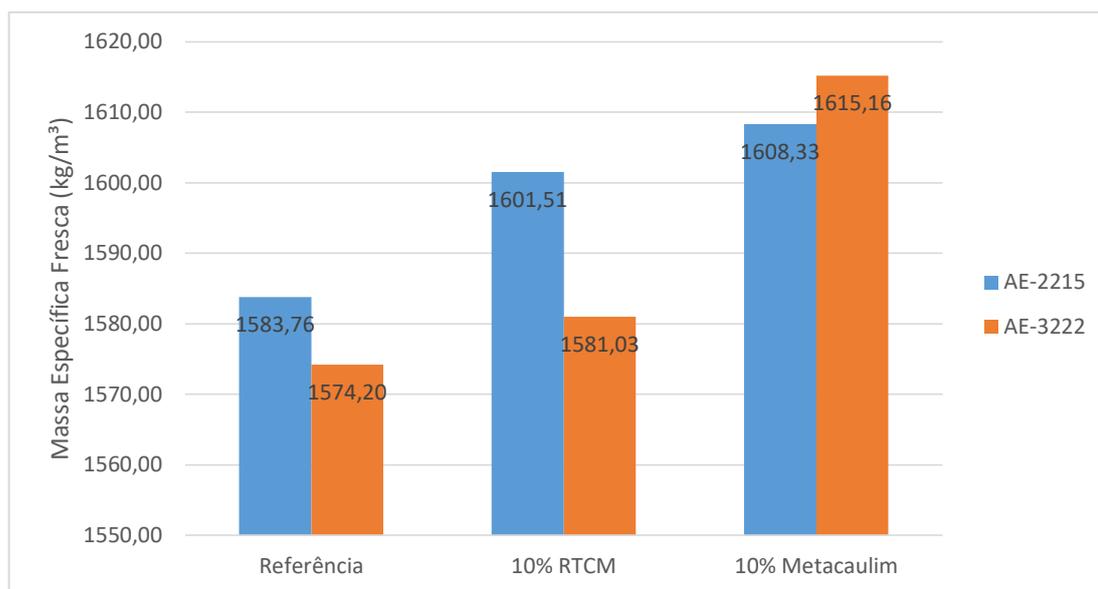


De acordo com a Figura 25, percebe-se que há uma redução no valor de abatimento obtido à medida que se substitui parcialmente o cimento pelas adições minerais. Vale salientar ainda que, como o fator água/cimento era fixo, nas amostras com RTCM e MC necessitou-se do uso do aditivo superplastificante para obtenção do slump dentro dos limites determinados. Assim, foi possível obter amostras de concretos plásticos sem alterar a quantidade de água utilizada nos traços.

O valor de abatimento para a amostra de referência contendo AE-3222 ultrapassou o limite superior do slump mesmo sem utilização de aditivo superplastificante. Este fato está, provavelmente, relacionado ao diâmetro máximo característico e à área de superfície específica da AE-3222, considerado maior que o da AE-2215.

Na Figura 26 são apresentados os valores obtidos para as massas específicas no estado fresco. O valor apresentado para cada amostra é resultado de uma única determinação dessa medida, após retirada do concreto da betoneira.

Figura 26 – Massas específicas no estado fresco



Os valores de massa específica com os agregados leves AE-2215 e AE-3222, sem adição mineral, variaram entre 1583 e 1574 kg/m³, ou seja, uma variação de aproximadamente 0,6%.

Além disso, com base nos dados apresentados, percebe-se que os traços de referência possuem os menores valores para massa específica fresca. Essa propriedade apresentou um aumento conforme foram adicionados aos traços as adições minerais, onde, com o uso de MC obteve-se os traços com maiores valores de massa específica, representando um acréscimo de 2,08%, em média. Para os traços com o uso do RTCM obteve-se um aumento de 0,78%, em média, no valor da massa específica fresca.

Essa diferença está provavelmente relacionada ao fato de se usar materiais mais finos que cimento Portland, no caso das adições minerais, resultando em uma pasta aglomerante mais densa, em relação às amostras de referência. No caso deste trabalho, o MC possui uma área superficial específica maior que o RTCM, o que justifica a massa específica das amostras contendo MC serem maiores que as amostras contendo RTCM.

4.2. ANÁLISE DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Os valores obtidos de absorção de água e índice de vazios são apresentados nas Figuras 27e 28, respectivamente.

Figura 27 – Absorção de água das amostras

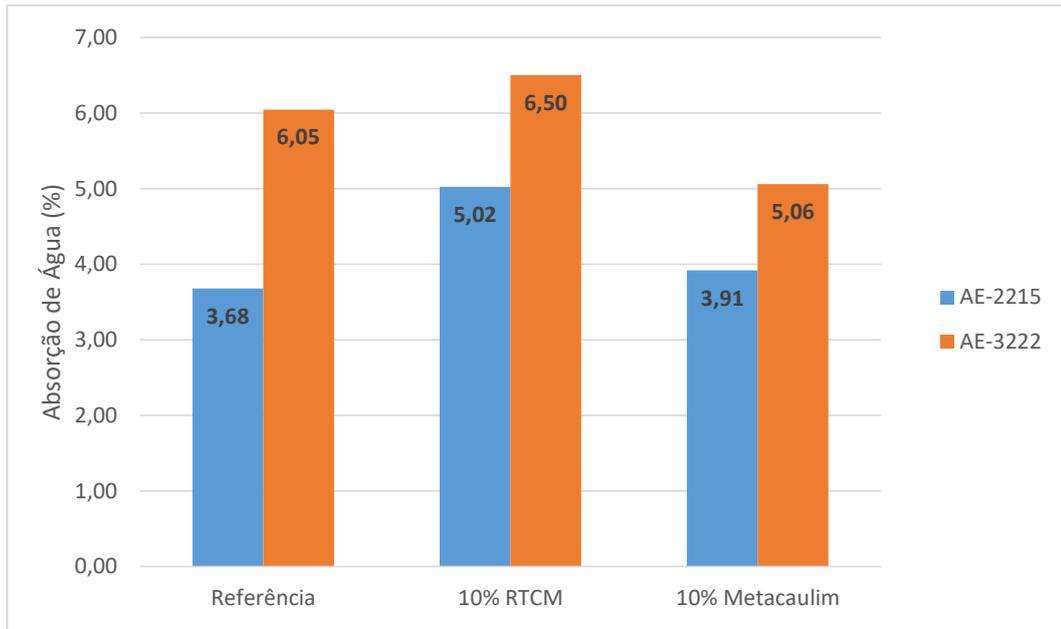
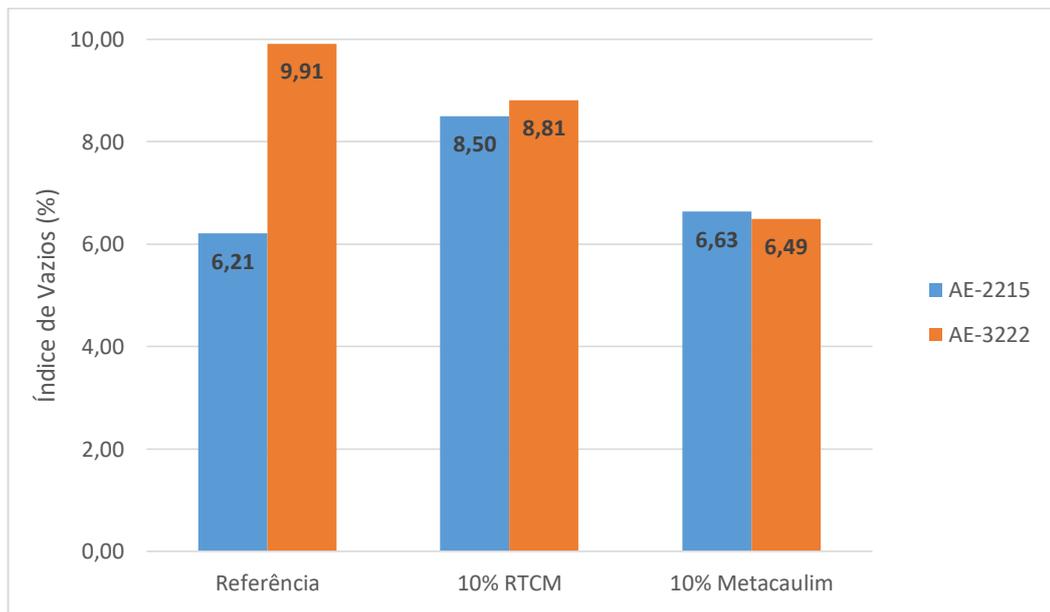


Figura 28 – Índice de vazios das amostras



De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 27 e 28 observa-se que, a mudança do agregado leve AE-2215 para AE-3222 apresentou mudanças significativas nas propriedades das amostras. Para a absorção obteve-se um aumento de 64,4%, ao mesmo tempo em que houve um aumento de 59,6% no índice de vazios. Este aumento era esperado, uma vez que, a AE-3222 apresenta maior diâmetro característico em relação a AE-2215, apresentando maior índice de vazios e, por consequência, maior porosidade.

Borja (2011) relata que com a utilização de adição mineral houveram melhorias na absorção de água, índice de vazios e porosidade total, contribuindo na redução da permeabilidade dos concretos.

Com relação às amostras contendo adições minerais, aquelas com RTCM apresentaram maiores valores de absorção de água e índice de vazios que as amostras contendo o MC, tanto para AE-2215 quanto para AE-3222. Comparando-se os resultados apresentados para o RTCM com os de MC, houve um aumento médio de 28,4% na absorção de água e 32% no índice de vazios. Este fato pode estar relacionado à menor área específica do RTCM quando comparado ao MC.

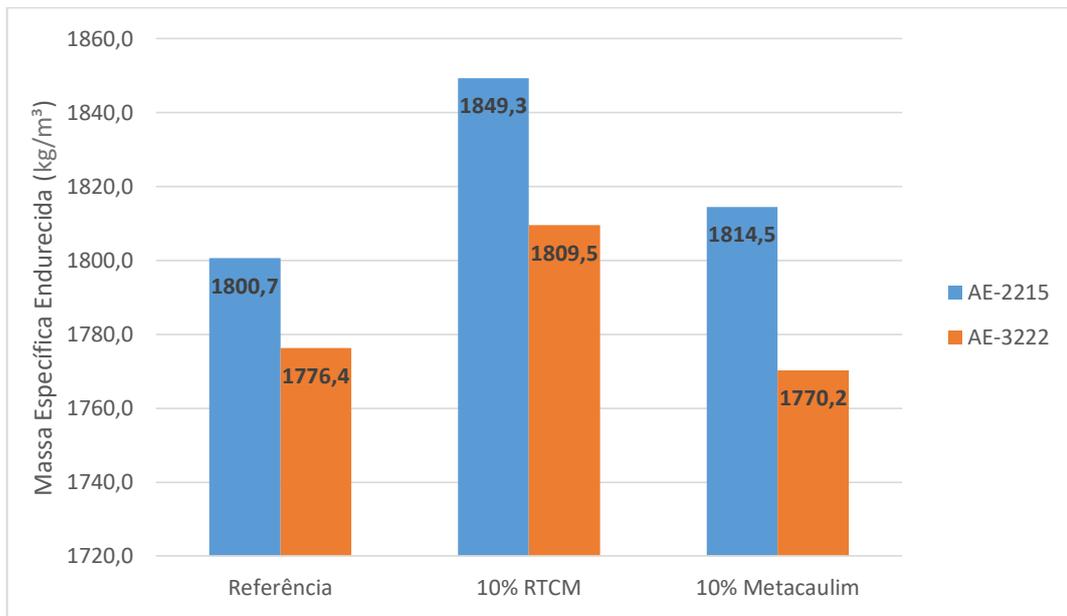
Dessa forma, o fato do RTCM não ser tão fino quanto o MC fez com que o mesmo preenchesse menos vazios na pasta cimentícia, propiciando à pasta um aumento no índice de vazios devido ao menor empacotamento das partículas e, conseqüentemente, apresentando uma maior absorção de água. Em contraste, o uso do MC permitiu maior preenchimento dos vazios da amostra, apresentando menores valores de absorção de água.

Ademais, como o RTCM se apresentou como material sem propriedades pozolânicas, conforme dados da Tabela 7, não houve contribuição da reação pozolânica nessas amostras, afim de se obter um concreto mais denso, ou seja, com menos poros que o concreto com MC. Comparando-se com as amostras sem adição mineral observa-se que, mesmo com RTCM ocorreu maior absorção, o que pode indicar que nem mesmo o efeito fíler do RTCM contribuiu para diminuição do índice de vazios.

Comportamento semelhante ao uso do metacaulim é relatado por Rossignolo & Oliveira (2006) ao afirmarem que, a utilização de 10% dessa adição mineral promoveu um aumento expressivo na melhora da absorção de água.

A Figura 29 apresenta os valores obtidos para a massa específica endurecida das amostras.

Figura 29 – Massa específica real endurecida das amostras



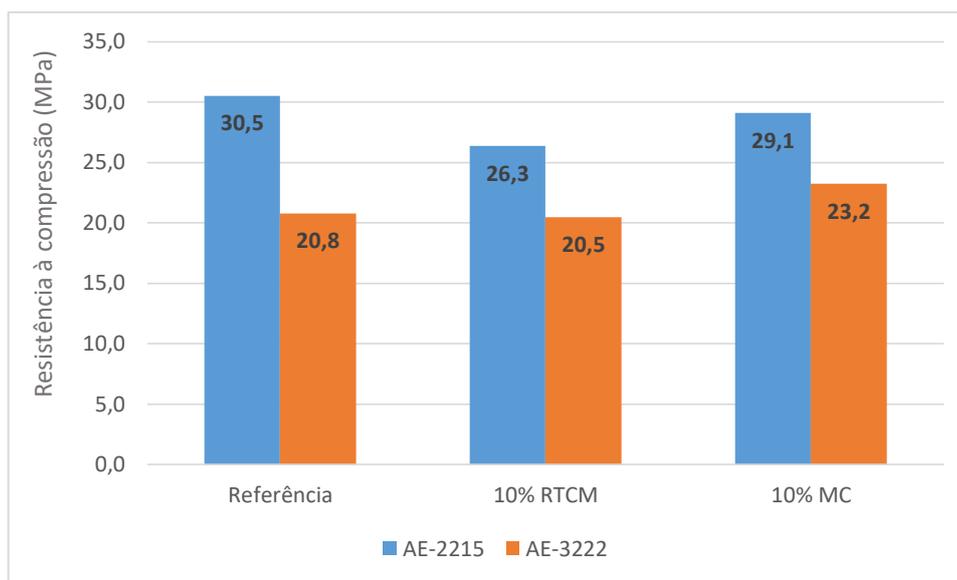
Com relação à massa específica endurecida observa-se que, os valores obtidos para as amostras em estudo se apresentaram de forma semelhantes e com poucas variações nos valores obtidos, sendo em média 1803 kg/m³. Esse comportamento pode indicar que o RCTM e o MC não interferiram essa propriedade das amostras quando adicionadas aos traços.

Além disso, todas as amostras podem ser classificadas como concretos leves de acordo com a Tabela 1, apresentada no capítulo 3 item 3.1.

. Comparando-se as amostras de referência, houve uma redução de 1,4% no valor da massa específica utilizando-se AE-3222 em relação a AE-2215. Esta diminuição era esperada uma vez que, de acordo com Rossignolo (2009), a diminuição no valor da massa específica dos concretos estruturais leves se deve à utilização de agregados com baixos valores de massa específica. Certamente, quanto menor for a massa específica do agregado leve utilizado, menor será a massa específica endurecida do concreto.

Os resultados de resistência à compressão obtido para as amostras são apresentados na Figura 30.

Figura 30 – Resultados de resistência à compressão



Conforme resultados apresentados na Figura 30, têm-se uma diminuição de 31,8% na resistência à compressão resultante da mudança do agregado leve AE-2215 para AE-3222. Este fato é explicado por Rossignolo (2009) ao afirmar que, agregados com estrutura muito porosa são menos resistentes que agregados com pouca estrutura porosa. Segundo o mesmo autor, a dimensão e granulometria dos agregados têm significativa influência nos valores da massa específica e da resistência à compressão nos concretos leves. De fato, o agregado leve AE-3222 apresenta dimensão máxima e índice de vazios maiores que a AE-2215, o que explica a redução no valor da resistência.

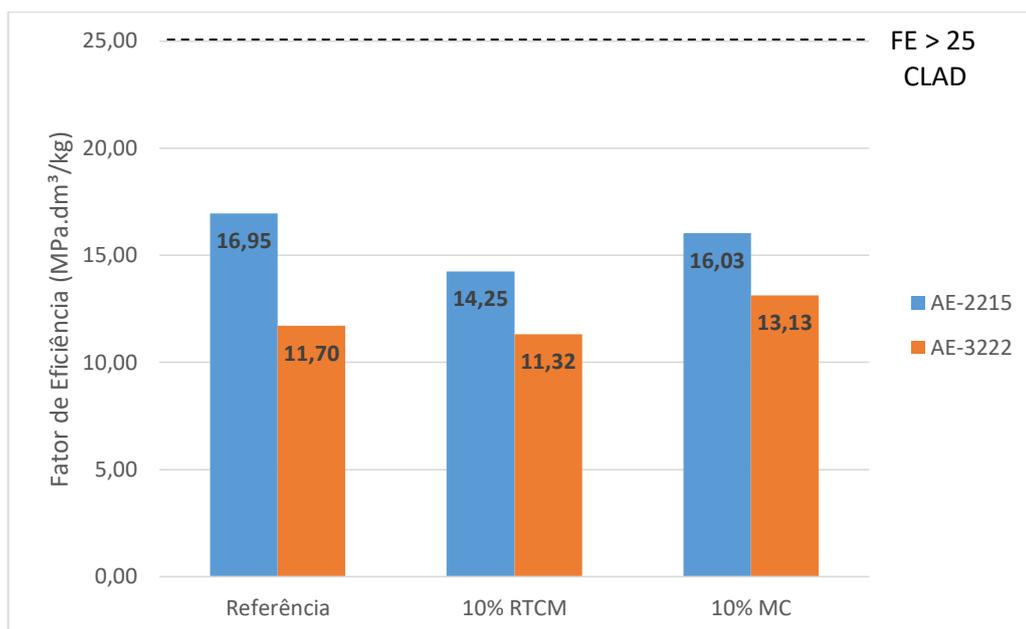
Além disso, para as amostras contendo a argila AE-2215, a resistência à compressão com o uso de MC diminuiu cerca de 4,6% em comparação às amostras de referência, enquanto que, com o uso do RTCM para o mesmo agregado leve acarretou em uma diminuição média de 13,8% no valor da resistência obtida. Para as amostras utilizando-se AE-3222, com o uso de MC houve um acréscimo de 11,5% na resistência à compressão, enquanto que, para o uso do RTCM com o mesmo agregado leve houve uma redução de 1,4% no valor da resistência final. Essa diminuição na resistência à compressão observada para as misturas contendo RTCM talvez se dê pelo fato de que o mesmo não possui atividade pozolânica tão eficiente quanto o MC.

O comportamento da resistência à compressão do concreto com adição de 10% de RTCM já era esperado uma vez que, Sales & Alfares Filho (2014) afirmam ter encontrado uma redução de 11% dessa propriedade para a substituição de 10% do cimento, aos 28 dias.

Comportamentos semelhantes foram relatados por Rossignolo & Oliveira (2006) ao afirmarem que, o uso de 10% de MC melhorou o desempenho de resistência à compressão e da absorção de água por imersão.

A partir dos valores de massa específica seca e resistência à compressão pôde-se determinar o fator de eficiência para as amostras, segundo a Equação (1) apresentada no capítulo 3 item 3.1., para as amostras. Os valores obtidos estão apresentados na Figura 31.

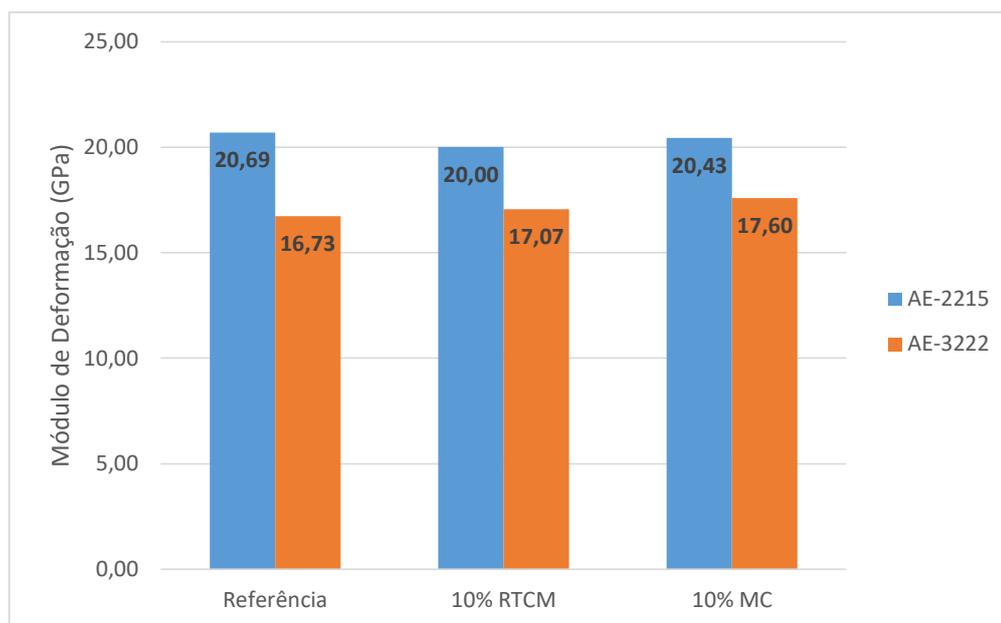
Figura 31 – Fator de eficiência para as amostras



Observa-se que, as mudanças mais expressivas ocorreram com a utilização do RTCM nas amostras com AE-2215, apresentando uma diminuição de 11,8% no fator de eficiência, e nas amostras com AE-3222 contendo adição do MC, apresentando um aumento de 12,2% na propriedade. Segundo Spitzner (1994) e Armelin et al. (1994), para que o concreto leve seja considerado de alto desempenho (CLAD) o mesmo deverá ter um fator de eficiência acima de 25 MPa.dm³/kg, fato este que não ocorreu com as amostras em estudo.

O módulo de deformação das amostras foi calculado através da Equação (2), apresentada no capítulo 3 item 3.1., e está apresentada na Figura 32.

Figura 32 – Módulo de deformação das amostras



De acordo com os resultados ilustrados na Figura 32, percebe-se que os valores calculados apresentaram pouca variação com a adição mineral podendo-se afirmar que, não ocorreram mudanças significativas sobre esta propriedade com a utilização das adições minerais.

Em contrapartida, a mudança do agregado leve AE-2215 para AE-3222 apresentou significativa alteração nesta propriedade, representando uma diminuição de 19,1% quando comparados as amostras de referência. Segundo Rossignolo (2009), o módulo de deformação está diretamente relacionado com o tipo e com a quantidade de agregado leve utilizado. Assim, de acordo com a Tabela 9, esta diminuição se dá ao fato do agregado leve AE-3222 possuir módulo de deformação inferior ao da AE-2215.

Rossignolo & Oliveira (2006) obtiveram resultados semelhantes, onde o módulo de deformação aos 28 dias variou de 9,8 GPa a 19,3 GPa, em concretos leves com agregado leve de dimensão máxima de 19 mm. Para concretos leves com utilizando agregado leve com dimensão máxima de 12,5 mm os mesmos autores obtiveram valores entre 11,5 e 20,8 GPa para o módulo de deformação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta um estudo das propriedades do concreto estrutural leve contendo argila expandida de dois diâmetros característicos diferentes e com adições minerais, de metacaulim e resíduo de tijolos cerâmicos, substituindo parcialmente o cimento Portland na confecção de concretos. Para isso, avaliou-se as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido.

De modo geral, os resultados obtidos nesta pesquisa mostraram que o aumento do diâmetro máximo característico do agregado leve não altera de forma significativa a massa específica endurecida do concreto. Em contraste, a resistência à compressão, índice de vazios e absorção de água e módulo de deformação sofrem significativas alterações com este aumento. Portanto, essas mudanças nas propriedades do concreto estrutural leve devem ser levadas em conta no momento de escolha do agregado leve a ser utilizado na dosagem.

Apesar de representar uma alternativa sustentável e economicamente mais viável, o uso de 10% de resíduo de tijolos cerâmicos não se mostrou benéfico para utilização em concretos, uma vez que promoveu significativos aumentos em propriedades como absorção de água, índice de vazios e diminuição na resistência à compressão. O módulo de deformação não sofreu significativas mudanças com a utilização do mesmo.

Por outro lado, a utilização do metacaulim se mostrou eficiente quanto ao desempenho da resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e módulo de deformação.

Estes resultados apontam que, apesar do agregado leve ser um fator limitante nos concretos estruturais leves, as adições minerais podem promover melhorias no desempenho de algumas propriedades, como: módulo de deformação, índice de vazios e resistência à compressão.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de continuidade e aprofundamento da presente pesquisa, têm-se:

- a) Realizar estudo com outro tipo de cimento;
- b) Utilizar argila expandida com dimensão máxima característica inferior;
- c) Utilizar polímeros no concreto estrutural leve; e
- d) Testar diferentes porcentagens de adição mineral.

REFERÊNCIAS

AÏTCIN, PC. **High performance concrete**. 624 f. London, 2011.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. **Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete**. ACI – 213R-87. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 27 f, 1997.

ARMELIN, H. S.; LIMA, M. G.; SELMO, S. M. S. Alta resistência com argila expandida. **Revista IBRACON**, v. 9, Brasil, 1994, p. 42-47.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11172**: Aglomerantes de origem mineral. Rio de Janeiro, 1990.

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

_____. **NBR 5738**: Concreto-Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9776**: Agregados - Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos por Meio do Frasco Chapman. São Paulo, 1987.

_____. **NBR. 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005

_____. **NBR. 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008

_____. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR NM 35**: Agregados leves para concreto estrutural: especificação. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da Massa Unitária e do Volume de Vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 53**: Agregado Graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

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

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

_____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Especificação. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 15575-1**: Edifícios habitacionais: desempenho - parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

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

_____. **NBR NM ISO 3310/1**: Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação. Rio de Janeiro, 1997.

ASTM, C. 125: **Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates**. Annual Book of ASTM Standards. 2003.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Histórico e principais elementos estruturais de concreto armado**. 16 f. Notas de Aula. São Paulo, 2006.

BORJA, E. V. de. **Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis**. 231 f. Tese de Doutorado. Natal, 2011.

BRITO, F. V. **Processamento de meios porosos à base de sílica**. 165 f. Dissertação de mestrado, Rio de Janeiro, 2005.

CEN - COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. CEN-prEN 205-25. **Béton. Performances, production et conformité.** 67 f. 1999.

CINEXPAN. **Tipos de Argila Expandida.** Disponível em: <<https://www.cinexpan.com.br/argila-expandida-cinexpan.html>>. Acesso em: 15 abr. 2019.

_____. ARGILA EXPANDIDA. **Ficha Técnica da argila expandida 2215.** Disponível em: <<https://www.cinexpan.com.br/pdf/ficha-tecnica-tipo-2215.pdf>>. Acesso no dia 17 de março de 2019.

_____. ARGILA EXPANDIDA. **Ficha Técnica da argila expandida 3222.** Disponível em: <<https://www.cinexpan.com.br/pdf/ficha-tecnica-tipo-3222.pdf>>. Acesso no dia 17 de março de 2019.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON and FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎTE – CEB-FIP. **Lightweight aggregate concrete – Manual of design and technology.** 169 f. 1977.

DE CARVALHO, João Dirceu Nogueira. Sobre as origens e desenvolvimento de concreto. **Revista Tecnológica.** 19 f. 2010.

DE SOUZA REZENDE, Maria Luiza et al. Uso de metacaulim em concreto seco: uma abordagem por superfície de resposta. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, 2012, p. 135-146.

EUROCODE 2. **Design of Concrete Structures.** New York, 1999.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎTE (FIP). **Manual of Lightweight Aggregate Concrete.** 259 f. Surrey University Press, Glasgow, 1983.

FILHO, J. S. A. **Influência de Adições Pozolânicas na Reologia de Pastas Cimentícias.** Artigo. Ibracon. 15 f. Paraná, 2018.

GIACOMIN, R. C. **Estudo das propriedades do concreto com argila expandida.** Trabalho de Conclusão de Curso. PUCRS, Porto Alegre. 2005.

GONÇALVES, J. P.; TOLEDO F. R. D.; FAIRBAIRN, E. de M. R. **Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica.** Artigo. 12 f. 2006.

HOLM, T. A.; BREMNER, T. W. **State-of-the-art report on high-strength, high-durability structural low-density concrete for applications in severe marine environments**. 1126 f. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, 2000.

LACERDA, C. S.. **Estudo da Influência da Substituição de Cimento Portland por Metacaulim em Concretos**. 20 f. EPUSP, São Paulo, 2005.

LIMA, S. F. et al. **Concreto e suas inovações**. Caderno de Graduação. UNIT, Alagoas, 2014, p. 31-40.

LUCENA, A. E. de F. **Materiais de Construção II**. Notas de Aula, 30 f, Paraíba, 2017.

MAILVAGANAM, N. P. **Admixture compatibility in special concretes**. Special Publication. 1999, p. 615-634,

MAYCÁ, J.; CREMONINI, R. A.; RECENA, F. A. **Contribuição ao estudo da argila expandida nacional como alternativa de agregado graúdo para concretos leves estruturais (CLE)**. Artigo. 16f, UFRGS, Rio Grande do Norte, 2006.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. **Revista Ibracon**, 2008.

NACIONAL. CP-V ARI MAX. **Melhores desempenho e custo-benefício**. Disponível em: <<http://www.cimentonacional.com.br/public/uploads/files/produtos/cpi-ari-max/arquivo.pdf>>. Acesso em: 29 mai. 2019.

NEWMAN, J. B. **Properties of structural lightweight aggregate concrete**. Structural lightweight aggregate concrete, 1993, p. 19-44.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 912 f. Editora PINI, São Paulo, 1997.

NORTE, Telha. Disponível em: <<https://telhanorte.vteximg.com.br/arquivos/ids/335611-480-480/Cimento-CP-V-40kg-cinza-Nacional.jpg?v=636755504401000000>>. Acesso em: 20 mai. 2019.

NORWEGIAN COUNCIL FOR BUILDING STANDARTIZATION. NS 3473 E 1992 – **Concrete structures design rules**. Oslo. 78 f, 1992.

PEDROSO, F. L. **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem**. **Concreto e Construções**. **Revista Ibracon**, 80 f, São Paulo, 2009, p. 14-19.

RILEN – INTERNATIONAL UNION OF TESTING AND RESEARCH LABORATORIES FOR MATERIALS AND STRUCTURES. **Terminology and Definitions of Lightweight Concrete**, 6 f, 1975.

RIPPER, E. **Manual prático de materiais de construção: recebimento, transporte interno, estocagem, manuseio e aplicação**. Editora Pini, São Paulo, 1995.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos-dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. Tese de Doutorado. 220 f. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. VC. Concreto estrutural leve. ISAIA, GC Concreto: ensino, pesquisa e realizações. **Revista Ibracon**. São Paulo. 2005.

ROSSIGNOLO, J. A.; OLIVEIRA, I. L. **Concreto leve estrutural com metacaulim**. Artigo. 2006, p. 177-187.

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

SALES, A. T. C.; ALFERES FILHO, R. dos S.. Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto. **Revista Ambiente Construído**. Sergipe, 2014, p.113-125.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de argilas**. 234 f. E. Blucher, São Paulo, 1992.

SEYE, O. et al. **Melhoramento do processo produtivo de cerâmica estrutural como ação mitigadora para estabilização ou redução adicional nas emissões de gases de efeito estufa**. Projeto BRA/00/014, Fundo Nacional do Meio Ambiente, Programa de Geração de Conhecimento em Mudanças Climáticas e Desertificação, Programa Brasil - Holanda. NEFEN/UFAM. Relatório Final. 200 f. Manaus, 2003.

SILVA, B. M. M. et al. **Betão leve estrutural com agregados de argila expandida**. 180 f. Porto, 2008.

SOUZA, P. S. L. **Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência**. 203 f. Tese de Doutorado. Porto Alegre, 2003.

SPITZNER, J. **High-strength LWA concrete. High-Strength Concrete**. RILEM Cap. II–Aggregates, 1994.

SUSSEKIND, J. C. **Curso de Concreto** – Vol. 1 e 2 – Ed. Globo – RJ –1980.

VIEIRA, M. G. **Betões de elevado desempenho com agregados leves – Durabilidade e microestrutura**. Dissertação de mestrado. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2000.

VIEIRA, A. de A. P. et al. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos**. 129 f. Dissertação de Mestrado. João Pessoa, 2005.

ZAMARION, F. D. J. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. Concreto e Construções. **Revista Ibracon**, 80 f, São Paulo, 2009, p. 8-13.

ZHANG, MH; GJØRV, OE. **Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste**. Cement and Concrete Research, v. 20, n. 4, 1990, p. 610-618

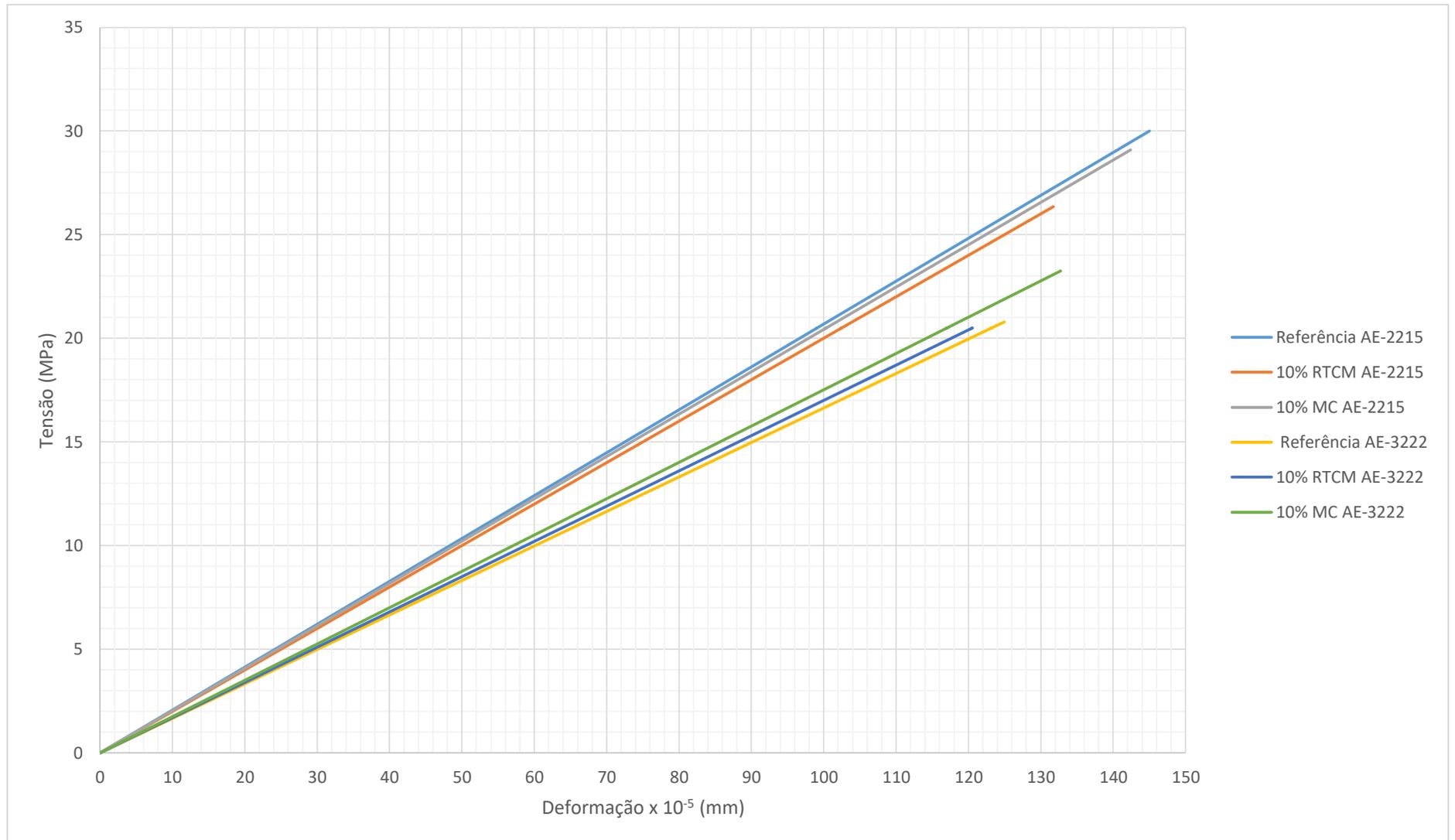
APÊNDICE

Tabela 20 – Resumo com resultados obtidos

Traço		Abatimento de Tronco de Cone (mm)	Massa Específica Fresca (kg/m ³)	Massa Específica Endurecida (kg/m ³)	Resistência Média (MPa)	Módulo de Deformação Calculado (GPa) (ROSSIGNOLO, 2005)	Fator de Eficiência (MPa.dm ³ /kg)	Índice de Vazios (%)	Absorção (%)
AE-2215	Sem adição	90,0	1583,76	1800,7	30,53	20,69	16,95	6,21	3,68
	10% RTCM	70,0	1601,51	1849,3	26,35	20,00	14,25	8,50	5,02
	10% MC	75,0	1608,33	1814,5	29,09	20,43	16,03	6,63	3,91
AE-3222	Sem adição	110,0	1574,20	1776,4	20,79	16,73	11,70	9,91	6,05
	10% RTCM	90,0	1581,03	1809,5	20,48	17,07	11,32	8,81	6,50
	10% MC	89,0	1615,16	1770,2	23,25	17,60	13,13	6,49	5,06

Fonte: O autor (2019)

Figura 33 – Deformação das amostras com aplicação das tensões.



Fonte: O autor (2019)