



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS



Faculdade de Tecnologia

ARIANE ROBERTO BECKER

ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E
ACÚSTICAS DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIUDO POR ARGILA
EXPANDIDA

LIMEIRA

2021

ARIANE ROBERTO BECKER

ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E ACÚSTICAS DE
ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO
AGREGADO MIUDO POR ARGILA EXPANDIDA

Dissertação apresentada à Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestra em Tecnologia, na Área de Ciências dos Materiais.

Orientadora: Prof.^a. Doutora Luísa Andréia Gachet

Este trabalho corresponde à versão final da
Dissertação defendida por Ariane Roberto Becker e
orientada pela Prof.^a Doutora Luísa Andreia Gachet.

LIMEIRA

2021

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia
Felipe de Souza Bueno - CRB 8/8577

B388e Becker, Ariane Roberto, 1991-
Estudo das propriedades físico-mecânicas e acústicas de argamassas produzidas com substituição parcial do agregado miúdo por argila expandida / Ariane Roberto Becker. – Limeira, SP : [s.n.], 2021.

Orientador: Luísa Andréia Gachet Barbosa.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia.

1. Argamassa. 2. Argila expandida. 3. Microestrutura. I. Barbosa, Luísa Andréia Gachet, 1970-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Study of the physical-mechanical and acoustic properties of mortars produced with partial replacement of small aggregate by expanded clay

Palavras-chave em inglês:

Mortar

Expanded clay

Microstructure

Área de concentração: Ciência dos Materiais

Titulação: Mestra em Tecnologia

Banca examinadora:

Luísa Andréia Gachet

Victor José dos Santos Baldan

Patrícia Stella Pucharelli Fontanini

Data de defesa: 30-09-2021

Programa de Pós-Graduação: Tecnologia

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0003-4782-5483>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/6228253223432943>

FOLHA DE APROVAÇÃO

Abaixo se apresentam os membros da comissão julgadora da sessão pública de defesa de dissertação para o Título de Mestra em Tecnologia na área de concentração de Ciências dos Materiais, a que submeteu a aluna Ariane Roberto Becker, em 30 de setembro de 2021 na Faculdade de Tecnologia- FT/ UNICAMP, em Limeira/SP.

Prof.^a Dr.^a Luísa Andréia Gachet

Presidente da Comissão Julgadora

Prof. Dr. Victor José dos Santos Baldan

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

Prof.^a Dr.^a Patrícia Stella Pucharelli Fontanini

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

A Ata da defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria de Pós-Graduação da FT.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Marcio e Eliana, e meus familiares que de alguma forma contribuíram com todo amor, carinho, sem vocês essa jornada de trabalhos e estudos seria impossível.

Ao meu namorado Alexandre, pelo incentivo, apoio emocional, compreensão e carinho ao longo desses anos de estudo.

À Faculdade de Tecnologia (FT/UNICAMP) pela oportunidade e suporte técnico para a realização desta pesquisa de mestrado.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Luísa Andréia Gachet, e à Prof.^a Dr.^a Rosa Cristina Cecche Lintz e, pela valiosa orientação, apoio, amizade e incentivo ao longo desses anos, que foram fundamentais à realização desta pesquisa.

Aos meus amigos de longa data, Augusto e Ariane, pelo incentivo e compreensão ao longo desta jornada.

À todos os amigos que fiz nessa jornada, pelo companheirismo, incentivo e pela nova família que ganhei na FT.

Aos técnicos do Laboratório de Construção Civil da FT, Diego Leandro Thomaz e Reginaldo Ferreira, e aos bolsistas, pelo apoio e auxílio técnico.

À Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/UNICAMP), por intermédio do técnico Paulo G. K. Nunes, por possibilitar a realização do ensaio ultrassônico.

À empresa CINEXPAN S.A., pelo fornecimento dos materiais utilizados nesta pesquisa.

Ao CNPQ pelo financiamento do projeto #406234/2018-3 e à FAPESP 2018/14945-0, que possibilitaram a realização desse estudo.

Ao CNPQ pela bolsa produtividade # 310375/2020-7.

À CAPES pela bolsa de mestrado concedida.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

A inserção de materiais alternativos na produção de concretos, têm se mostrado muito eficiente, pois, além de ter um viés sustentável, também melhora em muitos casos, as principais propriedades dos materiais. Dentre esses, a argila expandida vem sendo utilizada na produção de argamassas e concretos, substituindo parcialmente o agregado, diminuindo consideravelmente sua massa específica. Levando em consideração as necessidades do mercado, bem como a adequação a atual norma de desempenho, realizou-se nesta pesquisa experimental a análise das principais propriedades das argamassas nos estados, fresco e endurecido. Para tanto, foram produzidos traços de argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos, em que o agregado miúdo foi parcialmente e gradativamente substituído por argila expandida, em duas granulometrias distintas e com diâmetro máximo de 4.8 milímetros. Tanto os resultados dos ensaios no estado fresco, como no endurecido, atenderam as prescrições da norma. Os traços apresentaram boas características no estado fresco, garantindo a trabalhabilidade da argamassa. E no estado endurecido, as características mecânicas foram próximas aos encontrados em argamassas convencionais, e foram devidamente classificadas pela ABNT NBR 13281:2005. Também foram analisadas as imagens de microscopia das argamassas para melhor entendimento do comportamento da microestrutura. Concluindo, portanto, a viabilidade do uso da argila expandida na argamassa, contribuindo para a preservação de recursos naturais.

Palavras-chave: argamassa, argila expandida, resistência mecânica, trabalhabilidade, microestrutura

ABSTRACT

The inclusion of alternative materials in the production of concrete has been shown to be very efficient, as, in addition to having a sustainable bias, it also improves, in many cases, the main properties of the materials. Among these, expanded clay has been used in the production of mortar and concrete, partially replacing the aggregate, considerably reducing its specific mass. Taking into account the needs of the market, as well as the adequacy to the current performance standard, this experimental research carried out the analysis of the main properties of mortars in the fresh and hardened states. For this purpose, mortar traces were produced for laying and covering walls and ceilings, in which the fine aggregate was partially and gradually replaced by expanded clay, in two different granulometries and with a maximum diameter of 4.8 millimeters. Both the test results in the fresh and hardened state met the requirements of the standard. The traces showed good characteristics in the fresh state, ensuring the workability of the mortar. And in the hardened state, the mechanical characteristics were close to those found in conventional mortars, and were duly classified by ABNT NBR 13281:2005. Mortar microscopy images were also analyzed to better understand the behavior of the microstructure. Therefore, concluding the feasibility of using expanded clay in mortar, contributing to the preservation of natural resources.

Key-words: mortar, expanded clay, mechanical strength, workability, microstructure

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	12
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	ARGAMASSA	14
2.1.1	Componentes para argamassa de assentamento e revestimento de tetos e paredes	16
2.2	ARGILA EXPANDIDA	25
2.2.1	Processos de fabricação da argila expandida	26
2.2.2	Estrutura física e seu comportamento	29
2.2.3	Porosidade e absorção de água	30
2.2.4	Argila expandida nacional	30
2.3	PROPRIEDADES ACUSTICAS DAS ARGAMASSAS	32
2.3.1	Propriedades Físicas do Som	34
2.3.2	Fenômenos de propagação do som	34
2.3.2.1	Reflexão, Refração e Absorção do Som	34
2.3.2.2	O ruído	35
2.3.3	Tratamento acústico	38
2.3.3.1	Isolação e Isolamento acústico	38
2.3.3.2	Absorção acústica	39
2.4	MICROESTRUTURA DAS ARGAMASSAS	41
2.4.1	Zona de transição nos concretos com agregados leves	47
2.4.2	Análise da microestrutura por MEV	47
3.	MATERIAIS E METODOS	51
3.1	MATERIAIS	53
3.1.1	Cimento Portland	53
3.1.2	Agregado Miúdo	53

3.1.3	Água-----	53
4.1.4	Argila Expandida -----	54
3.2	MÉTODOS -----	55
3.3	Composição e Preparo das Argamassas -----	59
3.4	Ensaio no Estado Fresco -----	64
3.4.1	Determinação do Índice de Consistência -----	64
3.4.2	Determinação da Densidade e Teor de Ar Incorporado -----	66
3.4.3	Determinação da Retenção de Água -----	67
3.5	Ensaio no Estado Endurecido -----	68
3.5.1	Resistência a Tração na Flexão-----	68
3.5.2	Resistência a Compressão Axial-----	69
3.5.3	Densidade de Massa Aparente-----	70
3.5.4	Determinação da Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade-----	71
3.5.5	Determinação da resistência Potencial da Aderência a tração ----	72
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO-----	81
4.1	Caracterização Física -----	81
4.1.1	Cimento Portland – CPV ARI -----	81
4.1.2	Agregado Miúdo – Areia -----	82
4.1.3	Argila Expandida – 5mm e laminada 2,5mm-----	83
4.2	Propriedade das Argamassas em Estado Fresco-----	85
4.3	Propriedade das Argamassas em Estado Endurecido -----	87
4.3.1	Resistencia a Tração na Flexão e Compressão Axial -----	87
4.3.3	Densidade de Massa Aparente-----	89
4.3.4	Resistencia potencial da aderência a tração-----	90
4.3.5	Propriedades Acústicas -----	91
4.3.6	Microestrutura-----	94

5. CONCLUSÃO	106
5.1 Sugestão para futuros estudos	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

1. INTRODUÇÃO

A utilização de novos materiais na construção civil, já é uma realidade diária nos canteiros de obra pelo país, porém, em alguns casos ainda é restrita a substituições por similaridade, sem grandes inovações. O campo da pesquisa de ciências dos materiais, vem trabalhando para a inclusão de novos materiais e a substituição dos convencionais, por outros, com um viés sustentável e que tenham fontes recicláveis; auxiliando assim, que o meio se torne parte do movimento ambientalista, que busca combater os efeitos provocados pelos danos causados ao planeta.

Em conjunto a essa pauta, a recente introdução da norma de desempenho para edificações (ABNT NBR 1575:2013), priorizando condições ideais de conforto e segurança nas edificações, procura-se estudar novas aplicações de materiais alternativos, e que possam substituir de forma adequada, os materiais já consolidados no mercado.

A diversificação de usos para os materiais mostra-se como uma alternativa sustentável e necessária, uma vez que mudanças climáticas e condições ambientais extremas, mostram-se uma realidade cada dia mais presente, e com isso a forma de construir precisa buscar meios de adequação aos novos tempos e necessidades.

As argamassas estão presentes em diversas etapas da construção civil: assentamento de tijolos e blocos, acabamentos de paredes e lajes. Sendo assim, o estudo das argamassas é essencial para o contínuo processo de melhoria e inovação. Sendo assim, o desenvolvimento de argamassas leves é de grande interesse para a construção civil, pois possibilitam a diminuição do peso das estruturas, aliviando a própria estrutura e conseqüentemente suas fundações, criando novas opções para o desenvolvimento de projetos estruturais, uma vez que uma parte significativa do custo da obra, está embutido na execução das estruturas portantes, e uma vez que elas se tornem mais leves e permaneçam resistentes, os custos dessa etapa podem ser diminuídos (ISAIA, 2010).

No caso das argamassas, aplicadas como material de revestimento em paredes e lajes, adicionar desempenho térmico e acústico, é um diferencial

inovador e vantajoso. Para tanto, faz-se substituição de agregados miúdos tradicionais por agregados leves ou resíduos (ANGELIN et al., 2020). O uso dos agregados leves na produção de materiais cimentícios é geralmente associado aos materiais convencionais. Dentre os agregados leves empregados em argamassas podem ser citados o poliestireno expandido - EPS, (Silva, 2020), etileno acetato de vinila – EVA, (Tutikian, 2017), cortiça natural e expandida (Barroca, 2015), vermiculita expandida (Araújo et al, 2020), resíduo de corte de pedras ornamentais (granitos e mármore) e argila (Souza, 2020), resíduos de borracha inservíveis (Gomes, 2020; Covaes, 2018; KURS et al, 2018).

Como citado anteriormente, diversos estudos tem sido realizado empregando materiais alternativos na produção de concretos e argamassas. Este estudo desenvolve uma argamassa de assentamento e revestimento em que o agregado miúdo foi parcialmente e gradativamente substituído por argila expandida, em duas granulometrias distintas e com diâmetro máximo de 4,8 milímetros, e compara seu desempenho com as argamassas convencionais. Essa substituição não foi abordada, evidenciando, assim, a importância desta pesquisa.

1.1 Objetivos

Este estudo tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma argamassa para assentamento e revestimento, com substituição parcial do agregado miúdo por argila expandida em duas granulometrias distintas, 5mm (tipo C0500) e 2,5mm laminada, inferiores a 4,8 milímetros e o estudo de suas características mecânicas, acústicas e microestrutura.

Por meio da proposição principal para a formulação de argamassas com argila expandida, outros aspectos foram estudados, a fim da determinação da composição com melhor custo-benefício para utilização proposta, são eles:

- A caracterização física dos componentes da argamassa (cimento, areia e argila expandida);

- Desenvolvimento de traços de argamassas com 5%, 10%, 15% e 20% de substituição de agregado miúdo por argila expandida, e um traço referência sem substituição.
- Análise das propriedades mecânicas e validação dos traços desenvolvidos para uso proposto;
- Caracterização da composição química, morfológica e mineralógica da argamassa com argila expandida;
- Análise da microestrutura da argamassa desenvolvida;
- Análise das propriedades acústicas das argamassas;
- Determinar o traço com o melhor teor de substituição de agregado miúdo por argila expandida.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ARGAMASSA

Segundo Carasek (2010), argamassas são materiais de construção, com propriedades de aderência e endurecimento, obtidas por meio de uma mistura homogênea entre aglomerantes, agregados miúdos e água, podendo ou não conter adições ou aditivos. São amplamente empregados na construção civil, tendo como aplicação principal, sua utilização para assentamento nas alvenarias e nas etapas de revestimento, como emboço e reboco.

As argamassas podem apresentar diversas composições, com a modificação dos aglomerantes utilizados na mistura, podendo variar entre materiais como cal, gesso e cimento. As atualmente produzidas no Brasil, possuem em sua composição o uso prioritário de cimento Portland, podendo conter adições ou aditivos para melhorar suas propriedades de trabalhabilidade. Podem ser classificadas com relação ao traço e seus materiais constituintes e também em relação a sua função. (ISAIA, 2010). De acordo com a ABNT NBR 13281:2005, os diversos tipos de argamassas devem ser utilizados para os fins recomendados, uma vez que cada traço determina suas principais propriedades, e de acordo com essas propriedades são classificadas quanto ao uso (Quadro 01).

Quadro 01: Classificação quanto ao uso de argamassas de acordo com a ABNT NBR 13281:2005.

Tipos de Argamassa	Uso Recomendado
Assentamento	Fazer a união entre os componentes da alvenaria (blocos e tijolos), podendo ser comuns ou estruturais.
Encunhamento	Assentamento da última fiada de um componente de vedação.
Revestimento de tetos e paredes	Podem ser usadas como emboço, camada única e sua utilização é diferenciada dependendo do local de aplicação, sendo interno ou externo.
Reboco ou massa fina	Cobrimentos de emboços, uniformizando as superfícies. Podem ter caráter decorativo, se utilizados em camadas finas.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 13281:2005.

As argamassas ainda podem ser classificadas como industrializadas ou dosadas em obra; como aéreas ou hidráulicas e de acordo com o aglomerante

utilizado, podendo ser mistas - compostas por mais de um tipo de aglomerante - ou simples, tendo como aglomerante base o cimento.

Para que a argamassa tenha o desempenho desejado deve realizar as funções de:

- Regularizar a superfície das alvenarias, criando uma base sem imperfeições para receber os acabamentos finos, seja pintura ou outros tipos de revestimento;
- Atuar como isolante térmico e acústico, ao conjunto de vedação;
- Proporcionar estanqueidade à edificação;
- Apresentar textura uniforme, livre de imperfeições, fissuras, manchas ou eflorescências;
- Capacidade de absorver as deformações sem a ocorrência de microfissuras.

Dentre as funções desempenhadas destacam-se suas propriedades de aderência, deformabilidade, trabalhabilidade e resistência mecânica. A aderência, é a característica que permite que os elementos ligados ou revestido com este material, resistam as tensões de cisalhamento e de tração, além de garantir a estanqueidade das juntas, impedindo a infiltração de água e proporcionar a distribuição igualitária as cargas atuantes no local de aplicação. Elas devem apresentar bons coeficientes de deformabilidade em estado endurecido, afim de absorver as pequenas e constantes deformações que ocorrem durante sua vida útil no conjunto construtivo (CARASEK, 2010; ROMANO et al. 2016; MACIEL et al,2018).

Da mesma forma, a resistência mecânica deve possuir características que ajudem no trabalho do conjunto, como por exemplo, uma parede, a resistir aos esforços laterais. Quando em estado fresco, a trabalhabilidade é avaliada, buscando sempre consistências que beneficiem a facilidade de uso, seja no transporte ou aplicação, fazendo com que o processo de cura dessa argamassa seja homogêneo, gerando uma peça uniforme que trabalha todos os aspectos citados acima de forma coesa e satisfatória (CINCOTTO et al. 1995; CARASEK, 2010).

O estudo de trabalhabilidade, deformabilidade e resistência mecânica são amplamente difundidos e de fácil aplicação, que geram resultados rápidos e de fácil avaliação. Já para as propriedades de aderência, segundo Carasek (2010), como um fenômeno essencialmente mecânico, devido a capacidade de penetração da fase de pasta da argamassa a seu substrato de aplicação, devem ser estudadas além do nível macroscópico, levando a uma análise da microscopia das ligações entre a pasta e seus agregados miúdos e também dessa argamassa em relação ao substrato. No interior dos poros, nas cavidades do substrato e na zona de transição entre pasta e agregados, ocorrem fenômenos de precipitação dos produtos de hidratação do cimento, que após um tempo de reação exercem ação de ancoragem entre os materiais (DIAMOND 1986; MEHTA E MONTEIRO, 2014).

2.1.1 Componentes para argamassa de assentamento e revestimento de tetos e paredes

Para que os revestimentos de argamassa possam cumprir adequadamente as suas funções, eles precisam apresentar um conjunto de propriedades específicas, que são relativas à argamassa nos estados fresco e endurecido. A ABNT NBR 13281:2005 determina esses requisitos, para que argamassas de assentamento e revestimento de tetos e paredes atendam as propriedades mínimas estabelecidas, sejam elas dosadas e produzidas em central, *in loco* ou industrializadas.

O entendimento dessas propriedades e dos fatores que influenciam a sua obtenção permite prever o comportamento do revestimento nas diferentes situações de uso. As principais propriedades da argamassa no estado fresco, que resultam nas propriedades do estado endurecido, estão apresentadas no Quadro 02.

Quadro 02: Principais características de argamassas nos estados fresco e endurecido.

Estado Fresco	Estado Endurecido
---------------	-------------------



Massa específica e teor de ar incorporado	Aderência
Retenção de água	Deformabilidade
Trabalhabilidade	Resistência mecânica
Aderência Inicial	Resistência ao desgaste
Retração na secagem	Durabilidade

Fonte: ABCP, 2012.

2.1.1.1 *Trabalhabilidade*

É uma propriedade de avaliação qualitativa e complexa de ser determinada. Essa propriedade depende de todas as etapas do preparo e uso de uma argamassa, em especial do preparo e conhecimento dos componentes deste material. De forma geral, uma argamassa é considerada trabalhável quando:

- deixa penetrar facilmente a colher de pedreiro, sem ser fluida;
- mantém-se coesa ao ser transportada, mas não adere à colher ao ser lançada;
- distribui-se facilmente e preenche todas as reentrâncias da base;
- não endurece rapidamente quando aplicada.

Alguns aspectos interferem nessa propriedade como as características dos materiais constituintes da argamassa e o seu proporcionamento. Consistência e plasticidade são condicionantes da trabalhabilidade, onde a quantidade de água de amassamento utilizada é responsável pela consistência da argamassa, podendo ela ser seca, plástica ou fluida. Já a plasticidade é relacionada as quantidades de agregados, aglomerantes (finos) e tempo de mistura; e podem ser classificados como pobre (magra/áspera), média (plástica) ou rica (gorda) (NAKAKURA et al. 2004; CARASEK,2010).

2.1.1.2 *Resistencia mecânica*

Propriedade das argamassas em suportarem as ações mecânicas de diferentes naturezas, devidas à abrasão superficial, ao impacto e à contração termo higroscópica, sem comprometer as características de aderência, estanqueidade e durabilidade (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Depende do consumo e natureza dos agregados e aglomerantes da argamassa empregada e da técnica de execução que busca a compactação da argamassa durante a sua aplicação e acabamento (CINCOTTO et al. 1995).

A resistência mecânica aumenta com a redução da proporção de agregado na argamassa e varia inversamente com a relação água/cimento da argamassa. No caso das argamassas de assentamento e revestimento, a resistência não deve ser superior à do substrato ao qual foi aplicada, onde uma alta resistência tende a prejudicar a capacidade de absorção de deformações (CARASEK, 2010).

A ABNT NBR 13281:2005, apresenta a classificação quanto a resistência a compressão e a tração, e elas devem ser adotadas considerando a base em que a aplicação aconteceu. A Tabela 01 apresenta as classes e valores para resistência a compressão.

Tabela 01: Classificação de argamassas para assentamento e revestimento de tetos e paredes, quanto a resistência a compressão.

Classe	Resistência a compressão (MPa)	Metodologia de Ensaio
P1	≤2,0	ABNT NBR 13279:2005
P2	1,5 a 3,0	
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	>8,0	

Fonte: ABNT NBR 13281:2005

A resistência mecânica em relação as tensões de tração nas argamassas de assentamento e revestimento, está relacionada ao módulo de elasticidade do material e o aparecimento dessas tensões se inicia no estado fresco, onde retrações resultantes do processo de hidratação do cimento e reações químicas do processo de cura da argamassa, e continuam até a secagem da argamassa.

Quando esse processo se dá de forma lenta e gradual, o material desenvolve resistência capaz de absorver as tensões internas que se formam durante a cura; porém, quando o processo ocorre de forma rápida, seja por causas ambientais ou mesmo absorção da água pelo substrato, essas tensões internas ocasionam o surgimento de fissuras e microfissuras, comprometendo a resistência e estanqueidade da alvenaria (CINCOTTO et al. 1995; CARASEK, 2010).

A Tabela 02 apresenta a classificação de argamassas em relação a resistência à tração na flexão, segundo a ABNT NBR 13281:2005.

Tabela 02: Classificação de argamassas para assentamento e revestimento de tetos e paredes, quanto a resistência a tração na flexão.

Classe	Resistência à tração na flexão (MPa)	Metodologia de Ensaio
R1	≤1,5	ABNT NBR 13279:2005
R2	1,0 a 2,0	
R3	1,5 a 2,7	
R4	2,0 a 3,5	
R5	2,7 a 4,5	
R6	>3,5	

Fonte: ABNT NBR 13281:2005

2.1.1.4 Massa específica e teor de ar incorporado

A massa específica diz respeito à relação entre a massa da argamassa e o seu volume e pode ser absoluta ou relativa. Na determinação da massa específica absoluta, não são considerados os vazios existentes no volume de argamassa. Já na relativa, também chamada massa unitária, consideram-se os vazios. A massa específica é imprescindível na dosagem das argamassas, para a conversão do traço em massa para traço em volume, que são comumente empregados na produção das argamassas em obra (ROMANO et al, 2016).

O teor de ar é a quantidade de ar existente em um certo volume de argamassa. À medida que cresce o teor de ar, a massa específica relativa da argamassa diminui (ISAIA, 2010).

Essas duas propriedades interferem em outras propriedades da argamassa no estado fresco, como a trabalhabilidade (CINCOTTO et al. 1995; CARASEK, 2010). Uma argamassa com menor massa específica e maior teor de ar, apresenta melhor trabalhabilidade.

O teor de ar da argamassa pode ser aumentado por meio dos aditivos incorporadores de ar. Mas o uso desses aditivos deve ser muito criterioso, pois pode interferir negativamente nas demais propriedades da argamassa. Um aumento do teor de ar incorporado pode prejudicar a resistência mecânica e a aderência da argamassa, por exemplo.

A ABNT NBR 13281:2005, estabelece requisitos para as argamassas e as classifica com base na sua densidade, tanto em estado fresco quanto em estado endurecido, com diferentes metodologias de ensaio. As Tabelas 03 e 04, apresentam os requisitos.

Tabela 03: Classificação de argamassas para assentamento e revestimento de tetos e paredes, quanto a densidade de massa no estado fresco.

Classe	Densidade de massa no estado fresco (kg/m³)	Metodologia de Ensaio
D1	≤1400	ABNT NBR 13278:2005
D2	1200 a 1600	
D3	1400 a 1800	
D4	1600 a 2000	
D5	1800 a 2200	
D6	>2000	

Fonte: ABNT NBR 13281:2005

Tabela 04: Classificação de argamassas para assentamento e revestimento de tetos e paredes, quanto a densidade de massa no estado endurecido.

Classe	Densidade de massa no estado fresco (kg/m³)	Metodologia de Ensaio
M1	≤1200	ABNT NBR 13280:2005
M2	1000 a 1400	
M3	1200 a 1600	
M4	1400 a 1800	
M5	1600 a 2000	

M6	>1800	
----	-------	--

Fonte: ABNT NBR 13281:2005

Os valores apresentados para a densidade de massa no estado endurecido são menores, devido à perda de massa ocasionada pelo processo de cura do material, onde a argamassa perde água devido a evaporação e reações químicas de endurecimento.

2.1.1.5 Retenção de água

É capacidade da argamassa de reter a água de amassamento contra a sucção da base ou contra a evaporação. A retenção permite que as reações de endurecimento da argamassa se tornem mais gradativas, promovendo a adequada hidratação do cimento e consequente ganho de resistência. A retenção de água também afeta as propriedades no estado endurecido (CARASEK,2010; ROMANO et al, 2016). A rápida perda de água, compromete a aderência, a capacidade de absorver deformações, a resistência mecânica e, com isso, a durabilidade e a estanqueidade do revestimento e da vedação ficam comprometidas. (CINCOTTO et al. 1995).

Os fatores influentes na retenção de água são as características e proporcionalidade dos materiais constituintes da argamassa. A presença da cal e de aditivos pode melhorar essa propriedade. A ABNT NBR 13281:2005 classifica de U1 à U6, de acordo com a capacidade de retenção de água, conforme Tabela 05.

Tabela 05: Classificação de argamassas para assentamento e revestimento de tetos e paredes, quanto a retenção de água.

Classe	Retenção de água (%)	Metodologia de Ensaio
U1	≤78	ABNT NBR 13277:2005
U2	72 a 85	
U3	80 a 90	
U4	86 a 94	
U5	91 a 97	

U6	95 a 100	
----	----------	--

Fonte: ABNT NBR 13281:2005

2.1.1.6 Estanqueidade

A proteção da alvenaria e estrutura contra intemperismos, isolamento térmico e acústico, estanqueidade a água, segurança e resistência ao fogo e resistência a desgastes e abalos superficiais são responsabilidade da garantia da estanqueidade das argamassas de assentamento e revestimento de tetos e paredes (CINCOTTO et al. 1995). Para mensurar essas funções, a ABNT NBR 13281:2005, estabeleceu a avaliação do coeficiente de capilaridade, que determina a capacidade das argamassas absorver água, ou seja, sua permeabilidade. A norma classifica as argamassas de acordo com seu coeficiente de capilaridade, como apresenta a Tabela 06.

Tabela 06: Classificação de argamassas para assentamento e revestimento de tetos e paredes, quanto ao coeficiente de capilaridade.

Classe	Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^½)	Metodologia de Ensaio
C1	≤1,5	ABNT NBR 15259:2005
C2	1,0 a 2,5	
C3	2,0 a 4,0	
C4	3,0 a 7,0	
C5	5,0 a 12,0	
C6	>10,0	

Fonte: ABNT NBR 13281:2005

2.1.1.7 Aderência

É a propriedade do revestimento manter-se fixo ao substrato, por meio da resistência às tensões normais e tangenciais que surgem na interface base-revestimento. É resultante da resistência de aderência à tração, da resistência de aderência ao cisalhamento e da extensão de aderência da argamassa, ela depende da base qual foi aplicada, pois é resultado dessas interações; não se trata então de uma propriedade das argamassas, mas sim, da interação entre as camadas do sistema de revestimento (CARASEK, 2010).

A aderência depende das propriedades da argamassa no estado fresco; dos procedimentos de execução do revestimento; da natureza e características da base e da sua limpeza superficial. A quantidade dos materiais constituintes também afeta a aderência, pois altos níveis de cimento podem ajudar a resistência mecânica; mas podem provocar o aparecimento de fissuras e microfissuras, devido a hidratação do cimento; já para maiores quantidades de agregados miúdos, como areia, beneficiam uma aderência duradoura, uma vez que a areia fina diminui a retração durante a cura (CINCOTTO et al. 1995; FIORITO, 2009).

A resistência de aderência potencial da argamassa pode ser medida por meio do ensaio de arrancamento por tração. De acordo com a norma ABNT NBR 13281:2005 classifica os limites de resistência potencial de aderência à tração para o revestimento de argamassas de assentamento e revestimento, conforme a Tabela 07.

Tabela 07: Classificação de argamassas para assentamento e revestimento de tetos e paredes, quanto a resistência potencial de aderência à tração.

Classe	Resistência potencial de aderência à tração (MPa)	Metodologia de Ensaio
A1	< 0,20	ABNT NBR 15258:2005
A2	≥ 0,20	
A3	≥ 0,30	

Fonte: ABNT NBR 13281:2005

2.1.1.8 Ensaio de resistência potencial de aderência à tração

A resistência de aderência a tração, de acordo com a ABNT NBR 13528:2019, é aferida por meio da determinação da tensão máxima aplicada por uma carga direta e perpendicular a um revestimento de argamassa a um substrato.

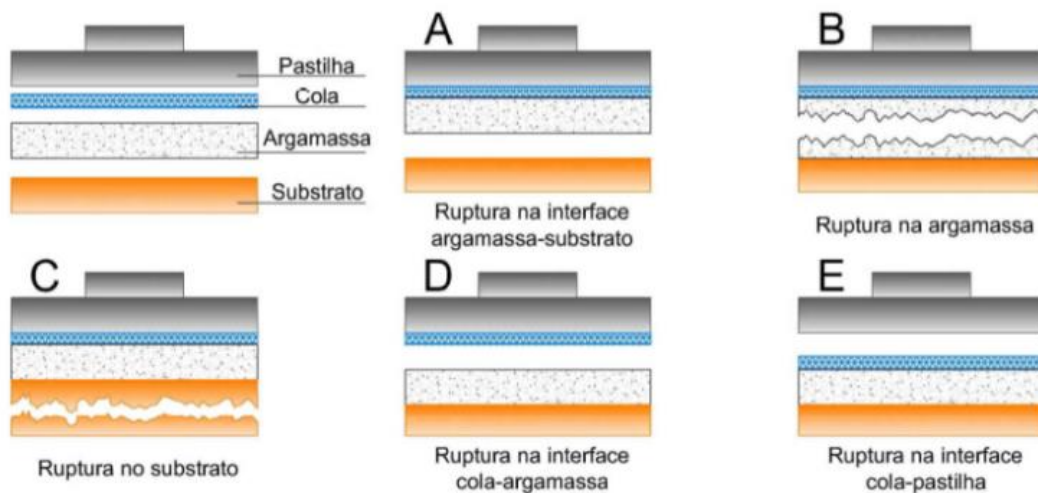
Esse ensaio também é conhecido como “*pull off test*”, onde é composto pela fase do cálculo do valor da resistência e pela avaliação do aspecto do tipo de ruptura que ocorreu durante o ensaio (CARASEK, 2010). Para o ensaio, são utilizados

a colagem de doze pastilhas sobre o sistema, e cada aspecto obtido é analisado, podendo ser:

- Tipo A – Adesiva: quando ocorre na interface argamassa-substrato e com valores mais elevados e possuem maior potencial para patologias;
- Tipo B/C – Coesiva: quando ocorre no interior da argamassa ou substrato, com valores menos preocupantes, ao menos que sejam muito baixos.
- Tipo D – indicam que a camada superficial do revestimento é mais fraca, possivelmente pela presença de pulverulência;
- Tipo E – indicam falhas na colagem e seus resultados são descartados.

A Figura 01 apresenta todos os tipos de ruptura e a composição do sistema que são ensaiados.

Figura 01: Tipos de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração de revestimentos e argamassa.



Fonte: Carasek (2010).

2.2 ARGILA EXPANDIDA

Os agregados leves podem ser classificados em naturais, obtidos por meio de extração de jazidas e classificados de acordo com sua granulometria; e, artificiais, que são obtidos a partir de processos industriais e classificados com base na matéria prima, processo de fabricação e granulometria (ISAIA, 2010).

Argilas expandidas são obtidas por meio de processos industrializados, podendo ser fabricadas através de sintetização ou forno rotativos de argilas com propriedades expansivas.

Alguns tipos de argilas, quando aquecidas em temperaturas em torno de 1200°C dão origem às argilas expandidas. Esse processo de transformação se dá devido aos diferentes constituintes da matéria-prima. Partes desses constituintes se fundem, ficando em um estado semi-plástico devido às altas temperaturas enquanto outras partes, mais voláteis, liberam gases que devido à massa viscosa formada não conseguem escapar para a atmosfera. Isso faz com que o material expanda até sete vezes o seu tamanho original. Essa estrutura porosa se mantém depois do resfriamento, assim a massa unitária do material após todo o processo de fabricação torna-se menor, devido ao aumento do seu volume (MORAIVA et al., 2006).

Com isso, ao final do processo, é obtido uma estrutura porosa e arredondada, com baixa massa específica e promovendo a formação de uma camada vitrificada externa na partícula com baixa porosidade, que diminui a absorção de água pelo material. (ROSSOGNOLO, 2009).

A argila expandida foi inventada em 1885, porém sua produção industrial só teve início em 12 de fevereiro de 1918 por S.I. Hayde em sua fábrica no Kansas City, Estados Unidos. O material produzido nesta fábrica recebeu o nome de Haydite em homenagem ao seu inventor. O uso da argila expandida cresceu somente após a 2ª Guerra Mundial devido o interesse do setor de construção civil por este material inerte e leve. Também neste período a produção de argila expandida por toda Europa foi disseminada tendo a Dinamarca como principal desenvolvedora do produto. O processo de fabricação de argila expandida em fornos rotativos, que ainda é utilizado nos dias de hoje, foi patenteado na Dinamarca (MELO, 2000).

2.2.1 Processos de fabricação da argila expandida

Nos itens 2.2.1.1 e 2.2.1.2 serão apresentados os principais processos de fabricação da argila expandida, por sinterização e forno rotativo.

2.2.1.1 Sinterização

A fabricação de argila expandida pelo processo de sinterização, ou também chamado sinterização contínua, tem início pelo umedecimento da matéria-prima que então é misturada com uma proporção adequada de combustível (coque ou carvão moídos) para então ser transportada em uma grelha móvel, durante todo esse transporte a mistura passa por queimadores garantindo a distribuição por igual do calor por toda a mistura para que haja formação dos gases e consequente expansão da argila (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Cabral (2005) define o processo de sinterização para a fabricação de argila expandida idêntico, em princípio, à sinterização de minérios de zinco ou

níquel onde a matéria-prima é misturada com certa quantidade de combustível, em seguida é depositada de forma não compactada sobre uma grelha móvel em um forno do tipo Dwight-Lloyd onde é incinerada graças à sucção ou injeção de ar por meio da grelha.

A argila expandida fabricada pelo processo de sinterização apresenta algumas características ruins quando comparadas às fabricadas em fornos rotativos. As produzidas pelo processo de sinterização possuem massa específica aparente entre 650 kg/m^3 e 900 kg/m^3 enquanto as produzidas em fornos rotativos têm valores entre 300 kg/m^3 e 650 kg/m^3 (MEHTA e MONTERIO, 2014).

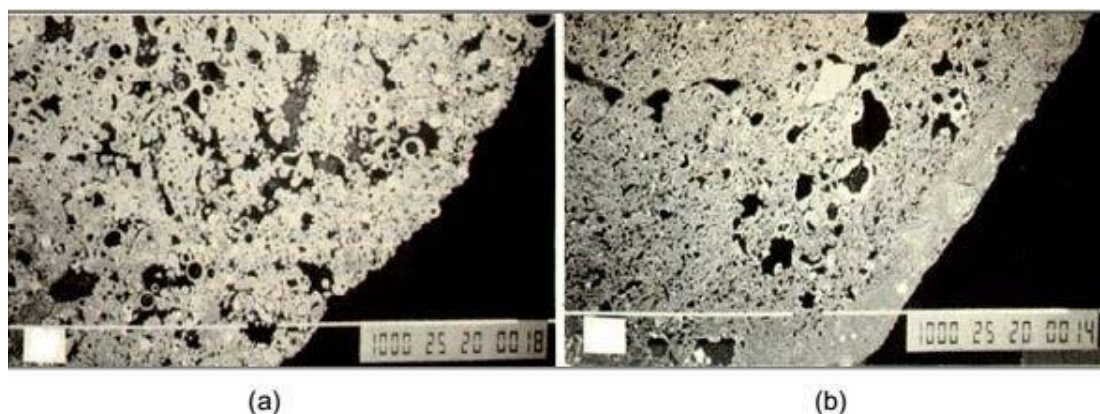
As argilas expandidas fabricadas por sinterização apresentam uma grande quantidade de poros abertos, o que acarreta altos valores de absorção de água. Outra desvantagem devida aos poros abertos ocorre quando a argila expandida é utilizada como agregado em concreto. A penetração da pasta de cimento nos poros pode aumentar o consumo de cimento em uma faixa de 30 a 100 kg por m^3 de concreto levando também a um aumento de sua massa específica (ROSSIGNOLO, 2009).

2.2.1.2 Forno rotativo

A fabricação de argila expandida em fornos rotativos se assemelha muito com ao processo de obtenção do cimento Portland em que se usa gás ou óleo diesel como combustível. Os fornos podem atingir temperaturas entre 1000° e 1350° C , próximas do ponto de fusão de componentes da matéria-prima. Em decorrência da fusão e da gaseificação de alguns componentes é formada a estrutura da argila expandida com seu interior composto por uma massa esponjosa microcelular, revestida por uma camada externa vitrificada chamada de encapado que confere ao agregado uma porosidade interna fechada o que leva a uma diminuição significativa da absorção de água. Além disso, apresenta uma granulometria variada, formato arredondado regular, boa resistência mecânica com baixa permeabilidade (MEHTA e MONTERIO, 2014; ROSSIGNOLO, 2009).

Na Figura 02 é possível observar uma micrografia de argilas expandidas produzidas por sinterização e em fornos rotativos, podendo verificar a formação do encapado na argila fabricada em forno rotativo.

Figura 02: (a) Argila expandida fabricada por sintetização, (b) Argila expandida fabricada por forno rotativo.



Fonte: ZHANG E GJORV (1991)

Para que o processo de fabricação da argila expandida seja completo é necessária a presença de fundentes na matéria-prima para que se forme uma camada vítrea, caso contrário, os gases formados internamente não são aprisionados por essa camada e consequentemente não há o aumento de volume da argila. Devem existir também teores mínimos de SiO_2 , Al_2O_3 e de constituintes que agem como fundentes (MgO , Na_2O , CaO , Fe_2O_3 e K_2O) que são extremamente importantes para a fusão da matéria-prima em baixas temperaturas (SOBRAL, 1987).

Porém, para solucionar esse problema é possível ajustar o teor de fundentes adequadamente, alterar o período de liberação de gás por meio de temperaturas mais altas, acelerar o aquecimento com a diminuição do fluxo de ar ou pela adição de componentes que elevem a viscosidade da fase vítrea (ROSSIGNOLO, 2009).

As etapas do processo de produção da argila expandida em fornos rotativos podem ser definidas em:

1. Homogeneização;
2. Desintegração;
3. Mistura e nova homogeneização;
4. Laminação;
5. Pelotização;
6. Secagem e queima;
7. Resfriamento;
8. Classificação e estocagem final.

A estrutura celular de um agregado leve é definida por Souza Santos (apud CABRAL, 2005) como uma textura em que os vazios estão isolados entre si por paredes impermeáveis, já o termo estrutura porosa ou esponjosa é definido como uma textura em que os vazios estão interconectados com o meio, como em uma esponja.

2.2.2 Estrutura física e seu comportamento

Esse tipo de agregado leve apresenta baixa resistência mecânica e tem pouca influência na transmissão de tensões internas no concreto ou argamassa, o que significa que quanto maior for a diferença entre os valores de módulo de deformação de agregado e da pasta de cimento, maior será a diferença entre a resistência à compressão da pasta de cimento e da argamassa. O aumento do módulo de deformação desse agregado leve, eleva também os valores da resistência a compressão e módulo do concreto (BORJA, 2011; ANGELIN *et al* 2012).

Já com relação a resistência mecânica, ela é diretamente influenciada pela estrutura interna dos agregados presentes na mistura, ou seja, para agregados com estrutura porosa, como a argila expandida, são menos resistentes que os com estrutura pouco porosa, sendo o tamanho e distribuição dos poros também um fator decisivo para a resistência global (LOTFY, 2015).

2.2.3 Porosidade e absorção de água

A porosidade e a absorção de água afetam de forma significativa as propriedades de argamassas e concretos, seja no estado fresco ou durante o processo de hidratação do cimento. As características que influenciam a absorção de água e porosidade do agregado, são a conectividade entre os poros, as características de superfície e umidade do agregado (METHA E MONTEIRO, 2014).

A consistência das argamassas e concretos é proporcional a absorção de água dos agregados presentes na mistura, e pode ser aumentada com o uso de aditivos superplastificante ou redutores (ROSSIGNOLO, 2009).

Com isso, pode-se aumentar a retração por secagem dos traços, devido a quantidade de água absorvida pelo agregado leve, porém a interação na zona de transição entre o agregado e pasta é melhorado, assim como a cura interna do material, já que a exsudação da água de amassamento é compensada (BORJA, 2011).

É recomendado aos agregados leves, como a argila expandida, a pré-saturação para evitar prejuízos a trabalhabilidade, a formação de bolhas ao redor do agregado e a reduzir a absorção de água após a mistura (ROSSIGNOLO, 2009).

2.2.4 Argila expandida nacional

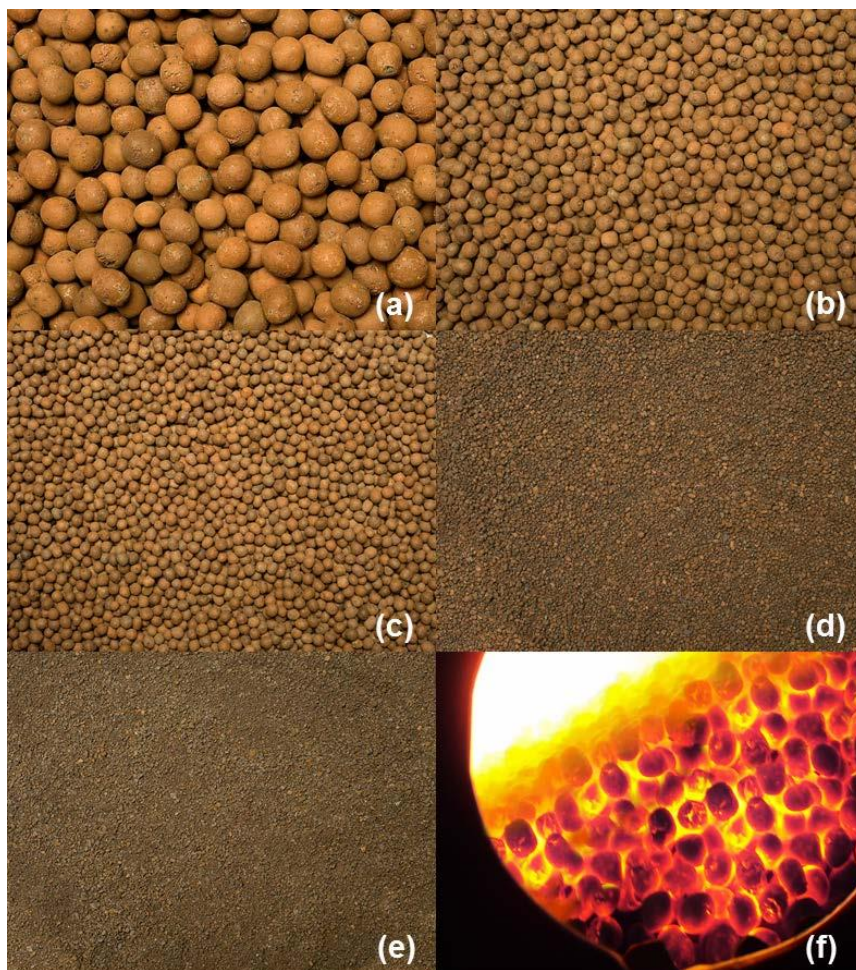
O início do fomento à fabricação de argila expandida no Brasil se deu em 1964 com a empresa CINASA, depois chamada CINASITA, e conhecida nacionalmente hoje como CINEXPAN. O objetivo principal era fornecer agregado leve, produto até então inexistente no Brasil, para o uso em construção de conjuntos habitacionais em escala industrial, demanda dada pelos governantes da época. A pesquisa de matérias-primas, dimensionamento do projeto, construção e operação da usina foram feitas pela equipe de engenharia da então CINASA associados ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT)

e da empresa norte-americana Fuller. Somente em 1967 a CINASA iniciou os primeiros testes e a produção efetiva ocorreu em janeiro de 1968 com a produção de 7.500 m³ mensais (CABRAL, 2005).

Para atender a demanda da indústria de construção civil em São Paulo, o IPT deu início às pesquisas com o intuito de encontrar argilas que pudessem ser utilizadas na fabricação de agregados leves em forno rotativo. Trezentos tipos diferentes de argilas encontradas no estado de São Paulo foram estudados, cuja composição química e mineralógica indicavam certo potencial para a expansão pirolástica. Por meio de ensaios de queima lenta e rápida, dezesseis argilas foram selecionadas, posteriormente reduzidas a quatro tipos e por final uma escolhida por condições econômicas para a industrialização (SANTOS apud CABRAL, 2005).

Atualmente no Brasil a principal produtora de argila expandida é a CINEXPAN localizada no município de Várzea Paulista no estado de São Paulo. A matéria-prima utilizada é retirada no Recôncavo Baiano e a fabricação da argila expandida é feita em fornos rotativos. São produzidos cinco tipos de argila expandida tendo como principal diferença suas classes granulométricas: de 22 a 32 mm (Tipo 3222), 15 a 22 mm (Tipo 2215), 6 a 15 mm (Tipo 1506), menores que 5 mm (Tipo 0500) e menores que 2,5 mm (Tipo Laminado). Na Figura 03 é possível observar os diferentes tipos de argilas e argilas expandidas dentro de um forno rotativo ainda incandescentes.

Figura 03: Argilas expandidas produzidas pela CINEXPAN (a)Tipo3222; (b) Tipo 2215, (c) Tipo 1506, (d)Tipo 0500, (e) Tipo Laminado e (f) argilas expandidas em forno rotativo.



Fonte: CINEXPAN (2021).

2.3 PROPRIEDADES ACUSTICAS DAS ARGAMASSAS

A acústica é um ramo da Física que estuda o som, sua criação, meio de propagação e a recepção do som (ALMEIDA E SILVA, 2005), e o som está presente na maioria dos estudos realizados por diversas ciências como, engenharia, arquitetura, música, medicina e física que estudam seu fenômeno, aplicação e formas de atuação nestas áreas.

Quando se fala em conforto acústico, entende-se como um dos fatores que implicam na qualidade de vida e no bem-estar do homem (NETO, 2009), tendo como consequência um ambiente confortável, que dependendo da atividade varia com nível de ruído exigido. Na realidade o conforto acústico basicamente é relacionado com o parâmetro de qualidade sonora, outra variável que também é subjetiva, dependendo de pessoa para pessoa.

Estudando os materiais aplicados as construções e levando isso em consideração nos projetos, verificam-se os prejuízos causados nos usuários das edificações, como o desconforto acústico, que é causado pelo tipo de ruído que os usuários de um ambiente estão expostos. Fazendo assim com que o projeto e a edificação se tornem funcional e confortável ao usuário.

Porém de forma geral o ruído gera um desconforto físico-psicológico nas pessoas e que se não forem pensados na fase de projeto, acarretarão em prejuízos para o proprietário da edificação (prejuízos relacionados à adequação do projeto), aos usuários e aos não usuários (população do entorno) daquele empreendimento.

Para NETO (2009) o desconforto acústico surge quando o nível de ruído ao redor atrapalha a execução de algumas atividades que necessitam de certo nível de silêncio. Surgindo o desconforto físico, surge o desconforto psicológico, não necessariamente nessa ordem, e a partir daí surgem os elevados índices de reclamação. Essa definição é verificada quando o que se está levando em consideração é a atividade do ambiente interno, pois quando se estabelece como referencial o ambiente externo a atividade interna de um determinado ambiente pode estar gerando ruído.

Para OGASAWARA (2006) acústica de edificações e planejamentos urbanos lida com os sons internos e externos à edificação. Segundo OLIVEIRA (2006) na acústica arquitetônica trabalha-se com o tratamento acústico, modo pelo qual se procura dar aos ambientes boas condições de clareza e inteligibilidade, de acordo com a atividade desenvolvida. O tratamento engloba isolamento e condicionamento acústicos.

Assim para OGASAWARA (2006) o projeto acústico de edificações se divide em duas ramificações: em acústica de salas e acústica de edificações. O termoacústica de salas está associado ao projeto (estudo da forma, das características dos materiais aplicados e do layout) de um espaço fechado visando obter as melhores condições auditivas. Está relacionado com a propagação sonora dentro de um ambiente cujo objetivo é a preservação de sons desejáveis. A acústica de edificações lida com a propagação sonora entre salas

e com sons indesejáveis, enquanto a acústica de salas está fortemente ligada a qualidade sonora.

2.3.1 Propriedades Físicas do Som

O som é toda vibração ou onda mecânica gerada por um corpo vibrante, passível de ser detectada pelo ouvido humano (CARVALHO, 2010), nesta definição limita-se o tipo de vibração, pois nem toda vibração é percebida pelo ouvido humano (SOUZA, ALMEIDA E BRANGANÇA, 2006), esta vibração ocorre pela propagação do som através de um meio (sólido, líquido ou gasoso) em todas as direções, segundo uma esfera (CARVALHO, 2010), porém este meio de propagação do som na construção civil refere-se basicamente ao ar e aos materiais de construção (SOUZA, ALMEIDA E BRANGANÇA, 2006).

As ondas sonoras são alterações atmosféricas causadas pelas vibrações sonoras das partículas do meio (no caso da construção civil o ar ou os materiais construtivos) que causam sucessivas compressões e rarefações de forma que o movimento de uma partícula provoca a vibração da partícula vizinha (ver figura - 4), resultando na propagação sonora (SOUZA, ALMEIDA E BRANGANÇA, 2006).

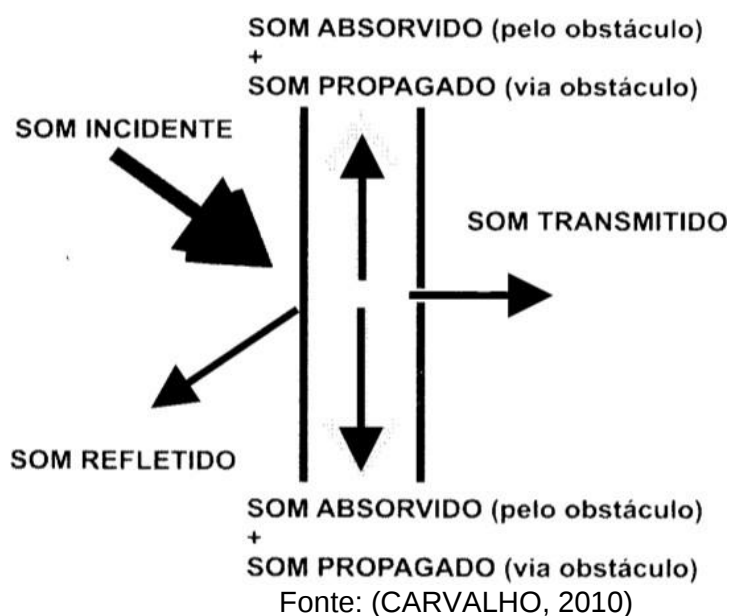
2.3.2 Fenômenos de propagação do som

2.3.2.1 Reflexão, Refração e Absorção do Som

Quando uma onda sonora encontra um obstáculo, como mostrada na Figura 04, (no caso da construção civil uma parede), a energia sonora incidente fica subdividida em duas partes, uma é refletida a outra é absorvida pelo meio, mas quando o obstáculo possui dimensões reduzidas como uma parede, nem toda energia será absorvida pelo meio, pois parte é transmitida para o outro ambiente por meio da refração (COSTA, 2003). A refração é a mudança de direção de uma onda sonora quando passa de um meio de propagação para outro (CARVALHO, 2010).

O que interessa na absorção sonora para a utilização correta dos materiais é o coeficiente de absorção que depende da natureza do material e que varia com o tipo de frequência da onda sonora. Materiais de grandes coeficientes de absorção são de estrutura porosa como tecidos, feltros, plásticos porosos, madeira aglomerada e outros (COSTA,2003).

Figura 4: processo de reflexão, absorção e transmissão do som.



A reflexão sonora é um fenômeno importante para as construções, pois dependendo de sua utilização podemos garantir uma queda da intensidade sonora ou um longo período de duração do som no ambiente (tempo de reverberação).

2.3.2.2 O ruído

O ruído como já foi mencionado, é qualquer fonte sonora que interfira na atividade de determinado ambiente interno ou externo. Porém, a partir dele são analisados todos os fatores que influenciam no condicionamento acústico de uma edificação, pois quando analisamos o ruído como parâmetro de projeto, verifica-se que não necessariamente precisaríamos extingui-lo, pela necessidade humana exigir do espaço um mínimo de ruído que garanta a intangibilidade da palavra ou atividade de interesse, assim o ruído funciona como um mascarado do que costumamos chamar de ruídos intrusos.

Por isso na maioria das vezes o condicionamento do espaço acústico depende de um mínimo de ruído, que é caracterizado como ruído de fundo. Então os ruídos existentes em um ambiente podem decorrer de atividades externas ou internas à edificação, sendo assim, as fontes de ruído determinam conjuntamente um nível sonoro mínimo nos ambientes internos e externos, com isso a forma de tratamento para a redução de ruídos varia com o tipo de ruído considerado (SOUZA, ALMEIDA E BRANGANÇA, 2006).

De acordo com Carvalho (2010) os ruídos são classificados em:

- Ruídos aéreos
- Ruídos de impactos

Os ruídos aéreos como o próprio nome define, é o ruído transmitido através do ar: vozes, buzinas, etc; (CARVALHO, 2010), ou seja, o som tem origem no ar. Geralmente os ruídos mais frequentes quando fazemos referências a ruídos externos a edificação, são sons emitidos de atividades humanas, como o ruído de transportes rodoviários e aéreos, as indústrias e algumas atividades de recreação (SOUZA, ALMEIDA E BRANGANÇA, 2006).

Os ruídos de impactos são resultantes de forças impostas diretamente sobre estruturas que podem gerar vibrações em sólidos ou impactos (SOUZA, ALMEIDA E BRANGANÇA, 2006) como a queda de objetos, marteladas, passos, tambor, ou seja, sua origem está primeiro na vibração do corpo, cujo o meio principal de transmissão e a energia sonora é passada posteriormente para o ar. O impacto sobre uma laje, por exemplo, promove além do ruído decorrente da sua vibração, excitação do sistema estrutural do edifício e de suas paredes, gerando dessa forma fontes secundárias de ruído (CARVALHO, 2010).

Os ruídos geram no homem inúmeras implicações (físicas, psicológicas, fisiológicas), assim a exposição a sons de alta intensidade por longa duração pode causar danos irreversíveis, e isso varia de um indivíduo para outro, em função da maior ou menor sensibilidade auditiva, daí a necessidade de se estabelecer níveis de ruídos aceitáveis por aferição instrumental (CARVALHO, 2010).

COSTA (2003) argumenta sobre a necessidade que os governos de vários países tiveram de estabelecer normas no sentido de controlar os níveis de ruídos exagerados nos diversos ambientes para evitar danos à saúde pública. No Brasil a normatização geral no estabelecimento de padrões para o meio ambiente equilibrado são feitos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), (OGASAWARA, 2006).

A legislação do CONAMA tem validade em todo território nacional e sobre ruídos as suas principais resoluções são:

- Resolução CONAMA n.º 1/90 – Estabelece critérios, padrões, diretrizes e normas reguladoras da poluição sonora. Em seus itens I e II a resolução que “são prejudiciais à saúde e ao sossego público, os ruídos com níveis superiores aos considerados aceitáveis pela norma NBR 10151 e que os níveis de ruídos gerados na comunidade não podem ultrapassar os limites previstos na norma NBR 10152.
- Resolução CONAMA n.º 2/90 – Estabelece normas de ruído visando o bem estar das pessoas. Cria o Programa SILÊNCIO, coordenado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA
- Resolução CONAMA n.º 1/93 – Estabelece limites de ruído para veículos automotores nacionais ou importados, exceto motocicletas.
- Resolução CONAMA n.º 2/93 – Estabelece limites de ruído para motocicletas e assemelhados.
- Resolução CONAMA n.º 8/93 – Estabelece limites de ruído para veículos automotores Diesel.
- Resolução CONAMA n.º 20/94 – Institui o Programa “Selo Ruído” para controlar o ruído em eletrodomésticos.
- Resolução CONAMA n.º 252/99 – Cria a inspeção obrigatória e fiscalização do ruído dos veículos em uso no Brasil.

O órgão responsável por estabelecer normas técnicas específicas de padrões é a ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, que estabelece a norma ABNT NBR – 10151:2020 níveis de ruídos em áreas habitadas visando

o conforto da comunidade, e na ABNT NBR – 10152:2020 níveis sonoros para conforto e os níveis sonoros aceitáveis para diversos ambientes internos e na ABNT NBR 15575:2013, que estabelece o desempenho geral da edificação.

2.3.3 Tratamento acústico

Para Carvalho (2010) tratar acusticamente um ambiente consiste basicamente em observar os seguintes quesitos:

- Dar-lhes boas condições de audibilidade, seja por meio das absorções acústicas dos revestimentos internos (pisos, paredes, tetos e outros componentes) e/ou em função da geometria interna (direcionamento das reflexões internas);
- Bloquear os ruídos externos que porventura possam vir a perturbar a boa audibilidade do recinto;
- Bloquear os possíveis ruídos produzidos no recinto de tal sorte que não perturbem o entorno.

O tratamento acústico depende de todas as variáveis aqui mencionadas, porém existem duas formas de se tratar acusticamente o ambiente (interno e externo), através do isolamento e isolação do ambiente ou através da absorção acústica dos ambientes. Geralmente o tratamento pode ser na fonte sonora, no meio de propagação ou no receptor.

2.3.3.1 Isolação e Isolamento acústico

Isolar um ambiente (externo e interno) é impedir que os ruídos provenientes das atividades externas ou internas, interfiram em outras atividades. O termo isolação geralmente é utilizado para o tratamento da redução sonora de ruídos de impactos (vibrações ou fricção) e o termo Isolamento é utilizado para a atenuação de ruídos aéreos (CORREDOR-BEDOYA et al, 2017).

Os ruídos aéreos podem ser atenuados de duas formas, pelo distanciamento entre a fonte e o receptor ou pela utilização de barreiras acústicas.

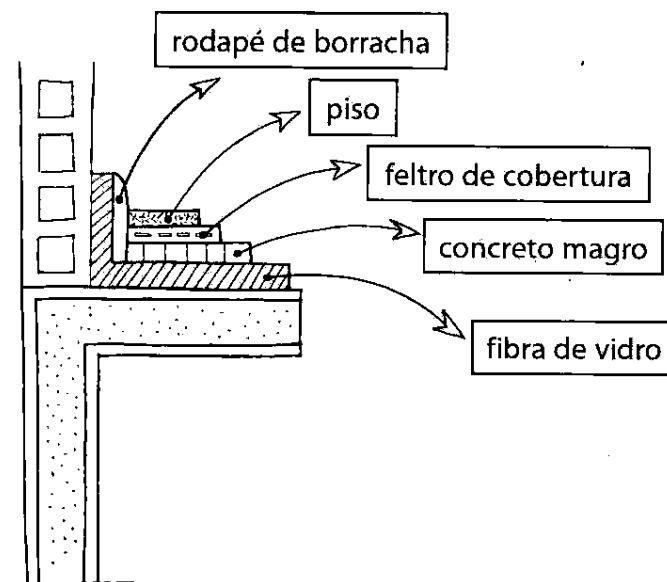
Uma característica importante que influencia na escolha do material adequado para a redução de ruídos aéreos, é o índice de atenuação, que é a capacidade própria de reduzir a intensidade sonora que todo material possui, então se o índice de atenuação sonora de um material é de 48 db isso implica dizer, que quando uma onda sonora incidir no material, esta tende a sofrer uma redução em sua intensidade no mesmo valor (SOUZA, ALMEIDA E BRANGANÇA, 2006; ANGELIN et al, 2019) , é importante salientar que o índice de atenuação varia em função da frequência, ou seja, para cada tipo de frequência há um determinado índice de atenuação.

2.3.3.2 Absorção acústica

Absorção acústica é muito utilizada em ambientes internos, onde se pretende controlar o tempo de reverberação do ambiente, mas como já foi mencionado, o controle de ruído através da absorção está ligado ao processo chamado isolamento, pois os ruídos são de impactos e fricções nas estruturas de uma edificação (HOLMES, 2014).

A isolamento das vibrações envolve a utilização de materiais resilientes e descontinuidade de estruturas (SOUZA, ALMEIDA E BRANGANÇA, 2006), nas construções geralmente pisos e tetos, tubulações estão mais sujeitos a ruídos de impactos, e as paredes à ruídos aéreos. Para que haja isolamento de ruídos de impactos todas as junções devem estar unidas por materiais resilientes e vínculos flexíveis.

Figura 05: Esquema de laje flutuante.



Fonte: (SOUZA, ALMEIDA E BRANGANÇA, 2006).

Nas estruturas das edificações um exemplo bastante utilizado para evitar ruídos de impactos são as lajes flutuantes (Figura 05), onde não há nenhum contato entre as estruturas, a laje simplesmente é apoiada em todos os seus vínculos, as junções estão apoiadas em materiais resilientes (borracha) que possuem capacidade de amortecimento e flexibilidade, e também é utilizado no piso como forma de complemento do amortecimento o carpete, pois as lajes flutuantes isolam os ambientes abaixo dos ruídos, os ambientes superiores estarão sujeitos aos ruídos.

A absorção acústica dos materiais é explicada em função das formas e dimensões dos poros ou das fibras desses materiais que se explica também a variação de suas absorções acústicas em função das faixas de frequências, por isso materiais absorvedores são mais eficazes em altas frequências do que para baixas frequências que possuem comprimentos de ondas altos. (CARVALHO, 2010).

2.3.3.4 As ondas sonoras em estruturas de concreto

Concretos e argamassas convencionais, compostos de cimento, areia e agregados britados, a densidade esperada é da ordem de 2.400 kg/m³ (METHA, MONTEIRO, 2014), logo, sendo considerados bons isolantes de sons oriundos do ambiente externo, pois o som é, em grande parte, refletido. Porém quando a fonte geradora se encontra dentro do ambiente ocorre um fenômeno chamado reverberação que é o prolongamento do som, prejudicando a inteligibilidade e causando um grande desconforto.

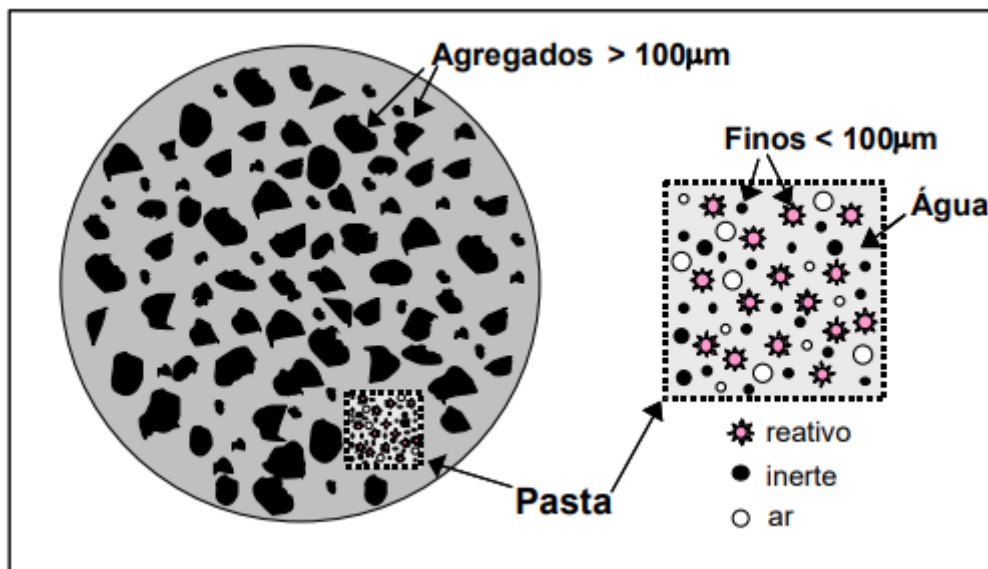
Para minimizar os efeitos negativos que os ruídos provocam nos usuários de uma edificação, a ABNT NBR 15575:2013 determina que, estas devam apresentar desempenho acústico adequado as suas funções indicando sistemas de isolamento compostos por camadas distintas de materiais, capazes de promover melhor desempenho acústico em pisos e vedações verticais, minimizando os níveis de ruídos aéreos e de impacto (ANGELIN et al, 2019).

Neste trabalho, para a avaliação das características acústicas da argamassa com argila expandida, optou-se pelo uso do ultrassom para determinar a atenuação das ondas sonoras na frequência de 1000 Hz, uma vez que, em componentes cimentícios esta frequência apresenta resultados mais expressivos.

2.4 MICROESTRUTURA DAS ARGAMASSAS

Simplificadamente a argamassa pode ser definida como suspensões bifásicas concentradas compostas por uma fração “grossa” inerte (agregado miúdo – areia) com partículas entre 100µm a 2mm, aproximadamente, e uma pasta reativa de água e finos, geralmente constituídos por cimento e cal (MEHTA E MONTEIRO, 2014). A durabilidade da argamassa é extremamente dependente desta pasta, e muitas das suas propriedades dependem da microestrutura. A Figura 06, mostra um esquema ilustrativo da composição da argamassa.

Figura 06: Ilustração esquemática da microestrutura de uma argamassa no estado fresco



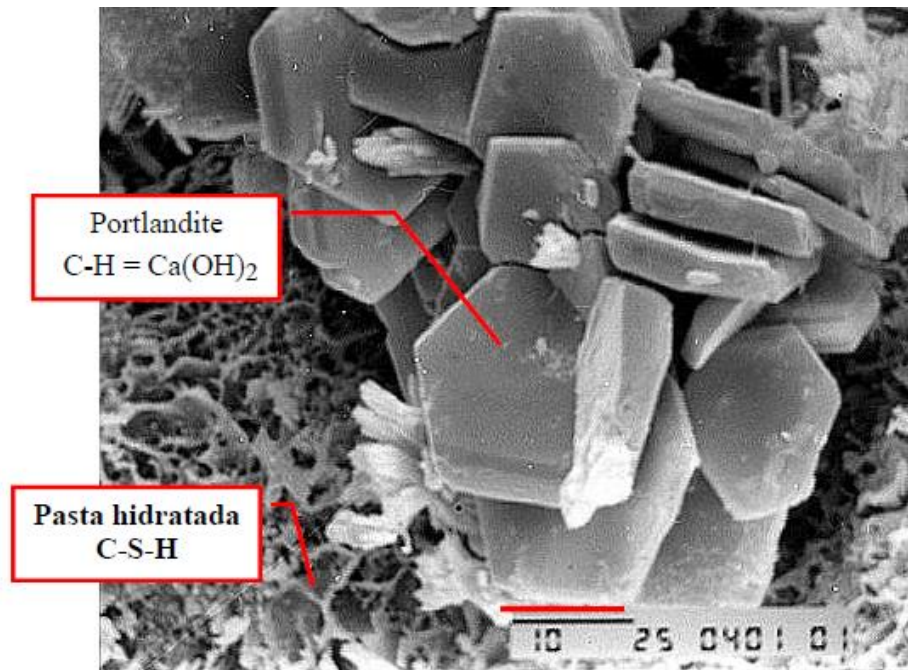
Fonte: Cardoso (2009).

A microestrutura de concretos e argamassas é heterogênea e altamente complexa, sendo formada por três fases: a fase agregado, a fase ligante, composta por uma massa contínua da pasta endurecida, e uma terceira fase, a zona de transição, que representa a região interfacial entre as partículas do agregado e a pasta. A quantidade relativa das fases presentes na microestrutura definirá o comportamento do material (ROMANO et al., 2011). A fase ligante em argamassas e concretos, que ocorre durante os períodos de hidratação e cura dos materiais cimentícios, garantindo a fase sólida, segundo Mehta e Monteiro (2014) pode ser descrita pelas seguintes formações:

- Silicato de cálcio hidratado (C-S-H): essa fase constitui de 50% a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratado. Apresenta uma morfologia variando de fibras pouco cristalinas a um reticulado cristalino, dependendo de como se aglomeram. Esta é a fase mais significativa durante o processo de hidratação e cura, portanto, quanto mais CSH mais resistente e durável serão os concretos e argamassas;
- Hidróxido de cálcio [$Ca(OH)_2$]: Também chamada de portlandita, constituem 20% a 25% do volume de sólidos na pasta hidratada. Há tendência em formar cristais grandes, sob a forma de prismas hexagonais distintos, cuja dimensão depende do espaço e temperatura de hidratação

para sua formação, pois possuem área superficial limitada e não afetam diretamente a resistência dos concretos e argamassas;

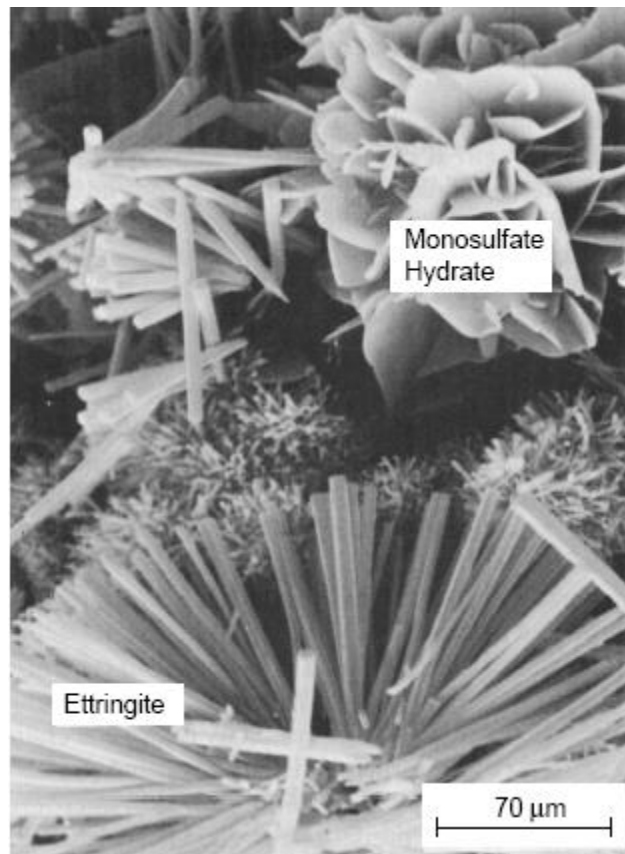
Figura 07: MEV na interface da pasta de cimento mostrando cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.



Fonte: ABCP 2012.

- Sulfoaluminatos de cálcio: ocupam de 15% a 20% do volume de sólidos na pasta endurecida, não interferindo na resistência dos concretos e argamassas; porém tornam o material mais suscetível ao ataque por sulfatos;

Figura 08: Cristais de etringita e monossulfato

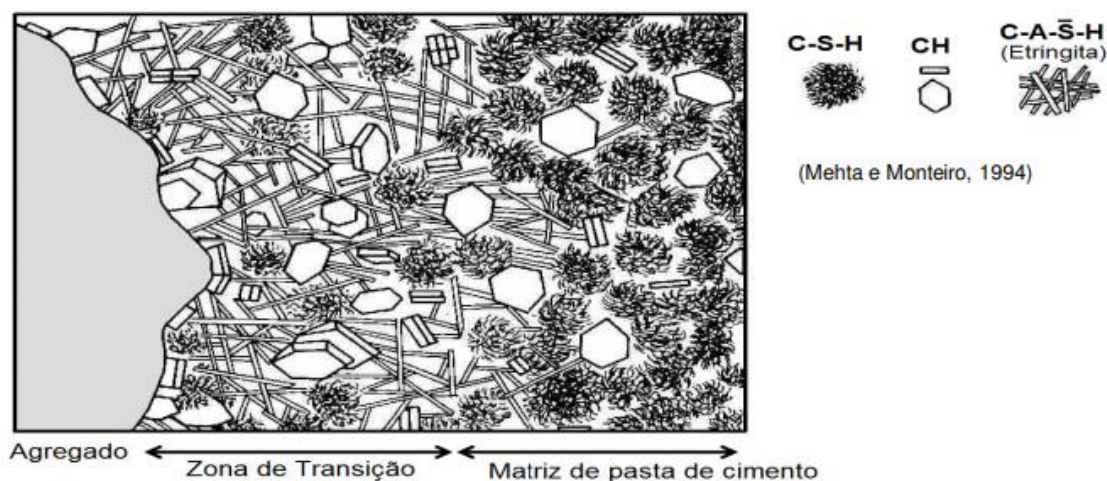


Fonte: MEHTA & MONTEIRO, 2014

- Grãos de clínquer não hidratado: dependendo da distribuição do tamanho das partículas de cimento anidro e do grau de hidratação, alguns grãos de clínquer não hidratado podem ser encontrados na microestrutura de pastas de cimento hidratado, mesmo após longo período de hidratação. Podem em alguns casos, influenciar na resistência final do material.

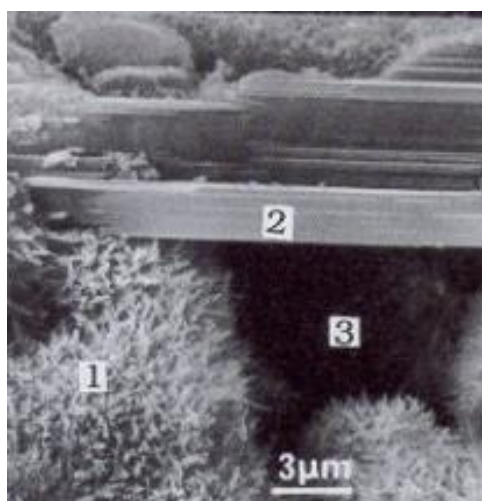
Nas Figura 07 e 08 mostra-se micrografia do concreto com a presença de C-S-H, presença de Ca(OH)_2 ou C-H e de vazios capilares. A morfologia do C-S-H varia desde fibras pouco cristalinas até redes reticulares

Figura 09 : Estrutura do concreto: agregado, zona de transição e matriz de pasta de cimento



Fonte: MEHTA & MONTEIRO, 2014

Figura 10: Micrografia do concreto



Fonte: MORANVILLE -REGOURD, (1992)

A zona de transição, que corresponde a região de contato entre a pasta e os agregados, é a região mais frágil dos concretos e argamassas. Embora constituída dos mesmos elementos que a pasta, a estrutura e as propriedades da zona de transição diferem da matriz de pasta. Em função disto, deve-se tratar a zona de transição como uma fase distinta da estrutura do concreto, sendo responsável por muitos comportamentos do concreto. A microestrutura na zona de transição é caracterizada pela alta porosidade, composta de poros relativamente grandes e, muitas vezes, contendo grandes cristais de hidróxido de cálcio. Essa elevada porosidade conduz a um caminho de percolação no interior da pasta de cimento, reduzindo a durabilidade. A resistência da zona de

transição em qualquer ponto depende do volume e do tamanho dos vazios presentes (ROMANO et al., 2011).

A microestrutura na zona de transição apresenta as seguintes características:

- apresenta maior quantidade de cristais de hidróxido de cálcio e de etringita, sendo esses materiais mais bem formados e de maior tamanho do que aqueles presentes na matriz (região fora da zona de transição);
- os cristais de hidróxido de cálcio estão orientados, preferencialmente, de modo que seus planos basais de clivagem são, aproximadamente, perpendiculares à superfície do agregado;
- a porosidade da interface é maior do que na matriz.

Existe uma forte relação entre a espessura e qualidade da zona de transição na interface (ZTI), em concretos e argamassas, influenciando em propriedades como resistência mecânica, módulo de elasticidade, propagação de fissuras e durabilidade deste material. (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

A resistência da fase matriz da pasta de cimento, é essencialmente dependente das forças de atração de Van der Waals, onde a resistência será maior, quanto mais compacta for a pasta (ou seja, livre de poros grandes) e menos produtos de hidratação como cristalinos forem produzidos, isto é, quanto maior a quantidade de C-S-H e menor a concentração de CH mais resistente é a pasta (AITCIN, 2000).

Outro fator que também pode influenciar nas propriedades de concretos e argamassas, é a presença de diversos tipos de vazios na pasta de cimento como, os vazios capilares, vazios originados pelo ar incorporado, os espaços interfamiliares no C-S-H que podem influenciar características como resistência mecânica e permeabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Certas regiões da pasta hidratada são afetadas pelo acúmulo de água. O aumento da relação água/aglomerante pode induzir na formação de compostos como os cristais de hidróxido de cálcio. Quanto mais espaço (poros) possuir a pasta, mais CH poderá desenvolver, e devido à baixa resistência do hidróxido de cálcio em comparação ao silicato de cálcio hidratado, somado com a maior

porosidade da zona de transição e da interface da pasta, nestes espaços surgem as fissuras devido a concentração de tensões.

2.4.1 Zona de transição nos concretos com agregados leves

Em concretos e argamassas produzidos com agregados leves porosos, como por exemplo a argila expandida, ocorre a redução da espessura da zona de transição. Isso se deve a diminuição da relação água/cimento da pasta nessa região, de modo que a quantidade de CH ao longo da interface também diminui. Essa diminuição é ocasionada pela absorção de água dos agregados, bem como, pela penetração da pasta nos poros da argila expandida (CHANDRA E BERNTSSON, 2002). Além disso, a textura áspera da superfície do agregado também melhora o intertravamento mecânico do agregado com a pasta. (RAMACHANDRAN E BEAUDOIN, 2001) Estudos realizados por Jalal et al. (2012) e Khalil et al. (2015), indicaram que a redução da espessura da zona de transição agregado-matriz melhora o desempenho das propriedades relacionadas à resistência mecânica e à durabilidade dos concretos. Para agregados leves que apresentam camada externa densa ou não possuem porosidade permeável, como é o caso da argila expandida, a zona de transição será similar da observada em concretos com agregados convencionais (ROSSIGNOLO, 2009).

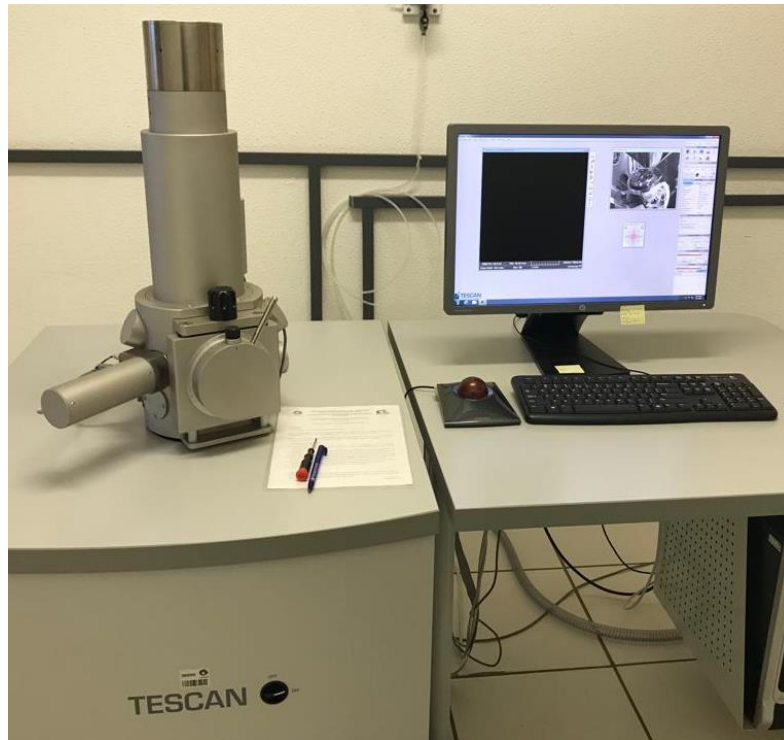
Uma maneira de alcançar essa melhoria é por reduzindo a W / C do concreto, de modo que a quantidade de CH ao longo da interface diminui.

2.4.2 Análise da microestrutura por MEV

Para a análise da microestrutura podem ser usadas algumas técnicas de microscopia, entre elas: a microscopia ótica (MO), a microscopia eletrônica de varredura (MEV), a microscopia eletrônica de transmissão (MET) e a microscopia de força atômica (AFM). No caso do estudo da microestrutura de compósitos com base cimentícia, para melhor potencialidade da microscopia, utiliza-se a microscopia eletrônica de varredura, pois, permite a análise de superfícies irregulares devido a sua ótima profundidade de foco, e apresenta como vantagem em relação ao microscópio óptico, a sua alta resolução, usualmente na ordem de 2 a 5 nm (podendo alcançar até 1 nm), e ainda cabe ressaltar a

vantagem do MEV na facilidade de preparação das amostras. A Figura 11 apresenta um microscópio utilizado para análise microestrutural.

Figura 11: Microscópio TESCAN VEGA 3 SEM para análise microestrutural



Fonte: Próprio autor

Com relação as amostras destacam-se que as condutoras de eletricidade são mais fáceis de serem analisadas, pois o fluxo livre de elétrons minimiza artefatos associados com o acúmulo de carga, e são boas condutoras de calor, mitigando a probabilidade de degradação térmica. Para a análise de amostras não condutoras de corrente elétrica recomenda-se outros procedimentos, como por exemplo a metalização, que consiste na precipitação, a vácuo, de uma película micrométrica de material condutor geralmente de ouro, platina, carbono ou outro metal, para dissipar as cargas acumuladas na superfície da amostra, possibilitando a condução da corrente elétrica. A Figura 12 apresenta uma amostra antes e depois do processo de metalização.

Figura 12 - Amostra antes e depois da metalização com carbono.
a) Amostra sem camada de carbono. b) Amostra com camada de carbono



Fonte: Iwamoto (2019)

Após a revisão bibliográfica apresentada nos subitens anteriores, a Quadro 03 destaca as principais pesquisas no período de 2012-2020 sobre o uso de agregados leves na composição de argamassas e concretos leves e, também, estudos sobre as propriedades termoacústicas e microestruturais. A coluna “Contribuições Inéditas do Trabalho”, elenca a originalidade de cada estudo, de forma a evidenciar a importância do desenvolvimento desta dissertação, quando analisamos o uso da argila expandida em duas granulometrias inferiores a 4,8mm para composição de um traço de argamassa de assentamento e revestimento.

Quadro 03: Principais trabalhos frente ao estado da arte do uso de agregados leves na composição de argamassas e concretos, de forma a evidenciar a evolução do tema deste trabalho.

Referência	Tipo de Argamassa/ Concreto	Agregado (s) Leves(s)	Contribuições inéditas do trabalho
------------	-----------------------------	-----------------------	------------------------------------

Angelin (2020)	CLAE	Argila expandida e borracha	Substituição do agregado miúdo (areia) por resíduo de borracha e agregado graúdo por argila expandida estudando sua atenuação acústica e microestrutura e capacidade térmica.
Iwamoto (2019)	CAA	EPS + Argila expandida	Substituição do agregado miúdo (areia) por EPS (com cola) e agregado graúdo por argila expandida, estudando sua atenuação acústica e microestrutura
Araújo (2017)	CAA	EPS + Argila expandida	Substituição do agregado miúdo (areia) por EPS e agregado graúdo por argila expandida, estudando sua atenuação acústica e microestrutura
Alibdo (2014)	AC	Argila reciclada	Substituição do agregado miúdo (areia) por argila reciclada e estudo das características mecânicas.
Gomes (2020)	AC	Resíduo de borracha	Substituição do agregado miúdo (areia) por resíduo de borracha, estudando sua atenuação acústica, microestrutura e capacidade térmica.
Angelin et al. (2019)	AC	Resíduo de borracha	Substituição do agregado miúdo (areia) por dois tipos de resíduo de borracha, estudando sua atenuação acústica e microestrutura
Cintra et al. (2014)	AC	Vermiculita expandida e resíduo de borracha	Adição de vermiculita expandida e resíduo de borracha no estudo das características físicas e mecânicas da argamassa.
Calderón (2016)	AL	Agregado reciclado e resíduo de borracha	Substituição do agregado miúdo (areia) por agregado reciclado e resíduo de borracha, estudando características mecânicas e químicas e também a viabilidade econômica da troca.
Nepomuceno et al. (2018)	CLAA	Argila expandida e areia	Definição da relação da massa de argamassa com argila expandida e areia, para definição de traços de CLAA
Venkateswara Rao et al (2018)	AC	PCM – material inorgânico e orgânico	Argamassas com adição de PCM a mistura, estudando eficiência mecânica e térmica
Bogas et al. (2012)	CAA	Argila expandida	Caracterização mecânica de traços ótimos de concreto autoadensável.
Koksal et al. (2015)	AL	Sílica e Vermiculita Expandida	Caracterização mecânica e da microestrutura dos traços de argamassa leve
Senhadji et al. (2019)	AL	PVC reciclado	Caracterização física, mecânica e térmica de argamassas leves produzidas com incorporação de PVC reciclado.

Mo et al. (2018)	AC	Vermiculita expandida	Substituição parcial por vermiculita expandida e estudo das características físicas, mecânicas e térmicas.
Ahmad et al. (2019)	CL	Argila expandida e sílica	Estudo de traços contendo agregados leves, caracterizando as propriedades mecânicas e térmicas.
Vyacheslav et al. (2016)	AL	Fibra de aço	Estudo das características mecânicas de argamassas reforçadas com fibra de aço.

Legenda: CAA = concreto autoadensável; CLAA=concreto leve autoadensável; CLAE= concreto leve autoadensável; CC= concreto convencional; AC= argamassa convencional; AL= argamassa leve.

De acordo com a Quadro03, fica evidente que os trabalhos realizados frente a utilização de agregados leves na produção de argamassas e concretos, não utilizam com exclusividade a argila expandida.

No intuito de avançar nas pesquisas, este trabalho visa utilizar a argila expandida em duas granulometrias para desenvolver traços de argamassas leves para assentamento e revestimento, buscando avaliar a influência do uso conjunto destes materiais nas propriedades mecânicas, como resistência à compressão e aderência potencial, as quais são diretamente influenciadas pelas características dos agregados que compõem a argamassa. Em conjunto, buscando atender aos requisitos da ABNT NBR 15575:2013, a qual traz diretrizes sobre o desempenho das edificações, propriedades termoacústicas e microestruturais serão investigadas.

3. MATERIAIS E METODOS

O objetivo deste estudo é o desenvolvimento de uma argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos, em que o agregado miúdo é parcialmente substituído por argila expandida, em duas granulometrias distintas e com diâmetro máximo de 4,8 milímetros, fornecida pela empresa brasileira CINEXPAN. Para a determinação do teor ideal de substituição do agregado

miúdo por argila expandida, cinco traços foram desenvolvidos, sendo o primeiro a referência – sem substituições – e os quatros seguintes, com porcentagens de substituição de 5%, 10%, 15% e 20% consequentemente, do agregado miúdo (areia) por argila expandida. Os materiais utilizados para o desenvolvimento dos corpos de prova são os seguintes: cimento Portland CPV-ARI, agregado miúdo, argila expandida e água. Neste trabalho, para fácil compreensão os traços serão referidos como EC00, onde EC – “*expanded clay*” e os prefixos numéricos são as porcentagens substituídas.

Essas argamassas, foram analisadas quanto suas características físicas, mecânicas, acústicas e microestrutura.

Os ensaios de caracterização física dos materiais, a elaboração das argamassas e os ensaios mecânicos – em estado fresco e endurecido – foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Tecnologia – FT UNICAMP, localizada no Campus I em Limeira – São Paulo.

Para os ensaios de ultrassom, obtenção da atenuação acústica e modulo de elasticidade, foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Agrícola - FEAGRI UNICAMP, localizada no Campus de Campinas.

Os estudos relacionados a microestrutura das argamassas produzidas, foram realizados junto ao Laboratório Multidisciplinar de Microscopia Eletrônica, localizado na Faculdade de Tecnologia – FT UNICAMP, Campus I em Limeira – São Paulo.

Para a elaboração das argamassas e estudo dos parâmetros já mencionados, foram seguidas as normas pertinentes da Associação de Normas Técnicas Brasileiras – ABNT. Foram realizados ensaios para determinação do índice de consistência, retenção de água, determinação do teor de ar incorporado, densidade de massa aparente no estado endurecido, determinação de água por capilaridade e resistências a tração na flexão e compressão axial, determinação da resistência potencial de aderência a tração, absorção acústica e modulo de elasticidade.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento Portland

O cimento escolhido para a composição do traço nesta pesquisa foi o Cimento Portland CPV – ARI – cimento de alta resistência inicial – produzido pela empresa brasileira Votorantim. A escolha deve a sua característica primordial, sua alta resistência inicial, com isso, a possibilidade de a desmoldagem dos corpos de prova serem realizados vinte e quatro horas após a moldagem e que os estudos referentes as resistências mecânicas em estado endurecido possam ser realizadas aos 7 e 28 dias. Outra característica predominante neste tipo de cimento, é o baixo teor de adições ao aglomerante, garantindo uma base cimentícia predominante e para argamassas, proporciona maiores resistências de aderência nas idades iniciais (Carasek,2010). O material citado foi escolhido de acordo com os padrões estabelecidos pela ABNT NBR 16.697:2018.

3.1.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo escolhido foi areia fina, do tipo quartzosa, proveniente da região de Limeira, interior do Estado de São Paulo e seu fornecimento foi feito pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil da FT – UNICAMP. Para utilização o material foi separado e passado pela peneira de malha 9,00 mm, para retirada de folhas e demais impurezas que possam ser adquiridos pelo material durante transporte e estocagem, em seguida o material foi seco, utilizando uma estufa com temperatura de 105°C por 24 horas para a retirada da umidade, após seu resfriamento, o agregado foi armazenado em recipiente limpo e completamente vedado.

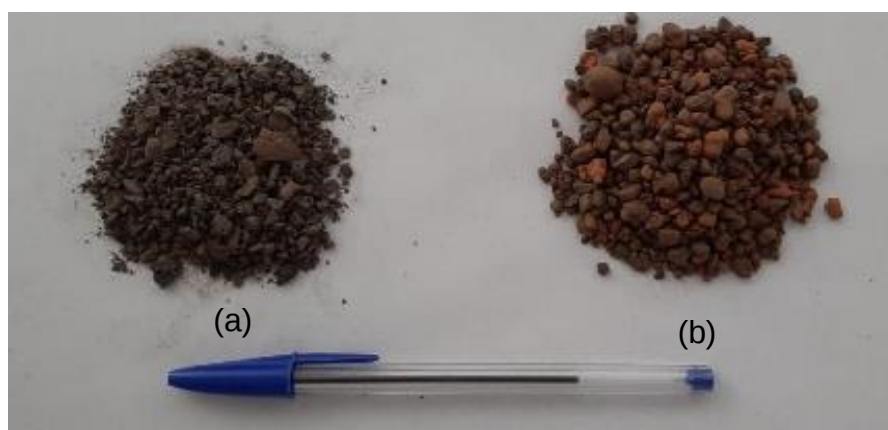
3.1.3 Água

A água utilizada foi captada pelo fornecimento da concessionária responsável pelo tratamento e distribuição da cidade de Limeira, interior do Estado de São Paulo.

4.1.4 Argila Expandida

As argilas expandidas utilizadas no desenvolvimento das argamassas, são dos tipos 0500 ($D_{\text{máx}} = 4,8\text{mm}$ e resistência à compressão de 2,3 MPa) e laminada 2,5 mm ($D_{\text{máx}} = 2,5\text{mm}$ e resistência à compressão de 2,3 MPa), fornecidas pela empresa brasileira CINEXPAN, localizada na cidade de Várzea Paulista, interior do Estado de São Paulo. Ambas as argilas, são fabricadas em forno rotativo e são caracterizadas como materiais naturais, incombustíveis, não inflamáveis e inertes. A Figura 13 possibilita a caracterização visual dos dois tipos.

Figura 13: Argilas expandidas utilizadas. a) Tipo Laminada 2.5mm, b) Tipo 0500



Fonte: Próprio autor.

Após o recebimento das argilas ensacadas, o material passou por processo de secagem similar ao feito com agregado miúdo, permanecendo 24 horas em estufa à 105°C, sendo armazenada em recipiente limpo e vedado após seu resfriamento.

Para o uso nas argamassas, foi utilizada a recomendação de Rossignolo (2009) e Angelin (2018), de saturar a argila expandida em água, 24 horas antes do preparo e escorrer o excesso alguns minutos antes do preparo, com o auxílio de uma peneira; para que a mesma não utilize a água de hidratação do traço, durante o preparo das argamassas, garantindo assim que a relação água/cimento estabelecida seja mantida durante o processo.

A composição química e algumas características físicas das argilas expandidas utilizadas, foram fornecidas pela empresa CINEXPAN, conforme Quadro04.

Quadro 04: Composição química argila expandida.

Composição Química	(%)
Silício (SiO_2)	63,19
Alumínio(Al_2O_3)	18,02
Ferro(Fe_2O_3)	7,63
Titânio(TiO_2)	0,92
Cálcio (CaO)	0,64
Magnésio (MgO)	3,26
Sódio(Na_2O)	0,61
Potássio(K_2O)	4,91
Óxido de Fósforo(P_2O_5)	0,20
Óxido de Manganês (MnO)	0,08
Óxido de Bário (BaO)	0,09

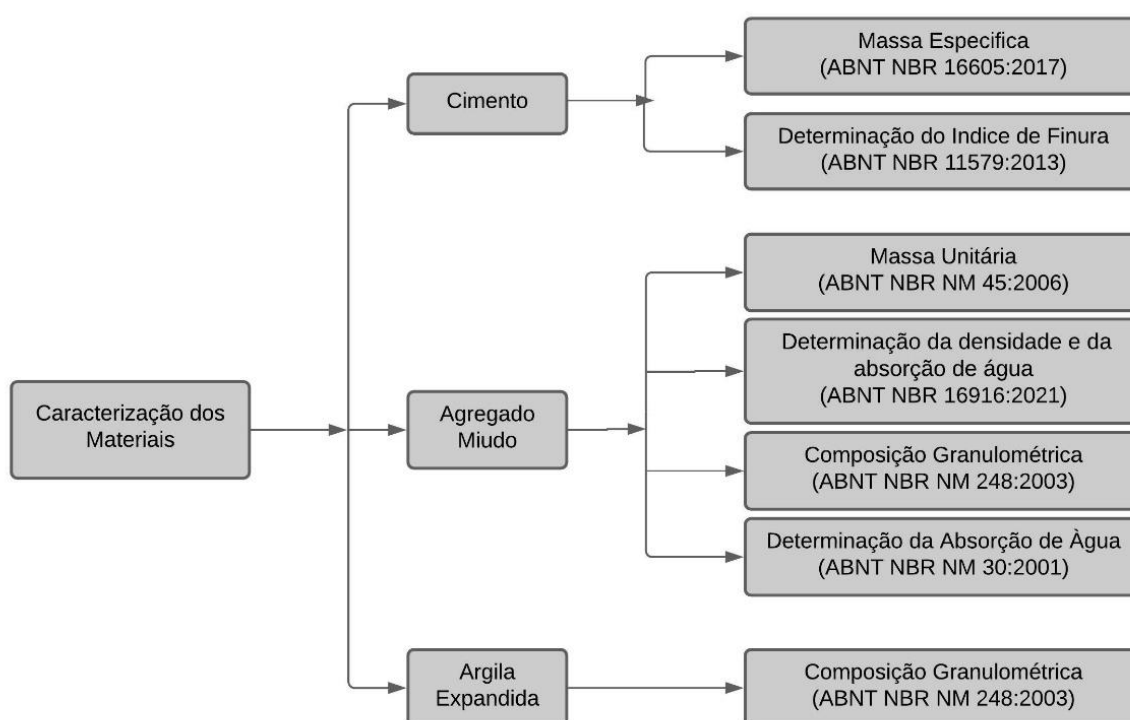
Fonte: CINEXPAN (2015).

Verifica-se, após análise da composição química que no geral, que a argila expandida apresenta grande incidência dos elementos O, Si, Al e Fe. O alto teor do oxigênio pode ser explicado pela sua presença na estrutura cristalina dos óxidos e silicatos que compõem a amostra (Moravia et al, 2006).

3.2 MÉTODOS

Os ensaios realizados para caracterização do agregado miúdo, cimento e argila expandida estão relacionados no fluxograma, mostrado na Figura 14 com apontamento dos normas utilizadas para cada procedimento. Os ensaios executados para determinação das características físicas dos materiais utilizados, foram: determinação do índice de finura do cimento Portland, determinação de massa específica, massa unitária e granulometria para os agregados miúdos.

Figura 14: Fluxograma da Caracterização física dos materiais utilizados no desenvolvimento das argamassas leves.



Fonte da figura: Próprio autor.

3.2.1 Massa Específica e Massa Específica Aparente – Agregado Miúdo

Os ensaios para determinar a massa específica e a massa específica aparente da areia foram realizados conforme os métodos padronizados pela ABNT NBR 16916:2021. A massa específica aparente é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, incluindo os poros permeáveis, e foi determinada pela Equação 01.

$$d_1 = \frac{m}{v - v_a}$$

(Eq. 01)

Sendo:

d_1 = Massa Específica aparente do agregado seco (g/cm³);

m = Massa da amostra seca em estufa (g);

V = Volume do frasco (cm³);

V_a = Volume de água adicionada ao frasco (cm³).

O volume de água adicionado foi determinado conforma Equação 02.

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a}$$

(Eq. 02)

Sendo:

m_1 = Massa do conjunto (frasco + agregado), (g);

m_2 = Massa total (frasco + agregado + água), (g);

ρ_a = Massa específica da água (g/cm³).

A massa específica do agregado saturado superfície seca foi determinada, segundo a ABNT NBR NM 52, pela Equação 03.

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a}$$

(Eq.03)

Sendo:

d_2 = Massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm³);

m_s = Massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

V = Volume do frasco (cm³);

V_a = Volume de água adicionada ao frasco (cm³)

A massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis. Os resultados em duas amostras,

segundo a ABNT NBR NM 52:2009 para o mesmo ensaio, não deve diferir mais de 0,02 g/cm³, e foi determinada pela Equação 04.

$$d_3 = \frac{m}{(v - va) - \frac{ms - m}{\rho_a}}$$

(Eq. 04)

Sendo:

d₃ = Massa específica do agregado (g/cm³);

m = Massa da amostra seca em estufa (g);

V = Volume do frasco (cm³);

Va = Volume de água adicionado ao frasco (cm³);

Ms = Massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

pa = Massa específica da água (g/cm³).

3.2.2 Determinação da Absorção – Agregado Miúdo

A absorção é definida pela ABNT NBR NM 30:2001 como o processo pelo qual um líquido é conduzido e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso. O ensaio para determinar a absorção da areia foi realizado conforme as especificações da norma e foi determinada conforme a Equação 05.

$$A = \frac{ms - m}{m} \cdot 100$$

(Eq. 05)

Sendo:

A= absorção de água (%);

ms= massa amostra na condição saturado superfície seca (g);

m = massa da amostra seca em estufa (g).

3.2.3 Granulometria Agregado Miúdo e Argila Expandida

Para a análise granulométrica do agregado miúdo, foi realizado o ensaio de peneiramento utilizando o conjunto de peneiras de série normal com abertura de

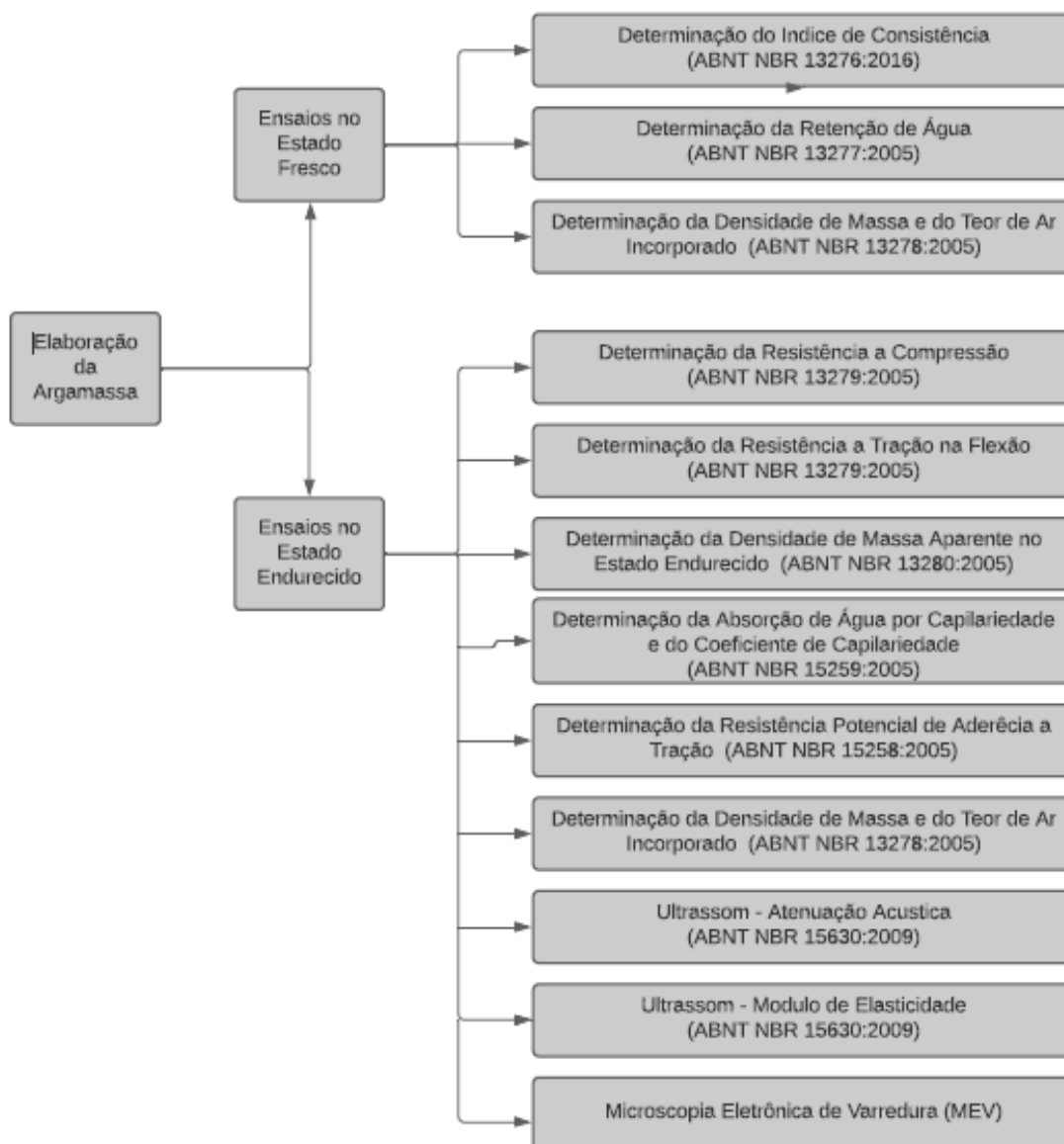
malhas de 0,15 mm, 0,30 mm, 0,60 mm, 1,18mm, 2,36 mm e 4,75 mm, seguindo as determinações da ABNT NBR NM 248:2003.

3.3 Composição e Preparo das Argamassas

Este estudo consiste no desenvolvimento de uma argamassa de traço 1:3 (em volume), definido após estudos previamente realizados pelo grupo de pesquisa da Faculdade de Tecnologia – FT UNICAMP, onde o traço mencionado proporciona condições similares aos canteiros de obra e apresentou resultados positivos quanto as características mecânicas, porém, nesses estudos, o agregado miúdo foi substituído por materiais como resíduo de borracha, proveniente de pneus reciclados.

A ABNT NBR 13281:2005 determina os requisitos que as argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos devem atender, e são classificadas conforme as características e propriedades determinadas pelos ensaios estabelecidos pela norma. A elaboração das argamassas e a realização dos ensaios no estado fresco e endurecido estão representados no fluxograma da Figura 15.

Figura 15: Fluxograma dos ensaios no estado fresco e endurecido realizados no desenvolvimento das argamassas leves



Fonte: Próprio autor.

Para a argamassa estudada, os materiais constituintes são Cimento Portland CPV-ARI, areia fina, argilas expandidas em duas granulometrias distintas e água. A adição de aditivos na mistura não foi necessária até este momento do estudo, pois os traços desenvolvidos apresentaram índices de trabalhabilidade satisfatórios, que serão mostrados em tópicos posteriores.

Para que os ensaios proporcionassem valores comparativos, foi definido um traço referência, 1:3 em volume, onde o agregado miúdo não seria substituído, fazendo com que a composição da argamassa ficasse restrita ao uso de cimento, areia e água. A partir deste traço, porcentagens de substituição

do agregado miúdo foram fixadas em 5%, 10%, 15% e 20%, sendo que o volume correspondente de agregado miúdo foi substituído por duas granulometrias de argila expandida em percentagem de 50% para cada tipo. Cada traço foi nomeado com base na percentagem de substituição de agregado miúdo por argila expandida. A Tabela 08 quantifica os materiais utilizados para produção de cada traço.

Tabela 08: Composição dos traços das argamassas leves estudadas.

Composição Dos Traços Estudados (g)						
Argamassa	Cimento	Areia	Argila Expandida 5mm	Argila Expandida 2.5mm	Água	Relação a/c
EC00	3110	9330	0	0	1980	0,64
EC05	3110	8864	138	124	1950	0,63
EC10	3110	8397	277	248	1950	0,63
EC15	3110	7931	415	372	1980	0,64
EC20	3110	7464	533	497	1980	0,64

Fonte: Próprio autor.

Para cada traço, foram moldados 18 corpos de prova prismático (EC), de acordo com a ABNT NBR 13281:2005, com dimensões padronizadas de 4x4x16 centímetros, totalizando a produção de 90 corpos de prova (EC).

As argamassas foram homogeneizadas em argamassadeira de marca G.Paiz 18C, com capacidade de 18 litros, no Laboratório de Materiais de Construção – FT. Com os materiais constituintes pesados e separados, de acordo com o traço acima, as misturas foram realizadas em três etapas principais, onde a) os materiais secos (cimento e areia) foram homogeneizados manualmente dentro do recipiente; b) com a argamassadeira ligada em velocidade baixa, 70% da quantidade de água foi adicionada a mistura e um período de 4 minutos foi anotado; c) para finalização da massa, o restante da água foi acrescido, para os traços que possuíam argila expandida, as mesmas foram escorridas 10 minutos antes do início do processo e adicionadas nesta etapa, mais 4 minutos foram anotados até a completa homogeneidade dos materiais da argamassa. Para garantir que a argamassa estivesse completamente homogênea, a massa foi misturada manualmente até constatação visual.

Figura 16: Mistura dos materiais secos na argamassadeira



Fonte: Próprio autor.

Figura 17: Mistura de todos os componentes na argamassadeira



Fonte: Próprio autor.

Após o preparo da argamassa, foram moldados os corpos de prova seguido a especificação da ABNT NBR 12358:2015, utilizando moldes metálicos

prismáticos, previamente untados com solução desmoldante. Este processo foi constituído de três partes, onde a) uma porção da argamassa foi colocada nos moldes, com o auxílio de uma gola guia, que atinge-se a marca visual de metade do molde, formando uma camada uniforme, e aplica-se 30 quedas na mesa de adensamento; b) uma segunda camada é adicionada até o preenchimento completo e uniforme do molde, e mais 30 quedas são aplicadas ao molde, de forma que o adensamento está completo e o corpo-de-prova preenchido) a guia é retirada, a massa excedente é rasada com o auxílio de uma régua metálica.

Figura 18: Modelagem dos corpos de prova.



Fonte: Próprio autor.

Como já citado, o cimento utilizado foi CPV-ARI, que possibilita o corpo de prova moldado atingir alta resistência inicial e ser desmoldado 24 horas após o processo de cura ter sido iniciado com a finalização da moldagem. Com eles desmoldados, os corpos de prova foram imersos em água e acondicionados na câmara úmida, até a idade de 28 dias, para que o processo de cura fosse completado e garantir que ele manteria suas características iniciais, sem perder água para o meio ambiente.

Figura 19: Corpos de prova após desmoldagem em 24 horas.



Fonte: Próprio autor.

3.4 Ensaios no Estado Fresco

Segundo Carasek (2010), características no estado fresco, interferem diretamente em parâmetros como resistência, trabalhabilidade e desempenho nas argamassas. Afim de avaliar e qualificar essas características, para uma compressão completa do material desenvolvido neste estudo, foram realizados os ensaios de determinação do índice de consistência (ABNT NBR 13276:2016), determinação de retenção de água (ABNT NBR 13277:2005) e densidade de massa e teor de ar incorporado (ABNT NBR 13278:2005).

3.4.1 Determinação do Índice de Consistência

Este ensaio é realizado com a argamassa fresca, com a utilização da mesa de consistência (*Flow Table*), sendo normatizado pela ABNT NBR 13276:2016. Neste ensaio um molde cônico metálico é posicionado no centro da mesa de consistência, com as características já normatizadas, e três camadas de argamassas são inseridas no molde, de forma que cada camada preencha 1/3 do cone, que são avaliadas de forma visual e inseridas da seguinte maneira : a) primeira camada é adensada com auxílio de soquete metálico, com 15 golpes; b) a segunda é adensado com 10 golpes; c) terceira é adensada com 5 golpes, onde os golpes são distribuídos de forma uniforme e constantes. Com o molde adensado, efetua-se o rasamento da argamassa excedente com o auxílio de uma régua metálica, formando um ângulo de 45° em relação a superfície do molde. Com o cone perfeitamente moldado, o cone metálico é retirado e são dados 30 golpes de queda da mesa, efetuando cada queda em um período de um segundo. Em seguida é feita a medição do diâmetro do espalhamento da argamassa, em três posições diferentes. A média desses valores é o índice de consistência da argamassa.

Figura 20: Ensaios de Flow Table.



Fonte: Próprio autor.

3.4.2 Determinação da Densidade e Teor de Ar Incorporado

Este ensaio é pautado pela ABNT NBR 13278:2005, que consiste em introduzir 3 camas de argamassa fresca, em quantidade iguais, dentro de um recipiente calibrado e de volume e massa conhecidos. A cada camada de argamassa, deve-se aplicar 20 golpes com soquete metálico, para adensamento da camada. Quando este processo está finalizado, deve-se aplicar 3 golpes de queda de uma altura aproximada de três centímetros de altura, rasar o recipiente e anotar a massa do conjunto argamassa e recipiente.

A densidade de massa da argamassa é determinada pela Equação 09:

$$A = \frac{M_c - M_v}{V_r}$$

(Eq. 09)

Sendo:

A= Densidade de massa (g/cm³);

Mc = massa do recipiente cilíndrico, contendo a argamassa de ensaio(g);

Mv = massa do recipiente cilíndrico vazio (g);

Vr = volume do recipiente cilíndrico (cm³).

O teor de ar incorporado foi determinado pela Equação 10:

$$AI = 100 \cdot \left(1 - \frac{A}{B}\right)$$

(Eq. 10)

Sendo:

AI= Teor de ar incorporado (%);

A = Densidade de massa (g/cm³);

B = Densidade de massa teórica da argamassa, sem vazios.

A densidade de massa teórica foi determinada pela Equação 11:

$$B = \frac{\sum M_i}{\sum \frac{M_i}{\gamma_i}}$$

(Eq. 11)

Sendo:

M_i = massa seca de cada componente da argamassa, inclusive massa da água (g);

γ_i = densidade de massa de cada componente da argamassa (g/cm³).

3.4.3 Determinação da Retenção de Água

Para o cálculo da retenção de água da argamassa fresca produzida, a ABNT NBR 13277:2005, consiste em encher um molde metálico específico com massa conhecida, em até 10 porções de argamassa e rasar o excedente com o auxílio de uma espátula metálica e alisar sua superfície. Pesando o conjunto do recipiente com argamassa, registrando a massa. Após esse processo, duas telas de gaze são posicionadas sobre a superfície com argamassa, e sob a gaze é posicionado 12 filtros secos, com massa previamente conhecida. Sobre todo o conjunto, foi posicionado um disco com massa conhecida de 2 quilos, contabilizando dois minutos. Após esse tempo, remover o disco, e pesar somente os filtros, registrando sua massa.

A retenção de água é calculada pela Equação 12:

$$R_a = \left[1 - \frac{M_f - M_{se}}{AF \cdot (M_{ma} - M_m)} \right] \quad (\text{Eq. 12})$$

Sendo:

R_a = Retenção de água (%)

M_w = massa total de água acrescentada à mistura (g)

M = Soma das massas dos componentes anidros (g)

AF = Fator água/argamassa fresca, dado pela Equação 13:

$$AF = \frac{M_w}{M + M_w} \quad (\text{Eq. 13})$$

Sendo:

M_f = massa do conjunto de discos molhados de papel-filtro (g);

M_{se} = massa do conjunto de discos secos (g);

M_{ma} = massa do molde com argamassa (g);

Mm = massa do molde vazio (g).

Figura 21: Equipamentos para realização dos ensaios de retenção de água.



Fonte: Próprio autor.

3.5 Ensaios no Estado Endurecido

Ensaios em estado endurecido, ou seja, com cura parcial ou completa, proporcionam o conhecimento dos parâmetros mais comuns de materiais que possuem bases cimentícias, como é o caso da argamassa desenvolvida neste estudo. Parâmetros como resistência a tração na flexão e compressão axial, auxiliam na classificação de uso dessa argamassa, de acordo com a ABNT NBR 13279:2005, validando assim a possibilidade de uso e permitindo a comparação com argamassas convencionais.

3.5.1 Resistência a Tração na Flexão

Os ensaios de tração na flexão, pautados pela ABNT NBR 13279:2005, foram realizados com corpos de prova prismático com dimensões de 16x4x4 centímetros, aos 7 e 28 dias. Para cada ensaio, foram utilizados 6 corpos de prova, para cada traço desenvolvido. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da FT – UNICAMP, utilizando prensa eletromecânica EmiC. Os corpos de prova foram posicionados entre os apoios, distanciando 3

centímetros de cada borda externa. Os valores são fornecidos em quilograma-força.

A resistência à tração na flexão é calculada pela Equação 14:

$$Rf = \frac{1,5 FfL}{40^3}$$

(Eq. 14)

Sendo:

Rf = Resistência à tração na flexão (MPa);

Ff = Carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);

L = Distância entre os suportes (mm).

Figura 22: Ensaio de tração na flexão.



Fonte: Próprio autor.

3.5.2 Resistência a Compressão Axial

Após a realização do ensaio de tração, a ABNT NBR 13279:2005, postula o uso das metades do CP que foi rompida. Os ensaios foram realizados aos 7 e 28 dias, executados em conjunto com os ensaios de tração na flexão, totalizando em 12 metades ensaiadas. Para a execução desse ensaio, utilizou uma prensa eletromecânica MTS. Os valores de rompimento são fornecidos em quilograma-força.

A resistência à compressão foi calculada pela Equação 15:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

(Eq. 15)

Sendo:

Rc = Resistência à compressão (MPa);

Fc = Carga máxima aplicada (N)

1600 = Área da seção do corpo de prova considerada quadrada (40 mm x 40 mm).

Figura 23: Ensaio de compressão axial.



Fonte: Próprio autor.

3.5.3 Densidade de Massa Aparente

Após os corpos de prova curados com 28 dias e retirados da água, os mesmos foram mantidos em ambiente controlado, com temperatura controlada, de forma que os corpos de prova estabilizassem sua massa, de acordo com a

ABNT NBR 13280:2005. Após a estabilização da massa, as dimensões de largura, altura e comprimento dos corpos de prova foram aferidas com auxílio de paquímetro em dois locais diferentes e as medidas anotadas. Com essas dimensões foi calculado o volume de cada CP e sua massa aferida com a utilização de uma balança de precisão com resolução de 0,1 grama.

A densidade de massa foi calculada segundo a Equação 16:

$$\rho_{M\acute{a}x} = \frac{m}{v} \cdot 1000 \quad (\text{Eq. 16})$$

Sendo:

v = Volume calculado segundo a equação $v = l.h.c$;

m = Massa do corpo de prova.

3.5.4 Determinação da Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

Para a determinação da absorção de água por capilaridade e o coeficiente de capilaridade foi realizado o ensaio seguindo as determinações da ABNT NBR 15259:2005. Esse ensaio consiste em após a cura de 28 dias, os corpos de provas devem ser e mantidos a temperatura de 23°C, e umidade relativa do ar 60 +/- 5 %, por um período máximo de 24 horas, decorrido esse tempo a superfície dos corpos de provas foram lixadas e limpas com um pincel. Em seguida foi determinada sua massa inicial e posicionados no equipamento específico para esse ensaio. Após 10 minutos, com a face quadrada imersa em não mais que 5 mm de água, mantidos constantes durante todo o ensaio, os corpos de provas foram retirados da água e tomados sua massa, e, imediatamente retornaram ao recipiente de ensaio. O mesmo procedimento foi efetuado aos 90 minutos a partir do momento em que entraram em contato com a água, conforme a norma determina. Para esse ensaio foram utilizados 6 corpos de prova para cada teor de substituição, totalizando 30 corpos de prova.

Para a determinação da absorção de água, foi utilizada a Equação 17, para cada tempo decorrido.

$$A_t = \frac{m_t - m_o}{16}$$

(Eq. 17)

Sendo:

A_t = Absorção por capilaridade para cada tempo (g/cm^2);

m_t = Massa do corpo de prova para cada tempo (g);

t = Tempo de 10 min e 90 min (s);

16 = Área do corpo de provas (cm^2).

O coeficiente de capilaridade por definição segundo a NBR 15259:2005, é aproximadamente igual ao valor médio das diferenças de massa aos 10 min e 90 min, conforme Equação 18:

$$C = (m_{90} - m_{10}) \quad (\text{Eq.18})$$

3.5.5 Determinação da resistência Potencial da Aderência a tração

Para a determinação da resistência potencial da aderência atração das argamassas estudadas, foi adotada a metodologia estabelecida pela ABNT NBR 13528-2:2019, utilizando três placas de um conjunto formado por substrato de concreto com assentamento da argamassa produzida. Este ensaio pode ser dividido em 3 etapas distintas: 1) moldagem do substrato de concreto; 2) lançamento da argamassa sob o substrato e 3) perfuração das placas e ensaio de arrancamento.

Os substratos de concreto foram moldados seguindo as especificações do anexo B da ABNT NBR 14081-2:2015, onde é sugerido um traço de 1:2,6:1,3 (cimento: areia: agregado graúdo) e relação água cimento de 0,50 para produção dos substratos, que possuem dimensão de 50x25 centímetros. Essa etapa também inclui o posicionamento de uma malha metálica para a armação do substrato, a Figura 24 demonstra o arranjo.

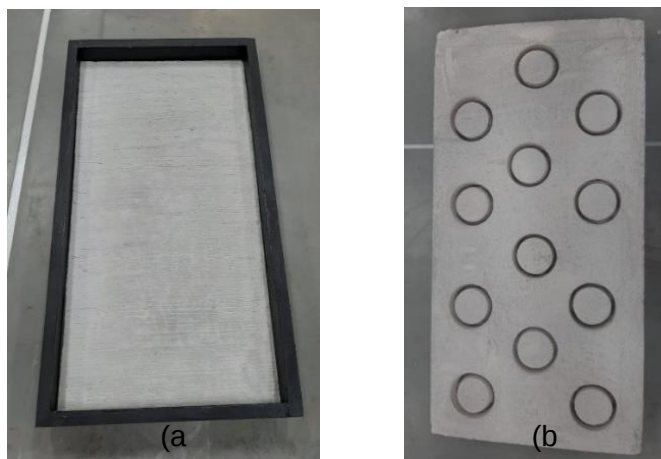
Figura 24: Preparo do arranjo para concretagem do substrato padrão, composto pela forma de madeira (50x25cm) e malha metálica.



Após 28 dias, os substratos de concreto estão curados e podem receber o lançamento da argamassa. A ABNT NBR 13258-2:2019, recomenda que esta etapa seja feita manualmente e com o posicionamento de forma de tamanho similar ao substrato de concreto e com espessura de 4cm, com lançamentos posicionados a uma distância de 15cm do substrato e que sejam feitos com vigor, de forma a provocar aderência entre ambos os materiais, garantindo a execução da última etapa.

Esse conjunto deve ser curado por 28 dias, para garantir o ganho de resistência mecânica necessária a execução da perfuração com serra copo de dimensão 5cm, de forma que a placa seja perfurada até o encontro do substrato de concreto, colagem e arrancamento das pastilhas metálicas de mesma dimensão. A Figura 25 apresenta as etapas 2 e 3 do ensaio.

Figura 25: (a) Substrato de concreto com posicionamento de moldura de madeira para assentamento da argamassa. (b) Conjunto substrato de concreto com argamassa, perfurado com serra copo aos 28 dias.



Fonte: Próprio Autor.

Com as placas perfuradas, pastilhas metálicas, que possuem uma saliência para fixação ao equipamento de tração (dinamômetro) são coladas sobre as marcações feitas utilizando cola epóxi de alta viscosidade, e após um intervalo de 24 horas, o conjunto está pronto para realização dos ensaios. Com a cola completamente seca, o ensaio de arrancamento foi realizado, utilizando um dinamômetro de arrancamento. Este equipamento que aplica uma força contínua de tração perpendicular à pastilha metálica até que ocorra a ruptura. Após a ruptura, registrou-se o valor da força aplicada e o diâmetro e forma da ruptura das amostras. A Figura 26 apresenta o conjunto final, com a realização do ensaio de aderência potencial a tração.

Figura 26: Realização do ensaio de arrancamento, com posicionamento do dinamômetro de arrancamento.



Fonte: Próprio autor.

A resistência de aderência à tração em cada amostra foi calculada utilizando a Equação 19:

$$Ra = \frac{F}{A}$$

(Eq.19)

Sendo:

Ra = A resistência de aderência à tração (MPa)

F = Força de ruptura (N)

A = Área do corpo de prova (mm²).

3.5.6 Ensaio de Atenuação Acústica e Modulo de Elasticidade

O ensaio de atenuação acústica foi realizado no Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, utilizando o método do ultrassom. O equipamento utilizado para esse ensaio foi o ultrassom da marca Olympus Panametrics, atendendo os procedimentos determinados pela ABNT NBR 15630:2009. Para este ensaio foram testadas seis amostras de cada traço, com suas respectivas porcentagens de substituição já mencionadas. Para o ensaio foram utilizados corpos de provas prismáticos com dimensões 40 x 40 x 160 mm, com idade de 28 dias.

Com os dados obtidos por meio do ensaio de atenuação acústica, é possível determinar os valores do módulo de elasticidade das argamassas estudadas. Para isso, foram seguidas as determinações da ABNT NBR 15630:2008. Para tal, a velocidade de propagação deve ser observada durante o ensaio.

O ensaio consiste em dois transdutores que são acoplados nas extremidades das amostras utilizando para isto um gel de ultrassom que melhora o contato entre a amostra e os transdutores. As ondas sonoras são propagadas nas direções longitudinais e transversais. Os transdutores são ajustados direcionando a vibração das partículas, desta forma, se obtém a os valores das velocidades de transmissão das ondas, por meio da compressão. Com a obtenção destes dados é possível calcular a atenuação acústica desse material, bem como seu modulo de elasticidade.

Foi fixado a emissão de ondas de 1 MHz, a amplitude inicial e final é fornecida pelo equipamento em porcentagem, para que fosse possível a medição das ondas, foi necessário fixar os valores do ganho, que foi ajustado de acordo com as ondas emitidas pelo pulsador, pois, a amplitude variou significativamente entre as amostras.

Antes de iniciar o ensaio, o equipamento é calibrado, utilizando para isso um modelo padrão, cujo material constituinte é resina acrílica translúcida, que possui velocidades de propagação padrão já estabelecidas pelo fabricante.

Figura 27: Esquema para realização dos ensaios de ultrassom.



Para calcular o coeficiente de atenuação acústica das amostras foi utilizada a Equação 20.

$$\alpha = -\frac{20}{h} \log \frac{Af}{A1}$$

(Eq. 20)

Sendo:

α = Coeficiente de atenuação

A_i = Amplitude inicial

A_f = Amplitude final

h = Altura da amostra.

Por meio do ensaio de ultrassom é possível determinar os valores do módulo de elasticidade das argamassas estudadas. Para isso, foram seguidas as determinações da ABNT NBR 15630:2008. Para o ensaio, foram utilizados 6 corpos de provas prismáticos com dimensões 40 x 40 x 160 mm, para todas as porcentagens de substituições e com 28 dias de idade.

A velocidade de propagação das ondas é dada pela Equação 21:

$$V = \frac{L}{t}$$

(Eq. 21)

Sendo:

V = Velocidade de propagação da onda ultrassônica (mm/ μ s)

L = Distância entre os pontos de acoplamento dos transdutores (mm)

t = Tempo registrado pelo equipamento (μ s)

O módulo de elasticidade dinâmico é determinado pela Equação 22:

$$Ed = v^2 \rho \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu}$$

(Eq. 22)

Sendo:

E_d = Módulo de Elasticidade Dinâmico (MPa)

v = Velocidade de propagação da onda ultrassônica (mm/ μ s)

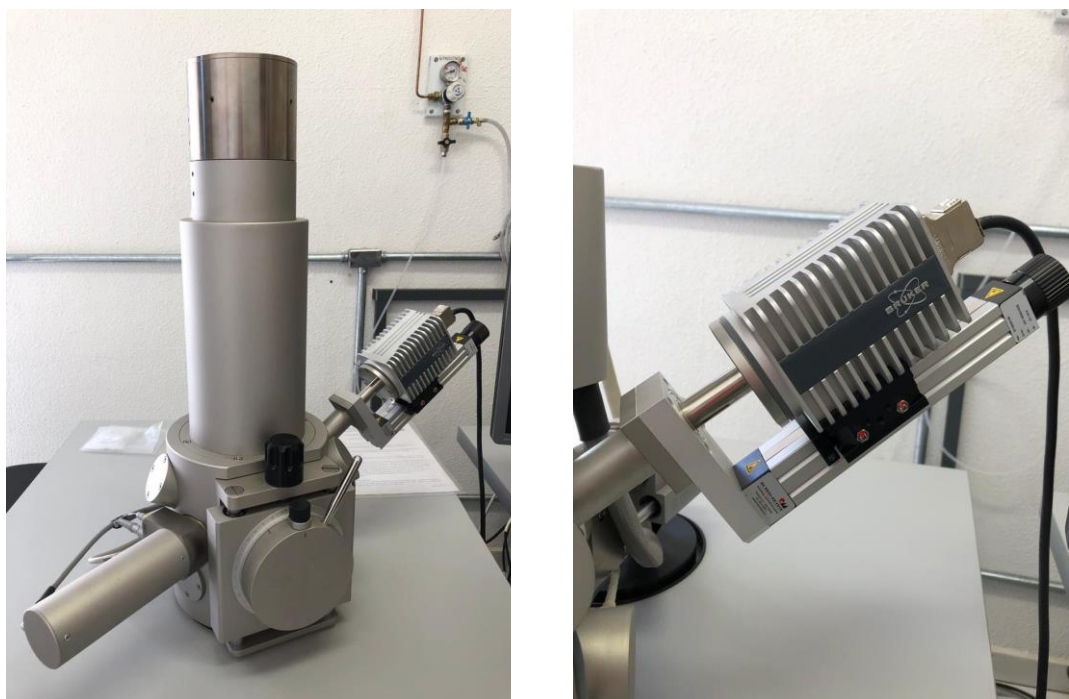
ρ = Densidade de massa aparente do corpo de prova (kg/m³)

μ = Coeficiente de Poisson (adota-se 0,2)

3.5.7 Análise microestrutural

O ensaio para avaliação da microestrutura dos traços de argamassas propostos, foi realizado utilizando-se a técnica da microscopia eletrônica de varredura (MEV), no Laboratório Multidisciplinar de Microscopia Eletrônica (LAMME) da Faculdade de Tecnologia da Unicamp. As amostras foram inseridas dentro da câmara do microscópio eletrônico multiusuário MEV TESCAN VEGA 3 SEM, mostrado na Figura 28. Para a elaboração dos ensaios, o equipamento foi configurado com energia de feixe de 10kV, corrente do feixe entre 500 pA e distancia de trabalho de 10mm. Convém ressaltar, que embora ainda em fase de instalação e treinamento, encontra-se também neste laboratório o Detetor para Espectroscopia de raio - X por dispersão em energia - EDS, (Detector X-Act SDD com precisão PentaFET , área ativa de 10mm²), apresentado na Figura 5. Futuras análises microscópicas poderão ser acompanhadas das análises de EDS.

Figura 28: a) Microscópio TESCAN VEGA 3 SEM com EDS acoplado; b) EDS.



Fonte: Próprio autor

Foram utilizadas duas amostras para cada traço de argamassa, garantindo assim a geração de imagens completas acerca da microestrutura do material. As amostras foram retiradas dos corpos-de-prova rompidos aos 28 dias, secos em estufa a 70°C por 24 horas.

As amostras das argamassas foram fraturadas para análise em microscópio eletrônico de varredura, em porções que continham todos os materiais utilizados na composição do traço, onde características como poros e a qualidade da interação entre pasta e agregados, denominada Zona de Transição na Interface (ZTI).

Como as amostras deste trabalho são classificadas como não metálicas, ele foi realizado em duas etapas, na primeira, imagens foram feitas sem a

metalização das amostras e para segunda etapa, todas as amostras foram metalizadas, afim de melhorar sua condução eletrônica e com isso, gerar imagens mais precisas e claras.

Para a metalização, as amostras foram fixadas aos suportes tipo Stub com fita dupla face de carbono, posicionadas na metalizadora da marca Quorum, e sob elas foi aplicado um filme de platina em 7 amostras e carbono nas outras 3 amostras, apenas com o objetivo de familiarização com as duas técnicas de metalização, pois, o resultado final encontrado foi o mesmo, tanto para o material platina como carbono.

Nas Figuras 29 e 30 apresentam-se a metalizadora devidamente instalada e preparada para utilizar tanto platina, como carbono para cobertura das amostras. Pode-se observar o instante exato da formação do plasma (cor roxa-azulada), gerada pela diferença de potencial entre os materiais.

Figura29: a) Metalizadora preparada para utilizar platina para cobertura das amostras



Fonte: Próprio autor



Fonte: Próprio autor

Figura 30: a) Metalizadora preparada para utilizar carbono para cobertura das amostras



Fonte: Próprio autor

A Figura 31 apresenta as amostras antes e após a metalização, devidamente acondicionadas, e que serão analisadas pelo MEV.

Figura 31: a) Amostras metalizadas



Fonte: Próprio autor

Após o processo de metalização, as amostras foram fixadas em suporte interno do compartimento do microscópio de varredura eletrônica e as imagens foram geradas a partir de software próprio, onde o operador varia a escala de zoom observada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios de caracterização física dos materiais constituintes da argamassa – cimento, agregado miúdo e argilas expandidas -, ensaios em estado fresco e endurecido, de qualificação das características mecânicas serão apresentados nos itens deste capítulo.

4.1 Caracterização Física

4.1.1 Cimento Portland – CPV ARI

Os resultados obtidos para caracterização física do material foram obtidos junto ao fabricante, empresa Votorantim, conforme Tabela 09.

Tabela 09: Características físicas cimento CPV-ARI.

Propriedades	Unidade	Resultado
--------------	---------	-----------

*Massa Específica (ABNT NBR 16605:2017)	Kg/dm ³	3,10
*Massa Unitária (ABNT NBR NM 45:2006)	Kg/dm ³	1,03
*Módulo de Finura (ABNT NBR)	-	0,98
**Tempo de Pega: Início/Fim ABNT NBR NM 65:2002	(min)	130/210
**Resistência à Compressão ABNT NBR 7215:1997	MPa	27,50 até 56

Fonte: *Elaborado pela autora e ** valores fornecidos pelo fabricante (2021)

4.1.2 Agregado Miúdo – Areia

As características físicas obtidas em ensaios realizados no laboratório são apresentadas na Tabela 10, obtidos de acordo com a normatização brasileira descrita no capítulo de metodologia.

Tabela 10: Características físicas do agregado miúdo.

Características Físicas da Areia			
Ensaio Realizado	Unidade	Resultado	NBR
Massa Específica	g/cm ³	2,63	NBR NM 52:2002
Massa Unitária	g/cm ³	1,51	NBR NM 45:2006
Diâmetro Máximo	mm	0,60	NBR NM 248:2003
Módulo de Finura	-	1,21	NBR NM 248:2003

Fonte: Próprio autor.

De acordo com a granulometria encontrada de diâmetro máximo igual 0,60 milímetros e módulo de finura 1,21, a ABNT NBR NM 248:2003, classifica este agregado como fino, uma vez que seu módulo é inferior a 2,40 milímetros. A Tabela 11 apresenta os resultados das peneiras.

Tabela 11: Composição granulometria da areia natural quartzosa

Abertura da Peneira (mm)	Areia Natural Quartzosa	
	% Retida	% Acumulada
9,5	0	0

6,3	0	0
4,8	0	0
2,4	0	0
1,2	0	0
0,6	2	2
0,3	31	33
0,15	54	86
Fundo	14	100

Fonte: Próprio autor.

4.1.3 Argila Expandida – 5mm e laminada 2,5mm

Para o estudo da argila expandida utilizada, foram utilizados dados fornecidos pela empresa fabricante CINEXPAN, para obtenção dos resultados de massa específica e resistência a compressão. Já para granulometria, as amostras foram submetidas a normativa utilizada para agregados miúdos, a ABNT NBR NM 248:2003. Os resultados encontrados para a argila expandida tipo 5mm e laminada 2,5mm, são apresentados nas Tabela 12 e 13.

Tabela 12: Características físicas argila expandida tipo 5mm.

Características Físicas da Argila Expandida 5mm			
Ensaio Realizado	Unidade	Resultado	NBR
Massa Específica	kg/dm ³	1,56	-
Resistência a Compressão	MPa	2,30	-
Diâmetro Máximo	mm	4,8	NBR NM 248:2003
Módulo de Finura	-	4,53	NBR NM 248:2003

Fonte: Próprio autor.

Tabela 13: Características físicas da argila expandida laminada 2.5mm.

Características Físicas da Argila Expandida Laminada 2.5 mm			
Ensaio Realizado	Unidade	Resultado	NBR
Massa Específica	kg/dm ³	1,40	-
Resistência a Compressão	MPa	2,30	-

Diâmetro Máximo	mm	4,8	NBR NM 248:2003
Módulo de Finura	-	2,32	NBR NM 248:2003

Fonte: Próprio autor.

Ambas as argilas expandidas caracterizadas, apresentaram diâmetro máximo iguais a 4,8mm e módulos de finura inferiores ou iguais a 4,5; os dois materiais são caracterizados como agregados miúdos de acordo com a ABNT NBR NM 248:2003, validando sua utilização como agregado de substituição nos traços propostos. As Tabelas 14 e 15 apresentam as composições granulométricas das argilas expandida estudadas.

Tabela 14: Composição granulométrica da argila expandida 5mm.

Abertura da Peneira (mm)	Argila Expandida 5mm	
	% Retida	% Acumulada
9,5	0	0
6,3	0	0
4,8	5	5
2,4	64	68
1,2	21	89
0,6	6	95
0,3	2	97
0,15	1	99
Fundo	1	100

Fonte: Próprio autor.

Tabela 15: Composição granulométrica da argila expandida 2.5mm.

Abertura da Peneira (mm)	Argila Expandida 2.5mm	
	% Retida	% Acumulada
9,5	0	0
6,3	0	0

4,8	0	0
2,4	6	6
1,2	26	32
0,6	20	52
0,3	14	66
0,15	10	76
Fundo	24	100

Fonte: Próprio autor.

Com relação os resultados utilizados pelo fornecedor, a empresa CINEXPAN, foi necessária pela falta de normatização de ensaios específicos para determinação da massa específica das argilas expandidas, pois o material de comporta de forma diferente dos agregados normatizados, uma vez que este material fica com parte em suspensão em meios aquosos e líquidos com densidade menores, invalidando as técnicas que o Laboratório de Materiais dispunha no momento dos ensaios, onde todo o material deve permanecer afundado. Isso se deve a baixa densidade do material, sendo menor que 0,60 kg/m³.

4.2 Propriedade das Argamassas em Estado Fresco

Para que a avaliação de trabalhabilidade e qualidade inicial da argamassa possam ser classificadas e qualificadas, indicado usos específicos para o material. Com isso os resultados para os ensaios iniciais, com a argamassa em estado fresco, com período de fabricação de no máximo 30 minutos, são apresentados na Tabela 16. Nesta tabela consta os resultados obtidos através dos ensaios de Índice de Consistência (ABNT NBR 13276:2016), Densidade de Massa e Teor de Ar (ABNT NBR 13278:2005) e Retenção de água (ABNT NBR 13277:2005).

Tabela 16: Resumo das características em estado fresco das argamassas desenvolvidas.

Propriedades das Argamassas em Estado Fresco
--

Argamassa	Relação a/c	Índice de Consistência (mm)	Densidade de Massa (kg/m ³)	Ar Incorporado (%)	Retenção de Água (%)
EC00	0,64	221,67	2227,06	4	94
EC05	0,63	238,67	2171,59	6	92
EC10	0,63	255,33	2184,04	7	91
EC15	0,64	285,66	2187,35	10	90
EC20	0,64	283,33	2127,95	11	90

Fonte: Próprio autor.

Com relação a densidade de massa no estado fresco, todas as argamassas apresentaram redução em seus valores e considerando a classificação dada pela ABNT NBR 13281:2005, todos os traços se encaixam como D6, com densidades superiores a 2000 kg/m³. também pode ser caracterização como uma argamassa comum, tendo variações superiores a 2000 kg/m³ e inferiores a 2300 kg/m³.

Quando se analisa o teor de ar incorporado pelas argamassas, que é caracterizado pela quantidade de ar presente em um determinado volume de argamassa, que influi de forma direta na trabalhabilidade do material, sendo padronizados pela ABNT NBR 13278:2005. De acordo com os resultados obtidos, temos uma variação crescente na taxa de ar incorporado com o aumento da taxa de substituição do agregado miúdo por argila expandida, variando de 4 a 11%. É recomendado pela ASTM C270 (ASTM,2007), valores de incorporação inferiores a 14%, para que não haja comprometimento da trabalhabilidade do material. Sendo assim, todos os traços apresentam bons valores.

Por fim a análise da retenção de água, demonstra que todos os traços com substituição de agregado miúdo por argila expandida, foram superiores ou iguais a 90%, obtendo classificação U5, pela ABNT NBR 13281:2005. Isso demonstra que as argamassas possuem boas condições de cura, onde a reação aglomerante e água é garantida, não causando exsudação rápida, que pode inferir em perda de resistência mecânica e trabalhabilidade (CARASEK, 2010).

4.3 Propriedade das Argamassas em Estado Endurecido

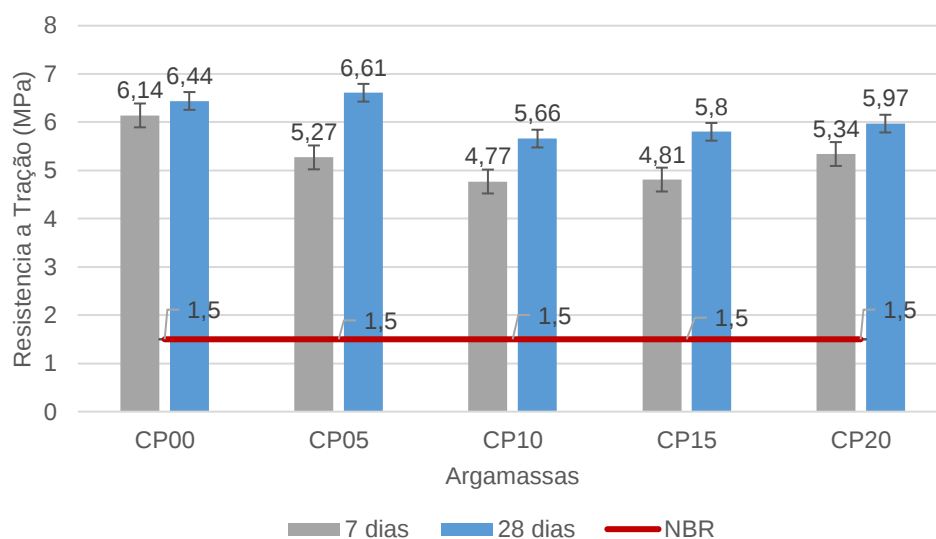
Para realização dos ensaios em estado endurecido dos corpos de prova, os procedimentos foram divididos em duas idades distintas, 7 e 28 dias. Para a primeira idade, 6 corpos de prova foram ensaios para determinação das resistências a tração na flexão e compressão axial. Já para a segunda, 6 corpos de prova foram submetidos ao mesmo procedimento feito na primeira idade e um conjunto diferente de 6 corpos de prova foram submetidos ao ensaio para determinação da densidade de massa aparente das argamassas. O resultado dos ensaios é apresentado nos itens 4.3.1 ao 4.3.5.

4.3.1 Resistência a Tração na Flexão e Compressão Axial

Para determinação da resistência a tração na flexão e compressão axial, foram realizados ensaios nas idades de 7 e 28 dias dos corpos de prova, os resultados são apresentados nas Figuras 32 e 33, onde as barras representam os valores médios obtidos em cada conjunto de corpos de prova ensaios e a barra vermelha determina os valores mínimos que caracterizam essa argamassa como de revestimento e assentamento. A norma brasileira que determina os parâmetros de ensaio aplicados é fornecida pela ABNT NBR 13279:2005.

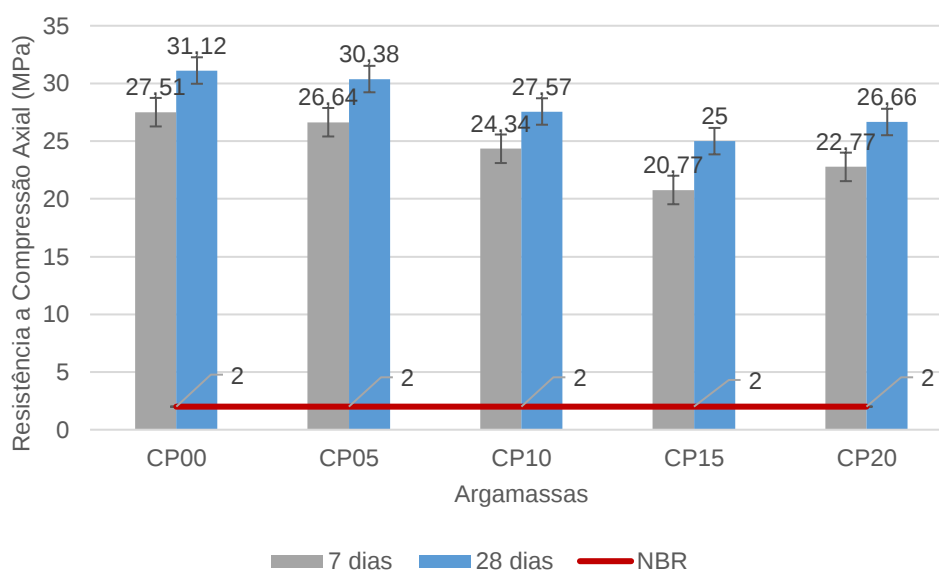
Os resultados demonstram comportamento esperado com relação ao crescimento da taxa resistência a tração e compressão entre os períodos de ensaio, que aumentaram quando completaram o período de cura. Porém, quando se compara em relação aos teores de substituição nas argamassas, os resultados são próximos e não apresentam comportamento de queda linear.

Figura 32: Variação dos valores encontrados para resistência a tração na flexão.



Fonte: Próprio autor

Figura 33: Variação dos valores encontrados para resistência a compressão axial.



Fonte: Próprio autor

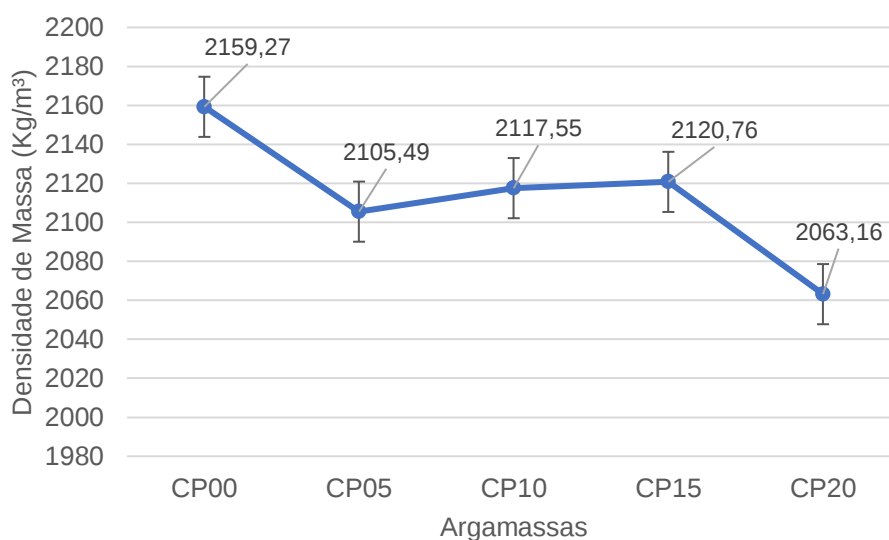
Com relação as classificações apresentadas pela ABNT NBR 13281:2005, todas as argamassas são classificação de resistência a compressão P6, pois apresentam resistência superior a 8 MPa. Para a resistência a tração na flexão, todas as argamassas apresentaram resultados

superiores a 3,5 MPa, atingindo classificação R6. Ambas as classificações dadas pela norma, são os maiores valores prescritos.

4.3.3 Densidade de Massa Aparente

A densidade de massa foi determinada de acordo com a ABNT NBR 13280:2005, com a idade de 28 dias dos corpos de prova, com um conjunto de 6 corpos de prova por traço de argamassa. Os resultados obtidos são apresentados no Figura 34.

Figura 34: Variação de valores encontrados para densidade de massa aparente.



Fonte: elaborado pela autora (2020).

As argamassas com substituição de agregado miúdo por argila expandida apresentaram redução nos valores de densidade de massa aparente, variando de 2117,55 a 2063,16 kg/m³.

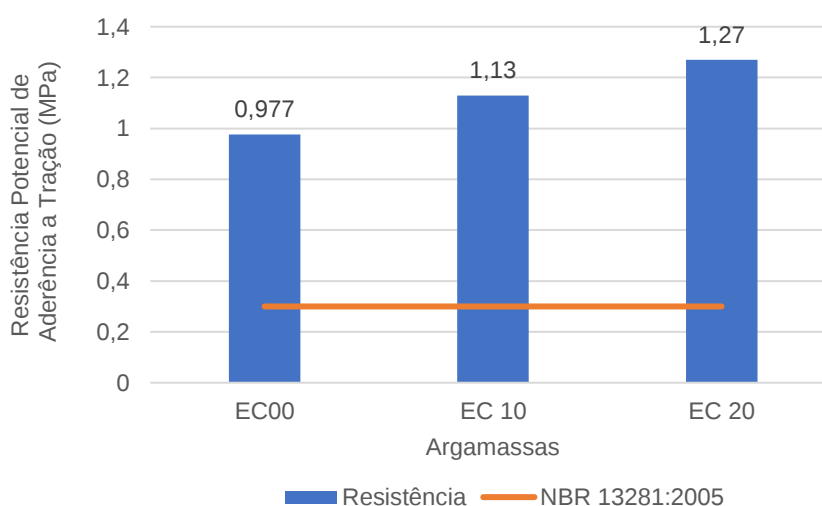
De acordo com a ABNT NBR 13281:2005, como todas as argamassas com teor de substituição apresentam densidade de massa aparente superiores a 1800 Kg/m³, são classificadas como M6 e, portanto, não levam denominação

de argamassas leves, apesar de apresentar redução em sua densidade, quando comparado com o traço referência.

4.3.4 Resistência potencial da aderência a tração

O ensaio foi realizado nos traços EC00, EC10 e EC20 e avaliadas e classificadas segundo a ABNT NBR 13281:2005 que determina os requisitos para as argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos. Os resultados obtidos estão demonstrados na Figura 35.

Figura 35: Resultados da resistência potencial de aderência à tração para os traços EC00, EC10 e EC20.



Fonte: Próprio autor

Os resultados obtidos para resistência potencial de aderência à tração com a utilização de placas de concreto armadas como substrato, demonstraram que os corpos de prova apresentaram rupturas na interface entre cola e argamassa, somente na argamassa e na interface entre o substrato de concreto e a argamassa. Para determinação da resistência potencial, o cálculo considera somente os valores obtidos a partir de rupturas que ocorram entre o substrato de concreto e a argamassa. Com isso, todos os corpos de prova apresentaram valores superiores ao máximo exigido pela ABNT NBR 13281:2005, fixado em

0,30MPa. Para aos outros tipos de ruptura, pode-se estabelecer que a resistência potencial nos pontos é superior ao valor encontrado.

4.3.5 Propriedades Acústicas

O ensaio de ultrassom realizado nas amostras de argamassas contendo argila expandida nacional demonstrou um aumento na atenuação acústica nas ondas de compressão aplicadas.

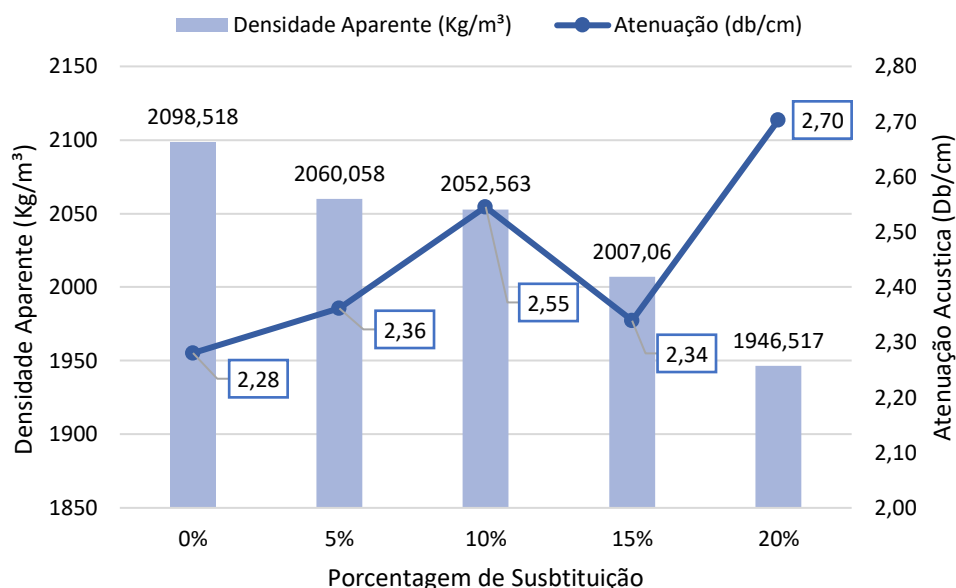
Entre as amostras CP00 e CP20 houve um aumento na atenuação de propagação das ondas de compressão de ~19% em relação a referência, que não possui a argila expandida. Isso ocorre devido as características que a própria argila expandida traz ao material, uma vez que ela é constituída de uma estrutura porosa, tornando a leve e uma excelente alternativa a absorção de ondas sonoras.

A absorção do som é mais eficiente em materiais porosos e menos densos, a Figura 36 demonstra um aumento na atenuação das ondas quando relacionadas à diminuição da densidade de massa das amostras.

Como a quantidade de vazios também atua de maneira significativa em relação ao desempenho acústico dos materiais, a porosidade tanto do agregado quanto da argamassa, contribuem para melhora desta propriedade.

Pode-se então relacionar que altas porcentagens de argila expandida no traço de argamassa causam uma melhora significativa na absorção acústica do material.

Figura 36: Relação entre densidade aparente e atenuação acústica das argamassas.



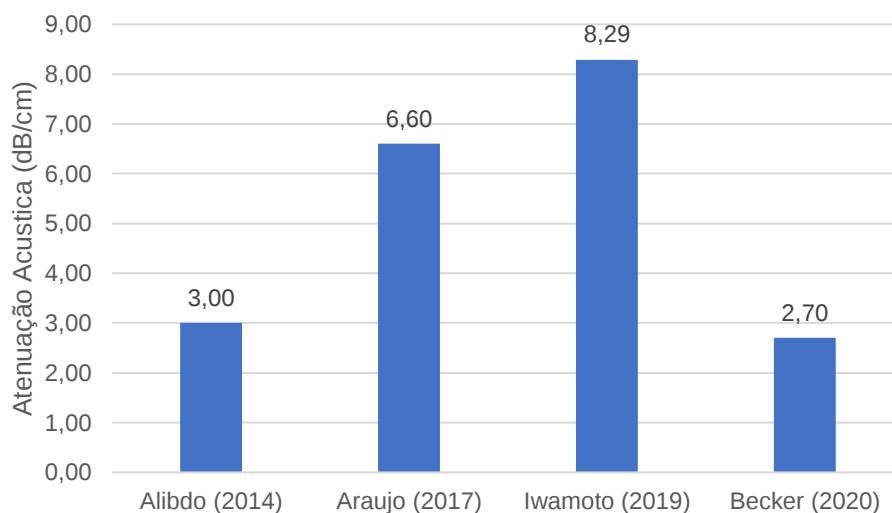
Fonte: Próprio autor.

Quando comparamos este estudo a outros materiais, temos um panorama que as porcentagens de argila expandida devem ter uma porcentagem superior a 20% para apresentar capacidade de absorção em níveis comparáveis a outros materiais sustentáveis.

Como demonstra a Figura 37 pode-se comparar a atenuação acústica entre materiais, está destacado os trabalhos desenvolvidos por Iwamoto (2019) e Araújo (et al, 2020), que desenvolveram traços de concreto leves, trabalhando com a adição de poliestireno expandido (EPS) e argila expandida, tendo variações de absorção entre 6,60 e 8,29 dB/cm, que corroboram para a propriedade apresentada pela argila expandida, de leveza e bons coeficientes acústicos. Porém as diferenças entre este trabalho e os citados, pode estar relacionado aos níveis de ar incorporado a massa, uma vez que a formação de poros no estado endurecido, ajudam na absorção acústica.

Já Alibdo (2014), trabalhou somente com a adição de argila reciclada, e seus resultados são próximos aos encontrados neste estudo, podendo assim relacionar de forma direta que a presença de argila, seja expandida ou reciclada, em matrizes cimentícias causam uma melhora nos índices de absorção acústica do material.

Figura 37: Comparação entre autores com matrizes cimentícias e coeficientes de atenuação acústica.

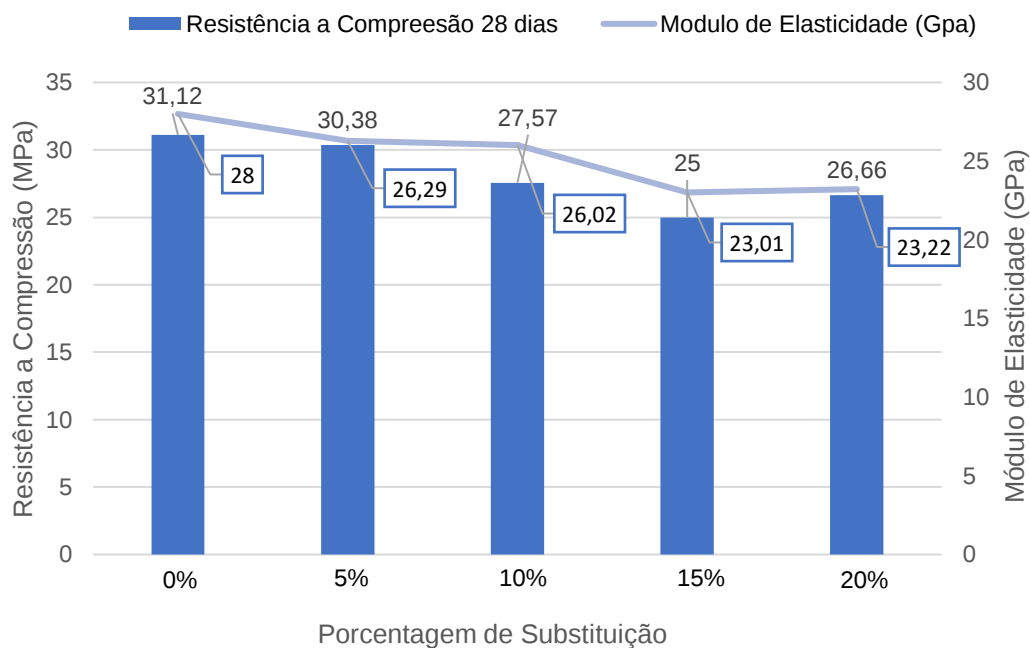


Fonte: Próprio autor

A Figura 38 apresenta o resultado obtido pelo ensaio de ultrassom do módulo de elasticidade dinâmico. As argamassas com argila expandida apresentaram queda na resistência à compressão, assim como os valores do módulo de elasticidade também diminuíram aproximadamente 15% entre os traços CP00 e CP20 de acordo com o aumento do teor de argila expandida na argamassa.

Essa queda no módulo de elasticidade está relacionada na capacidade da argamassa de absorver deformações, tanto quanto a sua capacidade de atenuação acústica.

Figura 38: Correlação entre o módulo de elasticidade e resistência à compressão.



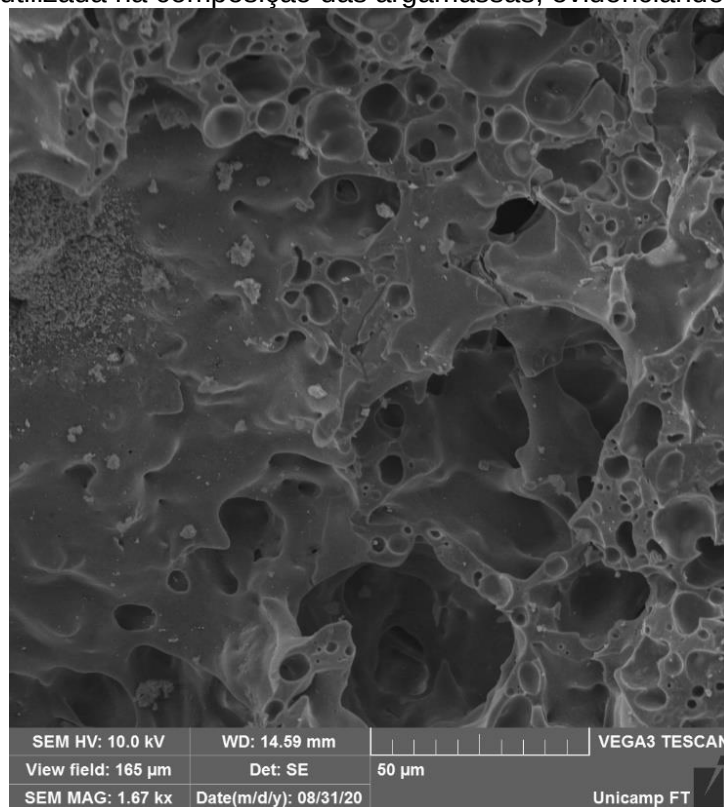
Fonte: Próprio autor

4.3.6 Microestrutura

Realizaram-se análises de microscopia eletrônica de varredura em todos os traços de argamassas desenvolvidos, que tipicamente continham agregados, produtos de cimento hidratado e algum cimento não hidratado. Foi analisada a zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento, além de observar a propagação das fissuras e os vazios presentes na matriz.

A Figura 39 apresenta a microestrutura da argila expandida, com magnificação de 200 μ . Pode-se observar uma das principais características da argila expandida, sua composição física ser predominantemente composta por poros, resultando em baixa densidade e baixa condutibilidade térmica podendo ser empregada para isolamento térmico e acústico.

Figura 39: Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da argila expandida utilizada na composição das argamassas, evidenciando seus poros.

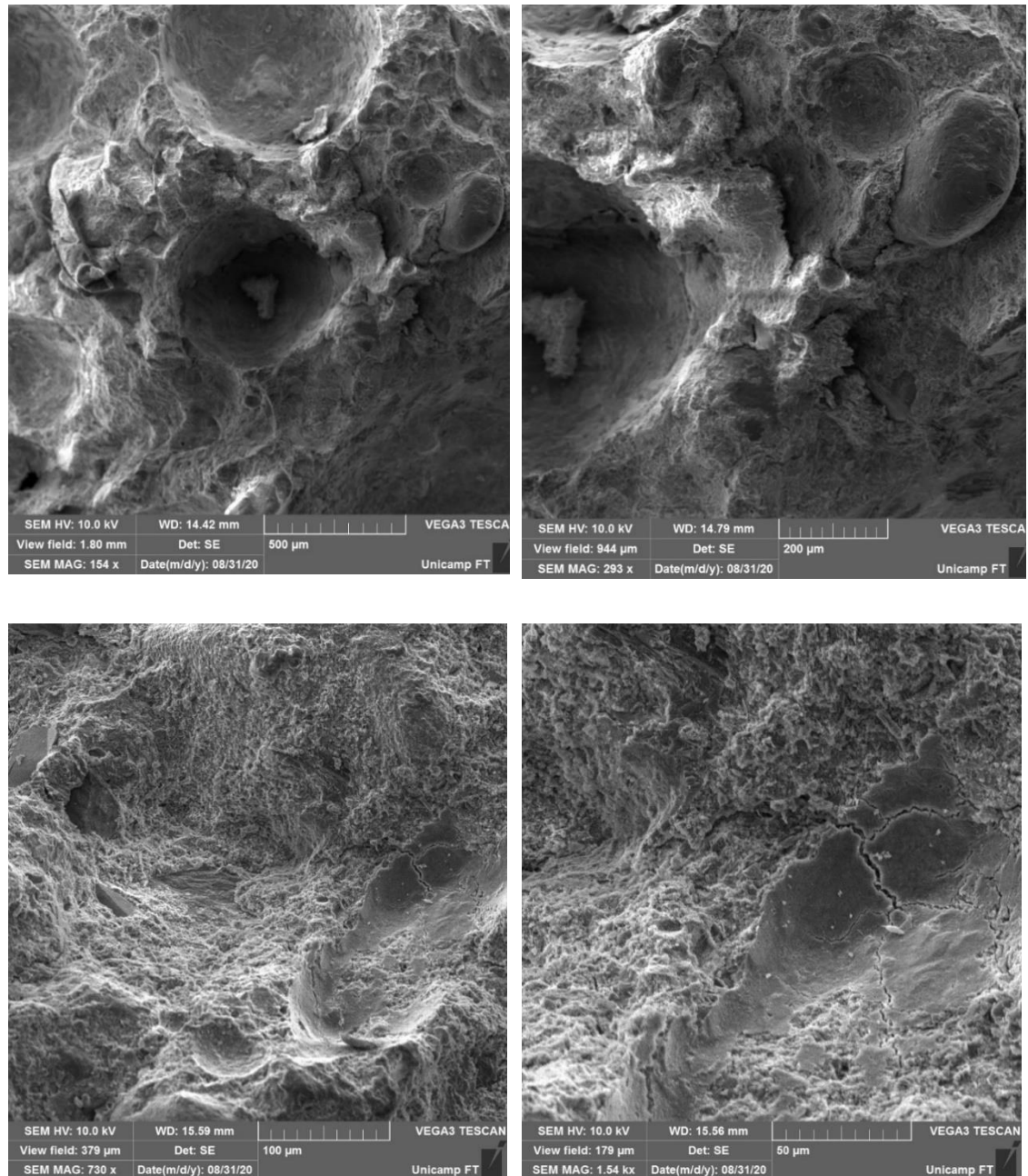


Fonte: Próprio autor

- Traço Referência, EC00

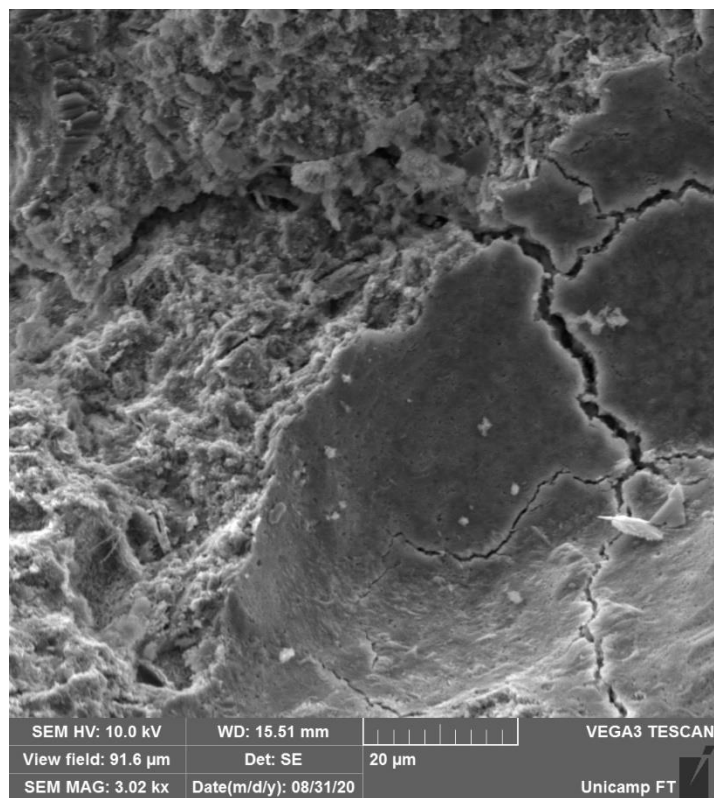
A Figura 40 apresenta a microestrutura da argamassa de referência, sem substituição do agregado miúdo por argila expandida, nomeado EC00, aos 28 dias de cura. Primeiramente, apresenta-se as amostras com a escala de 500 µm, menor ampliação utilizada, mostrando toda a amostra analisada, na sequência 200, 100 e 50 µm. Destacando-se na Figura 41, apresenta-se a amostra na maior ampliação utilizada, ou seja, 20 µm.

Figura 40: Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura da amostra fraturada da argamassa de referência, sem substituição do agregado miúdo por argila expandida, nomeado EC00, aos 28 dias de cura.



Fonte: Próprio autor

Figura 41: MEV da amostra EC00 na maior ampliação utilizada, ou seja, 20 μ m, aos 28 dias de cura.

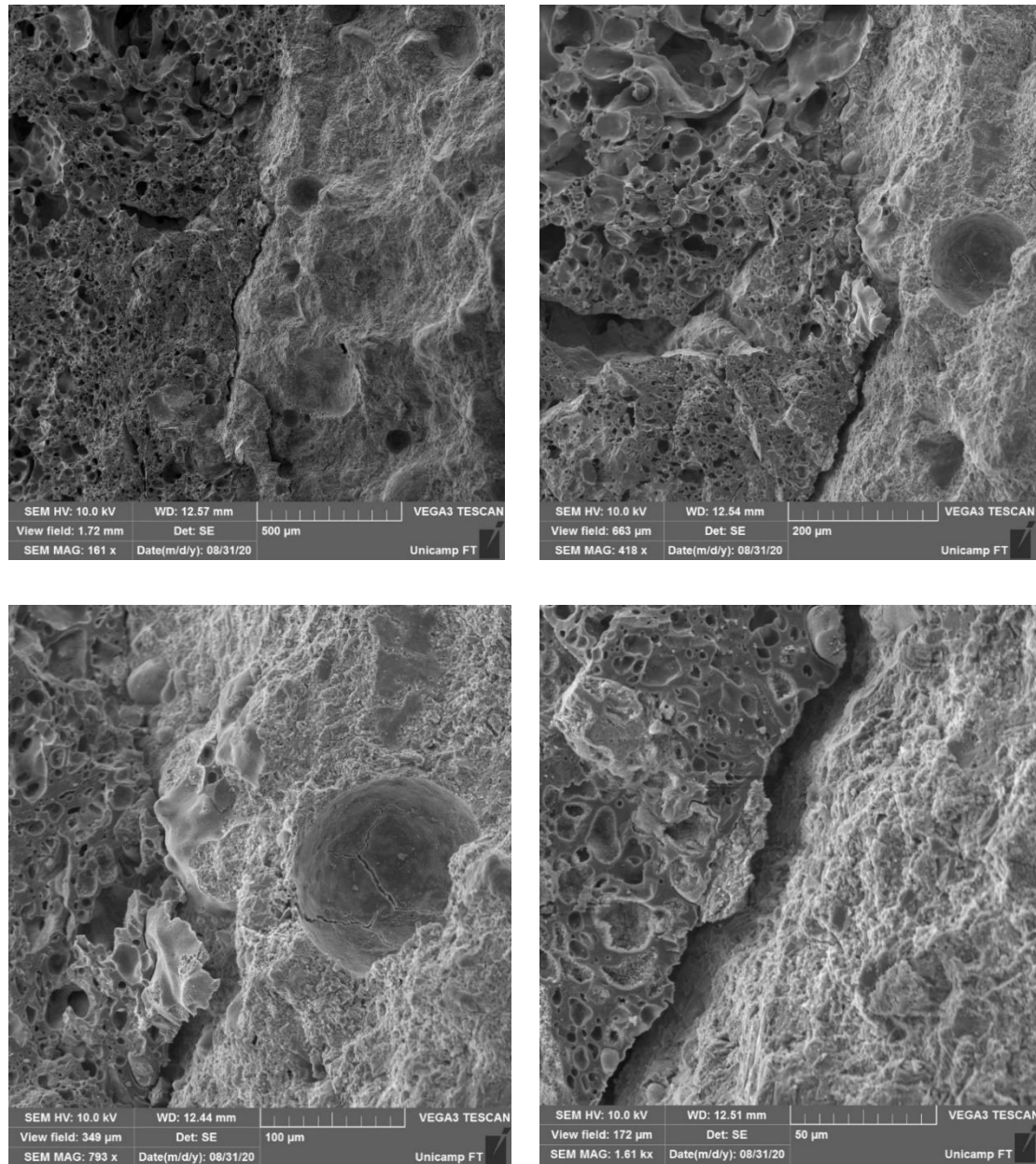


Fonte: Próprio autor

- Traço com 5% de substituição, EC05

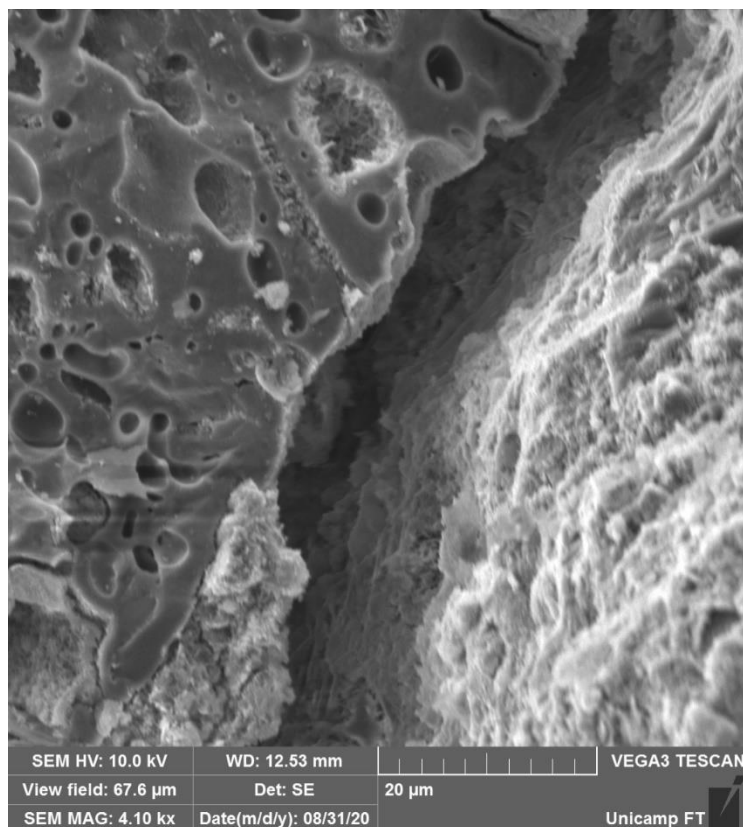
A Figura 42 apresenta a microestrutura da argamassa com substituição de 5% do agregado miúdo por argila expandida, nomeado EC05, aos 28 dias de cura. Primeiramente, apresenta-se as amostras com a escala de 500 μm , menor ampliação utilizada, mostrando toda a amostra analisada, na sequência 200, 100 e 50 μm . Destacando-se na Figura 43, apresenta-se a amostra na maior ampliação utilizada, ou seja, 20 μm .

Figura 42: Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura da amostra fraturada da argamassa de referência, com 5% substituição do agregado miúdo por argila expandida, nomeado EC05, aos 28 dias de cura.



Fonte: Próprio autor

Figura 43: MEV da amostra EC05 na maior ampliação utilizada, ou seja, 20 μ m, aos 28 dias de cura

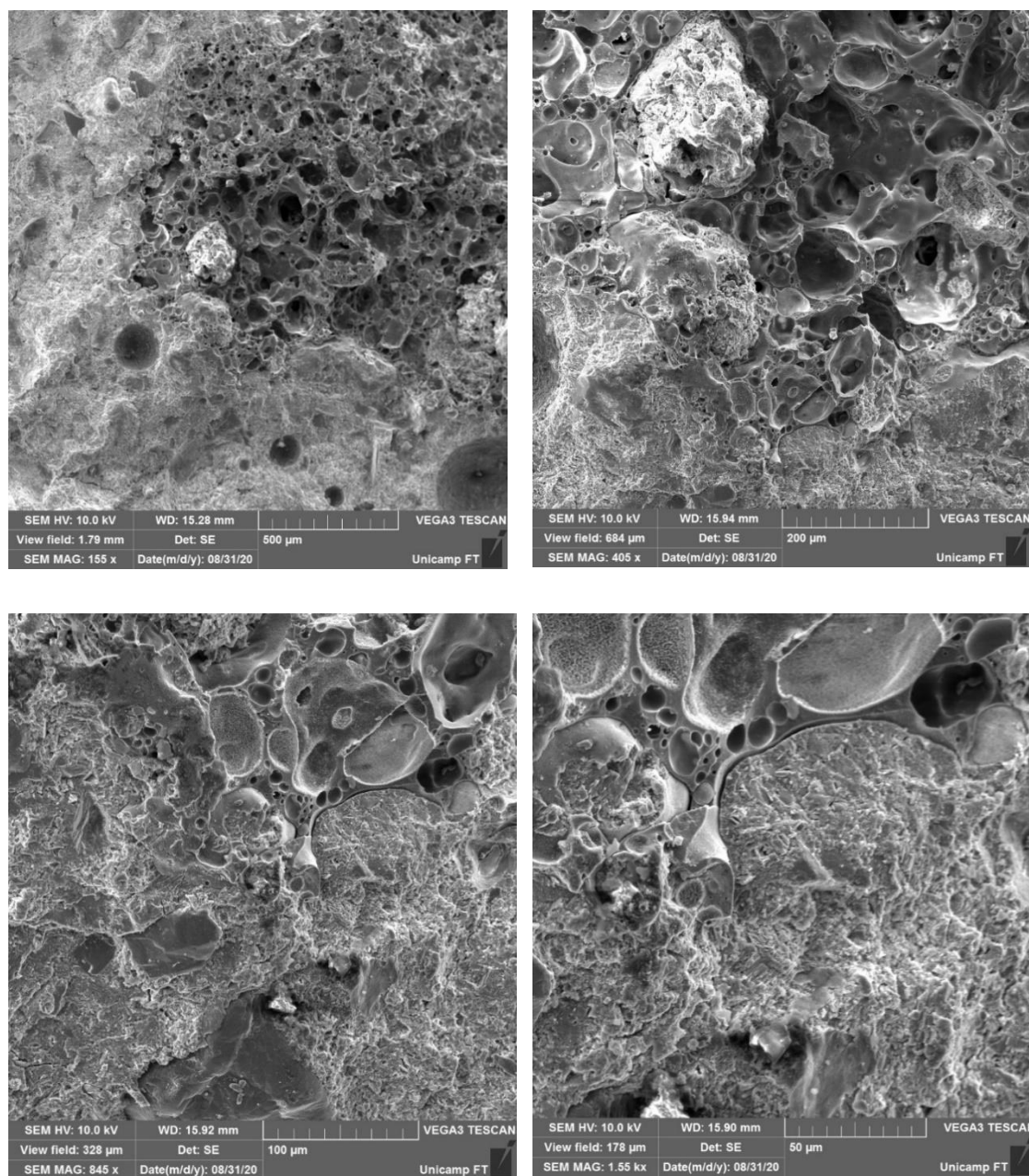


Fonte: Próprio autor

- Traço com 10% de substituição, EC10

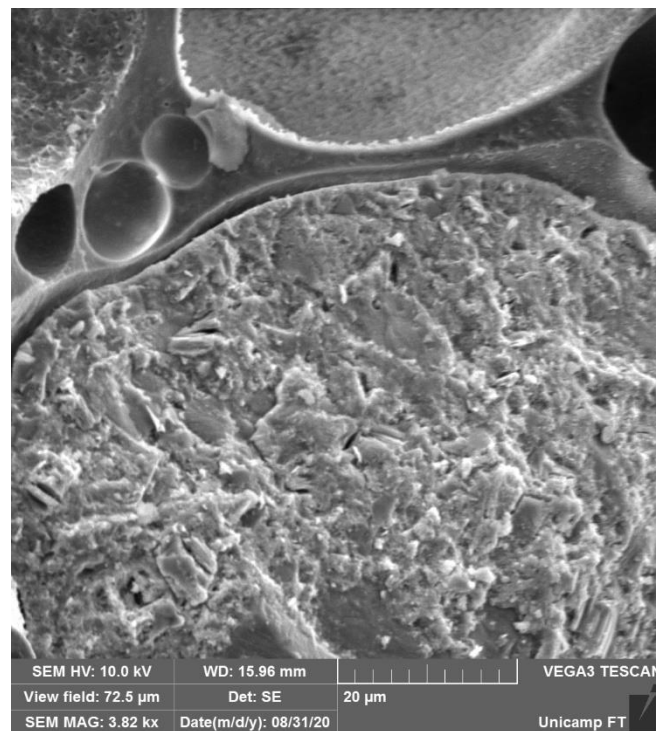
A Figura 44 apresenta a microestrutura da argamassa com substituição de 10% do agregado miúdo por argila expandida, nomeado EC10, aos 28 dias de cura. Primeiramente, apresenta-se as amostras com a escala de 500 μm , menor ampliação utilizada, mostrando toda a amostra analisada, na sequência 200, 100 e 50 μm . Nota-se um aumento na quantidade e dimensões de poros formados por bolhas de ar, a presença de vazios e microfissuras quando comparados ao traço de referência. Destacando-se na Figura 45, apresenta-se a amostra na maior ampliação utilizada, ou seja, 20 μm .

Figura 44: Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura da amostra fraturada da argamassa de referência, com 10% substituição do agregado miúdo por argila expandida, nomeado EC10, aos 28 dias de cura.



Fonte: Próprio autor

Figura 45: MEV da amostra EC10 na maior ampliação utilizada, ou seja, 20 μm , aos 28 dias de cura

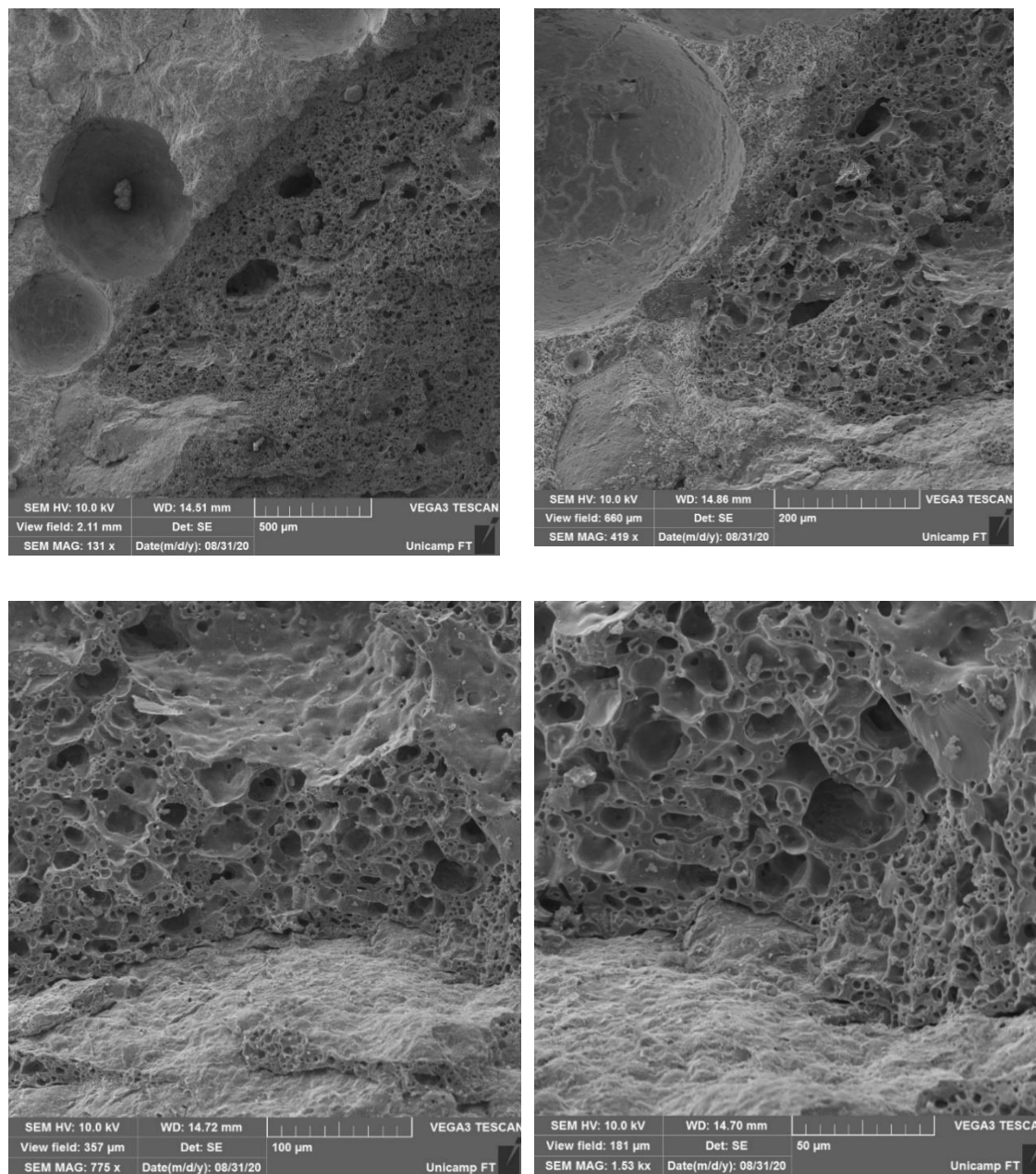


Fonte: Próprio autor

- Traço com 15% de substituição, EC15

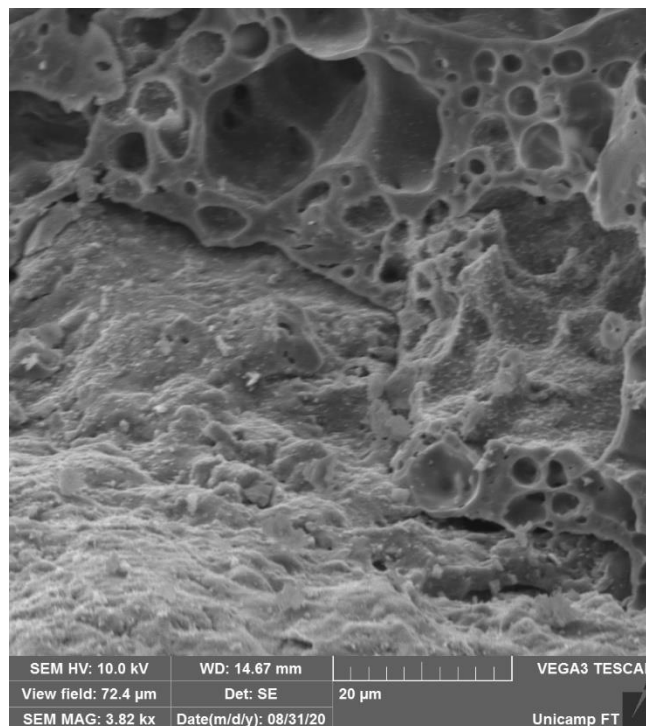
A Figura 46 apresenta a microestrutura da argamassa com substituição de 5% do agregado miúdo por argila expandida, nomeado EC15, aos 28 dias de cura. Primeiramente, apresenta-se as amostras com a escala de 500 μm , menor ampliação utilizada, mostrando toda a amostra analisada, na sequência 200, 100 e 50 μm . Destacando-se na Figura 47, apresenta-se a amostra na maior ampliação utilizada, ou seja, 20 μm .

Figura 46: Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura da amostra fraturada da argamassa de referência, com 15% substituição do agregado miúdo por argila expandida, nomeado EC15, aos 28 dias de cura.



Fonte: Próprio autor

Figura 47: MEV da amostra EC15 na maior ampliação utilizada, ou seja, 20 μm , aos 28 dias de cura

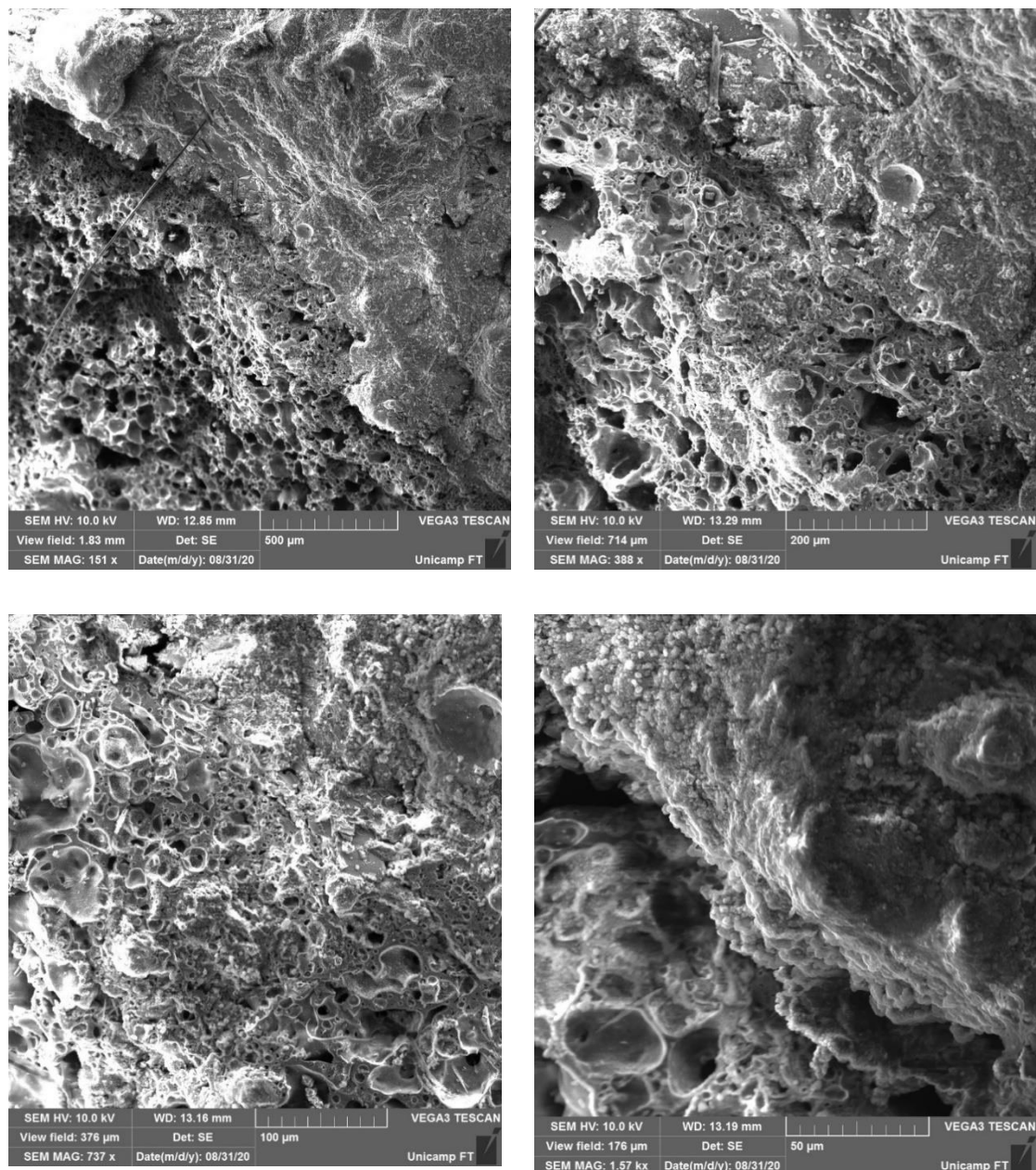


Fonte: Próprio autor

- Traço com 20% de substituição, EC20

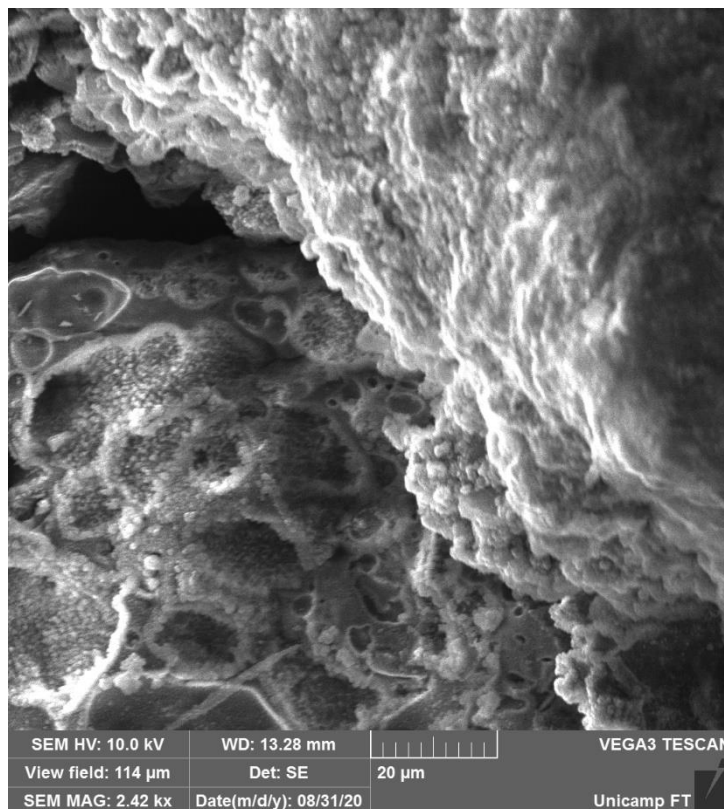
A Figura 49 apresenta a microestrutura da argamassa com substituição de 20% do agregado miúdo por argila expandida, nomeado EC20, aos 28 dias de cura. Primeiramente, apresenta-se as amostras com a escala de 500 μm , menor ampliação utilizada, mostrando toda a amostra analisada, na sequência 200, 100 e 50 μm . Destacando-se na Figura 50, apresenta-se a amostra na maior ampliação utilizada, ou seja, 20 μm . Nota-se também que a argila expandida está completamente envolvida pelos produtos hidratados da pasta de cimento.

Figura 49: Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura da amostra fraturada da argamassa de referência, com 20% substituição do agregado miúdo por argila expandida, nomeado EC20, aos 28 dias de cura.



Fonte: Próprio autor

Figura 50: MEV da amostra EC20 na maior ampliação utilizada, ou seja, 20 μm , aos 28 dias de cura



Fonte: Próprio autor

É possível verificar que, com teores crescentes de incorporação de argila expandida nas misturas houve um aumento do número e tamanho dos poros, microfissuras, resultando em uma microestrutura menos compacta, pois, a argila expandida apresenta característica porosa. Ainda se nota que a zona de transição entre a matriz cimentícia e argila expandida é reduzida, isso é comprovado pelo fato de a superfície vítrea da esfera de argila expandida favorecer a aderência entre a pasta de cimento e o agregado. Estas evidências justificam a pequena diminuição das resistências à compressão e à tração na flexão, quando se compara o traço EC00, aos com substituição do agregado miúdo por argila expandida.

5. CONCLUSÃO

A substituição do agregado miúdo por argila expandida, em argamassa de revestimento e assentamento apresentou resultados satisfatórios em relação as propriedades mecânicas, sendo classificada pela ABNT NBR 13281:2005, como R6, com resistência a tração superior a 3,5 MPa e P6, com resistência a compressão superior a 8,0 MPa. Mesmo com a substituição do agregado miúdo por outro, com resistência superficial menor, os resultados encontrados para os ensaios mecânicos possuem pouca variação, quando comparados ao traço referência, onde não houve substituição.

Foi comprovado que com a substituição do agregado miúdo por argila expandida, a massa específica da argamassa é reduzida.

Para os ensaios no estado fresco, todos os traços desenvolvidos apresentaram resultados satisfatórios, mantendo boas características que garantem a trabalhabilidade da massa e um processo de cura com reação dos materiais aglomerantes que garante boa resistência mecânica, como foi comprovado posteriormente nos ensaios no estado endurecido.

Com relação as características de aderência, podemos concluir tanto pelos resultados do ensaio de aderência potencial, aliado as imagens obtidas da microestrutura que a argila expandida reduz a espessura da zona de transição da argamassa, melhorando assim, sua adesão.

Quanto as propriedades acústicas, o teor de ar incorporado aumentou com teores crescentes de argila expandida nas misturas, assim como o coeficiente de atenuação acústica. Com isso, características acústicas da argamassa, a substituição do agregado natural (areia) por argila expandida nacional, causaram uma melhora nos coeficientes de absorção acústica do material, e este sendo um material para revestimento de paredes e tetos, esta nova adição torna o material mais versátil e atrativo, podendo aumentar sua gama de utilização em novos ambientes e cooperando para a melhora do desempenho do edifício como um todo.

Quando se analisa os resultados obtidos neste estudo, é possível afirmar existe viabilidade de uso de argila expandida em substituição do agregado

miúdo, para argamassas de revestimento. Porém, ainda existe a possibilidade de determinar o teor ótimo de substituição com porcentagens maiores de substituição por argila expandida, uma vez que os ensaios mecânicos mostraram resultados superiores aos mínimos exigidos pela norma brasileira

Com isso, o uso da argila expandida na argamassa, também mostra potencial de troca sustentável no ramo da construção civil. O material apresenta também grande potencial industrial, pois possuem manufatura facilitada, desde de o acesso aos materiais até a feitura do mesmo, e traz mais benefícios em sua utilização, quando em comparação com a argamassa convencional.

5.1 Sugestão para futuros estudos

No decorrer do desenvolvimento desta pesquisa e análises dos resultados, referentes ao desenvolvimento da tecnologia das argamassas leves, foi observado que uma série de aspectos e outras variantes correlacionadas ao estudo mereciam mais aprofundamento científico. Com isso, apresentam-se algumas propostas de desenvolvimentos para trabalhos futuros:

- Estudo de outros traços de argamassa de cimento Portland contendo argila expandida e adições minerais;
- Estudo que encontre o teor máximo de argila expandida para argamassas de assentamento e revestimento.
- Ensaios térmicos para avaliar a capacidade de absorção térmica;
- Estudos que avaliem esse material trabalhando num conjunto de revestimento cerâmicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 13277: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação de retenção de água.** Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 35. **Agregados leves para concreto estrutural.** Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13278: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes de placas cerâmicas –Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 13279. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 13281. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos.** 2005
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 15220. **Desempenho térmico de edificações.** Rio de Janeiro, 2005
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 9778. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 15575. **Desempenho de edificações habitacionais.** Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2016.
- ALMEIDA, Manuela G. ; SILVA, Sandra M. **Acústica.**Portugal: Universidade do Minho – Escola de Engenharia, 2005.
- ALVES, S. M.; XAVIER, B. C.; ROCHE, V.; LINTZ, R. C. C.; GACHET-BARBOSA, L. A. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas do concreto leve autoadensável com argila expandida e borracha.** In: 60º Congresso Brasileiro do Concreto, Foz do Iguaçu-PR. 2018.
- ALVES, S. M.; MIRANDA JR, E. J. P.; DA SILVA, FABIANA M.; Xavier, B. C.; ANGELIN, A. F.; GACHET-BARBOSA, L. A. **Desempenhos físico, mecânico e acústico de compósitos cimentícios com agregados leves.** In: XI Congresso Iberoamericano de Acústica - FIA, Cádiz - Espanha. p. 1-8. 2018.
- ANGELIN, A. F.; RIBEIRO, L. C. L. J.; PIRES, M. S. G.; JACINTHO, A. E. P. G. A.; LINTZ, R. C. C.; BARBOSA, L. A. G. **Effects of Consumption of Cement in Mechanical Properties of Lightweight Concrete Containing Brazilian Expanded Clay.** Applied Mechanics and Materials, v. 368-370, p. 925-928, 2013.
- ANGELIN, A. F. **Concreto leve estrutural - Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais.** Dissertação de mestrado. UNICAMP. Campinas - SP, 2014.
- ANGELIN, A. F., ANDRADE, M. F. F., BONATTI, R., LINTZ, R. C. C., GACHET-BARBOSA, L. A., OSÓRIO, W. R. **Effects of spheroid and fiber-like waste-tire rubbers on interrelation of strength-to-porosity in rubberized cement and mortars.** Construction & Building Materials, v.95, p.525 - 536, 2015.
- ANGELIN, A. F., SILVA, F. M., GACHET-BARBOSA, L. A., LINTZ, R. C. C., CARVALHO, M. A. G., FRANCO, R. A. S. **Voids identification in rubberized**

- mortar digital images using K-Means and Watershed algorithms.** Journal of Cleaner Production. June/2017.
- ANGELIN, A. F.; GACHET-BARBOSA, L. A.; LINTZ, R. C. C.; OSÓRIO, W. R. **Mechanical behavior and water absorption affected by porosity of an environmental-friendly recycled-waste tire rubberized mortar.** Construction & Building Materials. Oct 2017.
- ANGELIN, A. F.; MIRANDA, E. J. P.; SANTOS, J. M. C. dos; LINTZ, R. C. C.; GACHET-BARBOSA, L. A. **Rubberized mortar: The influence of aggregate granulometry in mechanical resistances and acoustic behavior.** Construction & Building Materials, v.200, p.248-254, March 2019.
- ANGELIN, A. F.; LINTZ, R. C. C.; OSÓRIO, W. R.; GACHET, L. A. **Evaluation of efficiency factor of a self-compacting lightweight concrete with rubber and expanded clay contents.** Construction & Building Materials, v. 257, October 2020.
- ARAUJO, GUILHERME S.; IWAMOTO, LUI C.; LINTZ, Rosa C. C.; GACHET, LUISA A. **Influence of Incorporation and Dimension of Expanded Polystyrene on Lightweight Concrete.** ACI MATERIALS JOURNAL. 118, p. 79-90, 2021.
- AZEVEDO, Mariane Brito. **Compatibilização do conforto acústico com o conforto térmico no ambiente construído.** Rio de Janeiro, 2007, 201 p. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo- Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- BATISTA, L. S.; LINTZ, R. C. C.; Silva, F. M.; GACHET, L. A. **Estudo das propriedades acústicas e mecânicas de argamassas com utilização de vermiculita expandida e borracha de pneu inservível.** In: 64º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2020, Águas de Lindóia. 64º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2020. p. 1-10
- BECKER, A. R.; GACHET, L. A.; LINTZ, R. C. C.; GOMES, A. **Comparação do desempenho mecânico de argamassas produzidas com substituição parcial de agregado miúdo por argila expandida e resíduo de borracha.** In: 64º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2020, Águas de Lindóia. 64º Congresso Brasileiro de Cerâmica, p. 1-10, 2020.
- 3ELLEI, P., Mohamad, G., & Kirchhof, L. D. (2016). Determinação Do Tempo De Utilização Por Viscosimetria De Argamassas Colantes Interação Física E Mecânica Dos Aditivos Em Argamassas Estabilizadas. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5126.8889>.
- BRITO, Luiz Antônio Perrone .F . **Correções na determinação do nível de potência sonora obtido através da técnica da intensimetria.** Campinas, São Paulo, 2006, 182 p. Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas.
- BISTAFA, Sylvio Reynaldo. **Acústica arquitetônica: Qualidade sonora em salas de audição crítica.** 2010.

BORJA, E. V. DE. **Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis.** [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011.

CABRAL, G. L. L. **Metodologia de produção e emprego de agregados de argila calcinada para pavimentação.** 2005. 359 p. Dissertação (Mestrado) –

Ciências em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.

CALLISTER JR, William D, RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais – uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CARASEK, H. **Argamassas**. In: Isaia, G.C. (ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON. págs. 892-944. 2ª ed. São Paulo –SP, v 2, 2010.

CARVALHO, MARIA LUIZA U. **Resíduos de poli (tereftalato de etileno) e de pneu na confecção de pisos flutuantes para o isolamento do ruído de impacto**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. 2009.

CARVALHO, RÉGIO PANIAGO. **Acústica Arquitetônica**. 2.ed. – Brasília: Thesaurus. 238p, 2010.

CARVALHO, Maria Luiza U. **Resíduos de poli (tereftalato de etileno) e de pneu na confecção de pisos flutuantes para o isolamento do ruído de impacto**. Goiânia, Goiás, 2009, 98 p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.

CARVALHO, Régio Paniago. **Acústica Arquitetônica**. 2.ed. – Brasília: Thesaurus, 2010. 238p.

CASCUDO, O., CARASEK, H. **Durabilidade do concreto**. São Paulo, SP: IBRACON, 2014.

CHANDRA, SATISH; BERNTSSON, LEIF. **Lightweight Aggregate Concrete: Science, Technology, and Applications**. Noyes Publications, New York, 2002.

CINCOTTO, Maria Alba et al. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**. São Paulo. SP. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995.

CINCOTTO, Maria Alba. **Patologias das argamassas de revestimento: análise e recomendações**. In: Tecnologia das Edificações. Pini. São Paulo – SP. 1988.

CORREDOR-BEDOYA, R.A. ZOPPI, A.L. SERPA. Composites of scrap tire rubber particles and adhesive mortar – Noise insulation potential, Cement and Concrete Composites, v. 82, p. 45-66, 2017, ISSN 0958-9465.

COSTA, ENNIO CRUZ. **Acústica Técnica**. São Paulo: Blucher, 127p. 2003.

De Paula, J. F.; ANGELIN, A. F.; LINTZ, R. C. C. ; GACHET-BARBOSA, L. A. **Interferência da variação do teor de argamassa nas principais características do concreto autoadensável**. In: 58º Congresso Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte-MG. 2016.

CORREA, Conceição de Maria Pinheiro. **Conforto termo-acústico de uma habitação de baixo custo**. São Carlos, São Paulo, 2009, 95 p. Tese de Doutorado Universidade de São Paulo.

COSTA, Ennio Cruz. **Acústica Técnica**. São Paulo: Blucher, 2003.

DIAMOND, S., **Cement Paste Microstructure: An Overview at Several Levels**, Proc. Conf. on Hydraulic Cement Pastes: Their Structure and Properties, pp. 2-30, Sheffield, Cement and Concrete Association, 1976.

DIAMOND, S. **The Microstructures of Cement Paste in Concrete**, Proceedings of the 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, pp. 122-147, 1986.

- FIORITO, Antonio J. S. I. Manual de argamassas e revestimentos: estudos e procedimentos de execução. 2. ed. São Paulo: Pini, 2009.
- GACHET, L. A.; LINTZ, R. C. C.; BECKER, A. R. **Mechanical and acoustic performance of mortars produced with expanded clay**. In: 64º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2020, Águas de Lindóia. 64º Congresso Brasileiro de Cerâmica, p. 1-10, 2020.
- GACHET, L. A.; BECKER, A. R.; PASSARINI, E.; LINTZ, ROSA C. C. **Argamassas leves produzidas com argila expandida**. In: 62º Congresso Brasileiro do Concreto, 2020, Florianópolis - SC. 62º Congresso Brasileiro do Concreto, p. 1-14. 2020.
- GACHET, L. A.; ARAUJO, G. S.; IWAMOTO, L.C.; ANGELIN, A. F.; LINTZ, R. C. C. **Produção de concreto autoadensável leve com argila expandida e poliestireno expandido**. In: 62º Congresso Brasileiro do Concreto, 2020, Florianópolis - SC. 62º Congresso Brasileiro do Concreto, p. 1-13. 2020.
- GROTTA, Danubia de Lima. **Materiais e técnicas contemporâneas para controle de ruído aéreo em edifícios de escritórios: Subsídios para especificações**. São Carlos, São Paulo, 2009, 212 p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Paulo.
- HOLMES, N.; BROWNE, A.; MONTAGUE, C. Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 195–204, 2014.
- ISAIA, GERALDO C. (editor) **Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto, IBRACON, v.1 e v.2. 1500p. 2005.
- ISAIA, GERALDO C. (editor) **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto, IBRACON, v.1 e v.2. 1700p. 2007.
- IWAMOTO, L. C. **Desempenho mecânico e acústico de concreto leve autoadensável com argila expandida e incorporação de EPS de diferentes granulometrias**. Dissertação de Mestrado, UNICAMP – Campinas, S.P. 2019.
- JALAL, M.; MANSOURI, E.; SHARIFIPOUR, M.; POULADKHAN, A.R. **Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles**. Materials and Design, p.389-400, 2012.
- KHALIL, E.; ABD-ELMOHSEN, M.; ANWAR, A. M. **Impact Resistance of Rubberized Self-Compacting Concrete**. Water Science, v. 29, n. 1, p. 45–53, 2015.
- KURS, M.N.; BRANDELI, T. M.; PALIGA, C. M.; TORRES, A. S. **A potencialidade do uso de resíduo de borracha de pneu em argamassa: análise das propriedades físicas e mecânicas**. Matéria (Rio J.) 23 (3). 2018.
- LANZÓN, M; GARCÍA-RUIZ, P.A. **Lightweight cement mortars: advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability**. Constr. Build. Mater., p. 1798-1806, 2008.
- LEONE, L., Mércia, M., Bottura, M. S., Fernando, B., Sabbatini, H., & Paulo, S. (1998). **Recomendações Para A Execução De Revestimentos De Argamassa Para Paredes De Vedação Internas E Exteriores E Tetos**.
- LINTZ, R. C. C.; GOMES, A.; GACHET, L. A. **Desempenho térmico de argamassas com resíduos de borracha**. In: 64º Congresso Brasileiro de

- Cerâmica, 2020, Águas de Lindóia. 64º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2020. p. 1-9
- LINTZ, R. C. C.; Silva, F. M.; GACHET, L. A.; SEYDELL, M. R. R.; MELO, M.L.N.M.; Santos, J. M. C. **Estudo da Absorção Acústica de Barreiras de Concreto com Resíduos de Borracha e Vermiculita**. In: 62º Congresso Brasileiro do Concreto, 2020, Florianópolis - SC. 62º Congresso Brasileiro do Concreto, 2020. p. 1-12
- LOPES, T. B.; PEREIRA, J. R.; GACHET-BARBOSA, L. A.; LINTZ, R. C. C. **Análise da microestrutura do concreto autoadensável por meio de microscopia eletrônica de varredura acoplado ao detector de raios-x (EDS)**. In 59º Congresso Brasileiro do Concreto: IBRACON, v. 1. p. 1-16. São Paulo. 2017.
- MACIEL, M.H.; BERNARDO, H.M.; SOARES, G.S.; ROMANO, R. C. O.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. **Efeito da variação do consumo de cimento em argamassas de revestimento produzidas com base nos conceitos de mobilidade e empacotamento de partículas**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 245-259, jan./mar. 2018.
- MELO, A. C. F. **Betões leves vibrocomprimidos com agregados de argila expandida: Estudo de composição e caracterização experimental**. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, sob a orientação do Profs.Doutores Hipólito de Sousa e Ana Maria Sarmiento. 2000.
- METHA, P. KUMAR; MONTEIRO PAULO J. M. **CONCRETE, Microstructure, Properties and Materials**, McGraw-Hill, 4ed., 2013.
- METHA, P. KUMAR; MONTEIRO PAULO J. M. **CONCRETO: Microestrutura, propriedades e materiais**. IBRACON, 2 ed., 2014.
- MIRANDA JUNIOR, E. J. P.; ANGELIN, A. F.; RODRIGUES, S. F.; GACHET-BARBOSA, L. A.; SANTOS, J. M. C. **Influence of Spheroid and Fiber-Like WasteTire Rubbers on the Sound Absorption Coefficient of Rubberized Mortars**. In: 61 Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2017, Gramado-RS. 61 Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2017.
- MIRANDA JR., EDSON JANSEN PEDROSA; ANGELIN, ANDRESSA FERNANDA; RODRIGUES, S. F.; GACHET-BARBOSA, LUÍSA ANDRÉIA; DOS SANTOS, J. M. C. **Influence of Spheroid and Fiber-Like Waste-Tire Rubbers on the Sound Absorption Coefficient of Rubberized Mortars**. Materials Science Forum (online), v. 958, p. 63-68, 2019.
- MORAVIA, W. G., OLIVEIRA, C. A. S., GUMIERI, A. G., FEDERAL, U., GERAIS, D. M., & HORIZONTE, B. **Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve**. Cerâmica, 52, 193–199. 2006.
- NAKAKURA, E.; CINCOTTO, M. A. Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento. Boletim Técnico PCC-USP. São Paulo – 2004
- NETO, MARIA DE FÁTIMA FERREIRA. **Nível de conforto acústico: uma proposta para edifícios residenciais**. Campinas, São Paulo, 257 p. Tese de Doutorado – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. 2009.
- NETO, Maria de Fátima Ferreira. **Estudo de barreiras acústica ao ar livre**. Campinas,São Paulo, 2002, 126 p. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas.

OGASAWARA, ANA PAULA. **Avaliação acústica de oito salas destinadas a apresentações teatrais da cidade de Campinas, SP, através da técnica impulsiva.** Campinas, São Paulo, 251 p. Dissertação de Mestrado –, UNICAMP – Campinas, S. P. 2006.

OLIVEIRA, Nadia Freire. **Avaliação acústica de salas de aulas de dimensões reduzidas através da técnica impulsiva.** Campinas, São Paulo, 2006.

PAULON, VLADIMIR A. **A microestrutura do concreto convencional.** In: **Concreto Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo. Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, v.1 e v.2, 2005.

PCZIECZEK, ADRIANE. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina. 2017.

PFEIFER, W. P.; FRONZA, R.; SOARES, M. S.; GACHET-BARBOSA, L. A.; LINTZ, R. C. C.. **Reutilização de resíduos de pneu em argamassa colante.** In: 57º Congresso Brasileiro do Concreto, Bonito - MS. p. 1-10. 2015.

RAMACHANDRAN, V.S.; BEAUDOIN, J. J.. **Handbook of analytical techniques in concrete science and technology.** William Andrew Publishing. 2001.

ROMANO, R. C. O. ; MACIEL, M. H. ; BERNARDO, H. M. ; SOARES, G. S. ; **CINCOTTO, M.A.** ; PILEGGI, R. G. . Avaliação do estado endurecido de argamassas de revestimento em função da variação do consumo de cimento. In: II Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento, 2016, Coimbra. Atas do II Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento, 2016.

ROMANO, R. C. O.; CARDOSO, F. A. ; PILEGGI, R. G. . Propriedades do Concreto no Estado Fresco. In: Geraldo C. Isaís. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1ed.São Paulo: , 2011, v. 1, p. 453-500.

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

SACHT, H. M., ROSSIGNOLO, J. A., & SANTOS, W. N. **Evaluation of thermal conductivity of lightweight concrete with expanded clay.** Revista Matéria, 15(1), 031–039. 2010.

SANTIS, B. C., SICHIERI, E. P., ROSSIGNOLO, J. A., FERREIRA, G., & FIORELLI, J. **Caracterização de massas cerâmicas do estado de S. Paulo para produção de agregados leves para concreto.** Cerâmica, 59(350), 198–205. 2013.

SANTOS, M.E. et. al. **Argila expandida como agregado para concreto leve.** Tema livre – Apresentado à reunião anual do IBRACON de 1986.

SANTOS, P. S., **Ciência e Tecnologia de Argilas.** 2a.ed., Vol 1 e 2, Editora Edgard Blücher, S. Paulo, Brasil (1992) apud MORAVIA, W. G., OLIVEIRA, C. A. S., GUMIERI, A. G., VASCONCELOS, W. L.. Caracterização microestrutural da 83 argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve. Cerâmica, n. 52, p. 193-199, 2006.

SILVA, BETOLVEM CRISTHIAN LUCIO DA; GACHET, LUÍSA ANDRÉIA; LINTZ, ROSA CRISTINA CECHE. **Análise microscópica de concreto**

pigmentado com resíduos de borracha aplicado em piso intertravado. Matéria-Rio de Janeiro, v. 25, p. 1-16, 2020.

SALVI, C. R. Universidade Do Vale Do Taquari-Univates Curso De Engenharia Civil **Avaliação Da Resistência De Aderência Á Tração De Argamassas De Revestimento Sobre Diferentes Substratos Na Cidade Guaporé/Rs**, 2017.

SOBRAL, H.S. **Concretos leves: tipos e comportamento estrutural**. ABCP, São Paulo, 1987.

SOUZA SILVA, L., Henrique Pires Nogueira, M., Kelly Moreira Lima, G., da Silva Cipriano, F., & Jane da Silva Batista, N. (2019). Concreto alternativo com utilização de resíduos de borracha de recauchutagem de pneus para elementos e componentes pré-fabricados.

SOUZA, Léa C. L.; ALMEIDA, Manuela G.; BRAGANÇA, Luís. **Bê-a-bá da acústica arquitetônica: ouvindo a Arquitetura – São Carlos**: EdUFSCar, 2006.

TEIXEIRA, F. S.; SALVADORI, M.C. **Microscópio eletrônico de varredura como ferramenta para micro e nanotecnologia**. Mecatrônica Fácil, v. 31, p. 38 - 41, nov. 2006.

WINTER, N. B. **Scanning electron microscopy of cement and concrete**. Woodbridge: WHD Microanalysis Consultants Ltd., 2012.

WINTER, N. B. **Understanding cement: The fast star user-friendly insight into cement production, cement hydration and cement and concrete chemistry**. Woodbridge: WHD Microanalysis Consultants Ltd., 2012.

VIEIRA, B., Santana, D. E., & Aleixo, I. V. (2017). Centro Universitário De Brasília-Uniceub Faculdade De Tecnologia E Ciências Sociais Aplicadas-Fatecs Programa De Iniciação Científica Avaliação Da Absorção Por Capilaridade De Argamassas Para Revestimento Com Diferentes Aditivos Impermeabilizantes Brasília 2017.

XAVIER, BEATRIZ C.; VERZEGNASSI, EMERSON; BORTOLOZO, AUDINIR D.; ALVES, SAMIRA M.; CECHE LINTZ, ROSA C.; GACHET, LUÍSA A.; OSÓRIO, WISLEI R. **Fresh and Hardened States of Distinctive Self-Compacting Concrete with Marble- and Phyllite-Powder Aggregate Contents**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 32, p. 04020065, 2020.

XAVIER, BEATRIZ C.; GOMES, AMAURI E; MELO, MIRIAN L. N. M.; LINTZ, ROSA C CECHE; GACHET, LUÍSA A; OSÓRIO, WISLEI R. **Study of three distinct self-compacting concretes containing marble/granite powder and hooked-end steel fiber contents**. Journal of Composite Materials, v. 1, p. 002199832199943-16, 2021.

ZHANG, M. H., & GJORV, O. E. (1991). Permeability of high-strength lightweight concrete. *ACI Materials Journal*, 88(5), 463–469. <https://doi.org/10.14359/2108>.

