CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR-MG
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CARLA DANIELA CHAGAS

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES MATERIAIS INERTES EM SUBSTITUIÇÃO TOTAL À CAL NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS TRADICIONAIS DE ASSENTAMENTO

FORMIGA - MG
2018

CARLA DANIELA CHAGAS

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES MATERIAIS INERTES EM SUBSTITUIÇÃO TOTAL À CAL NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS TRADICIONAIS DE ASSENTAMENTO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do UNIFOR-MG, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.
Orientadora: Profª. Esp. Mariana Del Hoyo Sornas

FORMIGA – MG

2018

Carla Daniela Chagas

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES MATERIAIS INERTES EM SUBSTITUIÇÃO TOTAL À CAL NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS TRADICIONAIS DE ASSENTAMENTO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do UNIFOR-MG, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof[a]. Esp. Mariana Del Hoyo Sornas
Orientadora

Prof. Dr. Ronan Souza Sales
UNIFOR

Prof[a]. Rosymeire Linderis da Silva
ENGENHEIRA CIVIL

Formiga, 06 de novembro de 2018.

C433 Chagas, Carla Daniela.
Análise da utilização de diferentes materiais inertes em substituição total à cal na produção de argamassas tradicionais de assentamento / Carla Daniela Chagas. – 2018.
75 f.

Orientadora: Mariana Del Hoyo Sornas.
Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Centro Universitário de Formiga - UNIFOR, Formiga, 2018.

1. Aglomerantes. 2. Agregado. 3. Materiais Substitutivos. I. Título.

CDD 698

Dedico este trabalho aos meus pais que tantas vezes abdicaram dos seus sonhos em função dos meus. A vocês minha infinita gratidão!

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Deus por todas as oportunidades a mim concedidas, pelo livre arbítrio e por me conduzir de forma silenciosa, intensa e assídua até o ponto de chegada de cada caminho por mim escolhido; Senhor das coisas visíveis e invisíveis: Obrigada sempre!

Aos meus pais, que tantas vezes abdicaram de seus sonhos em função dos meus, a vocês meu amor recíproco e minha infinita gratidão. Dedico essa conquista a vocês.

A todos os meus familiares, meu porto seguro, muito obrigada.

Aos meus amigos, anjos que tantas vezes me ergueram e me emprestaram suas asas para que eu alçasse voo, a minha gratidão. Aqui, deixo um agradecimento especial a Rosália da Silva, Willian César, Monalysa Vieira Rocha, Leôncio Alves, Paula Oliveira e Lucimara de Oliveira Monteiro pela paciência e disponibilidade; grande parte desta conquista foi em função da fidelidade de vocês.

Agradeço em especial à minha orientadora Profª. Mariana Del Hoyo Sornas, pela atenção disponibilizada a mim nesta reta final de graduação (me orientando quando tudo parecia “desorientado” demais na minha cabeça), mas principalmente por todos os ensinamentos divididos comigo no decorrer de todo o curso; a você, todo meu respeito e admiração. Ensinar é uma arte e você é uma grande protagonista.

Agradeço também a todos os outros professores que nesta caminhada compartilharam comigo um pouco de suas experiências e muito do seu saber. A vocês e à Mariana, uma frase define meu sentimento neste momento: Parte do que eu sou hoje como pessoa e como profissional tem muito de vocês, me espelho em cada um.

O meu agradecimento extensivo a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização deste sonho, seja com palavras de incentivo, gestos ou atitudes. A vocês, minha sincera gratidão.

RESUMO

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo principal de avaliar a substituição total da cal por diferentes materiais inertes na produção de argamassas tradicionais de assentamento. A avaliação qualiquantitativa embasou-se em ensaios mecânicos, físicos e químicos. Entre as principais justificativas que alavancaram o desenvolvimento do mesmo, cita-se as questões ambientais associadas, ou seja, os impactos ambientais envolvidos nos processos de extração e beneficiamento da cal que tendem a ser mais intensos e abrangentes se comparados com o processo de obtenção dos outros materiais testados no estudo. Os fatores econômicos também foram abordados através de uma estimativa de custos. Os materiais testados foram a argila, o argilito e o pó de pedra. No mercado, existem, na atualidade, muitos produtos industrializados que, segundo dados dos fornecedores, assemelham-se à cal em relação as suas principais características, sendo estas: resistência, durabilidade, plasticidade e trabalhabilidade. Em função do principal objetivo proposto do estudo e com o intuito de enriquecer o trabalho, além dos materiais mencionados foi produzido um traço na mesma proporção que os demais, utilizando-se um aditivo em volume teórico, conforme instruções do fornecedor. O traço utilizado no estudo foi o de 1:2:8 e todas as argamassas produzidas foram avaliadas quanto a certos aspectos em seu estado fresco (índice de plasticidade, trabalhabilidade e aderência inicial ao meio suporte) e endurecido (resistência à compressão). Os resultados mostraram que a utilização dos materiais em substituição à cal é possível do ponto de vista técnico e viável do ponto de vista ambiental e econômico (em relação aos aspectos avaliados), sendo que, para utilização do aditivo são necessários testes quanto à adoção do volume, não sendo aconselhável a utilização do volume médio teórico proposto pelo fornecedor. O estudo abre margem para realização de novas pesquisas, de forma a avaliar outras variáveis importantes que influenciam a qualidade e durabilidade geral das argamassas, assunto atrativo, considerando-se o grande potencial mineralógico do país.

Palavras-chave: Aglomerantes. Agregado. Materiais substitutivos.

ABSTRACT

The present work was developed with the main objective of evaluating the total replacement of lime by different inert materials in the production of traditional mortars. The qualitative evaluation was based on mechanical, physical and chemical tests. Among the main justifications that leverage the development of the same, we cite the associated environmental issues, that is, the environmental impacts involved in the processes of extraction and processing of lime, which tend to be more intense and comprehensive when compared to the process of obtaining the materials tested in the study. Economic factors were also addressed through a cost estimate. The materials tested were clay, clay and stone powder. In the market, there are now many industrialized products that, according to suppliers, resemble lime in relation to its main characteristics, being these: strength, durability, plasticity and workability. According to the main objective of the study and with the intention of enriching the work, in addition to the mentioned materials, a trace was produced in the same proportion as the others, using an additive in theoretical volume, according to the instructions of the supplier. The trait used in the study was 1: 2: 8 and all the mortars produced were evaluated for certain aspects in their fresh state (plasticity index, workability and initial adhesion to the support medium) and hardened (compressive strength). The results showed that the use of the materials in substitution for lime is technically feasible and feasible from an environmental and economic point of view (in relation to the evaluated aspects), and that for the use of the additive tests are required regarding the adoption of the volume, and it is not advisable to use the average theoretical volume proposed by the supplier. The study opens the door for further research to evaluate other important variables that influence the quality and general durability of mortars, an attractive subject considering the great mineralogical potential of the country.

Keywords: Binders. Added. Substitute materials.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais propriedades das argamassas de assentamento de alvenaria (elevação) 20
Quadro 2 – Características das argamassas mistas relacionadas com teor relativo de cimento/cal..... 24
Quadro 3 – Aspectos considerados na composição da argamassa 27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Massa mínima por amostra de ensaio 39
Tabela 2 – Série de peneiras 40
Tabela 3 – Caracterização granulométrica dos materiais testados, cal e areia.54
Tabela 4 – Resultados análises químicas 55
Tabela 5 – Volumes e massas correspondentes dos materiais utilizados na produção da argamassa com aditivo 56
Tabela 6 – Volumes e massas correspondentes dos materiais utilizados na produção das argamassas para o estudo.....57
Tabela 7– Relação a/c e a/ms obtidas para o estudo 58
Tabela 8 – Índice de consistência para os traços em estudo.....59
Tabela 9 – Exigências mecânicas e reológicas para argamassas 60
Tabela 10 – Cargas aplicadas e tensão máxima de ruptura 61
Tabela 11 – Composição final para alvenaria de vedação, com blocos cerâmicos furados, juntas de 12 mm e assentamento com argamassa mista de cimento, cal hidratada e areia sem peneirar. (Traço 1:2:8). Tipo 2. Unidade m².....63
Tabela 12 – Composição final para alvenaria de vedação, com blocos cerâmicos furados, juntas de 12 mm, e assentamento com argamassa mista de cimento, argilito e areia sem peneirar. (Traço 1:2:8). Tipo 2. Unidade m².....63
Tabela 13 – Composição final para alvenaria de vedação, com blocos cerâmicos furados, juntas de 12 mm, e assentamento com argamassa mista de cimento, argila e areia sem peneirar. (Traço 1:2:8). Tipo 2. Unidade m².....64
Tabela 14 – Composição final para alvenaria de vedação, com blocos cerâmicos furados, juntas de 12 mm, e assentamento com argamassa mista de cimento, pó de pedra e areia sem peneirar. (Traço 1:2:8). Tipo 2. Unidade m².....64
Tabela 15 – Composição final para alvenaria de vedação, com blocos cerâmicos furados, juntas de 12 mm, e assentamento com argamassa mista de cimento, aditivo e areia sem peneirar.(Traço 1:2:8).Tipo 2.Unidade m².....65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Materiais Testados no Estudo.....36
Figura 2– Bloco cerâmico utilizado no estudo 36
Figura 3 – Pesagem dos materiais para realização do ensaio granulométrico 40
Figura 4 - Realização do ensaio de granulometria 41
Figura 5 - Realização das análises químicas 43
Figura 6 – Formas de madeira.....46
Figura 7 - Painéis de alvenaria 46
Figura 8 - Máquina universal 100 tf (SOLOCAP).....48

Nenhuma entrada de índice de ilustrações foi encontrada.**LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 – Zonas de utilização limites para utilização do agregado miúdo.....50
Gráfico 2 – Curva granulométrica da areia 51
Gráfico 3 – Zonas de utilização limites para utilização (pó de pedra) 52
Gráfico 4 – Curva granulométrica do pó de pedra 53
Gráfico 5 - Curva granulométrica (materiais aglomerantes) 54
Gráfico 6 – Relação água/cimento (a/c) e relação água/materiais secos (a/ms)58
Gráfico 7 – Índice de consistência.....59
Gráfico 8 – Resistência à compressão e desvio padrão máximo absoluto 62
Gráfico 9 – Custos das argamassas por composições 65

LISTA DE FÓRMULAS

Equação 1 42
Equação 2 42
Equação 3. 44
Equação 4. 47

LISTA DE ABREVEATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira

ASTM - American Society for Testing and Materials

EDTA - Ácido Etilenodiamino Tetra-Acético

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **14**
2 OBJETIVOS **16**
2.1. Objetivo geral **16**
2.2. Objetivos específicos **16**
3 JUSTIFICATIVA **17**
4 REFERENCIAL TEÓRICO **19**
4.1 Argamassas **19**
4.2 Classificação geral das argamassas **20**
4.2.1 Classificação quanto à origem do aglomerante e sua natureza 21
4.2.2 Classificação quanto ao tipo e o número de aglomerantes (elementos ativos) 21
4.2.2.1 Argamassa de cal 21
4.2.2.2 Argamassa de cimento 23
4.2.2.3 Argamassas de cimento e cal 23
4.2.2.4 Argamassa de gesso 24
4.2.3 Classificação quanto sua forma de preparo ou fornecimento 25
4.2.4 Classificação quanto à consistência e plasticidade 26
4.2.5 Classificação quanto à densidade da massa da argamassa 28
4.2.6 Classificação quanto à função e emprego 28
4.3 Propriedades das argamassas no estado fresco **28**
4.3.1 Aderência inicial 28
4.3.2 Retenção de água 29
4.3.3 Trabalhabilidade 29
4.3.4 Massa específica e teor de ar incorporado 30
4.4 Propriedades das argamassas no estado endurecido **30**
4.4.1 Retração 30
4.4.2 Resistência de aderência à tração 31
4.4.3 Capacidade de absorver pequenas deformações 31
4.4.4 Resistência à tração na flexão e à compressão 31
4.5 Aglomerantes **32**
4.6 Aditivo **32**
4.7 Agregado miúdo **33**
4.8 Materiais argilosos (argilominerais) **33**

4.9 Rochas calcárias e produtos derivados 34
5 MATERIAL E MÉTODO 35
5.1 Material 35
5.1.1 Agregado miúdo (areia) 35
5.1.2 Materiais testados (argila, argilito e pó de pedra) 35
5.1.3 Cal 35
5.1.4 Aditivo 36
5.1.5 Cimento 36
5.1.6 Blocos cerâmicos 36
5.1.7 Reagentes e soluções 37
5.2 Equipamentos 37
5.3 Método 38
5.3.1 Ensaio granulométrico 38
5.3.2 Análises químicas 42
5.3.3 Escolha do traço e determinação dos volumes 43
5.3.4 Preparação das argamassas, moldagem dos corpos de prova e assentamento dos blocos cerâmicos 45
5.3.5 Determinação do índice de consistência 47
5.3.6 Determinação da resistência compressão 48
5.3.7 Análise de custo 49
5.3.8 Análise dos impactos ambientais associados 49
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO 50
6.1 Classificação granulométrica dos agregados 50
6.2 Classificação granulométrica dos aglomerantes 53
6.3 Caracterização química geral 55
6.4 Traço utilizado e relações água/cimento (a/c) e água/materiais secos (a/ms) 56
6.5 Índice de consistência 59
6.6 Resistência à compressão 60
6.7 Análise de custo 63
6.8 Análise de viabilidade ambiental 66
7 CONCLUSÃO 68
REFERÊNCIAS 70

1 INTRODUÇÃO

Em termos de disponibilidade de minérios, o Brasil destaca-se no cenário mundial, encontrando-se em posição privilegiada quando se analisa o seu potencial qualiquantitavo mineral. Em função desse grande potencial, muitos materiais vêm sendo largamente testados e utilizados no segmento de construção civil, inclusive na fabricação de argamassas, sejam elas obtidas pelo método tradicional “virada” na obra ou industrializadas.

No entanto, embora muitos experimentos venham sendo largamente realizados ao longo dos anos, a cal é o principal aglomerante utilizado na produção de argamassas, principalmente as tradicionais, podendo ser considerado também o mais antigo, vez que o “registro mais antigo do emprego da argamassa tradicional pela humanidade, sendo este um piso polido de 180 m², feito com pedras e argamassa de cal e areia, [é] estimado entre 7.000 a.C. e 9.000 a.C”. (CARASEK apud OLIVEIRA; LIMA; JONES, 2014).

Já as argamassas industrializadas surgiram mais tarde, em função da necessidade de favorecer a manutenção da organização e logística nos canteiros de obra. A escolha do melhor tipo de argamassa (virada na obra x industrializada) divide opiniões, principalmente quando se fala em argamassa para assentamento, e depende não só de fatores econômicos e técnicos, mas também e principalmente de fatores socioculturais. Na região de Arcos/MG, onde foram obtidos os materiais utilizados no estudo, ainda predomina a utilização das argamassas convencionais para esta finalidade.

Partindo-se desse pressuposto e considerando a grande importância das argamassas no segmento construtivo, a diversidade mineral do país e as possibilidades em relação à utilização de novos materiais nesse setor, o presente estudo foi desenvolvido a fim de se avaliar as características físicas (quanto à granulometria), mecânicas e químicas de novos materiais a serem utilizados como materiais substitutivos, ou seja, alternativos em substituição total à cal na produção de argamassas tradicionais para assentamento.

Buscou-se avaliar os fatores técnicos, econômicos e ambientais inerentes à utilização de cada material testado, de forma que esses três pilares estivessem associados na identificação dos resultados e parecer final conclusivo, pois a viabilidade de substituição da cal, um produto tão tradicional e eficaz, só seria

totalmente viável se atendesse a essas três esferas, aliando eficácia, economia e principalmente a questão ambiental.

2 OBJETIVOS

Esta seção tem por finalidade descrever os objetivos deste trabalho, sendo eles: objetivo geral e objetivos específicos, conforme especificados a seguir.

2.1. Objetivo geral

Avaliar algumas das principais propriedades das argamassas em seu estado fresco (índice de plasticidade, trabalhabilidade e aderência inicial ao meio suporte) e endurecido (resistência à compressão), sendo estas produzidas com diferentes materiais inertes em substituição total à cal na produção de argamassas de assentamento.

2.2. Objetivos específicos

- Analisar a possibilidade e viabilidade técnica de se adotar a argila, o argilito e o pó de pedra na fabricação de argamassas tradicionais de assentamento;
- Analisar a viabilidade da substituição total da cal por aditivo;
- Classificar as argamassas produzidas segundo os requisitos da NBR 13.281 (ABNT 2005) em seu estado endurecido quanto à resistência;
- Classificar as argamassas produzidas segundo os requisitos da NBR 13.276 (ABNT 2016) em seu estado fresco quanto ao índice de consistência;
- Realizar a caracterização granulométrica e química quanto aos parâmetros de SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, CaO, MgO, e P.F. de todos os materiais utilizados na pesquisa;
- Realizar uma estimativa comparativa de custos entre as argamassas produzidas através de uma composição de custos, usando como referência os dados do SINAP e TCPO (2010), considerando o traço, dosagens e volumes utilizado na pesquisa;
- Analisar se ambientalmente a utilização dos materiais substitutivos da cal é atrativa.

3 JUSTIFICATIVA

A construção civil é um dos setores de maior importância econômica, sendo também responsável por grande parte dos recursos naturais extraídos.

> A cadeia produtiva da construção civil consome entre 14 e 50% dos recursos naturais extraídos do planeta; no Japão corresponde à cerca de 50% dos materiais que circulam na economia; nos EUA o consumo de mais de dois bilhões de toneladas representa cerca de 75% dos materiais circulantes (JOHN, 2000).

Para Ribeiro; Pinto e Starling (2002), “o setor tem o desafio de conciliar uma atividade produtiva dessa magnitude com condições que conduzam a um desenvolvimento sustentável consciente e menos agressivo ao meio ambiente”.

Embora no Brasil os recursos naturais empregados na construção civil sejam abundantes, é necessário que se busque novas alternativas, novos recursos a fim de reduzir a utilização em excesso e escassez daqueles recursos atualmente utilizados em grande escala e de se dominar novas tecnologias a serem empregadas no segmento construtivo.

Segundo Abai apud Marinho (2015), “dentre os produtos da construção civil, a argamassa possui um expressivo consumo mundial” Ainda segundo o autor, “só no Brasil, o consumo de argamassas para assentamento de blocos e revestimento gira em torno de 100 milhões de toneladas por ano”.

A utilização da cal na preparação de argamassas data de épocas remotas, sendo este, ainda hoje, um dos aglomerantes mais utilizados no processo de fabricação de argamassas em função de suas particularidades, conferindo maior plasticidade, redução do atrito entre os grãos do agregado miúdo, boa retenção de água, entre outras inúmeras vantagens das argamassas produzidas com cal.

Todavia a indústria da cal está entre as mais poluidoras do meio ambiente, desde a extração do calcário até a fase da obtenção cal propriamente dita, principalmente em relação a emissão de gás carbônico.

Segundo Sampaio e Almeida (2009), com relação à emissão de CO_2, no processo de decomposição do calcário para produção da cal, são lançados na atmosfera aproximadamente 700kg de CO_2 por toneladas de material produzido.

Se pegarmos como referência o Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases do Efeito Estufa (Ministério da Ciência, Tecnologia e

Inovação, 2015), a realidade é ainda mais preocupante. Segundo a referida fonte, para a produção de uma tonelada de cal dolomítica, são emitidas aproximadamente 913kg de CO_2 para a atmosfera e para produção de uma tonelada de cal virgem 785kg.

Com base nesta estimativa e nos fatos acima mencionados com relação à expressividade da utilização da cal, pode ser mensurada a magnitude dos impactos ambientais causados pela sua utilização em grande escala ao longo do tempo.

De forma generalizada, são muitos outros impactos decorrentes do processo, além da poluição atmosférica, tais como alteração da paisagem local, aumento dos processos erosivos em função da exposição do minério para lavra, alcalinização na água e no solo, emissão de material particulado, entre tantos outros.

Destarte, o presente trabalho justifica-se pela necessidade técnica, econômica e ambiental de se conhecer o comportamento de possíveis materiais substitutivos à cal, visando, além do alcance dos objetivos propostos, a alternativas que agridam menos possível o meio ambiente, aliando desenvolvimento e sustentabilidade.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

Nos próximos itens, são abordados os temas mais relevantes utilizados para elaboração do presente trabalho, através do embasamento teórico obtido por meio de consultas bibliográficas diversas, nos mais variados formatos de mídias, tais como trabalhos de conclusão de curso, dissertações de mestrado, artigos acadêmicos, teses de doutorado, livros, revistas, informações obtidas junto a órgãos públicos e privados e experimentos já realizados sobre o assunto.

4.1 Argamassas

A argamassa é comumente utilizada no ramo da construção civil, podendo ser utilizada para fins de assentamento de alvenarias ou revestimento interno e externo.

A NBR 13281 (ABNT, 2005) assim define argamassa:

> [...] mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada) (ABNT, 2005).

Em função de sua grande utilização e aceitação no mercado, muitas outras conceituações foram sendo elaboradas e descritas ao longo do tempo em diferentes trabalhos, considerando, entre outros aspectos, a sua utilidade preponderante (assentamento ou revestimento).

Segundo a NBR 8545 (ABNT 1984), a argamassa de assentamento, foco principal do presente trabalho, “deve ser plástica e ter consistência para suportar o peso dos tijolos e mantê-los no alinhamento por ocasião do assentamento”. A importância e desempenho de tais funções e tantas outras, ficam subtendidas no trecho escrito por (PEREIRA, 2005).

> As funções das juntas de assentamento são solidarizar os elementos; distribuir e uniformizar as tensões de contato entre elementos evitando rupturas, resultantes de irregularidades e desvios geométricos dos elementos; acomodar deformações; aumentar a resistência ao cisalhamento e à tração da parede; contribuir para a estanqueidade e contribuir para a capacidade de isolamento térmico e acústico da parede (PEREIRA, 2005).

As argamassas possuem uma série de propriedades específicas que podem influenciar direta ou indiretamente na sua utilização, ou seja, podem comprometer em maior ou menor relevância a sua aplicabilidade, bem como os resultados esperados desta, havendo, portanto, uma interação direta entre suas funções e os requisitos necessários para alcançá-las. No QUADRO 1, podem ser observadas as principais propriedades das argamassas utilizadas para assentamento de alvenarias, bem como as funções associadas.

Quadro 1 – Principais propriedades das argamassas de assentamento de alvenaria (elevação)

Funções	**Principais Requisitos (Propriedades)**
Unir as unidades de alvenaria e ajudá-las a resistir aos esforços laterais.	Trabalhabilidade (consistência, plasticidade e retenção de água)
Distribuir uniformemente as cargas atuantes na parede por toda a área resistente dos blocos.	Aderência
Absorver deformações naturais a que a alvenaria estiver sujeita	Capacidade de absorver deformações
Selar as juntas	Resistência mecânica

Fonte: CARASEK (2007) (adaptado).

Ressalta-se que, embora o seu uso mais assíduo seja a elevação de alvenarias, as argamassas também podem e são utilizadas em fundações, pisos e coberturas e que o seu desempenho, bem como sua durabilidade, vai depender dos fatores associados a suas propriedades.

4.2 Classificação geral das argamassas

Nos itens a seguir, foram abordadas de forma geral as principais características das argamassas, ou seja, a forma como elas podem ser classificadas em função da diferenciação dos seus constituintes, forma de utilização, elementos ativos, etc.

4.2.1 Classificação quanto à origem do aglomerante e sua natureza

Segundo Ambrozewicz (2012), “aglomerante é um ligante, material ativo, e tem a função principal de promover a ligação entre os grãos do agregado”, podendo ser utilizados na produção de concretos e argamassas.

De acordo com a sua origem, os materiais aglomerantes podem ser classificados como orgânicos ou minerais. Os de natureza orgânica são obtidos a partir de substâncias animais ou vegetais, enquanto os de natureza mineral são obtidos a partir de rochas naturais, como calcários ou mármores, com determinados teores de argila (MARGALHA, 2011).

Em função do princípio ativo, os aglomerantes podem ser classificados em hidráulicos e aéreos. Segundo Rodrigues (2004), “os ligantes hidráulicos são constituídos por pós muito finos e têm a propriedade de endurecer em contato com o ar ou com a água, como a cal hidráulica e o cimento”.

Para Rodrigues (2004), “os ligantes aéreos, pelo contrário, não podem endurecer dentro de água, pois dependem do dióxido de carbono da atmosfera para isso, tal como a cal aérea”.

Entre os ligantes hidráulicos mais conhecidos, estão a cal hidráulica e o cimento e entre os aglomerantes aéreos, a cal aérea.

4.2.2 Classificação quanto ao tipo e o número de aglomerantes

Quanto ao tipo de aglomerante, as argamassas podem ser de cal, cimento, gesso, ou formadas a partir da mistura de cal e cimento. As argamassas produzidas com um único tipo de aglomerante são denominadas de argamassas simples; já as que possuem mais de um ligante na mistura de argamassas, mistas.

4.2.2.1 Argamassa de cal

> O homem conheceu a cal provavelmente nos primórdios da Idade da Pedra (período Paleolítico), ao final do Pliocênico. Por volta de 3000 a.C. foram achadas ruínas cujo solo argiloso foi estabilizado com cal para a construção da Pirâmide de Shersi, na região de Tibet (GUIMARÃES, 2002).

De forma sintetizada, a cal virgem é um produto derivado da rocha calcária, obtida através de um processo térmico conhecido como calcinação. Para Silva, Campiteli e Gleize (2007), “os calcários e os dolomitos quando calcinados à

temperatura próxima de 1000° C, produzem a cal virgem, pela perda de parte dos seus constituintes (anidrido carbônico – CO_2)".

A cal virgem pode passar ainda por um processo de hidratação (adição de água), transformando-se em cal hidratada. Segundo Coelho, Torgal e Jalali (2009), "extinção é o nome dado ao processo de hidratação da cal viva (virgem)". Esse procedimento é exotérmico e libera uma grande quantidade de calor.

Segundo dados do Sumário Mineral, no mercado a produção da cal, em ambas as formas, é expressiva, considerando-se os dados referentes à estrutura de produção geral para o ano de 2013, com "a cal virgem correspondendo a 76% e a cal hidratada a 24% da produção nacional" (DNPM, 2014).

Em termos de utilização na produção de argamassas, a escolha da condição (virgem ou hidratada), vai depender do objetivo pretendido, das características físico-químicas do material, das preferências particulares dos profissionais envolvidos, de questões econômicas e, claro, da cultura local.

Todavia "entre todos os plastificantes utilizados na preparação das argamassas, o mais recomendável é a cal hidratada ($Ca(OH)_2$), cujo desempenho como plastificante é comprovado em vários institutos de pesquisas" (PAIVA; GOMES; OLIVEIRA, 2008).

As argamassas de cal, por sua vez, possuem em sua composição além da cal, agregado miúdo e água, tendo a cal como principal função o preenchimento dos espaços vazios entre os grãos do agregado, conferindo à pasta maior plasticidade, trabalhabilidade, etc. Seu poder aglomerante auxilia na união dos grãos de areia que fazem parte da argamassa, trabalhando como uma espécie de cola, além de melhorar a trabalhabilidade da argamassa (COELHO; TORGAL; JALALI, 2009).

Segundo Carasek; Cascudo e Scartezini (2001), "as argamassas que contêm cal preenchem mais facilmente e, de maneira mais completa, toda a superfície do substrato, propiciando maior extensão de aderência". Segundo o manual da ABCP (2002), a utilização da cal na argamassa faz com que haja retenção de água na mistura, devido à finura da cal, o que auxilia na cura da argamassa, fazendo com que não falte água no processo de endurecimento

4.2.2.2 Argamassa de cimento

Segundo Bueno (2000), “cimento é o nome dado a materiais pulverulentos que, ao serem misturados com água formam uma pasta que pode ser facilmente moldada”. Esta pasta torna-se, ao secar, uma “massa compacta e de grande dureza” BUENO, 2000).

Nas argamassas, o cimento é utilizado como o aglomerante da mistura, sendo a pasta produzida também por água e agregado miúdo.

> Dentre eles, entretanto, o cimento é o mais ativo, do ponto de vista químico. Pode-se dizer que o cimento é o principal responsável pela transformação da mistura dos materiais componentes dos concretos e das argamassas no produto final desejado (ABCP, 2002).

O uso do cimento influencia as propriedades das argamassas especialmente no que tange à resistência mecânica. Ademais, colabora na plasticidade e na retenção de água devido à sua composição por partículas finas (ABCP, 2002).

4.2.2.3 Argamassas de cimento e cal

As argamassas mistas tratam-se de uma mistura que reúne ambos os materiais citados anteriormente (cal e cimento), agregado miúdo e água.

Elas são amplamente utilizadas na construção civil, principalmente na execução de revestimentos-base para acabamentos e na elevação de alvenarias (DÁFICO, 2007).

> As argamassas mistas são correntemente empregadas por apresentarem as seguintes características: elevada plasticidade e trabalhabilidade, baixa retratilidade, facilidade de ser desempenada sem apresentar fissuração, boa retenção de água e adesão inicial, estas propriedades são melhoradas pela presença da cal (POSSAN; GAVA; PETRAUSKI, 2002).

Diferentes resultados podem ser alcançados na utilização de argamassas mistas, com relação à dosagem aplicada de cada constituinte (cal ou cimento) e as características gerais das argamassas (QUADRO 2).

Quadro 2 – Características das argamassas mistas relacionadas com teor relativo de cimento/cal

PROPRIEDADES MELHORADAS COM MAIOR TEOR RELATIVO DE CIMENTO	PROPRIEDADES MELHORADAS COM MAIOR TEOR RELATIVO DE CAL
Maior resistência à compressão	Maior resistência à alta temperatura
Maior resistência à tração	Menor retração por secagem inicial
Maior capacidade de aderência	Maior retenção de água
Maior durabilidade	Menor movimentação higroscópica
Maior permeabilidade	Maior trabalhabilidade
Maior resistência inicial	Maior plasticidade
-	Maior elasticidade

Fonte: ROCHA (2010).

As argamassas que têm em sua mistura, além do cimento, a utilização da cal, apresentarão notáveis alterações, principalmente na trabalhabilidade no estado fresco, colaborando com a aplicação e ganho de produtividade (RECENA, 2008).

4.2.2.4 Argamassa de gesso

"O gesso é definido como material moído, na forma de pó, obtido da calcinação da gipsita, constituído predominantemente de sulfato de cálcio, podendo conter aditivos controladores do tempo de pega". Esta é a definição de gesso constante da NBR 13207 (ABNT, 2017).

> A maior aplicação do gesso é na indústria da construção civil (revestimento de paredes, placas, blocos, painéis, etc.), onde pode ser utilizado como alternativa em relação a outros materiais como a cal, o cimento, a alvenaria e a madeira (MUNHOZ; RENOFIO, 2007).

O gesso, assim como a cal, é originado do processo de extração e beneficiamento de um tipo de minério, ou seja, é um produto secundário. Ele é obtido pelo processo de beneficiamento da gipsita, que consiste em uma redução granulométrica da mesma (processo de britagem) e desidratação. O minério é constituído principalmente por sulfato de cálcio ($CaSO_4$). Após a desidratação o produto é moído e peneirado.

O emprego do gesso na construção civil é abordado pela NBR 13207 (ABNT 2017), que estabelece os requisitos para a caracterização, inspeção e recebimento do

gesso utilizado na construção civil para fabricação de elementos, componentes e revestimento de superfícies.

Já o emprego de gesso em argamassas está consolidado na normalização internacional. As normas ASTM C28/C28M-10 (ASTM, 2015) e ASTM C842-05 (ASTM, 2015) determinam os requisitos mínimos para utilização do gesso e traço a ser utilizado em função dos materiais.

4.2.3 Classificação quanto sua forma de preparo ou fornecimento

Quanto a sua produção e fornecimento, as argamassas podem ser totalmente produzidas no canteiro de obras.

Para Recena (2008), "'o grande problema das argamassas dosadas na obra é a dosagem, que muitas vezes é feita de forma inadequada afetando as propriedades exigidas das argamassas".

> Além disso, as argamassas produzidas em obra envolvem um número maior de processos para sua fabricação, com isso necessitam de maior espaço de armazenamento para os materiais, maior demanda de transporte de materiais dentro do canteiro de obras, e consequentemente uma maior utilização de mão de obra (REGATTIERI; SILVA, 2003).

Podem ser utilizadas como misturas semiprontas, adquirida de um fornecedor e produzida na obra, como podem também ser totalmente industrializadas, necessitando então apenas da adição de água e dosada em centrais de produção.

Com relação às argamassas industrializadas, Recena (2008) reforça a ideia de Trevisol (2015), afirmando que uma das principais vantagens desse tipo de argamassa é que a mesma vem ensacada, facilitando sua armazenagem. Além disso, é uma mistura bem mais homogênea, o que dá a garantia de que toda a argamassa aplicada terá as mesmas propriedades.

Segundo Matos (2013), as argamassas dosadas em centrais são transportadas por caminhões betoneiras de maneira bem semelhante ao concreto. Pela forma como são produzidas, essas argamassas são mais homogêneas, o que favorece a sua utilização e durabilidade.

> A produção da argamassa sendo feita em uma central de dosagem, com rígido controle dos materiais, proporciona uma maior homogeneidade ao produto, e com isso a diminuição do risco de patologias ligadas a erros de dosagem da argamassa (ROCHA; HERMANN, 2013).

4.2.4 Classificação quanto à consistência e plasticidade

Quanto à consistência, as argamassas podem ser secas, plásticas e fluídas.

> Argamassa de consistência seca é aquela que é necessário aplicar uma energia significativa para poder conformá-la em sua forma final, existindo atrito entre as partículas, resultando em uma massa áspera. Argamassa plástica é aquela que possui certa trabalhabilidade que com pequeno esforço atinge a forma desejada. A argamassa fluida são as que auto nivelam, não necessitando de qualquer esforço além da gravidade para sua aplicação (CARASEK, 2007).

Quanto à plasticidade, as argamassas classificam-se em magras, cheias e gordas, sendo comum as nomenclaturas (pobre, média e rica) em algumas literaturas, a depender da quantidade de aglomerante adicionado à pasta.

As argamassas pobres não possuem em sua pasta quantidade suficiente de aglomerante; as cheias possuem uma quantidade ideal, suficiente para preencher os vazios existentes entre os grãos; e as ricas ou gordas possuem materiais ligantes em excesso.

> A plasticidade adequada para cada mistura, de acordo com a finalidade e forma de aplicação da argamassa, demanda uma quantidade ótima de água a qual significa uma consistência ótima, sendo esta função do proporcionamento e da natureza dos materiais (CASCUDO; CARASEK; CARVALHO, 2005).

Embora não exista uma normatização em relação à dosagem das argamassas, uma série de aspectos deve ser observada na ocasião da mensuração da quantidade de cada constituinte a ser utilizado em cada obra, conforme se observa no QUADRO 3.

Quadro 3 – Aspectos considerados na composição da argamassa

MATERIAIS	ASPECTOS A SEREM CONSIDERADOS NA COMPOSIÇÃO E DOSAGEM
Cimento	Tipo de cimento (características) e classe de resistência; Disponibilidade e custo; Comportamento da argamassa produzida com o cimento.
Cal	Tipo de cal (características); Forma de produção; Massa unitária; Disponibilidade e custo; Comportamento da argamassa produzida com a cal.
Areia	Composição mineralógica e granulométrica; Dimensões do agregado; Forma e rugosidade superficial dos grãos; Massa unitária; Inchamento; Comportamento da argamassa produzida com a areia; Manutenção das características da areia.
Água	Características dos componentes da água, quando essa não for potável.
Aditivos	Uso de aditivos acrescentados à argamassa no momento da mistura ou da argamassa aditivada; Tipo de aditivo (características); Finalidade; Disponibilidade e custo; Comportamento da argamassa produzida com o aditivo.
Adições	Tipo de adição (características); Finalidade; Comportamento da argamassa produzida com a adição; Disponibilidade, manutenção das características e custo.

Fonte: ABREU apud BAÍA; SABBATINI (2008).

Ambas as propriedades (consistência e plasticidade) estão intimamente ligadas a trabalhabilidade das argamassas, sendo esta “uma das mais importantes propriedades das argamassas, haja vista a sua obrigatoriedade para que possa ser convenientemente utilizada (com fácil manuseio), apresentando todo o seu potencial durante o processo de execução do revestimento” (SOUSA; BAUER, 2003).

4.2.5 Classificação quanto à densidade da massa da argamassa

Quanto à densidade da massa, as argamassas podem ser leves, normais e pesadas. Para Costa (2016) “a densidade no estado fresco afeta principalmente a trabalhabilidade da argamassa, pois quanto mais leve melhor de se trabalhar”.

A densidade da massa das argamassas é estabelecida seguindo a NBR 13278 (ABNT, 2005).

Segundo Carasek (2007), “argamassa leve é aquela que possui densidade inferior a 1,40 g/cm³, argamassa normal possui densidade entre 1,40 g/cm³ e 2,30 g/cm³, enquanto que argamassa pesada possui densidade superior a 2,30 g/cm³”.

4.2.6 Classificação quanto à função e emprego

Quanto à função, as argamassas podem ser utilizadas em construções e alvenarias, revestimento de pisos, paredes e tetos, para revestimentos cerâmicos e recuperação de estruturas. Em função de seu emprego, elas podem ser subdivididas em argamassas comuns e refratárias, sendo as refratárias aquelas utilizadas em locais onde há necessidade de se resistir a altas temperaturas, sendo produzidas com agregados especiais e cimento aluminoso.

Segundo Matos (2013), “é de fundamental importância o conhecimento de cada material que constitui a argamassa”. Os materiais constituintes da massa têm ligação direta com as funções a serem desempenhadas, devendo estes ser determinados em função da utilização posterior da pasta.

4.3 Propriedades das argamassas no estado fresco

Nos itens a seguir, serão descritas as principais características das argamassas em seu estado fresco, ou plástico como também é denominado.

4.3.1 Aderência inicial

A aderência ou adesão, também concebida como a pegajosidade, é a propriedade que estima a capacidade que a argamassa tem de permanecer adequadamente unida à base de aplicação, após seu lançamento.

A aderência inicial da argamassa é a capacidade que a mesma possui de se grudar ao substrato de aplicação. Esta depende das demais propriedades das argamassas no estado fresco, além de características da base de aplicação tais como: a porosidade, as condições de limpeza, rugosidade e umidade (BAÍA; SABBATINI , 2008).

Segundo Carasek (2007), “ela está diretamente relacionada com as características reológicas da pasta aglomerante, especificamente a sua tensão superficial”.

A redução da tensão superficial da pasta favorece a “molhagem” do substrato, reduzindo o ângulo de contato entre as superfícies e implementação da adesão. Esse fenômeno propicia um maior contato físico da pasta com os grãos de agregado e também com sua base, melhorando, assim, a adesão.

4.3.2 Retenção de água

Para Lourenci (2003), a retenção de água é a aptidão de uma argamassa hidráulica fresca de reter a água de amassadura, quando exposta à sucção do suporte, possibilitando o seu endurecimento normal.

Os principais fatores que influenciam na retenção de água são os tipos de materiais utilizados e a dosagem de cada um deles. Esta propriedade pode ser melhorada com a adição de cal ou de outros aditivos (BAÍA; SABBATINI, 2008).

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. Este parâmetro pode ser avaliado através do ensaio de determinação da retenção de água segundo a norma NBR 13277 (ABNT, 2005) – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos.

4.3.3 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é a propriedade que determina a facilidade de manuseamento da argamassa ao ser misturada, transportada e aplicada.

> A trabalhabilidade é uma propriedade da argamassa que confere a consistência exata para que o pedreiro realize sua aplicação de modo que esta não seja aderida à colher, nem possa ser fluída a ponto de permitir que

> os instrumentos utilizados na sua aplicação a penetrem com facilidade (ARAÚJO apud ROSA, 2017).
>
> Uma argamassa pode ser considerada trabalhável quando, ao ser lançada na parede, pode ser distribuída com facilidade, não endurecer e nem aderir na ferramenta de quem esteja manuseando, além de não apresentar segregação ao ser transportada e permanecer plástica durante o tempo da sua aplicação (BAÍA; SABBATINI, 2000).

4.3.4 Massa específica e teor de ar incorporado

Teor de ar incorporado é a quantidade de ar existente em um determinado volume de argamassa.

A massa específica e o teor de ar incorporado influenciam na trabalhabilidade das argamassas. Segundo Lourenci (2003), “a massa específica absoluta da mistura ligante/agregado refere-se ao volume de material sólido não sendo considerados os vazios”.

De acordo com Carasek (2007), “a massa específica varia com o teor de ar (principalmente se for incorporado por meio de aditivos) e com a massa específica dos materiais constituintes da argamassa, prioritariamente do agregado”.

4.4 Propriedades das argamassas no estado endurecido

O conhecimento das propriedades da argamassa em seu estado endurecido é de fundamental importância, principalmente porque é a partir delas que se pode mensurar com maior clareza e precisão o seu comportamento ao longo dos anos, considerando o seu local de aplicação, as intempéries do tempo e o comportamento mecânico quando é aplicada de forma isolada ou em conjunto com diversificados materiais.

Nos itens a seguir serão descritas as principais propriedades das argamassas em seu estado endurecido.

4.4.1 Retração

> O endurecimento da argamassa é acompanhado por uma diminuição do volume em função da perda de água evaporável, ocasionada pelas reações de hidratação. Mesmo após a secagem, notam-se variações dimensionais em função do grau higrométrico do ambiente, tal fenômeno é conhecido como retração (FIORITO, 2003).

Para Baía e Sabbatini (2008), “as retrações ocorrem não só em função da evaporação acelerada da água, mas também pelas reações de hidratação do cimento”.

4.4.2 Resistência de aderência à tração

A aderência é a propriedade que as argamassas possuem de aderir, sendo influenciada pela sua condição superficial, pela capacidade de reter água, pelos materiais componentes da argamassa e pela espessura do revestimento.

Segundo definição da NBR 13528 (ABNT, 2010) “a resistência de aderência à tração consiste na tensão máxima suportada por uma área limitada de revestimento, na interface de avaliação, quando submetido a um esforço normal de tração”.

Para Silva, Campiteli e Gleize (2007), a aderência pode sofrer problemas em função da falha na resistência mecânica, que pode também originar fissuras.

4.4.3 Capacidade de absorver pequenas deformações

Refere-se à capacidade que o revestimento tem de absorver deformações, tanto as intrínsecas (do próprio revestimento), quanto as extrínsecas (da base), sem sofrer ruptura, sem apresentar fissuras prejudiciais e sem perder aderência.

Caso sua capacidade de deformação não seja compatível ao nível de tensões gerado, a argamassa na forma de revestimento ou junta de assentamento será rompida, podendo ocorrer prejuízos à sua funcionalidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

4.4.4 Resistência à tração na flexão e à compressão

As argamassas devem ser capazes de suportar quaisquer que sejam as solicitações (movimentações da base, recalques, variação dimensional, etc.), ou seja, esforços diversos de diversificadas origens.

Silva, Campiteli e Gleize (2007) citam a importância da resistência das argamassas a solicitações: “a falha na resistência mecânica pode originar fissuras ou problemas na aderência das camadas de argamassa”.

A norma brasileira NBR 13279 (ABNT, 2005) indica o procedimento experimental para determinação da resistência à tração na flexão e à compressão das

argamassas. Deve-se ainda atentar-se para o fato de que a resistência das argamassas pode ser influenciada por uma série de fatores diretos ou indiretos.

Segundo Jochem (2012), “a resistência mecânica das argamassas apresenta variações em função do local em que ela será aplicada”.

4.5 Aglomerantes

“Os aglomerantes, também chamados de ligantes, são materiais pulverulentos que se hidratam na presença de água formando uma pasta resistente capaz de aglutinar agregados dando origem a concretos e argamassas”, segundo (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2002). Tratam-se de materiais que servem para solidarizar os grãos dos agregados utilizados nas pastas de argamassas e concretos.

Eles podem ser ativados de diferentes formas a depender do seu processo ativo peculiar. Os quimicamente ativos endurecem a partir de reações químicas e os inertes endurecem por secagem simples.

Os quimicamente ativos podem ser hidráulicos e aéreos, podendo ser utilizados de forma isolada ou em conjunto, a depender do tipo de local onde serão aplicados e das peculiaridades de cada obra, podendo inclusive receber adições.

Para Dubaj (2000), “os dois tipos de aglomerantes mais utilizados são cimento e cal, e são importantes por sua composição química, finura e capacidade de solidificar, além de conferir às argamassas propriedades como aderência e resistência”.

4.6 Aditivo

De forma generalizada, os aditivos são produtos químicos, adicionados à argamassa imediatamente antes ou durante a mistura, com o objetivo de melhorar suas características (aderência, trabalhabilidade, resistência, etc.). Sua eficiência vai depender da concentração utilizada na mistura, do tempo de adição e dos seus componentes químicos.

A NBR 13529 (ABNT, 2013) define aditivo como “produto adicionado à argamassa em pequena quantidade para melhorar uma ou mais propriedades no estado fresco ou endurecido”.

4.7 Agregado miúdo

A NBR 7211 (ABNT, 2009) define agregado miúdo como sendo grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm.

Segundo a mesma fonte, suas dimensões e propriedades são adequadas para preparação de argamassa ou concreto. Os agregados podem ser naturais, industrializados e industriais.

4.8 Materiais argilosos (argilominerais)

De forma genérica, a argila é um material formado a partir de transformações (principalmente intemperismo) dos minerais mais comuns na crosta terrestre: os argilominerais, ou seja, silicatos de alumínio hidratado, Fe, Mg, Na, K, Ca, etc.

Segundo Toledo, Oliveira e Melfi (2000), “intemperismo pode ser entendido como um conjunto de alterações de ordem física (desagregação) e química (decomposição) que as rochas sofrem ao entrar em contato com o meio ambiente”.

> A denominação argila apresenta significados diversos nos diferentes ramos científicos e tecnológicos, porém o conceito clássico que reúne aceitação geral é o que define as argilas como materiais naturais, terrosos, de granulação fina que quando umedecidos com água apresentam certa plasticidade (BERGAYA et al apud COGO 2011).

Segundo Harvey e Murray (2006), “as argilas são classificadas de acordo com suas propriedades físicas e químicas, que estão diretamente relacionadas com suas principais aplicações” (traduzido). Em função de suas propriedades físicas e químicas, as argilas podem ser divididas em argilas comuns, argilas plásticas, refratárias, bentonita, argilas descorantes etc.

Segundo Leinz e Amaral apud Candido (2013), o argilito é uma rocha de origem sedimentar, podendo ser constituído de sedimentos clásticos, siliclásticos ou dendríticos. Assim como a argila, o argilito é uma rocha que possui argilominerais entre seus constituintes. Trata-se de uma rocha de grãos finos e laminados, contendo, além de argilominerais, feldspato, quartzo e clorita. Formam-se por processos metamórficos.

> As rochas metamórficas são formadas por transformações na mineralogia, química e estrutura de rochas já existentes, devido a mudanças nos parâmetros físicos (pressão e temperatura principalmente) e químicos diferentes das condições diagenéticas. As rochas resultantes do processo de metamorfismo dependem do tipo de rocha e sua composição mineralógica, e as principais transformações são a recristalização de minerais e, ou, formação de novos minerais e deformações na estrutura das rochas [...] (CARNEIRO; LOPES; GONÇALVES, 2015).

Ainda segundo os autores:

> Durante a deposição, diagênese e metamorfismo progressivo de um sedimento argiloso [...], ele passa por uma série de etapas. As rochas envolvidas nessas transformações permanecem no estado sólido e podem formar rochas sedimentares, como o argilito ou folhelho, ou podem dar origem a rochas metamórficas, como a ardósia, filito, xisto e gnaisse (CARNEIRO; LOPES; GONÇALVES, 2015).

4.9 Rochas calcárias e produtos derivados

As rochas calcárias têm sua utilização em diversificados segmentos, dando origem a diversos produtos derivados.

Eles podem ser utilizados na indústria de cimento, construção civil, fabricação de cal, indústrias de papel etc.

No segmento de construção civil, ele pode ser utilizado de forma direta (como agregado) ou indireta (através de produtos derivados).

> A calcita (carbonato de cálcio – $CaCO_3$) é o principal constituinte mineralógico do calcário, e naturalmente existem, acompanhando o carbonato de cálcio, em maior ou menor proporção, outros carbonatos como os de magnésio, ferro, manganês e mais raramente de zinco, bário etc.
> [...]
> O calcário encontrado extensivamente em todos os continentes é extraído de pedreiras ou depósitos que variam em idade, desde o Pré-Cambriano até o Holoceno. As reservas de rochas carbonatadas são grandes e intermináveis, entrementes, a sua ocorrência com elevada pureza corresponde a menos que 10% das reservas de carbonatos lavradas em todo mundo (SAMPAIO; ALMEIDA, 2009).

Tanto a cal, como o pó de pedra, são originários das rochas calcárias, ou seja, se tratam de produtos derivados do calcário.

5 MATERIAL E MÉTODO

O presente trabalho foi realizado através da execução de experimentos diversos (ensaio de determinação de granulometria, análises químicas, ensaios de resistência a compressão e índice de consistência), a fim de testar diferentes materiais quanto a sua utilização na fabricação de argamassas de assentamento em substituição total à cal.

As argamassas foram dosadas no traço de 1:2:8 em laboratório e preparadas de forma convencional, ou seja, manualmente.

A realização de tais ensaios foi necessária para o alcance de todos os objetivos propostos no trabalho. Nos próximos tópicos, são descritos todos os materiais utilizados na realização do estudo, bem como todo método aplicado na execução dos ensaios mencionados.

5.1 Material

5.1.1 Agregado miúdo (areia)

A areia utilizada no estudo foi obtida de uma jazida da região de Arcos, com granulometria máxima de 2mm.

5.1.2 Materiais testados (argila, argilito, pó de pedra)

Assim como a areia utilizada no estudo, todos os materiais testados no presente trabalho foram obtidos em jazidas da região de Arcos (FIG.1). O pó de pedra foi obtido junto a uma mineração de calcário, sendo este agregado proveniente do seu processo de britagem. Na empresa onde o mesmo foi obtido não há aproveitamento deste tipo de material, sendo um subproduto de granulometrias maiores das britas produzidas.

5.1.3 Cal

A CH utilizada no estudo foi a cal hidratada ensacada, com teor de MgO de 0,73% e 72,73% de CaO.

5.1.4 Aditivo

O aditivo utilizado foi um aditivo plastificante com dosagem teórica de 100 a 250 ml de produto para cada saco de cimento (50 kg).

Figura 1 – Materiais Testados no Estudo

Fonte: A autora (2018).

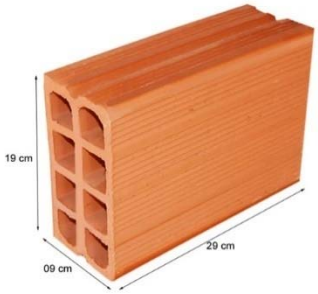
5.1.5 Cimento

O cimento utilizado para produção da argamassa foi CPII – F – 32 (Cimento Portland com adição de Filler).

5.1.6 Blocos cerâmicos

Como o estudo trata de argamassas de assentamento, além dos ensaios em corpos de prova, as pastas foram também aplicadas a painéis de alvenaria, com intuito de se testar a trabalhabilidade das argamassas produzidas e sua aderência inicial. Os blocos utilizados na execução dos mesmos foram tijolos cerâmicos com as seguintes dimensões: 9 cm x 19 cm x 29 cm (FIG. 2).

Figura 2– Bloco cerâmico utilizado no estudo



Fonte: ROSA (2017).

5.1.7 Reagentes e soluções

Para a realização das análises químicas foram utilizados alguns reagentes e soluções. A utilização dos mesmos é necessária para a determinação dos teores de SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, CaO, MgO e PF. Os reagentes e soluções utilizados foram:

- Ácido percloríco;
- Ácido nítrico;
- Solução de acetato de amônio;
- EDTA;
- Calcon;
- Negro de eriocromo;
- Indicador para ferro;
- Indicador para alumínio;
- Hidróxido de potássio;
- Hidróxido de amônio;
- Complexo de cobre;
- Trietanolamina;
- Carbonato de Sódio.

5.2 Equipamentos

Os equipamentos utilizados foram:

- Béquer de 250 cm^3;
- Balão volumétrico de 250 cm^3;
- Bureta;
- Pipeta;
- Pipetador;
- Agitador magnético;
- Bastões magnéticos;
- Chapa aquecedora;
- Balança analítica de grande precisão;
- Cadinho de porcelana;

- Cadinho de platina com tampa;
- Bico de gás;
- Banho de areia;
- Peneiras vibratórias e agitador de peneiras;
- Recipiente para produção das argamassas;
- Misturador mecânico;
- Mesa para índice de consistência;
- Molde troco cônico;
- Soquete metálico;
- Paquímetro;
- Moldes prismáticos de madeira (40mm x 40mm x 160mm);
- Prensa de ensaio de compressão;
- Régua metálica;
- Espátula metálica;
- Nível;
- Prumo.

5.3 Método

Para cada ensaio realizado no trabalho, foi seguido um método específico. Nos próximos tópicos esses métodos serão descritos de forma isolada em função de sua normatização e especificações peculiares.

5.3.1 Ensaio granulométrico

A determinação granulométrica do agregado miúdo e pó de pedra utilizada no estudo foi realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT 2003), com adaptações para os demais materiais utilizados. Os materiais a serem mostrados, foram levados para o laboratório.

Cada amostra foi umedecida com o intuito de se evitar a segregação dos grãos e cuidadosamente misturada. Em seguida formaram-se duas amostras utilizadas na realização do ensaio (amostra 1 e amostra 2).

A determinação da massa mínima por amostra utilizada no estudo em quilogramas foi determinada em função da dimensão nominal do material em milímetros de acordo com a TAB. 1.

Tabela 1 – Massa mínima por amostra de ensaio

Dimensão Máxima Nominal do Agregado (mm)	Massa Mínima da Amostra de Ensaio (kg)
< 4,75	0,3*
9,5	1
12,5	2
19	5
25	10
37,5	15
50	20
63	35
75	60
90	100
100	150
125	300

Fonte: NBR NM 248 (ABNT, 2003).
Nota: * Após secagem

Em função da dimensão nominal da areia e materiais testados, foi utilizado 0,3 kg de cada material (300 g). A pesagem foi realizada utilizando-se uma balança de precisão (0,1 g) da marca Coleman – BN 1200.

Ressalta-se que todos os materiais utilizados no ensaio foram secos em estufa a (105 – 110ºC) e esfriados à temperatura ambiente.

Na FIG. 3 observa-se a pesagem do agregado miúdo para realização do ensaio. Todos os materiais testados foram pesados.

Figura 3 – Pesagem dos materiais para realização do ensaio granulométrico

Fonte: A autora (2018).

Procedeu-se então ao peneiramento das amostras. Para realização do ensaio, utilizaram-se peneiras da série normal e série intermediária (TAB. 2).

Tabela 2 – Série de peneiras

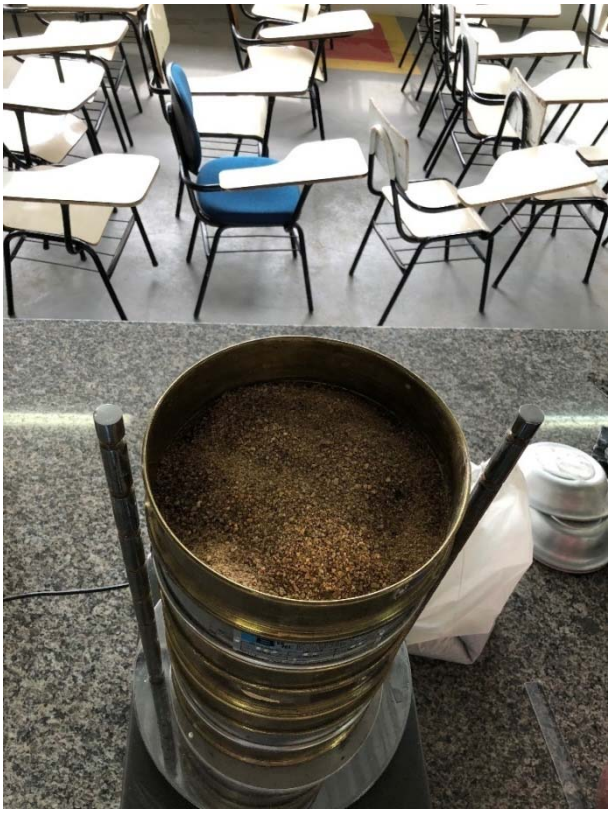
Série Normal			**Série Intermediária**		
(mm/µm)	**ASTM**	**Mesh**	**(mm/µm)**	**ASTM**	**Mesh**
-	-	-	2,0 mm	10	9
1,18 mm	16	14	-	-	-
-	-	-	850 µm	20	20
-	-	-	425 µm	40	35
300 µm	50	48	-	-	-
-	-	-	180 µm	80	80
150 µm	100	100	-	-	-
-	-	-	75 µm	200	200

Fonte: NM 248

Para o ensaio do agregado miúdo, utilizou-se as peneiras de 2 mm, 1,18 mm, 850 µm, 425 µm, 300 µm e 150 µm e o fundo. Para os outros materiais, as de 1,18 mm, 850 µm, 425 µm, 300 µm 150 µm e 75 µm e o fundo.

As peneiras foram encaixadas em ordem crescente da base para o topo, formando um conjunto único de peneiras, colocadas sobre o agitador mecânico. Na FIG. 4 observa-se a montagem das peneiras já colocadas sobre o agitador para realização do ensaio granulométrico.

Figura 4 - Realização do ensaio de granulometria



Fonte: A autora (2018).

Cada amostra foi agitada por 10 minutos, sendo então peneirada. A adoção desse tempo de agitação deu-se em função do tipo de material passante e do tipo de peneiramento utilizado no estudo (peneiramento a seco). Por se tratar de partículas muito finas (para alguns dos materiais utilizados), tal tempo foi suficiente para alcance de resultados representativos para o tipo de ensaio realizado.

O material retido em cada peneira foi removido para recipientes identificados para posterior aferição. Durante este processo, utilizou-se escovas (uma de cerda de metal e outras de cerdas de plástico flexível) para remoção completa do material.

Em seguida as porcentagens médias retidas e acumuladas em cada peneira foram calculadas através da equação 1, com aproximação de 1%.

$$\mathrm{M}\ (\%) = \frac{\mathrm{m2}\ .\ 100}{\mathrm{m1}} \qquad (1)$$

Onde;

M = Porcentagem de material retido em cada peneira (%);
m1= Massa total da amostra (gr);
m2 = massa retida em cada peneira (gr).

Determinadas as porcentagens de material retido em cada peneira, calculou-se a porcentagem retida acumulada em cada uma e em seguida determinou-se a dimensão máxima característica, sendo esta correspondente à malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o material apresentou uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

O módulo de finura dos materiais foi calculado com aproximação de 0,01, através da Equação 2. Foram somadas as porcentagens retidas acumuladas em massa de cada material nas peneiras da série normal, sendo esta dividida por 100.

$$\mathrm{MF} = \frac{\Sigma\%\ (\mathrm{Retida\ Acumulada})}{100} \qquad (2)$$

5.3.2 Análises químicas

As análises químicas foram realizadas para a cal e os demais materiais testados. Os ensaios foram realizados em laboratório terceirizado e a metodologia adotada foi a de titulação para determinação dos teores de Al_2O_3 (óxido de alumínio), SiO_2+ RI (sílica + resíduos insolúveis), Fe_2O_3 (óxido férrico), CaO (óxido de cálcio), MgO (óxido de magnésio) e PF (perda ao fogo).

As análises foram realizadas segundo os procedimentos contidos na NBR 6473 (ABNT 2003), com adaptações da metodologia para os minérios de argila e argilito. A FIG. 5 ilustra o processo de titulação das amostras realizadas.

Figura 5 - Realização das análises químicas

Fonte: A autora (2018).

5.3.3 Escolha do traço e determinação dos volumes

A escolha e definição do traço deram-se em função da aplicabilidade esperada para argamassa, levando em consideração sua composição e o tipo de bloco adotado no levantamento das fiadas de alvenaria executadas no trabalho.

O traço de uso mais recorrente para argamassas de assentamento é o de 1:2:8 (cimento, cal, areia), podendo este ser aplicado quando da utilização de blocos cerâmicos e tijolos maciços, diferenciando-se ambos apenas em relação ao rendimento médio esperado, sendo este de 10 m²/saco de cimento para aplicação em tijolos maciços e de 16 m²/saco de cimento para tijolos cerâmicos (COUTO; PINTO; STARLING, 2015).

Sendo a cal o material a ser substituído, todos os materiais testados foram utilizados na mesma proporção que este, ou seja, 1 parte de cimento, duas partes de materiais alternativos e 8 partes de areia.

Na prática, os traços são medidos em volume. Para se determinar o volume total de cada componente da argamassa, determinou-se o volume total dos corpos de

prova a serem moldados e a proporção dos volumes encontrados em partes de acordo com traço definido. Os corpos de prova utilizados no estudo são prismáticos e possuem as seguintes dimensões: 4 cm (profundidade) x 4 cm (largura) x 16 cm (comprimento).

O volume do corpo de prova foi determinado através da Equação 3.

$$V = P.L.C \tag{3}$$

Onde;

V = Volume do molde do corpo de prova em m³;
P = Profundidade do molde em m;
L = Largura do molde em m;
C = Comprimento do molde em m.

Conhecendo-se o volume total de um corpo de prova, foi possível determinar o volume proporcional de cada material e, utilizando-se o peso específico de cada um, o valor corresponde em massa.

O peso específico foi determinado através da NBR 6120 (ABNT 1980) ou calculado em laboratório. Para cálculo do volume total das argamassas produzidas, bastou-se multiplicar os valores adotados pelo número de corpos de prova utilizados no estudo. A NBR 13279 (ABNT 2005) exige um número mínimo de corpos de prova para execução do ensaio (no mínimo 3).

Para a argamassa produzida com o aditivo em substituição à cal, adotou-se o traço de 1:8 (1 parte de cimento: 8 partes de areia). A definição desse traço deu-se em função das instruções do fabricante que sugerem essa proporção para pastas a serem utilizadas em argamassas de assentamento.

Com relação à adição do produto, o fabricante sugere a adoção de um volume teórico de 100 a 250 ml de aditivo para cada saco de cimento de 50 kg. Utilizou-se no trabalho o volume médio de 175 ml, sendo este valor ajustado de acordo com a massa do cimento utilizada na produção da argamassa.

Para o assentamento das fiadas de blocos cerâmicos executadas no trabalho, adotou-se o mesmo traço, considerando-se a espessuras médias das juntas utilizadas

(12 mm) e a extensão total da superfície dos blocos em contato com as juntas, acrescentando-se um percentual mínimo de segurança. Os volumes adotados foram quadriplicados.

5.3.4 Preparação das argamassas, moldagem dos corpos de prova e assentamento dos blocos cerâmicos

Alguns cuidados foram tomados em relação à preparação das argamassas, tais como o traço bem definido e dosado, a utilização da quantidade mínima de água necessária para garantir a trabalhabilidade das mesmas e, durante a aplicação nos fiadas de bloco, estes foram umedecidos garantindo, dessa forma, que não houvesse a absorção de água em excesso pelos mesmos.

As argamassas foram preparadas de forma convencional, ou seja, manualmente. O amassamento das argamassas foi realizado em um recipiente de plástico com o auxílio de uma colher de pedreiro e espátula. Misturou-se os componentes de cada pasta e adicionou-se água.

A quantidade de água adicionada foi variável em função do tipo de material utilizado na preparação das argamassas, sendo o volume adicionado suficiente para manter o índice de consistência das pastas dentro dos limites considerados ideias segundo a NBR 13276 (ABNT 2016), sendo este de 260 ± 5 mm. O volume médio utilizado para preparação das argamassas utilizadas na moldagem dos corpos de prova foi de 410 ml e de 1640 ml para o assentamento dos blocos dos painéis de alvenaria.

Nos casos em que se notou a necessidade da adição ou subtração do volume inicial de água, adicionou-se ou subtraiu-se 50 ml à mistura, de forma a não comprometer a trabalhabilidade da pasta.

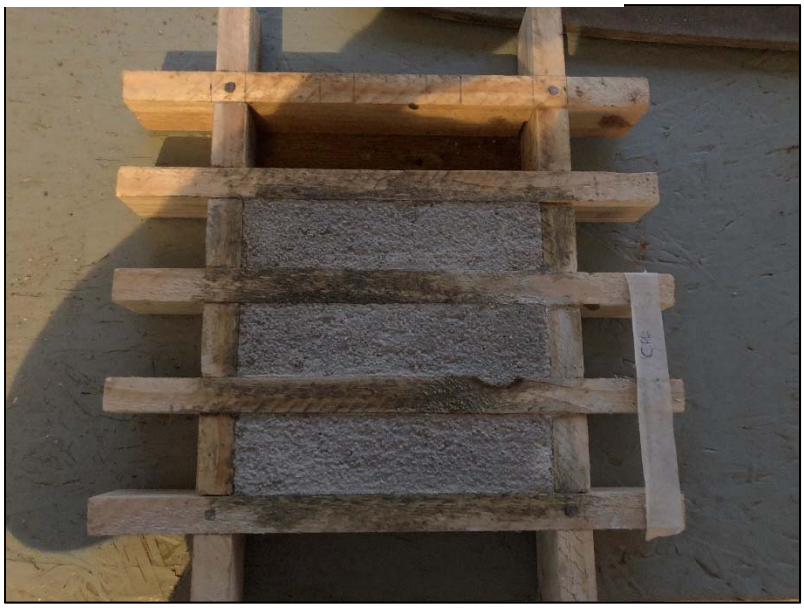
Com as argamassas prontas, procedeu-se à moldagem dos corpos de prova e assentamento dos blocos cerâmicos.

Os corpos de prova foram moldados conforme a NBR13279 (ABNT, 2005). Conforme mencionado, a norma prevê a moldagem de três corpos.

Os moldes foram feitos em madeira com as dimensões (profundidade, largura e comprimento): 40 mm x 40 mm x 160 mm de comprimento, sendo as paredes dos mesmos com espessura média de 8 mm. Cada forma composta por quatro repartições, com dimensões *“idem”* às citadas no item anterior.

Na FIG. 6 observam-se as formas com os moldes prismáticos utilizados no trabalho.

Figura 6 – Formas de madeira



Fonte: A autora (2018).

O assentamento dos blocos cerâmicos foi realizado utilizando-se três fiadas de blocos e esta etapa foi executada no mesmo dia em que os corpos de prova foram moldados: 23/08/2018 (FIG. 7).

Figura 7 - Painéis de alvenaria

Fonte: A autora (2018).

O levantamento do painel foi realizado para que se pudesse avaliar, de forma prática, a consistência das argamassas para o traço adotado, a trabalhabilidade da argamassa e sua aderência inicial ao meio suporte.

5.3.5 Determinação do índice de consistência

O índice de consistência foi determinado conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016). Todas as argamassas utilizadas no estudo foram testadas. Antes de se proceder à execução do ensaio, o tampo da mesa para realização dos testes foi totalmente limpo, assim como a parede do molde troco-cônico com espoja umedecida, de forma com que as paredes do mesmo ficassem ligeiramente úmidas.

As argamassas preparadas e utilizadas no trabalho foram utilizadas para encher o molde, colocado centralizado sobre a mesa para realização do ensaio. Foi necessária a ajuda de um colaborador para o enchimento dos moldes.

O enchimento dos mesmos foi realizado em camadas sucessivas (três), com espessuras aproximadamente iguais. Cada camada recebeu a aplicação de respectiva de 15, 10 e 5 golpes de soquete de forma que houvesse uma distribuição uniforme do material dentro do molde.

Quando necessário, o volume do molde foi completado com mais argamassa. Para evitar o trasbordo da argamassa para fora do molde, utilizou-se uma régua metálica, aparando sobras do material e garantindo que a superfície da pasta ficasse rente aos limites do molde.

Após este procedimento, a mesa vibratória foi acionada por 30 segundos. Em seguida, retirou-se o tronco cônico (molde) e aferiu-se, com a utilização do paquímetro, o espalhamento da argamassa amostrada em três diferentes diâmetros, tomados em pares de pontos uniformemente distribuídos ao longo do perímetro. Registrou-se as três medidas. O índice de consistência foi obtido através da Equação 4.

$$\mathrm{Ic\ (mm)} = \frac{\mathrm{L1+L2+L3}}{3} \tag{4}$$

Onde;

Ic = Índice de Consistência (mm);

L1... = Diâmetros Aferidos (mm);

5.3.6 Determinação da resistência compressão

Para se determinar a resistência à compressão, foram utilizados os corpos de prova moldados, segundo a NBR13279 (ABNT, 2005).

O processo de ruptura dos corpos de prova deu-se na idade de 28 dias. A ruptura após esse período foi realizada utilizando-se uma máquina universal 100 Tf (SOLOCAP) para ensaios de tração e compressão. A FIG. 8 mostra a máquina utilizada para realização do ensaio de resistência a compressão.

Figura 8 - Máquina universal 100 tf (SOLOCAP)

Fonte: A autora (2018).

Foi aplicada aos corpos de prova uma carga de (500 ± 50) N/s até a ruptura dos mesmos. A resistência à compressão foi calculada através da (EQ. 05).

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (5)$$

Onde;

R_c = Resistência a Compressão, em Megapascals;
F_c = Carga Máxima Aplicada em Newtons;
1600 = Área de Seção Considerada Quadrada do Dispositivo de Carga 40mm x 40mm em Milímetros Quadrados.

Os valores obtidos nos ensaios foram anotados. A resistência foi calculada como sendo a média obtida das rupturas individuais dos corpos de provas produzidos com cada argamassa preparada no estudo. Calculou-se o desvio padrão máximo de cada série de corpos de prova ensaiados à compressão, ou seja, calculou-se a diferença entre a resistência média encontrada e a resistência individual de cada corpo de prova amostrado.

Caso haja algum desvio padrão superior a 0,5 MPa, uma nova média deverá ser calculada, desconsiderando-se dessa forma o valor discrepante.

5.3.7 Análise de custo

Para a realização da análise de custo abordada no trabalho, adotou-se como referência para composição de custos unitários a Tabela de Composições e Preços para Orçamentos - TCPO (2010) e SINAP - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. Para estimativa dos custos foram considerados apenas os custos diretos, com encargos sociais desonerados para o mês 09/2018.

Apenas para o argilito utilizou-se o preço comercializado na região, não havendo indicação do material no SINAP.

A análise baseou-se numa composição base por m² para a alvenaria de vedação, com blocos cerâmicos furados, juntas de 12 mm e assentamento com argamassa mista de cimento, cal hidratada e areia sem peneirar (Traço 1:2:8) Tipo 2.

Para os demais materiais testados, o procedimento foi o mesmo, porém adaptando-se esta composição ao tipo de material utilizado e preços correspondentes.

Adotou-se para todas as composições a espessura da parede de 9 cm, em função do tipo de bloco utilizado e forma de assentamento das fiadas.

5.3.8 Análise dos impactos ambientais associados

A análise dos impactos ambientais foi realizada através de observações particulares de matrizes de impactos elaboradas para cada etapa do processo produtivo referente a cada material utilizado, exceto o aditivo por se tratar de um produto industrializado.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

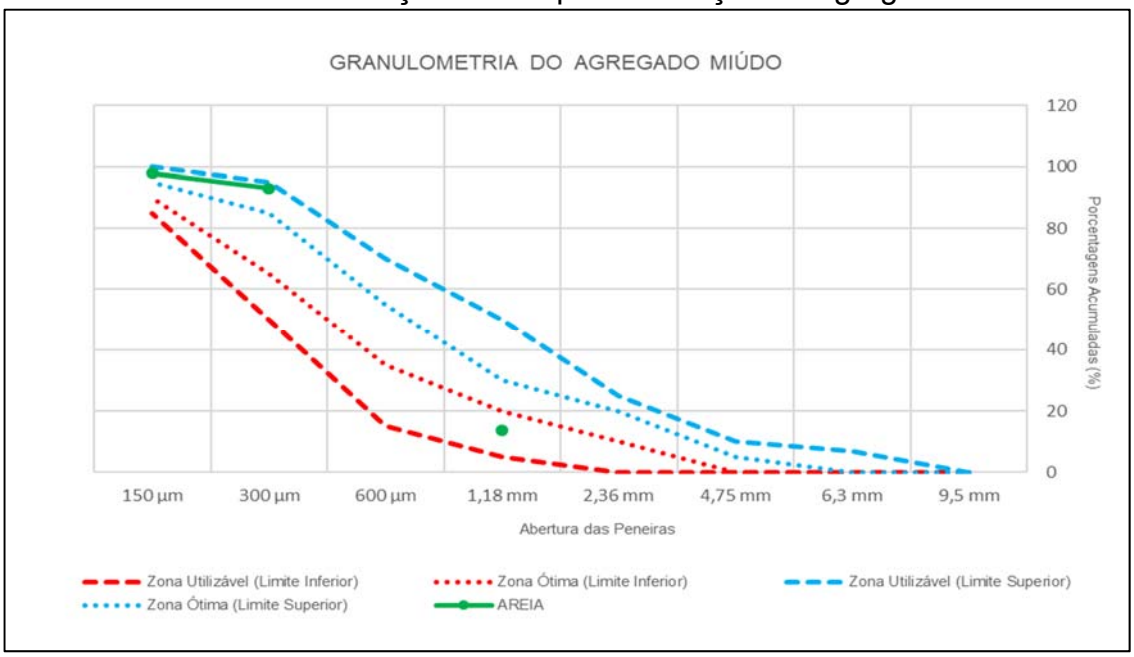
6.1 Classificação granulométrica dos agregados

Em função do método utilizado, a dimensão máxima encontrada para o agregado miúdo utilizado no estudo foi de 2,00 mm e o modulo de finura (MF) de 2,04 considerando a porcentagem acumulada nas peneiras da série normal utilizada no ensaio.

Em função do MF encontrado, a areia utilizada no trabalho é fina com MF ≤ 2,20 NBR 7211 (ABNT 2009), encontrando-se dentro da zona utilizável.

No GRÁF. 1 observa-se a granulometria do agregado utilizado em relação às faixas limites de utilização para as peneiras de 1,18 mm, 0,30 mm e 0,15 mm.

Gráfico 1 – Zonas de utilização limites para utilização do agregado miúdo



Fonte: A autora (2018).

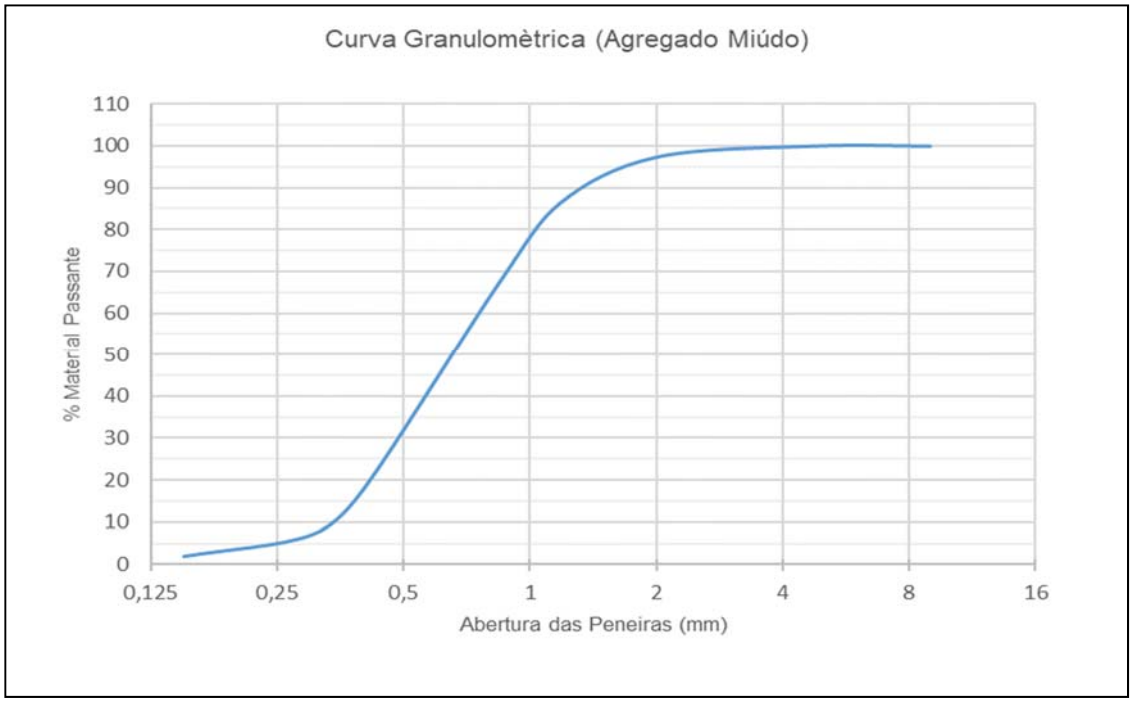
Segundo Freitas e Costa (2010) “a distribuição granulométrica dos agregados contribui decisivamente no desempenho das argamassas [..]”. Em seu estado fresco, influenciando no consumo de água e trabalhabilidade das mesmas, e em seu estado endurecido, na resistência mecânica das mesmas.

Para argamassas de assentamento é aconselhável a utilização de uma areia média, de forma a se manter uma boa interação entre a trabalhabilidade da massa e

sua resistência após a cura. Em função da classe dos limites utilizados para classificação entre areia (fina e média), sendo estes de 1,55 ≤ MF <2,20 e 2,20 ≤ MF <2,90 respectivamente (sendo muito próximos) e das proporções do tamanho dos grãos que compõem o agregado utilizado, nota-se que houve um engano na hora de se obter o produto junto às casas de material de construção, que vendem a areia com essa granulometria como areia média, o que pode comprometer a resistência mecânica das argamassas testadas.

No GRÁF. 2 observa-se a curva granulométrica do agregado. Nota-se uma granulometria contínua. Por apresentar uma granulometria graduada, a areia utilizada no estudo favoreceu a trabalhabilidade das argamassas.

Gráfico 2 – Curva granulométrica da areia

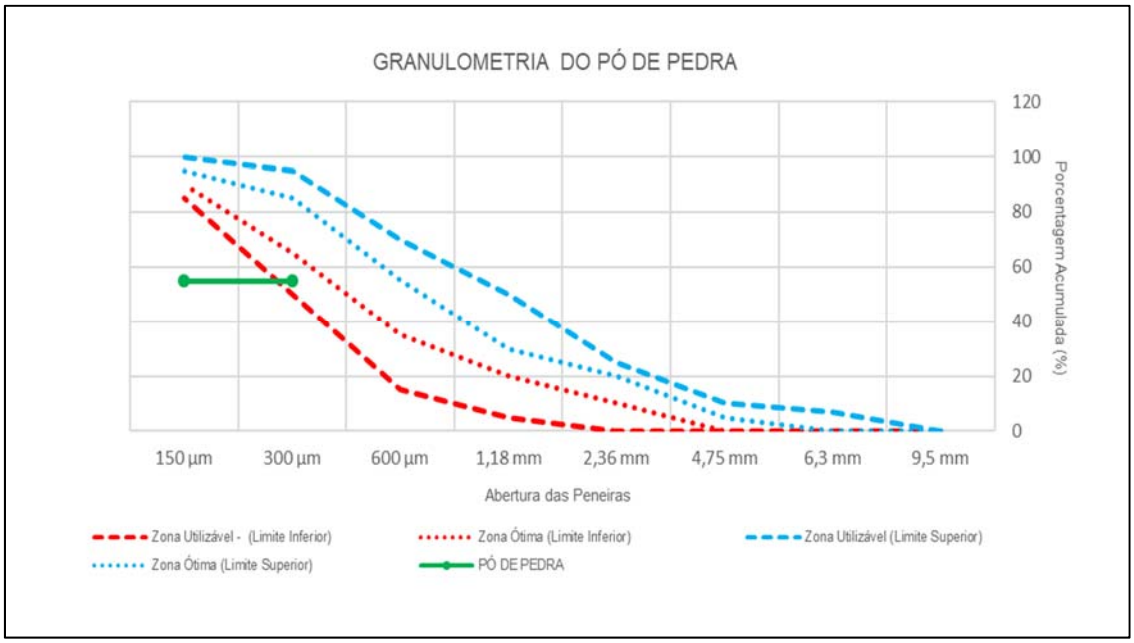


Fonte: A autora (2018).

Todavia pode ser que a graduação dos grãos tenha influenciado na resistência das mesmas, o que pode ser reforçado pelo fato de que a mesma ficou fora da zona ótima de utilização (pelo menos para as peneiras utilizadas), sendo esta a recomendada para se obter um melhor desempenho.

Em relação ao pó de pedra, a dimensão máxima encontrada foi de 0,85 mm e o MF de 1,09. De acordo com os resultados, o pó de pedra utilizado no estudo é considerado um material muito fino, encontrando-se fora da faixa considerada utilizável (GRÁF. 3). Ressalta-se que embora o mesmo seja um agregado no estudo testa-se sua utilização em substituição à cal e não a areia.

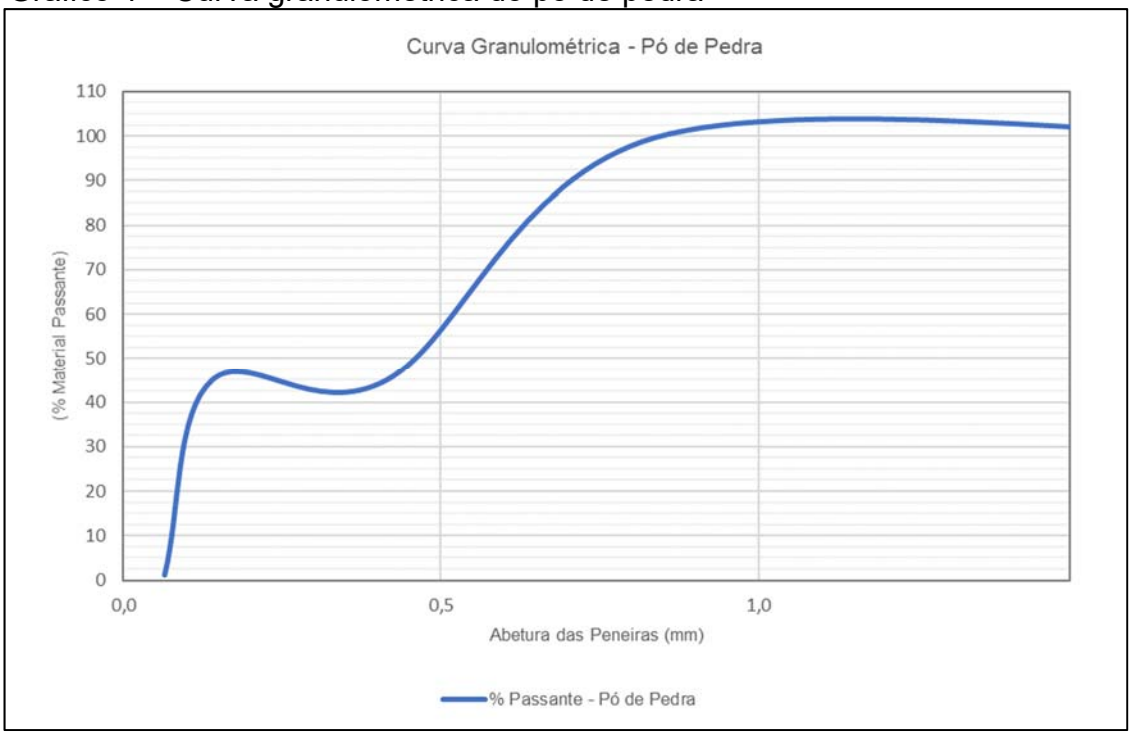
Gráfico 3 – Zonas de utilização limites para utilização (pó de pedra)



Fonte: A autora (2018).

A granulometria do pó de pedra (GRÁF. 4) é descontínua, o que pode ter sido um fator favorável em relação à resistência mecânica das argamassas produzidas com esse material.

Gráfico 4 – Curva granulométrica do pó de pedra



Fonte: A autora (2018).

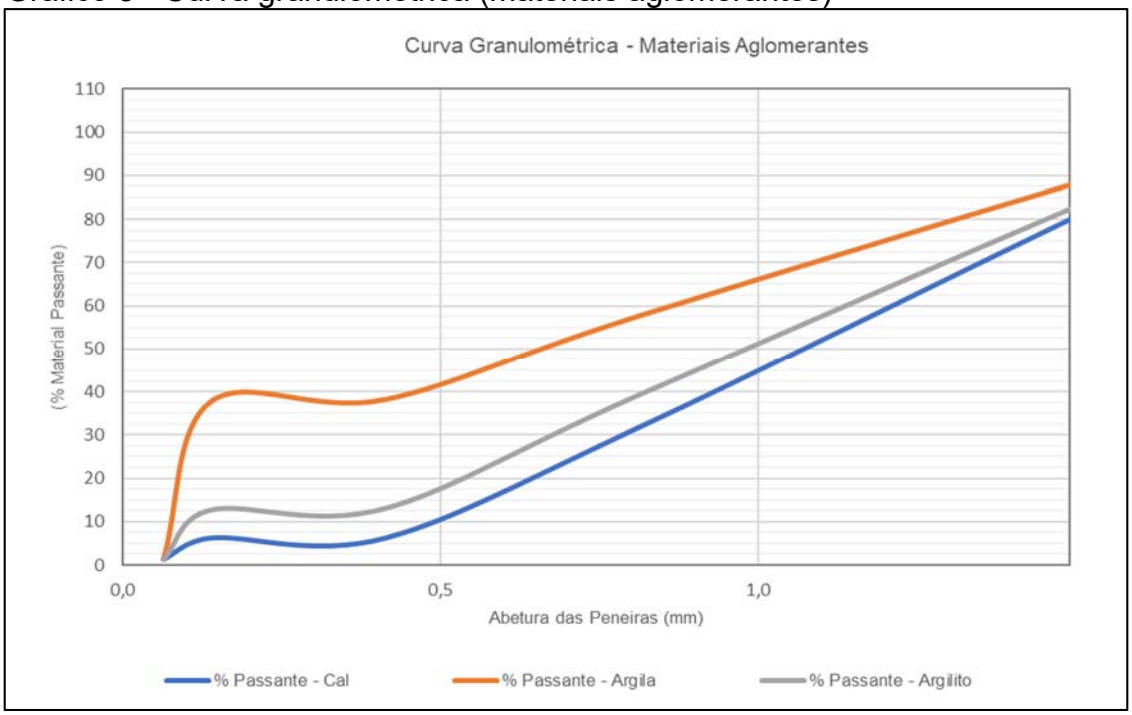
6.2 Classificação granulométrica dos aglomerantes

Tomando como referência a mesma metodologia adotada para definição da classe granulométrica dos agregados, o argilito e a cal podem ser classificados como materiais finos e a argila como material muito fino.

Com relação ao diâmetro máximo (DM), todos os materiais aglomerantes mesmo apresentando módulo de finuras diferentes, apresentaram DM de 1,18 mm.

Com relação à curva granulométrica (GRÁF. 5), observa-se uma granulometria descontínua para todos os materiais testados, sendo a granulometria do argilito a que mais se aproximou da granulometria da cal.

Gráfico 5 - Curva granulométrica (materiais aglomerantes)



Fonte: A autora (2018).

Na TABELA 3 são apresentados, de forma mais completa, os resultados da análise granulométrica realizada para todos os materiais testados no estudo, a cal e o agregado miúdo.

Tabela 3 – Caracterização granulométrica dos materiais testados, cal e areia

Malha das Peneiras (mm)	Materiais														
	Areia			Argila			Argilito			Cal			Pó de Pedra		
	Material Retido (g)	Material Retido (%)	Retido acumulado (%)	Material Retido (g)	Material Retido (%)	Retido acumulado (%)	Material Retido (g)	Material Retido (%)	Retido acumulado (%)	Material Retido (g)	Material Retido (%)	Retido acumulado (%)	Material Retido (g)	Material Retido (%)	Retido acumulado (%)
2,0	8,00	2,66	2,66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,18	33,00	11,00	13,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,850	56,00	18,66	32,32	123,40	41,13	41,13	177,30	59,10	59,10	198,95	66,32	66,32	0,60	0,20	0,20
0,425	150,00	50,00	82,32	62,00	20,67	61,80	83,70	27,90	87,00	82,00	27,33	93,65	164,10	54,70	54,90
0,300	32,00	10,66	92,98	0,00	0,00	61,80	0,00	0,00	87,00	0,00	0,00	93,65	0,00	0,00	54,90
0,180	0,00	0,00	92,98	0,00	0,00	61,80	0,00	0,00	87,00	0,00	0,00	93,65	0,00	0,00	54,90
0,150	15,00	5,00	97,98	1,40	0,47	62,27	1,20	0,40	87,40	0,00	0,00	93,65	0,00	0,00	54,90
0,075	0,00	0,00	97,98	109,00	36,33	98,60	34,20	11,40	98,80	14,85	4,95	98,60	131,40	43,80	98,70
FUNDO	6,00	2,02	100,00	4,20	1,40	100,00	3,60	1,20	100,00	4,20	1,40	100,00	3,90	1,30	100,00
TOTAL	300,00	100,00	-	300,00	100,00	-	300,00	100,00	-	300,00	100,00	-	300,00	100,00	-

Identificação	Areia	Argila	Argilito	Cal	Pó de Pedra
Módulo de Finura	2,04	1,24	1,74	1,87	1,09
Diâmetro Máximo (mm)	2,00	1,18	1,18	1,18	1,18

Fonte: A autora (2018).

6.3 Caracterização química geral

Na TABELA 4, os teores químicos dos materiais utilizados no estudo.

Tabela 4 – Resultados análises químicas

Materiais	Teores (%)					
	CaO (%)	MgO (%)	SiO_2 (%)	PPC (%)	Fe_2O_3 (%)	Al_2O_3 (%)
Cal	72,73	0,73	0,67	23,23	0,19	0,21
Argila	0,12	0,27	60,15	15,85	5,07	17,36
Argilito	0,03	1,5	67,8	4,37	1,6	19,2
Pó de Pedra	49,03	0,6	1,66	45,8	2,45	0,24

Fonte: A autora (2018).

A NBR 11172 (ABNT 1990) define os aglomerantes de origem mineral como sendo um “produto com constituintes minerais que, para sua aplicação, se apresenta sob forma pulverulenta e que na presença da água forma uma pasta com propriedades aglutinantes”. A argila e argilito são aglomerantes inertes. Para ambos, nota-se um elevado teor de sílica e óxido de alumínio se comparados com os demais. Analisado apenas esse parâmetro, ambos os materiais podem ser considerados materiais pozolânicos.

> Materiais pozolânicos são compostos silicosos ou silicoaluminosos que isoladamente possuem pouca ou nenhuma propriedade aglomerante. Entretanto quando finamente moídos e em presença de água reagem com o hidróxido de cálcio a temperatura ambiente formando compostos com propriedades aglomerantes (MALHOTRA; MEHTA apud CORDEIRO; DÉSIR, 2010).

Todavia, segundo a NBR 12653 (2015), dois dos requisitos químicos principais para os materiais pozolânicos é que a somatória de seus componentes argilosos (SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3), seja no mínimo ≥ 50% e a perda ao fogo (PF) seja ≤ 6% (ABNT 2015). Partindo desse pressuposto, apenas o argilito atende às especificações químicas quanto a esses requisitos, podendo conferir à argamassa boa reatividade.

Para a argila, os teores de perda ao fogo ficaram acima do limite máximo aceitável, ≤ 10%, mas a mesma apresentou somatória de 77,51% de (SiO_2 e Al_2O_3). Esses teores podem ser indicativos de predominância do argilomineral caulinita, característico por apresentar uma estrutura mais rígida, podendo conferir à argamassa boa estabilidade, principalmente se utilizadas para assentamento.

Alexandre (2000), em um estudo realizado sobre as argilas (matérias primas e composição de massa utilizada em cerâmicas vermelhas), conclui que altos teores de sílica e alumínio indicavam a presença desse argilomineral. Com relação ao pó de pedra e a cal, verificou-se o predomínio de óxido de cálcio em sua composição e baixos teores de magnésio. Em função da sua composição ambos os materiais são calcíticos. A soma dos componentes argilosos (SiO_2, $Al2O_3$ e Fe_2O_3) desses materiais foram de 4,35% e 1,07% respectivamente. Segundo Coelho, Torgal e Jalali (2009), sobre a produção de argamassas:

> A cal da variedade calcítica oferece melhores rendimentos que a cal magnesiana.[...] A proporção de pasta de cal na argamassa deve obedecer a um limite mínimo, abaixo do qual a mesma deixa de ser trabalhável. Essa proporção determina a capacidade de sustentação de areia da pasta de cal. [...] a cal cálcica tem maior capacidade de sustentação de areia do que a cal magnesiana. Sendo a cal normalmente empregue em mistura com agregados miúdos na elaboração de argamassas, a introdução desse produto em proporções convenientes reduz os efeitos da retração (COELHO; TORGAL; JALALI, 2009).

6.4 Traço utilizado e relações água/cimento (a/c) e água/materiais secos (a/ms)

Em função da metodologia utilizada para definição do traço descrita anteriormente, segue na TABELA 5 a proporção em volume e massa dos materiais utilizados na produção da argamassa contendo aditivo. Em seguida, no TABELA 6, apresenta-se a proporção em volume e massa dos materiais utilizados na produção da argamassa contendo os demais materiais testados e a cal.

Tabela 5 – Volumes e massas correspondentes dos materiais utilizados na produção da argamassa com aditivo

ELABORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA						
Argamassa (Identificação)	Volume (m³)		kg/ml			Água (ml)
	Cimento	Agregado	Cimento (kg)	Aditivo (ml)	Agregado (kg)	
Argamassa c/ Aditivo	0,000125	0,00113	0,175	0,612	1913	350
ASSENTAMENTO DOS BLOCOS CERÂMICOS						
Argamassa (Identificação)	Cimento	Agregado	Cimento (kg)	Aditivo (ml)	Agregado (kg)	Água (ml)
Argamassa c/ Aditivo	0,0005	0,00452	0,7	2,448	7652	1400

Fonte – Autora (2018)

Tabela 6 – Volumes e massas correspondentes dos materiais utilizados na produção das argamassas para o estudo

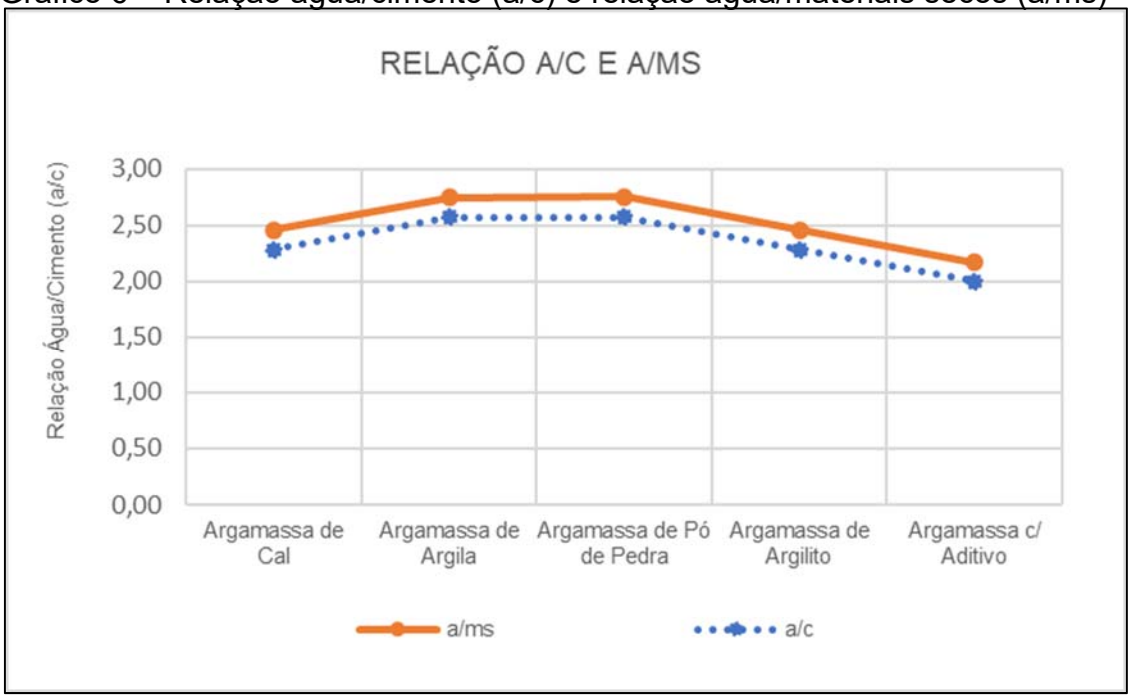
ELABORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA							
Argamassa (Identificação)	Volume (m³)			Peso (kg)			Água (ml)
	Cimento	Aglomerante	Agregado	Cimento	Aglomerante	Agregado	
Argamassa de Cal	0,000125	0,00025	0,00113	0,175	0,250	1,913	400
Argamassa de Argila	0,000125	0,00025	0,00113	0,175	0,450	1,913	450
Argamassa de Pó de Pedra	0,000125	0,00025	0,00113	0,175	0,375	1,913	450
Argamassa de Argilito	0,000125	0,00025	0,00113	0,175	0,212	1,913	400
ASSENTAMENTO DOS BLOCOS CERÂMICOS							
Argamassa (Identificação)	Volume (m³)			Peso (kg)			Água (ml)
	Cimento	Aglomerante	Agregado	Cimento	Aglomerante	Agregado	
Argamassa de Cal	0,000500	0,001	0,0045	0,700	1,000	7,652	1600
Argamassa de Argila	0,000500	0,001	0,0045	0,700	1,800	7,652	1800
Argamassa de Pó de Pedra	0,000500	0,001	0,0045	0,700	1,500	7,652	1800
Argamassa de Argilito	0,000500	0,001	0,0045	0,700	0,848	7,652	1600

Fonte – Autora (2018)

A quantidade de água utilizada para cada mistura foi satisfatória, considerando a trabalhabilidade alcançada pelas argamassas produzidas e suas consistências. Ambas as propriedades puderam ser avaliadas de forma prática durante o assentamento dos blocos cerâmicos (painéis de alvenaria com três fiadas de blocos).

Ainda com relação a quantificação de água, nota-se que quanto menor o módulo de finura encontrado, maior a quantidade de água utilizada e, consequentemente as relações a/c e a/ms (GRÁF. 6).

Gráfico 6 – Relação água/cimento (a/c) e relação água/materiais secos (a/ms)



Fonte: A autora (2018).

As relações a/c e a/ms encontradas podem ser melhor observadas na TABELA 7. A argamassa produzida com pó de pedra foi a que apresentou maiores valores e a contendo aditivo os menores.

Tabela 7– Relação a/c e a/ms obtidas para o estudo

Relação Água/Cimento e Relação Água/Materiais Secos (Execução dos Corpos de Prova)						
Argamassa (Identificação)	Peso (g)			Água (ml)	a/c	a/materiais secos
	Cimento	Aglomerante	Agregado			
Argamassa de Cal	175	250	1913	400	2,29	0,171
Argamassa de Argila	175	450	1913	450	2,57	0,177
Argamassa de Pó de Pedra	175	375	1913	450	2,57	0,183
Argamassa de Argilito	175	212	1913	400	2,29	0,174
Argamassa c/ Aditivo	175		1913	350	2,00	0,168
Relação Água/Cimento e Relação Água/Materiais Secos (Execução dos Painéis de Alvenaria)						
Argamassa (Identificação)	Peso (g)			Água (ml)	a/c	a/materiais secos
	Cimento	Aglomerante	Agregado			
Argamassa de Cal	700	1000	7652	1600	2,29	0,171
Argamassa de Argila	700	1800	7652	1800	2,57	0,177
Argamassa de Pó de Pedra	700	1500	7652	1800	2,57	0,183
Argamassa de Argilito	700	848	7652	1600	2,29	0,174
Argamassa c/ Aditivo	700		7652	1400	2,00	0,168

Fonte – Autora (2018)

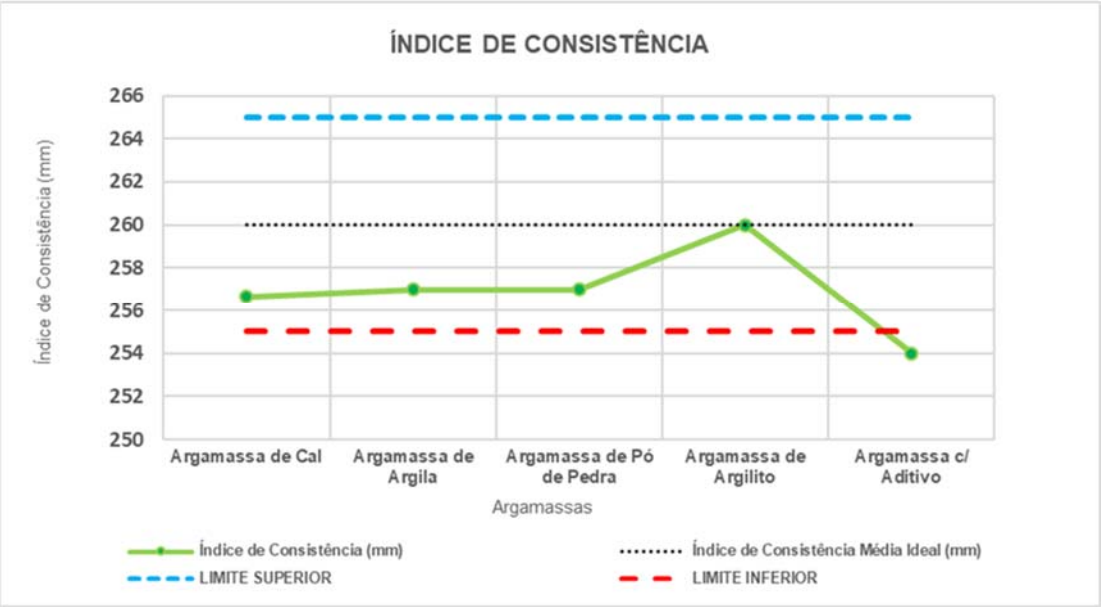
6.5 Índice de consistência

Quanto ao índice de consistência, todas as argamassas produzidas, exceto a com aditivo apresentaram valores médios dentro dos limites considerados ideais, segundo a NBR 13276 (ABNT 2016), sendo este de 260 ± 5 mm (GRÁF. 7).

Essa similaridade com relação à consistência só foi obtida através de um ajuste na quantidade de água adicionada a cada mistura (adição ou subtração), realizada em função módulo de finura dos materiais utilizados.

Na TABELA 8, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados.

Gráfico 7 – Índice de consistência



Fonte – A autora (2018).

Tabela 8 – Índice de consistência para os traços em estudo

Amostras	Diâmetros (mm)			Índice de Consistência (mm)
	Ensaio 01	Ensaio 02	Ensaio 03	
Argamassa de Cal	258	260	252	256,67
Argamassa de Argila	256	254	261	257,00
Argamassa de Pó de Pedra	256	255	260	257,00
Argamassa de Argilito	256	261	263	260,00
Argamassa c/ Aditivo	252	255	255	254,00

Fonte: A autora (2018).

A trabalhabilidade está diretamente associada à consistência da argamassa. Durante o assentamento dos blocos cerâmicos, notou-se uma semelhança em relação à trabalhabilidade das argamassas produzidas com cal, argila, argilito e pó de pedra. No entanto, notou-se uma secagem mais rápida da argamassa produzida com o pó de pedra, devido à maior velocidade de evaporação da água de amassamento. Apenas a pasta contendo aditivo apresentou menor facilidade de manuseio.

Com relação à aderência inicial, o resultado foi satisfatório para todas as argamassas, principalmente as pastas contendo materiais aglomerantes, sendo que apenas a argamassa produzida com o aditivo não apresentou resultados positivos.

6.6 Resistência à compressão

Com relação à resistência à compressão, os corpos de prova moldados foram rompidos ao atingirem 28 dias de tempo de cura. Para verificação dos resultados obtidos, foi consultada a NBR 13281 (ABNT, 2005), conforme TABELA 9.

Tabela 9 – Exigências mecânicas e reológicas para argamassas

Característica	Identiicação1	Limites	Método
Resistência a Compressão aos 28 Dias (Mpa)	I II III	≥ 0,1 e < 4,0 ≥ 4,0 e ≤ 8,0 > 8,0	NBR 13281

Fonte: ABNT NBR 13281 (2005).

Todas apresentaram resultados dentro das faixas de classificação exigidas pela norma.

As argamassas contendo os materiais aglomerantes e o aditivo atenderam aos requisitos para argamassa tipo I, sendo que a contendo pó de pedra atendeu aos requisitos das do tipo II. Na TABELA 10, são apresentados os resultados encontrados.

Tabela 10 – Cargas aplicadas e tensão máxima de ruptura

Argamassas Produzidas c/	Ensaio de Resistência a Compressão Carga Máxima Aplicada aos Corpos de Prova (N)				Tensão (MPa)			
	1°	2°	3°	Média	1°	2°	3°	Média
Argila	17.251,19	18.786,73	18.218,01	18.085,31	2,70	2,94	2,85	2,83
Argilito	16.720,38	16.473,93	16.796,21	16.663,51	2,61	2,57	2,62	2,60
Cal	19.848,34	19.393,37	19.848,34	19.696,68	3,10	3,03	3,10	3,08
Pó de Pedra	29.270,14	28.985,78	27.658,77	28.638,23	4,57	4,53	4,32	4,47
Aditivo	14.293,839	13.478,67	13.781,99	13.851,50	2,23	2,11	2,15	2,16

Fonte: A autora (2018).

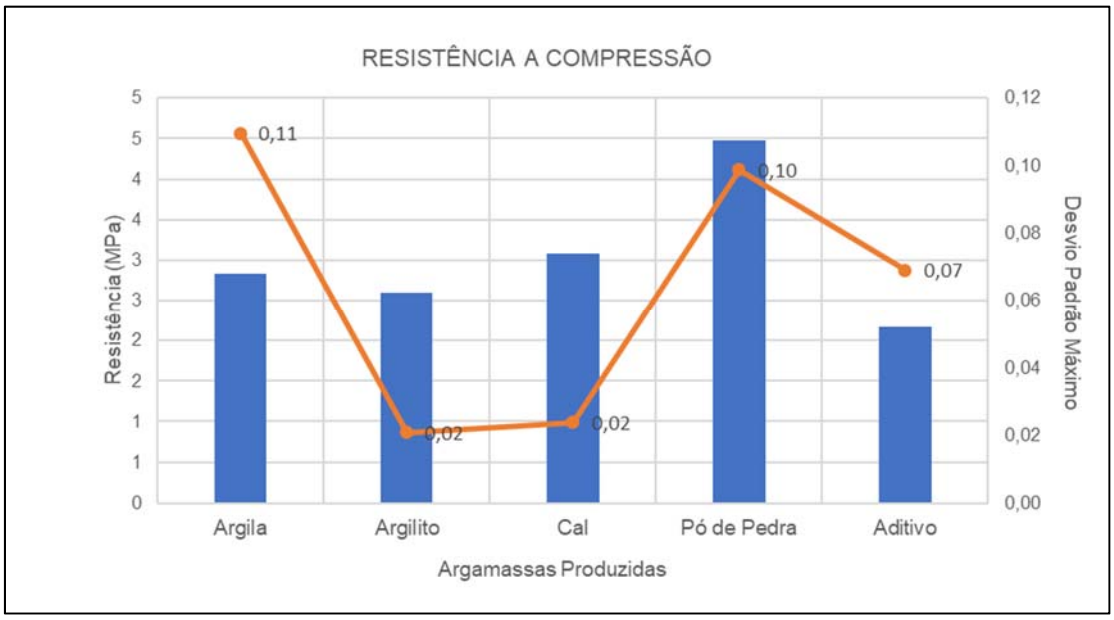
O fato de a argamassa produzida com pó de pedra apresentar maior resistência à compressão já era esperado, considerando que o mesmo, embora em granulometria reduzida, seja classificado como agregado. Sua resistência foi de 4,47 MPa.

As demais argamassas tiveram seus resultados dentro da faixa de variação de ≥ 0,1 e ≤ 4,0 (MPa). Nota-se que as argamassas produzidas com pó de pedra e argila, embora possuam relação a/c e a/ms superiores às demais, foram as que apresentaram melhores resultados com relação à resistência (se comparados aos resultados da argamassa de cal).

Se analisado apenas este requisito de resistência, todos os materiais citados poderiam substituir a cal, considerando que se encontram dentro da mesma faixa de identificação e atendem à NBR 13281 (ABNT, 2005), inclusive o aditivo, embora a resistência encontrada tenha sido consideravelmente inferior às demais. Ressalta-se que a quantidade adicionada ao traço se tratou de uma adição teórica, podendo e devendo ser melhor ajustada para o alcance de melhores resultados.

Os resultados, em se tratando do conceito de substituição, foram satisfatórios, considerando não apenas as resistências, mas também o desvio padrão máximo absoluto encontrado, que ficou abaixo de 0,5 MPa, indicando que os valores individuais calculados se encontram bem próximos aos valores médios. No GRÁF. 8, observam-se os resultados quanto à resistência à compressão e o desvio padrão máximo absoluto encontrado para cada argamassa produzida no estudo.

Gráfico 8 – Resistência à compressão e desvio padrão máximo absoluto



Fonte: A autora (2018).

No entanto, as argamassas contendo os materiais abordados neste estudo foram produzidas com o intuito de serem aplicadas no assentamento de alvenaria, sendo a proporção utilizada adotada com grande frequência para esta finalidade.

A normatização utilizada no presente trabalho para classificação das argamassas quanto à resistência não faz menção quanto ao uso recomendado em função do tipo de argamassa. Todavia, existem normas internacionais que associam o tipo de argamassa e sua utilização ao traço utilizado, sendo a mais comum e referenciada em outros trabalhos a ASTM C-270-14a (ASTM, 2014).

A referida norma preconiza quatro tipos de argamassas destinadas a alvenaria estrutural ou vedação. Segundo esta fonte, em função do traço adotado, as argamassas produzidas no estudo podem ser classificadas como tipo “O”, com resistência esperada de aproximadamente 2,4 MPa, podendo ser utilizada em alvenaria exterior de elevação (quando não sujeita a ventos fortes ou outras cargas laterais significativas) e alvenaria interior, como divisórias internas não portantes.

Partindo dessa analogia, todos os materiais utilizados podem ser utilizados para assentamento de alvenaria, não sendo recomendado, porém, que, pelo menos com o traço adotado, sejam utilizados para fins estruturais.

6.7 Análise de custo

Com relação à análise de custo, a composição da argamassa contendo a cal foi a que apresentou maior custo (TABELA 11).

Tabela 11 – Composição final para alvenaria de vedação, com blocos cerâmicos furados, juntas de 12 mm e assentamento com argamassa mista de cimento, cal hidratada e areia sem peneirar. (Traço 1:2:8). Tipo 2. Unidade m².

Composição Detalhada Incluindo a Produção de Insumos (m²) - Argamassa de Cal					
Código	Componente	unid.	Índice	Preço Unitário (R$)	Preço Total (R$)
01270.0.40.1	Pedreiro	h	0,66	14,00	9,24
01279.0.45.1	Servente	h	0,66	9,15	6,04
02060.3.2.1	Areia lavada tipo média	m³	0,01	63,33	0,80
02065.3.2.1	Cal hidratada CH III	kg	1,87	0,64	1,20
02065.3.5.1	Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32 Mpa)	kg	1,87	0,37	0,69
04211.3.1	Bloco cerâmico de vedação – bloco inteiro	unid.	12,90	0,60	7,74
Total					25,71

Fonte – Adaptado TCPO (2018).

Se considerado o custo médio das composições contendo os outros materiais, sendo este o valor de 24,53 R$/m², e o custo da composição da argamassa contendo a cal, a diferença é de 1,17 R$/m² a mais para esta. Um valor considerável para obras de porte maior.

Tabela 12 – Composição final para alvenaria de vedação, com blocos cerâmicos furados, juntas de 12 mm, e assentamento com argamassa mista de cimento, argilito e areia sem peneirar. (Traço 1:2:8). Tipo 2. Unidade m².

Composição Detalhada Incluindo a Produção de Insumos (m²) - Argamassa de Argilito					
Código	Componente	unid.	Índice	Preço Unitário (R$)	Preço Total (R$)
01270.0.40.1	Pedreiro	h	0,66	14,00	9,24
01279.0.45.1	Servente	h	0,66	9,15	6,04
02060.3.2.1	Areia lavada tipo média	m³	0,01	63,33	0,80
-	Argilito	kg	0,85	0,032	0,03
02065.3.5.1	Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32 Mpa)	kg	1,87	0,37	0,69
04211.3.1	Bloco cerâmico de vedação – bloco inteiro	unid.	12,90	0,60	7,74
Total					24,54

Fonte - Adaptado TCPO (2018).

Para o argilito, o preço médio praticado na região é de R$ 32,00 a tonelada, sendo este o valor utilizado na composição de custos da argamassa contendo este

material. Na região onde se realizou o estudo, o mesmo é comercializado para indústrias cerâmicas. Em função dos resultados alcançados o segmento civil pode ser um mercado explorável para este material.

Tabela 13 – Composição final para alvenaria de vedação, com blocos cerâmicos furados, juntas de 12 mm, e assentamento com argamassa mista de cimento, argila e areia sem peneirar. (Traço 1:2:8). Tipo 2. Unidade m².

Composição Detalhada Incluindo a Produção de Insumos (m²) - Argamassa de Argila					
Código	Componente	unid.	Índice	Preço Unitário (R$)	Preço Total (R$)
01270.0.40.1	Pedreiro	h	0,66	14,00	9,24
01279.0.45.1	Servente	h	0,66	9,15	6,04
02060.3.2.1	Areia lavada tipo média	m³	0,01	63,33	0,80
00006077	Argila	m³	0,001	16,52	0,02
02065.3.5.1	Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32 Mpa)	kg	1,87	0,37	0,69
04211.3.1	Bloco cerâmico de vedação – bloco inteiro	unid.	12,90	0,60	7,74
Total					24,52

Fonte - Adaptado TCPO (2018).

A composição da argamassa com argila, entre os materiais testados, foi a que apresentou menores custos, ficando atrás apenas da composição com aditivo.

Tabela 14 – Composição final para alvenaria de vedação, com blocos cerâmicos furados, juntas de 12 mm, e assentamento com argamassa mista de cimento, pó de pedra e areia sem peneirar. (Traço 1:2:8). Tipo 2. Unidade m².

Composição Detalhada Incluindo a Produção de Insumos (m²) - Argamassa de Pó de Pedra					
Código	Componente	unid.	Índice	Preço Unitário (R$)	Preço Total (R$)
01270.0.40.1	Pedreiro	h	0,66	14,00	9,24
01279.0.45.1	Servente	h	0,66	9,15	6,04
02060.3.2.1	Areia lavada tipo média	m³	0,01	63,33	0,80
00004741	Pó de Pedra	m³	0,001	55,72	0,06
02065.3.5.1	Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32 Mpa)	kg	1,87	0,37	0,69
04211.3.1	Bloco cerâmico de vedação – bloco inteiro	unid.	12,90	0,60	7,74
Total					24,56

Fonte - Adaptado TCPO (2018).

Dentre os materiais testados em substituição à cal, a composição contendo o pó de pedra foi a que obteve maior custo.

Tabela 15 – Composição final para alvenaria de vedação, com blocos cerâmicos furados, juntas de 12 mm, e assentamento com argamassa mista de cimento, aditivo e areia sem peneirar.(Traço 1:2:8).Tipo 2.Unidade m².

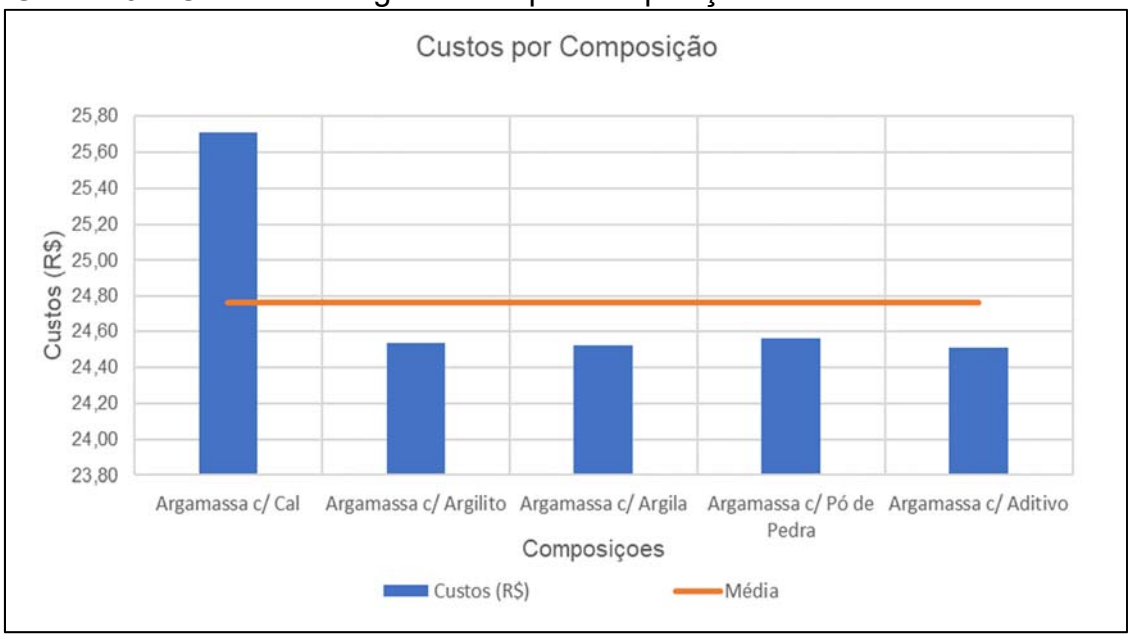
Composição Detalhada Incluindo a Produção de Insumos (m²) - Aditivo					
Código	Componente	unid.	Índice	Preço Unitário (R$)	Preço Total (R$)
01270.0.40.1	Pedreiro	h	0,66	14,00	9,24
01279.0.45.1	Servente	h	0,66	9,15	6,04
02060.3.2.1	Areia lavada tipo média	m³	0,01	63,33	0,80
00037538	Aditivo	l	0,0024	0,64	0,00
02065.3.5.1	Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32 Mpa)	kg	1,87	0,37	0,69
04211.3.1	Bloco cerâmico de vedação – bloco inteiro	unid.	12,90	0,60	7,74
Total					24,51

Fonte - Adaptado TCPO (2018).

A argamassa contendo o material plastificante testado (aditivo) foi a que apresentou menor custo, no entanto, utilizou-se a quantidade teórica média para produção das argamassas e os resultados não foram tão satisfatórios.

No GRÁF. 9 observa-se a diferença de custos encontrada para as composições apresentadas em relação à média.

Gráfico 9 – Custos das argamassas por composições



Fonte - A autora (2018).

6.8 Análise de viabilidade ambiental

Do ponto de vista ambiental, a extração de todos os materiais utilizados no estudo produzirá impactos ambientais diretos e indiretos, reversíveis e irreversíveis, sendo que a magnitude desses impactos dependerá das características de cada jazida, da adoção de medidas mitigadoras e da eficácia dos sistemas de controle efetivamente implantados.

No entanto, é possível citar alguns impactos inerentes à atividade de extração desses materiais de forma geral, tais como: alterações da morfologia do terreno, retirada da cobertura vegetal e exposição do solo, início de processos erosivos, geração de efluentes atmosféricos, geração de resíduos sólidos, alteração nos níveis de ruído etc.

Adiciona-se à utilização do pó de pedra os impactos associados às vibrações por ocasião da obtenção do calcário e os impactos associados a seu beneficiamento.

Todavia, a produção da cal chega a ser mais agressiva em relação principalmente à geração de efluentes atmosféricos.

Segundo dados obtidos no Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases do Efeito Estufa (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2015), para o ano de 2012, foram emitidas no Brasil 6.403Gg de CO_2, o que equivale a 6.403.000.000kg de CO_2. Através destes dados pode-se mensurar o tamanho do impacto ambiental. Frise-se que o Brasil é o quarto maior produtor de cal do planeta.

Outro impacto considerável é o que tange à supressão da vegetação para obtenção do combustível para os fornos, sendo que a maioria ainda utiliza madeira irregular e/ou queimam materiais perigosos e ilegais, tais como pneus.

São vários os impactos oriundos da produção de cal. Além dos já mencionados, citam-se, ainda, a emissão de dióxido de enxofre e óxido de nitrogênio, que contribuem para a ocorrência de chuva ácida, além da geração de subprodutos (produtos fora de especificação), geração de ruído, material particulado, consumo relevante de água, odores característicos etc.

Ressalta-se que, como toda atividade industrial, há também a ocorrência de impactos positivos. Não obstante, se comparados os impactos obtidos durante a fabricação da cal com os impactos inerentes à extração dos demais materiais utilizados no estudo, a produção da cal possui maior magnitude, considerando que os

impactos negativos mais expressivos ocorrem durante o processo de descarbonatação.

7 CONCLUSÃO

Os resultados mostram que a utilização dos materiais testados em substituição total à cal é possível, principalmente para os materiais aglomerantes (em relação às propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido abordadas neste estudo), sendo o argilito (com base em todos os resultados obtidos) o material mais indicado para substituição da cal em argamassas de assentamento.

A argamassa produzida com argila, apresentou maior relação água/cimento, tendo sua trabalhabilidade condicionada à adição de um maior volume de água, no entanto apresentou valores dentro da faixa considerada ideal quanto a consistência, apresentando resultados semelhantes a argamassa de cal.

O argilito foi o material que apresentou o melhor resultado com relação a consistência, sendo esta inclusive superior à cal, utilizando-se a mesma quantidade de água.

O pior resultado com relação à esta variável foi o da argamassa contendo aditivo, ficando essa fora da faixa comparativa utilizada. Esse resultado vai ao encontro dos resultados obtidos durante o assentamento dos painéis de alvenaria, sendo esta argamassa a que apresentou as maiores dificuldades quanto à trabalhabilidade e aderência inicial.

O pó de pedra, embora seja um agregado também apresentou resultados satisfatórios em substituição à cal. Apenas a trabalhabilidade, se comparada com as demais argamassas foi comprometida, em função de uma maior rapidez de secagem da pasta após sua aplicação. No entanto, sua utilização em argamassas mistas (contendo cimento na mistura), pode ser uma solução viável do ponto de vista técnico, considerando os resultados obtidos no estudo, principalmente em relação a resistência. Além do exposto, por ser um material fino acredita-se que argamassas produzidas com esse material possuam menor permeabilidade que as demais, podendo conferir à argamassa maior durabilidade. Com relação à consistência, essa argamassa apresentou resultados semelhantes a argamassa de cal após o acréscimo de água.

Com relação à resistência, todas as argamassas atenderam a NBR 13281. A pasta contendo pó de pedra foi a mais resistente. Todavia os resultados obtidos para as argamassas contendo argila e argilito apresentaram resultados interessantes, se comparadas a argamassa de cal.

Também para esta variável a argamassa com aditivo foi a que apresentou os piores resultados, pelo menos para o traço e dosagem utilizada no estudo. Ressalta-se que no presente trabalho não foi adotado o pior cenário, ou seja, a pior das hipóteses, considerando que foi utilizada uma dosagem média, sendo uma dosagem ainda inferior a esta indicada pelo fabricante.

Quanto aos custos diretos, o traço contendo cal foi o que apresentou os maiores custos e o traço contendo aditivo os menores, sendo este produto interessante do ponto de vista econômico e o pior entre os materiais testados do ponto de vista técnico.

A argila e o argilito apresentaram bons resultados quanto aos aspectos técnicos abrangidos pelo estudo, sendo o valor do traço semelhante, sendo considerados materiais interessantes também do ponto de vista econômico.

Se observados os fatores ambientais, a argila e o argilito podem apresentar-se como boas alternativas para utilização em substituição à cal na produção de argamassas para assentamento, tendo associados à sua utilização apenas os impactos inerentes a sua extração.

O mesmo pode-se dizer do pó de pedra, pois embora a este material associem-se também os impactos das vibrações e aqueles associados à redução da granulometria, se comparados com a cal, esses impactos são menores tanto em número quanto em severidade e abrangência.

Ressalta-se que é necessário que sejam feitos outros testes, com outros traços para verificação da efetiva substituição da cal pelos materiais utilizados, pois nem todas as propriedades foram testadas no presente estudo. Sugere-se para trabalhos futuros a realização dos testes de capacidade de retenção de água pelas pastas, teor de ar incorporado e os ensaios de resistência à tração na flexão, sendo estas variáveis importantes que podem influenciar diretamente na qualidade e durabilidade das argamassas.

REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, J. **Análise de matéria-prima e composições de massa utilizada em cerâmicas vermelhas**. Tese (Doutorado em Ciências de Engenharia com ênfase em Geotecnia)-Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes, 2000.

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de construção**: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório. 1. Ed. São Paulo: Pini, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM C28/C28M -10 (2015) Standard Specification for Gypsum Platers. Pennsylvania 2015.

_____. ASTM C842-05(2015), Standard Specification for Application of Interior Gypsum Plaster. Pennsylvania, 2015.

_____. ASTM C270-14a, Standard Specification for Mortar for Unit Masonry, Pennsylvania, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do cimento Portland. 7. ed. São Paulo, 2002. Disponível em: < http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/uploads/2016/05/BT106_2003.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR MN 248**: Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

_____. **NBR 6473**: Cal virgem e cal hidratada: análise química. Rio de Janeiro, 2003.

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

_____. **NBR 8545**: Execução de alvenaria sem função estrutural de tijolos e blocos cerâmicos: Procedimento. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 11172**: Aglomerantes de origem animal: terminologia. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos: requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 13207**: Gesso para construção civil: requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação do índice de consistência. Rio de janeiro, 2016.

_____. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13281**: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos: requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13528**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas: D determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas: terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

BAÍA, L. L. M; SABBATINI, F. H. **Projeto e execução de revestimento de argamassa**. São Paulo: O Nome da Rosa, 2000.

_____. **Projeto e execução de revestimento de argamassa**. 4 ed. São Paulo: O nome da rosa, 2008.

BUENO, C. F. H. B. **Tecnologia de materiais de construções**. Apostila-(Universidade Federal de Viçosa). Viçosa, 2000.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Sistema nacional de preços e índices para a construção civil**. Preços de insumos não desonerados. MG. Mês: Agosto. Belo Horizonte, 2018.

CANDIDO, V. S. et al. **Desenvolvimento de adoquim cerâmico com argilas cauliníticas, chamote e argilito**. São Paulo: Cerâmica, v. 59, 2013.

CARASEK, H., 2007, “Argamassas”. In: Geraldo C. Isaias; **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2 ed., cap. 28, IBRACON.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, IV. 2001, Brasília. **Anais**... Brasília: ANTAC, 2001.

CARNEIRO, C. D. R.; LOPES, O.R.; GONÇALVES, P. W. O ciclo das rochas na natureza**. Revista terra e Didática**, ano 2015, v. 5, p. 50-62. Disponível em: <www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v5/pdf-v5/TD_V-a5.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2018.

CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CARVALHO, A. Controle de argamassas industrializadas em obra por meio do método de penetração do cone. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI, 2005, Florianópolis. **Anais**... Florianópolis: ANTAC, 2005.

COELHO, A. Z. G.; TORGAL, F. P.; JALALI, S. **A cal na construção**. Guimarães: Tecminho, 2009. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/28972/1/A%20cal%20na%20construu%C3%A7%C3%A3o.pdf> Acesso em: 17 jun. 2018.

COGO, J. M. **Caracterização e funcionalização de argila esmectita de alteração basáltica e utilização na remoção de corante com processo de adsorção**: estudo da cinética e equilíbrio do processo. Dissertação (Mestrado em Geociências)- Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2011.

CORDEIRO, G. C.; DÉSIR, J. M. **Potencial de argila caulinítica de Campos dos Goytacazes-RJ na produção de pozolana para concreto de alta resistência**. São Paulo: Ceramica, 2010.v. 56.

COSTA, I. **Estudo comparativo entre argamassas de revestimento externo: preparada em obra, industrializada fornecida em sacos, e estabilizada dosada em central**. Projeto de monografia (Graduação em Engenharia Civil)- Centro Universitário UNIVATES, 2016. Disponível em: < https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/1412/1/2016IvandrodaCosta.pdf> Acesso em: 18 jul. 2018.

COUTO, Carmen; PINTO, J. D. DA S. ; STARLING, T. . **Materiais de Construção** Civil. 4ª. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2015. v. 1. 112p.

DÁFICO, D. A. **Método para obtenção de independência entre resistência e elasticidade em estudos de dosagem de argamassas mistas**. Ambiente Construído (Online), v. 7, p. 35-42, 2007. Disponível em: < https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/viewFile/3752/2105> Acesso em: 04 ago. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário mineral**. V. 34. Brasília, 2014. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2014> acesso em: 18 de outubro de 2018.

DUBAJ, E. **Estudo comparativo entre traços de argamassas utilizadas em Porto Alegre**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos**. São Paulo: PINI, 2003.

FREITAS, C.; COSTA, M. R. M. M. . **Estudo da influência da distribuição granulométrica no desempenho de argamassas com areia britada.** In: XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2010, Gramado. Avanços

científicos e impactos da pesquisa em tecnologia do ambiente construído: como avaliar? 2010. v. 1.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal**: fundamentos e aplicações na engenharia civil. 2. ed. São Paulo: Pini, 2002.

HARVEY, C. C. and MURRAY, H. H. Claysan Overview in: Kogel, Jessica Ezea; Triveti, Nikhil C.; Barker, James M.; Krukawski, Stanley T. **Industrial Minerals E Rocks**: Commodities, Marketsand Uses. 7. ed. Society for Mining Metallurgyan Exploration Inc, 2006.

JOCHEM, L. F. **Estudo das argamassas de revestimento com agregados reciclados de RCD**: características físicas e propriedades da microestrutura. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFSC - Centro Tecnológico. Florianópolis, 2012. 221 f.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

LOURENCI, S. **Caracterização de argamassas de revestimento fabricadas com materiais alternativos.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)-Universidade do Estado de Santa Catarina – Centro de Ciências Tecnológicas. Joinville, 2003.

MARGALHA, M. **Argamassas**: documento de apoio às aulas de conservação e recuperação do património. Universidade de Évora. Évora, 2011.

MARINHO, A. L. B. **Aglomerante ecológico para argamassa**: reciclagem da escória de forno e panela. Dissertação em Programa de Pós-Graduação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2015.

MATOS, P. R. de. **Estudo da utilização de argamassa estabilizada em alvenaria estrutural de blocos de concreto.** Monografia (Graduação em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. 2ed. São Paulo: IBRACON, 2008

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Terceiro inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa**: relatórios de referência. Brasília, 2015. Disponível em: <http://sirene.mcti.gov.br/publicacoes> Acesso em: 10 ago. 2018.

MUNHOZ, F. C.; RENOFIO, A. **Uso da gipsita na construção civil e adequação para o P+L**. In: XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Foz do Iguaçu, 2007. v. 01.

OLIVEIRA, K. A. S.; LIMA, T. D.; JONES, K. M. **Análise comparativa entre argamassa de assentamento preparado na obra e argamassa industrializada**. Construindo, v. 6, p. 12, 2014.

PAIVA, S. C. de; GOMES, E. A.; OLIVEIRA, R. A. **Controle de qualidade da cal para argamassas**: metodologias alternativas. **Revista Ciências e Tecnologia.** v. 1. p. 1-11. Recife, 2008.

PEREIRA, M. F. P. **Anomalias em paredes de alvenaria sem função estrutural**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade do Minho. Guimarães, 2005. Disponível em:<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/2734?mode=full&submit_simple=Mostrar+registo+em+formato+completo>. Acesso em: 5 mai. 2018.

POSSAN, E.; GAVA, G. P.; PETRAUSKI, S. M. F. C. **Estudo comparativo do desempenho de argamassas de revestimento produzidas em obra e industrializadas em diferentes substratos**. In: ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Foz do Iguaçu, 2002.

RECENA, F. A. P. **Conhecendo argamassa**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2008.

REGATTIERI, C. E.; SILVA, L. L.R. **Ganhos de potenciais na utilização da argamassa industrializada**. Simpósio Brasileiro de Tecnologia em Argamassas. São Paulo, 2003.

RIBEIRO, C. C., PINTO, J. D.S., STARLING, T. **Materiais de construção civil**. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2002. 102p.

ROCHA, J. C. **Apostila da disciplina materiais de construção**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010. Disponível em: <labvalores.paginas.ufsc.br> Acesso em: 23 ago 2018.

ROCHA, J. P. A.; HERMANN, A. **Pesquisa da viabilidade da utilização de argamassa estabilizada modificada para revestimento sem a necessidade de aplicação de chapisco**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil)-Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2013.

RODRIGUES, M. P. S. F. de F. **Argamassas de revestimento para alvenarias antigas:** contribuição para o estudo da influência dos ligantes. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2004. Disponível em: < https://run.unl.pt/bitstream/10362/1129/3/faria_2004.pdf> Acesso em 07 ago. 2018.

ROSA, D. F. M. **Aplicação de resíduos de polietileno tereftalato (PET) como alternativa ao agregado miúdo natural em argamassas de assentamento**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil)-Unifor-MG. Formiga, 2017.

SAMPAIO, J. A; ALMEIDA, S. L. M. Calcário e Dolomito. In: Adão Benvindo da Luz; Fernando A. Freitas Lins. (Org.). **Rochas & Minerais Industriais usos e especificações**. 2.ed. v. 1. Rio de Janeiro: CETEM, 2009.

SELMO, S. M. S. et al. **Boletim Técnico**: PCC/310: Propriedades e especificações de argamassas industrializadas de múltiplo uso. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP, 2002.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. ; GLEIZE, P.J.P. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia de britagem de rocha calcária**. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Recife. VII SBTA, 2007.

SOUSA, J. G. G.; BAUER, E. **Contribuição ao estudo da trabalhabilidade das argamassas mistas**. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, São Paulo. V SBTA, 2003.

TCPO. **Tabelas de composição de preços para orçamentos**: engenharia civil, construção e arquitetura. 13. ed São Paulo: PINI, 2010.

TOLEDO, M.C.M.; OLIVEIRA, S.M.B.; MELFI, A. J. Intemperismo e formação do solo. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHIELD,T. R.; TAIOLI,F. D**ecifrando a Terra**. São Paulo. 2000.

TREVISOL, L. A. **Estudo comparativo entre as argamassas**: estabilizada dosada em central, industrializada e produzida em obra por meio de ensaios fisicos nos estados fresco e endurecido. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil)-Instituto de Engenharia do Parana. Curitiba, 2015.