



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Argamassas de substituição em edifícios históricos: estudo da
compatibilidade através das propriedades mecânicas e do comportamento à
água.**

GUSTAVO DA SILVA SALLES

BELÉM - PA
AGOSTO DE 2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Salles, Gustavo da Silva, 1979-

Argamassas de substituição em edifícios históricos: estudo da compatibilidade através das propriedades mecânicas e do comportamento à água / Gustavo da Silva Salles.— 2017.

Orientador: Márcio Santos Barata

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Belém, 2017.

1. Arquitetura – Conservação e restauração. 2. Argamassa – Conservação e restauração. 3. Edifícios históricos – Conservação e restauração. 4. Materiais de construção. I. Título.

CDD 23. ed. 720.288

GUSTAVO DA SILVA SALLES

**Argamassas de substituição em edifícios históricos: estudo da
compatibilidade através das propriedades mecânicas e do comportamento à
água.**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do
**Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e
Urbanismo da Universidade Federal do Pará**, na
área de concentração Análise e Concepção do Espaço
Construído na Amazônia, linha Patrimônio, Restauro
e Tecnologia, como parte dos requisitos necessários à
obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e
Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Santos Barata.

**BELÉM - PA
AGOSTO DE 2017**

GUSTAVO DA SILVA SALLES

**Argamassas de substituição em edifícios históricos: estudo da
compatibilidade através das propriedades mecânicas e do comportamento à
água.**

Belém - PA, 31 de agosto de 2017.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Márcio Santos Barata (Orientador)

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal do Pará

Profa. Dra. Isaura Nazaré Lobato Paes (Membro Externo)

Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Federal do Pará

Profa. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro (Membro Externo)

Faculdade de Engenharia Civil - Universidade Federal do Pará

Argamassas de substituição em edifícios históricos: estudo da compatibilidade através das propriedades mecânicas e do comportamento à água.

Gustavo da Silva Salles

Orientador: Prof. Dr. Márcio Santos Barata

RESUMO

Este trabalho avaliou a compatibilidade das argamassas de substituição com seus substratos através de parâmetros de compatibilidade, como: resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade dinâmico, resistência de aderência e absorção capilar. Duas argamassas aéreas de substituição foram avaliadas, AR-1 e AR-2, de composição 1:3 e 1:5 (cal:areia), em volume. Moldou-se corpos de prova prismáticos e revestimentos sobre blocos cerâmicos. As argamassas estudadas não se mostraram plenamente compatíveis em decorrência da granulometria contínua do agregado miúdo e da alta qualidade da cal utilizada. A resistência à compressão e o coeficiente de capilaridade ficaram dentro do intervalo de compatibilidade, mas as resistências à tração na flexão, o módulo de elasticidade e a resistência de aderência foram ligeiramente superiores ao limite máximo adequado. Não houve diferença significativa entre os resultados obtidos para as argamassas AR-1 e AR-2, o que indica que composições com menor relação aglomerante/agregado podem ser empregadas sem prejuízo às propriedades mecânicas e ao comportamento à água. Em suma, os resultados demonstraram que argamassas de cal podem ser compatíveis com os materiais pré-existentes.

Palavras-chave: argamassa de substituição, cal, restauro, compatibilidade.

Replacement mortars in historic buildings: study of compatibility through the mechanical properties and water behavior.

Gustavo da Silva Salles

Advisor: Prof. Dr. Márcio Santos Barata

ABSTRACT

This work aimed to evaluate the compatibility of the replacement mortars with their substrates through compatibility parameters such as resistance axial compressive strength, traction resistance in bending, elasticity dynamic modulus, tensile bond strength and water absorption by capillarity. Two replacement air mortars were evaluated, AR-1 and AR-2, 1:3 composition and 1:5 (lime: sand) by volume. Prismatic specimens were shaped and coatings on ceramic blocks. The studied mortars were not fully compatible due to continuous grain size distribution and the high quality of the lime. Compressive strength and capillarity coefficient were within the range of compatibility, but resistance traction resistance in bending, elasticity dynamic modulus and tensile bond strength have been slightly higher than appropriate ceiling. There was no significant difference between the results obtained for the AR-1 and AR-2 mortars, which indicates that smaller compositions with binder /aggregate relationship can be employed without prejudice to mechanical properties and on water transport. In short, the results showed that lime mortars can be compatible with existing materials.

Palavras-chave: replacement mortar, lime, repair, compatibility.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por sua imensa graça de nos conceder a vida, nos permitir buscar e alcançar vitórias, apesar das tribulações. Por nos conduzir em seus caminhos, que muitas vezes, aos nossos olhos, parecem estranhos, por não compreendermos seus desígnios, mas que sempre se revelam perfeitos, diante aos que planejamos.

Aos meus pais (*in memorian*), eternamente, pelo amor, pelo estímulo aos estudos e pelo preparo para ser uma pessoa de bem. Ao meu irmão, por ter sido meu esteio moral, por ter me guiado nos caminhos da honestidade. À minha irmã (*in memorian*), pelos seus cuidados, na minha infância. Ao meu cunhado, por ser meu grande amigo de infância e pelos seus bons conselhos e à minha cunhada, por seu carinho.

À minha esposa e filhos, que me apoiam e se sacrificam junto comigo quando é necessário resignação para transpor os obstáculos que a vida nos traz. Aos meus sogros, pelo estímulo e importante apoio. Aos meus amigos, também pelo estímulo, por dividir tarefas, e pelas palavras de otimismo.

À Coordenação do PPGAU – UFPA, Prof. PhD. José Júlio e Prof.^a Dr.^a Ana Cláudia Cardoso, e servidores Aluísio e Carlos Eduardo, por sua idoneidade, humildade, educação, transparência dos atos, por seu compromisso em servir. A todos os professores e servidores que fazem parte deste processo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Márcio Barata, pela sugestão de tema extremamente inteligente e interessante, pelas orientações, pela confiança, pelo apoio técnico e logístico, por abrir as portas de sua rede de trabalho para apoiar o desenvolvimento de minhas tarefas de pesquisa, pelos “puxões de orelha”, por não desistir.

À Prof.^a Dra. Isaura Paes, por sua grande contribuição em minha pesquisa, por me apoiar neste desafio e me trazer de volta aos trilhos. À Prof.^a Dra. Risete Braga e à Prof.^a Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro por suas, também, grandiosas contribuições.

Aos Prof. Dr. Marcelo Picanço, Prof. Dr. Paulo Sérgio Souza, Prof. Dr. Sandoval Rodrigues Júnior, laboratoristas Sr. “Maneca” e Sr. Joel, do Laboratório de Engenharia Civil, LEC – UFPA, pelo apoio.

Ao Prof. PhD. Remo Souza, pelo apoio com os ensaios de ultrassom. Aos Srs. Eduardo Macedo e Carlos Eduardo, da empresa SUPERMASSA, pela doação do aglomerante e pelo apoio em ensaios laboratoriais.

A Sra. Cleydimara Brito, laboratorista do IFPA – Campus Bragança, pelo apoio com ensaios de resistência mecânica, por sua predisposição e compromisso com o trabalho e pela amizade. À Gisele, Bruno e Paula, do Laboratório de Microanálise do Instituto de Geociências da UFPA por seu empenho.

Ao meu amigo Jonathan Oliveira, por dedicar seu tempo de descanso com sua família para me ajudar de forma significativa nas tarefas quase impossíveis, (confeção e montagem de formas, construção da caixa de queda, preparo das argamassas, aquisição e limpeza dos blocos cerâmicos, moldagem de prismas e revestimentos), durante os trabalhos preliminares da pesquisa.

A todos que fazem parte deste processo, mas que por minha falha tenham sido omitidos deste campo, mas não de minha gratidão.

“É preciso que as pessoas se desenvolvam humana, social e profissionalmente, com a consciência de servir. O individualismo e a arrogância destroem o compromisso com a coletividade e fazem, todos, paradoxalmente, perecerem em meio ao processo da própria evolução.”

Gustavo Salles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição granulométrica das areias estudadas por Costa (2016).	25
Figura 2 – Fluxograma de requisitos (Adaptado de VAN BALEN et al., 2005).	29
Figura 3 – Influência da constituição do aglomerante sobre a relação entre as resistências à compressão e à tração (Adaptado de SILVA; FERREIRA PINTO; GOMES, 2015).	32
Figura 4 - Ruína do casarão centenário, após incêndio, à esquerda (fonte: http://g1.globo.com).	41
Figura 5 - Blocos cerâmicos com seção transversal em “L”.	41
Figura 6 - Bloco cerâmico com identificação do fabricante.	42
Figura 7 - Recortes de jornal da época.	42
Figura 8 - Fluxograma das atividades do programa experimental.	45
Figura 9 - Determinação das medidas das faces (L, L1, H, H1 e C).	47
Figura 10 - Determinação das espessuras das paredes externas (e) e septos (s).	47
Figura 11 - Determinação do desvio em relação ao esquadro (D).	48
Figura 12 - Determinação da planeza das faces (F).	48
Figura 13 – Ensaio de caracterização mecânica dos blocos em “L”.	49
Figura 14 - Misturador mecânico (a) e argamassas aplicadas em substrato (b).	50
Figura 15 - Ensaio de densidade de massa no estado plástico.	51
Figura 16 - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico.	54
Figura 17 - Dispositivo de carga para determinação da resistência à tração na flexão.	55
Figura 18 - Ensaio de resistência à tração na flexão.	56
Figura 19 - Ensaio de resistência à compressão axial.	56
Figura 20 - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.	57
Figura 21 - Dispositivo mecânico, caixa de queda, para aplicação da argamassa no substrato.	58
Figura 22- Bloco cerâmico com aplicação de gabarito e de argamassa de revestimento.	59
Figura 23 - Procedimentos de ensaio de resistência de aderência à tração.	59
Figura 24- Difratoograma de Raio-X da cal hidratada.	60
Figura 25- Distribuição granulométrica da areia empregada nesta pesquisa.	62
Figura 26- Comparativo entre as areias empregadas por Bolonha e a empregada na pesquisa.	62

Figura 27 - Ensaio de caracterização geométrica dos blocos cerâmicos.....	64
Figura 28 - Ensaio de resistência à compressão dos blocos em “L”.	65
Figura 29 – Gráficos dos coeficientes de capilaridade das argamassas (90 dias de idade).....	77
Figura 30 – Configuração de ruptura das argamassas.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Exigências químicas e físicas para cal hidratada (ABNT NBR 7175:2003).....	23
Tabela 2- Características das areias (COSTA, 2016).	24
Tabela 3- Resistências mecânicas das argamassas de cal (LANAS; ALVAREZ, 2003).....	32
Tabela 4- Resistências mecânicas das argamassas de cal (FARIA et al., 2008).	33
Tabela 5 - Requisitos estabelecidos para características mecânicas e comportamento à água das argamassas de substituição para edifícios antigos (adaptado de SANTOS e VEIGA, 2012).....	36
Tabela 6 - Resistência à compressão (ABNT NBR 13281:2005).	36
Tabela 7 - Densidade de massa aparente no estado endurecido (ABNT NBR 13281:2005). ..	37
Tabela 8 - Resistência à tração na flexão (ABNT NBR 13281:2005).....	37
Tabela 9 - Coeficiente de capilaridade (ABNT NBR 13281:2005).	37
Tabela 10 - Densidade de massa no estado fresco (ABNT NBR 13281:2005).....	37
Tabela 11 - Retenção de água (ABNT NBR 13281:2005).....	38
Tabela 12 - Resistência potencial de aderência à tração (ABNT NBR 13281:2005).....	38
Tabela 13 – Composição das argamassas de substituição AR-1 e AR-2.	50
Tabela 14 - Caracterização física e química da cal hidratada CH-I.	60
Tabela 15 - Granulometria e características físicas do agregado miúdo natural.	61
Tabela 16 - Identificação do fabricante e medidas de fabricação dos blocos cerâmicos.	63
Tabela 17 - Características visuais dos blocos cerâmicos.	63
Tabela 18 - Características geométricas dos blocos cerâmicos (ABNT NBR 15270-3:2005). ..	64
Tabela 19 - Características físicas dos blocos cerâmicos (ABNT NBR 15270-3:2005).....	65
Tabela 20 - Características mecânicas dos blocos cerâmicos (ABNT NBR 15270-3:2005). ..	65
Tabela 21 - Índices de consistência das argamassas (ABNT NBR 13276:2016).....	67
Tabela 22 - Retenção de água nas argamassas de substituição (ABNT NBR 13277:2005). ...	68
Tabela 23 - Densidades de massa e do teor de ar incorporado (ABNT NBR 13278:2005)....	68
Tabela 24 - Densidades de massa aparente (ABNT NBR 13280:2005).....	69
Tabela 25 - Resistência à compressão (ABNT NBR 13279:2005).	70
Tabela 26 - Resistência à tração na flexão (ABNT NBR 13279:2005).....	72
Tabela 27 - Módulo de elasticidade dinâmico (ABNT NBR 15630:2009).....	74
Tabela 28 - Relações (f_c/f_t) para as argamassas AR1 e AR2 para as idades de 28, 56 e 90 dias.	76

Tabela 29 – A absorção de água e do coeficiente de capilaridade (ABNT NBR 15259:2005).	76
Tabela 30 - Resistência de aderência à tração (ABNT NBR 13528:2010).	78
Tabela 31 - Resultados dos ensaios das argamassas de revestimento, estado plástico.	79
Tabela 32 - Resultados dos ensaios dos prismas de argamassas, estado endurecido (90 dias).	80
Tabela 33 - Resultados dos ensaios dos blocos cerâmicos.....	80
Tabela 34 – Comparação entre resultados obtidos na pesquisa e requisitos técnicos.	80

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	JUSTIFICATIVA.	17
1.2	OBJETIVOS.....	17
1.2.1	Geral.....	17
1.2.2	Específicos.	17
1.3	ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS.	21
2.1.1	Aglomerante.....	21
2.1.2	Agregado miúdo.	23
2.1.3	Água de amassamento.	25
2.2	USO DA CAL EM ARGAMASSAS.....	25
2.2.1	Técnicas de uso.	26
2.3	FORMULAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	28
2.4	SUBSTRATO DOS REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA.....	40
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	44
	PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO.	44
3.1	PRIMEIRA ETAPA: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	45
3.1.1	Aglomerante.....	45
3.1.2	Agregado miúdo.	46
3.1.3	Blocos cerâmicos.	46
3.2	SEGUNDA ETAPA: PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS.	49
3.2.1	Propriedades no estado plástico.....	51
3.2.1.1	Índice de consistência.....	51
3.2.1.2	Retenção de água.....	51
3.2.1.3	Densidade de massa e teor de ar incorporado.	51
3.2.2	Propriedades no estado endurecido.....	52
3.2.2.1	Densidade de massa aparente.....	52
3.2.2.2	Módulo de elasticidade dinâmico.....	52
3.2.2.3	Resistência à tração na flexão e resistência à compressão axial.	54
3.2.2.4	Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade.....	56

PROPRIEDADES DO REVESTIMENTO NO SUBSTRATO.....	57
3.2.2.5 Resistência de aderência à tração.	59
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
4.1 MATERIAIS.	60
4.1.1 Aglomerante.....	60
4.1.2 Agregado miúdo.	61
4.1.3 Blocos cerâmicos.	63
4.2 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS.....	66
4.2.1 Estado plástico.	66
4.2.1.1 Índice de consistência.....	66
4.2.1.2 Retenção de água.....	67
4.2.1.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado.	68
4.2.2 Estado endurecido.....	69
4.2.2.1 Densidade de massa aparente.....	69
4.2.2.2 Resistência à compressão axial.	70
4.2.2.3 Resistência à tração na flexão.	72
4.2.2.4 Módulo de elasticidade dinâmico.....	74
4.2.2.5 Absorção de água e coeficiente de capilaridade.....	76
4.2.2.6 Resistência de aderência à tração.	78
4.3 COMPATIBILIDADE DO REVESTIMENTO COM O SUBSTRATO.....	79
5 CONCLUSÕES.....	83
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	85

1 INTRODUÇÃO.

Belém, capital do estado do Pará, abriga relevante acervo do patrimônio histórico nacional. Em meados do século XIX, com o comércio da borracha, Belém se beneficiou com a industrialização iniciada pela Inglaterra, época na qual a cidade viveu seu apogeu econômico e cultural. Surgiu, então, a Belém da *Belle époque*, com prédios luxuosos e a influência estrangeira por meio das levas de imigrantes atraídos pelas oportunidades de trabalho (IPHAN, 2016).

Os primeiros tombamentos ocorreram nos anos de 1940, tendo como os primeiros conjuntos arquitetônicos, urbanísticos e paisagísticos tombados o Cemitério de Nossa Senhora da Soledade, a Praça Frei Caetano Brandão (antigo Largo da Sé) e o Mercado do Ver-o-Peso com suas áreas adjacentes como a Praça Pedro II e o *Boulevard* Castilhos França, inclusive o Mercado de Carne e o Mercado Bolonha de Peixe.

Além destes, foram tombados em 1985 os conjuntos arquitetônicos das avenidas Nazareth e Governador José Malcher. Tombados em 2012, os conjuntos arquitetônicos, urbanísticos e paisagísticos dos bairros Cidade Velha e Campina se destacam como o núcleo histórico e reúnem cerca de 2.800 edificações protegidas, entre as quais estão palacetes, palácios e sobrados conjugados com casas comerciais no térreo.

Cada indivíduo é parte de um todo, da sociedade e do ambiente onde vive e constrói com os demais a história dessa sociedade, legando às gerações futuras, por meio dos produtos criados e das intervenções no ambiente, registros capazes de propiciar a compreensão da história humana pelas gerações futuras. A destruição dos bens herdados das gerações passadas acarreta o rompimento da corrente do conhecimento, levando à repetição incessantemente de experiências já vividas, por isso a importância da preservação do patrimônio histórico (CREA-SP, 2008).

Segundo Souza (2013), as argamassas históricas assumem papel importante na conservação do patrimônio edificado, pois protegem a alvenaria contra as ações climáticas, choques mecânicos e conferem o aspecto de conservação à edificação. Por ter a função de proteger as alvenarias contra as intempéries e agentes agressivos, as argamassas são um dos primeiros elementos construtivos a sofrer degradação.

Até meados do século XIX, a cal era o aglomerante empregado nessas argamassas de revestimento e de assentamento de alvenaria. Era obtida por meio da calcinação de rochas carbonáticas ou de conchas coletadas dos sambaquis (bancos de conchas), encontrados no continente e ao longo do litoral. No século XVII, em Belém, nos bairros da Cidade Velha e Campina, foram construídos fornos para calcinação de conchas, com o objetivo de produção de

cal para aplicação nas argamassas utilizadas na construção das edificações do centro histórico (SANTIAGO, 2007).

Algumas décadas atrás, a cal caiu em desuso e o conhecimento experimental empírico foi quase totalmente perdido, especialmente nos países desenvolvidos e em desenvolvimento, nos quais o Brasil se enquadra. Isto ocorreu por causa das mudanças tecnológicas na construção, dentre as quais o uso generalizado do cimento Portland como aglomerante hidráulico (FARIA; HENRIQUES; RATO, 2008).

Em relação ao patrimônio cultural e arquitetônico, a substituição das argamassas de cal por argamassas de cimento se tornou corriqueira, tendo em vista as facilidades do uso destas ultimas em razão da pega rápida e desenvolvimento de resistência inicial elevado do aglomerante hidráulico e ainda, se acreditava serem mais resistentes que as argamassas tradicionais. O que ocorreu foi justamente o contrário, a presença de alto teor de sais solúveis, a elevada rigidez e impermeabilidade dessas argamassas hidráulicas resultaram em um desempenho insatisfatório, configurando-se como incompatíveis com as argamassas tradicionais e os materiais do substrato (ROSSI-DORIA, 1986). Em decorrência disto, nas últimas décadas o uso da cal hidratada ganhou novamente um papel importante na conservação do patrimônio arquitetônico, apesar das desvantagens a respeito dos tempos de pega e endurecimento lentos e da baixa resistência nas primeiras idades.

Numa intervenção sobre um edifício antigo, a primeira opção deve ser sempre a conservação dos revestimentos existentes, através de planos de manutenção e reparações pontuais. Quando a conservação não é possível, sob o ponto vista técnico e econômico, deve-se então recorrer a reparos parciais ou totais dos revestimentos por meio das argamassas de substituição, que devem ser formuladas tendo em conta as características das argamassas preexistentes, para evitar a aceleração da degradação dos materiais antigos, em particular das alvenarias. A eficácia da intervenção sobre revestimentos de paredes de edifícios antigos exige conhecimento aprofundado dos revestimentos, do seu papel na estrutura antiga, da sua composição e do seu estado de conservação (SANTOS; VEIGA, 2012).

Na ciência da conservação, a reversibilidade é um conceito tradicional, mas que nem sempre é possível de ser alcançado. Uma visão mais realista foi a introdução dos conceitos da compatibilidade e da reparabilidade. A compatibilidade significa a introdução de materiais que não irão acarretar consequências negativas aos materiais pré-existentes (VAN BALEN et al., 2005). A reparabilidade se traduz na possibilidade de um tratamento conservativo, tipo uma argamassa de reparo, ser ao menos suscetível de ser reparado sem alterações de comportamento inaceitáveis (VEIGA et al., 2004).

1.1 JUSTIFICATIVA.

Belém abriga relevante acervo do patrimônio histórico nacional, os quais convêm restaurar com argamassas de cal, haja vista ter sido este o aglomerante utilizado nos revestimentos de argamassa dos edifícios antigos. Entretanto, qualquer intervenção em um prédio histórico deve ter como diretriz para elaboração de argamassas de reparo a compatibilidade com os materiais pré-existentes.

No âmbito internacional são inúmeras as pesquisas científicas voltadas para o estudo da compatibilidade das argamassas de reparo, investigando a composição das misturas, os tipos de agregados e de cal (LANAS; ALVAREZ, 2003; FARIAS; HENRIQUES; RATO, 2008), assim como as propriedades mecânicas, o comportamento à água (SILVA; FERREIRA PINTO; GOMES, 2015), comportamento térmico, resistência ao gelo-degelo, resistência aos sais solúveis entre outras (ARIZZE; CULTRONE, 2012).

No Brasil não encontrou-se estudos sobre as propriedades das argamassas de substituição relacionadas à compatibilidade das mesmas com os substratos. Em Belém, está sendo desenvolvida apenas uma tese de doutoramento que aborda as argamassas de reparo de cal hidratada com incorporação de pozolana de alta reatividade (LOUREIRO, 2016). Contudo, nenhum estudo sobre avaliação das argamassas de cal aérea foi realizado, levando em consideração a compatibilidade com o substrato.

Diante deste panorama, justifica-se a realização de trabalho científico que investigue a formulação de argamassas de substituição à base de cal aérea para revestimento de edifícios antigos tendo como diretriz à compatibilidade com o substrato, através da avaliação das propriedades mecânicas e do comportamento à água, de modo a contribuir para a conservação e preservação do patrimônio histórico edificado.

1.2 OBJETIVOS.

1.2.1 Geral.

O trabalho teve como objetivo geral avaliar a compatibilidade das propriedades das argamassas de cal e areia com o substrato de bloco cerâmico através de ensaios mecânicos e de transporte de água.

1.2.2 Específicos.

- Avaliar as propriedades das argamassas de cal e areia no estado plástico, a saber: consistência, teor de ar incorporado, retenção de água e densidade de massa no estado plástico;

- Avaliar as propriedades das argamassas de cal e areia no estado endurecido: densidade de massa aparente, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade dinâmico por ultrassom, absorção de água e coeficiente de capilaridade;
- Avaliar as propriedades das argamassas quando aplicadas aos substratos absorventes como: resistência à tração na flexão, resistência de aderência à tração, permeabilidade sob baixa pressão e absorção de água e coeficiente de capilaridade
- Comparar os resultados determinados nos ensaios com os parâmetros de compatibilidade propostos por Santos e Veiga (2012).

1.3 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.

O Capítulo 2 aborda o conceito de conservação, sua importância para a preservação do patrimônio histórico e meios de custeio desta ação. Aborda, também, a composição, formulação e utilização das argamassas de cal e os conceitos de compatibilidade, seus requisitos e metodologias de ensaio para sua verificação.

O Capítulo 3 apresenta o planejamento, os materiais e os procedimentos experimentais utilizados para atingir os objetivos da pesquisa, com sua metodologia utilizada baseada nos fundamentos teóricos pesquisados.

O Capítulo 4 aborda os resultados e suas discussões fundamentados na literatura pesquisada e referenciada, afetos aos materiais primários (cal, areia e blocos cerâmicos). Também aborda resultados e discussões afetos às propriedades das argamassas estudadas, nos estados plástico e endurecido e aos revestimentos recuperados dos substratos.

O Capítulo 5 aborda as conclusões quanto à compatibilidade entre as argamassas (prismas e revestimentos) e o bloco cerâmico utilizado, auferidas das análises dos resultados determinados capítulo anterior, diante das metodologias de ensaio utilizadas e com base no comportamento apresentado pelos materiais..

O Capítulo 6 apresenta sugestões de aprofundamento do tema com vistas a pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

IMPORTÂNCIA DA CONSERVAÇÃO E MEIOS DE CUSTEIO.

Conservação é o conjunto de ações destinadas a prolongar o tempo de vida de determinado Bem Cultural (BRASIL, 2005). A importância da preservação do patrimônio histórico se fundamenta no fato que a destruição dos bens herdados das gerações passadas acarreta o rompimento da corrente do conhecimento, levando à repetição incessantemente de experiências já vividas. O homem é parte de um todo, composto pela sociedade e pelo ambiente onde vive e constrói com seus pares, a história dessa sociedade, deixando como legado de sua existência, os produtos criados e suas intervenções no ambiente, os quais consistem em registros capazes de propiciar a compreensão da história humana por parte das gerações futuras (CREA-SP, 2008).

As argamassas históricas assumem papel importante na conservação do patrimônio edificado, pois protegem a alvenaria contra as ações climáticas, choques mecânicos e conferem o aspecto de conservação à edificação. Por ter a função de proteger as alvenarias contra as intempéries e agentes agressivos, as argamassas são um dos primeiros elementos construtivos a sofrer degradação (SOUZA, 2013).

Todavia, não somente as intempéries são responsáveis pela degradação de edifícios históricos. O homem apesar de ser o principal interessado na preservação desse legado, também figura, em muitos casos, como agente causador deste problema.

Os fatores que acarretam o processo de degradação dos monumentos históricos são o intemperismo e as ações antrópicas. A degradação por ação antrópica é o processo em que o ser humano é o agente da ação deletéria, a exemplo deste tipo de ação, pode-se citar a atividade industrial, a produção de resíduos urbanos, o turismo, a pichação e o vandalismo (ALTÊ, G. A.; ALTÊ, M. T.; ALTÊ, R. R. A., 2015).

A causa do problema pode residir na falta de conhecimento ou de consciência de preservação do patrimônio, que induz o usuário do bem patrimonial ao comportamento negligente e predatório.

A respeito deste assunto, Prince (2016) discute sobre a importância que a Educação Patrimonial tem em relação à preservação do patrimônio histórico e cultural de uma sociedade. Trata-se de um processo permanente e sistemático de trabalho educacional como fonte primária de conhecimento e enriquecimento individual e coletivo. A autora afirma que este tipo de educação está relacionado à formação de cidadãos conscientes e com conhecimentos acerca da origem e desenvolvimento da região em que vivem, buscando a preservação da memória que remete à sua história.

Entretanto, são necessários recursos financeiros para a execução das atividades de preservação e restauro, que podem provir do estado ou da iniciativa privada. De um lado, se o estado não dispõe de recursos em suficiência para atender às demandas, o proprietário do edifício, muitas vezes, também não dispõe destes recursos.

O financiamento de obras de conservação e restauração, em monumentos classificados como patrimônio histórico, é difícil de ser obtido, pois as obras são caras e os recursos escassos. Por outro lado, nota-se, por vezes, o desinteresse por parte do proprietário do imóvel em proceder, com recursos próprios, a restauração do mesmo, tendo em vista que há restrições de projeto e as obras são caras (SANTIAGO, 2012).

É sugerido, neste caso, como política de conservação do patrimônio histórico e cultural do Centro Histórico de Belém, aliada à política de combate ao déficit habitacional, a utilização de imóveis abandonados ou subutilizados, através da provisão de moradia de interesse social, por meio da implantação de Aluguel Social (MERCÊS; TOURINHO; LOBO, 2014).

O Aluguel Social é um recurso assistencial mensal destinado a atender, em caráter de urgência, famílias que se encontram sem moradia. Os autores ressaltam que estas áreas apresentam elevada acessibilidade, são dotadas de equipamentos e serviços diversificados, de infraestrutura de boa qualidade e de ofertas de empregos, o que favorece aos assistidos.

Desta forma, os autores supracitados encontraram um meio, antagônico e paradoxal, de resolver as questões geradas pelo abandono das áreas urbanas. Se o abandono do imóvel acelera sua degradação, reduzindo seu valor, a ocupação social gera renda para sua conservação, fazendo do uso o agente retardador do processo de degradação. Da mesma forma, o usuário do imóvel, que a priori também é agente antrópico de deterioração, figura como fomentador da conservação do bem.

Souza e Bahl (2011) refletem sobre a necessidade de conservar os bens históricos e culturais, a partir das responsabilidades dos profissionais do turismo em conservar estes bens. Discutem a relação entre os profissionais do turismo e o espaço onde apontam para a necessidade da formação de profissionais preocupados com a conservação dos bens históricos e culturais a partir do princípio de que quando o homem conhece sua história, preserva-a e transmite-a através da memória para as gerações futuras, afirmando-se conhecedor de seus direitos e deveres cidadãos.

Ribeiro e Vieira (2014) apontam que, em Pelotas – RS, a historiografia municipal conscientizou os munícipes acerca da importância do patrimônio histórico, buscando alimentar junto à comunidade, a necessidade da preservação do acervo, não apenas como elemento

contemplativo, mas como caminho para a retomada do desenvolvimento e da autoestima coletiva. Apontam para a regulamentação de zonas de preservação do patrimônio cultural e para a prática efetiva dos regulamentos, como tradução de ações concretas de preservação.

Caldeira et al. (2012) também se referem à intervenção do poder público, em Belo Horizonte – MG, acerca do desenvolvimento e implantação de Plano Diretor, como medida de organização do espaço construído e de proteção de edificações contra intervenções indesejadas, garantindo sua preservação e autenticidade.

2.1 COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS.

A norma NBR 13281 (ABNT, 2005) define argamassa como a mistura homogênea de agregado miúdo, aglomerantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria, no caso de argamassa industrializada.

Santiago (2007) afirma que a denominação de argamassa como uma mistura de aglomerante com agregado miúdo e água é limitada para descrever a diversidade de materiais que podem ser empregados nesta mistura.

2.1.1 Aglomerante.

De acordo com Guimarães (2009), acerca do aglomerante, o objetivo da sua adição na mistura é assegurar a coesão do conjunto através da ligação com os agregados e preencher os vazios existentes entre eles. Alerta que o aglomerante deve ser adicionado na quantidade certa, pois sua dosagem em demasia acarreta fissuração das argamassas, devido sua contração durante a secagem; e que a falta de aglomerante acarreta muita porosidade, o que leva ao enfraquecimento da argamassa.

A norma NBR 11172 (ABNT, 1990) define aglomerantes como produtos com constituintes minerais que, para sua aplicação, apresenta-se sob forma pulverulenta e que na presença da água formam uma pasta com propriedades aglutinantes. Quanto a sua forma de endurecimento, podem ser classificados como aglomerantes hidráulicos e aglomerantes aéreos.

Segundo a referida norma, os aglomerantes hidráulicos se caracterizam por aqueles cuja pasta apresenta a propriedade de endurecer apenas pela reação com a água e que, após seu endurecimento, resiste satisfatoriamente quando submetida à ação da água. Por sua vez, os aglomerantes aéreos, se caracterizam por aqueles cuja pasta apresenta a propriedade de endurecer por reações de hidratação ou pela ação química do anidrido carbônico (CO₂) presente

na atmosfera e que, após seu endurecimento, não resiste satisfatoriamente quando submetida à ação da água.

Como exemplos de aglomerantes aéreos, destaca o gesso e a cal. Define a cal como um aglomerante aéreo cujo constituinte principal é o óxido de cálcio (CaO) ou óxido de cálcio em presença natural com o óxido de magnésio (MgO), hidratados ou não, apresentando os tipos de cales, conforme abaixo.

- Cal virgem (CaO): pó resultante de processos de calcinação, da qual o constituinte principal é o óxido de cálcio ou óxido de cálcio em associação natural com o óxido de magnésio, capaz de reagir com a água e em função dos teores dos seus constituintes, pode ser designada de cálcica, magnesiana ou dolomítica.
- Cal hidratada: pó seco, obtido pela hidratação adequada da cal virgem (CaO), constituída essencialmente de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) ou de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio (Mg(OH)_2), ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.
- Cal hidráulica: de pó seco, obtida pela calcinação a uma temperatura próxima à da fusão de calcário com impurezas sílico-aluminosas, formando silicatos, aluminatos e ferritas de cálcio, que lhe conferem um certo grau de hidráulicidade.
- Cal extinta: cal resultante da exposição da cal virgem ao ar ou à água, portanto apresentando sinais de hidratação e, eventualmente, de recarbonatação, apresentando proporções variadas de óxidos, hidróxidos e carbonatos de cálcio e magnésio.

A norma NBR 7175 (ABNT, 2003) define a cal hidratada como o pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.

A referida norma determina que a cal hidratada deve ser denominada, conforme as exigências químicas e físicas apresentadas na Tabela 1, pelas siglas: cal hidratada CH-I, CH-II e CH-III. Aufere-se da referida norma sobre as exigências químicas que a cal do tipo CH I é a cal hidratada com maior teor de óxidos totais, o que a torna mais reativa que as demais, fator que contribui para a melhoria das propriedades da argamassa, principalmente referentes à

retenção de água e à trabalhabilidade. A cal CH II é a cal hidratada comum, e a cal CH III é a cal hidratada comum com a adição de carbonatos moídos com baixíssima granulometria. As exigências físicas por ela consideradas referem-se à finura, à estabilidade, à plasticidade, à retenção de água e ao índice de incorporação de areia.

Tabela 1- Exigências químicas e físicas para cal hidratada - NBR 7175 (ABNT, 2003).

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidro carbônico	Na fábrica	$\leq 5 \%$	$\leq 5 \%$	$\leq 13 \%$
	No depósito	$\leq 7 \%$	$\leq 7 \%$	$\leq 15 \%$
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratados calculados (CaO+MgO)		$\leq 10 \%$	$\leq 15 \%$	$\leq 15 \%$
Óxidos totais na base de não voláteis (CaO _t + MgO _t)		$\geq 90 \%$	$\geq 88 \%$	$\geq 88 \%$
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600 mm	$\leq 0,5 \%$	$\leq 0,5 \%$	$\leq 0,5 \%$
	Peneira 0,075 mm	$\leq 10 \%$	$\leq 15 \%$	$\leq 15 \%$
Retenção de água		$\geq 75 \%$	$\geq 75 \%$	$\geq 70 \%$
Incorporação de areia		$\geq 3,0$	$\geq 2,5$	$\geq 2,2$
Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias		
Plasticidade		≥ 110	≥ 110	≥ 110

Segundo Guimarães (2002), a utilização de cal em argamassas proporciona, no estado plástico, grande capacidade de retenção de água em torno de suas partículas, conferindo à argamassa maior plasticidade e trabalhabilidade, além de permitir melhor controle da perda de água para o substrato onde foi aplicada, melhorando sua aderência final.

2.1.2 Agregado miúdo.

A norma NBR 7211 (ABNT, 2009) define agregado miúdo como aquele cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 μ m, em ensaio realizado de acordo com a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003) com peneiras definidas pela norma NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 2010). Determina que os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, e não devem conter substâncias de natureza e em quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento do cimento e a durabilidade.

A fase agregado nas argamassas é a principal responsável pela massa unitária, pelo módulo de elasticidade e pela estabilidade dimensional (METHA; MONTEIRO, 1994)

Neto e Córdoba (2012) relatam que a forma dos grãos dos agregados exerce grande influência sobre as propriedades das argamassas. Agregados lamelares produzem argamassas menos trabalháveis que os de forma regular, sendo esta influência mais acentuada nos agregados miúdos. Agregados de forma lamelar apresentam maior aderência à pasta e,

consequentemente, argamassas com a utilização deste tipo de agregado, apresentam maior resistência à tração e ao desgaste.

Aufere-se, então, destas afirmações que agregados de forma cubica de arestas arredondadas, como ocorre com os agregados miúdos naturais, devido aos processos de decomposição da rocha matriz e de transporte dos grãos, melhoram a trabalhabilidade e apresentam menor resistência à tração e ao desgaste.

Areias muito grossas não produzem argamassas com boa aderência porque prejudicam a sua trabalhabilidade e, consequentemente, a sua aplicação ao substrato, reduzindo a extensão de aderência. Areias ou composições inertes com alto teor de finos, principalmente partículas inferiores à 0,075mm, podem prejudicar também a aderência. Para obtenção de bons resultados de aderência, a areia deve possuir uma distribuição granulométrica contínua e quanto maior o módulo de finura das areias, desde que produzam argamassas trabalháveis, maior será a resistência de aderência obtida. (ISAIA, 2010).

Em sua pesquisa, Costa (2016), ao analisar a granulometria dos agregados miúdos utilizados das argamassas de assentamento e de revestimento das alvenarias de edifícios históricos de Belém construídos pelo engenheiro Francisco Bolonha, concluiu que estes agregados não são de origem de importação, mas extraídos da área da Formação de Barreiras, que compreende grande parte da Região Nordeste do estado do Pará, desde as áreas litorâneas próximas a capital até localidades mais ao interior do continente.

O referido autor verificou que as argamassas de assentamento (AA) e de revestimentos externo e interno (RE e RI) empregaram areias de finas a muito finas, com módulo de finura variando de 0,6 a 1,7 e dimensão máxima característica (DMC) entre 1,2 e 2,4 mm. São areias características da região Nordeste do Pará. A areia mais grossa foi a empregada no concreto (AC), módulo de finura de 2 e DMC de 4,8mm. Tais verificações encontram-se demonstradas na Tabela 2 e a Figura 1 apresenta a distribuição granulométrica das referidas areias.

Tabela 2- Características das areias (COSTA, 2016).

AREIA	MODULO DE FINURA	DMC (mm)
AAIBC2	1,0	1,2
AAIF1	1,4	2,4
AAIPB1	1,7	2,4
AREBC1	1,7	2,4
ARIBC2	0,6	1,6
ARIBC3	1,7	2,4
ACBC1	2,0	4,8

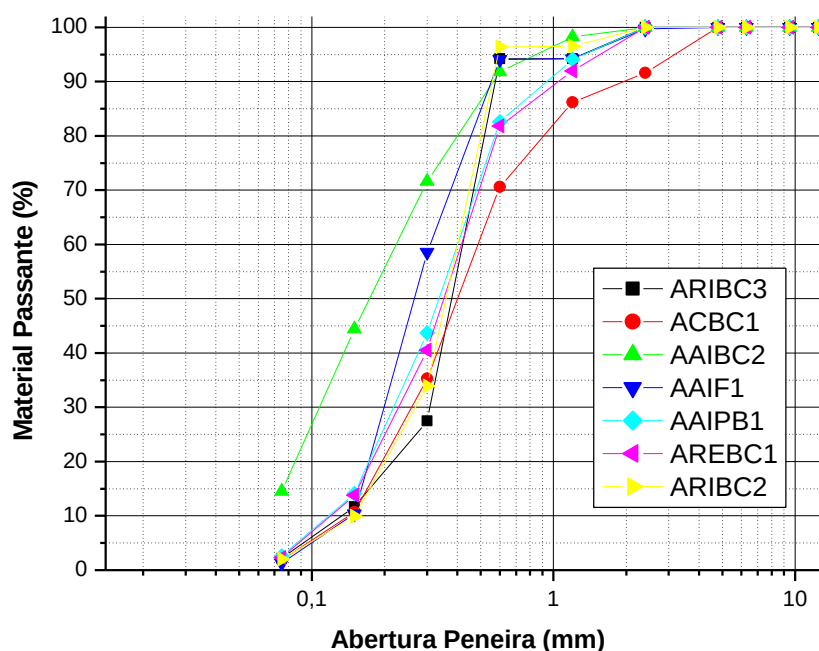


Figura 1 – Distribuição granulométrica das areias estudadas por Costa (2016).

2.1.3 Água de amassamento.

A norma NBR 15900-1 (ABNT, 2009) especifica os requisitos para a água ser considerada adequada ao preparo de concreto. Neste trabalho, serão utilizados estes mesmos critérios para a determinação da adequabilidade da água de amassamento a ser utilizada nas argamassas de substituição.

A referida norma classifica a água de amassamento, de modo geral, em função de sua origem e verifica se a água é adequada ou não para uso no preparo da mistura. A norma determina que a água de abastecimento público é adequada para uso e não necessita ser ensaiada.

A quantidade de água de amassamento utilizada em uma argamassa tem grande influência nas características físicas, na trabalhabilidade e, conseqüentemente, na sua aplicação. A retração e a trabalhabilidade de uma argamassa são fortemente influenciadas pela relação água/material anidro (GOMES; DIAZ GONÇALVES; FARINA, 2012).

2.2 USO DA CAL EM ARGAMASSAS.

Até meados do século XIX, a cal era o aglomerante por excelência utilizado nas construções, tanto para assentamento, quanto para revestimento. Era obtida por meio da calcinação de rochas carbonáticas ou de conchas coletadas dos sambaquis (bancos de conchas),

encontrados no continente e ao longo do litoral. No século XVII, em Belém, nos bairros da Cidade Velha e Campina, foram construídos fornos para calcinação de conchas, com o objetivo de produção de cal para aplicação nas argamassas utilizadas na construção das edificações do centro histórico (SANTIAGO, 2007).

O uso da argamassa de cal no Brasil antecede a fundação da Cidade de Salvador, em 1549, pois vem desde a época das Capitanias Hereditárias. A partir da criação da nova Capital, teriam vindo de Portugal para a construção da Cidade, além de outros profissionais, os caeiros (ARQUIVOS NACIONAIS DA TORRE DO TOMBO, 1551 apud SANTIAGO, 2012).

Segundo a autora, os caeiros seriam os responsáveis pelo preparo do aglomerante feito a partir de “pedras muito crespas e artificiosas para outras curiosidades e não nascem em pedreiras, mas acham-se soltas em muita quantidade. Estas pedras são sobre o leve por serem por dentro organizadas em alvéolas”. Tais pedras eram os corais, encontrados em abundância na área. Deste modo, a cal era preparada a partir de corais, e não a partir de rochas calcárias, como em Lisboa.

A cal hidratada tem grande capacidade para reter água em torno de suas partículas, conferindo à argamassa no estado plástico maior plasticidade e trabalhabilidade, além de permitir melhor controle da perda de água para o substrato no qual foi aplicada, melhorando sua aderência final (MELO, M. C. S., 2012).

As argamassas à base de cal vêm sendo empregadas com bons resultados para a conservação e restauração de edifícios históricos porque apresentam plasticidade, porosidade, permeabilidade, resistência mecânica, inércia térmica e durabilidade, quando bem executadas, aplicadas e mantidas, e ainda envelhecem sem provocar danos (CARVALHO, 2012). A utilização da cal em obras de restauração impõe domínio de sua tecnologia, para que se alcancem os resultados desejados (VEIGA, 2003a).

2.2.1 Técnicas de uso.

A cal é usada como aglomerante nas argamassas do patrimônio arquitetônico desde os tempos antigos. A seleção e a preparação do aglomerante, a extinção e a aplicação de argamassas de cal foram aprimoradas ao longo do tempo, a partir de tentativa e erro e esse conhecimento foi adquirido e repassado por gerações (CHAROLA; HENRIQUES, 1998).

Algumas décadas atrás a cal caiu em desuso e o conhecimento experimental (empírico) foi quase totalmente perdido, especialmente nos países desenvolvidos. Isto ocorreu devido a mudanças tecnológicas na construção e o uso generalizado de cimento como aglomerante. Naquela época, a substituição das argamassas de cal por argamassas de cimento no patrimônio arquitetônico tornou-se comum, criando novos problemas que não foram

previstos naquele momento. Em consequência disso, nas últimas décadas, a expertise do uso da cal ganhou novamente um papel importante na conservação do patrimônio arquitetônico (FARIA; HENRIQUES; RATO, 2008). Apesar do aumento no uso da cal nas intervenções de restauro, existem desvantagens como a baixa resistência nas primeiras idades e tempos de pega e endurecimento lentos (LANAS; ALVAREZ, 2003).

A cal é obtida a partir da calcinação da rocha calcária com altas porcentagens de carbonato de cálcio, do qual é obtido o óxido cálcio (CaO). A cal viva é muito reativa em a presença de água e não pode ser usada antes de ser transformado em hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) pela reação com água (FARIA; HENRIQUES; RATO, 2008).

Estes autores ressaltam que é uma tradição, há muito estabelecida, que a cal extinta deve ser usada apenas depois de um longo período de imersão em água. Esta tradição, no entanto, não era compatível com as modernas práticas de industrialização, permitindo assim um aumento progressivo de do uso de cal hidratada seca em pó pronta para uso. A despeito disso, a tradição de longos períodos de extinção da cal viva foi mantida e ainda pode ser vista em vários países, como a Itália ou o Reino Unido, onde a pasta de cal obtidas após diferentes períodos de extinção é comercializada, principalmente para uso em projetos de conservação.

A prática de extinção da cal, também é relatada por Fonseca (2016) quando afirma que para que pudesse ser utilizada nas construções, a cal virgem precisava ser hidratada ou ‘apagada’. Para isto, deveria ser combinada com água, transformando o óxido de cálcio em hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , conhecida como cal apagada, hidratada ou extinta. A cal deveria permanecer sob a água por períodos maiores que um ano, para que garantisse a extinção perfeita, evitando fissuras nos revestimentos onde fosse aplicada.

Souza (2013) ressalta a importância da extinção completa da cal, pois a presença de óxidos na cal hidratada, ocasionarão patologias ao ter sua hidratação tardia durante a secagem da argamassa no revestimento, visto que sua hidratação tem efeito expansivo, gerando os chamados "pipocamentos" do revestimento.

Sempre que argamassas de cal pura foram previstas, a bibliografia internacional e as práticas recomendam o uso de massas pasta de cal com grandes períodos de extinção. Melhor trabalhabilidade, em muitos casos realmente notáveis e um melhor desempenho geral são vantagens atualmente atribuídas a estes produtos, devido à diminuição das dimensões dos cristais de portlandita, um consequente aumento da superfície específica e mudanças morfológicas específicas sobre envelhecimento (HANSEN et al., 1999).

As técnicas de produção de cal levam à produção de Ca(OH)_2 , de diferentes tamanhos de cristais, dependendo de diversos fatores como temperatura queima, reatividade da

partícula e condições de extinção. Para fins de conservação, é importante caracterizar diferentes cales e as argamassas feitas com elas (PAVÍA; TREACY, 2006).

Em alguns países a cal pode ser comercializada em diferentes formas: cal hidratada seca em pó pronta para uso; cal viva em pó finamente esmagada, a qual precisa ser extinta, *in loco*, antes da utilização; cal viva padrão na forma em que é obtida após queima em estufa, para extinção *in loco*; e pasta de cal com períodos de extinção diferentes (FARIA; HENRIQUES; RATO, 2008).

Segundo Veiga (2003b), a utilização da cal como aglomerante quase único implicava um modelo de constituição multicamada, com funções específicas, sendo as camadas de regularização e proteção: emboço (também chamado de salpico; no Brasil, chapisco), reboco (no Brasil, emboço) e esboço (no Brasil, reboco); e as camadas de proteção, acabamento e decoração: barramento (ou guarnecimento), pintura (em geral mineral) simples ou de ornamentação (fingidos, pintura mural). As camadas de regularização e proteção eram constituídas por argamassas de cal e areia, eventualmente com adições minerais e aditivos orgânicos. Normalmente, as camadas internas tinham granulometria mais grosseira que as externas e a deformabilidade e a porosidade iam aumentando das camadas internas para as externas, promovendo assim um bom comportamento às deformações estruturais e à água, em que esta estrutura é, ainda hoje, considerada a mais adequada para rebocos feitos em obra.

Tradicionalmente, os revestimentos exteriores eram constituídos por duas camadas principais, com funções e espessuras distintas. A primeira, de regularização e proteção, era constituída pelo emboço (chapisco, no Brasil), mais grosseiro, que estabelecia o contato com a parede e constituía uma base de aplicação às camadas seguintes; depois pelo reboco (emboço, no Brasil), que era a camada intermediária de regularização, e pelo esboço (reboco, no Brasil), de preparação para o acabamento (VEIGA, 2003b).

2.3 FORMULAÇÃO DAS ARGAMASSAS.

As argamassas de revestimento são dosadas para atender a um conjunto de propriedades no estado fresco, pertinentes ao processo de aplicação e ao desempenho do sistema de revestimento no estado endurecido (BAUER et al., 2012).

A formulação de argamassas para restauração tornou-se cada vez mais importante nas últimas décadas. Isto porque com a deterioração das argamassas originais pelo intemperismo natural e pela ação corrosiva dos poluentes atmosféricos tem demandado sua substituição de forma indiscriminada e intensiva por argamassas de cimento. O uso de argamassas de cimento ou a base de polímeros se tornaram muito empregadas em obras de

restauro de construções históricas pela facilidade (pega e resistência inicial aceleradas) e porque acreditava-se serem mais resistentes que as argamassas tradicionais. Pelo contrário, o alto teor de sais solúveis e a compatibilidade limitada entre esses materiais rígidos e impermeáveis e os materiais originais das paredes (pedras e tijolos cerâmicos) resultam desempenho insatisfatório (ROSSI-DORIA, 1986).

Segundo Van Balen et al. (2005), para a formulação destas argamassas de reparo ou de substituição é necessário definir a que requisitos devem atender. O ponto inicial para a definição da mistura final é a caracterização da argamassa antiga e seu contexto histórico. Não basta apenas definir os requisitos técnicos relacionados aos materiais utilizados, nem tampouco apenas considerar-se o ambiente no qual está inserida, é também necessário conhecer aspectos filosóficos de como a intervenção em construções históricas devem ocorrer.

Os referidos autores apontam três passos a serem seguidos para a caracterização das argamassas antigas: documentação, análise de danos e projeto de intervenções. A documentação é o primeiro passo antes de qualquer intervenção sobre uma estrutura existente, histórica ou recente, em que se coleta informações para evidenciar a causa do dano e justificar qualquer proposta de intervenção. Esta fase é importante pois contribui para a determinação dos valores culturais da construção e também para a compreensão sobre o dano e sobre seus mecanismos de deterioração, o problema é que a maioria das construções históricas não possuem documentos de sua execução.

O próximo passo é o uso desta informação para desenvolver a estratégia de intervenção mais adequada para o patrimônio, ou seja, a intervenção mais compatível. Portanto, é importante no campo do patrimônio desenvolver primeiramente um fluxograma que vai da filosofia (abstrata) ao projeto da mistura (prático), o qual servirá de suporte para a definição dos aspectos funcionais e técnicos para as argamassas de reparo. A Figura 2 apresenta o fluxograma para a definição dos requisitos a serem atendidos pelas argamassas de reparo.



Figura 2 – Fluxograma de requisitos (Adaptado de VAN BALEN et al., 2005).

No campo filosófico, a autenticidade define porque o monumento é importante, a qual deve ser compreendida e preservada o quanto possível. O entendimento dos valores que norteiam as razões para que se considere um edifício ou um objeto como patrimônio e não um objeto comum são: a forma e *design*; materiais e estruturas; uso e função; tradições e técnicas; técnicas construtivas e padronização; espírito e sentimento (DOCUMENTO NARA, 1994).

No que diz respeito aos requisitos conceituais, as intervenções em edifícios históricos, por muito tempo, foram guiadas pelo conceito de reversibilidade, que embora seja o objetivo principal, nem sempre é possível (CARTA DE VENEZA, 1964).

Portanto, sob uma ótica mais realista, a introdução do conceito de compatibilidade ganha espaço juntamente com o de reparabilidade. Compatibilidade significa a introdução de materiais que não trarão consequências negativas. Reparabilidade significa que o tratamento conservativo (argamassa de reparo) atual não irá prejudicar ou impedir tratamentos adicionais ou complementares no futuro (TEUTONICO et al., 1997).

Então, qualquer intervenção em um prédio histórico deve ter como norte, para elaboração das dosagens de argamassas de reparo a compatibilidade entre o material antigo e o material de reparo. Logo, ações de conservação devem ser guiadas pelo conceito de compatibilidade e de reparabilidade, os quais foram propostos na Conferência de Berlim, em 1997. O significado de compatibilidade e reparabilidade conduz a uma argamassa que se comporta de modo similar às argamassas antigas e ao material de substrato e não cria, nem agrava um dano, fato que leva a definição de requisitos funcionais e técnicos: durabilidade, sustentabilidade e harmonização (VAN BALEN et al., 2005).

Para Papayianni (1994), durabilidade é um conceito de grande importância sob o ponto de vista econômico, pois as argamassas precisam ter resistência adequada ao intemperismo ou aos agentes agressivos. Hoje, restrições construtivas têm dificultado o uso de materiais tradicionais, porque proporcionam argamassas fracas com pega e endurecimento lentos (uma das desvantagens do uso da cal).

Sustentabilidade não era um termo conhecido nas sociedades antigas, contudo elas a praticavam no uso de materiais locais para suas construções, o que requer menos energia para a produção ou entrega. Materiais mais sofisticados com maior demanda por energia somente eram usados em últimos casos. Melhoras eram tentadas pela combinação com fibras e outros aditivos. Harmonização se refere à compatibilidade estética, não somente de materiais, mas de técnicas, procedimentos e contexto histórico (VAN BALEN et al., 2005).

Acerca dos requisitos funcionais, estes derivam das funções das argamassas na alvenaria e da função da alvenaria na estrutura. As argamassas devem assegurar a capacidade

de carga da parede; prevenir a penetração de água pela parede (impermeabilidade); contribuir para o aspecto estético; e contribuir para a durabilidade (GROOT; ASHALL; HUGHES, 2005).

Segundo estes autores, em se tratando dos requisitos técnicos, os valores de autenticidade, conceitos e requisitos funcionais devem ser definidos e traduzidos em requisitos técnicos, que auxiliarão na definição do projeto da argamassa de reparo. Os requisitos técnicos se baseiam na análise sistemática (química, física, mineralógica e de danos). Obtidos esses dados, o problema é como usá-los na concepção do projeto das argamassas de reparo, levando em conta aspectos conceituais e funcionais. As características técnicas mais decisivas para compatibilidade entre argamassa nova e antiga são conforme a seguir.

- Características superficiais: textura, cor, acabamento superficial.
- Composição: tipo de aglomerante, tipo de agregado e distribuição granulométrica.
- Resistência: à compressão, tração na flexão e aderência.
- Elasticidade: módulo de elasticidade, deformabilidade.
- Porosidade: porosidade total, massa específica, absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao vapor.
- Coeficiente de dilatação térmica.

Os requisitos afetos à resistência são critérios importantes para a compatibilidade e estão relacionados à tração na flexão e ao módulo de elasticidade, cuja propriedade afeta a deformabilidade da parede. A elasticidade é estimada com base na resistência à compressão.

Os requisitos funcionais de argamassas para construções históricas dependem de uma série de condições, as quais nem sempre são fáceis de harmonizar e alcançar. De modo geral, as argamassas de substituição ou de reparo devem proporcionar uma proteção eficiente aos substratos, de modo a evitar o desenvolvimento de processos que possam conduzir à degradação. As argamassas devem ser compatíveis com as paredes, do ponto de vista mecânico, físico e químico e, ao mesmo tempo, resistentes à sua própria degradação, particularmente no que se refere a sais solúveis.

Em se tratando das propriedades mecânicas, argamassas hidráulicas dosadas com maiores quantidades de agregado apresentam redução significativa em suas resistências. As argamassas de cal proporcionam maior ductibilidade, uma vez que apresentam menor relação entre as resistências à compressão e à tração (f_c/f_t). Argamassas hidráulicas apresentam maior resistência à compressão e menor resistência à tração (SILVA; FERREIRA PINTO; GOMES, 2015).

Os autores supracitados demonstram que as argamassas hidráulicas apresentam maior relação f_c/f_t , em relação às argamassas de cal (Figura 3), o que comprova o efeito deteriorativo da redução da ductibilidade, que leva à redução da capacidade de acomodação das deformações sofridas pela alvenaria. De sua pesquisa, apresentam resultados de $f_c = 0,45$ MPa e $f_t = 0,24$ MPa, para argamassa de referência de cal (A, 1:3, em volume), aos 28 dias de idade, o que leva a $f_c/f_t = 1,9$. Da mesma forma o fazem para argamassas de cal com substituição por percentuais ora de cal hidráulica (AH), ora de cimento (AC), cujos resultados são apresentados, com resultado máximo de $f_c = 24,90$ MPa e de $f_t = 4,80$ MPa, o que leva a $f_c/f_t = 5,2$. Estes autores se referem à compatibilidade como um dos mais complexos e subjetivos conceitos na restauração, assim como as definições de restauro compatível e argamassa de reparo compatível.

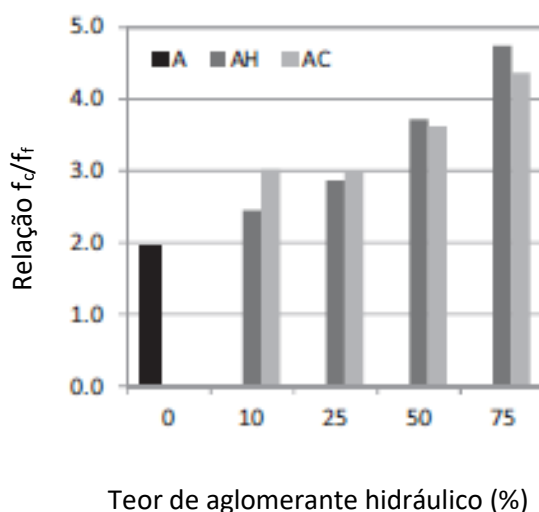


Figura 3 – Influência da constituição do aglomerante sobre a relação entre as resistências à compressão e à tração (Adaptado de SILVA; FERREIRA PINTO; GOMES, 2015).

Lanas e Alvarez (2003) ao pesquisar acerca das resistências mecânicas em argamassas de cal com traço 1:3, em volume, utilizando areias silicosas, apresentam seus resultados conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3- Resistências mecânicas das argamassas de cal (LANAS; ALVAREZ, 2003).

Argamassa de cal (1:3)	f_c (MPa)		f_t (MPa)	
	28 d	90 d	28 d	90 d
Ag - 1	0,80	1,20	0,22	0,40
Ag - 2	1,20	1,60	0,34	0,44

Faria, Henriques e Rato (2008) ao pesquisarem acerca das resistências mecânicas em argamassas de cal com traço 1:2, em volume, utilizando areias silicosas, apresentam seus resultados conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4- Resistências mecânicas das argamassas de cal (FARIA; HENRIQUES; RATO, 2008).

Argamassa de cal (1:2)	f_c (MPa)		f_t (MPa)	
	60 d	90 d	60 d	90 d
cq	0,70	1,09	0,39	0,63
ql63	0,24	0,35	0,15	0,23
ql44	0,34	0,47	0,17	0,25

Acerca do comportamento à água, o coeficiente de absorção capilar nas argamassas de cal ($C=0,139 \text{ Kg/m}^2\text{s}^{1/2}$) é maior, em comparação ao encontrado nas argamassas de cimento ($C=0,034 \text{ Kg/m}^2\text{s}^{1/2}$), assim como a quantidade de água absorvida também é maior. A prática da dosagem das argamassas de cal é muito diferente da prática de dosagem das argamassas de cimento. As argamassas de cal apresentam um período longo de cura e de secagem, eventualmente até alcançar um conteúdo de umidade crítica menor (SILVA; FERREIRA PINTO; GOMES, 2015).

Os autores citados afirmam que as argamassas hidráulicas têm o processo de secagem dividido em três estágios, com um curto período inicial de taxa cimentante. A evaporação da água de amassamento ocorre nessas argamassas, em seu interior, mais cedo que nas argamassas de cal, entretanto, nelas tem mais tempo para secar e isto ocorre de forma mais completa do que nas argamassas aéreas. A permeabilidade das argamassas de cal ao vapor de água é maior do que nas argamassas de cimento.

Nos momentos iniciais após a mistura e aplicação da argamassa sobre a alvenaria, ocorre uma grande modificação na estrutura interna do material em função do transporte de água da argamassa, que se movimenta em direção a estrutura porosa da alvenaria (blocos cerâmicos ou de concreto, por exemplo) por efeito de sucção capilar (absorção). Também ocorre movimentação da água para a superfície exposta causada pela evaporação superficial. A saída da água da argamassa nos momentos iniciais (algumas horas após a mistura) e nas idades iniciais (primeiros 7 dias) é extremamente importante, no desenvolvimento de propriedades do sistema de revestimento (como é o caso da aderência), e também no surgimento de patologias indesejáveis como por exemplo a fissuração por retração (BAUER et al., 2012).

Segundo Souza (2013), os traços mais comumente utilizados nas argamassas tradicionais de cal eram o 1:1, 1:2, 1:3 e 1:4, com variações nas adições de alguns materiais como pó de tijolo e pó de pedra como pozolanas, respectivamente, artificiais e naturais, e óleos, e tendo como aglomerante principal a cal maturada.

Loureiro (2016), ao analisar os traços de argamassas de edifícios históricos de Belém, a partir de amostras dos revestimentos do Arquivo Público do Estado do Pará, determinou que na proporção dos constituintes das argamassas, a relação aglomerante:agregado, em volume, varia de 1:3,52 (traço mais forte) a 1:5,84 (traço mais fraco), que são argamassas com pouca quantidade de finos, em cujas amostras detectou pequenas quantidades de frações argilosas (barro, saibro).

De acordo com Santos e Veiga (2012), os rebocos (no Brasil, emboço) eram compostos por ligantes com base em cal aérea e agregados provenientes dos próprios locais de construção e quando cuidadosamente preparados e aplicados, adquiriam resistências significativas e durabilidades elevadas.

As referidas autoras ressaltam que em uma intervenção sobre um edifício antigo, a primeira opção deve ser sempre a conservação dos revestimentos existentes, através de planos de manutenção e reparações pontuais. Contudo, observam que ao longo dos últimos anos tem-se verificado que as intervenções em revestimentos exteriores de edifícios antigos, ditas de reabilitação, com a alteração de materiais e de processos construtivos, nem sempre têm contribuído para melhorar o estado de conservação destes, sendo mesmo, frequentemente, responsáveis pela aceleração de diversos mecanismos de degradação.

As pesquisadoras alertam sobre o fato de que uma intervenção eficaz sobre os revestimentos de paredes de edifícios antigos exige um conhecimento aprofundado dos revestimentos existentes, da sua composição e do seu estado de conservação. E que, de acordo com o conhecimento atual, a seleção das soluções de revestimentos de substituição deve basear-se em critérios de compatibilidade com os elementos pré-existentes, tentando evitar, a aceleração da degradação dos materiais pré-existentes, em particular das alvenarias.

As autoras afirmam que o desempenho das argamassas depende em grande medida das propriedades da sua microestrutura que, por sua vez, é condicionada por diversos aspetos entre os quais se destacam: as características dos componentes utilizados (tipo de ligante e natureza mineralógica e granulometria do agregado); a formulação (proporção com que os componentes são misturados e quantidades de água de amassadura); a cura; os procedimentos de aplicação e o tipo de suporte.

Por fim, identificam como critérios de compatibilidade, um conjunto de requisitos que procuram estabelecer uma definição de argamassas compatíveis, dos quais se destacam:

- não contribuir para degradar os elementos pré-existentes, nomeadamente as alvenarias antigas;
- ter a capacidade de proteger as paredes;

- ser reversíveis, ou, pelo menos, reparáveis;
- ser duráveis (e contribuir para a durabilidade do conjunto); e
- não prejudicar a apresentação visual da arquitetura, nem descaracterizar o edifício.

Para a verificação dos dois primeiros critérios devem ser cumpridas exigências relacionadas com os seguintes aspetos:

- bom comportamento à água: oferecer alguma resistência à penetração da água até ao suporte e não dificultar a sua secagem;
- ter alguma resistência mecânica, mas não transmitir tensões elevadas ao suporte; e
- não introduzir sais solúveis ao suporte.

Os dois últimos critérios implicam:

- alguma resistência mecânica, mas inferior à dos tipos de suportes sobre os quais se prevê que possam vir a ser aplicados;
- aderência ao suporte suficiente para garantir a durabilidade, mas não tão grande que a sua extração possa afetar a alvenaria e a ruptura não pode ser coesiva no corpo do suporte;
- módulo de elasticidade relativamente pouco elevado;
- reduzida suscetibilidade à fissuração;
- bom comportamento ao gelo e aos sais solúveis existentes no suporte.

Lorenzetti (2010) observa que a substituição é uma técnica interventiva que deve ser utilizada quando todas as outras se demonstrarem inócuas. Cita Veiga (2006) com relação à compatibilidade entre materiais, quando afirma que, ao aplicar um revestimento de substituição em um edifício histórico, deve-se proceder ao estudo prévio do revestimento antigo, verificando sua composição, textura, cor, bem como a tecnologia de sua aplicação, pois as exigências funcionais para rebocos antigos são diferentes das exigências gerais dos rebocos modernos, uma vez que apresentam menor resistência mecânica, maior deformabilidade, aderência moderada e extensa, permeabilidade ao vapor de água mais elevada com maior capilaridade e teor reduzido de sais solúveis.

Na intervenção nas edificações históricas, um conceito fundamental é a compatibilidade. As argamassas de reintegração e recuperação não precisam repetir obrigatoriamente a composição original da argamassa antiga, mas devem ser formuladas de modo a compatibilizar-se com a estrutura e se adequar às suas necessidades, bem como

apresentar boa resistência aos sais solúveis e outros agentes de degradação (KANAN, 2008). A Tabela 5 mostra os requisitos a serem atendidos pelas argamassas de substituição para edifícios antigos como parâmetros de compatibilidade, propostos por Santos e Veiga (2012).

Tabela 5 - Requisitos estabelecidos para características mecânicas e comportamento à água das argamassas de substituição para edifícios antigos (adaptado de SANTOS e VEIGA, 2012).

Argamassa	Características mecânicas aos 90 dias (MPa)			R _{ad} 90 dias (MPa)	C (Kg/m ² .min ^{1/2})
	R _t	R _c	E		
Revestimento externo	0,2 – 0,7	0,4 – 2,5	2000 - 5000	0,1 – 0,3	1,0 – 1,5
Revestimento interno				Ruptura na argamassa	-
Requisitos adicionais a estabelecer se forem conhecidas as características das argamassas originais e do suporte, para revestimentos exterior e interior: as características mecânicas devem ser semelhantes às das argamassas originais e inferiores às do suporte; no teste de aderência, a ruptura nunca deve ocorrer no substrato; e a capilaridade e permeabilidade ao vapor de água devem ser semelhantes às argamassas originais e superiores às do substrato.					
R _t – Resistência à tração na flexão; R _c – Resistência à compressão; E – Módulo de elasticidade dinâmico por frequência de ressonância; R _{ad} – Resistência de aderência à tração; C – Coeficiente de capilaridade.					

A norma NBR 13281 (ABNT, 2005) classifica os tipos de argamassa de acordo com a finalidade, como argamassa para assentamento, para revestimento de paredes e tetos, para uso geral, para reboco, argamassas decorativas em camada fina e em monocamada. A referida norma prescreve que estas argamassas devem também cumprir os requisitos que estabelece e as classifica conforme características e propriedades que apresentam, determinadas pelos métodos de ensaio, conforme especificado nas Tabelas de 6 a 12. A norma determina que, de modo a considerar o desvio de cada ensaio, em todos os casos, para a determinação da classificação na sobreposição entre faixas, deve ser adotada a maior classificação.

Tabela 6 - Resistência à compressão - NBR 13281 (ABNT, 2005).

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

Tabela 7 - Densidade de massa aparente no estado endurecido - NBR 13281 (ABNT, 2005).

Classe	Densidade de massa aparente no estado endurecido Kg/m ³	Método de ensaio
M1	≤ 1200	NBR 13280 (ABNT, 2005)
M2	1 000 a 1 400	
M3	1 200 a 1 600	
M4	1 400 a 1 800	
M5	1 600 a 2 000	
M6	> 1 800	

Tabela 8 - Resistência à tração na flexão - NBR 13281 (ABNT, 2005).

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

Tabela 9 - Coeficiente de capilaridade - NBR 13281 (ABNT, 2005).

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

Tabela 10 - Densidade de massa no estado plástico - NBR 13281 (ABNT, 2005).

Classe	Densidade de massa no estado plástico Kg/m ³	Método de ensaio
D1	≤ 1400	NBR 13278 (ABNT, 2005)
D2	1 200 a 1 600	
D3	1 400 a 1 800	
D4	1 600 a 2 000	
D5	1 800 a 2 200	
D6	> 2 000	

Tabela 11 - Retenção de água - NBR 13281 (ABNT, 2005).

Classe	Retenção de água %	Método de ensaio
U1	≤ 78	NBR 13277 (ABNT, 2005)
U2	72 a 85	
U3	80 a 90	
U4	86 a 94	
U5	91 a 97	
U6	95 a 100	

Tabela 12 - Resistência potencial de aderência à tração - NBR 13281 (ABNT, 2005).

Classe	Resistência potencial de aderência à tração MPa	Método de ensaio
A1	$< 0,20$	NBR 15258 (ABNT, 2005)
A2	$\geq 0,20$	
A3	$\geq 0,30$	

Aos requisitos preconizados pela norma NBR 13281 (ABNT, 2005), estão associadas propriedades intrínsecas aos revestimentos de argamassa, nos estados plástico e endurecido. As propriedades das argamassas no estado plástico a serem observadas são a consistência, a trabalhabilidade, a retenção de água, a densidade de massa e o teor de ar incorporado. No estado endurecido, observa-se as resistências à tração na flexão e à compressão, a densidade de massa, o módulo de elasticidade e a resistência de aderência e comportamento à água.

Gomes (2008) define a consistência da argamassa como a resultante das ações de forças internas, como coesão e ângulo de atrito interno e viscosidade, que condicionam a mudança de forma da mistura, sendo esta propriedade afetada pelo teor de água, forma e textura dos grãos dos agregados e sua granulometria.

A trabalhabilidade é a principal propriedade das argamassas no estado plástico, a qual determina a facilidade como podem ser misturadas, transportadas e aplicadas aos substratos, mantendo a homogeneidade (ARAÚJO, 2014).

A trabalhabilidade é uma propriedade bastante subjetiva e de definição complexa, que depende da combinação de outras propriedades como a consistência, a plasticidade, a retenção de água, a coesão, a exsudação, a massa específica e a adesão inicial (CARASEK, 2007).

Freitas (2010) observa que em argamassas de revestimento, o conceito de trabalhabilidade também inclui a capacidade de proporcionar uma boa aderência ao substrato e

facilidade de acabamento superficial, influenciando deste modo em propriedades no estado endurecido.

A retenção de água é a propriedade pela qual a argamassa resiste em não perder água, tanto por evaporação, quanto para o substrato onde ela foi aplicada. No estado plástico interfere diretamente na consistência e, conseqüentemente, na trabalhabilidade das argamassas (MELO, F. C. A. C., 2012).

A densidade de massa ou massa específica, no estado plástico, varia com o teor de ar incorporado e com a massa específica dos materiais constituintes. Quanto mais leve for a argamassa, mais trabalhável será ao longo do tempo, reduzindo o esforço do operário na aplicação gerando, conseqüentemente, um aumento de produtividade na operação (MELO, M. C. S., 2012).

O teor de ar incorporado afeta diretamente a trabalhabilidade e os valores de resistência mecânica, porém pode beneficiar para uma melhor deformabilidade das argamassas. O teor de ar incorporado também contribui para o bloqueio da passagem de água para o interior da argamassa por capilaridade, pois as bolhas de ar incorporado tendem a interromper parte dos poros capilares das argamassas (FREITAS, 2010).

Carasek (2010) define a resistência mecânica como a capacidade apresentada pelos sistemas de suportarem solicitações de compressão, tração e cisalhamento. Assim, o revestimento de argamassa deve apresentar a capacidade de absorver pequenas deformações sem ruptura ou microfissuras, que poderiam comprometer sua aderência, estanqueidade e durabilidade.

Em geral, as resistências de tração e compressão variam com a quantidade dos materiais empregados. Reduzem-se com o aumento do teor de agregados empregado e/ou com o aumento da relação água/aglomerante. Outros fatores que interferem na resistência mecânica final dos revestimentos são a energia de amassamento e o uso de adições (MACIEL; BARROS; SABBATINI, 1998).

A densidade de massa, no estado endurecido, é a relação entre a massa e o volume aparente da argamassa. Esta propriedade indica a compacidade da proporção de mistura agregado/aglomerante e a distribuição granulométrica do conjunto e determina, indiretamente, o volume de vazios e a quantidade de água de amassamento perdida por evaporação (FREITAS, 2010).

A aderência da argamassa ao substrato é definida como a capacidade que a interface substrato/argamassa possui de absorver tensões tangenciais (cisalhamento) e normais (tração) a ela, sem romper-se (SABBATINI, 1984).

Araújo (2014) refere-se à aderência como uma das propriedades mais importantes na análise de desempenho de argamassas, por representar a possibilidade de fixação do revestimento ao substrato a qual foi aderido.

A aderência é influenciada pelas condições da base, como porosidade e absorção de água, resistência mecânica, textura superficial e pelas condições de execução do revestimento. A aderência da interface argamassa/substrato depende, ainda, da retenção de água, da consistência e do teor de ar aprisionado da argamassa (BREITENBACH, 2013).

A aderência da argamassa endurecida ao substrato é um fenômeno mecânico, devido à entrada da pasta aglomerante e argamassa nos poros e rugosidades do substrato onde foi aplicada. Quando a argamassa no estado plástico entra em contato com o substrato, parte da água penetra pelos poros e cavidades, onde ocorre, então, precipitação dos produtos de hidratação do cimento e da cal, exercendo então após algum tempo a ação de ancoragem à base (CARASEK, 2010).

O módulo de elasticidade avalia a resistência do material à deformação elástica, quanto maior o módulo de elasticidade, maior a rigidez do material. Esta propriedade afeta diretamente o desempenho da argamassa de revestimento, pois está ligado à capacidade de absorver deformações. Argamassas rígidas tendem a fissurar diante às tensões de tração (JOCHEM, 2012).

A permeabilidade é uma propriedade relacionada ao comportamento da argamassa à água e está relacionada à sua passagem pelos poros do revestimento, tanto no estado líquido, quanto no de vapor. O revestimento deve ser estanque à água, mas permeável ao vapor, tendo sua permeabilidade afetada pela quantidade e tipo de aglomerante utilizado, pela granulometria do agregado e pelas características da base (BAÍA; SABBATINI, 2000).

Portanto, para definição da mistura da argamassa de reparo ou de substituição, para que haja compatibilidade entre os materiais novo e antigo, é necessário que se caracterize o revestimento antigo, para a determinação de estratégias adequadas e de metodologia de intervenção que considere os aspectos filosóficos e os requisitos conceituais, funcionais e técnicos, em que estes requisitos dependem das propriedades do revestimento de argamassa nos estados plástico e endurecido.

2.4 SUBSTRATO DOS REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA.

O substrato utilizado para os revestimentos de argamassa deste trabalho foram os blocos cerâmicos oriundos dos escombros do casarão centenário localizado à Rua Santo Antônio, esquina com a Travessa Leão XIII, bairro da Campina, em Belém. A construção do

referido casarão data de 1884, que teve por finalidade abrigar uma importante drogaria da cidade. O edifício desabou, após incêndio, em 23 de junho de 2015, quando utilizado como estabelecimento comercial (Figura 4).



Figura 4 - Ruína do casarão centenário, após incêndio, à esquerda (fonte: <http://g1.globo.com>).

Os blocos cerâmicos apresentavam seção transversal em “L”, com furos na horizontal e eram assentados com argamassa, de modo a permanecerem encaixados (Figura 5).



Figura 5 - Blocos cerâmicos com seção transversal em “L”.

No espaço amostral de 75 blocos cerâmicos coletados, foram encontrados dois espécimes com a identificação do fabricante impressa em sua superfície (Figura 6). Na impressão consta o termo “PENACOVA”, o qual arremete a uma antiga fazenda local de senhores de escravos, homônima, na qual funcionava uma olaria, no final do século XIX. Também foram encontrados recortes de jornal de circulação local (Figura 7) da época, que fazem alusão à antiga olaria.



Figura 6 - Bloco cerâmico com identificação do fabricante.

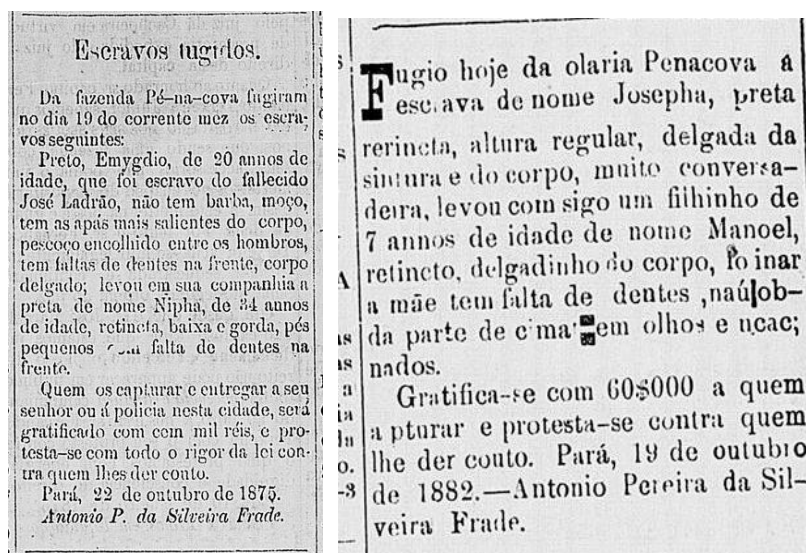


Figura 7 - Recortes de jornal da época.

Os blocos cerâmicos são sólidos porosos ricos em átomos de oxigênio, que se ligam aos átomos de hidrogênio formando o grupo hidroxila e atraem as moléculas de água, que se depositam dentro dos poros do material (TORRACA, 1986). A distribuição da água nos sólidos

porosos varia conforme o tamanho dos poros do material, pois o diâmetro dos poros influencia diretamente na força de sucção da água (FLORENZANO, 2016).

Os raios médios dos capilares da argamassa, em geral, são superiores aos dos capilares do substrato, portanto, o movimento de água se efetua no sentido da argamassa para o substrato (PAES, 2004). Nos momentos iniciais após a mistura e aplicação da argamassa sobre a alvenaria ocorre o transporte de água da argamassa para a estrutura porosa do substrato por efeito da sucção capilar, ou absorção. O transporte de água da argamassa para o bloco de alvenaria depende das características da estrutura porosa do mesmo (BAUER et al., 2012).

Há um intervalo crítico quanto ao diâmetro dos poros, oscilando entre 0,1 e 1 μ c, pois em poros bem finos a água não consegue entrar. A absorção de água relaciona-se diretamente com a porosidade do material, no entanto, mais importante que a quantidade é o tamanho dos poros e seu comportamento. Materiais com poros pequenos e cheios de ar apresentam baixa absorção, devido à difícil eliminação do ar para a penetração da água, enquanto materiais com poros médios absorvem mais rapidamente (FLORENZANO, 2016).

Quando os poros se apresentam interligados, formando uma rede contínua de vazios, a porosidade é do tipo aberta, em cuja rede interna os fluídos são transportados. Se os poros estiverem de forma dispersa, não haverá uma rede de comunicação entre eles e, dessa forma, a porosidade será fechada (FREITAS; TORRES; GUIMARÃES, 2008).

A aderência entre a argamassa e o substrato é um fenômeno essencialmente mecânico devido à penetração da pasta aglomerante, ou da própria argamassa, nos poros ou entre as rugosidades do substrato pela precipitação dos produtos de hidratação do aglomerante, exercendo ação de ancoragem da argamassa ao substrato (CARASEK, 1996).

A correta sucção de água da argamassa é de grande importância, uma vez que valores muito altos desse transporte para o bloco de alvenaria podem conduzir a menores valores da resistência de aderência (PAES, 2004). Situações em que a sucção é prejudicada, por exemplo, pela baixa porosidade do bloco, também levam a valores relativamente baixos na resistência de aderência (BAUER, 2005).

Para que haja compatibilidade entre as argamassas de substituição e os materiais pré-existentes (argamassas e substrato), a capilaridade e permeabilidade ao vapor de água destas argamassas devem ser semelhantes as das argamassas originais e superiores as do substrato (SANTOS; VEIGA, 2012).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.

PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO.

O programa experimental teve como objetivo avaliar as propriedades de duas argamassas de cal, nos estados plástico e endurecido, como material de reparo em obras de restauração de edifícios históricos e sua compatibilidade com o substrato de alvenaria de bloco cerâmico. Foram avaliadas as propriedades do substrato e das argamassas de substituição.

A pesquisa foi dividida em duas etapas, conforme fluxograma mostrado na Figura 8. Na primeira etapa foram realizadas caracterizações do material de substrato (blocos cerâmicos) e dos constituintes das argamassas, no caso a cal hidratada e a areia. Nos blocos cerâmicos foram determinadas as características geométricas, física (índice de absorção de água) e mecânica (resistência à compressão). Na cal hidratada realizou-se as caracterizações química, física e mineralógica e no agregado miúdo, a caracterização física.

Na segunda etapa foram investigadas as propriedades, tanto no estado plástico, quanto endurecido, de duas argamassas de cal. No estado plástico, foram determinados: o índice de consistência, a retenção de água, o teor de ar incorporado e a densidade de massa. No estado endurecido, as determinações foram: densidade de massa aparente, resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade dinâmico, absorção de água por capilaridade, coeficiente de absorção capilar e resistência de aderência à tração.

Todas as análises, seja de caracterização dos materiais ou de determinação das propriedades das argamassas foram realizadas no Laboratório de Engenharia Civil do ITEC/UFPa (LEC), no Laboratório de Caracterização Mineral (LCM) do IG/UFPa e no Laboratório da SUPERMASSA, indústria que fabrica argamassas para o mercado da Construção Civil.

As verificações foram realizadas em condições ambientais de laboratório com temperatura de 25 °C e umidade relativa de 65%. Utilizou-se os equipamentos de acordo como descritos nas respectivas normas de ensaio, os quais permaneceram no ambiente de laboratório, sob as condições especificadas, por 24h anteriores à execução dos testes. Os procedimentos dos ensaios, a determinação dos resultados e dos desvios e o tratamento estatístico para análise das respostas, também foram realizados conforme recomendado nas respectivas normas.



Figura 8 - Fluxograma das atividades do programa experimental.

3.1 PRIMEIRA ETAPA: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.

3.1.1 Aglomerante.

Nos experimentos deste trabalho de pesquisa foi utilizada, como aglomerante aéreo, a cal hidratada industrializada, na forma seca e pulverizada, do tipo cálcica, classe CH-I, disponível em sacos de 20 kg. A caracterização física da cal hidratada foi determinada através da massa específica real, da massa específica aparente e da área superficial específica de acordo com as prescrições das normas NBR NM 23 (ABNT, 2000), NBR NM 45 (ABNT, 2006) e NBR 16372 (ABNT, 2015), respectivamente.

A análise química foi realizada através da Espectroscopia de Fluorescência de Raios-x por dispersão de comprimento de onda. O equipamento utilizado foi o Espectrômetro WDS sequencial, modelo Axios Minerals, da PANalytical, com tubo de raios-X cerâmico

anodo de Ródio (Rh) e potência de 2,4 kW. A aquisição dos dados e o tratamento dos mesmos foram realizados com o software *SuperQ Manager* da PANalytical. A preparação das amostras para as análises foi realizada a partir de pastilhas fundidas, com a utilização de 1 g de amostra para 6 g de fundente (Tetraborato de Lítio – $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$).

A caracterização mineralógica da cal hidratada foi realizada através da Difração de Raios-X pelo método do pó. Em virtude de sua elevada finura, não houve a necessidade de pulverização da amostra. As análises foram realizadas em um Difratorômetro de Raios-X, modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), da PANalytical, com goniômetro PW3050/60 (θ / θ), tubo de Raios-X cerâmico e anodo de Cu ($K\alpha_1 = 1,540598 \text{ \AA}$), modelo PW3373/00 com foco fino (2200 W / 60 kV), e filtro $K\beta$ de Níquel. O detector utilizado é do tipo RTMS, X'Celerator. As condições instrumentais utilizadas: varredura de 3 a 75° em 2θ , voltagem de 40 kV, corrente de 30 mA, tamanho do passo de $0,02^\circ$ em 2θ , tempo/passo de 81 s, fenda divergente de $1/4^\circ$ e anti-espalhamento de $1/2^\circ$, máscara de 10 mm e movimentação circular da amostra com frequência de 1 rotação/s. A aquisição de dados foi feita com o software X'Pert Data Collector.

3.1.2 Agregado miúdo.

Para a composição das argamassas, o agregado miúdo utilizado nesta pesquisa foi a areia natural, proveniente de jazidas da região Nordeste do Pará, disponível no mercado da região metropolitana de Belém.

A determinação da composição granulométrica foi realizada conforme a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). A massa específica do agregado foi determinada de acordo com os procedimentos descritos na norma NBR NM 52 (ABNT, 2009). A massa unitária foi determinada de acordo com os procedimentos descritos na norma NBR NM 45 (ABNT, 2006).

3.1.3 Blocos cerâmicos.

Os blocos cerâmicos utilizados como corpos de prova para as caracterizações geométrica, física e mecânica desta pesquisa foram coletados dos escombros de um casarão centenário e apresentavam seção transversal em “L”, com furos na horizontal. Tomou-se o cuidado de selecionar visualmente os exemplares intactos. As argamassas de assentamento e de revestimento foram cuidadosamente removidas dos espécimes coletados. Em seguida, lavou-se com água corrente e, ao final, secou-se ao ar em ambiente de laboratório para serem disponibilizados à etapa de caracterização.

A caracterização consistiu em inspeção geral e por ensaios dos espécimes, conforme os procedimentos prescritos na norma NBR 15270-3 (ABNT, 2005b). A inspeção geral teve por objetivo a identificação do fabricante e das dimensões de fabricação, através da

presença da gravação destas informações em uma das faces externas dos treze blocos integrantes da amostra. Outro objetivo desta inspeção foi verificar, a partir de características visuais, a presença de defeitos sistemáticos, tais como quebras, superfícies irregulares ou deformações.

A inspeção por ensaios visou à determinação das características geométricas, física e mecânica. Foram utilizados treze blocos cerâmicos como amostras para as caracterizações geométricas e mecânica e outros seis blocos para a caracterização física, perfazendo o total de 19 amostras.

Realizou-se a caracterização geométrica sobre superfície plana e indeformável e procedeu-se às medições com utilização de paquímetro e esquadro metálicos. Determinou-se as medidas das faces (largura, altura e comprimento), espessura das paredes externas e septos, planeza das faces, desvio em relação ao esquadro e área bruta, conforme apresentado nas Figuras 9 a 12 e adaptado da referida norma.

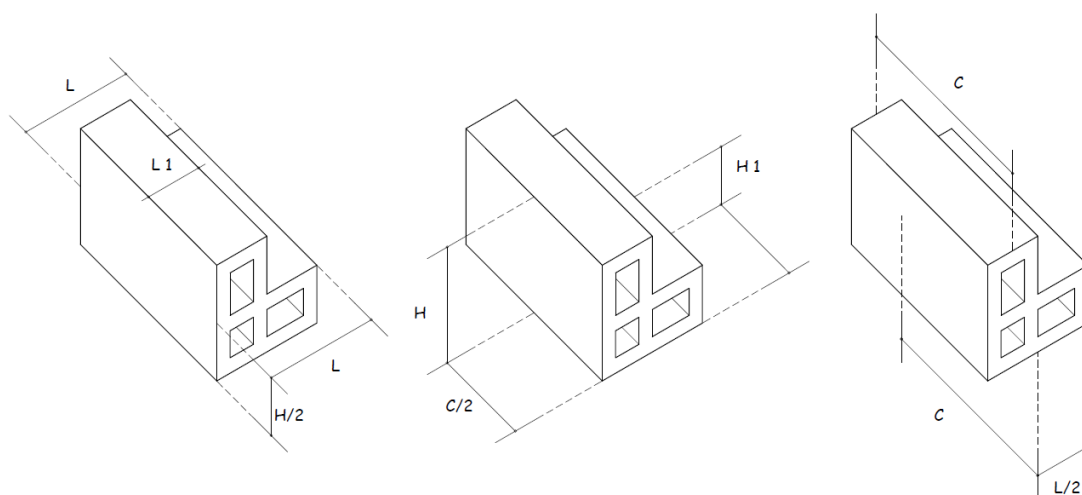


Figura 9 - Determinação das medidas das faces (L, L1, H, H1 e C).

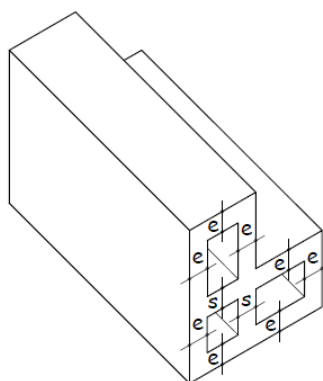


Figura 10 - Determinação das espessuras das paredes externas (e) e septos (s).

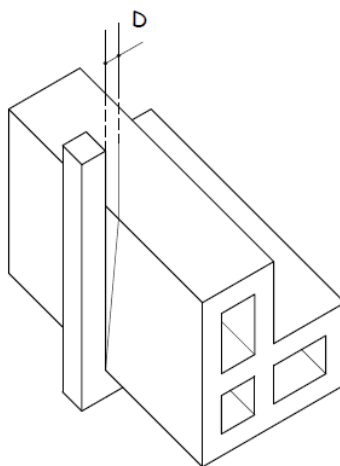


Figura 11 - Determinação do desvio em relação ao esquadro (D).

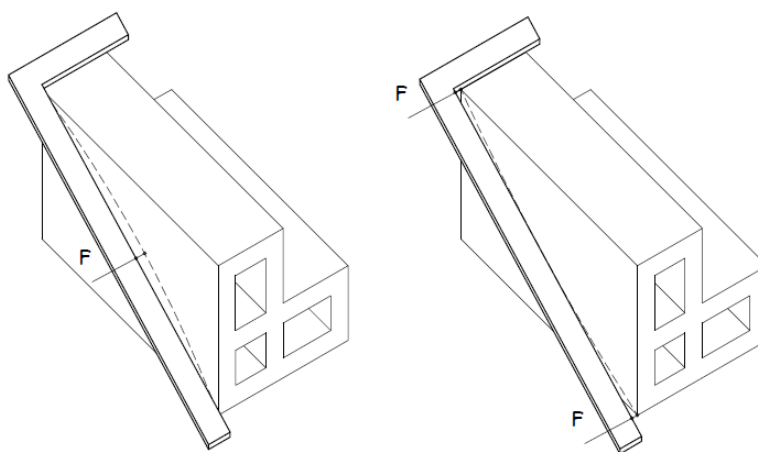


Figura 12 - Determinação da planeza das faces (F).

Realizou-se a caracterização física através da determinação da massa seca e do índice de absorção de água. Para isso, os corpos de prova foram secos em estufa a 105°C e tiveram medidas suas massas secas imediatamente após sua remoção da estufa. Após seu resfriamento, foram completamente imersos em um recipiente contendo água à temperatura ambiente, por 24 h. Decorrido o período anterior, os retirou-se da imersão, removeu-se a água remanescente e mediu-se suas massas úmidas. O índice de absorção de água foi determinado através da Equação 1 e de acordo com as prescrições da norma NBR 15270-1 (ABNT, 2005a).

Equação 1.

Onde:

$$AA_{(\%)} = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100$$

- AA% é o índice de absorção de água (%)
- m_u e m_s são as massas úmida e seca do corpo de prova, respectivamente (g).

A caracterização mecânica foi realizada através da determinação da resistência à compressão axial individual dos corpos de prova, para blocos de vedação com furos horizontais (ABNT, 2005a). Adotou-se como parâmetro a norma para blocos de vedação, tendo em vista a configuração dos furos, que são horizontais e perpendiculares à carga, apesar de terem a função estrutural na edificação.

Regulou-se a prensa de modo a aplicar, progressivamente, a velocidade de avanço de compressão de 1 mm/min, com direção do carregamento perpendicular aos furos horizontais, na face destinada ao assentamento. Regularizou-se com massa plástica as superfícies inferior e superior dos blocos cerâmicos em contato com os pratos da prensa. Comprimiu-se os blocos com a prensa e registrou-se as cargas para a definição da resistência à compressão axial, onde se considerou no cálculo como área, a média aritmética (ABNT, 2005b) das áreas das superfícies superior e inferior dos blocos em contato com os pratos da prensa (Figura 13).



Figura 13 – Ensaio de caracterização mecânica dos blocos em “L”.

3.2 SEGUNDA ETAPA: PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS.

Nesta etapa da pesquisa foram estudadas as propriedades das argamassas nos estados plástico e endurecido. Foram preparadas duas argamassas aéreas de substituição, denominadas AR-1 e AR-2, preparadas de acordo com os procedimentos da norma NBR 16541 (ABNT, 2016). As características e a composição das argamassas são apresentadas na Tabela 13. Ambas foram baseadas nos estudos preliminares da tese de doutorado de Loureiro (2016), nos quais realizou um levantamento de diversos traços de argamassas de revestimento e assentamento de edificações construídas em Belém nos séculos XVII, XVIII e XIX. A argamassa AR-1 foi preparada na proporção 1:3 (cal:areia) e a argamassa AR-2, na proporção 1:5 (cal:areia), ambas em volume. Nos referidos traços, não houve a adição de saibro devido às recorrentes patologias intrínsecas à utilização deste material em revestimentos de argamassa.

Tabela 13 – Composição das argamassas de substituição AR-1 e AR-2.

Argamassa	Traço		Consumo de materiais / m ³ de argamassa			
	Em massa (cal:areia)	Em volume (cal:areia)	a/c	Cal (g)	Areia (g)	Água (g)
AR-1	1:7,71	1:3	1,59	201,03	1.550,11	319,64
AR-2	1:12,81	1:5	2,80	123,09	1.577,07	344,66

A mistura das argamassas ocorreu em misturador mecânico (Figura 14a). Inicialmente, se desconhecia a quantidade de água de amassamento necessária para a mistura e, nestes casos, a norma NBR 16541 (ABNT, 2016) recomenda que seja utilizada a quantidade de água necessária para que a argamassa atinja o valor do índice de consistência em 260 ± 5 mm, determinado de acordo com a norma NBR 13276 (ABNT, 2016).

Entretanto, diante a necessidade de se obter uma argamassa de restauro trabalhável e independentemente do que é recomendado na referida norma, a quantidade de água para a mistura foi determinada experimentalmente, a partir de progressivas adições de percentagens de água em relação à massa de cal, até que alcançada a relação ideal entre água e aglomerante (a/c), na qual a argamassa apresentou melhor trabalhabilidade, demonstrada por sua facilidade de manuseio com a colher de pedreiro e estabilidade diante sua aplicação sobre substrato vertical (Figura 14b).

A trabalhabilidade, calculada empiricamente, foi a propriedade decisiva para a determinação da quantidade de água de amassamento dosada para as argamassas. Utilizou-se como água de amassamento para a produção das argamassas desta pesquisa, a água potável fornecida à região metropolitana de Belém, pela Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA).



(a)



(b)

Figura 14 - Misturador mecânico (a) e argamassas aplicadas em substrato (b).

3.2.1 Propriedades no estado plástico.

3.2.1.1 Índice de consistência.

A determinação do índice de consistência das argamassas de substituição obedeceu às prescrições da norma NBR 13276 (ABNT, 2016).

3.2.1.2 Retenção de água.

A retenção de água das argamassas foi avaliada pela metodologia proposta pela ABNT NBR 13277 (ABNT, 2005). Consistiu em determinar a quantidade de água removida de uma porção de argamassa contida em um funil de filtragem, o funil de Büchner.

3.2.1.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado.

Os procedimentos experimentais para o desenvolvimento deste ensaio foram realizados conforme descrito na norma NBR 13278 (ABNT, 2005).

A densidade de massa da argamassa no estado plástico foi calculada pela Equação 2, o resultado expresso em quilograma por metro cúbico (Kg/m³) e arredondo ao número inteiro mais próximo.

$$d = \frac{m_c - m_v}{V_r} \times 100 \quad \text{Equação 2.}$$

Onde:

- d é a densidade de massa da argamassa (Kg/m³)
- m_c é a massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa (g).
- m_v é a massa do recipiente cilíndrico vazio (g).
- V_r é o volume do recipiente cilíndrico (cm³).



Figura 15 - Ensaio de densidade de massa no estado plástico.

O teor de ar incorporado na argamassa foi calculado pela Equação 3, o resultado expresso em porcentagem e arredondo ao número inteiro.

$$A = 100 \times \left(1 - \frac{d}{d_t} \right) \quad \text{Equação 3.}$$

Onde:

- A é o teor de ar incorporado na argamassa (%).
- d é o valor da densidade de massa da argamassa (g/cm^3).
- d_t é o valor da densidade de massa teórica da argamassa, sem vazios (g/cm^3).

Nesta pesquisa, as argamassas foram dosadas e preparadas em laboratório, ou seja, não são industrializadas, por isso a densidade de massa teórica foi calculada pela Equação 4:

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\gamma_i}} \quad \text{Equação 4.}$$

Onde:

- d_t é a densidade de massa teórica da argamassa.
- m_i é a massa seca de cada componente da argamassa, mais a massa da água.
- γ_i é a massa específica de cada componente da argamassa.

3.2.2 Propriedades no estado endurecido.

Para cada argamassa de cal foram moldados 18 corpos de prova prismáticos de dimensões 4 x 4 x 16 cm, perfazendo um total de 36 CPs para as duas argamassas AR-1 e AR-2. Para cada combinação idade *versus* tipo de argamassa, foram empregados 06 corpos de prova prismáticos, sendo 03 para os ensaios de densidade de massa aparente, módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tração na flexão e à compressão axial. Os 03 restantes foram para o ensaio de absorção de água. Logo após a moldagem foram postos em cura ao ar nas condições de laboratório e permaneceram nos moldes até as datas de realização dos ensaios. Todas as propriedades no estado endurecido foram avaliadas para as idades de 28, 56 e 90 dias

3.2.2.1 Densidade de massa aparente.

Realizou-se o ensaio de densidade de massa das argamassas no estado endurecido aos 28, 56 e 90 dias de idade, com três corpos de prova prismáticos 4x4x16 cm, conforme norma NBR 13280 (ABNT, 2005). Moldou-se os corpos de prova os quais permaneceram nas formas até a data dos ensaios, em ambiente de laboratório com temperatura do ar de 25 °C e umidade relativa do ar de 65 %.

3.2.2.2 Módulo de elasticidade dinâmico.

Determinou-se o módulo de elasticidade dinâmico, através da propagação de onda ultrassônica das argamassas no estado endurecido, aos 28, 56 e 90 dias de idade, com três corpos de prova prismáticos 4x4x16 cm, conforme NBR 15630 (ABNT, 2009). Os corpos de prova foram moldados e mantidos nas formas até a data dos ensaios, em ambiente de laboratório com temperatura do ar de 25 °C e umidade relativa do ar de 65 %.

A onda foi emitida por equipamento devidamente calibrado, contendo circuito gerador-receptor, por meio de cabo coaxial, ao transdutor emissor. O transdutor emissor em contato com o corpo de prova, lhe transferiu a onda, a qual percorre seu comprimento e foi captada pelo transdutor receptor e seu cabo coaxial, sendo retransmitida ao equipamento. Os transdutores foram posicionados centralizados nas faces opostas (4x4 cm) do corpo de prova. Foi aplicado gel específico para transmissão ultrassônica nas superfícies de contato dos transdutores e do corpo de prova, de modo que ao serem comprimidos ocorreu o extravasamento do gel.

O equipamento mediu o tempo de propagação da onda, foram tomadas três leituras de tempo em cada corpo de prova e considerada a menor leitura. Foi calculada a velocidade de propagação de onda através da Equação 5. O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado através da Equação 6.

$$V = \frac{L}{t} \quad \text{Equação 5.}$$

Onde:

- V é a velocidade de propagação de onda ultrassônica, expressa em milímetros por microssegundos (mm/μs), arredondada à segunda casa decimal.
- L é a distância entre os postos de acoplamento dos transdutores, o comprimento do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).
- t é o tempo registrado pelo mostrador digital, expresso em microssegundos (μs).

$$E_d = v^2 \rho \frac{(1 - \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad \text{Equação 6.}$$

Onde:

- E_d é o módulo de elasticidade dinâmico, expresso em megapascal (MPa), arredondado à centena.
- V é a velocidade de propagação de onda ultrassônica, expressa em milímetros por microssegundos (mm/μs).

- ρ é a densidade de massa aparente do corpo de prova, expressa em quilogramas por metro cúbico (Kg/m³).
- μ é o coeficiente de Poisson, adotado nesta equação o valor de 0,2.

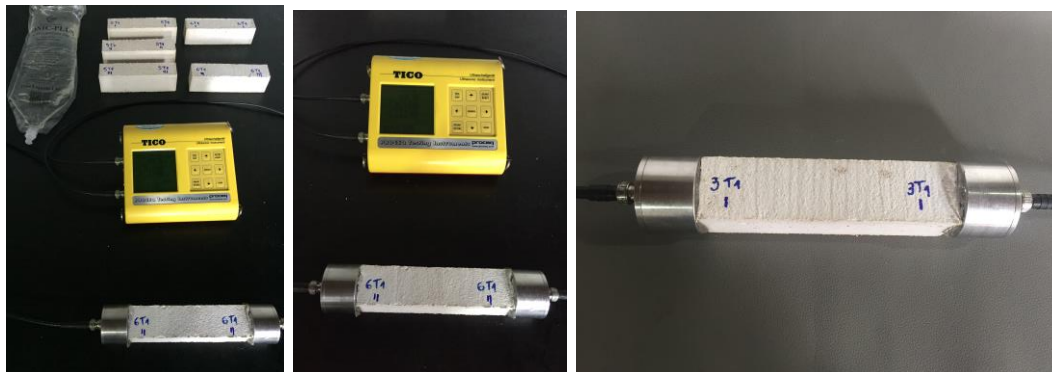


Figura 16 - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico.

3.2.2.3 Resistência à tração na flexão e resistência à compressão axial.

Realizou-se os ensaios de resistência à tração na flexão e de resistência à compressão axial, seguindo as prescrições da NBR 13279 (ABNT, 2005), nos mesmos três corpos de prova prismáticos utilizados no ensaio de densidade de massa aparente no estado endurecido (Seção 3.2.2.1 deste trabalho), aos 28, 56 e 90 dias de idade, pelos motivos explicados naquela seção. O equipamento utilizado foi a prensa elétrica digital 100T, modelo I-3025-B, da marca CONTENCO. Os corpos de prova foram moldados e mantidos nas formas até a data dos ensaios, em ambiente de laboratório com temperatura do ar de 25 °C e umidade relativa do ar de 65 %.

Para o ensaio de resistência à tração na flexão, o corpo de prova foi posicionado no dispositivo de apoio do equipamento de ensaio, conforme Figura 17, de modo que a face arrasada não ficou em contato com o dispositivo de apoio nem com o de carga. Foi aplicada a carga de (50 ± 10) N/s até a ruptura do corpo de prova. A resistência à tração na flexão foi calculada segundo a Equação 7.

$$R_f = \frac{1,5F_f L}{40^3} \quad \text{Equação 7.}$$

Onde:

- R_f é a resistência à tração na flexão, expressa em megapascal (MPa), arredondada ao centésimo mais próximo.
- F_f é a carga vertical aplicada no centro do prisma, expressa em newtons (N).
- L é a distância entre os suportes, expressa em milímetros (mm).

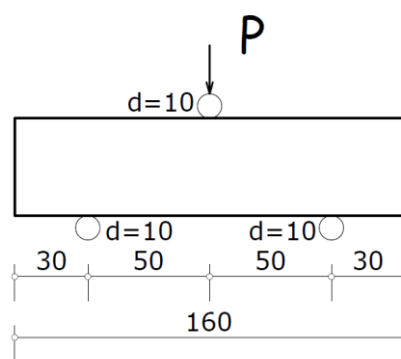


Figura 17 - Dispositivo de carga para determinação da resistência à tração na flexão.

Para o ensaio de resistência à compressão axial, foram utilizadas as metades dos três corpos de prova do ensaio de resistência à tração na flexão, serrados para as dimensões de um cubo de aresta 4 cm, posicionados sobre o dispositivo de apoio da prensa, de modo que a face arrasada não ficou em contato com o dispositivo de apoio nem com o de carga. A taxa de aplicação de carga foi de (500 ± 50) N/s até a ruptura do corpo de prova. A resistência à compressão axial foi calculada segundo a Equação 8.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad \text{Equação 8.}$$

Onde:

- R_c é a resistência à compressão, expressa em megapascal (MPa), arredondada ao centésimo mais próximo.
- F_c é a carga vertical aplicada no centro do prisma, expressa em newtons (N).
- 1600 é a área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga 40x40 mm, expressa em milímetros quadrados (mm²).

A NBR 13279 (ABNT, 2005) prescreve, ainda que deverão ser calculadas as resistências médias à tração na flexão e à compressão, arredondando o valor ao décimo mais próximo. Que o desvio absoluto máximo da série de corpos de prova é a diferença entre a resistência média e a resistência individual que mais se afaste da média para mais ou para menos e que o valor obtido deve ser arredondado ao décimo mais próximo.

A referida norma determina que na resistência à tração na flexão, quando o desvio absoluto máximo for superior a 0,3 MPa, deve ser calculada uma nova média, desconsiderando o valor discrepante, identificando-o no relatório de ensaio, com asterisco. O ensaio é considerado válido quando o resultado for constituído da média de no mínimo dois corpos de prova, caso contrário o ensaio deve ser refeito.

E por fim, que na resistência à compressão axial, quando o desvio absoluto máximo for superior a 0,5 MPa, deve ser calculada uma nova média, desconsiderando o valor discrepante, identificando-o no relatório de ensaio, com asterisco. O ensaio é considerado válido quando o resultado for constituído da média de no mínimo quatro corpos de prova, caso contrário o ensaio deve ser refeito.



Figura 18 - Ensaio de resistência à tração na flexão.



Figura 19 - Ensaio de resistência à compressão axial.

3.2.2.4 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade.

Procedeu-se ao ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade, seguindo as prescrições da NBR 15259 (ABNT, 2005), em três corpos de prova prismáticos 4x4x16 cm, nas idades de 28, 56 e 90 dias. Logo após a preparação das argamassas, os corpos de prova foram moldados e mantidos nas formas até a data dos ensaios, em ambiente de laboratório com temperatura do ar de 25 °C e umidade relativa do ar de 65 %.

Os corpos de prova tiveram uma das suas faces de 4x4 cm, a que ficou em contato com a água, lixada e limpa com pincel e, em seguida, foi determinada sua massa inicial. Foram posicionados com a face quadrada tratada sobre o suporte no recipiente de ensaio, evitando a molhagem de outras superfícies. O nível de água permaneceu constante a (5 ± 1) mm acima da face em contato com a água.

A partir da colocação dos corpos de prova em contato com a água, foram determinadas suas massas aos 10 e aos 90 minutos. Foram enxutos com pano úmido antes de

cada pesagem. Completada a pesagem, retornaram imediatamente para o recipiente de ensaio. A absorção de água por capilaridade, para cada tempo, foi determinada pela Equação 09. O coeficiente de capilaridade para cada corpo de prova foi determinado pela Equação 10.

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad \text{Equação 09.}$$

Onde:

- A_t é a absorção de água por capilaridade, para cada tempo, expressa em gramas por centímetro quadrado (g/cm^2), aproximada ao centésimo mais próximo.
- m_t é a massa do corpo de prova em cada tempo, expressa em gramas (g), aproximada ao centésimo mais próximo.
- m_0 é a massa inicial do corpo de prova, expressa em gramas (g).
- t corresponde aos tempos de 10 e 90 minutos, expressos em segundos (s).
- 16 é a área da face do corpo de prova em contato com a água, expressa em centímetros quadrados (cm^2).

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

Onde:

- C é o coeficiente de capilaridade, expresso em gramas por decímetro quadrado pela raiz quadrada de minuto ($\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$), aproximado ao décimo mais próximo.



Figura 20 - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.

PROPRIEDADES DO REVESTIMENTO NO SUBSTRATO.

Nesta pesquisa foi estudada a propriedade do revestimento no estado endurecido, aplicado ao substrato, os blocos cerâmicos em “L”, descritos na Seção 3.1.3 desta pesquisa. O objetivo foi avaliar se as propriedades das argamassas são afetadas de forma significativa

quando em contato com o substrato, dando indicativos da compatibilidade ou não com o material pré-existente. Considerou-se como medida padrão as determinações das propriedades das argamassas medidas nos corpos de prova, ao passo que as mesmas propriedades das argamassas medidas após 56 e 90 dias de aplicação sobre substrato de bloco cerâmico foi um indicador da compatibilidade ou não entre os materiais novo e pré-existente. A propriedade das argamassas avaliadas após aplicação no bloco cerâmico foi a resistência de aderência à tração.

Foram preparadas as mesmas argamassas aéreas de substituição AR-1 e AR-2, conforme explicado na seção 3.2. As argamassas foram aplicadas sobre o substrato através de um dispositivo que lança a argamassa sobre o bloco cerâmico, eliminando a variação da energia de lançamento por parte do pedreiro, principal causa da variação de desempenho do revestimento. O dispositivo, denominado de caixa de queda, consiste em uma espécie de caixa dotada de fundo móvel (alçapões), que ao serem abertos, despejam a argamassa sobre a superfície do bloco com energia potencial gravitacional padrão, minimizando a ocorrência de variações de aplicação do revestimento.



Figura 21 - Dispositivo mecânico, caixa de queda, para aplicação da argamassa no substrato.

Este procedimento de lançamento tem sua gênese na caixa de queda desenvolvida por Carasek (1996) e neste trabalho é uma adaptação do dispositivo original. A altura de queda da argamassa, ou seja, a distância entre o fundo da caixa e a face do bloco, foi de 50 cm, baseada nos estudos desenvolvidos por Paes et al. (2003), nos quais simula a energia de lançamento da argamassa, por parte do pedreiro.

Os blocos não receberam tratamentos, como chapisco, nem os revestimentos aplicados sofreram qualquer tipo de compactação ou acabamento, mas foram arrasados com régua metálica para garantir a sua planeza. A espessura final do revestimento após o arrasamento ficou em média com 2 cm. Os corpos de prova, ou seja, os blocos cerâmicos com revestimento de argamassa aplicado, foram mantidos sob cura ao ar no ambiente do laboratório desde a aplicação da argamassa até a data da realização dos ensaios.

3.2.2.5 Resistência de aderência à tração.

O ensaio de determinação da resistência de aderência à tração seguiu as prescrições da NBR 13528 (ABNT, 2010). Ensaiou-se nas idades 56 e 90 dias, 12 corpos de prova extraídos dos revestimentos de argamassa aplicados diretamente sobre os oito blocos cerâmicos em “L”. O revestimento de argamassa ficou com espessura de 2 cm garantida pela aplicação de um gabarito de compensado plastificado (Figura 22).



Figura 22- Bloco cerâmico com aplicação de gabarito e de argamassa de revestimento.

O revestimento foi cortado a seco, ortogonalmente a sua superfície, se estendendo aproximadamente 2 mm dentro do substrato, por meio da utilização de uma serra copo de seção circular de 50 mm de diâmetro, acoplada a uma furadeira elétrica. Em seguida, procedeu-se às etapas de colagem da pastilha, acoplamento do equipamento, aplicação da carga, avaliação da forma de ruptura e, por fim, à determinação da resistência de aderência (Equação 11), a partir da leitura da carga aplicada na extração do corpo de prova, no equipamento aferido.

$$R_a = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 11.}$$

Onde:

- R_a é a resistência de aderência, expressa em megapascal (MPa).
- F é a força de ruptura, expressa em newton (N).
- A é a área do corpo de prova, expressa em milímetros quadrados (mm²).



Figura 23 - Procedimentos de ensaio de resistência de aderência à tração.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.

4.1 MATERIAIS.

4.1.1 Aglomerante.

As caracterizações físicas e químicas da cal hidratada são mostradas na Tabela 14. A Figura 24 mostra o difratograma de raios-x da cal hidratada. A cal hidratada empregada no trabalho é uma cal cálcica, constituída essencialmente por portlandita ou hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 . Na DRX foi também detectado calcita, em proporções menores, proveniente da preparação da amostra, que ocasionou a carbonatação da portlandita. Na FRX constata-se a presença de cerca de 72% de CaO, próximo do consumo teórico para cal hidratada de 75%, assim como a perda ao fogo de 22% foi similar ao valor teórico de 25%, o que ratifica os resultados encontrados na DRX.

Tabela 14 - Caracterização física e química da cal hidratada CH-I.

	Métodos de Ensaio	Características determinadas	Resultados
Caracterização Física	NBR NM 23:2000	Massa específica real (g/cm^3)	2,21
	NBR NM 45:2006	Massa específica aparente (g/cm^3)	0,58
	NBR 16372:2015	Superfície específica Blaine (cm^2/g)	6,29
Caracterização Química	NBR 6473:2003	Perda ao fogo (%)	22,10
		Dióxido de silício (SiO_2) (%)	1,29
		Óxido de alumínio (Al_2O_3) (%)	0,00
		Óxido férrico (Fe_2O_3) (%)	0,22
		Óxido de cálcio total (CaO) (%)	71,88
		Óxido de magnésio (MgO) (%)	0,56
		Teor de umidade (%)	8,75
	NBR NM 25:2003	Óxido de sódio (Na_2O) (%)	0,07
		Óxido de potássio (K_2O) (%)	0,11

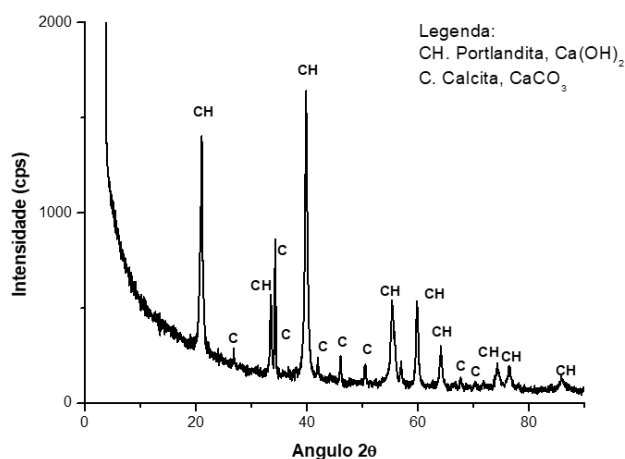


Figura 24- Difratograma de Raio-X da cal hidratada.

4.1.2 Agregado miúdo.

A composição granulométrica da areia natural é apresentada na Tabela 15. São também mostrados os resultados das características físicas: massa específica, massa unitária, zona de graduação e índice de vazios.

Tabela 15 - Granulometria e características físicas do agregado miúdo natural.

Abertura da peneira ABNT (mm)	Percentagem retida em massa (%)	Percentagem retida acumulada em massa (%)	Método de ensaio
4,8	0,10	0,10	NBR NM 248:2003
2,4	0,33	0,42	
1,2	1,05	1,48	
0,60	19,46	20,94	
0,30	69,99	90,93	
0,15	8,94	99,89	
Fundo	0,14	100,00	
Módulo de Finura	2,14 (Zona Utilizável)		NBR NM 248:2003
Diâmetro Máximo (mm)	1,2		
Massa Específica (Kg/dm³)	2,63		NBR NM 52:2009
Massa Unitária (Kg/dm³)	1,49		NBR NM 45:2006
Zona de Graduação	Areia Fina		NBR 7211:2009
Índice de Vazios (%) [1- (MU/ME)]x100	43		-

A areia empregada nesta pesquisa (Figura 25) é proveniente da extração de jazidas localizadas em um raio de 60 km de distância de Belém, na região nordeste do Pará. É classificada como fina, com maior concentração de grãos entre as peneiras 0,3 e 0,6 mm, de diâmetro máximo de 1,2 mm, granulometria contínua e de densidade normal.

Estas características são semelhantes às dos agregados pesquisados por Costa (2016), encontrados nas argamassas de assentamento de alvenaria e de revestimentos empregadas pelo engenheiro Francisco Bolonha no final do século XIX e início do século XX (Figura 26). Segundo o pesquisador, a hipótese mais provável é que as areias empregadas nas construções daquela época eram de extrações de jazidas compreendidas na porção Nordeste do Estado, na área da Formação Barreiras. As areias pesquisadas pelo referido autor se classificam como contínuas, no intervalo de finas a muito finas, apresentam módulo de finura variando de 0,6 a 1,7 e diâmetro máximo característico entre 1,2 a 2,4 mm, características da região nordeste do Pará. Além disso, o autor constatou que os agregados possuem grãos subangulosos e subarredondados de aspecto fosco e polido, caracterizando transporte por abrasão em meio aquoso, com deposição próxima às margens de rios, dos quais se pressupõe a origem destas

extrações. Essas constatações indicam que as jazidas do agregado empregado na pesquisa são as mesmas ou de características semelhantes às empregadas pelos construtores da *Belle Époque*.

Ao se comparar as areias pesquisadas por Costa (2016), utilizadas por Bolonha, no início do século XX e a areia empregada nesta pesquisa é observada sua semelhança (Figura 26), especialmente quanto ao comportamento de suas curvas de distribuição granulométrica. Isto é um aspecto importante em termos de compatibilidade, pois empregar agregados com características similares, como a distribuição granulométrica, é um dos requisitos técnicos para aumentar a compatibilidade das argamassas de substituição com os materiais pré-existentes (VAN BALEN et al., 2005).

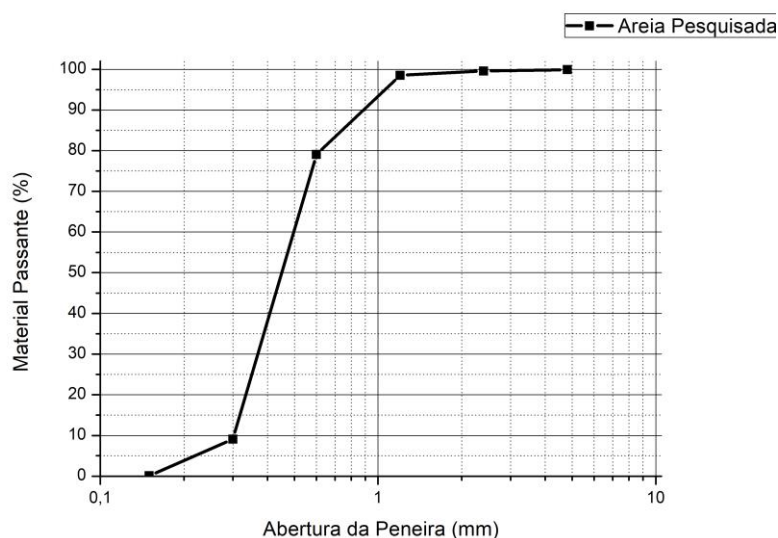


Figura 25- Distribuição granulométrica da areia empregada nesta pesquisa.

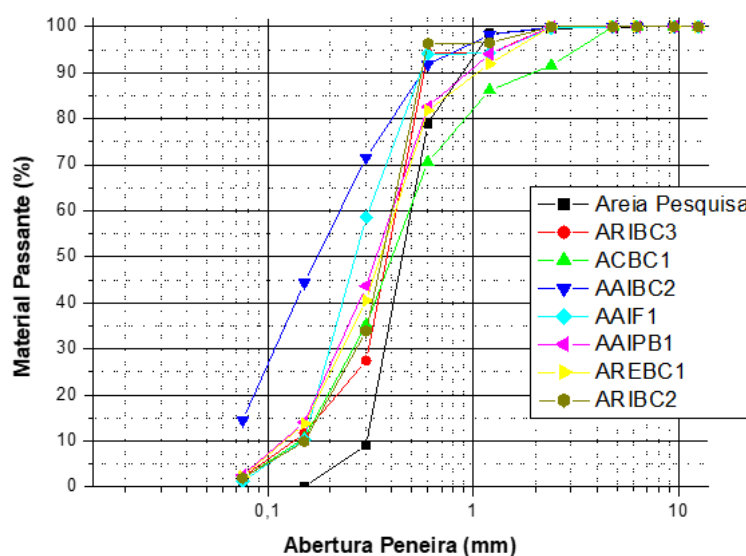


Figura 26- Comparativo entre as areias empregadas por Bolonha e a empregada na pesquisa.

A distribuição granulométrica contínua da areia utilizada nesta pesquisa favorece o empacotamento e, conseqüentemente, a resistência mecânica, acarretando incremento de densidade de massa da mistura, nos estados plástico e endurecido, além de incrementar o módulo de elasticidade (METHA; MONTEIRO, 1994). A continuidade entre a matriz de calcita e a fração do agregado está associada à distribuição granulométrica contínua, contribuindo para o aumento da resistência mecânica. Agregados com granulometria contínua, ou seja, com partículas de todos os tamanhos, distribuem melhor a cal entre os grãos (LANAS; ALVAREZ, 2003).

Agregados de arestas arredondadas favorecem à trabalhabilidade das argamassas (NETO; CÓRDOBA, 2012). A continuidade da areia desta pesquisa, seu maior o módulo de finura em relação às areias pesquisadas por Costa (2016) e a adequada trabalhabilidade das argamassas produzidas, favorecem a resistência de aderência do revestimento (ISAIA, 2010).

4.1.3 Blocos cerâmicos.

Os blocos cerâmicos foram caracterizados, respectivamente, conforme requisitos e métodos de ensaio das normas NBR 15270-1 (ABNT, 2005a) e NBR 15270-3 (ABNT, 2005b), não para sua aceitação ou recusa, pois quando fabricados não eram regulamentados por estas normas, mas por serem o substrato das argamassas desta pesquisa, tornando esta caracterização relevante. Após a realização dos procedimentos de inspeção geral, a Tabela 16 apresenta as conformidades (C) e não conformidades (NC) dos mesmos, acerca da identificação do fabricante e das medidas de fabricação. Da mesma forma, a Tabela 17 o faz referente às características visuais. A caracterização geométrica é apresentada na Tabela 18, a física, na Tabela 19 e a mecânica, na Tabela 20.

Tabela 16 - Identificação dos blocos cerâmicos – NBR 15270-3 (ABNT, 2005b).

CP N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
C / NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC

C – Conforme. NC – Não conforme.

Tabela 17 - Características visuais dos blocos cerâmicos – NBR 15270-3 (ABNT, 2005b).

CP N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Quebra	x	x	x			x			x	x	x	x	x
Superfícies irregulares	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Trincas					x								x
C / NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC

C – Conforme. NC – Não conforme.

Tabela 18 - Caracterização geométrica dos blocos cerâmicos – NBR 15270-3
(ABNT, 2005b).

CP N°	Medidas das faces (mm)					Septos (mm)	Paredes externas (mm)	Desvio esquadro (mm)	Planeza das faces (mm)	Área bruta (cm²)	C/NC
	L	L1	H	H1	C						
1	148	80	156	75	230	20	23	5	0	340,4	NC
2	141	71	152	78	220	18	20	0	0	310,2	NC
3	140	72	158	79	226	23	23	0	2	316,4	NC
4	144	74	157	79	218	18	19	2	3	313,9	NC
5	143	74	157	80	226	20	23	2	3	323,2	C
6	153	76	141	73	217	21	21	1	1	332,0	NC
7	142	73	158	79	228	18	18	2	0	323,8	C
8	142	71	159	80	222	22	25	4	2	315,2	NC
9	134	71	163	78	224	25	18	5	3	300,2	NC
10	142	70	162	80	235	20	23	13	3	333,7	NC
11	145	73	158	80	230	16	18	4	2	333,5	NC
12	143	72	157	80	217	18	20	5	0	310,3	NC
13	160	81	141	73	228	23	19	5	2	364,8	NC
Média (mm)	144	74	155	78	225	20	21	4	2	324,4	-
Tolerância	Relação às medidas de fabricação ± 5 mm					≥ 6 mm	≥ 7 mm	≤ 3 mm	≤ 3 mm	-	-
	Relação à média das medidas ± 3 mm										
C – Conforme. NC – Não conforme.											

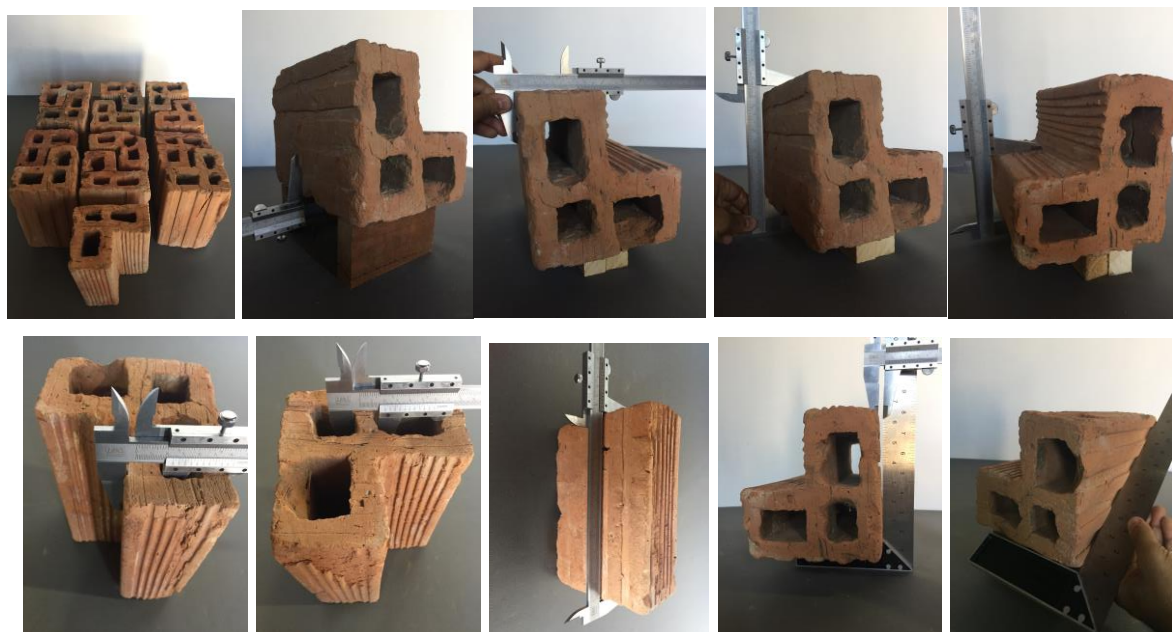


Figura 27 - Ensaio de caracterização geométrica dos blocos cerâmicos.

Tabela 19 - Características físicas dos blocos cerâmicos – NBR 15270-3 (ABNT, 2005b).

CP Nº		1	2	3	4	5	6
MASSA SECA		3996	4144	4224	4026	4170	4058
(g) ÚMIDA		4294	4490	5030	4432	4562	4490
8 ≤ AA ≤ 22 (%)		7,5	8,3	19,1	10,1	9,4	10,6
C/NC		NC	C	C	C	C	C

C – Conforme. NC – Não conforme.

Tabela 20 - Características mecânicas dos blocos cerâmicos – NBR 15270-3 (ABNT, 2005b).

CP Nº	Largura L1 (mm)	Largura L (mm)	Comprimento C (mm)	Área bruta 1 (mm²)	Área bruta (mm²)	Média das áreas brutas das faces de trabalho (mm²)	Carga (N)	Resistência à compressão ≥ 1,5 (MPa)	C/NC
1	80	148	230	18.400	30.040	26.220	50.900	1,9	C
2	71	141	220	15.620	31.020	23.320	65.400	2,8	C
3	72	140	226	16.272	31.640	23.956	62.800	2,6	C
4	74	144	218	16.132	31.392	23.762	75.100	3,2	C
5	74	143	226	16.724	32.318	24.521	90.900	3,7	C
6	76	153	217	16.492	33.201	24.847	64.500	2,6	C
7	73	142	228	16.644	33.376	24.510	61.300	2,5	C
8	71	142	222	15.762	31.524	23.643	56.200	2,4	C
9	71	134	224	15.904	30.016	22.960	86.300	3,8	C
10	70	142	235	16.450	33.370	24.910	48.900	2,0	C
11	73	145	230	16.790	33.350	25.070	57.900	2,3	C
12	72	143	217	15.624	31.031	23.328	89.700	3,8	C
13	81	160	228	18.468	36.480	27.474	61.500	2,2	C
Média: 2,8 MPa			Desvio Padrão: 0,7 MPa			Coeficiente de Variação: 24%			

C – Conforme. NC – Não conforme.



Figura 28 - Ensaio de resistência à compressão dos blocos em “L”.

Os blocos cerâmicos, diante as não conformidades apresentadas, não atenderam aos requisitos da norma NBR 15270-1 (ABNT, 2005a), quanto à identificação e características visuais e quanto às características geométricas. Todavia, os mesmos apresentaram resultados satisfatórios em suas características física e mecânica, sendo estes dois requisitos importantes para a determinação da compatibilidade entre o substrato e as argamassas de substituição. O resumo da caracterização dos blocos cerâmicos é apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 – Resumo das características dos blocos cerâmicos – NBR 15270-3 (ABNT, 2005b).

Determinações	Referência Normativa	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
L (mm)	Tolerância de ± 3 mm	144	6,15	4,26%
L1 (mm)		74	3,29	4,47%
H (mm)		155	6,61	4,26%
H1 (mm)		78	2,51	3,22%
C (mm)		225	5,41	2,41%
Septos (mm)	Mínimo 6 mm	20	2,48	12,29%
Paredes externas (mm)	Mínimo 7 mm	21	2,29	11,04%
Desvio de esquadro (mm)	Máximo 3 mm	4	3,24	87,85%
Planeza das faces (mm)	mm	2	1,21	74,99%
Área bruta (mm ²)	-	324,4	16,08	4,96%
Massa seca (g)	-	4.103	81,87	2,00%
Massa úmida (g)	-	4.550	229,93	5,05%
Índice de absorção de água	Entre 8% e 22%	11%	3,84%	35,39%
Resistência à compressão	Mínimo 1,5 MPa	2,8 MPa	0,63 MPa	23%

A heterogeneidade das amostras observada pelos valores elevados dos coeficientes de variação referentes ao desvio de esquadro, planeza das faces e absorção de água, assim como a dispersão média observada quanto à resistência mecânica estão relacionadas, provavelmente, ao processo de fabricação dos blocos cerâmicos, à qualidade da matéria prima empregada e ao controle da temperatura de queima da argila.

4.2 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS.

4.2.1 Estado plástico.

4.2.1.1 Índice de consistência.

Os resultados de plasticidade das argamassas de substituição obtidos no ensaio de consistência pela mesa de *Graff* são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Índices de consistência das argamassas - NBR 13276 (ABNT, 2016).

Argamassa	Designação	Volume (cal:areia)	água/cal	água/materiais secos	IC (mm)
AR-1	T-1	1:3	1,59	0,182	275±6
AR-2	T-2	1:5	2,80	0,203	271±4

O índice de consistência das argamassas, cujos valores médios foram similares, apresenta maior valor na composição de maior teor de aglomerante (AR-1), devido ao maior teor de pasta, a qual atua como uma espécie de lubrificante, reduz o atrito intergranular do agregado, melhora a mobilidade da massa e contribui com a plasticidade da argamassa. Independente disso, ambas argamassas apresentaram capacidade satisfatória de adesão inicial ao substrato, com baixo índice de reflexão, observado durante a execução do revestimento do painel.

As elevadas demandas por água, principalmente em AR-2, com maior quantidade de agregado, se devem ao índice de vazios do agregado e às características da cal hidratada empregada, no caso cálcica, pois este tipo de cal requer maior quantidade de água de amassamento para tornarem as argamassas fluidas (BOLORINO; CINCOTTO, 1997).

As argamassas de substituição, tanto AR-1 e AR-2, apresentaram excelente coesão, além de uma consistência pastosa e praticamente nenhuma exsudação foi observada, em razão da finura da cal hidratada e da distribuição granulométrica contínua do agregado. Apesar da diferença de consumo de aglomerante e de agregado entre as argamassas, praticamente não houve diferenças significativas com relação à consistência e a exsudação. Isto se deve a capacidade da cal hidratada em incorporar grandes quantidades de agregados em razão da área superficial específica de suas partículas.

4.2.1.2 Retenção de água.

Os resultados de retenção de água das argamassas de substituição são apresentados na Tabela 23. Apesar destas argamassas com cal hidratada apresentarem baixo consumo de aglomerante por metro cúbico, cerca de 200 kg para AR-1 e 121 kg para AR-2, os valores de retenção foram elevados, superiores a 90%.

Segundo Guimaraes (2002), as argamassas com cal hidratada proporcionam maior retenção de água por apresentarem cristallitos muito pequenos e com capacidade de reter em sua volta uma película líquida de água firmemente aderida.

Tabela 23 - Retenção de água nas argamassas de substituição - NBR 13277 (ABNT, 2005).

Argamassa	Designação	Volume (cal:areia)	Água/ argamassa anidra	a/c	Retenção de água (%)
AR-1	T-1	1:3	0,182	1,59	92±0
AR-2	T-2	1:5	0,203	2,80	90±0

Estes resultados demonstram que a incorporação desta cal hidratada às argamassas não é afetada pelas condições de sucção dos substratos de blocos cerâmicos, aspecto favorável do ponto de vista da compatibilidade.

A elevada retenção de água das argamassas controla a perda de água por sucção para o substrato, cujo gradiente de fluxo se deve aos poros finos dos blocos cerâmicos com dimensões menores que os das argamassas, evitando patologias relacionadas à perda de aderência do revestimento e à fissuração por retração. A retenção de água é importante propriedade do ponto de vista da formulação e dosagem das argamassas, tendo a cal e a distribuição granulométrica do agregado, com arranjo de grãos mais finos, como responsáveis pelos elevados valores desta propriedade, pois levam a menores intensidades no transporte de água (BAUER et al., 2012).

4.2.1.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado.

Os valores de densidade de massa e de teor de ar incorporado das argamassas AR-1 e AR-2 são apresentados na Tabela 24 e as classificam como argamassas como de peso normal. As densidades da massa no estado plástico foram muito similares, 2.045 e 2.016 kg/m³, e compatíveis com os percentuais de ar incorporado, 1,25% e 1,40%.

Tabela 24 - Densidades de massa e do teor de ar incorporado - NBR 13278 (ABNT, 2005).

Argamassa	Designação	Volume (cal:areia)	Água/ argamassa anidra	Densidade de massa (Kg/m ³)	Ar incorporado (%)
AR-1	T-1	1:3	0,182	2.045±7,28	1,25±0,35
AR-2	T-2	1:5	0,203	2.016±5,69	1,40±0,28

Em que pese a diferença de composição entre as argamassas, 1:3 e 1:5 em volume, as quantidades de materiais por metro cúbico de argamassa não diferem significativamente a ponto de alterar a densidade de massa. A AR-1 possui 201,03 kg de cal hidratada e 1550,11 kg de areia, enquanto que a AR-2 possui 123,09 kg de cal hidratada e 1.577,07 kg de areia.

A densidade de massa no estado plástico varia com o teor de ar incorporado e com a massa específica dos materiais constituintes e quanto menor a densidade de massa, mais trabalhável será a argamassa (MELO, M. C. S., 2012).

O teor de ar incorporado afeta diretamente a trabalhabilidade, contribui para melhor deformabilidade das argamassas e para o bloqueio da passagem de água para o interior da argamassa por capilaridade, pois as bolhas de ar incorporado tendem a interromper parte dos poros capilares das argamassas (FREITAS, 2010).

Contudo, AR-1 apresentou maior facilidade de manuseio, apesar de maior densidade de massa e menor teor de ar incorporado, devido ao maior teor de pasta, a qual reduziu o atrito intergranular da areia utilizada, atuando como espécie de lubrificante.

4.2.2 Estado endurecido.

4.2.2.1 Densidade de massa aparente.

Os valores de densidade de massa aparente das argamassas AR-1 e AR-2 são mostrados na Tabela 25. As densidades de massa no estado endurecido não diferiram entre as argamassas, como foi observado para a densidade de massa no estado fresco pelas razões expostas no item 4.2.1.3. As densidades de massa aparente no estado endurecido foram 13% inferiores em relação à densidade no estado fresco devido à saída de parte da água. Estudos experimentais apontam reduções entre 3 e 14% da densidade de massa endurecida em relação a densidade no estado fresco (CARASEK, 2010).

Tabela 25 - Densidades de massa aparente - NBR 13280 (ABNT, 2005).

Argamassa	Designação	Volume (cal:areia)	Água/ argamassa anidra	Média das densidades de massa aparente (Kg/m ³)		
				28 dias	56 dias	90 dias
AR-1	T-1	1:3	0,182	1.803±15	1.798±20	1.662±61
AR-2	T-2	1:5	0,203	1.774±6	1.767±24	1.752±7

Os valores encontrados de 1662 a 1803 kg/m³ para argamassa AR-1 e de 1752 e 1774 kg/m³ para argamassa AR-2, são ligeiramente superiores aos obtidos por Faria et al. (2008), que obtiveram para argamassas de cal e areia na proporção 1:2 (em volume), densidades de massa de 1550 a 1720 kg/m³ aos 60 dias e 1560 a 1690 kg/m³ aos 90 dias.

Freitas (2010) observou que a densidade de massa indica a compacidade da proporção de mistura agregado/aglomerante e a distribuição granulométrica do conjunto e determina, indiretamente, o volume de vazios e a quantidade de água de amassamento perdida por evaporação. Bauer et al. (2012) observaram que a distribuição granulométrica do agregado, com arranjo de grãos mais finos, leva a menores intensidades no transporte de água.

AR-1 possui menor quantidade de areia, material de maior massa específica na mistura, mas apesar disto apresentou maiores valores de densidade de massa nas primeiras

idades, devido ao maior teor de pasta preenchendo os vazios do agregado e à água de amassamento, ainda presente no corpo da argamassa, tendo em vista o arranjo de grãos mais finos do agregado não favorecerem a perda da água para o ambiente.

Corroborando com as afirmações de Freitas (2010) e Bauer et al. (2012), aos noventa dias de idade, diante a evaporação da maior parte da água, AR-2 apresentou maior densidade de massa, devido à maior proporção de mistura agregado/aglomerante. O índice de vazios do agregado, neste caso, não foi determinante, pela finura do agregado e assim vazios de menores volumes.

4.2.2.2 Resistência à compressão axial.

Os resultados de resistência à compressão axial dos prismas de argamassas são apresentados na Tabela 26. Os baixos valores de resistência à compressão enquadram estas argamassas de substituição na classe P2 da norma NBR 13281 (ABNT, 2005).

Tabela 26 - Resistência à compressão - NBR 13279 (ABNT, 2005).

Argamassa	Designação	Volume (cal:areia)	Água/ argamassa anidra	Média das resistências à compressão (MPa)		
				28 dias	56 dias	90 dias
AR-1	T-1	1:3	0,182	1,0±0,13	0,9±0,18	1,8±0,24
AR-2	T-2	1:5	0,203	0,9±0,11	1,1±0,29	2,0±0,22

As resistências das argamassas AR-1 e AR-2 não diferiram significativamente entre si para todas as idades avaliadas, com resultados variando de 0,90-1,00MPa aos 28 dias a 1,8-2,00MPa aos 90 dias.

Lanas e Alvarez (2003) obtiveram resultados semelhantes com traços 1: 3 e 1:5 (em volume), com cal hidratada cálcica em pó. As resistências a compressão variaram de 0,90 MPa para ambos os traços aos 28 dias e 1,8-2,00MPa aos 90 dias.

Silva et al. (2015) obtiveram resistência à compressão aos 28 dias de 0,48MPa para traços 1:3 (em volume). Faria et al. (2008) desenvolveram um programa experimental no qual avaliaram a influência do tipo de cal empregada. Para as argamassas de traço de 1:2 (em volume), as cales cálcicas em pó proporcionaram as maiores resistências mecânicas às argamassas, cerca de 0,46MPa aos 60 dias e 0,75MPa aos 90 dias, enquanto que nas argamassas com pasta de cal industrializada, as resistências variaram de 0,34MPa aos 60 dias para 0,47 aos 90 dias. A menor resistência destas argamassas com pasta se deve a maior quantidade de água empregada.

As argamassas de cal, de modo geral, apresentam menores resistências em comparação às argamassas hidráulicas e demandam anos para alcançar a carbonatação total. Entretanto, o período de tempo em que o máximo valor de resistência à compressão é alcançado não é bem estabelecido.

Segundo Degryse et al. (2002), as resistências máximas são obtidas aos 28 dias, dependendo do tipo de agregado empregado; ao passo que Lanas e Alvarez (2003) constataram acréscimos de resistências até 365 dias, dependendo do tipo de agregado empregado, mas principalmente da relação aglomerante/agregado. Quanto maior a relação aglomerante/agregado, no caso 1:1 e 1:2, maiores serão os ganhos de resistência ao longo do tempo. Para relações água/aglomerante menores, a partir de 1:3, os ganhos máximos de resistência ocorrem entre 90 e 180 dias. As constatações dos resultados de ATD/ATG dão indícios de que a presença do Ca(OH)_2 na argamassa é necessária para este comportamento, tendo em vista que uma determinada relação ótima $\text{CaCO}_3/\text{Ca(OH)}_2$ na argamassa é responsável pelo aumento de resistência, contudo as razões deste fenômeno não estão bem entendidas.

Veiga (2017) se refere a 1:3 como a proporção que assegura a melhor compacidade para uma areia bem graduada, devido ao melhor preenchimento dos vazios da areia pela cal. Lanas e Alvarez (2003) ressaltam que argamassas pobres em cal (1:4) têm baixa resistência mecânica, no entanto os mais ricos (1:1 e 1:2) não são necessariamente mais mecanicamente resistentes em comparação com 1:3.

Entretanto, o maior valor de resistência à compressão observado aos 90 dias de idade em AR-2, traço de menor teor de aglomerante, pode ter relação com o menor preenchimento dos vazios do agregado por aglomerante e com a perda de água para o ambiente, permitindo melhor acesso do gás carbônico e assim favorecendo à carbonatação e consequente ganho de resistência nesta idade.

O endurecimento das argamassas de cal hidratada ocorre por carbonatação, cujo processo exige a prévia dissolução do dióxido de carbono em água, para isso a carbonatação requer o contato da argamassa com CO_2 e precisa de um certo grau de umidade a fim de permitir a dissolução do gás, entretanto os poros da argamassa não devem estar saturados, de modo a garantir as condições para a difusão da solução aquosa de CO_2 na rede porosa (LAWRENCE et al., 2006; VAN BALEN; VAN GEMERT, 1994).

Moropoulou et al. (1997) associa a ocorrência da portlandita cristalina nas argamassas ao decréscimo da porosidade e aumento na resistência. Baseado nessas afirmações,

é possível que as argamassas estudadas estejam próximas de ter alcançado a maior resistência máxima já aos 90 dias.

As variações de resultados de resistência mecânica da argamassa de cal encontradas na literatura estão associadas ao tipo de cal empregada, (em pó ou em pasta), ao tipo de agregado (textura e distribuição granulométrica) e a composição (relação aglomerante/agregado), entre outras variáveis de controle. Os valores de resistências à compressão das argamassas AR-1 e AR-2 terem sido mais elevados em relação aos da literatura pode ser atribuído a uma melhor distribuição granulométrica das partículas do agregado miúdo empregado. Conclusões semelhantes foram obtidas por Lanas e Alvarez (2003).

Em suma, as resistências das argamassas AR-1 e AR-2 variaram entre 0,90 e 2,00 MPa, valores condizentes com o encontrado na literatura, ligeiramente inferiores à resistência à compressão dos blocos cerâmicos, de 2,8MPa, e dentro dos requisitos de propriedades mecânicas proposto por Santos e Veiga (2012), que estabelecem o intervalo de 0,40 a 2,5MPa para resistência à compressão para argamassas de reparo ou de substituição.

4.2.2.3 Resistência à tração na flexão.

Os resultados de resistência à tração na flexão dos prismas de argamassas são mostrados na Tabela 27. Os baixos valores de resistência à tração na flexão enquadram estas argamassas de substituição na classe R2 da norma NBR 13281 (ABNT, 2005).

Tabela 27 - Resistência à tração na flexão (ABNT NBR 13279:2005).

Argamassa	Designação	Volume (cal:areia)	Água/ argamassa anidra	Média das resistências à tração na flexão (MPa)		
				28 dias	56 dias	90 dias
AR-1	T-1	1:3	0,182	0,9±0,09	0,8±0,19	1,1±0,15
AR-2	T-2	1:5	0,203	1,0±0,19	1,1±0,10	1,2±0,22

As resistências das argamassas AR-1 e AR-2 não diferiram significativamente entre si para todas as idades avaliadas, com resultados variando de 0,90 - 1,00MPa, aos 28 dias, a 1,10 - 1,20 MPa, aos 90 dias. Lanas e Alvarez (2003) obtiveram resultados inferiores com traços 1: 3 e 1:5 (em volume), com cal hidratada cálcica em pó. As resistências à tração na flexão variaram de 0,35-0,40 MPa para ambos os traços aos 28 dias a 0,75-0,83MPa aos 180 dias. Silva et al. (2015) obtiveram resistência à compressão aos 28 dias de 0,24 MPa para traços 1:3 (em volume). Faria et al. (2008) obtiveram para argamassas de cal 1:2 (em volume) com cal cálcica em pó 0,29 MPa aos 60 dias e 0,33 MPa aos 90 dias, enquanto que nas argamassas com pasta de cal industrializada, as resistências variaram de 0,17 MPa, aos 28 dias, para 0,25 MPa

aos 90 dias. Os pesquisadores atribuem que a menor resistência das argamassas com pasta se deve a maior quantidade de água empregada.

Assim como ocorreu na resistência à compressão, não houve diferenças significativas de resistência entre as diferentes composições, AR-1 e AR-2. Acredita-se que a quantidade de cal hidratada começa a ser significativa, em termos de incrementos de resistência mecânica, a partir de composições muito elevadas com relação cal/agregado 1:1, conforme observado por Lanas e Alvarez (2003). Para composições intermediárias e baixas, como 1:2, 1:3, 1:4 e 1:5, as diferenças já não se tornam expressivas, sendo influenciadas por outros fatores como o tipo de cal e principalmente, a distribuição granulométrica dos agregados.

Lanas e Alvarez (2003) mencionaram a importância de agregados com a granulometria adequada e constataram que agregados com melhor distribuição granulométrica aumentaram substancialmente as resistências à tração na flexão, aproximadamente diferenças de 100% entre um agregado de granulometria descontínua e outro de granulometria contínua.

Os valores elevados de 0,90 a 1,2 MPa se devem possivelmente às características da areia empregada, com distribuição contínua das partículas de diferentes tamanhos, proporcionando uma melhor distribuição da pasta de cal nos espaços vazios entre as partículas de areia. As resistências foram superiores às recomendadas por Santos e Veiga (2012), que estabelecem o intervalo entre 0,20 e 0,70 MPa.

Além disso, conforme também observado na resistência à compressão axial, aos 90 dias de idade em AR-2, traço de menor teor de aglomerante, apresentou maior valor de resistência à tração na flexão, o que pode ter relação com o menor preenchimento dos vazios do agregado por aglomerante e com a perda de água para o ambiente, permitindo melhor acesso do gás carbônico e assim favorecendo à carbonatação e consequente ganho de resistência nesta idade.

Apesar das resistências à tração na flexão terem sido superiores ao intervalo considerado adequado em termos de compatibilidade, no caso 0,20 a 0,70 MPa, é necessário considerar as características dos materiais pré-existent, no caso as argamassas históricas e os blocos cerâmicos. No caso das argamassas, os agregados empregados nas argamassas históricas das construções da *Belle Époque* em Belém, do final do século XIX e início do século XX, são semelhantes e originários das mesmas jazidas, de mesma formação geológica, no caso, a Formação Barreiras, fato este comprovado pelas curvas de distribuição granulométrica das areias (figura da granulometria), que são similares, conforme visto no item 4.1.2 (caracterização do agregado). Em contrapartida, na época da *Belle Époque* a cal hidratada era empregada em pasta, o que demandaria mais água e uma provável redução da resistência mecânica.

Em suma, é necessário considerar os materiais de substrato e pré-existentes e suas características. Possivelmente esses níveis de resistência à tração na flexão, entre 0,9 e 1,2MPa, também sejam os alcançados pelas argamassas históricas de cal aplicadas nas edificações, o que se traduz que as argamassas de substituição AR-1 e AR-2 seriam compatíveis, mesmo com resistências à tração ligeiramente superiores ao critério genérico de SANTOS e VEIGA (2012). Os próprios pesquisadores afirmam que devem ser levadas em considerações as especificidades das construções locais para estabelecer com mais precisão os critérios técnicos de compatibilidade.

4.2.2.4 Módulo de elasticidade dinâmico.

Os resultados para o ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico, através da propagação de onda ultrassônica, realizado nos prismas de argamassas são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Módulo de elasticidade dinâmico - NBR 15630 (ABNT, 2009).

Argamassa	Designação	Volume (cal:areia)	Água/ argamassa anidra	Média dos módulos de elasticidade dinâmicos (MPa)		
				28 dias	56 dias	90 dias
AR-1	T-1	1:3	0,182	5.642±127	7.068±299	4.985±35
AR-2	T-2	1:5	0,203	6.365±388	7.906±329	7.751±128

Segundo Barra (2011), valores elevados de módulo de elasticidade caracterizam materiais rígidos, enquanto valores baixos, caracterizam materiais com elevada deformabilidade. O autor afirma que o módulo de elasticidade dinâmico em argamassas permite a percepção de sua capacidade de fissuração e o nível de deformação do material. O módulo de elasticidade é uma propriedade intrínseca aos materiais, dependente da composição química, microestrutura e falhas (poros e trincas), obtido da razão entre a tensão exercida e a deformação sofrida pelo material.

Os valores de módulo de elasticidade dinâmicos para as argamassas AR-1 e AR-2 são elevados, entre 5.642 e 7.906 MPa, aos 28 e 56 dias. Constata-se também uma redução no módulo de elasticidade aos 90 dias, mais pronunciado para a argamassa 1:3, alcançando 4.985 MPa. Os requisitos de compatibilidade estabelecidos por SANTOS e VEIGA (2012) variam entre 2.000 e 5.000 MPa. Sob este ponto de vista, as argamassas estão com rigidez elevada, com baixa capacidade de absorver as deformações e com isto gerar tensões de cisalhamento na interface entre os materiais pré-existentes e as argamassas de substituição. Contudo, se forem levados em consideração as especificidades dos materiais locais, é possível que as argamassas

históricas, executadas com agregados semelhantes possam apresentar módulos de elasticidade semelhantes aos obtidos experimentalmente.

Faria et al. (2008) obtiveram para argamassas de composição 1:2 (em volume) módulos de elasticidade dinâmicos bem inferiores aos obtidos na pesquisa, de 2.050 aos 60 dias e de 2.100 aos 90 dias para cal cálcica em pó. Quando empregaram pastas de cal, os módulos de elasticidade das argamassas reduziram ainda mais, 1.250 MPa aos 60 dias e 1700 MPa aos 90 dias.

É possível que os módulos de elasticidade elevados das argamassas AR-1 e AR-2 sejam em decorrência, em parte, à distribuição granulométrica do agregado miúdo, que proporciona um maior empacotamento e densificação das argamassas estudadas. Fato análogo ao que ocorreu nas resistências à compressão e à tração na flexão em comparação com os resultados da literatura.

Além disso, conforme também observado na resistência à compressão axial e à tração na flexão, aos 90 dias de idade em AR-2, traço de menor teor de aglomerante, apresentou maior valor de resistência à tração na flexão, o que pode ter relação com o menor preenchimento dos vazios do agregado por aglomerante e com a perda de água para o ambiente, permitindo melhor acesso do gás carbônico e assim favorecendo à carbonatação, consequente ganho de resistência nesta idade através da formação de cristais e assim incrementando o valor do módulo de elasticidade.

Uma outra abordagem relevante a respeito da compatibilidade dimensional para argamassas de reparo é a ductibilidade da argamassa. Esta propriedade está avaliada através da relação resistência à compressão e da resistência à tração na flexão (f_c/f_t). De acordo com Bricoli e Rovero apud Moropoulou et al. (2005), a relação (f_c/f_t) de materiais similares é proporcional ao módulo de elasticidade para medidas entre 1 e 6 meses. Os autores concluem que relações (f_c/f_t) baixas correspondem a módulos de elasticidade reduzidos no caso de argamassas aéreas de cal.

A Tabela 29 mostra as relações (f_c/f_t) para as argamassas AR-1 e AR-2 para as idades de 28, 56 e 90 dias. As relações (f_c/f_t) entre as argamassas foram semelhantes para as idades de 28 e 56 dias, entre 0,90 e 1,12. Contudo, houve um acréscimo aos 90 dias, passando o valor da relação (f_c/f_t) para 1,60, o que se traduz em uma progressiva redução da capacidade de acompanhar as deformações das argamassas. Contudo, os valores são menores em relação aos encontrados na literatura. Silva et al. (2015) encontrou uma relação (f_c/f_t) de 2,00 para argamassa de cal de traço 1:3 (em volume) e bastante inferior a 5,1 encontrado para argamassa de cimento Portland. Faria et al. (2008) obtiveram relações (f_c/f_t) de 1,60 a 2,34 para argamassas

de cal de traço 1:2 (em volume) com cal hidratada em pó e relações (f_c/f_t) de 1,50 a 2,00 para argamassas de mesmo traço produzidas com pasta de cal.

Tabela 29 - Relações (f_c/f_t) para as argamassas AR-1 e AR-2 nas idades de 28, 56 e 90 dias.

Argamassa	Designação	Volume (cal:areia)	Água/ argamassa anidra	f_c/f_t		
				28 dias	56 dias	90 dias
AR-1	T-1	1:3	0,182	1,11	1,12	1,63
AR-2	T-2	1:5	0,203	0,90	1,00	1,66

Em termos relativos ao encontrado na literatura, as argamassas AR-1 e AR-2 estariam satisfatórias. Contudo, em termos de comparação com a proposta de SANTOS e VEIGA (2012), as argamassas não atenderiam a este requisito técnico de compatibilidade.

Uma possibilidade para reduzir o módulo de elasticidade das argamassas seria o emprego da pasta de cal hidratada, que é disponível comercialmente. Esta solução também repercutiria num provável decréscimo de resistência à tração na flexão e de resistência à compressão.

4.2.2.5 Absorção de água e coeficiente de capilaridade.

Os resultados de absorção de água e do coeficiente de capilaridade nos prismas de argamassas são apresentados na Tabela 30. Segundo a norma NBR 13281 (ABNT, 2005), com estes valores, as argamassas se enquadram na classe C6, o que demonstra altos níveis de absorção de água.

Tabela 30 – Absorção de água e coeficiente de capilaridade - NBR 15259 (ABNT, 2005).

Argamassa	Designação	Volume (cal:areia)	Água/ argamassa anidra	Absorção de água após 10 min (g/cm^2)		
				Absorção de água após 90 min (g/cm^2)		
				Coeficiente de capilaridade ($\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$)		
				28 dias	56 dias	90 dias
AR-1	T-1	1:3	0,182	0,42±0,06	0,67±0,06	0,50±0,00
				1,17±0,06	1,65±0,11	1,29±0,06
				12,00±0,0	15,70±1,1	12,70±0,9
AR-2	T-2	1:5	0,203	0,50±0,00	0,63±0,00	0,67±0,06
				1,13±0,00	1,38±0,00	1,50±0,00
				10,00±0,0	12,00±0,0	13,30±0,9

Os coeficientes de capilaridade das argamassas AR-1 e AR-2 ficaram compreendidos entre 10 e 12 $\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$, aos 28 dias, 12 e 15,7 $\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$, aos 56 dias e 12,7 e 13,3 $\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$, aos 90 dias. Não houve uma tendência de redução no coeficiente de capilaridade dos 28 para os 90 dias, mas sim uma tendência de estabilização do transporte de

água. AR-1 apresentou menor coeficiente de capilaridade (Figura 29) devido a maior relação aglomerante/agregado, menor quantidade de água de amassamento e, com isso, melhor preenchimento dos vazios. Os requisitos de compatibilidade estabelecidos por SANTOS e VEIGA (2012) variam entre 10 e 15 $\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$. Sob este ponto de vista, ambas argamassas atenderam ao critério de compatibilidade quanto ao transporte de água.

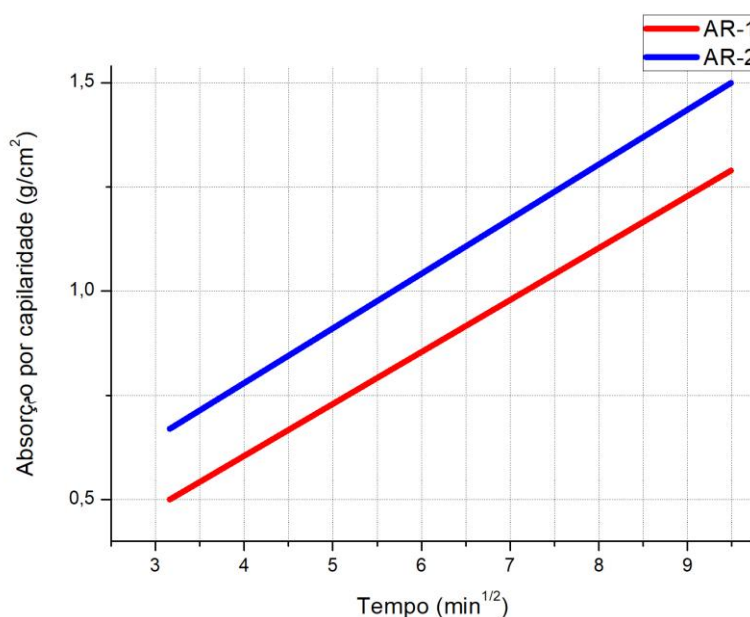


Figura 29 – Gráficos dos coeficientes de capilaridade das argamassas (90 dias de idade).

Em comparação com outros resultados na literatura, constata-se que os coeficientes de capilaridade das argamassas AR-1 e AR-2 foram bastante inferiores aos obtidos por Faria et al. (2008) em argamassas de composição 1:2, com cal hidratada em pó e em pasta. Os coeficientes de capilaridade variaram de 33 a 98 $\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$, aos 28 dias, para 20 a 85 $\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$, aos 90 dias. Os maiores valores foram obtidos para a cal em pasta, em razão da maior relação água/aglomerante destas argamassas.

Silva et al. (2015) obtiveram coeficientes de capilaridade de 10,80 $\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ aos 3 anos para argamassa de cal de composição 1:3 e relação água/cal de 1,52. Para argamassas de cimento Portland, de composição 1:3 e relação água/cimento 0,60, o coeficiente de capilaridade foi de 2,86 $\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$. Os referidos autores constataram que as argamassas de cal apresentaram uma taxa de secagem muito maior em relação as argamassas de cimento Portland, assim como uma liberação maior de água por evaporação, em decorrência do elevado coeficiente de difusidade ao vapor d'água, 1,47 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$.

Veiga (2017) afirma que argamassas com traços mais ricos em cal (1:1 e 1:2) podem apresentar maior porosidade aberta e coeficiente capilar do que a referência (1:3), pelo menos

no relativamente curto espaço de tempo (90 dias). Ressalta que a porosidade aberta é muito variável, até para a mesma proporção de cal:areia, dependendo, em grande parte, da água de amassamento e da distribuição granulométrica e do tipo de agregado.

4.2.2.6 Resistência de aderência à tração.

Os resultados para o ensaio de determinação da resistência de aderência à tração realizado nos revestimentos de argamassas são apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 - Resistência de aderência à tração - NBR 13528 (ABNT, 2010).

Argamassa	Designação	Volume (cal:areia)	Água/ argamassa anidra	Média das resistências de aderência à tração (MPa)	
				56 dias	90 dias
AR-1	T-1	1:3	0,182	-	0,35±0,03
AR-2	T-2	1:5	0,203	-	0,35±0,02

Os valores de resistência de aderência à tração das argamassas AR-1 e AR-2 foram iguais, 0,35 MPa, aos 90 dias. Este valor é ligeiramente superior ao requisito de compatibilidade estabelecido por SANTOS e VEIGA (2012), compreendido entre 0,1 e 0,3 MPa. Assim como ocorreu para as demais propriedades mecânicas (resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade), a resistência de aderência foi ligeiramente superior ao máximo estipulado para que uma argamassa seja compatível com o substrato. Atribui-se esse comportamento elevado à distribuição granulométrica contínua da areia e finura e qualidade da cal cálcica, alta pureza e finura.

Araújo (2014) refere-se à aderência como uma das propriedades mais importantes na análise de desempenho de argamassas. Carasek (1996) descreve esta propriedade como um fenômeno essencialmente mecânico devido à penetração da pasta aglomerante nos poros do substrato, exercendo ação de ancoragem da argamassa ao substrato. Breitenbach (2013) afirma que a aderência é influenciada pelas condições da base: porosidade e absorção de água, resistência mecânica, textura superficial, pelas condições de execução do revestimento; e das propriedades da argamassa: da retenção de água, da consistência e do teor de ar aprisionado.

Paes (2004) alerta sobre a importância da correta sucção de água da argamassa, uma vez que valores muito altos desse transporte para o bloco de alvenaria podem conduzir a menores valores da resistência de aderência. Bauer (2005) informa que a sucção é prejudicada pela baixa porosidade do bloco que leva a baixos valores na resistência de aderência.

Observou-se, a partir dos resultados, que a resistência de aderência não foi prejudicada pela reutilização dos blocos cerâmicos do casarão histórico, que provavelmente já

apresentavam alguma impregnação de pasta aglomerante em sua estrutura porosa. Além disso, que as condições do substrato relativas a sua porosidade, absorção de água, resistência mecânica, textura superficial e aplicação com a caixa de queda, bem como as argamassas, no tocante a suas propriedades. Este fato é indicativo de que indica que as argamassas estudadas se mostram eficientes e se enquadram em parâmetros favoráveis à execução de serviços de restauro de edifícios históricos da cidade Belém.

Apesar do valor de resistência de aderência ligeiramente superior ao indicado como critério de compatibilidade estabelecido pelos pesquisadores do LNEC, a configuração de ruptura, que ocorreu na sua totalidade na interface da argamassa com o substrato cerâmico (Figura 30). Vale ressaltar que Santos e Veiga (2012) estabelecem, além dos valores limites, como critério de compatibilidade, a ocorrência da ruptura da argamassa na interface, que então não deve ocorrer no substrato e, como não se conhece as características das argamassas originais, se pode levantar a hipótese de que as argamassas estudadas podem ser compatíveis com os materiais pré-existentes do antigo casarão e demais edifícios históricos desta cidade.



Figura 30 – Configuração de ruptura das argamassas.

4.3 COMPATIBILIDADE DO REVESTIMENTO COM O SUBSTRATO.

Nas Tabelas de 32 a 34 a seguir são apresentados os resumos dos valores determinados nos ensaios como resultados das propriedades estudadas nesta pesquisa.

Tabela 32 - Resultados dos ensaios das argamassas de revestimento, estado plástico.

Propriedade determinada	Argamassa	Método de ensaio	Resultados médios	Classificação
Índice de consistência	AR-1	NBR 13276 (ABNT, 2016)	275±6 mm	-
	AR-2		271±4 mm	-
Retenção de água	AR-1	NBR 13277 (ABNT, 2005)	92±0 %	U5
	AR-2		90±0 %	U4
Densidade de massa	AR-1	NBR 13278 (ABNT, 2005)	2.045±7,28 Kg/m ³	D6
	AR-2		2.016±5,69 Kg/m ³	D6
Teor de ar incorporado	AR-1		1,25±0,35 %	-
	AR-2		1,40±0,28 %	-

Tabela 33 - Resultados dos ensaios dos prismas de argamassas, estado endurecido (90 dias).

Propriedade determinada	Argamassa	Método de ensaio	Resultados médios	Classificação
Densidade de massa aparente	AR-1	NBR 13280	1.662±61 Kg/m ³	M5
	AR-2	(ABNT, 2005)	1.752±7 Kg/m ³	M5
Módulo de elasticidade	AR-1	NBR 15630	4.985±35 MPa	-
	AR-2	(ABNT, 2009)	7.751±128 MPa	-
Resistência à tração na flexão	AR-1	NBR 13279 (ABNT, 2005)	1,1±0,15 MPa	R2
	AR-2		1,2±0,22 MPa	R2
Resistência à compressão	AR-1	(ABNT, 2005)	1,8±0,24 MPa	P2
	AR-2		2,0±0,22 MPa	P2
Coeficiente de capilaridade	AR-1	NBR 15259 (ABNT, 2005)	12,7±0,9 g/dm ² .min ^{1/2}	C6
	AR-2		13,3±0,9 g/dm ² .min ^{1/2}	C6
Resistência de aderência à tração	AR-1	NBR 13528 (ABNT, 2010)	0.35±0,03 MPa	A1
	AR-2		0,35±0,02 MPa	A1

Tabela 34 - Resultados dos ensaios dos blocos cerâmicos.

Propriedade determinada	Método de ensaio	Resultados limites	Resultados médios
Índice de absorção de água	NBR 15270-3 (ABNT, 2005)	7,5 – 19,1 %	11±2,7 %
Resistência à compressão	NBR 15270-3 (ABNT, 2005)	1,9 – 3,8 MPa	2,80±0,54 MPa

A Tabela 35 mostra um comparativo das propriedades obtidas com as argamassas AR-1 e AR-2 e os requisitos técnicos estabelecidos para características mecânicas e comportamento à água das argamassas de substituição para edifícios antigos (SANTOS e VEIGA, 2012).

Tabela 35 – Comparação entre resultados obtidos na pesquisa e requisitos técnicos.

AR-1 e AR-2, 90 dias de idade		Requisitos de compatibilidade (SANTOS e VEIGA, 2012)
Propriedades	Resultados	
f_c (MPa)	1,80 a 2,00	0,40 a 2,50
f_t (MPa)	1,10 a 1,20	0,20 a 0,70
E (MPa)	4.985 a 7.751	2.000 a 5.000
f_c/f_t	1,63 a 1,66	2,00 a 3,57
C (g/dm ² .min ^{1/2})	12,7 a 13,3	10 a 15
Ra (MPa)	0,35	0,1 a 0,3

Os únicos requisitos plenamente atendidos pelas argamassas AR-1 e AR-2, em termos de compatibilidade, foram a resistência à compressão e coeficiente de capilaridade. Em termos de resistência à compressão, 1,80 e 2,00 MPa, as argamassas são compatíveis porque

apresentam resistência inferior a do bloco cerâmico (2,80 MPa) e dentro do intervalo sugerido por Santos e Veiga (2012).

Em relação à resistência à tração na flexão, possivelmente, os valores de ambas argamassas, superiores aos limites máximos dos requisitos de compatibilidade, foram influenciados pela distribuição granulométrica do agregado miúdo, pelo seu arranjo de grãos finos e pela qualidade da cal cálcica empregada.

Na determinação direta do modo de elasticidade através do equipamento de pulsos ultrassônicos, a argamassa AR-1 (4.985 MPa) se manteve dentro do intervalo recomendado, contudo tendendo ao limite superior de 5.000 MPa. Entretanto, de modo divergente, AR-2 superou em 50% o referido limite, também possivelmente influenciado pelas características supracitadas do agregado miúdo e do aglomerante. No entanto, a medida indireta de ductibilidade aponta valores reduzidos de f_c/f_t que indicam um material com boa capacidade absorver as deformações do substrato.

Ambas dosagens contribuíram para uma melhor distribuição do aglomerante no esqueleto granular das partículas da areia, proporcionando boa compacidade às argamassas, o que pode ser constatado pelos resultados de densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado.

A resistência de aderência das argamassas estudadas, apesar das diferentes relações aglomerante/agregado, se apresentaram iguais (0,35 MPa), ligeiramente superior ao limite recomendado, mas com ruptura ocorrida na interface argamassa/substrato. À luz do requisito de compatibilidade sugerido, ambas se mostram acima dos parâmetros, porém tiveram forma de ruptura que induz a se considerar a sua compatibilidade, já que a execução de serviços de restauro com estas argamassas, sob o aspecto desta propriedade, não promoveria danos à alvenaria histórica, além do fato de que não se conhecem as características das argamassas originais.

Os blocos cerâmicos apresentaram absorção de água dentro da faixa de valores preconizado e resistência mecânica superior a das argamassas, conforme recomendado por Santos e Veiga (2012).

Em relação à propriedade de transporte de água, o coeficiente de capilaridade ficou dentro do limite estabelecido, indicando que as argamassas tendem a absorver considerável massa de água, mas também permitem uma secagem rápida por conta da maior permeabilidade ao vapor, o que é extremamente favorável do ponto de vista da durabilidade, pois dificulta que o substrato permaneça constantemente úmido.

Um contraponto aos resultados superiores aos recomendados como critérios de compatibilidade é a possibilidade de as argamassas pré-existentis apresentarem valores semelhantes aos das argamassas de substituição AR-1 e AR-2, tendo em vista serem produzidas com areias de mesma procedência, o que do ponto de vista da compatibilidade é um resultado positivo. A dúvida recai na qualidade da cal empregada pelos antigos construtores.

Para que as argamassas atendessem aos critérios de compatibilidade deveriam apresentar ligeiras reduções nas propriedades mecânicas. Uma possibilidade seria reduzir o módulo de elasticidade das argamassas através do emprego da pasta de cal hidratada, que é disponível comercialmente. Esta solução também repercutiria num provável decréscimo de resistência à tração na flexão e de resistência à compressão, tendo em vista que as argamassas produzidas com pastas de cal possuem uma relação água/aglomerante superior em relação às argamassas com a cal em pó. Outra solução seria o emprego de agregado com melhor distribuição granulométrica e composições de argamassa com relações aglomerante/agregado mais baixas, como, por exemplo, 1:6 a 1:7, que possivelmente não repercutiria na trabalhabilidade da argamassa visto que a cal hidratada empregada é cálcica do tipo CH I e possui alta finura, conseqüentemente, apresenta alta capacidade de incorporação de areia.

Não houve praticamente diferenças nas propriedades obtidas entre as argamassas AR-1 (1:3) e AR-2 (1:5), independentemente do consumo de aglomerante, de agregado ou da relação água/aglomerante. Lanas e Alvarez (2003) também obtiveram resultados semelhantes para os traços 1:3 e 1:5, ambos em volume. Os autores constataram que composições com relações aglomerante/agregado mais elevadas como 1:1 e 1:2 ou até 2:1 é que de fato proporcionam diferenças significativas nas argamassas de cal. Argamassas com relações aglomerante/agregado de 1:3, 1:4 e 1:5 praticamente não apresentaram diferenças de propriedades mecânicas e de porosidade.

Em relação à propriedade de transporte de água, o coeficiente de capilaridade ficou dentro do limite estabelecido, indicando que as argamassas tendem a absorver considerável massa de água, mas também permitem uma secagem rápida por conta da maior permeabilidade ao vapor, o que é extremamente favorável do ponto de vista da durabilidade, pois dificulta que o substrato permaneça constantemente úmido.

Em suma, as argamassas não atenderam a todos os parâmetros, sendo o mais discrepante o módulo de elasticidade dinâmico. Portanto, é necessário que para as argamassas de cal serem compatíveis com o uso de cal cálcica do tipo CH I e das areias da Formação Barreiras, devem ser dosadas com maior incorporação de areia ou empregar a cal em pasta para relações água/aglomerante entre 1:3 e 1:5.

5 CONCLUSÕES.

As argamassas de substituição estudadas, AR-1 e AR-2, não atenderam plenamente aos requisitos de compatibilidade recomendados por Santos e Veiga (2012), pois seus valores determinados nos ensaios de resistência mecânica, em geral, se apresentaram superiores ao recomendado, sendo o módulo de elasticidade dinâmico o mais discrepante.

Os requisitos de compatibilidade atendidos pelas argamassas foram a resistência à compressão axial e o coeficiente de capilaridade. Com isso, as referidas argamassas se mostraram compatíveis quanto a esta propriedade mecânica e ao comportamento à água, cujos valores determinados ficaram dentro do limite recomendado.

O coeficiente de capilaridade, dentro do limite estabelecido, indicou que as argamassas tendem a absorver considerável massa de água, mas permitem secagem rápida, devido à maior permeabilidade ao vapor, o que é extremamente favorável do ponto de vista da durabilidade, pois dificulta que o substrato permaneça constantemente úmido.

Encontrou-se valores superiores aos limites máximos dos requisitos de compatibilidade nas demais propriedades mecânicas: resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e resistência de aderência, o que se atribui à distribuição granulométrica contínua do agregado miúdo, devido ao seu arranjo de grãos finos e pela alta qualidade da cal cálcica empregada, fatores que aumentam a compacidade da mistura e incrementam as propriedades mecânicas.

Os resultados de módulo de elasticidade apresentaram valores altos, mas compatíveis com as altas resistências mecânicas, contudo se apresentaram divergentes entre as proporções estudadas, onde o traço mais pobre atingiu maior valor, o que se atribui ao menor preenchimento dos vazios do agregado por aglomerante pela maior evaporação de água de amassamento para o ambiente, permitindo melhor acesso do gás carbônico e assim favorecendo à carbonatação, consequente ganho de resistência nesta idade através da formação de cristais e, assim, incrementando as resistências mecânicas e o módulo de elasticidade. Apesar disto, a medida indireta de ductibilidade proposta por Bricoli e Rovero apud Moropoulou et al. (2005) aponta valores reduzidos de f_c/f_t , que indicam um material com capacidade absorver as deformações do substrato.

As resistências de aderência das argamassas estudadas, apesar das diferentes relações aglomerante/agregado, se apresentaram iguais (0,35 MPa), ligeiramente superior ao limite recomendado, mas com ruptura ocorrida na interface argamassa/substrato, que à luz do requisito de compatibilidade sugerido se mostram acima dos parâmetros. Porém, o modo de ruptura na interface argamassa/substrato, sem danos no bloco cerâmico, sob o aspecto desta

propriedade, induz a se considerar a hipótese da compatibilidade destas argamassas com os materiais pré-existentes do antigo casarão e com os demais edifícios históricos da cidade de Belém, capital do estado do Pará.

Os blocos cerâmicos apresentaram absorção de água dentro da faixa de valores preconizada, resistência mecânica superior ao recomendado e superior a das argamassas, atendendo às recomendações de Santos e Veiga (2012).

A resistência de aderência medida decorre das condições favoráveis quanto à absorção dos produtos de hidratação do aglomerante por parte dos blocos cerâmicos, ao processo executivo de aplicação das argamassas com a caixa de queda e às propriedades apresentadas pelas argamassas, que corroboram as afirmações de Paes (2004) e Bauer (2005) e indicam a eficiência destas argamassas para a execução de serviços de restauro de edifícios históricos da cidade Belém.

Um contraponto aos resultados superiores aos recomendados como critérios de compatibilidade é a possibilidade de as argamassas pré-existentes apresentarem valores semelhantes aos das argamassas de substituição AR-1 e AR-2, tendo em vista serem produzidas com areias de mesma procedência, o que do ponto de vista da compatibilidade é um resultado positivo, recaindo a dúvida sobre a qualidade da cal empregada pelos antigos construtores. Com exceção do módulo de elasticidade dinâmico, não houve diferenças significativas nas propriedades obtidas entre as argamassas AR-1 e AR-2, independentemente do consumo de aglomerante, de agregado ou da relação água/aglomerante, nos estados plástico e endurecido.

As argamassas devem apresentar ligeiras reduções nas propriedades mecânicas para que atendam aos critérios de compatibilidade. Para isso, é necessário se reduzir o módulo de elasticidade através do emprego da pasta de cal hidratada, cuja solução também repercutiria provável decréscimo de resistência à tração na flexão e de resistência à compressão, tendo em vista o emprego de pastas de cal possuírem maior relação água/aglomerante em relação às argamassas com a cal em pó.

Outra solução seria o emprego de agregado miúdo com melhor distribuição granulométrica e composições de argamassa com relações aglomerante/agregado mais baixas, como, por exemplo, 1:6 a 1:7, que possivelmente não repercutiria na trabalhabilidade da argamassa visto que a cal hidratada empregada é cálcica do tipo CH I e possui alta finura, consequentemente, apresenta alta capacidade de incorporação de areia. Para que as argamassas de cal sejam compatíveis com o uso de cal cálcica do tipo CH I e das areias da Formação Barreiras, as mesmas devem ser dosadas com maior incorporação de areia, ou deve-se empregar a cal em pasta, para relações aglomerante/agregado entre 1:3 e 1:5.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

Com vistas à continuidade de pesquisas acerca do tema desta dissertação, são sugeridas abordagens para trabalhos futuros, de modo a contribuir com o aprofundamento dos estudos e do desenvolvimento da tecnologia de restauração de revestimentos de argamassa em edifícios antigos.

- Estudar as propriedades mecânicas, de estabilidade dimensional e de porosidade de argamassas com pasta de cal hidratada.
- Estudar composições de argamassas com menores teores de aglomerante, de 1:6 a 1:8.
- Estudar a compatibilidade de argamassas com incorporações de pozolanas com vistas a melhorar as resistências iniciais e reduzir o tempo de pega das argamassas de substituição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ALTÊ, R. R. A.; ALTÊ, M. T.; ALTÊ, G. A. Ação das intempéries e atividades antrópicas na degradação de monumentos, prédios históricos e obras de artes produzidas com material geológico. I Congresso Internacional de Hidrossedimentologia - Porto Alegre – RS, 2015.

ARAÚJO, N. N. de. Desempenho de argamassas de revestimento produzidas com agregados reciclados oriundos do resíduo de construção e demolição da grande Natal – RN. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

ARIZZI, A.; CULTRONE, G. *The difference in behaviour between calcitic and dolomitic lime mortars set under dry conditions: the relationship between textural and physical-mechanical properties*. Cem. Concr. Res. 2012;42:818–26.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11172: Aglomerantes de origem mineral. Rio de janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13277: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13528: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15270-1 – Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos. Rio de janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15270-3 – Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio. Rio de janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto - Requisitos. Rio de janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6473: Cal virgem e cal hidratada - Análise química. Rio de janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7175: Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 25: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de álcalis disponíveis. Rio de janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de janeiro, 2006.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM ISO 3310-1: Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação - Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de janeiro, 2010.

BAÍÁ, L. L.; SABBATINI, F. H. Projeto e execução de revestimento de argamassa. Coleção primeiros passos da qualidade no canteiro de obras. 1. ed. São Paulo: O Nome da Rosa, 2000. 82 p.

BARRA, A. T. P. Caracterização física e mecânica de argamassas não estruturais com agregados finos reciclados. Dissertação (Mestrado). Universidade de Lisboa. Lisboa, 2011.

BAUER, E. Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades. Brasília, SINDUSCON-DF, 2005.

BAUER, E.; PAES, I. N. L.; SILVA, M. N. B.; KRAUS, E. A influência do transporte de água no comportamento dos revestimentos de argamassa nos momentos iniciais pós-aplicação. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS. Coimbra, 2012.

BRASIL. Ministério da Cultura. Instituto do Programa Monumenta. Manual de elaboração de projetos de preservação do patrimônio cultural / Elaboração José Hailon Gomide, Patrícia Reis da Silva, Sylvia Maria Nelo Braga. Brasília: Ministério da Cultura, Instituto do Programa Monumenta, 2005.

BREITENBACH, S. B. Desenvolvimento de argamassa para Restauração utilizando resíduo do Polimento do porcelanato. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

BOLORINO, H. CINCOTTO, M. A. A influência do tipo de cimento nas argamassas. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2., 1997, Salvador. Anais... Salvador: ANTAC, 1997. p. 15-25.

CALDEIRA, A. B.; MINGUCCI, R.; GARAGNANI, S.; BARTOLOMEI, C.; MOURA, A. C. M.; SOUZA, A. G. A.; GAIANI, M.; CARBONARA, G. A conservação do patrimônio histórico, arquitetônico e urbano do conjunto da Igreja de São José de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. DISEGNARECON - Atti dei Seminari, v. 5, p. 81-86, 2012.

CARASEK, H. Aderência de argamassas a base de cimento Portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação. São Paulo, 1996. 285p. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo, IBRACON, 2007. 2v. 1712 p. C 26.

CARASEK, H. Argamassa. In: Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. Vol 2, 2. ed atualizada e ampliada. São Paulo: IBRACON, 2010.

CARVALHO, C. S. R. A pesquisa para conservação de superfícies arquitetônicas do museu casa de Rui Barbosa. Pós. Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP, v. 19, p. 238, 2012.

CHAROLA, A. E., HENRIQUES, F. A., *Lime mortars: same considerations on testing standardization*, in: R.C. McClung (Ed.), *Use and Need for Preservation Standards in Architectural Conservation*, ASTM STP 1355, 1998.

COSTA, F. M. A Tecnologia Estrutural do Engenheiro Francisco Bolonha em Belém-PA. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Belém, 2016.

CREA-SÃO PAULO. Patrimônio Histórico: como e por que preservar/ coordenação de: Nilson Ghirardello e Beatriz Spisso; colaboradores: Gerson Geraldo Mendes Faria [et al.]. -- Bauru, SP: Canal 6, 2008. Disponível em: http://www.creasp.org.br/arquivos/publicacoes/patrimonio_historico.pdf. Acesso em: 16/12/2016.

DEGRYSE, P.; ELSSEN, J.; WAELKENS, M. *Study of ancient mortars from Salassos (Turkey) in view of their conservation*. Cem. Concr. Res. 32 (2002) 1457–1563.

FARIA, P.; HENRIQUES, F.; RATO, V. *Comparative evaluation of aerial lime mortars for architectural conservation*. Journal of Cultural Heritage 9 (2008): 338 - 346.

FLORENZANO, L. S. Conservação de tijolo cerâmico em alvenarias históricas: subsídios para restauração do Sítio Histórico de Santa Leopoldina. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.

FONSECA, Daniele. B. Consolidação de revestimento de argamassa escaioladas de prédios históricos de Pelotas/RS, Brasil. Tese De Doutorado. Programa de Pósgraduação em Memória Social e Patrimônio Cultural do Instituto de Ciências Humanas. Universidade Federal de Pelotas, 2016.

FREITAS, C. Argamassas de revestimento com agregados miúdos de britagem da região metropolitana de Curitiba: propriedades no estado fresco e endurecido. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

FREITAS, V.; TORRES, M.; GUIMARÃES, A. Humidade Ascensional. 106 p. Porto, Portugal: FEUP edições, 2008.

GOMES, A. O. Propriedades das argamassas de revestimento de fachadas. Comunidade da Construção. UFBA, Salvador, 2008.

GOMES, M.I, DIAZ GONÇALVES, T., FARINA, P. (2012). *Evaluación de la influencia del contenido de agua en la trabajabilidad del mortero de tierra*. En: *Apuntes* 25 (2): 258 – 277.

GROOT, C.; ASHALL, G.; HUGHES, J. *Characterisation of Old Mortars with Respect to their Repair*. Final report of RILEM TC 167-COM. Edited by C. Groot, G. Ashall and J. Hughes (RILEM Report 28, RILEM Publications s.a.r.l., France, 2005; ISBN: 2-912143-35-7) [in press].

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

GUIMARÃES, J. E. P. Técnicas tradicionais de construção, anomalias e técnicas de intervenção em fachadas e coberturas de edifícios antigos. Tese de Mestrado de Engenharia Civil - Universidade De Trás-Os-Montes E Alto Douro. Portugal, 2009.

HANSEN, E.; TAGLE, A.; ERDER, E.; BARON, S.; CONNELL, S.; RODRÍGUEZ-NAVARRO, C.; VAN BALEN, K. *Effects of ageing on lime putty*. in: P. Bartos, C. Groot, J.J. Hughes (Eds.), *Proceedings of PRO 12 e International RILEM Workshop on Historic Mortars: Characteristics and Tests*, RILEM Publications, Paisley, 1999, pp. 197e207.

Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – IPHAN. <http://portal.iphan.gov.br/pagina/detalhes/103>. Acessado em 16/12/2016.

ISAIA, G. C. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo, IBRACON, 2010. 1v e 2v.

JOCHER, L. F. Estudo das argamassas de revestimento com agregados reciclados de RCD: características físicas e propriedades da microestrutura. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

KANAN, M. Manual de Conservação e Intervenção em Argamassas e Revestimentos à Base de Cal. Bras l de ConservaPrograma Monumenta, 2008.

LANAS, J.; ALVAREZ, J.I. *Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior*. Cement and Concrete Research 33 (2003) 1867–1876.

LAWRENCE, R.M.H.; MAYS, T.J.; WALKER, P.; D'AYALA, D. *Determination of carbonation profiles in non-hydraulic lime mortars using thermogravimetric analysis*. Thermochim. Acta 444 (2006) 179–189.

LORENZETTI, Elizete Terezinha. Análise das técnicas de intervenção em esquadrias de madeira e nos revestimentos argamassados da fachada de três edificações históricas dos séculos XIX e XX no estado do Paraná, sob o enfoque tecnológico e dos critérios de conservação patrimoniais. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, 2010.

LOUREIRO, A. M. S. Propriedades de argamassas de cal-metacaulim para restauração de alvenarias históricas, utilizando resíduos industriais da região amazônica. Exame De Qualificação De Tese De Doutorado. Programa De Pós-Graduação Em Geologia E Geoquímica. Universidade Federal Do Pará, 2016.

MACIEL, L. L.; BARROS, M. M. S. B.; SABBATINI, F. H. Recomendações para execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação interna e externa e tetos. São Paulo: EPUSP, 1998.

MELO, F. C. A. C. Análise de argamassas com substituição parcial do cimento portland por cinza residual de lenha de algaroba. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

MELO, M. C. S. Estudo de argamassas adicionadas de cinza de algaroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012.

MERCÊS, S. S.; TOURINHO, H. L. Z.; LOBO, M. A. A. . Locação Social no Centro Histórico de Belém: Investigação introdutória. Caderno CRH (UFBA. Impresso), v. 27, p. 299-311, 2014.

METTA, P.K., MONTEIRO, J.P.M. Concreto: estrutura, propriedade e materiais. São Paulo: PINI, 1994, 573 p.

MOROPOULOU, A.; BISCONTIN, G.; BAKOLAS, A.; BISBIKOU, K. *Technology and behavior of rubble masonry mortars*. Constr. Build. Mater. 11 (2) (1997) 119– 129.

MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A.; MOUNDOULAS, P.; AGGELAKOPOULOU, E.; ANAGNOSTOPOULOU, S. *Strength development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries*. Cem. Concr. Res. 27 (2005) 289–294.

NARA *Document on Auteticity*. Nara Conference on Autenticity in Relation to the World Heritage Convention, held at Nara, Japan (1994).

NETO, J. C. M.; CÓRDOBA, R.E. Resíduos da Construção Civil em Municípios de Pequeno Porte: Estudo de Caso de Olímpia-SP. In: XV SILUBESA Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2012, Belo Horizonte. Anais do XV SILUBESA, 2012.

PAES, I.N.L.; SOUZA, G. G.; BAUER, E. Desenvolvimento de sensores de umidade interna para utilização em revestimentos de argamassa. Norma Interna de Trabalho Nº 02. Universidade de Brasília. Laboratório de Ensaio de Materiais da UnB, 2003.

PAES, I.N.L. 2004. Avaliação do transporte de água em revestimentos de argamassa nos momentos iniciais pós-aplicação. Brasília, DF. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, 260 p.

PAPAYIANNI, I. “Durability Lessons from the Study of Old Mortars and Concretes”, ACI P.K. Mehta Symposium on Durability of Concrete, Nice, France, 1994.

PAVÍA, S.; TREACY, E. *A comparative study of the durability and behavior of fat lime and feebly-hydraulic lime mortars*. Materials and Structures 39 (2006) 391e398.

PRINCE, A. E. História, educação e patrimônio: a importância da educação patrimonial. In: XX INIC- Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, 2016, São José dos Campos. Anais do XX INIC- Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, 2016.

RIBEIRO, F.; VIEIRA, S. O zoneamento urbano como estratégia de preservação da paisagem cultural do centro histórico de Pelotas, RS. Revista de Geografia e Ordenamento do Território (GOT), nº 6 (dezembro). Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território, p. 283-303. 2014.

ROSSI-DORIA, P.R. *Mortars for restoration: basic requirements and quality control*. Materials & Structures, vol. 19, 114), 1986, 445-448.

SABBATINI, F. H. O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílico-calcária. São Paulo, 1984, Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, p. 298.

SANTIAGO, C. C. Argamassas tradicionais de cal. Salvador: EDUFBA, 2007.

SANTIAGO, C. C. O restauro de argamassa de cal no Brasil. Construindo, Belo Horizonte, v. 4, n. 1, Jan/Jun. 2012.

SANTOS, A. R.; VEIGA, M. R. Argamassas compatíveis para edifícios antigos. Jornadas LNEC, Lisboa, 2012.

SILVA, B.A.; FERREIRA PINTO, A.P.; GOMES, A. *Natural hydraulic lime versus cement for blended lime mortars for restoration works*. Construction and Building Materials 94 (2015) 346–360.

SOUZA, Juliana Santa Cruz. Estudo de argamassa à base de cal e metacaulim para intervenções em revestimento das edificações históricas. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2013.

SOUZA, S. do R. de; BAHL, M. . A conservação do patrimônio histórico-cultural e os profissionais do turismo: uma relação possível. Revista Iberoamericana de Turismo, v. 1, p. 26-35, 2011.

TEUTONICO, J. M.; CHAROLA, A. E.; DE WITTE, E.; GRASEGGER, G.; KOESTLER, R. J.; LAURENZI TABASSO, M.; SASSC, H. R.; SNETHLAGE, R. Group Report “How Can We Ensure the Responsible and Effective Use of Treatments (Cleaning, Consolidation, Protection)?”, Dahlem Workshop on Saving Our Architectural Heritage: Conservation of Historic Stone Structures, Baer, N.S. and Snethlage, R. (Eds) (Chichester, John Wiley & Sons, 1997) 293-313.

TORRACA, Giorgio. *Materiaux de Construction Poreux: science des matériaux pour la conservation architecturale*. Roma: ICCROM, 1986.

VAN BALEN, K.; PAPAYIANNI, I.; VAN HESS, R.; BINDA, L.; WALDUM, A. *Introduction to requirements for and functions and properties of repair mortars*. Materials & Structures, vol. 38: 2005, 781-785.

VAN BALEN, K.; VAN GEMERT, D. *Modelling lime mortar carbonation*. Mater. Struct. 27 (1994) 393–398.

VEIGA, Maria do Rosário. Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes. In: Anais 3º ENCORE – Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios. Lisboa: LNEC, 2003a.

VEIGA, Maria do Rosário. As argamassas na conservação, in Actas das 1ªs Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Avaliação e Reabilitação das Construções existentes, Lisboa, 2003b.

VEIGA, M; AGUIAR, J.; SILVA, A. S.; CARVALHO, F. Conservação e Renovação Paredes de Edifícios Antigos. Lisboa: LNEC, 2004.

VEIGA, M. Argamassas de Cal na Conservação de Edifícios Históricos. Lisboa: LNEC, 2006.

VEIGA, R. *Air lime mortars: What else do we need to know to apply them in conservation and rehabilitation interventions? A review*. Construction and Building Materials, 157 (2017) 132-140.

VENICE Charter. International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites (1964). Web site: <http://www.icomos.org/docs/venicecharter.html>.