



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ESTRUTURAS - MATERIAIS CONSTRUTIVOS

**ESTUDO DE ARGAMASSAS À BASE DE CAL E
METACALUM PARA INTERVENÇÕES EM
REVESTIMENTO DAS EDIFICAÇÕES
HISTÓRICAS**

por

Juliana Santa Cruz Souza

Dissertação de Mestrado

Recife, janeiro de 2013.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ESTRUTURAS - MATERIAIS CONSTRUTIVOS

ESTUDO DE ARGAMASSAS Á BASE DE CAL E METACAULIM PARA INTERVENÇÕES EM REVESTIMENTO DAS EDIFICAÇÕES HISTÓRICAS

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção de mestre, pela Pós-graduação em Engenharia Civil na UFPE, cujo trabalho foi desenvolvido por Juliana Santa Cruz Souza, e orientada pelo Professor Doutor Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.

Recife, janeiro de 2013.

Catálogo na fonte
Bibliotecário Vimário Carvalho da Silva, CRB-4 / 1204

S729e Souza, Juliana Santa Cruz.
Estudo de argamassa à base de cal e metacaulim para intervenções em revestimento das edificações históricas. / Juliana Santa Cruz Souza. - Recife: A Autora, 2013.
227 folhas, il., color., gráfs., tabs.

Orientador: Prof^o. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2013.

Inclui Referências bibliográficas, apêndices, listas de figuras, de tabelas e siglas.

1. Engenharia Civil. 2. Argamassa. 3. Cal. 4. Metacaulim. 5. Edificações. I. Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira (orientador). II. Título.

624 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2014-212



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DE ARGAMASSAS À BASE DE CAL HIDRATADA E METACAULIM PARA
INTERVENÇÕES EM REVESTIMENTO DAS EDIFICAÇÕES HISTÓRICAS**

defendida por

Juliana Santa Cruz Souza

Considera a candidata APROVADA

Recife, 31 de janeiro de 2013

Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro – UFPE
(orientador)

Prof.^a Dr.^a Karoline Alves de Melo Moraes - UFAL
(examinadora externa)

Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto – UFPE
(examinador interno)

Dedico a Deus e ao Mestre Jesus por tamanha oportunidade de aprendizado e aos meus amados pais.

A minha mãe, Gleide Mary Alves Santa Cruz, por todo seu esforço na minha formação como pessoa e na minha educação;

E ao meu pai, Antônio de Souza Silva por ser um grande incentivador de sonhos.

Agradecimentos

Sonhos são para serem conquistados com uma dose de sacrifício e aprendizado. Durante a caminhada houve momentos de lágrimas das quais fizeram fortalecer a perseverança e a obstinação. Pedi a Deus força para seguir em frente, e encontrei amigos fiéis que me auxiliaram como anjos e as nuvens passaram. Quem disse que seria fácil... Mas aprendi mais que imaginava, posso dizer com toda certeza que apesar do turbilhão de emoções, fui e sou IMENSAMENTE FELIZ FAZENDO O QUE SONHEI PARA MIM!!!

Agradeço a Deus e ao Mestre Jesus por toda a força que me foi dada. Pela magnífica bondade divina que me deu esta oportunidade de aprendizado pessoal e profissional.

Tenho muito e muitos a agradecer...

Ao meu orientador Arnaldo Manoel Pereira Carneiro, pela oportunidade de aprendizado, seus ensinamentos e pelas contribuições no estudo. Agradeço imensamente por ter sido meu orientador e por me proporcionar a felicidade de concluir este trabalho.

A minha mãe, Gleide Mary Alves Santa Cruz, que tanto amo e que tem papel importante na minha formação como ser humano e que sem ela não teria galgado tantos sonhos.

A Antônio de Souza Silva, meu amado pai, que tenho tanto a agradecer por seu apoio, incentivo e por ser a pessoa que esteve ao meu lado no momento mais difícil durante a dissertação.

A Alexandre Braz da Silva, por fazer parte da minha trajetória como pessoa e profissional. Uma pessoa que me fez muito feliz durante anos, que estará sempre em meu coração, pois constatamos o melhor de uma relação é a amizade, o afeto e o carinho que temos um pelo outro.

Aos meus queridos laboratoristas, Ezequiel Siqueira e João Cazuzza. A convivência diária fez com que fossem criados laços de amizade. Agradeço por toda a força nos momentos difíceis, por toda ajuda, por todo gesto de carinho. Os tenho em meu coração como pessoas queridas que torcem por mim todo esse tempo.

Durante minha trajetória na pós, fiz amigos leais dos quais tenho profunda admiração e respeito, agradeço por todo esclarecimento, auxílio e encorajamento disponibilizado a mim por Fuad Zarzar, Aline Azeredo, Marcela Correia e Marília Lopes. Sem dúvida alguma tê-los como companheiros de trabalho foi uma alegria imensa, onde o ambiente de trabalho se tornou uma grande família.

A Cláudia Cavalcanti, minha querida amiga, que esteve comigo em todo o mestrado. Quero agradecer pela força e encorajamento. Queria que soubesse o quanto lhe tenho carinho e estima por estar comigo nesta caminhada.

A Alex Bezerra, meu amigo querido, que eu tenho enorme admiração pelo seu caráter, um irmão que Deus me deu! Tenho imenso carinho e muitas saudades dos tempos do "Quarteto Fantástico".

A Elaine Rocha pela amizade sincera, uma linda pessoa que Deus colocou em meu caminho, que considero como uma irmã de alma, meus agradecimentos por estar sempre comigo.

A minha amiga-irmã Camila Regina, uma pessoa muito especial que está sempre em todos os momentos da minha vida, que tenho um grande carinho e afeto, meu muito obrigada pela amizade sincera.

A Pedro França e Indira Cruz, meus queridos amigos, meu muito obrigada pela leveza das brincadeiras e por toda amizade proporcionada a mim. A Marconi Cavalcanti pela amizade e palavras de incentivo nas etapas finais da dissertação.

A Tamara Bonilla pelo carinho e pela amizade. Pelo incentivo e pela presteza de informações e materiais.

Ao Alisson Almeida e a Leandro Luz agradeço pela colaboração nos ensaios.

A Andréa Negromonte e Claudiana Santiago, secretárias da pós, pela amizade, pela torcida e pelo carinho. Obrigada por toda a ajuda e toda a solicitude.

A Cintia Guedes por toda a ajuda e amizade nas etapas finais de dissertar.

Aos meus queridos amigos do PAZ, LUZ E HARMONIA, em especial Rogério Tenório, Gilvania Kardinally e Auréa.

Meus singelos agradecimentos a todos que contribuíram direta ou indiretamente para que eu conseguisse terminar este trabalho.

Quando são necessários reparos e substituições parciais ou totais em argamassas à base de cal, é dispensável que os materiais de substituição sejam idênticos aos antigos. Ser compatível significa conciliar propriedades físico-químicas e estéticas sem obrigatoriamente usar materiais idênticos. A compatibilidade deve ser referente aos materiais do substrato e os em contato.

Maria Isabel Kanan



ESTUDO DE ARGAMASSAS À BASE DE CAL E METACAULIM PARA INTERVENÇÕES EM REVESTIMENTO DAS EDIFICAÇÕES HISTÓRICAS¹

Juliana Santa Cruz Souza

Resumo

O objetivo deste trabalho é caracterizar argamassas a base de cal com teores diferenciados de metacaulim para a restauração de revestimento nas edificações históricas. Confrontou-se cinco traços de argamassa à base de cal, metacaulim e mistura binária de agregado miúdo, sendo mantida a proporção de ligante e agregado em massa constante 1:3. Os traços possuem modificação na proporção de cal e metacaulim, sendo a cal substituída em massa por metacaulim nas porcentagens de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. Foram analisadas as principais propriedades das argamassas no estado anidro, fresco e endurecido. Os materiais foram caracterizados no estado anidro quanto às propriedades físicas e químicas. Na propriedade física, determinou-se a massa unitária das composições binárias dos agregados miúdos, dos aglomerantes e das misturas; e a granulometria dos componentes. A análise química, foi determinada por Fluorescência de Raio X. No estado fresco, o consumo de água foi adquirido para uma consistência padrão de 260 mm e determinação da densidade de massa. No estado endurecido, determinação da variação de massa, resistência à compressão e à tração na flexão, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão.

A "cal em flocos" é uma contribuição da pesquisa, melhorou suas características e facilita o desenvolvimento de estudos futuros. No estado anidro, a densidade de massa comprovou que o percentual de metacaulim em até 15% influenciou no empacotamento do sistema e favoreceu as curva granulométrica com maior percentual de metacaulim. No estado fresco, quanto maior o teor de metacaulim nas argamassas maior foi a relação água/material seco para a mesma trabalhabilidade. As argamassas com maior percentual de metacaulim tiveram um endurecimento e desmolde mais rápidos. No estado endurecido, constatou-se na variação de massa que quanto maior o teor de metacaulim, mais lento foi o ganho de massa. A resistência mecânica à compressão teve a seguinte ordem $C < D < B < E < A$. Na resistência à tração na flexão não houve grandes disparidades dos resultados. A absorção por imersão confirmou a hidraulicidade das argamassas.

As argamassas tiveram resultados condizentes com a utilização em revestimentos históricos e poderão fazer parte de um estudo mais abrangente no tocante a famílias de revestimentos que facilitará a conservação de monumentos históricos mediante a uma caracterização de argamassas originais históricas e a busca de traços compatíveis com estas, contribuindo para a preservação do Patrimônio Histórico edificado.

Palavras-chaves: Argamassas de revestimento; cal; metacaulim; edificações históricas; compatibilidade.

¹ SOUZA, Juliana Santa Cruz. *Estudo de argamassas à base de cal e metacaulim para intervenções em revestimento das edificações históricas*. Recife: Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Pernambuco, 2013.



STUDY OF MORTAR CONTAINING LIME AND METAKAOLIN FOR INTERVENTION IN THE HISTORIC BUILDINGS MORTARS ¹

Juliana Santa Cruz Souza

Abstract

The purpose of this work is characterizing the lime based mortars with different levels of metakaolin intended to rehabilitate mortar lining of historic buildings. Five mortars mixtures containing lime, metakaolin and a binary mixture of fine aggregate were compared keeping a constant binder and aggregate 1:3 ratio in mass. These mixtures have modified proportion of lime and metakaolin, with lime being substituted in mass by 0%, 5%, 10% and 20% metakaolin. The main properties of the mortar mixtures were analyzed in the anhydrous, fresh and hardened status. The materials were characterized in the dry state for its physical and chemical properties. In relation to the physical properties, the unit mass of the binary compositions of fine aggregates, binder, mixtures and granulometry of the components were determined. The chemical analysis was determined by X-Ray Fluorescence. In the fresh state, the water consumption was obtained for a standard consistency of 260 mm and mass density determination. In the hardened state, determination of mass variation was accomplished, as well as compressive strength, tensile and flexural strength, water absorption by capillarity and water absorption by immersion. The "lime flakes" is a contribution of this research, its improved features and facilitating the development of future studies. On anhydrous state, the mass density has proven that the percentage of metakaolin up to 15% influenced the packaging system and favored the granulometric curve highest percentages of metakaolin. In the fresh state, the higher the content of the metakaolin mortar was higher relation to the water / dry matter for the same workability. Mortars with a higher percentage of metakaolin had a hardening faster. On hardened state, mass variation of verified that the higher the concentration of metakaolin, the slower mass gain. The mechanical strength had the following order $C < D < B < E < A$. In resistance to traction in flexion there were no major differences of the results. The absorption dip confirmed the hydraulicity mortars. The results of the mortar mixtures were suitable for use in historical coatings and may be part of a larger study concerning families of coatings that will facilitate the conservation of historic monuments through a characterization of original historical mortars and the search for compatible mixtures, contributing to the preservation of Historic buildings.

Keywords: Mortars restoration; lime; metakaolin; historic buildings; compatibility.

¹ SOUZA, Juliana Santa Cruz. *Estudo de argamassas à base de cal e metacaulim para intervenções em revestimento das edificações históricas*. Recife: Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Pernambuco, 2013.

Lista de figuras

Numeração	Descrição	Pág
Figura 3.1	Esquema da absorção de água por capilaridade ascendente quando o revestimento é com o aglomerante cal.	27
Figura 3.2	Esquema da absorção por capilaridade ascendente quando o revestimento é com aglomerante de cimento Portland.	27
Figura 3.3	Elevação da umidade na alvenaria com altura de pelo menos 2 metros no 1º pavimento na Casa 25 no Pátio de São Pedro - Recife.	28
Figura 3.4	Ciclo dissolução/hidratação - cristalização dos sais solúveis	30
Figura 3.5	Eflorescência em intervenção com uso de cimento Portland	31
Figura 3.6	Fendilhação decorrente de Criptoflorescência	32
Figura 3.7	Aspecto visual de uma intervenção com uso de cimento Portland	35
Figura 3.8	Aspecto visual com uma camada de pintura de uma intervenção com uso de cimento Portland	36
Figura 4.1	Fluxograma da produção da cal hidratada	39
Figura 4.2	Esquema da reação pozolânica	52
Figura 4.3	Resistência à flexão do estudo de Aggelakopoulou et al	68
Figura 4.4	Resistência à compressão do estudo de Aggelakopoulou et al	69
Figura 6.1	Esquema do Programa experimental da cal	78
Figura 6.2	Teste do teor de água - com consistência pastosa	80
Figura 6.3	Teste do teor de água - com consistência mais diluída com nata de água na superfície da pasta	80
Figura 6.4	Aspecto da pasta de cal após 2 horas na estufa e pesagem da pasta + recipiente	83
Figura 6.5	Maturação da cal	84
Figura 6.6	Aspecto da cal após 24 horas na estufa	85
Figura 6.7	Apicoamento da cal	85
Figura 6.8	Cal em flocos pronta para ser embalada e lacrada	86
Figura 6.9	Granulometria da cal hidratada CH II em flocos	88
Figura 6.10	Execução do ensaio de retenção de água na cal CHII	98
Figura 6.11	Esquema do programa experimental do metacaulim	101
Figura 6.12	Granulometria do metacaulim	102
Figura 6.13	Analisador de superfície e de tamanho de poros ASAP (Accelerated Surface Area and Porosimetry System) 2420 da Micrometrics	104
Figura 6.14	Agregado de coloração acinzentada	107
Figura 6.15	Agregado de coloração mais escura	107
Figura 6.16	Esquema do programa experimental dos agregados miúdos	108
Figura 6.17	Gráfico das curvas granulométricas dos agregados miúdos	112
Figura 6.18	Estudo das curvas granulométricas para a definição da mistura binária usada na pesquisa	117

Figura 6.19	Massa unitária das composições granulométricas para a determinação da mistura binária dos agregados miúdos do estudo	119
Figura 6.20	Esquema do Programa experimental das argamassas	120
Figura 6.21	Cura ao ar dos corpos de prova	122
Figura 6.22	Retração por secagem dos corpos de prova da argamassa A.	122
Figura 6.23	Curvas granulométricas das argamassas do estado anidro	123
Figura 6.24	Gráfico do espalhamento / água/material seco para a determinação da água teórica.	125
Figura 6.25	Variação de massa da argamassa A	128
Figura 6.26	Variação de massa da argamassa B	128
Figura 6.27	Variação de massa da argamassa C	128
Figura 6.28	Variação de massa da argamassa D	129
Figura 6.29	Variação de massa da argamassa E	129
Figura 6.30	Ensaio de resistência à tração na flexão no traço D aos 60 dias	130
Figura 6.31	Curvas das argamassas no ensaio de resistência mecânica à compressão nas idades de 28 dias, 60 dias e 9 meses (270 dias).	131
Figura 6.32	Curvas das argamassas no ensaio de resistência mecânica à tração na flexão nas idades de 28 dias e 60 dias.	131
Figura 6.33	Nivelamento das barras para o ensaio de capilaridade	132
Figura 6.34	Corpo de prova teste para conferir a altura da lamina de água	132
Figura 6.35	Execução do ensaio de capilaridade	133
Figura 6.36	Corpos de prova após o ensaio das argamassas B e A	133
Figura 6.37	Gráficos de capilaridade das argamassas na idade de 30 dias	134
Figura 6.38	Gráficos de capilaridade das argamassas na idade de 60 dias	135
Figura 7.1	Densidade de massa dos traços no estado anidro	137
Figura 7.2	Curvas granulométricas das argamassas	138
Figura 7.3	Gráfico da variação de massa dos traços das argamassas da data de moldagem até os 60 dias de idade.	143
Figura 7.4	Gráfico da resistência mecânica à compressão das argamassas aos 28 dias, 60 dias e 9 meses de idade	145
Figura 7.5	Gráfico da resistência mecânica à tração na flexão das argamassas aos 28 dias, 60 dias de idade	145
Figura 7.6	Gráfico da capilaridade das argamassas aos 30 dias de idade	147
Figura 7.7	Gráfico da capilaridade das argamassas aos 60 dias de idade.	147

Lista de tabelas

Numeração	Descrição	Pág
Tabela 3.1	Sais solúveis presentes no cimento e sua solubilidade em água	33
Tabela 4.1	Nomenclatura dos compostos presentes nas cales	41
Tabela 4.2	Exigências químicas da cal hidratada para argamassas na construção civil.	43
Tabela 4.3	Requisitos físicos da cal hidratada para argamassas na construção civil.	45
Tabela 4.4	Classificação dos materiais pozolânicos segunda a NBR 12653	51
Tabela 4.5	Exigências químicas das classificações dos materiais pozolânicos	51
Tabela 4.6	Exigências físicas das classificações dos materiais pozolânicos	51
Tabela 4.7	A razão Ca/Si referente ao gel de CSH tipo Tobermorite	61
Tabela 4.8	Tipologias de CSH produto da reação cal-metacaulim	62
Tabela 4.9	Aluminatos e silico-aluminatos de cálcio hidratados produtos formados pela reação do hidróxido de cálcio e o metacaulim	63
Tabela 4.10	Resistência à compressão das argamassas dosadas por Bonilla e Carneiro	65
Tabela 4.11	Coefficiente de Capilaridade do estudo de Velosa	66
Tabela 4.12	Resistências à flexão do estudo de Velosa	66
Tabela 4.13	Resistências à compressão do estudo de Velosa	67
Tabela 4.14	Requisitos estabelecidos para as características mecânicas para argamassas de intervenção	67
Tabela 4.15	Percentagens dos materiais (em massa) dos traços do estudo de Aggelakopoulou et al	68
Tabela 6.1	Teste de perda do teor de água da pasta de cal	83
Tabela 6.2	Fluorescência de Raio-X da cal maturada em flocos	91
Tabela 6.3	Obtenção das 3 pesagens da cal para a massa unitária da cal	92
Tabela 6.4	Percentagens retidas nas peneiras n° 30 e n° 200: Ensaio de finura da cal CHII	93
Tabela 6.5	Base dos cálculos do volume total ocupado pela solução com a cal CHII	98
Tabela 6.6	Valores da decantação da cal CHII em ml, cm e seus volumes em cm ³ e em %	99
Tabela 6.7	Base dos cálculos do volume total ocupado pela solução cal CHII em flocos	99
Tabela 6.8	Valores da decantação cal CHII em flocos em ml, cm e seus volumes em cm ³ e em %	100
Tabela 6.9	Fluorescência de Raio-X do metacaulim	105
Tabela 6.10	Obtenção das 4 pesagens do metacaulim para a massa unitária	106
Tabela 6.11	Fluorescência de Raio-X do agregado de coloração acinzentada	109
Tabela 6.12	Fluorescência de Raio-X do agregado de coloração mais escura	110
Tabela 6.13	Dimensão máxima característica e módulo de finura dos agregados miúdos	113

Tabela 6.14	Obtenção das 3 pesagens do agregado acinzentado para a massa unitária	114
Tabela 6.15	Obtenção das 3 pesagens do agregado de colocação mais escura para a massa unitária	114
Tabela 6.16	Designação e composição das argamassas	115
Tabela 6.17	Granulometrias ensaiadas para a determinação da percentagem dos agregados miúdos na mistura binária.	117
Tabela 6.18	Massa unitária das composições granulométricas para a determinação da mistura binária do estudo	118
Tabela 6.19	Densidade de massa dos traços no estado solto	123
Tabela 6.20	Dados da relação A/MS teórico, A/MS da molgagem e o quantitativo de dias para a desmoldagem para cada argamassa	126
Tabela 6.21	Densidade de massa no estado fresco das argamassas e os respectivos valores de desvio padrão e coeficiente de variação	126
Tabela 6.22	Resultados da resistência à compressão e à tração na flexão	131
Tabela 6.23	Absorção por imersão das argamassas mistas com metacaulim	136
Tabela 7.1	Dados da relação A/MS teórico, A/MS da molgagem e quantos dias se levou para efetuar a moldagem para cada argamassa	139
Tabela 7.2	Densidade de massa no estado fresco das argamassas e os respectivos valores de desvio padrão e coeficiente de variação.	140
Tabela 7.3	Perda de massa (%) das argamassas com 3 dias de idade	140
Tabela 7.4	Perda de massa (%) das argamassas com 10 dias de idade	141
Tabela 7.5	Perda de massa (%) das argamassas com 15 dias de idade	141
Tabela 7.6	Perda de massa (%) das argamassas com 20 dias de idade	142
Tabela 7.7	Perda de massa (%) das argamassas com 27 dias de idade	142
Tabela 7.8	Coeficiente de capilaridade das argamassas aos 30 e 60 dias de idade	146
Tabela 7.9	Absorção por imersão das argamassas mistas com metacaulim aos 90 dias.	148

Lista de siglas e notações

Siglas/Notações	Descrição
CETENE	Centro de Tecnologia Estratégicas do Nordeste
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
Cun	Coefficiente de Uniformidade
$D_{máx}$	Dimensão máxima característica
LABISE	Laboratório Núcleo de Estudos Geoquímicos
(M.F)	Módulo de finura
NBR	Norma Brasileira Registrada
PF	Perda ao Fogo
ton	Toneladas
Å	Angstrôm
μ	Micron

SUMÁRIO

1 – Introdução	16
2 – Conceitos para intervenção em patrimônio edificado	21
3 – Anomalias decorrentes de intervenções em revestimentos históricos ricos em cimento Portland	25
4 – Requisitos técnicos e estudos sobre cal, metacaulim e reações pozolânicas	37
4.1 – O Aglomerante	37
4.1.1 – As Cales	37
4.1.1.1 – As cales aéreas	37
4.1.1.2 – Cal hidráulica	46
4.2 – Adições Pozolânicas	49
4.2.1 – Metacaulim	53
4.3 – Reações pozolânicas da cal e metacaulim	58
4.4 – Estudos de argamassas mistas com uso de metacaulim para uso em argamassa de intervenção	64
5 – Traços utilizados nas argamassas históricas e a Influência lusa na composição dos traços utilizados no Brasil	70
5.1 – O conceito de argamassa na Antiguidade	70
5.2 – Traços utilizados nas argamassas históricas	71
5.3 – Classificação das argamassas históricas	75
6 – Procedimento experimental e apresentação dos resultados	77
6.1 – Materiais utilizados	77
6.1.1 – Aglomerante - A cal	77
6.1.1.1 – Maturação da cal	78
6.1.1.1.1 – Teste de teor de água a ser adicionado na maturação	79
6.1.1.1.2 – Teste de retirada da água	81
6.1.1.1.3 – Procedimento de maturação e secagem da cal utilizada na pesquisa, denominada "cal em flocos"	84
6.1.1.1.4 – Teste do tempo de cura da cal utilizada na pesquisa	86
6.1.1.2 – Granulometria da cal CHII em flocos	87
6.1.1.3 – Superfície específica da cal CHII em flocos - BET	89
6.1.1.4 – Fluorescência de Raio-X da cal CHII em flocos	90
6.1.1.5 – Massa Unitária da cal CHII em flocos	91
6.1.1.6 – Determinação da finura da cal CHII	92
6.1.1.7 – Determinação do teor de CO₂ da cal CHII	94
6.1.1.8 – Determinação de retenção de água da cal CHII	96
6.1.1.9 – Determinação da umidade da cal CHII em flocos	100
6.1.2 – Adição - Metacaulim	101
6.1.2.1 – Granulometria do metacaulim	101
6.1.2.2 – Superfície específica do metacaulim - BET	103

6.1.2.3 – Fluorescência de Raio-X do metacaulim	104
6.1.2.4 – Massa Unitária do metacaulim	106
6.1.3 – Agregados miúdos	106
6.1.3.1 – Fluorescência de Raio-X dos agregados miúdos	109
6.1.3.2 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos	111
6.1.3.3 – Massa unitária dos agregados miúdos	113
6.2 – Composição das argamassas	114
6.2.1 – Definição da granulometria de estudo	115
6.3 – Programa experimental e resultados das argamassas	120
6.3.1 – Moldagem, desmoldagem e cura das argamassas	121
6.3.2 – Ensaio nas argamassas no estado anidro	122
6.3.2.1 – Densidade de massa dos traços no estado solto	122
6.3.2.2 – Granulometria das argamassas	123
6.3.3 – Ensaio nas argamassas no estado fresco	124
6.3.3.1 – Consistência	124
6.3.3.2 – Densidade de massa das argamassas	126
6.3.4 – Estado endurecido	127
6.3.4.1 – Variação de massa	127
6.3.4.2 – Resistência à compressão e à tração na flexão	129
6.3.4.3 – Capilaridade	132
6.3.4.4 – Absorção de água	135
7 – Análise dos resultados obtidos	137
8 – Considerações finais	149
9 – Referências bibliográficas	154
APÊNDICES	165
<i>Apêndice A - Resumo das Composições das argamassas antigas</i>	166
<i>Apêndice B.1 - Definição da mistura binária da granulometria do estudo</i>	170
<i>Apêndice B.2 - Massa unitária das composições granulométricas</i>	174
<i>Apêndice B.3 - Cálculo das quantidades de materiais na transformação de volume para massa dos traços</i>	176
<i>Apêndice B.4 - Densidade de massa dos traços no estado anidro</i>	178
<i>Apêndice B.5 - Granulometria das argamassas</i>	180
<i>Apêndice C.1 - Resultado do ensaio de consistência e determinação do teor de água</i>	183
<i>Apêndice C.2 - Resultados da densidade de massa no estado fresco</i>	184
<i>Apêndice C.3 - Resultados da massa unitária, desvio padrão, e coeficiente de variação</i>	186
<i>Apêndice C.4 - Resultados da variação de massa</i>	188
<i>Apêndice C.5 - Resultados das resistências à compressão e à tração na flexão</i>	203
<i>Apêndice C.6 - Resultados do ensaio de capilaridade</i>	206
<i>Apêndice C.7 - Resultados do ensaio de absorção por imersão</i>	226

1 – INTRODUÇÃO

A degradação de uma edificação é um processo natural gerado pela ação do tempo, contudo tal deterioração dos materiais tem relação direta com outros fatores, tais como: ausência de manutenção, intervenções inapropriadas, conservação dos materiais e das técnicas construtivas. Estas são definidas, segundo Souza (2010, p. 10 e 11) diante da disponibilidade de recursos, de mão-de-obra, materiais e tecnologia acessível ao tempo e local em que a edificação foi construída.

Santiago (2007) relata que nas últimas cinco décadas tem sido dada uma maior ênfase aos estudos dos materiais de construção, assim como os materiais que são utilizados na conservação e no restauro dos edifícios históricos, entretanto o conhecimento técnico sobre as características e propriedades dos materiais pelos profissionais que trabalham na construção civil ainda assim é insuficiente e ineficiente.

Velosa (2011) afirma que a prática tem revelado uma maior preocupação com os materiais a serem utilizados em obras de conservação e restauro, principalmente após a degradação acelerada verificada em edifícios onde não se encontrava patente esse cuidado.

Roque e Lourenço afirmam que as dificuldades naturais na reparação da edificação histórica tem relação com o domínio limitado que se possui das técnicas e dos materiais históricos.

A insuficiência do conhecimento e a ausência de apreensão dos estudos sobre as técnicas construtivas e materiais históricos ocasiona intervenções desastrosas e acarreta na perda de informações sobre os edifícios de importância histórica e cultural, pois muitas vezes as intervenções agredem as propriedades dos materiais, o que gera a descaracterização do sistema construtivo e da obra arquitetônica.

Os materiais e técnicas construtivas são fatores que representam a história de um povo de um determinado lugar em um determinado momento histórico, estudá-las favorece a conservação do testemunho das técnicas ancestrais. Para que isso ocorra, é necessário o emprego de materiais compatíveis com os materiais

originais durante a execução da restauração, visto que a compatibilidade é importante para o não surgimento de patologias degenerativas nas edificações históricas.

Segundo Santiago (2007, p. 13), o conhecimento da ciência dos materiais é fundamental para uma boa execução de restauro da obra arquitetônica sendo que “se a nobre arte (a arte de arquitetar, projetar) é *utilitas*¹ e *venustas*, é primeiramente *firmitas*”. Reconhece a necessidade de que o profissional deve saber sobre as características e propriedades dos materiais para a estruturação da edificação.

No caso específico das argamassas históricas, estas assumem um importante papel na conservação do patrimônio edificado, visto que protegem a alvenaria contra as ações climáticas, choques mecânicos, além de conferir 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. E por vezes, durante as intervenções de restauro, são desconsideradas como parte importante na constituição e estruturação dos edifícios históricos, sendo removidas total ou parcialmente para a visualização da estrutura das alvenarias, ou refeitas com materiais e traços inapropriados para a aderência no substrato.

Segundo Magalhães *et al* (2007), as experiências nestas edificações com argamassas não compatíveis favorecem a degradação prematura das alvenarias, que se encontravam anteriormente em bom estado de conservação.

Os estudos de Veiga (2003) e Magalhães (2011) comprovam que uma má intervenção no revestimento influencia na degradação tanto das argamassas de revestimentos originais como posteriormente afetará seu substrato. Tais patologias são provocadas pela introdução de tensões excessivas no suporte, tendência à retenção de umidade no interior da alvenaria e presença de sais solúveis no revestimento novo.

Desta forma, o revestimento novo não deve desenvolver tensões elevadas para não haver fendilhações e fissuras², e consequente perda de coesão do

1 Utilitas = utilidade, uso e funcionalidade da obra arquitetônica. Venustas = beleza da obra arquitetônica, aspecto sensorial emitido pelo espaço arquitetônico. Firmitas = como estruturas o espaço arquitetônico, a técnica construtiva e materiais usados para estruturar o espaço arquitetônico.

² Fendilhação é uma abertura longitudinal que atravessa toda a espessura do reboco até rompê-lo, assim é possível visualizar as duas partes do revestimento. Fissura - é uma abertura longitudinal curta e com desenvolvimento discreto, onde afeta a parte superficial do revestimento e seu

revestimento; deve dificultar a penetração de água até o substrato, entretanto deve permitir a saída por evaporação da umidade contida no interior da estrutura seja ela proveniente da entrada através da argamassa seja através da capilaridade ascendente obtidas pelas fundações; e por fim não deve deter na sua constituição materiais ricos em sais solúveis que podem causar desde eflorescências³ até criptoflorescências, sendo estas últimas causadoras de patologias degenerativas a estrutura devido ao seu efeito expansivo na cristalização.

Na intervenção nas edificações históricas, um conceito fundamental é a compatibilidade. Segundo Kanan (2008, p. 37), 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.

Segundo Veiga (2003), critérios de compatibilidade, funcionais, de aspecto, e comportamento no futuro são requisitos de uma boa intervenção no revestimento. O comportamento futuro está atrelado aos materiais pré-existentes, tentando evitar a aceleração da degradação das paredes e também do surgimento de fenômenos de envelhecimento diferencial entre os novos e os velhos revestimentos.

A autora descreve como durabilidade dos revestimentos novos, os que tenham boa resistência mecânica a choques, boa coesão interna, boa aderência ao suporte e entre camadas, e tenha uma absorção relativamente lenta e facilidade de secagem. E que permita a reversibilidade, ou seja, sua retirada sem que haja danos ao substrato.

Vários autores, tais como Veiga *et al* (2009), Marques *et al* (2006) e Maravelaki-Kalaitzakia *et al* (2005) abordam estudos referentes aos materiais usados na recuperação das argamassas de revestimento e assentamento nas edificações históricas. Assim como existem estudos, como os de Veiga *et al* (2009), que tratam da utilização de materiais novos, tais como os pozolânicos, que trazem uma maior durabilidade às argamassas de restauro.

acabamento (pintura). Suas aberturas são estreitas e não atingem a profundidade para se visualizar o revestimento dividido em dois.

³ Eflorescência - substância esbranquiçada com aparência cristalina ou filamentosa, e é decorrente da cristalização de sais solúveis na superfície do revestimento. Criptoflorescência - são cristais formados nos poros e nos vasos capilares do revestimento, causam degradação pois a cristalização dos sais geram o aumento de volume causando ausência de coesão. Ambos as patologias são ocasionadas devido a argamassas com alto teor de cimento somados a umidade constante elevada e revestimentos que não permitem a permeabilidade do vapor de água contido no interior da alvenaria.

As argamassas com pozolanas são uma tradição que remonta à antiguidade e está documentada desde a época dos romanos pelos escritos de Vtrúvio. Segundo Velosa et al (2009), as argamassas à base de cal e pozolana têm características satisfatórias no seu comportamento e nas suas propriedades. Isso se deve ao fato da reação dos óxidos (ácidos) da pozolana com a cal (básica) formarem produtos de silicato de cálcio hidratados (CSH). Estes compostos dão durabilidade e resistência à ação prolongada a água.

Mleza e Hajjaji (2012) relatam a melhoria da estabilidade química e nas propriedades físicas das argamassas com as argilas termicamente ativadas, havendo a possibilidade do seu uso na restauração de edificações históricas.

Estudos, como os das autoras Velosa e Veiga, comprovam que o uso de argamassa de cal e metacaulim são compatíveis com os substratos e as argamassas originais históricas, e que possuem maior durabilidade que as argamassas de cal hidratada e não possuem as características de resistência mecânica e presença acentuada de sais solúveis das argamassas com cimento Portland.

Segundo Veiga (2003), as argamassas com pozolanas possuem propriedades intermediárias entre as argamassas compostas somente de cal ou somente de cimento, e melhoram algumas características das argamassas sem ocasionar patologias.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo uma análise comparativa das características e propriedades das argamassas de revestimento com traços utilizando cal e metacaulim para serem utilizadas na restauração de edificações históricas.

Para a obtenção do objetivo principal de estudo, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- I. Caracterizar os materiais utilizados no estado anidro (as areias, cal hidratada, metacaulim) quanto às propriedades físicas;
- II. Investigar as propriedades das argamassas no estado fresco;
- III. Investigar as propriedades das argamassas no estado endurecido;
- IV. Identificar se argamassas com metacaulim apresentaram bom desempenho nos ensaios laboratoriais para uso em intervenções históricas.

Dessa forma, para desenvolver a proposta de estudo, a estruturação da dissertação foi em nove capítulos, além das referências bibliográficas e os apêndices.

O **Capítulo 2** aborda os conceitos chaves para a intervenção do patrimônio edificado, tais como: conservação, preservação e restauração, estes são importantes para compreender os procedimentos a serem tomados nas intervenções arquitetônicas.

O **Capítulo 3** aborda a temática das patologias decorrentes de intervenções incorretas com uso de cimento Portland nos revestimentos das edificações históricas.

O **Capítulo 4** aborda primeiramente as características exigidas pela normativa e estudos referentes à aglomerante cal e da pozolana Metacaulim, a seguir descreve as reações pozolânicas e os estudos que tratam da temática. E por fim explana os estudos das argamassas bastardas com uso da adição de metacaulim.

O **Capítulo 5** aborda primeiramente o conceito de argamassa histórica, a seguir descreve os traços mencionados por diversos autores e a influência destes traços nas argamassas utilizadas no Brasil antes ao século XIX com o advento do cimento Portland. Além de abordar a classificação das argamassas históricas de acordo com teor dos seus compostos.

O **Capítulo 6** apresenta o planejamento da pesquisa e seus resultados, com a metodologia utilizada baseada em fundamentos teóricos com o objetivo de explicar os materiais e os métodos de ensaios utilizados.

No **Capítulo 7** são apresentados as análises dos resultados obtidos nos procedimentos experimentais, e no **Capítulo 8** estão as considerações finais a respeito do estudo e as demandas de aprofundamento e desdobramentos do tema sugeridas a pesquisas futuras.

Com isso, busca-se um trabalho técnico que contribua a conservação e preservação do patrimônio edificado com estudos referentes à argamassas mistas com adição de metacaulim, ampliando a percepção de arquitetos e engenheiros no tocante às particularidades do revestimento de restauro.

2 – CONCEITOS PARA INTERVENÇÃO EM PATRIMÔNIO EDIFICADO

Este capítulo abordará os conceitos chaves para a intervenção do patrimônio edificado, tais como: conservação, preservação e restauração, sendo estes são importantes para compreender os procedimentos a serem tomados nas intervenções arquitetônicas. Tais conceitos foram abordados e disseminados nas cartas patrimoniais.

As Cartas Patrimoniais são documentos firmados internacionalmente com a prerrogativa do estabelecimento de normas e procedimentos para a preservação dos bens culturais. Esses conceitos são imprescindíveis para principiar os estudos de intervenção nos edifícios históricos. Contudo, estas cartas abordam diferentes temáticas, de modo que foram explanados neste texto conceitos referentes à preservação, conservação e restauração no tocante aos materiais construtivos, visto que a pesquisa está pautada na intervenção das argamassas de revestimento em substratos de edificações com significância histórica.

A Carta de Atenas (IPHAN, 2004, p.13 - 19) redigida em 1931, contribuiu para a propagação do movimento internacional de estudos referentes à conservação do patrimônio e da criação do Centro Internacional de Estudos para a Conservação e Restauração dos Bens Culturais. Foi redigida por Le Corbusier no Primeiro Congresso Internacional de Arquitetos e Técnicos em Monumentos Históricos em Atenas. O item VI desta carta, relata a possibilidade do emprego de técnicas e materiais modernos para a consolidação de edifícios antigos, inclusive do uso do concreto armado. Esta trata ainda da consolidação de ruínas pela anastilose, que é a recolocação em seus lugares dos elementos originais encontrados nas proximidades das ruínas. Relata que os materiais novos utilizados na consolidação devem ser sempre reconhecíveis.

Assim, o documento redigido em Atenas viabiliza o uso dos materiais modernos desde que estes sejam identificados facilmente e sejam compatíveis com os materiais originais. Contudo menciona o uso de concreto armado para a estabilização das estruturas. O Capítulo 3 relata que o uso do cimento Portland não é aconselhável aos revestimentos nestas construções. No tocante as argamassas

na execução da anastilose, é clara a possibilidade de traços e materiais compatíveis com as argamassas originais desde que não sejam mascaradas como originais.

A Carta de Veneza de 1964 (IPHAN, 2004, p. 91 - 95), redigida no 2º congresso citado acima define como monumento histórico a criação arquitetônica isolada, bem como o sítio (local) urbano ou rural que dá testemunho de uma civilização em particular, de uma evolução significativa ou de um acontecimento histórico. Declara a conservação como manutenção permanente e que não se pode alterar a disposição ou ornamentação dos edifícios, e só através destes limites é que se pode conceber e autorizar as modificações exigidas pela evolução dos usos e costumes. Trata da restauração como uma operação que deve ter seu caráter excepcional, e ter por objetivo conservar e revelar os valores estéticos e históricos do monumento e fundamentando-se no respeito ao material original e aos documentos autênticos. Quando as técnicas tradicionais se revelarem inadequadas, a consolidação do monumento pode ser assegurada com o emprego de todas as técnicas modernas de conservação e construção cuja eficácia seja comprovada por dados científicos e pela experiência.

Portanto, estudos referentes a traços com materiais modernos para uso em argamassas históricas são importantes para que não se tenha intervenções inadequadas, com materiais e traços incompatíveis com as técnicas construtivas do patrimônio edificado.

A Carta de Restauro (IPHAN, 2004, p. 147 - 169) escrita em 1972, aborda a anastilose no Art. 7º, de forma que as pequenas reintegrações sejam executadas com clara determinação dos contornos das reintegrações, ou com a adoção de material diferenciado, embora o mesmo seja harmônico e de fácil distinção ao olho nú em particular nos pontos de enlace com as partes antigas. Descreve ainda o conceito de restauração como uma medida de conservação que intervém como finalidade de manter o funcionamento da obra e transmitir integralmente ao futuro as obras arquitetônicas históricas.

Assim sendo, a Carta mencionada acima determina que as intervenções sejam perceptíveis, e não se confundam com o que não teve uma intervenção e consolidação, de modo que não pareça original, o que podemos chamar de "fake" de autenticidade. A edificação histórica possui uma pátina peculiar adquirida com o passar do tempo. Esta deve ser preservada e os materiais de intervenção devem ser compatíveis, mas não falsear uma pátina ou aspecto dos materiais originais.

A Resolução de São Domingos (IPHAN, 2004, p. 195 - 198), ocorrida na República Dominicana em 1974, ressalta a importância do patrimônio latino-americano e da relevância prévia de uma investigação documental e arqueológica para que os estudos resgatem a maior quantidade de dados relacionados à história do sítio.

Desta forma, há uma necessidade de um levantamento histórico do local e da edificação para discernir e compreender como se dava o construir e o edificar de antigamente, quais seus materiais e técnicas construtivas utilizadas, para que desta forma se tenha o maior quantitativo de informações referentes da edificação e assim poder intervir e restaurá-la sem comprometer sua autenticidade.

A Carta de Burra (IPHAN, 2004, p. 247 - 252) discutida no Conselho Internacional de Monumentos e Sítios, na Austrália em 1980, compila definições referentes à conservação, preservação e restauração no tocante ao monumento com significação cultural. O termo conservação designa os cuidados a serem dispensados a um bem para preservá-lo as características que apresentem um significado cultural. E que as técnicas empregadas devem ser de caráter tradicional, mas que pode, a depender das circunstâncias, utilizar técnicas modernas com fundamento científico comprovado. Relata que a preservação deve se impor nos casos em que o conjunto de materiais que constituem o bem oferece testemunho de uma significação cultural específica. Sendo assim, a preservação se limita à proteção, à manutenção e à eventual estabilização dos materiais existentes. Não deverão ser admitidas técnicas de estabilização que destruam a significação cultural do bem. A restauração é o restabelecimento dos materiais de uma edificação no estado anterior conhecido e pode implicar na reposição de elementos desmembrados (anastilose) ou na retirada de acréscimos de intervenções anteriores.

O conceito de conservação está intimamente ligado à proteção do bem edificado, de forma que a construção tenha suas características arquitetônicas preservadas pela manutenção das técnicas e dos materiais empregados na sua estruturação. A preservação deve estar imbuída na intervenção de restauração para que os materiais e técnicas construtivas não sejam subestimados, e que haja compatibilidade entre os materiais a fim de garantir a preservação dos mesmos.

Na Carta de Brasília (IPHAN, 2004, p. 323 - 328) redigida em 1995, foi abordado o conceito de autenticidade, segundo o qual, os edifícios são objetos

materiais portadores de uma mensagem referente a um contexto social e cultural determinado, sua compreensão e aceitação pela comunidade, o converte em patrimônio, ou seja, um bem é autêntico quando há uma correspondência entre o objeto material e seu significado. A intervenção arquitetônica deve resgatar o caráter do edifício, enaltecendo sua autenticidade, sem transformar sua essência e equilíbrio, sem se deixar envolver em arbitrariedades, mas enaltecendo seus valores. Preconiza que toda intervenção em que haja novos materiais estes sejam de caráter reversível e se harmonizem com o conjunto.

Logo, a carta preconiza os materiais construtivos originais como parâmetro de autenticidade, e que as intervenções construtivas não sejam arbitrárias e descaracterizantes. As restaurações devem ser reversíveis para que com o passar do tempo, outras técnicas e materiais possam ser mais compatíveis e de maior eficácia na estabilização da edificação. Então, numa possível intervenção a posteriori à intervenção anterior pode ser removida sem que haja danos ao edifício.

A apreensão de tais conceitos favorece a visão da importância do patrimônio edificado e a postura mais adequada para intervir nele. A conduta da intervenção e da restauração deve estar pautada nestes conceitos para que as características do bem cultural sejam preservadas e que não haja a perda da autenticidade da construção que sofreu a intervenção arquitetônica.

3 – ANOMALIAS DECORRENTES DE INTERVENÇÕES EM REVESTIMENTOS HISTÓRICOS RICOS EM CIMENTO PORTLAND

Noções incorretas sobre como se deve intervir e os materiais modernos incompatíveis usados na restauração podem acarretar em patologias às edificações históricas, pois o comportamento estrutural e funcionamento destas construções são diferentes das estruturadas atualmente. Esta incompatibilidade gera danos muitas vezes desastrosos em virtude das alvenarias históricas serem estruturais.

Uma das principais patologias decorrentes de intervenções inadequadas no revestimento é o uso de argamassas ricas no cimento Portland, em virtude da ausência de conhecimento das patologias causadas tanto ao substrato como aos revestimentos originais.

Veiga (2003a) relata que as alvenarias antigas eram estruturadas com materiais porosos e deformáveis, onde a capacidade de resistência era assegurada essencialmente pela espessura tanto das alvenarias como nos seus revestimentos. Não havia a necessidade de impedir a capilaridade ascendente, visto que, a própria estrutura permitia e facilitava a liberação da água por evaporação através do revestimento, evitando a permanência prolongada de umidade excessiva. Assim, a entrada moderada de água no interior das alvenarias era parte do funcionamento normal da estrutura, por ser um sistema construtivo com equilíbrio hídrico satisfatório.

Ainda segundo a autora, o sistema construtivo das edificações atuais é estruturado de forma a impedir ao máximo a penetração de água do exterior, com o uso das chamadas cintas de amarração de concreto armado e de cortes de capilaridade junto das fundações que dificultam a capilaridade ascendente, além do uso de aditivos hidrófugos e revestimentos impermeabilizantes. Nas intervenções, o uso de materiais compatíveis com as técnicas de construção atuais causam patologias em decorrência das características físicas e químicas serem distintas dos materiais originais das edificações históricas.

Veiga concluiu que argamassas de cimento são revestimentos mais homogêneos, mais impermeáveis, e com maior resistência mecânica. Tais fatores propiciam uma aceleração acentuada da degradação das alvenarias, por não

permitirem a liberação da umidade do interior da alvenaria histórica, pois seu equilíbrio hídrico é rompido.

Magalhães (2011) informa que a presença de umidade é a condição necessária para a disseminação de outros agentes deteriorantes, tais como gases poluentes e crescimento biológico. É importante ressaltar que as argamassas de cimento Portland são ricas em sais solúveis que ao serem dissolvidos causam eflorescências e criptoflorescências.

Os revestimentos tendo cimento Portland como aglomerante são mais compactos e possuem uma porosidade menor que os de cal. Henriques (2007, p. 4) relata que a ascensão da água nas paredes está relacionada com a porometria (tamanho dos poros) dos materiais constituintes, pois quanto menor o diâmetro dos poros maior é a altura teórica que a água pode atingir.

Logo, as argamassas de cimento Portland por ter poros com diâmetros de menor dimensão em relação às de cal, atingem uma altura de absorção de água por capilaridade ascendente superior em relação às estas últimas.

A ascensão e retenção da umidade no interior do substrato se dá até o nível em que a quantidade de água evaporada pelo revestimento compense a que penetra por capilaridade ascendente. Desta forma, ao se diminuir as condições de evaporação com um revestimento impermeável a altura da umidade contida no interior da alvenaria tende a se elevar para que se restabeleça um novo equilíbrio de evaporação pelo revestimento (Ver **Figuras 3.1 e 3.2**). Henriques (2007) notifica que quanto maior for à espessura da alvenaria maior será o nível de umidade atingido por ela. A **Figura 3.3** mostra a elevação da umidade uma alvenaria histórica com altura de mais ou menos 2 metros.

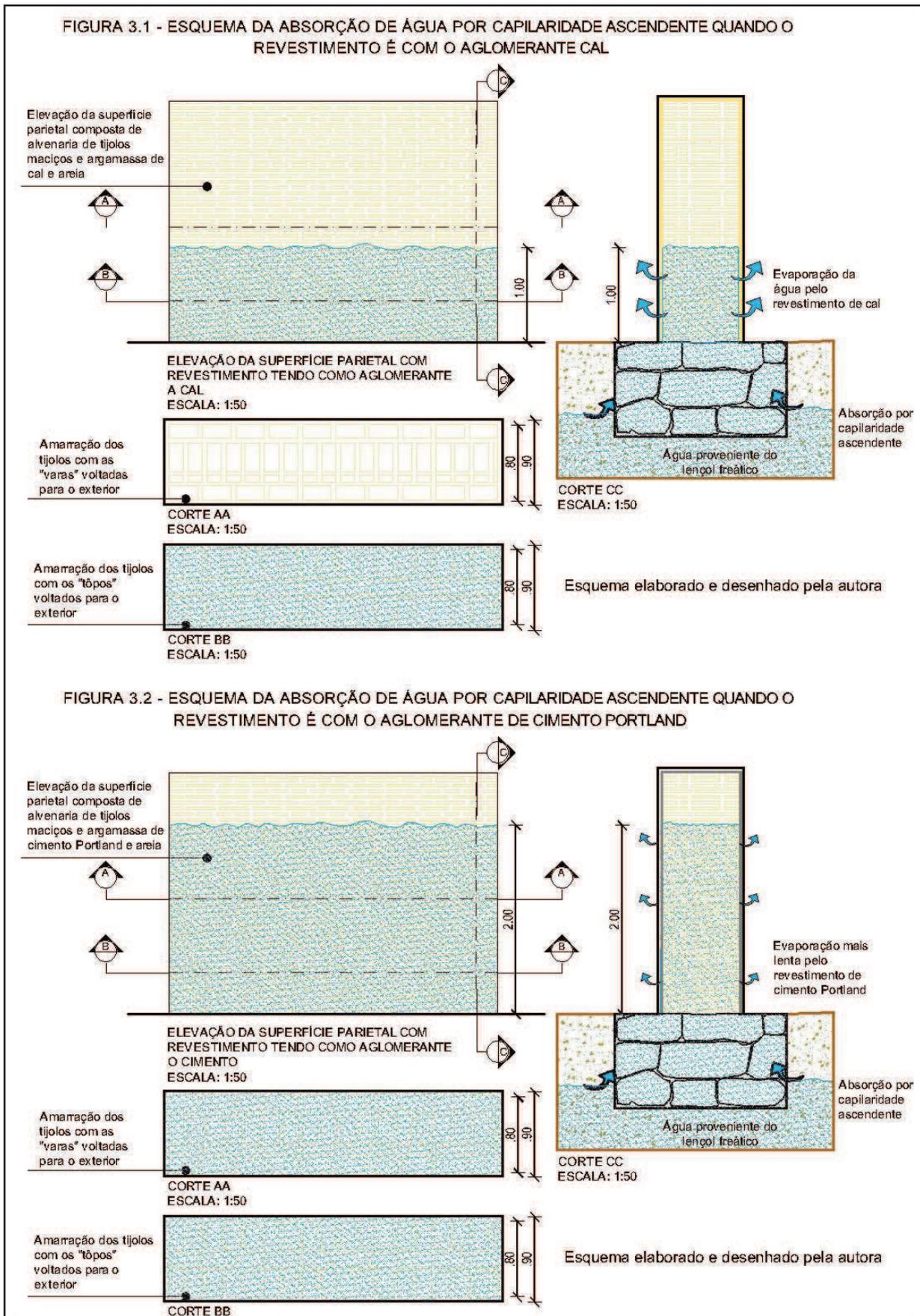
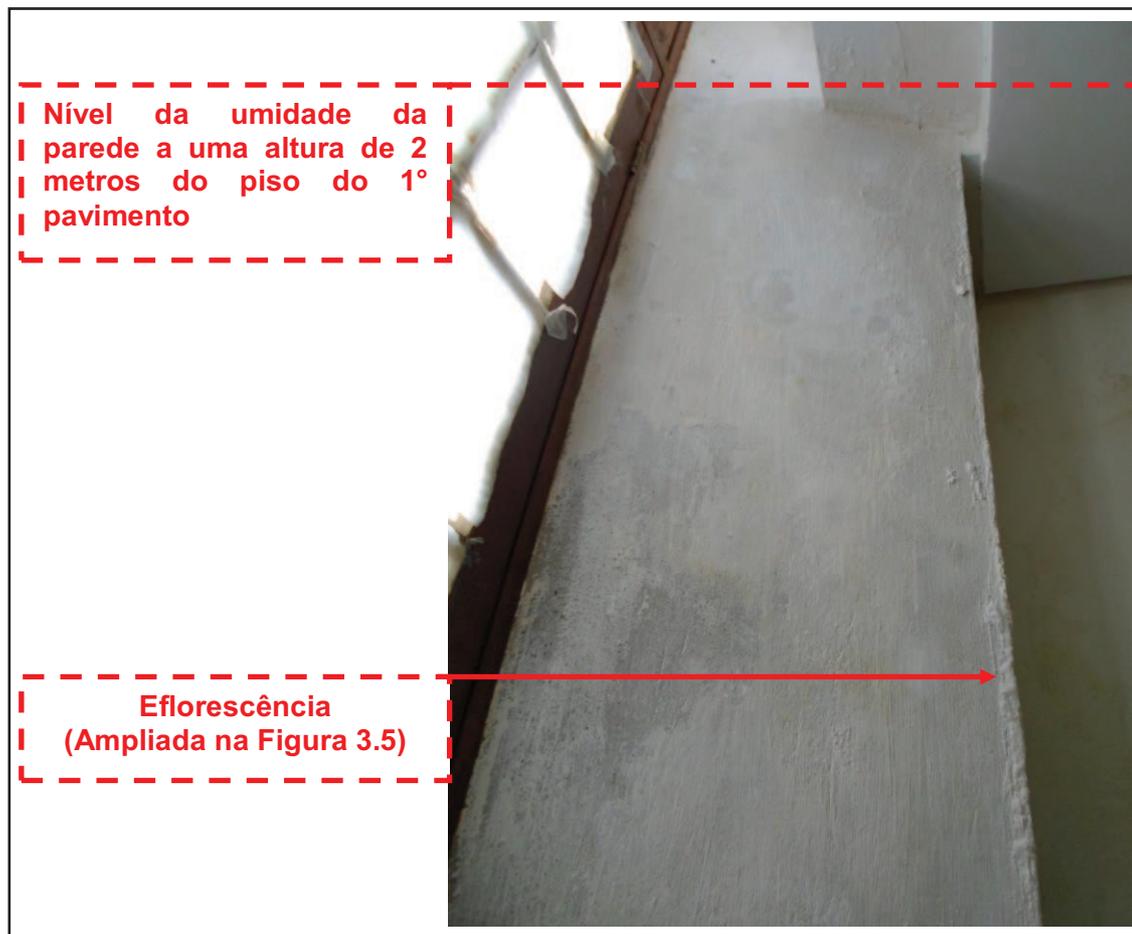


Figura 3.3 - Elevação da umidade na alvenaria com altura de pelo menos 2 metros no 1º pavimento na Casa 25 no Pátio de São Pedro - Recife.



Fonte: Autora (2013).

Segundo Henriques (2007), a umidade contida no terreno que é absorvida pelas fundações¹ e não provoca danos na alvenaria desde que não seja uma umidade intermitente. Fato que explica o convívio harmonioso das edificações históricas de Recife, construídas sobre aterros dos mangues, onde a umidade do solo é elevada. Entretanto, quando intermitentes causam a erosão decorrente da cristalização dos sais solúveis presentes no revestimento e segundo Posser (2004) a movimentação higroscópica gerada pela expansão e retração, causa a fadiga do material.

¹ As fundações das edificações históricas de Recife e Olinda são constituídas de rochas calcária e arenito.

Desta forma, a execução de um revestimento rico em cimento Portland, aliado a uma variação de períodos de umedecimento e períodos de secagem² provocam o desgaste do reboco, implicando na perda de material.

Um dos principais vetores para o desgaste do revestimento pela umidade são os sais solúveis. Estes na presença da água são dissolvidos e transportados para a superfície dos rebocos e em contato com o ar cristalizam e ficam depositados na superfície do revestimento, criando uma película e colmatando os poros, reduzindo a permeabilidade do material. Com isso, a umidade por capilaridade ascendente tende a elevar seu nível na alvenaria para o restabelecimento do equilíbrio hídrico, criando-se um ciclo que gera a elevação do teor de umidade no interior da estrutura. Este fato é agravado pelo motivo de alguns destes sais serem higroscópicos³, tais como: nitratos, cloretos, nitritos⁴.

Essa característica faz com que os sais absorvam a umidade do ar ou dos materiais e dissolvam-se, e quando há um período de secagem, eles se cristalizam. A cristalização é acompanhada por um aumento de volume destes sais. O ciclo de dissolução/hidratação - cristalização provoca o umedecimento dos materiais pela característica higroscópica e degradação pelo aumento de volume. (Ver **Figura 3.4**)

Segundo Magalhães (2011, p. 72), quando os revestimentos ricos em sais solúveis faz contato com a água líquida ou com elevados teores de vapor de ar, os sais que têm a característica higroscópica absorvem água, tornando-se uma espécie de depósitos de líquidos geradores de anomalias em virtude de facilitar a dissolução de mais sais que ainda não foram hidratados. Estes fatores formam uma cadeia patológica degenerativa do revestimento e do substrato.

² Períodos de chuva e períodos de calor são características do clima de Recife e Olinda.

³ Qualidade de um produto de absorver a umidade do ar, de forma a estabelecer um equilíbrio hídrico com o meio ambiente.

⁴ Segundo Henriques apenas os sulfatos e os carbonatos não são higroscópicos.

Figura 3.4 - Ciclo dissolução/hidratação - cristalização dos sais solúveis

Fonte: Elaborado e desenhado pela autora.

A hidratação/dissolução - cristalização dos sais pode gerar a eflorescência ou a criptoflorescência. O diferencial entre as mesmas é o local onde há a cristalização dos sais. A primeira caracteriza-se pela formação de uma substância de aparência cristalina geralmente de cor esbranquiçada que aflora na superfície do revestimento alterando seu aspecto e colmatando os poros do revestimento, inviabilizando a permeabilidade (Ver **Figura 3.5**). Observados em microscópio, os sais possuem a forma geométrica de seus cristais que lembram flores, assim são nomeados de "eflorescência" a cristalização de qualquer tipo de sal (MAGALHÃES, 2011, p.76).

Figura 3.5 - Eflorescência em intervenção com uso de cimento Portland

Fonte: Autora (2013) - Retirada no 1º pavimento da Casa 25, Pátio de São Pedro em Recife.

A criptoflorescência (Ver **Figura 3.6**) é quando a cristalização dos sais ocorre entre o revestimento e o substrato, e/ou nos poros e/ou vasos capilares destes materiais, gerando aumento de volume por serem expansivos. Esta dilatação implica em um impulso e tensões na estrutura prejudicando a aderência dos materiais, visto que a produção deste impulso perpendicular ao plano de interface entre os materiais pode gerar o descolamento em virtude da perda de aderência, que tende a degradar o revestimento. O substrato também desprotegido tende a sofrer em decorrência da exposição às intempéries, e das anomalias causadas pelos sais e da umidade excessiva.

Figura 3.6 - Fendilhação⁵ decorrente de Criptoflorescência

Fonte: Autora (2013) - Retirada no pavimento térreo da Casa 25, Pátio de São Pedro em Recife.

Magalhães (2011, p. 76) informa que para que haja a ocorrência da eflorescência e da criptoflorescência é necessário a junção de três fatores:

- Presença de umidade;
- A existência de sais solúveis nos materiais constituintes do revestimento ou do suporte;
- Pressão hidrostática para propiciar a migração da solução para a superfície do revestimento.

Bauer (1988) classifica os sais solúveis contidos no cimento Portland de acordo com sua composição em: carbonato de cálcio, carbonato de magnésio, carbonato de potássio, carbonato de sódio, sulfato de sódio e cloreto de potássio. A **Tabela 3.1** mostra a caracterização quanto à solubilidade, e destes apenas os dois primeiros apresentam-se como pouco solúveis. Desta forma, a maior parte dos sais solúveis contidos no cimento Portland é solúvel em água.

⁵ Fendilhação - qualquer abertura longitudinal que atravessa toda a espessura do reboco, chegando a rompê-lo, tornando possível distinguir bem as duas partes do elemento construído. Fissura - toda abertura longitudinal curta, fina e com desenvolvimento discreto. (MAGALHÃES, 2011)

Tabela 3.1 - Sais solúveis presentes no cimento e sua solubilidade em água

Sais solúveis presentes no cimento e sua solubilidade		
Nomenclatura		Solubilidade em água
Carbonatos	Cálcio	Pouco
	Magnésio	Pouco
	Potássio	Muito
	Sódio	Muito
Sulfatos	Sódio	Muito
Cloreto	Potássio	Muito

Fonte: (BAUER, 1988)

No tocante ao comportamento mecânico, o cimento produz uma argamassa com altas resistências mecânicas em detrimento a uma argamassa com uso de cal como aglomerante. Souza et al (2012) mostram que uma argamassa mista com traço 1:1:6 (cimento:cal:areia) tem uma resistência à compressão aos 28 dias de 6,73 MPa e uma argamassa com traço 1:3 composta de cal e areia⁶ tem na mesma idade 1,24 MPa, ou seja, a primeira argamassa é 5,42 vezes mais resistente que a segunda. E uma argamassa com o traço 1:3 (cimento:areia) tem resistência de aproximadamente 15 MPa⁷, 12 vezes maior que a argamassa com aglomerante de cal.

Em seu estudo Veiga (2003c) conclui que as argamassas de cimento com traço 1:4 não são adequadas para o uso em intervenções visto que haveria uma transmissão de esforços a estrutura decorrente do substrato e que possivelmente causaria sua degradação. A autora usa o termo argamassa bastarda para designar uma argamassa quando se adiciona outros materiais à argamassa de cal, tais como: pó de tijolo, cinzas volantes, pozolanas, cimento branco ou Portland.

⁶ Em ensaios obtidos nesta pesquisa de mestrado

⁷ Nos estudos de iniciação científica em Engenharia Civil do aluno Alisson Anunciação de Almeida e do Professor Doutor Arnaldo Manoel Pereira Carneiro da UFPE.

As argamassas de cimento são demasiado "fortes" e rígidas, transmitem ao suporte forças que se consideram excessivas... Confirma-se, assim, que são argamassas pouco adequadas para paredes antigas, tendendo a degradar as alvenarias fracas por transmissão de esforços elevados e a fendilhar por dificuldade em acomodar as deformações elevadas que são expectáveis nesse tipo de alvenaria. A argamassa bastarda com teor de cimento idêntico ao de cal aérea é, ainda, demasiada "forte", mas as restantes características encontram-se dentro dos limites aceitáveis. (VEIGA, 2003c)

A autora relata que as argamassas bastardas com o mesmo teor de cal e cimento com o traço 1:1:6 são ainda fortes, mas as demais características são satisfatórias para o uso em intervenções. As argamassas bastardas com cal e pozolanas foram as que apresentaram maior compatibilidade e os melhores resultados.

Segundo Veiga (1997 apud MAGALHÃES, 2011, p. 74), argamassas ricas em cimento Portland com elevados teores de finos e água de amassamento são suscetíveis à fendilhação devido à elevada retração pela alta rigidez e pelos movimentos diferenciais dos vários materiais que estão em contato (substratos). Para que os revestimentos resistam satisfatoriamente às fontes de tensões de tração a que estão sujeitas, elas devem ter retração moderada e um módulo de elasticidade reduzido.

Quando há uma intervenção pontual com argamassa de cimento Portland em um determinado trecho da alvenaria, fato que muito acontece nas edificações históricas; e pelo fato da argamassa original ser muito porosa, esta absorve mais água que as primeiras, e com a presença dos sais do cimento, podem vir a fendilhar em decorrência da cristalização dos sais no interior do revestimento.

Gonçalves (2011, p. 176) considera que a ação dos sais solúveis afeta de forma geral edifícios antigos e constituem uma das principais causas da sua degradação, diminuindo progressivamente a segurança estrutural das construções.

No que coterne à questão estética, o revestimento rico em cimento Portland não possui semelhança com a textura das argamassas originais de cal. Isto contradiz o que a Carta de Burra fala que os materiais usados na estabilização não devem destruir a significação do que ele representa, nem o degradar. Assim como a Carta de Veneza que preconiza o uso de materiais compatíveis com os originais. A

textura e a reflexão da luz tem sua importância no aspecto visual da intervenção e deve ter uma harmonia com o que é original.

As argamassas ricas em cimento Portland não obedecem aos preceitos estéticos das argamassas por uma questão de textura, reflexão de luz, aspecto visual e não são compatíveis com as argamassas e substratos históricos (Ver **Figura 3.7** e **3.8**).

Figura 3.7 - Aspecto visual de uma intervenção com uso de cimento Portland



Fonte: Autora (2013) - Retirada no 1º pavimento da Casa 25, Pátio de São Pedro em Recife.

Figura 3.8 - Aspecto visual com camada de pintura de uma intervenção com uso de cimento Portland



Fonte: Autora (2013) - Retirada no pavimento térreo da Casa 25

Conclui-se que as argamassas de cimento tem um potencial destrutivo por degradar tanto o revestimento como o substrato, que por ser estrutural pode ser levado a colapso, gerado por tensões mecânicas a que o substrato não fora projetado para suportar.

As intervenções ricas em cimento Portland e em sais solúveis com características físicas e mecânicas diferentes das argamassas originais são um dos principais vetores de dano estrutural as edificações históricas, visto que a alvenaria foi concebida de modo estrutural e sua degradação causa danos e anomalias graves, podendo levar ao colapso. Fato que deve ser divulgado e contido o uso indiscriminado de intervenções ricas em cimento Portland em edificações históricas estruturadas com tijolos e rochas, por haver uma vasta literatura que identifica tais danos como patologias degenerativas.

4 – REQUISITOS TÉCNICOS E ESTUDOS SOBRE CAL, METACAULIM E REAÇÕES POZOLÂNICAS.

4.1 – O Aglomerante

Antes de adentrar ao estudo da cal, este texto fará uma breve abordagem sobre os aglomerantes, suas classificações e características, para logo mais explicar as características inerentes do aglomerante do estudo, a cal.

Os aglomerantes são classificados em orgânicos e inorgânicos. Os orgânicos, de acordo com Mehta e Monteiro (2008), tem composição básica formada por carbono, e são o betume (asfalto) e as resinas. Os inorgânicos possuem composição básica de silício (Si), cálcio (Ca) e alumínio (Al), e são a cal, gesso, cimento Portland e outros cimentos.

Os aglomerantes inorgânicos são solúveis em água, onde a pasta tem o mecanismo básico de dissolução dos íons, solução saturada onde ocorrem as reações químicas e físicas, e precipitação do material.

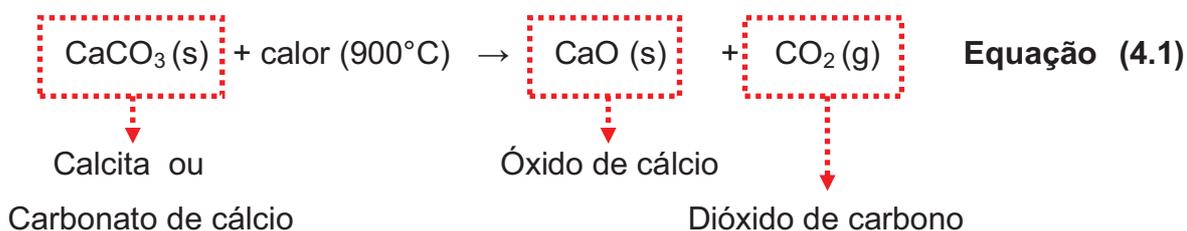
Os aglomerantes inorgânicos, ainda segundo os autores, são classificados em aéreos e hidráulicos. Os primeiros são menos resistentes à ação prolongada da água, e são exemplos: a cal virgem e a hidratada. Os aglomerantes inorgânicos hidráulicos são mais resistentes à ação prolongada da água, tendo como exemplo a cal hidráulica.

4.1.1 – As Cales

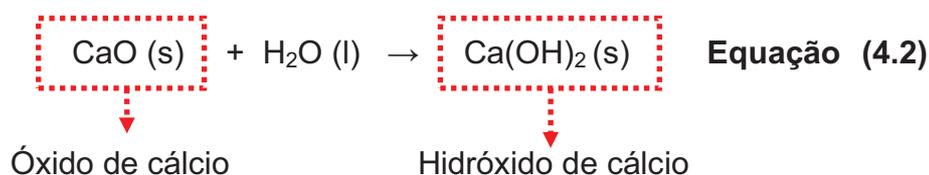
4.1.1.1 – As cales aéreas

A cal virgem é obtida pela calcinação da rocha calcária ou calcita, fundamentalmente constituída de carbonato de cálcio (CaCO_3), a uma temperatura de 900°C , segundo a **Equação (4.1)**, onde o carbonato de cálcio (CaCO_3), depois de ser calcinado, dá origem ao óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO_2). É

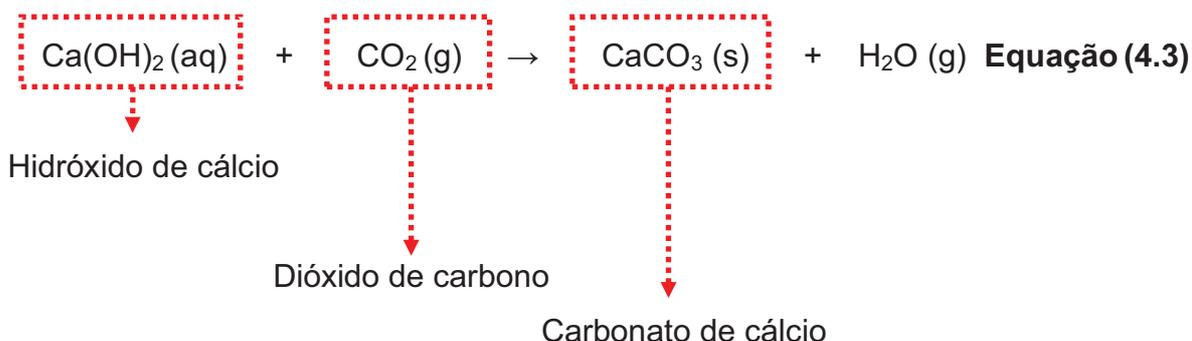
constituída de uma reação endotérmica¹ com liberação do dióxido de carbono, também denominado anidrido carbônico.



O óxido de cálcio (CaO) é conhecido vulgarmente como cal viva ou cal virgem. Após a calcinação, dar-se a "extinção da cal", que é a hidratação da cal virgem e tem como produto o hidróxido de cálcio Ca(OH)₂, conforme expressa a **Equação (4.2)**.



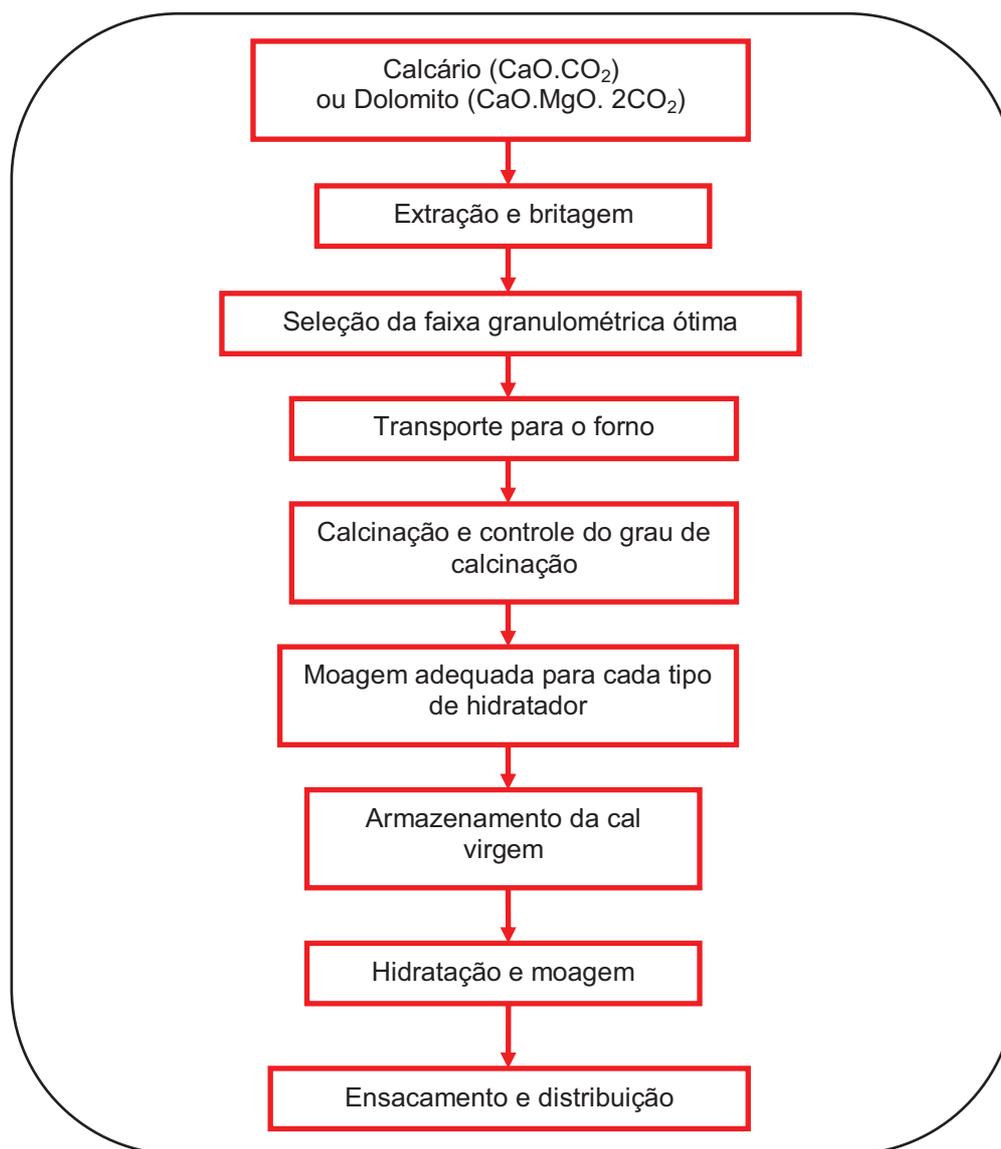
A cal hidratada quando aplicada no substrato sofre o endurecimento através da carbonatação, onde o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) entra em contato com o dióxido de carbono (CO₂) presente no ar, dando origem ao carbonato de cálcio (CaCO₃) com a evaporação da água contida não quimicamente combinada, transcrita na **Equação (4.3)**. Tal reação é um processo lento que dar-se do exterior para o interior da argamassa. Bell (1987, p. 26, 91-3 apud RAGO; CINCOTTO, 1999) afirma que a carbonatação da cal é lenta e tampora as eventuais fissuras ocorridas nas argamassas mistas.



¹ É uma reação química cuja energia total (entalpia) dos seus produtos é maior que a de seus reagentes, ou seja, ela absorve energia (na forma de calor)

A **Figura 4.1** mostra o fluxograma das etapas de fabricação da cal hidratada. O calcário ou o dolomito é extraído e britado, transportado ao forno para a calcinação a uma temperatura de 900°C, passa por uma moagem e posterior armazenamento da cal virgem. Em seguida, o material é hidratado e moído, e ensacado para a comercialização.

Figura 4.1 - Fluxograma da produção da cal hidratada



Fluxograma elaborado pela autora

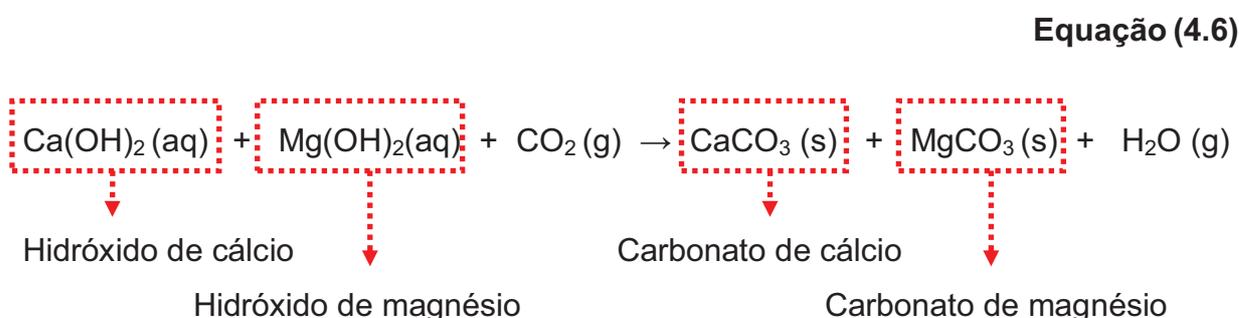
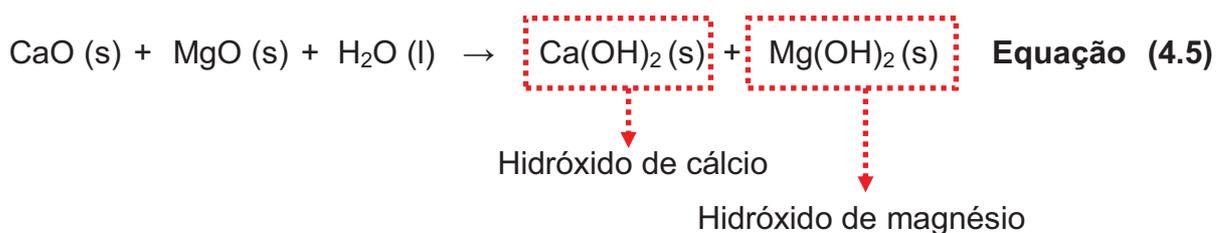
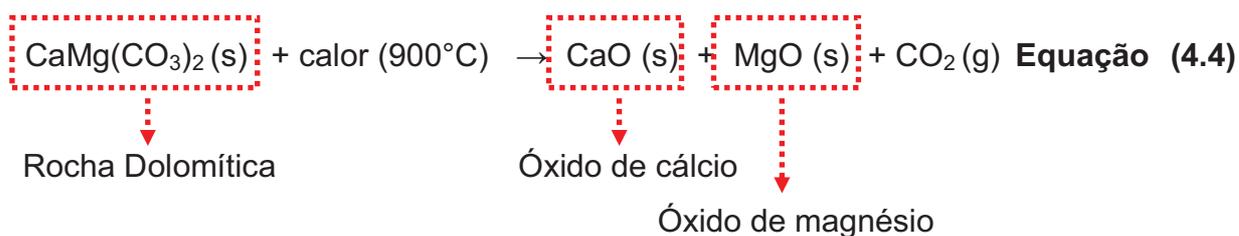
A matéria-prima predominante para a produção de cal hidratada pode ser duas rochas carbonáticas sedimentares: calcários ou dolomitos. Os calcários possuem como material predominante a calcita ou carbonato de cálcio (CaCO_3). As

rochas dolomíticas possuem a predominância tanto de carbonato de cálcio quanto de carbonato de magnésio ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$).

Assim, a cal tem propriedades definidas de acordo com os teores dos óxidos de cálcio e magnésio, e estes teores classificam as cales em cálcica, dolomítica e magnesiana.

A cal cálcica tem predominância de óxido de cálcio na sua composição. A cal dolomítica tem um meio termo em relação aos teores de óxidos de cálcio e de magnésio. A cal magnesiana possui um maior teor de óxido de magnésio quando comparado com a dolomítica. Entretanto, é mais fácil encontrar jazidas de cal cálcicas em detrimento das outras duas.²

Desta forma, ao se compendiar as equações secundárias ocorridas durante o processo de fabrico da cal devido as impurezas da matéria-prima, tem-se que caso a cal aérea seja dolomítica, a sua calcinação, hidratação e carbonatação dar-se-á de acordo com as respectivas **Equações (4.4), (4.5) e (4.6)**.



² Notas de aula da Disciplina de Química dos Aglomerantes ministrada pelo professor Doutor Antônio Acacio em 2012 na Pós-graduação em Engenharia Civil da UFPE.

Segundo Velosa (2006, p. 30) a depender do processo de extinção do hidróxido de cálcio e do hidróxido de magnésio, estes podem apresentar-se em pasta ou em pó. Assim, no presente trabalho considera-se o "(s)" nas **Equações (4.2) e (4.5)** como material em pó. E considera-se o hidróxido de cálcio e de magnésio nas **Equações (4.3) e (4.6)** como solução "(aq)", uma mistura homogênea com uma ou mais substâncias.

Kanan (2008, p. 31) relata que o carbonato de cálcio presente na argamassa curada, apesar de quimicamente similar ao CaCO_3 presente na matéria-prima do calcário original, apresenta características físicas de comportamento muito diferentes.

A **Tabela 4.1** mostra as diversas nomenclaturas dos compostos presentes nas cales, tais como os vocabulários comumente utilizados, o químico, mineralógico e da química do cimento.

Tabela 4.1 - Nomenclatura dos compostos presentes nas cales

Vocabulário comum	Vocabulário químico	Vocabulário mineralógico ou da Química do Cimento	Fórmula do composto
Calcário (Cal virgem cálcica)	Carbonato de cálcio	Calcita	CaCO_3
Cal virgem ou cal viva	Óxido de cálcio*	—	CaO
Cal hidratada ou apagada	Hidróxido de cálcio	Portlandita	Ca(OH)_2
Cal carbonatada	Carbonato de cálcio	Calcita	CaCO_3
—	Carbonato de magnésio	Magnesita	MgCO_3
Cal virgem magnesiana	Óxido de magnésio*	Periclásio	MgO
—	Hidróxido de magnésio	Brucita	Mg(OH)_2

* Predominância do composto

Fonte: Tabela elaborada pela autora.

Sendo assim, a cal hidratada é composta por hidróxidos de cálcio e de magnésio. Como muitas vezes a extinção da cal virgem durante o fabrico não é executada de forma adequada, ocorre então a presença de óxidos de cálcio e de magnésio remanescentes.

Polisseni (2005) ao retratar a instabilidade volumétrica da escória de aciaria remete ao aumento de volume do cristal do carbonato de cálcio (CaCO_3) que é de 99,4% a 105,8% superior ao cristal do óxido de cálcio (CaO).

O CaO livre, ao hidratar-se, gera o cristal de Ca(OH)_2 e ao carbonatar-se gera o cristal de CaCO_3 , com volume de 99,4% e 105,8% superior ao cristal de CaO , respectivamente, o que causa, conseqüentemente, a instabilidade volumétrica da escória de aciaria, causando sua expansão.
(POLISSENI, 2005, p.53)

Tal argumento de Polisseni é válido também às argamassas de cal hidratada, pois os óxidos de cálcio e magnésio quando hidratados tardiamente desencadeiam a instabilidade volumétrica destas argamassas. Os autores Mehta e Monteiro (2008, p. 214) e Taylor (1997, p. 2) relatam a hidratação do periclásio (MgO cristalino) como uma reação lenta e expansiva.

Segundo Sequeira *et al* (2007), o CaO é um composto instável que é ávido por água com a qual reage e libera uma grande energia acompanhada de aumento de volume.

Assim, aconselha-se deixar a cal hidratada maturando no canteiro de obra, para que os óxidos remanescentes sejam hidratados, visto que estes óxidos de cálcio quando hidratados tardiamente nas argamassas geram patologias, pois sua hidratação gera expansão, são os chamados popularmente de "pipocamentos" do revestimento. Por isso, é importante uma segunda extinção das cales hidratadas em obras de restauração para minorar a potencialidade destas erupções nas argamassas de intervenção.

Existem ainda na cal hidratada, os resíduos de extinção, que é a fração super-calcinada não hidratável que gera desagregação da argamassa e os teores de impurezas das rochas, que é material inerte. Segundo Silva³, as impurezas encontradas nas rochas calcárias são o quartzo, silicatos argilosos, óxidos metálicos de ferro e manganês, matéria orgânica, fosfatos, sulfetos, sulfatos, e fluoretos.

A cal é um aglomerante inorgânico e deve obedecer à norma técnica brasileira (NBR 7175) que determina a classificação das cales em CHI, CHII e CHIII, de acordo com as exigências químicas e físicas presentes nas **Tabelas 4.2 e 4.3**,

³ Hilton Barbosa da Silva em suas notas de aulas na disciplina de Materiais de construção na UNIP - Universidade Paulista.

respectivamente. A pureza das cales hidratadas é aferida de acordo com o teor de anidrido carbônico, onde a CHI detém a maior pureza, seguida da CHII e por fim a CHIII.

As propriedades da cal hidratada têm relação com a porcentagem na composição química dos óxidos totais, resíduo solúvel, óxidos de cálcio e magnésio não hidratados, anidrido carbônico (ou dióxido de carbono) e água combinada.

O teor de óxidos totais está relacionado à pureza da matéria-prima, ou seja, o teor de óxidos de cálcio e de magnésio. Quanto maior o teor de óxidos totais maior será a pureza da cal.

O resíduo insolúvel está relacionado às impurezas ou materiais de adição, tais como areia (material inerte). Segundo Kanan (2008, p. 59), os resíduos insolúveis podem estar presentes na cal hidratada devido ao resultado da calcinação seja ela, má, incompleta ou excessiva. Desta forma, quanto maior o teor de material insolúvel menor é a reatividade da cal, pois o teor de tal material interfere no grau de aglutinação da cal hidratada.

O teor de óxidos não hidratados representa o grau de hidratação da cal na fabricação, então quanto menor este teor melhor será a qualidade da cal hidratada. O teor de anidrido carbônico está intrinsecamente ligado ao grau de calcinação da matéria-prima. Desta forma, se o teor de anidrido carbônico estiver elevado, significa que a cal (carbonato de cálcio) não foi calcinada corretamente.

A água combinada tem relação direta com o grau de hidratação da cal virgem. Se houver um teor baixo, significa que não houve a hidratação correta. Os óxidos livres estão relacionados com a hidratação e a supercalcinação da matéria-prima.

Tabela 4.2 - Exigências químicas da cal hidratada para argamassas

Requisitos		Critérios limites		
		CH - I	CH - II	CH - III
Anidrido carbônico	Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
	No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO + MgO)		≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos totais na base de não-voláteis (CaO + MgO)		≥ 90%	≥ 88%	≥ 88%

Fonte: NBR 7175/2003.

Em relação às propriedades físicas das cales, a norma determina os teores limites para a percentagem retida nas peneiras 0,600 mm e 0,075 mm, retenção de água, incorporação de areia, estabilidade e plasticidade.

A percentagem de cal retida na peneira 0,600 mm é delimitado igualmente para as três tipologias das cales, menor ou igual a 0,5%. Em relação a percentagem retida na peneira 0,075 mm, quanto menor o teor retido melhor será a qualidade da cal, em virtude de o material abaixo da tal peneira ser pulverulento e de mais fácil hidratação dos grãos e do processamento das reações. A norma NBR 9289 (2000) descreve o procedimento para a determinação de finura da cal.

A retenção de água da cal está intrinsecamente relacionada à perda de água da argamassa ao substrato, possibilitando o maior tempo de plasticidade da argamassa e a produtividade de seu executor. Para Melo *et al* (2007), a cal possui a capacidade de reter água em torno das suas partículas. Desta forma, quanto maior a retenção de água da cal maior será sua capacidade de desempenho. A norma NBR 9290 (1996) prescreve o método utilizado para o ensaio de retenção de água da cal hidratada para argamassas, através do funil de Buchner modificado.

A incorporação de areia está relacionada à facilidade da pasta de cal hidratada envolver os grãos do agregado miúdo, unindo os mesmos. Quanto maior for o teor de incorporação de areia maior será a plasticidade da argamassa no estado fresco. Melo *et al* (2007) afirmam que a plasticidade é obtida a partir do contato da água com as partículas da cal hidratada, as quais são muito finas e funcionam como lubrificante, reduzindo o atrito entre os grãos de areia presentes na argamassa, proporcionando maior trabalhabilidade e boa aderência ao substrato.

A determinação do procedimento de ensaio da capacidade de incorporação de areia no plastômetro de Voss é dada pela NBR 9207 (2000), onde o equipamento permite determinar a quantidade máxima de areia-padrão que pode ser misturada a uma cal hidratada sem que haja prejuízo nas características de trabalho da mistura resultante.

A estabilidade da cal pressupõe a ausência de cavidades e protuberâncias no revestimento, e tem ligação com o teor de óxidos não hidratados, visto que sua presença causa "pipocamentos" na argamassa, conforme já foi comentado anteriormente. O ensaio para a determinação de estabilidade é prescrito na NBR 9205 (2001) e trata de uma observação visual.

Para que haja uma maior produtividade na execução do revestimento todas as cales foram igualmente definidas pela NBR 7175 (2003) com o mesmo critério limite de maior ou igual a 110. A descrição do ensaio para a determinação da plasticidade da cal hidratada é definida pela NBR 9206 (2001) com o uso do plasticímetro de Emley.

Tabela 4.3 - Requisitos físicos da cal hidratada para argamassas

Requisitos		Critérios limites		
		CH - I	CH - II	CH - III
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600 mm	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
	Peneira 0,075 mm	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Retenção de água		≥ 75%	≥ 75%	≥ 70%
Incorporação de areia		≥ 3,0	≥ 2,5	≥ 2,2
Estabilidade		Ausência de cavidade ou protuberância		
Plasticidade		≥ 110	≥ 110	≥ 110

Fonte: NBR 7175/2003

Segundo Rago e Cincotto (1999) na argamassa a cal hidratada possui a finalidade de melhorar a retenção de água no estado fresco, melhorar a plasticidade, minimizar as retrações durante o endurecimento e melhorar a extensão da aderência sobre a superfície do substrato.

As autoras acima e Melo *et al* (2007) mencionam ainda, que no estado endurecido, a cal possibilita absorção das deformações, devido ao seu baixo módulo de deformação. Tal propriedade é de extrema importância no desempenho da argamassa, possibilitando-a acompanhar a movimentação da estrutura e diminuição da retração gerando menor variação dimensional do revestimento.

Selmo (1989 apud TRISTÃO, 1995, p. 26) em seu estudo sobre dosagens de materiais e sua interferência na resistência mecânica dos revestimentos, considera que a adição de cal nas argamassas aumenta a capacidade de deformação, minorando os efeitos das cargas de impacto devido a melhor absorção destas.

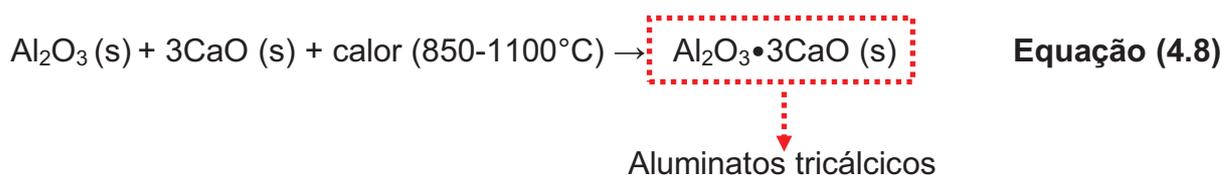
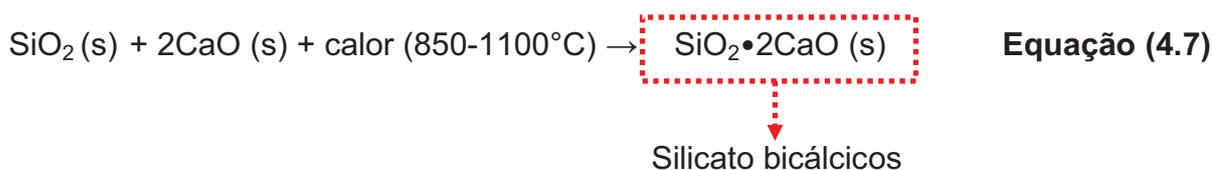
Contudo, Almeida *et al* (2007) afirmam que o endurecimento da argamassa de cal é extremamente lento, o que faz com que haja sérios entraves na execução de revestimentos com este material. Em seus estudos, Freitas *et al* (2008) relatam que há casos em que o endurecimento da argamassa de cal é superior a um ano.

4.1.1.2 – Cal hidráulica

A cal hidráulica pode ser obtida através da calcinação⁴ de rocha, a chamada cal hidráulica natural ou através de dosagem de adição pozolânica a cal hidratada na argamassa, conferindo-a hidráulicidade.

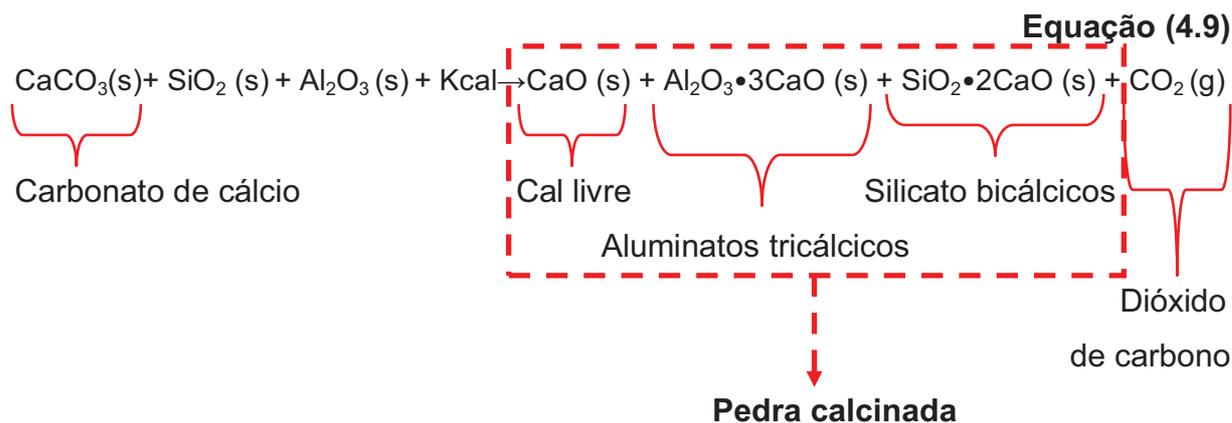
Sequeira *et al* (2007) informa que a obtenção da cal hidráulica natural é dada por uma rocha composta por uma mistura de argila e calcário. Onde procedem na calcinação as seguintes reações:

- Entre 400° C e 600° C - A argila se decompõe e combina-se com o óxido de cálcio;
- Entre 850° C e 1100° C - As reações dão origem aos silicatos bicálcicos (Ver **Equação (4.7)**) e aos aluminatos tricálcicos (Ver **Equação (4.8)**);
- O carbonato de cálcio ou calcário (CaCO₃) a partir da temperatura de 850° C dá origem ao dióxido de carbono (CO₂) e o óxido de cálcio (CaO);
- A calcinação das substâncias calcárias e argilosas, em proporções definidas, até que haja a ustulação⁵ origina uma estrutura compacta designada pedra calcinada (Ver **Equação (4.9)**);



⁴ Segundo Velosa, depois de passar pelo processo de calcinação a cal hidráulica necessita passar pelo processo de extinção assim como a cal aérea.

⁵ Expor um material a uma alta temperatura na presença do ar. No caso específico, Sequeira *et al* afirma que a ustulação deve ser sem que haja a formação de fase líquida.



Para Alvarez ([s.d] apud SEQUEIRA *et al*, 2007), à pedra calcinada é adicionado o gesso cru ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) onde a mistura é homogeneizada e transformada em um pó fino, e o produto final é a cal hidráulica natural.

Metha e Monteiro (2008, p. 217 e 226) informam que a gipsita que é usada no cimento Portland tem função de desacelerar a hidratação dos aluminatos, visto que a reação dos aluminatos é imediata com a formação de hidratos cristalinos, sendo mais rápida que a reação dos silicatos. As características de enrijecimento⁶ (perda de consistência) e pega⁷ (solidificação) são amplamente determinadas pelas reações de hidratação dos aluminatos.

Segundo Kanan (2008, p. 33 e 34), o percentual de argila é superior a 25% em sílica e alumina. E quanto maior o teor de argila no calcário mais hidráulica é a cal, pois a hidráulidade depende do quantitativo de sílica e alumina presente na rocha.

Carasek *et al* (2001) classificam as cales hidráulicas de acordo com os teores de óxido de cálcio em relação aos óxidos totais, onde é:

- Cálcica: $\text{CaO} \geq 90\%$;
- Magnésiana: $65\% < \text{CaO} < 90\%$;
- Dolomítica: $\text{CaO} \leq 65\%$.

A calcinação da rocha, segundo Velosa (2006, p. 30), é a cerca de 1200°C , onde os produtos da queima são semelhantes aos do cimento Portland, contudo o que difere é a diminuição da relação $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S}$ (alita/belita). Tal fato acontece em

⁶ Enrijecimento - é a perda de consistência da pasta plástica de cimento e está associado ao fenômeno de perda de abatimento no concreto. (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 226)

⁷ O tempo de pega se refere à solidificação da pasta plástica de cimento. O início da solidificação, chamado de início da pega, marca o ponto em que a pasta se torna não trabalhável. (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 226)

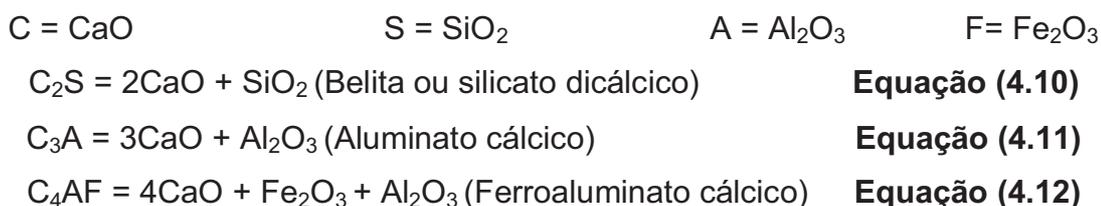
virtude da diminuição do teor de C_3S (alita ou silicato tricálcico) que necessita de altas temperaturas para a sua formação.

Taylor (1997) informa que acima de $1350^\circ C$ é dado o desenvolvimento dos cristais de alita, e que o silicato tricálcico é o composto mais importante do clínquer constituindo-o cerca de 50-70%, contudo o alto teor de alita não se apresenta na formação da cal hidráulica e a temperatura necessária não é atingida para a formação do C_3S .

O fato de haver uma diminuição do teor de alita em relação ao de belita, explica o ganho de resistência nas idades mais avançadas nas cales hidráulicas. O silicato tricálcico reage relativamente rápido com a água, e segundo Taylor é responsável pelo ganho de resistência nas primeiras idades no cimento Portland. A belita ou silicato dicálcico, segundo o autor, reage lentamente com a água, tendo pouca resistência aos 28 dias, e com 1 ano pode atingir a mesma resistência mecânica da alita pura.

Os trabalhos dos autores Charola e Henriques (1999, p. 95-104), Velosa (2006, p.30), Gualtieri *et al* (2006, p. 401-406.) apontam os produtos das cales hidráulicas como os semelhantes aos presentes na fabricação do cimento, sendo os principais o C_2S , C_3A , e C_4AF . Tais nomenclaturas são da química do cimento, e são abreviaturas das fórmulas químicas que são descritas nas **Equações (4.10), (4.11) e (4.12)**.

Abreviaturas da química do cimento:



Para Sequeira *et al* (2007), a sílica e a alumina se ligam à cal através de forças intermoleculares formando os compostos do silicato dicálcico e o aluminato cálcico. A pega da cal hidráulica ocorre em duas fases:

1. Fase predominantemente hidráulica com a hidratação dos aluminatos tricálcicos e silicatos bicálcicos;

2. Fase aérea onde ocorre a relação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono atmosférico, que se dá do exterior do revestimento para o interior.

Sequeira *et al* (2007) em seus estudos concluíram que a cal hidráulica natural é um ligante que combina em uma única substância a pega hidráulica e aérea, que conferem as argamassas modernas características adequadas a utilização na restauração em edificações históricas com porosidade equilibrada. A cal hidratada é um ligante aéreo e dá a argamassa a propriedade de ductilidade, entretanto, a cal hidráulica tem a união dos comportamentos de ductilidade e resistência à ação prolongada a água.

Os autores descrevem ainda as vantagens do uso da cal hidráulica nas intervenções históricas:

- Maior untuosidade ou plasticidade;
- Redução da fissuração decorrente da boa aderência ao substrato e da baixa retração;
- Maior tempo de trabalhabilidade operacional, decorrente do maior espaçamento de tempo entre o início e o fim de pega.

4.2 – Adições Pozolânicas

A norma NBR 12653 define materiais pozolânicos como:

Silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.(NBR 12653, 1992, p. 2 e 3)

Kanan (2008, p.34) descreve pozolanas como sendo qualquer material que contém sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) reativas que na presença de água reagem ou combinam-se quimicamente a temperatura ambiente com a cal formando compostos aglutinantes (silicatos de cálcio hidratados). Seus produtos possuem uma pega mais rápida e melhor resistência à água. Para Lea (1971 apud JOHN; NITA, 2007), os produtos pozolânicos possuem propriedades cimentantes.

Rocha (2005, p. 18) afirma que as pozolanas são materiais cerâmicos constituídos por óxidos na fase predominantemente amorfa, com a aparência de um

pó fino semelhante ao cimento, usualmente nas cores cinza-claro, rosa, vermelho, preto ou branco. Possuem a capacidade cimentante quando na presença de compostos ativadores.

Para Gibbons (2003), pozolana é um material finamente pulverizado que pode ser aditivado à argamassa de cal para aumentar a sua durabilidade e proporcionar uma pega mais rápida.

Lea classifica as pozolanas quanto à origem, em naturais e artificiais. As pozolanas naturais são encontradas na natureza em alguns materiais de origem vulcânica e terras diatomáceas. As artificiais são originárias de beneficiamento como tratamento térmico em argilas e rochas, ou podem ser provenientes de subprodutos das atividades industriais e agroindustriais.

Para Velosa (2011), as pozolanas naturais são compostas preponderantemente por sílica (SiO_2) em cerca de 22 a 70% e alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) em menor porcentagem, respectivamente, 4 a 10%, e 2 a 13%. Existe a possibilidade da existência de outros componentes tais como: óxidos de cálcio, magnésio, sódio, potássio e o trióxido de enxofre.

Sobre as pozolanas artificiais, a referida autora, informa que são obtidas através de tratamento de materiais com base siliciosa a temperaturas de calcinação específicas para cada material, produzindo material com composição de sílica amorfa. Estas temperaturas não devem ser demasiadamente elevadas para não potencializar a nucleação e o crescimento cristalino. O arrefecimento brusco promove a formação de matéria amorfa⁸ ou com baixo grau de cristalinidade, e desta forma, torna o material mais reativo.

A norma NBR 12653 (1992) classifica os materiais pozolânicos em três classes, descritas na **Tabela 4.4**, e determina as exigências químicas e físicas nas **Tabelas 4.5 e 4.6**, respectivamente.

⁸ Materiais amorfos - materiais que possuem um arranjo atômico estrutural desordenado, não repetitivo.

Tabela 4.4 - Classificação dos materiais pozolânicos

Classificação	Descrição
Classe N	Pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos aplicáveis nesta Norma, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, "cherts" silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.
Classe C	Cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas que obedece aos requisitos aplicáveis nesta Norma.
Classe E	Qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores, conforme estabelecido nesta Norma.

Fonte: NRB12653/1992

Tabela 4.5 - Exigências químicas das classificações dos materiais pozolânicos

Propriedades	Classificação do material pozolânico		
	N	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , % mín.	70	70	50
SO ₃ , % máx.	4,0	5,0	5,0
Teor de umidade, % máx.	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo, % máx.	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis em Na ₂ O, % máx.	1,5	1,5	1,5

Fonte: NRB12653/1992

Tabela 4.6 - Exigências físicas das classificações dos materiais pozolânicos

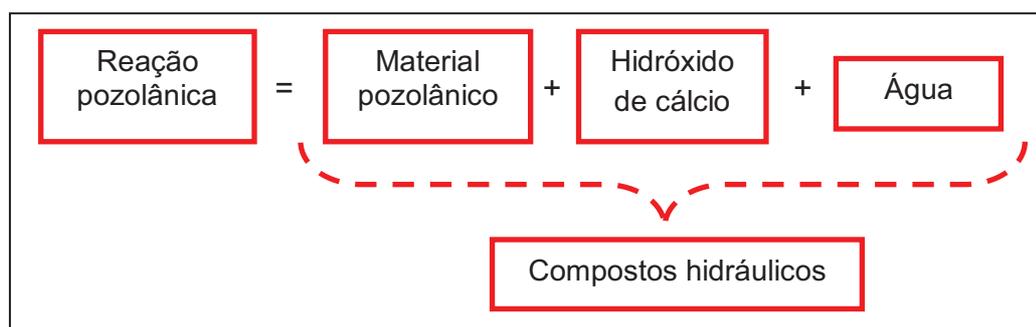
Propriedades	Classificação do material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira 45µm, % máx.	34	34	34
Índice de atividade pozolânica:			
- com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % mín.	75	75	75
- com a cal aos 7 dias, em MPa	6,0	6,0	6,0
- água requerida, % máx.	115	110	110

Fonte: NRB12653/1992

Segundo Gibbons (2003), as propriedades e o comportamento das pozolanas devem ser sempre verificada através de ensaios, antes do seu emprego na construção. A escolha do tipo e da quantidade de pozolana a ser utilizada numa argamassa de cal moderna deve ser determinada pelas exigências de desempenho, disponibilidade dos materiais e pela experiência.

De acordo com Velosa, a reação pozolânica (Ver **Figura 4.2**) é uma reação química entre um dado material, vulgarmente designado como pozolânico, e o hidróxido de cálcio, na presença de água, formando compostos hidráulicos. E é a existência desta reação que permite classificar os materiais em pozolânicos ou não e a sua extensão determina o grau de pozolanicidade ou reatividade pozolânica de um dado material.

Figura 4.2 - Esquema da reação pozolânica



Fonte: Esquema elaborado pela autora

Para Boffey e Hirst (1999), as reações pozolânicas possuem diversos graus de reatividade, que depende do teor de sílica reativa, da finura dos grãos e qualidade da cal.

Veiga (2006) afirma que as adições pozolânicas permitem obter características melhoradas das argamassas de intervenção, principalmente no tocante ao comportamento a água.

Para Velosa (2011), espera-se que o comportamento das argamassas com adições pozolânicas, além de se enquadrarem no campo das necessidades adstritas da conservação patrimonial, se revele superior ao das argamassas de cal sem adições no que concerne à durabilidade.

John e Nita (2007) afirmam que as pozolanas podem contribuir para o ganho de resistência mecânica e redução do teor de água na trabalhabilidade devido ao efeito físico das partículas na distribuição granulométrica do sistema. Este fenômeno é mais acentuado em pozolanas que possuem granulometria mais fina, como é o caso da sílica e do metacaulim.

Os autores constataram que o teor de pozolana que não reagiu nas primeiras idades exerce a função filler, provocando a densificação da região da zona

de transição, desta forma, colmatando os poros. Massazza (1993 apud JOHN; NITA, 2007) afirma que nas misturas com cal a reação pozolânica é lenta.

Desta forma, a literatura menciona que o uso das pozolanas em argamassas de intervenção é uma saída viável e que dá durabilidade às restaurações do patrimônio histórico. Contudo, como o estudo experimental da pesquisa aborda o uso do metacaulim, no item a seguir será explanado sobre este material.

4.2.1 – Metacaulim

O metacaulim é obtido da argila caulínica, para isso a mesma deve ser calcinada a temperatura de 500° a 800° C, depois moído para adquirir a granulométrica desejada a valores inferiores a 5 µm, e obtendo-se desta forma a reatividade pozolânica (SOUZA, P. S. L.; DAL MOLIN, D. C. C., 2006).

Para Rocha (2005, p. 18), o metacaulim é um material pozolânico cuja rede atômica apresenta pouca ou nenhuma organização cristalina, sendo um material predominantemente amorfo.

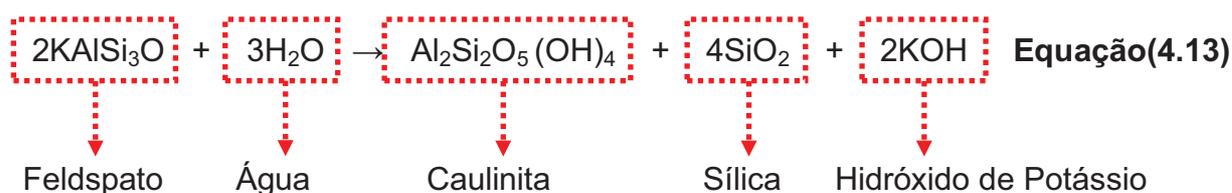
Outra definição é que a pozolana é constituída basicamente por sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃), além de pequenos teores de Fe₂O₃, Na₂O, K₂O e outros. Para Santos (1975 apud JOHN; NITA 2007), o metacaulim é um material pozolânico proveniente da calcinação do argilomineral caulinita que tem como componente principal o caulim (METACAULIM, 2004).

Rocha (2005, p. 15) afirma que a produção do metacaulim se dá pela prospecção da argila caulínica; seguido do beneficiamento e eliminação de suas impurezas, secagem, calcinação, moagem e micronização⁹.

O autor¹⁰ remete que o beneficiamento das argilas caulínicas produz o caulim que deve ser de alta qualidade e com baixos teores de impurezas. Os teores de caulim devem ser acima de 50%, visto o alto custo do beneficiamento. A argila caulínica é formada pela decomposição de feldspato por meio de processos geológicos, representada na **Equação (4.13)**.

⁹ Micronização é a seleção de granulometria para o produto.

¹⁰ (ROCHA, 2005, p. 13)



Segundo Souza e Dal Molin (2002 apud NETTO, 2006, p. 83) para que a argila caulinítica possa desenvolver a atividade pozolânica é necessário haja o processo de calcinação nas temperaturas entre 500 - 800°C, seguido de moagem visando à diminuição da granulometria abaixo de partículas inferiores a 5 µm. Desta forma, se obtém uma excelente atividade pozolânica do metacaulim que é denominado por alguns autores como Metacaulim de Alta Reatividade.

A argila caulinítica é também denominada de caulinita ou caulim. A origem da palavra Caulim vem do chinês 'Kao-Ling' que significa "alta cordilheira" onde eram as jazidas de extração do material, utilizado ao longo dos tempos para diversas finalidades como cerâmica, indústria de papel e borracha (VELOSA, 2006, p. 16).

Na caulinita é comum impurezas tais como quartzo, hematita, anatásio, muscovita, feldspato entre outros. Segundo Rocha (2005, p. 9), a caulinita é um mineral argiloso que pode possuir as tonalidades branca, bege, marrom, laranja ou rosa.

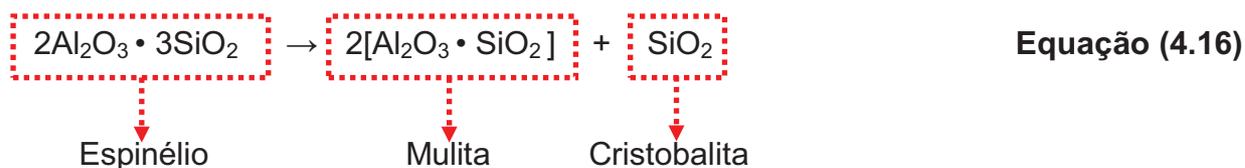
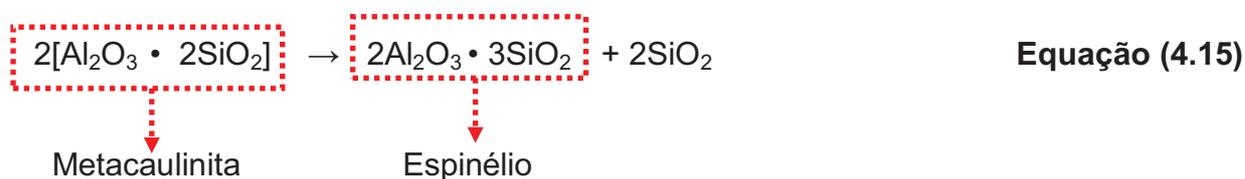
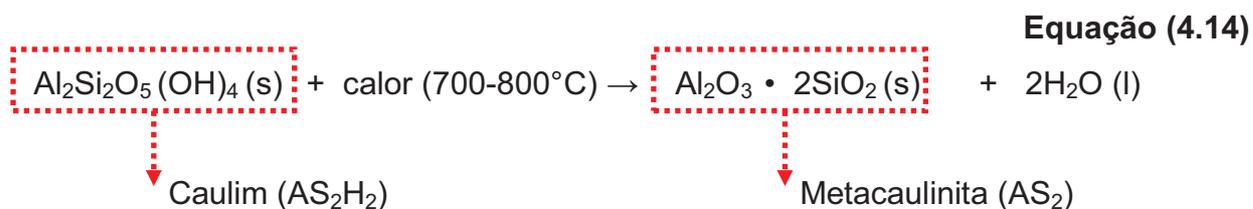
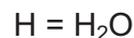
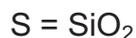
O caulim é essencialmente composto de silicato de alumínio hidratado $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$ que após a calcinação a temperaturas adequadas perde a maioria dos radicais OH^- e passa a ser um silicato de alumínio no estado amorfo, que é quimicamente instável e altamente reativo com o hidróxido de cálcio.

Shvarzan *et al* (2003 apud JOHN; NITA 2007) descrevem a obtenção do metacaulim que é feita pela calcinação a 700-800°C do mineral caulinita, que provoca a desidroxilação da estrutura cristalina, formando uma fase de transição com alta atividade (Ver **Equação (4.14)**). A perda de massa teórica para um caulim puro no processo de calcinação corresponde a 13,76%.

Para Mothé (2004), a caulinita perde a água da sua estrutura cristalina dando origem a uma estrutura amorfa. Entretanto, quando o processo de calcinação tem continuidade, a elevação da temperatura provoca a evolução da estrutura

amorfa da metacaulinita para uma fase cristalina intermediária denominada de espinélio até a nucleação da mulita (Ver **Equações (4.15) e (4.16)**).

. Abreviaturas da química do cimento:



O autor informa que após o beneficiamento gera-se a metacaulinita, um aluminossilicato de estrutura desordenada que não possui propriedades aglomerantes, contudo reage quimicamente com o CH em presença de água originando novos compostos hidratados com propriedades cimentícias e insolúveis em água (MOTHÉ, 2004, p. 6 e 7).

De acordo com Velosa (2006, p. 15), para obtenção do metacaulim de forma a introduzir nestes materiais argilosos reatividade pozolânica é necessário efetuar a calcinação a uma temperatura adequada, que destrua as ligações químicas produzindo material reativo, mas que não seja suficientemente alta para proporcionar a formação de novas fases cristalinas. Os minerais argilosos, principais responsáveis pela formação da fase amorfa e reativa liberam a água absorvida a cerca de 100°C, e se desidroxilam entre 500-600°C, com a formação do metacaulim. Entre os 800°C e os 1000°C, dá-se a nucleação de novas fases cristalinas.

Diversos estudos¹¹ tratam a temperatura de calcinação como um fator fundamental para garantir a reatividade da pozolana artificial, este fator está interligado com o teor de sílica amorfa contido no produto. A estrutura amorfa possui arranjo não cristalino e favorece a reatividade (VELOSA, 2006, p. 45).

O metacaulim se enquadra na Classe N (Ver **Tabela 4.4**), pois sua matéria-prima é a argila calcinada. De acordo com as exigências químicas (Ver **Tabela 4.5**), o somatório de sílica, alumina e óxido de ferro deve ser no mínimo 70%. Contudo, John e Nita (2007) fazem uma ressalva relatando que a norma não fixa os respectivos valores máximos individuais, desta forma, se um material for constituído predominantemente de Fe_2O_3 e tiver um somatório de 70%, mesmo assim atenderia a norma, mas não teria função de pozolana.

Os autores mencionam que o metacaulim possui na sua composição química 40% de alumina (Al_2O_3) e 52% de sílica (SiO_2) preferencialmente no estado vítreo, totalizando 92% do material. O percentual de impurezas é em torno de 8% que podem ser composto de quartzo, outros argilominerais, a mica, o feldspato, gipsita, componentes de ferro e materiais orgânicos, que estão contidos na **Tabela 4.5** nos itens SO_3 e álcalis disponíveis em Na_2O e que possuem os respectivos valores máximos em percentagem de 4,0 e 1,5 %.

A variação de cor do metacaulim, de acordo com Rocha (2005, p.11), é devido à presença de óxidos de ferro (Fe_2O_3 , Fe_2O_2 , FeO) que determinam a coloração alaranjada, vermelha, amarela ou marrom. Este material pode apresentar coloração acinzentada em virtude da presença de óxido de titânio (TiO_2).

Segundo Domone (2001 apud JOHN; NITA, 2007), o tamanho das partículas do metacaulim varia de 0,2 a 0,15 μm . Khatib e Wild (1996 apud JOHN; NITA, 2007) informam que a área específica deste material encontra-se em valores maiores que $12\text{m}^2/\text{g}$.

Velosa (2006, p.43) relata que a finura do material e a superfície específica influenciam na reatividade, onde um material com maior superfície específica implica obrigatoriamente numa maior área de reação contribuindo para o aumento de reatividade.

Massazza (1993 apud JOHN; NITA, 2007) relata a atividade pozolânica como a capacidade que uma determinada pozolana tem em reagir com o hidróxido

¹¹ (COUTINHO, 1958 apud VELOSA, 2006, p. 43); (LEA, 1970 apud VELOSA, 2006, p. 43); (TEUTONICO *et al*, 1994)

de cálcio, isto é, quanto maior o valor do hidróxido de cálcio consumido pela pozolana, maior será a atividade. John e Nita (2007) constataram que há métodos diretos e indiretos de aferir a atividade pozolânica. Os diretos são o Método de Chapelle, Difração de raio X e Termogravimetria. O método indireto é a verificação do desenvolvimento da resistência mecânica ao longo do tempo. A norma NBR 12653 (1992) determina que com a cal a resistência à compressão deve ser de 6 MPa aos 7 dias.

Contudo, este último método tem sua desvantagem, a não possibilidade de distinguir se o ganho de resistência mecânica é devido ao efeito químico ou ao efeito físico da pozolana. Entretanto, a verificação da evolução da resistência mecânica favorece a obtenção de uma estimativa do teor ótimo de pozolana em função da máxima resistência à compressão para uma determinada condição.

Velosa (2006, p. 41) afirma que a utilização de ensaios mecânicos para avaliar a reatividade de pozolanas se baseia no pressuposto que os produtos formados a partir da reação pozolânica provocam o aumento da resistência mecânica. Desta forma, é possível identificar o nível de capacidade de reação de um dado material pozolânico com a cal através da comparação das resistências mecânicas em ensaios laboratoriais.

A norma NBR 5751 determina o índice de atividade pozolânica com a cal. Segundo John e Nita (2007), a maior parte dos estudos relatam o ganho de resistência à compressão nas misturas de cal com pozolana.

Rocha (2005, p. 17) descreve a composição química teórica do metacaulim de alta reatividade com um percentual de 54,1% de sílica e 45,9% de alumina. O autor informa que o nível de pureza é identificado pelos ensaios de fluorescência de raio-X, difração de raio-X e EDS, e os demais parâmetros como área superficial específica ou perda ao fogo. Tais informações determinarão a qualidade do metacaulim que pode ser de baixa, média ou alta reatividade, não existindo norma que especifique a classificação.

Bezerra *et al* (2010) afirma que no concreto no estado fresco, a adição de metacaulim pode contribuir positivamente na trabalhabilidade, coesão e diminuição da exsudação. Observou ainda que pela elevada finura de suas partículas e alta superfície específica, o metacaulim, provoca elevada absorção de água de amassamento pelas suas partículas.

Parande *et al* (2008) afirmam que o aumento do teor de metacaulim nas argamassas e concretos provoca o refinamento dos poros. Segundo Lacerda e Helene¹², em seus estudos sobre a influência da substituição de cimento Portland por metacaulim em concretos, um dos fatores que explicam a diminuição nos teores de vazios nas misturas com metacaulim é devido ao efeito filler. Este efeito ocorre enquanto não se iniciam as reações pozolânicas, onde as partículas finas inertes do metacaulim preenchem os espaços existentes que seriam ocupados pelo ar.

4.3 – Reações pozolânicas da cal e metacaulim

Rocha (2005, p.26) relata que as reações pozolânicas dadas em meio aquoso com dosagem adequada entre o metacaulim e o hidróxido de cálcio, promove reações químicas e formação do gel com capacidade cimentante. As reações de endurecimento da cal e metacaulim podem ocorrer em horas, dias ou meses.

Shi e Day (2000 apud VELOSA, 2006, p. 48) afirmam que a reação pozolânica tem um desenvolvimento lento, com resultados que apontam que as resistências mecânicas à compressão com cal e pozolana tem seus resultados aumentados em 100% entre as idades de 28 dias a 1 ano.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a reação pozolânica ocorre devido à reação entre a cal (básica) e os óxidos (ácidos) da pozolana, que são os maiores responsáveis pela melhoria das características mecânicas no concreto. A principal reação pozolânica envolve a formação de silicato de cálcio hidratado (CSH), similar ao produzido pela hidratação dos silicatos de cálcios do cimento Portland, como o C₃S. A **Equação (4.17)** retrata como ocorre a formação do CSH com a cal hidratada.



Onde: C = CaO , S = SiO₂ , H = H₂O

Em 1938 e 1963, Straetling e Jamlov¹³ respectivamente, detectaram a formação da gelenita hidratada (C₂ASH₈) na mistura de metacaulim com cal. Em 1964, Taylor faz menção a hidrogranada (C₃AH₆). Nos anos de 1962 e 1963,

¹² (LACERDA; HELENE, 2005)

¹³(STRAETLING, 1938 apud SERRY *et al*, 1984) e (JAMLOV, 1963 apud SERRY *et al*, 1984)

estudos¹⁴ afirmam que o silicato de cálcio hidratado é produto característico das reações da cal com a betonita¹⁵.

Dasgupta (1975 apud SERRY *et al*, 1984) informa que os produtos formados durante a hidratação da escória vítrea do sistema CaO - Al₂O₂ - SiO₂ são o gel de CSH, a gelenita hidratada e a hidrogranada.

Para Velosa (2011), os silicatos e aluminatos são substâncias responsáveis pelo aumento da durabilidade nas argamassas.

Serry *et al* (1984) confirmam os resultados de Dasgupta. Estes defendem que os produtos da reação entre o hidróxido de cálcio (CH) e o aluminato presente no metacaulim em temperatura ambiente são o CSH que é mal cristalizado e a gelenita hidratada (C₂ASH₈) ou também chamada de stratilingita, e pequenos teores de hidrogranada, (C₃ASH₆).

Os autores estudaram quatro misturas em pasta preparadas em relação ao peso nas seguintes proporções metacaulim/cal: (80:20), (70:30), (60:40) e (50:50). As pastas foram ativadas termicamente por 2 horas a uma temperatura de 800°C e foram cobertas com algodão umedecido para minimizar o efeito da carbonatação nas pastas hidratadas. Picos endotérmicos da Termogravimetria constataram a presença:

1. pico → 100-150°C - Silicato de cálcio hidratado¹⁶;
2. pico → 150-220°C - Gelenita hidratada;
3. pico → 220-300°C - Hidrogranada;
4. pico → 420-520°C - Cal hidratada.

Serry *et al* (1984) teceram conclusões a respeito dos resultados da pesquisa, onde:

- O principal produto de hidratação encontrado na Termogravimetria foi à gelenita hidratada e seu teor aumentou com o avançar das idades nas pastas com maior teor de cal. Quanto maior o teor de cal maior o teor de gelenita hidratada;

¹⁴ (EADES *et al*, 1962 apud SERRY *et al*, 1962) e (GLENN; HANDY, 1963)

¹⁵ Betonita - a designação de uma argila com grãos muito finos e com teores de impurezas, ou seja, metacaulim.

¹⁶ Segundo Serry *et al*, o gel de CSH não pode ser facilmente detectado pela Termogravimetria devido ao seu baixo grau de cristalinidade.

- A hidrogranada (C_3AH_6) é formada nos primeiros estágios de hidratação nas misturas onde há um menor teor de cal (80:20) e seu teor aumentou nas idades mais avançadas. Este composto não apareceu nas amostras ricas em cal. A hidrogranada se forma principalmente como resultado da ferrita ou do C_3A (Aluminatos cálcicos). Este resultado está de acordo com os estudos de Wall e De Wet (1972 apud SERRY *et al*, 1984);
- O silicato de cálcio hidratado e o aluminato de cálcio hidratado foram relatados serem os produtos de hidratação das misturas caulinita-cal. Considerando que o silicato de cálcio hidratado é o principal produto das misturas quartzo e cal.

Sabir *et al* (2001) reafirmam os três compostos acima mencionados por Serry *et al* (1984) nas reações entre o metacaulim e o CH, resultando em aluminatos hidratados e alumino-silicatos hidratados, mais acrescenta o composto C_3AH_6 .

Contudo, Murat em 1983, já mencionava os quatro produtos formados pela reação pozolânica, de acordo com a variação da relação (em massa) entre o metacaulim (AS_2) e o hidróxido de cálcio (CH). Em todas as relações há a formação de CSH, ao ser 0,5 encontrou-se o aluminato tetracálcio hidratado (C_4AH_{13}), ao ser 0,6 os aluminatos tricálcio hidratados (C_3AH_6) e quando 1,0 a gellenita hidratada (C_2ASH_8). As relações estão exemplificadas nas **Equações (4.18), (4.19) e (4.20)**.



Murat (1983) informa que o processo de cura influencia no endurecimento e nas reações das misturas e que durante o estudo constatou-se que as amostras conservadas em temperatura ambiente a 20°C, o desenvolvimento da resistência é muito limitado devido à evaporação da água contida e pela rápida carbonatação do hidróxido de cálcio.

Em seu estudo, concluiu-se que o hidróxido de cálcio reage com o metacaulim formando essencialmente três compostos a gellenita hidratada, CSH e pequenas quantidades de C_4AH_{13} .

Segundo Mehta e Monteiro (2008, p.206), a cal hidratada não é estável na água, mas que ao carbonatar-se lentamente e forma um produto estável, o carbonato de cálcio. E quando a pozolana faz parte do sistema de hidratação, os silicatos de cálcio hidratados ficam estáveis em água.

Taylor (1997) afirma a existência de diversos tipos de CSH, totalizando 17 tipologias, influenciados pelas condições em que são formados, variando sua estrutura cristalina e suas propriedades. Chen *et al* (CHEN; THOMAS; TAYLOR; JENNINGS, 2004 apud VELOSA, 2006, p. 36) contabilizaram em 2004 mais de 30 fases de CSH no estado cristalino.

Segundo Velosa, o grau de cristalinidade destes produtos é usualmente baixo, visto que para a formação destes produtos são necessárias condições de pressão e temperatura superiores às encontradas no meio ambiente, tais como temperatura superior a 100°C e pressão superior a atmosférica.

Taylor constata que o silicato de cálcio hidratado (CSH) pode ser encontrado como formação natural com diversas designações, entretanto as mais comuns são os grupos das Tobermoritas e Wollastoritas.

O CSH do tipo tobermorita pode ter a formação de duas fases de semi-cristalinas, o CSH tipo I e CSH tipo II. O CSH tipo I é caracterizado por uma razão Ca/Si menor que 1,5 e possui morfologia de favos. O CSH tipo II tem uma razão de Ca/Si maior ou igual a 1,5 e sua morfologia é fibrosa. Dentro do tipo tobermorita, quando a razão de Ca/Si é maior que 1,5, o gel de CSH é material praticamente amorfo e apresenta morfologia variada como plaquetas irregulares, favos e fibras. (Ver **Tabela 4.7**)

Tabela 4.7 - A razão Ca/Si referente ao gel de CSH tipo Tobermorita

Razão Ca/Si	Nomenclatura	Morfologia
< 1,5	CSH tipo I	Favos
≥ 1,5	CSH tipo II	Fibrosa
> 1,5	_____	Plaquetas irregulares, favos e fibras.

Fonte: (TAYLOR, 1997)

Segundo Velosa (2006, p. 37), os autores que estudaram as duas tipologias de silicato de cálcio hidratado formados a partir da reação pozolânica do metacaulim com o hidróxido de cálcio estão dispostos na **Tabela 4.8**.

Tabela 4.8 - Tipologias de CSH produto da reação cal-metacaulim

Tipologia de CSH	Referência bibliográfica
$C_2S_2H_n$	(LEA, 1938) (STÄTLING <i>et al</i> , 1948)
CSH	(FRIAS, CABRERA, 2001) (LEA, 1970) (MOROPOULOU <i>et al</i> , 2004) (ROJAS; CABRERA, 2002) (SABIR <i>et al</i> , 2001) (TAYLOR, 1997)

Fonte: (VELOSA, 2006, p.37)

A autora ainda menciona a ocorrência dos aluminatos e os silicoaluminatos de cálcio hidratados nas reações pozolânicas. A gelenita hidratada (C_2ASH_8) ocorre tanto nas reações de cal com pozolana natural como nas artificiais. O aluminato tetracálcio hidratado (C_4AH_{13}) é produto somente das reações da cal com as pozolanas artificiais. E todos os materiais pozolânicos artificiais produzem aluminatos tricálcio hidratado (C_3AH_6), exceto as cinzas volantes por causa da sua variação de composição.

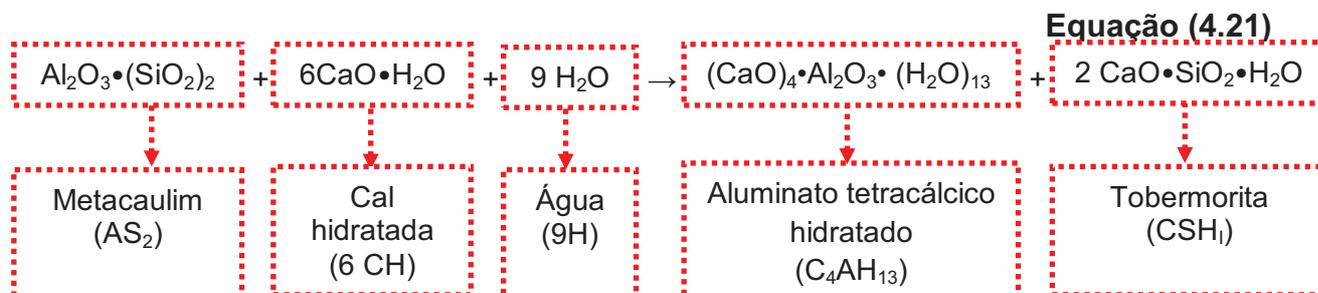
Velosa (2006, p. 39) descreve a presença de cinco aluminatos e silicoaluminatos de cálcio hidratados em estudos de outros autores produtos da cal com metacaulim, que estão dispostos na **Tabela 4.9**.

Tabela 4.9 - Aluminatos e silico-aluminatos de cálcio hidratados produtos formados pela reação do hidróxido de cálcio e o metacaulim.

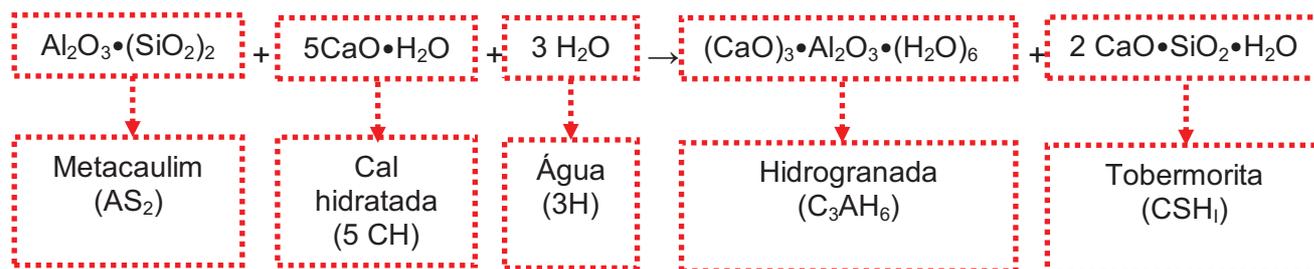
Referência bibliográfica	Produtos hidratados
(LEA, 1938)	C ₂ ASH _n
(STÄTLING <i>et al</i> , 1948)	
(LEA, 1970)	C ₃ AH ₆ C ₄ AH ₁₃ C ₂ ASH ₈
(TAYLOR, 1972)	C ₂ ASH ₈
(HE <i>et al</i> , 1995)	C ₂ ASH ₈ C ₃ AH ₆
(SABIR <i>et al</i> , 2001)	C ₄ AH ₆ C ₄ AH ₁₃ C ₂ ASH ₈
(FRIAS, CABRERA, 2001)	C ₃ AH ₆ - produto de reações a temperaturas superiores a 50°C ou em misturas com déficit de hidróxido de cálcio C ₄ AH ₁₃ C ₂ ASH ₈
(ROJAS; CABRERA, 2002)	C ₄ AH ₁₃ C ₂ ASH ₈
(MOROPOULOU <i>et al</i> , 2004)	

Fonte: (VELOSA, 2006)

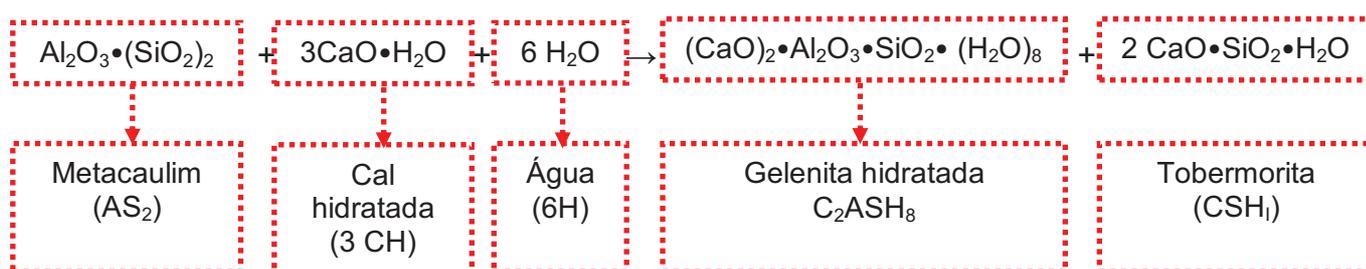
Siddique e Klaus (2009 apud SCHACKOW, 2011, p.89) descrevem as reações pozolânicas ocorridas entre a cal hidratada e o metacaulim, que são descritas nas **Equações (4.21), (4.22) e (4.23)**. A **Equação (4.21)** retrata como produtos finais o aluminato tetracálcico hidratado e a tobermorita. A **Equação (4.22)** os descreve como sendo a hidrogranada e o CSH do tipo tobermorita, e na **Equação (4.23)** os produtos são o mesmo tipo de CSH descrito nas duas primeiras e a hidrogranada.



Equação (4.22)



Equação (4.23)



Desta forma, a literatura descreve a ocorrência de compostos cimentantes como produtos das reações químicas do metacaulim e da cal hidratada, apesar de haver distinção em algumas tipologias dos produtos. Tais compostos influenciam nas resistências mecânicas e na durabilidade das argamassas compostas por estes materiais. Conferindo-as uma compatibilidade com os substratos históricos e uma maior longevidade à ação climática e da água.

4.4 – Estudos de argamassas mistas com uso de metacaulim para uso em argamassa de intervenção.

Alguns estudos apontam para o uso de argamassas contendo metacaulim e cal para intervenção em monumentos históricos ao nortear a viabilidade e a compatibilidade dos materiais originais com novas possibilidades de materiais e estudos compositivos destas argamassas.

Bonilla e Carneiro (2007) ensaiaram argamassas com finalidade de restauração, sendo três traços 1:1, 1:2 e 1:3 (aglomerante: agregado) com a fração aglomerante formada pela mistura de cal hidratada e metacaulim de coloração alaranjada em igual proporção de 1:1. Para a fração de agregado foi determinada uma composição binária na proporção de 70% e 30% dos agregados miúdos. Os

resultados a compressão aos 7 dias estão abordados na **Tabela 4.10** e com as respectivas finalidades de aplicação do revestimento.

A definição da área de aplicação do revestimento se deu de acordo com as resistências mecânicas. O traço 1:1 teve maior valor de resistência, e sua possível utilização seria no assentamento de pedras, visto que, o valor alcançado aos 7 dias é 50% da resistência à compressão necessária para suportar a estruturação da alvenaria de pedra, estipulada em 8 MPa. O traço 1:2 atingiu 2 MPa sua possível aplicação é próxima ao embasamento da alvenaria. A proporção 1:3 se adéqua à utilização de revestimento.

Tabela 4.10 - Resistência à compressão das argamassas dosadas por Bonilla e Carneiro

Traço	Resistência (MPa)	Área de aplicação do revestimento
1:1	5,2	Assentamento de pedras
1:2	2,0	Perto do embasamento da alvenaria
1:3	0,5	Revestimento

Fonte: (BONILLA; CARNEIRO, 2007)

Contudo, é válido ressaltar que os resultados das argamassas dosadas são nas idades iniciais, sem a análise em idades mais avançadas e ensaios complementares que dariam uma maior amplitude comportamental dos traços.

Aggelakopoulou *et al* (2011) ressaltam que há muitos estudos publicados sobre a utilização do metacaulim como adição pozolânica para argamassas de cimento e em concretos, e as reações cinéticas do metacaulim com o cimento e do metacaulim com a cal.

Contudo, segundo os autores, há poucos estudos considerando os aspectos físicos e mecânicos e/ou as propriedades químicas das argamassas de cal com metacaulim. O fato que deve ser considerado é que estes poucos estudos foram executados com a mistura de diferentes materiais, com diferentes proporções e condições de cura, e seus resultados obtidos em idades precoces. Desta forma, há uma dificuldade de comparação das características desses materiais.

Velosa (2006, p. 42) informa que de acordo com o tipo de pozolana há um aparecimento de diferentes cristais em argamassas com cal e uma determinada pozolana.

Em seus estudos a autora usou o traço 1:3 com substituição de 10% e 20% sob o peso da cal, devido à probabilidade deste material ter uma elevada reatividade. Com uso de duas tipologias de metacaulim, uma industrial e outra produzida para a pesquisa na região de Alvarães, totalizando quatro traços com metacaulim e um traço sem a adição.

As argamassas com menos teor de adição apresentaram um coeficiente de capilaridade mais baixo, enquanto que quando aumentou-se a percentagem de metacaulim, elevou-se o coeficiente de capilaridade das argamassas - Ver **Tabela 4.11**.

Tabela 4.11 - Coeficiente de Capilaridade do estudo de Velosa

Traço	Coeficiente de capilaridade ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$)		
	28 dias	90 dias	6 meses
1:3	10,81	17,21	15,47
1:3 Alv. 10%	22,89	20,79	18,89
1:3 Alv. 20%	20,09	24,27	22,08
1:3 Ind. 10%	19,82	20,50	16,17
1:3 Ind. 20%	22,53	21,4	24,79

Fonte: (VELOSA, 2006)

Com relação à resistência na flexão houve valores baixos de resistência mecânica à flexão, com valores similares aos das argamassas de cal aérea até os 90 dias. Não houve um comportamento significativo em relação aos diferentes teores de metacaulim e variação dos resultados - Ver **Tabela 4.12**.

Tabela 4.12 - Resistências à flexão do estudo de Velosa

Traço	Resistência à flexão (MPa)					
	28 dias	D.P.	90 dias	D.P.	6 meses	D.P.
1:3	0,27	0,04	0,26	0,06	0,58	0,03
1:3 Alv. 10%	0,24	0,03	0,37	0,03	0,16	0,03
1:3 Alv. 20%	0,20	0,04	0,26	0,02	0,11	0,01
1:3 Ind. 10%	0,19	0,04	0,22	0,04	0,18	0,02
1:3 Ind. 20%	0,27	0,03	0,21	0,05	0,11	0,01

*D.P. = desvio padrão

Fonte: (VELOSA, 2006)

Quanto às resistências mecânicas à compressão (Ver **Tabela 4.13**), o estudo verificou que não houve uma grande disparidade dos valores com traços

contendo metacaulim, com resultados inferiores a 1MPa, contudo o traço com metacaulim industrial com 20% teve valores superiores aos demais traços com a adição.

Tabela 4.13 - Resistências à compressão do estudo de Velosa

Traço	Resistência à compressão (MPa)					
	28 dias	D.P.	90 dias	D.P.	6 meses	D.P.
1:3	0,50	0,02	0,84	0,03	2,46	0,15
1:3 Alv. 10%	0,42	0,04	0,50	0,01	0,38	0,02
1:3 Alv. 20%	0,62	0,10	0,62	0,02	0,36	0,02
1:3 Ind. 10%	0,48	0,02	0,43	0,13	0,38	0,04
1:3 Ind. 20%	0,76	0,04	0,98	0,26	0,92	0,06

Fonte: (VELOSA, 2006)

A autora concluiu sobre os materiais pozolânicos em seu trabalho, e dentre eles, o metacaulim, que é notória a influência da adição no comportamento à ação da água sob as argamassas e uma pequena influência na resistência mecânica. As argamassas de cal tiveram valores superiores às que continham metacaulim. Estas tiveram resultados insuficientes em relação aos ciclos de envelhecimento acelerado e sofreram degradação.

Veiga (2005) em seu estudo sobre as exigências para argamassas a serem utilizadas em intervenções em edificações históricas define alguns padrões que podem ser tomados como referência (Ver **Tabela 4.14**), contudo é válido ressaltar que devem ser tomadas a priori as características mecânicas do suporte e as semelhanças com as argamassas originais. A autora determinou os usos de acordo com os resultados apresentados pelas argamassas ensaiadas com as mais diferentes composições, desde o uso de cales hidráulicas até as cales aéreas.

Tabela 4.14 - Requisitos estabelecidos para as características mecânicas para argamassas de intervenção

Uso	Características mecânicas (MPa)		Coefficiente de capilaridade (kg/m ² ·h ^{0,5})
	Rt*	Rc**	C
Reboco exterior	0,2 - 0,7	0,4 - 2,5	<12;>8
Reboco interior	0,2 - 0,7	0,4 - 2,5	-----
Juntas	0,4 - 0,8	0,6 - 3,0	<12;>8

Rt* - Resistência à Tração

Rc** - Resistência à compressão

Fonte: (VEIGA, 2005)

Em seu estudo Aggelakopoulou *et al* (2011) investigaram argamassas contendo cal hidratada e metacaulim. A **Tabela 4.15** possui o quantitativo de material dos traços. As argamassas denominadas de MK1 e MK05 foram desmoldados com 3 dias e os demais traços com 7 dias em virtude do menor teor de metacaulim que contribuiu para um maior tempo de endurecimento do material.

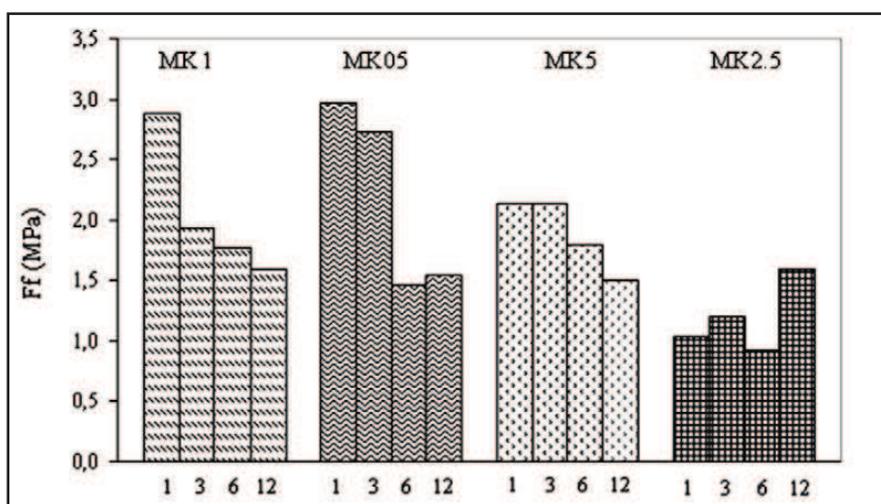
O MK1 apresentou maiores intensidade dos picos relacionados às reações pozolânicas nas curvas de DTA. O estudo constatou que as resistências das argamassas à compressão aumentaram com a proporção de MK/cal. Houve um decréscimo das resistências mecânicas à flexão (Ver **Figura 4.3**) em todas as argamassas do 1º mês até os 12 meses, exceto o MK2.5. Nos resultados de compressão (Ver **Figura 4.4**), houve uma queda das resistências, fato que também foi verificado por Velosa *et al* (2009) e Chiaverini (2004). As razões da queda de resistência não tem causas claras, porém foram atribuídas por Velosa *et al* (2009) às microfissuras de retração decorrentes do alto teor de cal.

Tabela 4.15 - Percentagens dos materiais (em massa) dos traços estudados por Aggelakopoulou *et al*

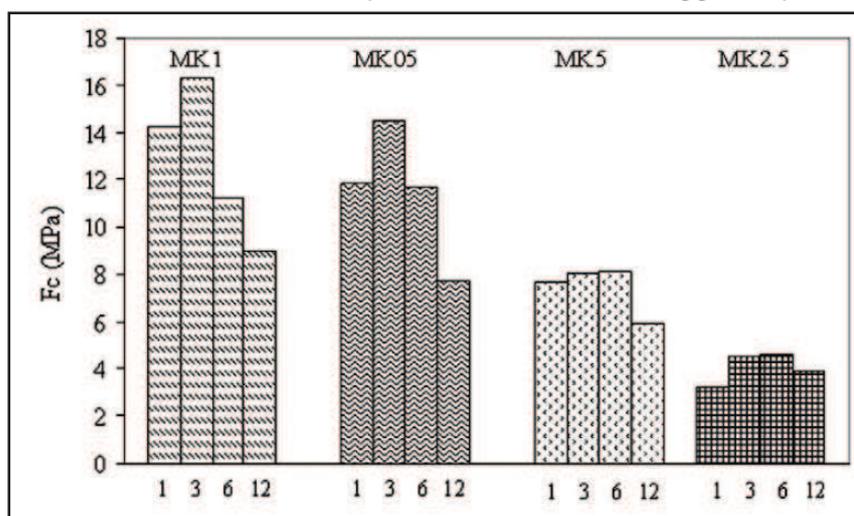
Traços	Cal hidratada	Metacaulim	Agregado miúdo
MK1	15	15	70
MK05	20	10	70
MK5	25	5	70
MK2.5	27,5	2,5	70

Fonte: (AGGELAKOPOULOU; BAKOLAS; MOROPOULOU, 2011)

Figura 4.3 - Resistência à flexão do estudo de Aggelakopoulou *et al*



Fonte: (AGGELAKOPOULOU; BAKOLAS; MOROPOULOU, 2011)

Figura 4.4 - Resistência à compressão do estudo de Aggelakopoulou *et al*

Fonte: (AGGELAKOPOULOU; BAKOLAS; MOROPOULOU, 2011)

Segundo os autores, há poucos estudos referentes aos aspectos físicos, mecânicos e químicos das argamassas com uso de metacaulim e cal hidratada, e os que existem foram executados com diferentes proporções, materiais e condições de cura, o que inviabiliza a comparação dos resultados obtidos.

Entretanto, tais estudos auxiliam na gama de resultados e da perspectiva de aumentar as análises destes materiais e contribuem para o melhor entendimento do seu comportamento e uma possível utilização em intervenções históricas.

O conhecimento da literatura aliado às pesquisas em laboratório, e a sistematização da aplicação das argamassas de estudo favorecem o melhor discernimento dos seus resultados e do seu comportamento com o passar do tempo, viabilizando uma durabilidade dos revestimentos de intervenção com tais materiais.

5 – TRAÇOS UTILIZADOS NAS ARGAMASSAS HISTÓRICAS E A INFLUÊNCIA LUSA NA COMPOSIÇÃO DOS TRAÇOS UTILIZADOS NO BRASIL

Este capítulo abordará primeiramente o conceito de argamassa histórica onde diversos compostos orgânicos e inorgânicos eram utilizados, a seguir descreverá os traços mencionados por diversos autores e a influência destes traços nas argamassas utilizadas no Brasil antes ao século XIX com o advento do cimento Portland, além de abordar a classificação das argamassas históricas de acordo com teor dos seus compostos.

Tais explicações favorecerão a compreensão de que os revestimentos históricos têm uma gama de composições que fogem aos da atualidade, sendo assim, é necessário que exista uma caracterização das argamassas inorgânicas usadas para a execução de obras de restauro e intervenção para que haja uma compatibilização dos materiais da intervenção com os originais.

5.1 – O conceito de argamassa na Antiguidade

Alguns autores definem o conceito de argamassa como sendo a mistura de agregado miúdo, aglomerante e água. Mehta e Monteiro (2008) descrevem como sendo uma mistura de cimento, areia, água e outros materiais, tais como cal, saibro, barro e caulim para facilitar a plasticidade. Tais autores não tratam a cal como um aglomerante principal e sim como uma adição plastificante, visto que o cimento Portland é o aglomerante mais comumente utilizado nas argamassas atuais. Outros atribuem a argamassa como sendo uma composição de aglomerante, agregado, aditivo, adições e água.

A definição de argamassa para monumentos históricos leva em consideração materiais e composições que não são habitualmente utilizados na construção civil na atualidade, tendo um conceito mais amplo e diferenciado.

Santiago (2007, p.19) relata como restritivos os conceitos acima mencionados, visto que se podem encontrar diversas composições que não se enquadram na designação de argamassa da atualidade. “Isto porque tal definição é restritiva, incompleta, desde quando afirma que argamassa consiste em uma mistura

de agregado miúdo, aglomerante e água, composição que nem sempre foi adotada ao longo do tempo."

Kanan (2008) observa que no passado houve o uso de materiais que hoje não são nada convencionais que influíam na trabalhabilidade e na consistência das argamassas no estado fresco e no estado endurecido que detinham o controle das retrações, na absorção e difusão da umidade. Eram materiais orgânicos, tais como: mucilagem vegetal¹, proteínas (tais como: caseína do leite, clara de ovo), óleos animais (peixes, baleia), óleos vegetais (linhaça) e gorduras (sebo), fibras vegetais e animais (palhas, crina, estrume). Estas adições influenciavam diretamente na durabilidade e na resistência final dos revestimentos

Desta forma, é válido explanar alguns traços mencionados por manuscritos, tratados e publicações relacionadas ao tema a fim de esclarecer algumas das composições e as proporções executadas nas argamassas históricas.

5.2 – Traços utilizados nas argamassas históricas

Em seu trabalho, Santiago (2007) descreveu as diversas composições de argamassas textualizadas por tratadistas e outros autores. Neste tópico do capítulo, buscou-se mencionar a composição e traços de alguns destes autores, e no **Apêndice A** há uma tabela que fornecerá um resumo das composições das argamassas antigas com as respectivas bibliográficas primárias.

A primeira descrição em manuscrito que sobreviveu e chegou como conhecimento sobre a forma do uso das técnicas tradicionais de se construir no período de domínio Romano, foi escrito por Vitrúvio. Este texto, descoberto em 1414, é o único tratado da Antiguidade que sobreviveu e que teve grande influência em diversos tratadistas, tais como: Alberti, Andrea Palladio, Serlio, Michelangelo e Vignola².

Para Vitruvius depois que a cal fosse "apagada", ou seja, que a cal virgem fosse extinta "...seria misturada a argamassa de modo que se lancem nela três partes de areia, no caso de ser de origem fóssil, para uma parte de cal; se de origem

¹ Grande grupo de polissacarídeos complexos, frequentemente presentes nas paredes celulares das plantas aquáticas e nos tegumentos de algumas outras espécies. Mucilagem é rígida quando seca e pegajosa quando úmida. Tem possivelmente uma função protetora e se ancora nas plantas.

² Segundo o Historiador da Arte Renato Brolezzi no texto "Vitrúvio e sua herança moderna" contido no livro "Tratado de Arquitetura".

fluvial ou marinha, misturam-se duas partes de areia com uma de cal. Desse modo se conseguirá a proporção ideal de caldeamento".³

Assim Vitruvius sugere o uso do traço 1:3⁴ caso o agregado miúdo fosse fósil ou de jazida e o traço 1:2 caso sua origem fosse fluvial ou marinha, obtendo a melhor proporção da mistura que denomina de caldeamento.

Palladio, tratadista italiano, em 1570 na sua obra "*I Quattro libri dell'Architettura*" faz menção aos mesmo traços usados por Vitruvius, inclusive quanto a origem do agregado miúdo.

Plínio⁵ também relaciona o traço com a origem do agregado miúdo onde 1:4 quando a areia for proveniente de jazida, e quando for de mar ou rio seja utilizado o traço 1:3. Desta forma, o autor aumenta o teor de agregado na argamassa em relação ao de aglomerante ao se comparar com os traços mencionados por Vitruvius.

Entretanto, não havia muitas vezes uma distinção entre argamassa de assentamento e de revestimento nos manuscritos e textos relacionados à construção. Santiago (2008, p. 26) menciona que esta não diferenciação ocorreu até o século XIX. Embora não houvesse esta distinção, havia um grande leque de traços com os mais diferentes tipos de materiais e especificações.

O tratadista, historiador e soldado do período romano, Marco Terencio Varrão⁶ que viveu em 116-27 a.c. indicou para argamassas hidrófugas usadas em pisos e em paredes uma mistura composta de pó de mármore, argila, palha de trigo e bagaço de azeitonas prensadas.

O tratadista italiano Martini⁷ recomendou na sua obra publicada em 1482 intitulado de "*Architettura civile e militare*", o uso do traço usando cal virgem, cinzas de azinheiro⁸ e óleo na quantidade para deixar a argamassa pastosa na proporção 1:0,5. Proporcionando à argamassa a função de hidrófuga. Descreveu ainda o mesmo traço adicionando 0,25 de vitriolo romano⁹ ou sulfato de cobre.

O escritor português Mathias Ayres Ramos da Sylva de Eça¹⁰, que nasceu em São Paulo e que viveu de 1705 a 1763, recriminava o uso de qualquer material

³ Na obra *Tratado de Arquitetura*, 2007, p. 126.

⁴ Os traços descritos neste texto são em volume, quando não são, há uma especificação.

⁵ Na obra *Naturalis Historia*.

⁶ (VARRON, 1945, Cap. LVII, p.55 apud SANTIAGO, 2007, p. 23)

⁷ (MARTINI, v. III, t. I, p.113 apud SANTIAGO, 2007, p. 34 e 35)

⁸ Árvore nativa da região do Mediterrâneo.

⁹ Denominação vulgar de alguns sais metálicos

¹⁰ (EÇA, 1777, Parte II, Cap. X, p. 148/149 apud SANTIAGO, 2007, p. 19)

diferente de areia e de cal nas argamassas. Contudo, a história da arte¹¹ nos mostra que as argamassas portuguesas e as brasileiras até o século XIX usavam adições pozolânicas nas suas composições tais como pó de pedra e pó de tijolos, além do uso de alguns óleos.

No Brasil no período colonial foi comum o uso de óleos¹² nas argamassas, dentre eles o de baleia, o de oliva e o de linhaça. Este último, segundo Santiago tem função secativa. A função dos óleos que são ricos em ácidos graxos é conferir aspecto hidrofugante.

Em 1763, o jesuíta austríaco Christiano Rieger¹³ afirmava que o betume¹⁴ com coalhada de leite e cal virgem deveria ser usado para unir pedra com pedra, madeira com madeira e pedra com madeira. E que para unir pedras irregulares o ideal seria pó de tijolo e cal, mas não menciona a proporção entre os materiais¹⁵.

A depender dos materiais a serem usados na estruturação, a água é citada como único ligante pelo francês Antoine Ville¹⁶ nas muralhas de Charra na Arábia executada com pedras de sal.

No final do século XIX, o português Castanha das Neves¹⁷ textualiza em "**Memoria sobre as investigações experimentais e ensaios de resistência dos materiaes de construção**" que se deveria usar a argamassa composta de areia, cal, borra de ferro, pó de tijolo, massapez¹⁸ e cinza de carvão.

O português Carlos Augusto Pinto Ferreira¹⁹, no início do século XX, descreve vários betumes para a união entre cantarias. Como o pó de pedra e a cal virgem na proporção 1:1. O pó de pedra, a cal virgem e o azeite na seguinte proporção 1,725:1,725:1,5 em litros. E para betumar mármore e outras rochas, indicava a cal virgem em pó com clara de ovo.

Contudo, alguns escritos trazem a identificação do uso a que deveria ser executada a argamassa, determinando se esta deveria ser usada para revestimento ou assentamento.

¹¹ Autores como Santiago, Veiga e Velosa.

¹² Santiago chama de TETIM a mistura de composta de pó de tijolo, cal e azeite com função hidrófuga.

¹³ (RIEGER, 1763, Parte IV, Cap. I, p. 226/227 apud SANTIAGO, 2007, p. 35 e 36)

¹⁴ BETUME é um termo genérico usado antigamente para união de materiais.

¹⁵ No livro de Santiago não há menção dos traços

¹⁶ (DE VILLE, 1641. Parte I, L. I, p. 89 apud SANTIAGO, 2007, p.21)

¹⁷ (CASTANHEIRA DAS NEVES, 1893, t. XXIV, p. 497-522 p. 501 apud SANTIAGO, 2007, p. 19)

¹⁸ Pozolana usada na argamassa

¹⁹ (FERREIRA, 1903, p. 75 apud SANTIAGO, 2007, p. 32)

Plínio, O Antigo, em sua obra *Historia naturale*, determina para revestimento, cal e pó de mármore na proporção de 1,5:1. Tais materiais, cal e pozolanas, foram largamente utilizados nas construções históricas nos mais variados traços.

O teórico italiano Pietro Caetano²⁰, que viveu em Siena de 1510 a 1574, fez uso dos mesmos materiais, entretanto o autor especificou o uso para revestimento em estuque, onde 2/3 era de cal feita com pó de mármore e 1/3 de pó de mármore finamente moído.

O Catalão Bernard Forest de Belidor²¹ que viveu de 1698 a 1761, determinou que para unir pedras a argamassa deveria ter cal e areia ou cal e pó de material cerâmico.

O pintor, arquiteto de origem italiana Gioseffe Viola Zanini²², que viveu nos anos de 1599 até 1631, determinou a utilização para as argamassas de revestimento cal e pó de vidro, cal e pó de telha, cal e pó de Istria²³, cal e escória de ferro. E para obturação no revestimento de marmorino o uso de cal e pó de mármore.

Alguns autores determinam os seus traços de acordo com a pureza ou dureza da cal. Dentre eles, os portugueses Matheus do Couto e Manuel de Azeredo Fontes.

O arquiteto Couto²⁴ em seu manuscrito escrito entre 1631 e 1641, utilizou o 1:1,5 para a cal feita de lioz, e caso a pedra de cal virgem fosse mais branda o traço deveria ser 1:1 e se a pedra de cal virgem tivesse maior dureza, o traço deveria ser 1:2. Havia segundo Santiago (2007, p.49), uma crença de quanto maior a dureza da pedra de cal virgem maior seria sua qualidade, desta forma, o aumento do teor de agregado miúdo não interferiria na resistência e nas características da argamassa de cal.

Fontes²⁵, na sua obra *O Engenheiro Português* datada de 1728-29, relatou o uso do traço 1:2, e caso a cal tivesse pouco poder de aglomeração, fosse usado o traço 1:1.

²⁰ (CAETANO, 1964, L. II, Cap. XI, fls 34v apud SANTIAGO, 2007, p.39)

²¹ (BELIDOR, 1755, p.193 apud SANTIAGO, 2007, p. 20)

²² (ZANINI, 1677, L. I, Cap. XVI, p. 68 apud SANTIAGO, 2007, p. 40 e 41)

²³ Istria foi calcário muito usado nas construções italianas

²⁴ (COUTO, L. II, Cap. IX, p.37 apud SANTIAGO, 2007, p. 49)

²⁵ (AZEVEDO FONTES, t. II, L. VI, Cap. III, p. 282 apud SANTIAGO, 2007, p. 47)

Diante do exposto, fica claro a vasta gama de traços e composições de materiais orgânicos e inorgânicos utilizados nas argamassas históricas. A vinda de portugueses mestres de obras, artífices, arquitetos e engenheiros para a execução de obras públicas e particulares no Brasil Colônia influenciou na forma como eram executadas a arquitetura e a engenharia desde a implantação das residências ao tecido urbano.

As técnicas construtivas e os materiais usados para a estruturação das edificações teve forte influência lusa, onde os traços utilizados em Portugal estavam fortemente pautados nos traços romanos determinados por Vitruvius, Palladio e Plínio.

Como isto, os traços mais comumente utilizados 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.

5.3 – Classificação das argamassas históricas

As argamassas históricas podem ainda ser classificadas de acordo com o teor de cal. Na Bahia, segundo Santiago²⁶, o termo "bastardar" na argamassa, significa adicionar solo na sua composição. Entretanto, o mesmo termo em Portugal significa adicionar à argamassa de cal outros materiais, tais como: pó de tijolo, cinzas volantes, pozolanas, cimento branco ou Portland. No presente trabalho, o termo bastardo está de acordo com as referências portuguesas.

Outra denominação das argamassas históricas é a proporção de cal no traço. Rodrigues²⁷, em seu dicionário técnico escrito no final do século XIX, relata a classificação de acordo com o teor de cal na argamassa. Quando o teor de cal era superior ao teor de areia, a argamassa era chamada de gorda, quando o teor era inferior era denominada magra.

²⁶ (SANTIAGO, 2007, p. 27)

²⁷ (RODRIGUES, 1875, p. 56 apud SANTIAGO, 2007, p. 20)

"...quando são ordinárias, preparam-se com a cal grossa, misturando-lhe mais ou menos areia. Chama-se 'argamassa' gorda quando a cal é em muito mais quantidade do que a areia, e 'argamassa' magra quando a cal não é suficiente para bem ligar"
(RODRIGUES, 1875, p. 56 apud SANTIAGO, 2007, p. 20)

Diante do exposto, se percebe que as argamassas históricas possuem uma diversidade na composição, mas predomina o uso do aglomerante principal a cal, que manteve seu posto até o século XIX, com o advento do cimento Portland.

6 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E APRESENTAÇÃO RESULTADOS

Este tópico tem como objetivo explicar os materiais e os métodos de ensaios utilizados na pesquisa. A metodologia adotada para abordar a caracterização física dos materiais, e os ensaios no estado anidro, fresco e endurecido dos traços das argamassas, assim como apresentar os resultados obtidos.

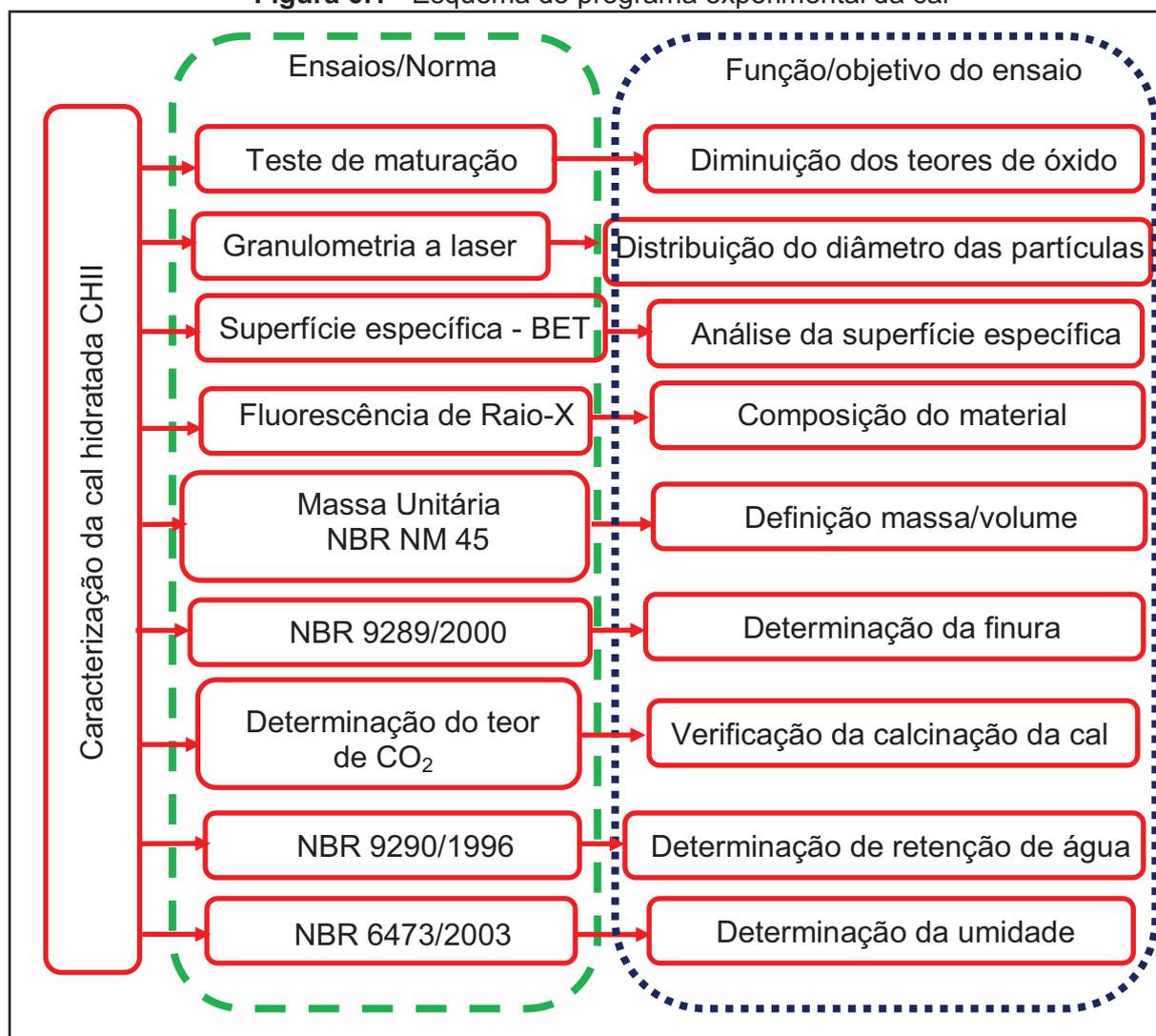
6.1 – Materiais

Para a preparação das argamassas utilizou-se dois tipos de agregado miúdo, cal hidratada como aglomerante e a adição de metacaulim de coloração alaranjada.

6.1.1 – Aglomerante - A cal

O aglomerante utilizado na pesquisa foi a cal hidratada do tipo CH II, mais facilmente encontrada no comércio, que deve obedecer aos critérios estabelecidos pela norma técnica brasileira - NBR 7175 (2003). A **Figura 6.1** traz um esquema do programa experimental, onde relaciona os ensaios executados na cal e/ou suas normas, suas funções e objetivos.

Figura 6.1 - Esquema do programa experimental da cal



6.1.1.1 – Maturação da cal

Em obras históricas é comum a maturação por dias ou até meses, tanto na cal virgem como na hidratada, desde que a mesma não entre em contato com o ar, devido ao processo de carbonatação. A norma NBR 7200/1998¹, informa que o período mínimo de maturação de cal virgem é de 7 (sete) dias, e para a cal hidratada 16 (dezesseis) horas. Rago e Cincotto (1999) fizeram uso do período de 24 (vinte e quatro) horas para a "extinção". Contudo, optou-se neste trabalho por maturar durante três dias ou 72 horas a cal hidratada CH II.

A importância da maturação é pelo fato da existência de óxidos não hidratados na cal hidratada, atribuídos pela não completa extinção dos óxidos

¹ NBR 7200/1998, p. 4 (Item - 6.4.2 e 7.3.2.1)

presentes na cal virgem, e pelo fato desses óxidos ocasionarem patologias ao ter sua hidratação tardia durante a secagem da argamassa na parede, visto que a hidratação dos óxidos tem efeito expansivo, assim formam-se os chamados "pipocamentos" do revestimento².

Ainda segundo Rago e Cincotto (1999, p. 13), quando a cal é deixada em contato direto com a água, em forma de pasta ou em conjunto com areia e água, apresenta melhora nas suas propriedades no estado fresco, tais como a trabalhabilidade e a retenção de água. As autoras ainda relatam a ausência de estudos na microscopia e de lacunas na análise na maturação da cal, e de como o fenômeno se dá microscopicamente, gerando modificações nas propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas compostas pelo material.

Alguns fenômenos além da hidratação dos óxidos de cálcio e de magnésio ainda presentes ocorrem quando a cal hidratada é deixada em contato com a água, sob forma de pasta. Faltam estudos na área, que expliquem este fenômeno microscopicamente, mas intui-se que a cal hidratada seja aglomerado de placas microscópicas, que em contato com a água se desaglomeram, como no caso de placas de argila, aumentando a superfície específica em contato com a água, melhorando assim as suas propriedades no estado fresco, e como consequência também no estado endurecido.

(RAGO;CINCOTTO, 1999, p. 13)

Com base na literatura sobre a importância da maturação nas propriedades físicas e químicas da cal, foi realizado um estudo explanatório para a obtenção de uma cal hidratada maturada sob a forma de flocos.

6.1.1.1.1 – Teste do teor de água a ser adicionado na maturação

Testes foram realizados para a definição do quantitativo de água a ser adicionado à cal hidratada para a maturação durante os 3 dias. Para este procedimento, colocou-se em dois recipientes plásticos a mesma quantidade de cal, e teores diferentes de água. No primeiro recipiente, colocou-se um teor de água para

² Notas de aula da Disciplina Química dos Aglomerantes, ministrada pelo Professor Antônio Acacio.

obter uma consistência pastosa (Ver **Figura 6.2**), e no outro uma consistência mais diluída com uma nata de água sobre a pasta (Ver **Figura 6.3**). Após os dias, verificou-se o aumento de volume de ambas as pastas. A pasta com aspecto pastoso estava mais densa, enquanto a segunda estava com aspecto de pastoso com uma pequena nata de água. Desta forma, calculou-se o teor de água a ser adicionado de maneira que houvesse uma nata de água na superfície da pasta de cal após os 3 dias.

Figura 6.2 - Teste do teor de água - com consistência pastosa



Figura 6.3 - Teste do teor de água - com consistência mais diluída com nata de água na superfície da pasta

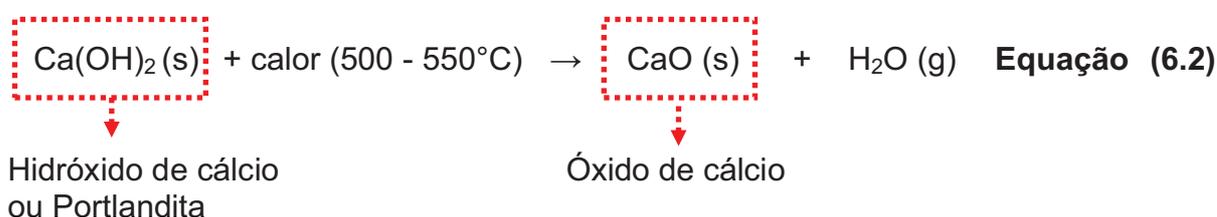
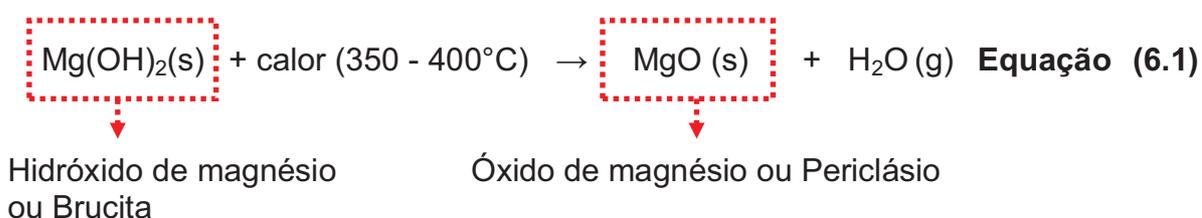


6.1.1.1.2 – Teste de retirada da água

Durante o desenvolvimento da pesquisa, houve a dificuldade de quantificar o teor de cal com exatidão após a maturação, obtendo-se um grande estoque de cal maturada previamente. Haja vista que os trabalhos consultados não quantificavam o teor da cal maturada, contudo quantificavam pequenas porções de pasta de cal. Entretanto, para a execução dos cálculos dos traços em massa foi necessário elaborar uma forma de quantificação desta cal maturada. Para isso, se executou testes; sendo que um deles obteve resultado satisfatório e utilizado no decorrer do estudo.

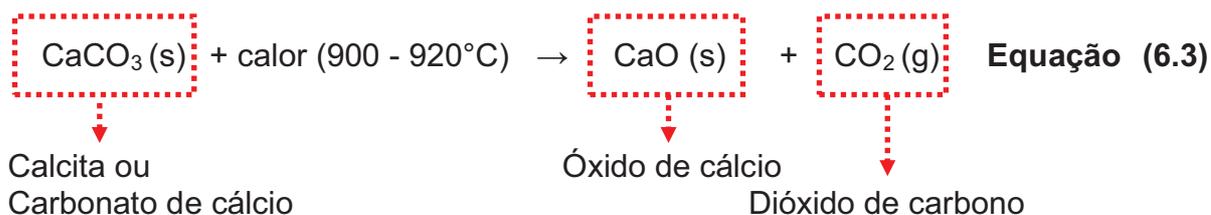
O teste visou saber se ao maturar a cal, e colocá-la na estufa (a uma temperatura de 100 - 105°C) para a retirada da água não quimicamente combinada, e verificar se após esse procedimento a cal aglomeraria.

Segundo Quarcioni (2008, p. 40)³, a decomposição da Brucita e da Portlandita (Ver **Equações (6.1), (6.2) e (6.3)**) ocorre respectivamente na faixa entre 350°C e 400° C, e na faixa entre 500° C e 550° C, a água adsorvida⁴ é perdida a 100° C, ou seja, a água que não está fazendo parte dos compostos, apenas envolvendo-os.



³ (QUARCIONI, 2008, p. 40)

⁴ Água que fica retida na superfície dos sólidos, chega a zero o seu teor quando o sólido é aquecido a temperatura de 105-110°C, até peso constante.



Segundo Mehta e Monteiro (2008, p. 34), tanto a água capilar como a adsorvida não são parte integrante da estrutura dos compostos. A diferença entre elas é que a água capilar está presente nos vazios maiores que 50 Å, e é uma água livre da influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida; já a água adsorvida se encontra próxima à superfície do sólido, e sob influência das forças de atração. Segundo Melo (2002, p.19), a água adsorvida está presente nos microporos e mesoporos; e a capilar encontra-se nos poros maiores denominados de macroporos. Esta última água pode também, segundo o autor, ser chamada de água livre por ter uma baixa tensão superficial e pela sua remoção não ocasionar variação volumétrica.

Assim a temperatura de 100° C permite a retirada da água em excesso, a água capilar e a adsorvida, não decompondo os compostos presentes na pasta de cal, visto que é uma temperatura muito inferior a necessitada para decompor os hidróxidos de cálcio e magnésio.

Para determinar o tempo e a validade do procedimento, foi necessário fazer um teste da perda do teor de água da pasta de cal colocada na estufa. Desta forma, houve as seguintes etapas abaixo:

- a. Maturou-se uma pequena quantidade de cal durante 3 (três) dias em um recipiente plástico, com teor de água suficiente para não deixar a cal entrar em contato com o ar para que não houvesse carbonatação;
- b. Pesou-se os dois recipientes de alumínio e anotou-se os seus pesos;
- c. Antes do procedimento, homogeneizou-se a pasta de cal;
- d. Na balança, tarou-se o valor do recipiente de alumínio e pesou-se aproximadamente 100 gramas de pasta;
- e. Colocou-se na estufa a 100 - 105° C os dois recipientes com as pastas de cal, deixando-os por períodos diferenciados de tempo, sendo um recipiente por 1 (uma) hora e outro por 2 (duas) horas;

- f. Após a retirada, e espera do resfriamento, concluiu-se que havia a mesma perda de massa de 48 gramas de água para os dois experimentos (Ver **Tabela 6.1** e **Figura 6.4**).

Tabela 6.1 - Teste de perda do teor de água da pasta de cal

Experimento 1		Experimento 2	
Quantidade de pasta 102,0 gramas		Quantidade de pasta 103,5 gramas	
Peso do recipiente 185,3 g		Peso do recipiente 194,8 g	
Tempo	Pasta + recipiente	Tempo	Pasta + recipiente
Tempo 1° - 0 h	287,3 g	Tempo 1° - 0 h	298,3 g
Tempo 2° - 1 h	239,3 g	Tempo 2° - 2 h	250,3 g
Perda de massa 48 g		Perda de massa 48 g	

Figura 6.4 - Aspecto da pasta de cal após 2 horas na estufa e pesagem da pasta + recipiente



O teste de perda do teor de água se mostrou eficaz no que diz respeito ao procedimento de retirada da água que não estava quimicamente combinada, ou seja, que estava nos poros capilares da pasta e não se combinava com os óxidos de cálcio e magnésio, formando respectivamente os hidróxidos de cálcio e magnésio.

Contudo, quando se tentou maturar a cal, retirar uma pequena amostra de pasta e fazer o procedimento para quantificar o teor de água da pasta, ocorreram erros e a possibilidade de falha na quantificação do teor de cal na pasta, pois havia a possibilidade de não homogeneização total o que inviabilizaria a quantificação do teor de água por amostragem, o item a seguir relata o procedimento utilizado para maturação e produção da cal no decorrer da pesquisa.

6.1.1.1.3 – Procedimento de maturação e secagem da cal utilizada na pesquisa, denominada "cal em flocos".

Para a maturação seguiu-se os seguintes procedimentos (Ver **Figura 6.5**):

- a. A maturação foi executada numa caixa d'água de fibrocimento em formato cônico com capacidade para 250 litros;
- b. Colocou-se 40 quilos de cal hidratada CH II na caixa d'água para maturação;
- c. Para esta quantidade de aglomerante aéreo, adicionou-se 34 litros de água;
- d. Durante a maturação uma nata de água foi formada e a caixa foi mantida fechada com tampa, deixando apenas uma pequena abertura.

Figura 6.5 - Maturação da cal



Adotou-se o procedimento de maturar a cal por 3 dias e colocar em bandejas metálicas e deixar na estufa a 100 - 105°C por 24 horas para a retirada da água não quimicamente combinada. A escolha da temperatura é devido a vaporização da água que ocorre a 100°C ao nível do mar⁵ passando do estado líquido ao gasoso, e por não decompor os compostos da cal hidratada. Após 24 horas, as bandejas foram retiradas da estufa (Ver **Figura 6.6**). A cal foi apicoada com martelo de pena e/ou soquete, e depois passada na peneira 2.4 mm (Ver **Figura 6.7**), logo em seguida sendo armazenada em sacos selados com lacre e sem ar dentro para evitar a carbonatação dentro da embalagem.

Figura 6.6 - Aspecto da cal após 24 horas na estufa



Figura 6.7 - Apicoamento da cal



⁵ (USBERCO; SALVADOR, 1997, p. 56)

Os procedimentos de maturação, secagem e apicoamento resultaram em uma "cal em flocos" que foi utilizada no decorrer de toda a pesquisa⁶ (Ver **Figura 6.8**).

Figura 6.8 - Cal em flocos pronta para ser embalada e lacrada



6.1.1.1.4 – Teste do tempo de cura da cal utilizada na pesquisa

A "cal em flocos" foi utilizada na pesquisa pelo fato de ser de fácil homogeneização e dissolução dos grumos no manuseio da argamassa no estado fresco, por isso, foi necessário o teste para determinação do tempo de cura para verificar se havia modificação do tempo de endurecimento de argamassa composta pela "cal em flocos" em relação a uma com cal hidratada sem o procedimento.

O teste do tempo de cura foi executado com uma argamassa com cal hidratada CHII maturada e outra batelada com a mesma cal sem o procedimento de maturação. Após a moldagem das duas bateladas de argamassa de cal hidratada com traço 1:3, sendo uma com maturação e outro sem a maturação, verificou-se que havia a mesma dificuldade de endurecimento nos dois traços. Estes apresentavam uma nata carbonatada, contudo quando iria se desmoldar da forma cilíndrica (5cm x 10cm), os corpos de prova estavam no seu interior úmidos e sem endurecimento. A

⁶ Foram maturados e consumidos 80 quilos de cal hidratada CH II.

diferença do tempo de endurecimento de um traço para outro foi de 1 (um) dia, e para isso retirava-se da forma os corpos de prova de maneira delicada e esperava-os carbonatar, fato que ocorria em 24 horas. O traço com cal maturada teve desmolde com 9 (nove) dias e o sem maturação com 8 (oito) dias. A demora no endurecimento pode ser explicada devido à carbonatação ser um processo lento, que ocorre em duas etapas, segundo Kanan⁷:

- A. Evaporação da água da argamassa que gera uma retração;
- B. Reação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) com o dióxido de carbono (CO_2). O teor de CO_2 no ar é de apenas 0,04%, fato que explica lentidão da reação⁸.

Desta forma, percebeu-se que a "cal em flocos" poderia ser utilizada na pesquisa.

6.1.1.2 – Granulometria da cal CHII em flocos

O ensaio permite verificar a distribuição da granulometria e a frequência dos diâmetros existentes na cal. A distribuição granulométrica do aglomerante está correlacionada com a demanda de água necessária para hidratação e molhagem das partículas, influenciando nas propriedades das argamassas no estado fresco, bem como nas suas características e propriedades das mesmas no estado endurecido.

A preparação da cal para o ensaio de granulometria a laser foi obtida seguindo os procedimentos:

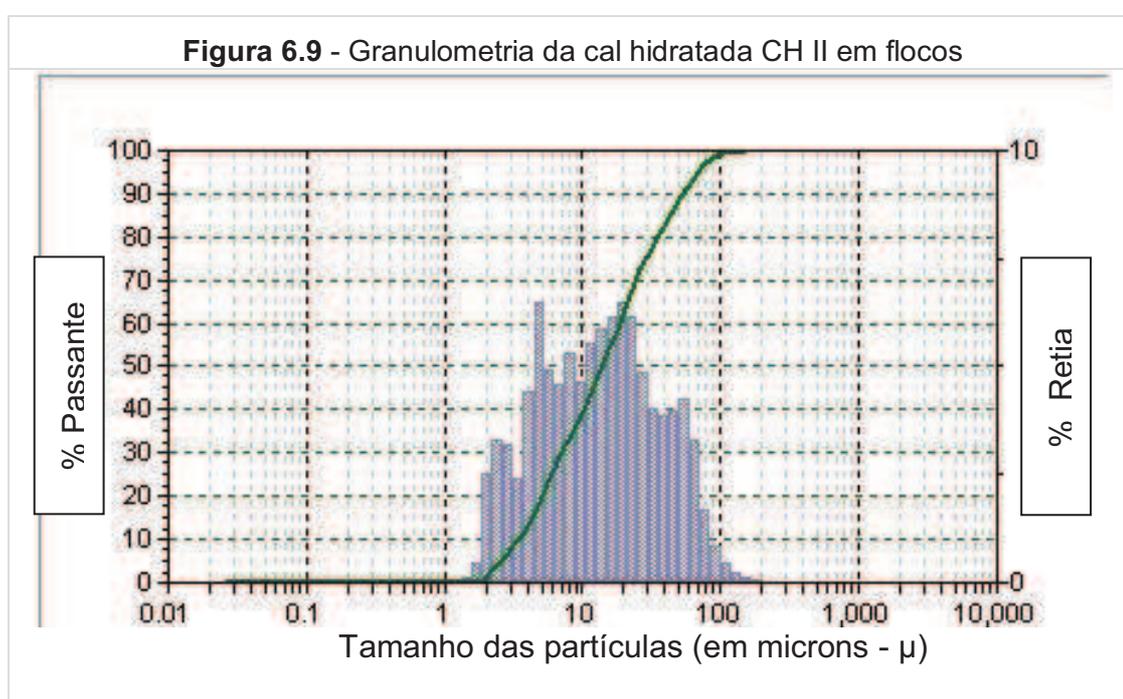
- A. A cal maturada em flocos foi colocada em um almofariz ou gral de porcelana e amassada com um pistilo de cabo de madeira e ponta de porcelana;
- B. A cal foi amassada até que os grumos fossem dissolvidos;

⁷ (KANAN, 2008, p. 31)

⁸ ESTEFANO, Márcio. Notas de aula. São Paulo: Universidade Estadual Paulista, Disciplina de Materiais e Construção Civil, 4º parte, 2004. Disponível em: < <http://www.feg.unesp.br/~caec/downlo ads/3/materiap2.pdf>>. Acessado em: novembro de 2012.

C. Foi colocada em microtubo de 2 ml, identificado e enviado ao Centro de Tecnologia Estratégicas do Nordeste (CETENE) para a execução do ensaio.

O Equipamento utilizado na granulometria a laser foi o Analisador de Tamanho de Partículas Microtac S3500, com comprimento de onda do laser de 780 nm, modelo de difração Fraunhofer, com faixa de determinação de tamanho de partícula por via úmida de 0,02 - 2000 μm . O ensaio seguiu a norma ISO 13320-1 de 1999. A **Figura 6.9** mostra o gráfico com a curva granulométrica da cal.



A curva da granulometria é a formada em forma de "S" na cor verde no gráfico, e possui uma escala no eixo "y" (da esquerda) na faixa de 0 a 100% que corresponde ao resultado acumulado abaixo de um dado diâmetro. Para analisar o gráfico⁹, pode-se dar como exemplo o valor de diâmetro característico D (3 μ , 0,1) é obtido na curva acumulativa que corresponde ao valor de 10% no eixo das ordenadas. Interpreta-se, que 10% das partículas da amostra possuem diâmetro abaixo desse valor de 3 μ .

Entretanto, a curva de frequência (histograma - na cor azul) é representada no gráfico pela curva como um pico, tendo como escala a faixa de 0 a 10% no eixo

⁹ Explicações de análise do gráfico obtidas pelo técnico do Departamento de Nanotecnologia do CETENE Raphael Nascimento.

"y" (da direita), sendo obtida pela derivação da curva acumulativa. Quando essa curva contém apenas um pico é classificada como unimodal, se possui dois picos é chamada de bimodal, se tem três picos de trimodal, e quando possui vários picos é classificada como polimodal, como é o caso do gráfico acima.

Então cada pico do histograma corresponde a uma população de tamanhos de partículas diferentes. Um pico localizado mais a esquerda do gráfico equivale a uma população de partículas de tamanhos de diâmetros menores e, quando localizado mais a direita do gráfico equivale a uma população de partículas de diâmetros com tamanhos maiores.

A cal CHII apresenta uma distribuição granulométrica com uma concentração de partículas retidas nos diâmetros de 4 a 70 μ , e com dois picos de material retido que equivale a 6,25% nos diâmetros de 4-5 μ e de 200 μ . A curva granulométrica possui características uniformes que influenciam na compactação do sistema nas idades iniciais, visto que com o passar do tempo a carbonatação irá colmatar as microfissuras decorrentes da perda de água e dos vazios entre as partículas, minorando os vazios.

6.1.1.3 – Superfície específica da cal CHII em flocos - BET

A determinação da superfície específica do material influencia diretamente no teor de água necessário para molhar as partículas. A preparação da amostra seguiu o mesmo procedimento da granulometria a laser.

A técnica consiste em promover a adsorção do gás (nitrogênio) ao material pulverizado, no caso a cal que foi previamente tratada numa estação de vácuo. A adsorção é executada pela inserção do gás nitrogênio sob pressão a uma baixa temperatura, que são controlados por uma estação de análise¹⁰. O equipamento utilizado na superfície específica (BET) foi o Analisador de superfície e de tamanho de poros ASAP (Accelerated Surface Area and Porosimetry System) 2420 da Micrometrics. A superfície específica da cal CHII é de **13,8554m²/g**.

¹⁰ Caderno Rede NANO CETENE, que contém informações sobre os equipamentos e execução dos ensaios.

6.1.1.4 – Fluorescência de Raio-X da cal CHII em flocos

A fluorescência de Raio-X determina a composição semi-quantitativas dos compostos. O item abaixo explora como foi a preparação da amostra, procedimentos de ensaio e os resultados obtidos.

A cal maturada foi passada na peneira #200 (0,075 mm), colocada em microtubo de 2 ml, identificado e enviado ao Laboratório Núcleo de Estudos Geoquímicos (LABISE).

O método consiste em uma porção da amostra que é colocada na estufa para secar a 110° C e então levada a uma mufla¹¹ a 1000°C, por duas horas, para a determinação da perda ao fogo. Parte da porção seca na estufa é colocada em cápsulas e prensada em prensa hidráulica a 25 ton de força. As pastilhas assim formadas são analisadas semi-quantitativamente para alguns elementos pesados e leves. Os resultados de perda ao fogo (PF) são incorporados ao resultado da varredura, recalculados para 100%. A análise química foi executada pelo equipamento denominado Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X Rigaku, modelo RIX 3000, equipado com tubo de Rh. O resultado é expresso em peso%, encontra-se na **Tabela 6.2**.

¹¹ Mufla é um tipo de estufa de altas temperaturas que variam de 200°C a 1400°C.

Tabela 6.2 - Fluorescência de Raio-X da cal maturada em flocos

Compostos	Cal maturada em flocos
Na ₂ O	nd
MgO	9,8
Al ₂ O ₂	0,2
SiO ₂	1,3
P ₂ O ₅	tr
SO ₃	0,1
K ₂ O	0,1
CaO	67,2
Fe ₂ O ₃	0,6
NiO	nd
SrO	0,1
ZrO ₂	nd
ZnO	0,1
TiO ₂	nd
MnO	nd
Cr ₂ O ₃	nd
BaO	nd
PF	20,6
Total	100,1

Legenda:
tr = traços;
nd = não detectado

A cal apresentou alto teor de CaO e MgO, com os respectivos valores de 67,2 e 9,8%, e um elevado valor de perda ao fogo de 20,6% que pode ser atribuído à evaporação da água presente nos compostos hidratados, visto que, a portlandita (hidróxido de cálcio) se decompõe entre 500 - 550° C e a Brucita (hidróxido de magnésio) entre 350 - 450° C. O teor de SiO₂ - sílica - é atribuído ao material inerte presente na cal. Os outros compostos mostrados de forma semi-quantitativas são atribuídos a impurezas contidas na cal.

6.1.1.5 – Massa Unitária da cal CHII em flocos

A determinação da massa unitária foi de acordo com a NBR NM 45/2006, seguindo o método "C" que deve ser empregado em material em estado solto e anidro.

A base para a execução do ensaio foi uma lona e nela o material foi revolvido e homogeneizado e colocado no recipiente quadrado de volume e peso conhecidos.

O método consiste em encher o recipiente até que o mesmo transborde, utilizando uma pá para a colocação do material, despejando o agregado de uma altura não superior a 50 mm acima da borda superior do recipiente, evitando o máximo de segregação dos agregados da amostra. Para nivelar a camada superficial foi usada uma régua metálica. O recipiente usado no procedimento é de material metálico, com peso de 7,480 quilos e volume de 15 dm³.

Para a cal CHII em flocos foram executadas 3 pesagens (Ver **Tabela 6.3**) e de cada uma delas foi subtraído o valor do recipiente, e dividido pelo volume do recipiente, encontrou-se quatro valores de massa unitária. Destas medidas, tirou-se uma média, assim encontrou-se o valor da massa unitária no estado solto da cal que é de **0,675kg/dm³**.

Tabela 6.3 - Obtenção das 3 pesagens da cal para a massa unitária da cal

Peso cal + recipiente (kg)	Recipiente (Kg)	Pesagens da cal (Kg)	Massa unitária (Kg/dm ³)
17,565	7,480	10,085	0,672
17,625	7,480	10,145	0,676
17,665	7,480	10,185	0,679
Média da Massa unitária da cal			0,675

6.1.1.6 – Determinação da finura da cal CHII

A norma NBR 7175 de 2003 determina os requisitos necessários para as diversas classificações das cales, dentre eles, o teor de finura. Este define os limites das percentagens retidas nas peneiras de abertura 0,600 mm e de 0,075 mm.

Por ser um aglomerante, a percentagem de finura interfere no teor de água da hidratação e no tempo de hidratação do grão, fatores que interferem nas características das argamassas. A finura revela ainda o nível de moagem, visto que, se os teores limites não correspondem ao normatizado, demonstra a ausência de controle no fabrico do material.

O ensaio é normatizado e definido pela NBR 9289/2000 que determina o procedimento do ensaio para a verificação dos teores de finura das cales.

Foi seguida a seguinte metodologia: Pesou-se 50 gramas de cal CHII. Colocou-se as duas peneiras 0,600 mm e 0,075 mm, respectivamente, a de nº 30 e nº 200, uma sobre a outra e com o jato de água de pressão constante de forma que o jato ficasse a 25 cm cima da tela da peneira de 0,600 mm. A lavagem foi executada de forma uniforme, girando a peneira de maneira que toda a extensão da tela fosse atingida pelo jato, evitando respingos e/ou projeções da cal. Todo o processo de lavagem foi cronometrado e teve a duração de 5 minutos. Após esse procedimento, as peneiras foram separadas. Pegou-se a peneira 0,600mm, e com um pissete a cal retida foi transferida para pratos de alumínio. Deixando decantar o material por 10 minutos e retirando a água que havia em excesso. O mesmo procedimento foi executado com o material retido na peneira 0,075mm. Colocando os dois pratos de alumínio na estufa por 2 horas a 100 - 105° C. O ensaio foi executado em duplicada como sugere o mínimo na norma.

A norma NBR 7175 (2003) determina os limites para a cal CHII da percentagem retida nas peneiras 0,600 mm e 0,075 mm, que são respectivamente, $\leq 0,5\%$ e $\leq 15\%$.

Na primeira batelada do ensaio (Ver **Tabela 6.4**), a quantidade de material retido na peneira 0,600 mm é 3,6 vezes maior que o valor estipulado pela norma. O material retido na peneira 0,075 mm é 2 vezes maior que o definido pela norma.

Na segunda batelada do ensaio, a quantidade de material retido na peneira 0,600 mm é 4 vezes maior que o valor estipulado pela norma. E o material retido na peneira 0,075 mm é 1,97 vezes maior que a definição da NBR 7175.

Tabela 6.4 - Percentagens retidas nas peneiras nº 30 e nº 200: Ensaio de finura da cal CHII

	1° Batelada de ensaio	2° Batelada de ensaio	Média do ensaio
Quantidade retida na peneira 0,600 mm	0,9 g	1 g	0,95 g
% retida na peneira 0,600 mm	1,8%	2%	1,9 %
Quantidade retida na peneira 0,075 mm	15,4 g	14,8 g	15,1 g
% retida na peneira 0,075 mm	30,8%	29,6 %	30,2 %

A finura da cal pode ser calculada pela média do ensaio que equivale as **Equações (2.4) e (2.5)** que se encontram na NBR 7175.

$$F_{30} = (R_{30} / M) \times 100 \quad \text{Equação (2.4)}$$

$$F_{200} = (R_{200} + R_{30} / M) \times 100 \quad \text{Equação (2.5)}$$

Onde:

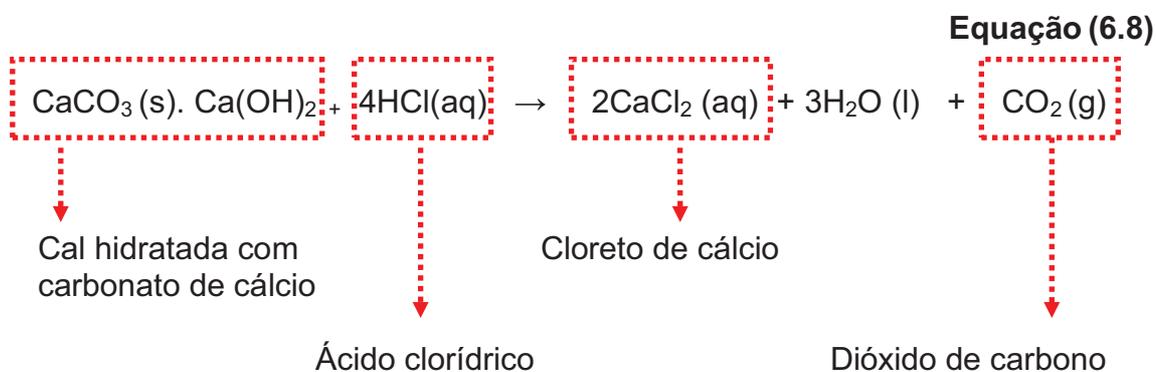
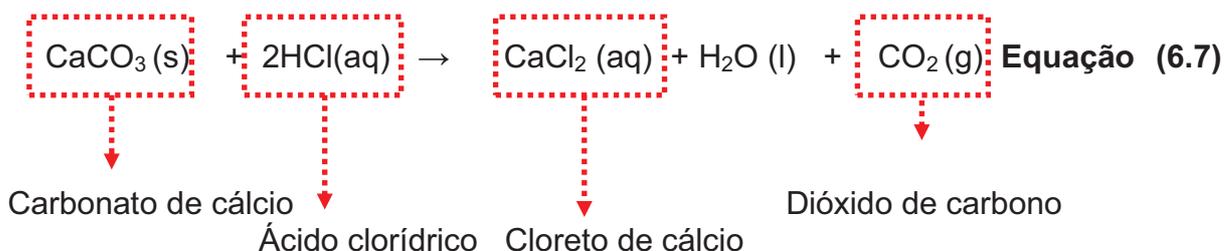
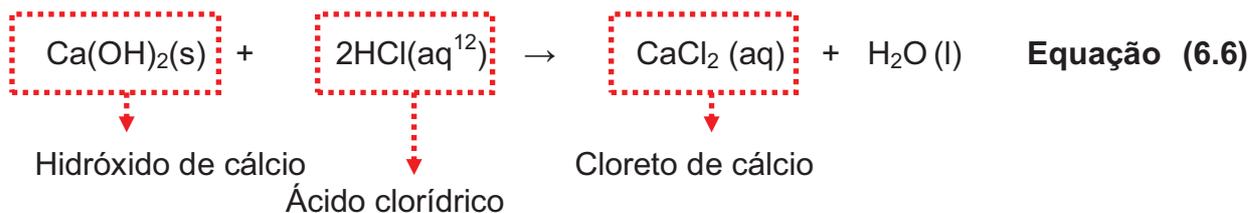
- F_{30} é a finura da peneira 0,600 mm (n° 30), em porcentagem;
- F_{200} é a finura da peneira 0,075 mm (n°200) em porcentagem;
- R_{30} é o resíduo seco na peneira 0,600 mm (n° 30), em gramas;
- R_{200} é o resíduo seco na peneira 0,075 mm (n° 200), em gramas;
- M é a massa da amostra inicial.

Os resultados do ensaio de finura revelaram a falta de controle no fabrico da cal, visto que, a finura é um dos fatores relacionados à qualidade da cal.

6.1.1.7 – Determinação do teor de CO₂ da cal CHII

Este procedimento é normatizado pela NBR 6473 (2003), e faz uso de equipamento específico para o ensaio. Contudo, Paiva et al (2007) relatam uma metodologia alternativa para a obtenção do teor de CO₂, que segundo os autores, possui a mesma precisão, entretanto, de maior simplicidade na execução com adição de ácido clorídrico juntamente com a cal, liberando o dióxido de carbono.

Quando o hidróxido de cálcio [Ca(OH)₂] é adicionado ao ácido clorídrico [2HCl] há uma reação com formação dos produtos cloreto de cálcio [CaCl₂] e água [H₂O] (Ver **Equação 6.6**). Contudo, quando a cal hidratada não está totalmente calcinada ou não maturada, existe a presença do carbonato de cálcio [CaCO₃], e este quando reage com o ácido clorídrico [2HCl], forma o cloreto de cálcio [CaCl₂], água e dióxido de carbono [CO₂] (Ver **Equação 6.7**). Desta forma, o teor de CO₂ tem como função indicar se a cal sofreu uma calcinação adequada, se não teve sua maturação completa ou se durante o seu armazenamento entrou em contato com o ar. Caso isso venha a ocorrer, a cal hidratada [Ca(OH)₂] em contato com dióxido de carbono [CO₂] produz o carbonato de cálcio [CaCO₃]. Logo aumentando o teor de CO₂ liberado ao adicionar o ácido clorídrico [2HCl] (Ver **Equação 6.8**).



Abaixo segue o método determinado por Paiva *et al*:

O método consiste em pesar uma amostra de cal hidratada e colocar em um frasco de Erlenmeyer. Em seguida, pesar o volume ($\pm 25\text{ml}$) de uma solução de ácido clorídrico de concentração 50%, juntamente com a cal, devendo-se aguardar o tempo necessário para que a reação se processe e a temperatura da reação se reduza para a ambiente, durante aproximadamente 10 min. Em seguida, efetuar nova pesagem do conjunto e calcular a diferença, a massa de CO_2 liberada. (PAIVA; GOMES; OLIVEIRA, 2007. p. 6)

Ainda segundo os autores, o procedimento teve sua eficácia testada através da colocação de uma amostra de hidróxido de cálcio PA com pureza 99,98%, e encontrou-se um valor de 100,21% de rendimento.

¹² aq = solução

Para a obtenção do teor de CO₂ foi utilizado o seguinte procedimento¹³:

- a. Diluição de ácido clorídrico com concentração de 37%, o chamado HCl 37% P.A. em 50% de água destilada;
- b. Utilização de dois frascos de Erlenmeyer de 125 ml;
- c. Tara da balança e pesagem em um dos frascos de Erlenmeyer 50 ml de ácido clorídrico diluído¹⁴;
- d. Tara novamente a balança com o segundo frasco e pesagem de 25 g de cal hidratada CHH;
- e. Com cuidado, adicionou-se o ácido a cal;
- f. A solução foi deixada em repouso por aproximadamente 30 minutos para que a reação se processasse e a temperatura fosse reduzida a ambiente.
- g. Após esse período de espera, foi efetuada a pesagem do frasco de Erlenmeyer e por diferença de massa encontrado o valor em massa liberado de CO₂.

A massa perdida foi de 1,9 g que equivale ao teor de anidrido carbônico presente na cal. Este valor é 7,6 % da cal utilizada no ensaio, valor acima dos padrões determinados pela norma NBR 7175/2003, que estipula o teor menor ou igual 7% de anidrido carbônico no depósito. O resultado ratifica o ensaio anterior de finura, e a ausência de controle rigoroso no fabrico do material.

6.1.1.8 – Determinação de retenção de água da cal CHH

Este procedimento é normatizado pela NBR 9290/1996, e faz uso de equipamento específico para o ensaio. Contudo, assim como no ensaio de teor de CO₂, Paiva *et al* (2007) relatam uma metodologia alternativa para a determinação de retenção de água da cal.

¹³ Sugere-se que durante o ensaio faça-se o uso de máscara e óculos apropriados para gases ácidos. E que a execução seja em local ventilado ou em uma capela.

¹⁴ A princípio, utilizou-se 25 ml de ácido dissolvido, contudo verificou-se que poderia ter resquícios de CO₂, pela proporção de material seco e ácido. Então, adicionou-se mais 25 ml de ácido.

Quanto maior for a retenção de água da cal maior será a sua capacidade de resistência à perda de água por evaporação e para o substrato, logo uma maior retenção de água inibe possíveis fissuras na argamassa.

Para a execução do ensaio, foi procedido em duas vezes, sendo uma com a cal CHII sem maturação e outra com a cal em flocos. Para o experimento foram utilizados os seguintes equipamentos e quantidades de materiais:

- a. 50 g de cal hidratada CHII em flocos e 50 g da mesma cal sem o processo de maturação;
- b. 100 g de água destilada para cada execução de ensaio, totalizando 200 g de água destilada;
- c. Duas provetas de 250 ml;
- d. Bastão de vidro;
- e. Paquímetro.

A logística do ensaio se deu da seguinte maneira (Ver **Figura 6.10**):

- a. Com o paquímetro, foi tirada a medida do diâmetro interno da proveta e anotado o valor;
- b. Foi aferido e anotado o valor equivalente de 2ml em cm;
- c. A proveta foi posta na balança e teve seu peso tarado, nela foi colocado 50 g de cal hidratada;
- d. Em seguida, tarou-se a segunda proveta e foi colocado 100 g de água destilada;
- e. A água destilada foi adicionada à cal e homogeneizada com bastão de vidro, a solução teve sua altura aferida na proveta;
- f. Em seguida, a proveta com a cal e a água destilada foi colocada em uma superfície plana e deixou-se a solução decantar;
- g. Foi anotada a decantação da cal através do volume da parte líquida que deixou de se incorporar na mistura nos seguintes tempos 30, 60, 90 e 150 minutos.

Figura 6.10 - Execução do ensaio de retenção de água na cal CHII

Na **Tabela 6.5** seguem os dados obtidos com a cal CHII sem maturação.

Tabela 6.5 - Base dos cálculos do volume total ocupado pela solução com a cal CHII

$D_{\circ} = 3,8 \text{ cm}$	$R_{\circ} = 1,9 \text{ cm}$	$A_{\circ} = 1,9^2 \times \pi = 11,34 \text{ cm}^2$
$Al_{\text{T}} = 128 \text{ ml} = 9,6 \text{ cm}$		
128 ml - x cm		
2 ml - 0,15 cm		
$x = 128 \times 0,15 / 2 = 19,2 / 2 = 9,6 \text{ cm}$		
$V_{\circ\text{T}} = 11,34 \times 9,6 = 108,86 \text{ cm}^3$		

Legenda da **Tabela 6.5**:

- D_{\circ} → Diâmetro interno da proveta
- R_{\circ} → Raio interno da proveta
- 2 ml = 1,5 mm = 0,15 cm
- Al_{T} = Altura total da solução cal + água destilada
- $V_{\circ\text{T}}$ = Volume total da solução cal + água destilada

Tabela 6.6 - Valores da decantação cal CHII em ml, cm e seus volumes em cm^3 e em %

Tempo	Valor em ml que decantou	Equivalente em cm	Volume que decantou em cm^3	Volume que decantou em percentagem
30 minutos	20 ml	1,5 cm	17,01 cm^3	15,62 %
60 minutos	30 ml	2,25 cm	25,51 cm^3	23,43 %
90 minutos	35 ml	2,62 cm	29,71 cm^3	27,29 %
150 minutos	38 ml	2,85 cm	32,32 cm^3	29,69 %

Logo, a cal CHII sem o processo de maturação não está dentro dos padrões de retenção de água, pois em 150 minutos obtive 29,69% de decantação do volume de cal, tendo uma retenção de água de 70,31%. A norma determina para a CHII uma retenção de água maior ou igual a 75% ($\geq 75\%$). O mesmo ensaio foi executado com a cal CHII em flocos, na **Tabela 6.7** abaixo segue os resultados encontrados do material.

Tabela 6.7 - Base dos cálculos do volume total ocupado pela solução cal CHII em flocos

$D_o = 3,8 \text{ cm}$	$R_o = 1,9 \text{ cm}$	$A_o = 1,9^2 \times \pi = 11,34 \text{ cm}^2$
$Al_T = 122 \text{ ml} = 9,15 \text{ cm}$		
122 ml - x cm		
2 ml - 0,15 cm		
$x = 122 \times 0,15 / 2 = 18,5 / 2 = 9,15 \text{ cm}$		
$V_{o_T} = 11,34 \times 9,15 = 103,76 \text{ cm}^3$		

Legenda da **Tabela 6.7**:

- D_o → Diâmetro interno da proveta
- R_o → Raio interno da proveta
- 2 ml = 1,5 mm = 0,15 cm
- Al_T = Altura total da solução cal + água destilada
- V_{o_T} = Volume total da solução cal + água destilada

Tabela 6.8 - Valores da decantação cal CHII em flocos em ml, cm e seus volumes em cm³ e em %

Tempo	Valor em ml que decantou	Equivalente em cm	Volume em cm ³	Volume em percentagem que decantou
30 minutos	8 ml	0,6 cm	6,80 cm ³	6,55%
60 minutos	14 ml	1,05 cm	11,90 cm ³	11,47%
90 minutos	20 ml	1,5 cm	17,01 cm ³	16,39%
150 minutos	26 ml	1,95 cm	22,11 cm ³	20,31%

Logo, a cal CHII em flocos se apresenta dentro dos padrões de retenção de água, pois em 150 minutos obteve 20,31% de decantação do volume de cal, tendo uma retenção de água de 79,69%. A norma determina para a CHII uma retenção de água maior ou igual a 75% ($\geq 75\%$).

Este ensaio demonstrou que a maturação e o processo de execução da cal em flocos a favoreceu no que diz respeito à característica da retenção de água, dando-a maior capacidade de reter a água da mistura, logo contribuindo para o não surgimento de patologias decorrentes de fissuras.

6.1.1.9 – Determinação da umidade da cal CHII em flocos

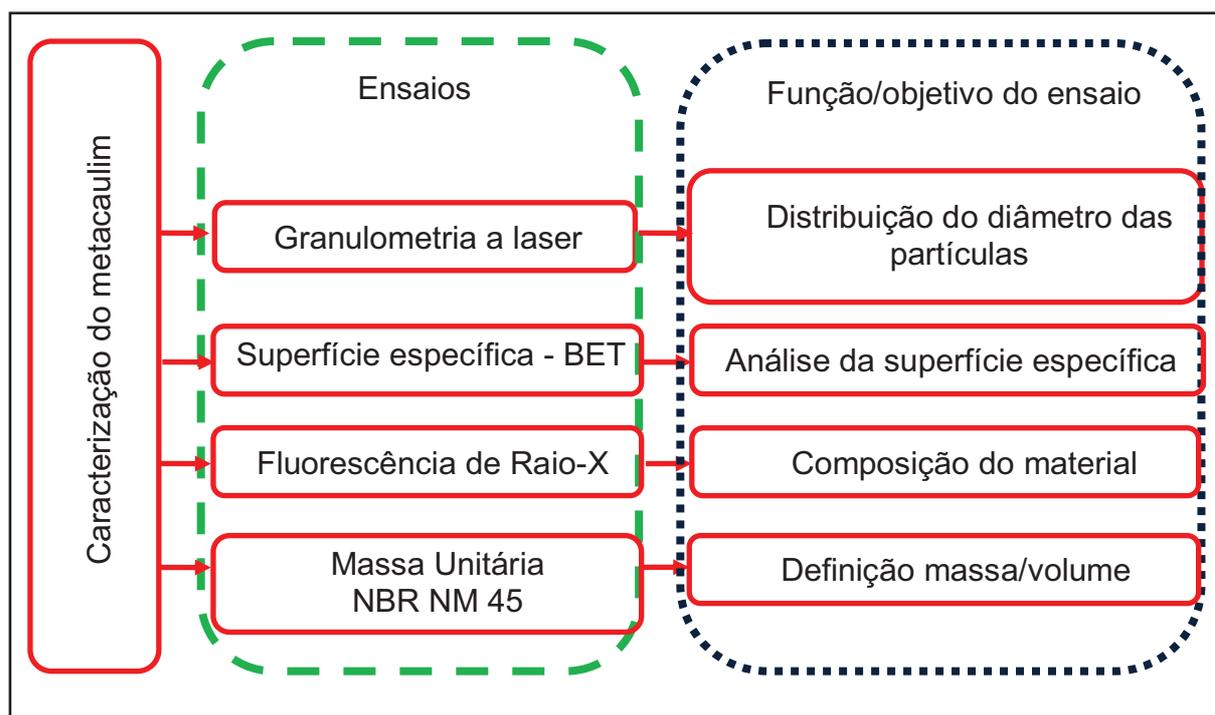
O ensaio teve como base¹⁵ os procedimentos descritos na norma NBR 6473 de 2003 para a determinação de umidade da cal hidratada. A metodologia do ensaio foi da seguinte forma: Um recipiente metálico foi tarado e pesado 10 g de cal CHII em flocos. O material foi posto na estufa durante duas horas a temperatura de 100 - 105° C. Imediatamente após a retirada do material a pesagem foi executada. Por diferença de massa, foi obtido o valor da percentagem de umidade. O teor de umidade encontrado na cal foi de 0,1 gramas, que em porcentagem equivale a 1%. Não há padrões de norma quanto ao teor de umidade da cal.

¹⁵ Os procedimentos da norma não foram seguidos de forma católica, houve alterações na quantidade de material usado.

6.1.2 – Adição - Metacaulim

A adição utilizada na pesquisa foi o metacaulim de coloração alaranjada. A **Figura 6.11** mostra o esquema do programa experimental, onde se relaciona os ensaios e/ou suas normas com suas respectivas funções e objetivos.

Figura 6.11 - Esquema do Programa experimental do metacaulim

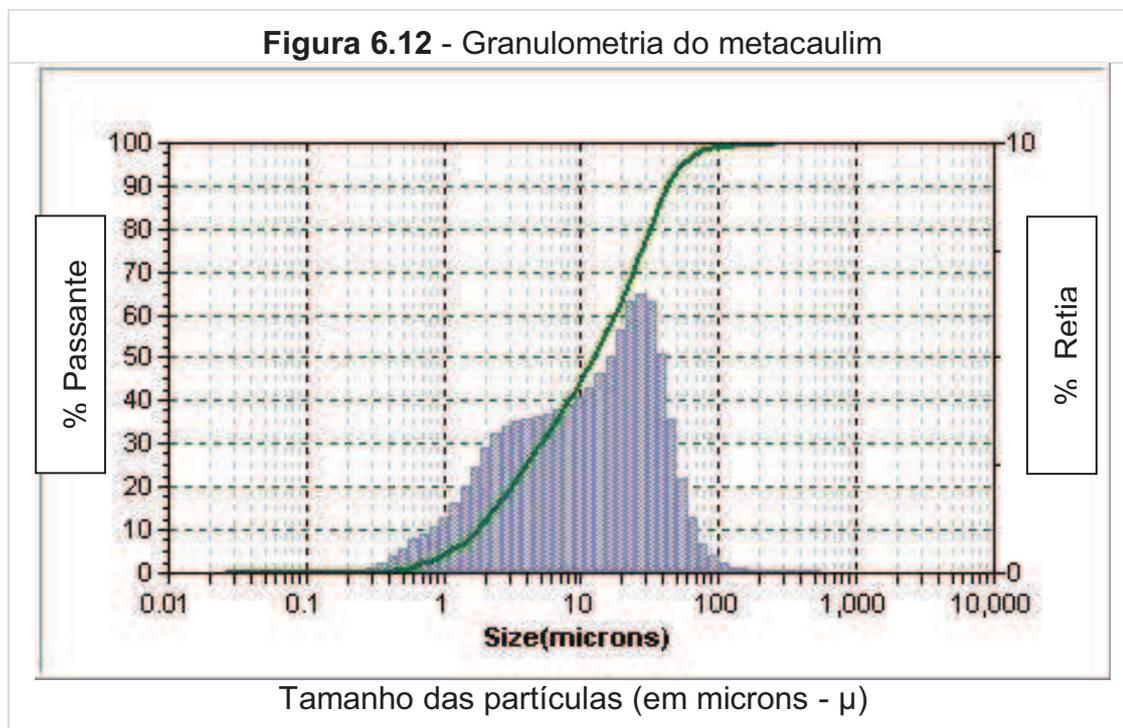


6.1.2.1 – Granulometria do metacaulim

Segundo Mota *et al* (2010), a granulometria da adição interfere na compactação do sistema, preenchendo os vazios, que gera uma maior extensão da aderência e minorando a porosidade na interface entre a argamassa e o substrato. A distribuição da granulometria e a frequência dos diâmetros existentes no metacaulim tem uma correlação com a demanda de água necessária para hidratação e molhagem das partículas, que interfere nas propriedades da argamassa no estado fresco, assim como nas suas características e propriedades no estado endurecido.

O metacaulim foi colocado em um microtubo de 2 ml, identificado e enviado ao CETENE, onde o ensaio foi realizado. O equipamento utilizado foi o mesmo da

cal, o Analisador de Tamanho de Partículas Microtac S3500. O gráfico abaixo mostra a curva granulométrica do metacaulim.



O metacaulim possui uma distribuição granulométrica com uma concentração de partículas retidas nos diâmetros de 0,5 a 100 μ , e com três picos de material retido que equivale a aproximadamente 6,66% do material nos diâmetros de 20 - 40 μ . O histograma apresenta uma continuidade crescente de picos até 30 μ e a partir deste pico, o histograma decresce de forma gradual. Há uma distribuição gradual de material retido ao longo de diversos tamanho das partículas.

O metacaulim possui uma curva granulométrica uniforme, contudo há uma melhor dos grãos se comparada com a curva da cal CHII em flocos, pois a curva da adição se caracteriza por uma distribuição granulométrica com percentagens passantes mais bem distribuída que a encontrada na curva da cal CHII (Ver **Figura 6.9**).

O teor de metacaulim favorece a compactação do sistema devido ao teor de finos tornarem o empacotamento do sistema mais denso, ao preencher os vazios, e favorecendo o rolamento entre as partículas.

6.1.2.2 – Superfície específica do metacaulim - BET

Segundo Rocha (2005, p. 26), a área superficial específica tem relação com o tamanho da partícula, com a forma e a rugosidade superficial, e pela presença de poros superficiais abertos. Dois métodos são consagrados na análise da área superficial, o Blaine e o BET. Para a execução de ambos os ensaios, as amostras devem estar finamente moídas. Rocha descreve o método Blaine, e informa que o método não deve ser utilizado para materiais lamelares e fibrosos, visto que, esses materiais possuem um alto índice de forma ou possuem uma dimensão de partícula muito distinta das demais, ou muito maior ou muito menor que as demais dimensões de partícula.

Blaine é um método que mede o tempo necessário para que um determinado volume de ar passe pela amostra moída e compactada, e o correlaciona à área superficial específica. Este método, mesmo que não seja muito preciso, é de fácil execução e requer equipamento de baixo custo. Entretanto, a norma brasileira não recomenda este método para materiais lamelares fibrosos, ou seja, com alto índice de forma ou que uma dimensão da partícula seja muito menor ou maior que as outras duas. (ROCHA, 2005, p. 31)

Ainda segundo o autor, o método é mais recomendado para materiais com partículas esferoidais e cúbicas. A norma NBR NM 76 (1996) relata que o método pode não ser eficiente para cimentos contendo materiais ultrafinos, o que pode ser explicado pelo Blaine não ser eficiente na captação dos poros superficiais abertos e na diferenciação de dimensões e formas das partículas.

O método BET tem essa nomenclatura devido às letras serem as iniciais dos nomes dos seus pesquisadores, Brunauer, Emmett e Teller, desenvolvida no início do século XX. O BET utiliza a medição de nitrogênio introduzida na amostra e na área ocupada pelas moléculas de N₂. É um método que utiliza equipamento de alto custo e de difícil execução. Por ser um método mais preciso que o Blaine para materiais lamelares, o valor da área específica do BET é superior ao valor obtido pelo Blaine, pois o BET detecta com maior exatidão os poros superficiais abertos das partículas. No metacaulim, Rocha afirma que o valor encontrado no BET é de 10 a 20 vezes superior ao encontrado no Blaine.

O resultado do valor da superfície específica do material tem relação direta com teor de água necessário para molhar as partículas, pois quanto maior a superfície maior será a finura do material, logo maior será o teor de água a ser adicionado na mistura¹⁶.

A preparação da amostra seguiu o mesmo procedimento da granulometria a laser, explanada no item anterior. O equipamento (Ver **Figura 6.13**) e a técnica é a mesma descrita no Item 6.1.1.3 que trata da superfície específica da cal CHII em flocos. A superfície específica do metacaulim é de **17,2510 m²/g**, ou seja, uma superfície específica maior que a da cal CHII que é 13,8554 m²/g, devido a maior finura do material pozolânico.

Figura 6.13 - Analisador de superfície e de tamanho de poros ASAP (Accelerated Surface Area and Porosimetry System) 2420 da Micrometrics



6.1.2.3 – Fluorescência de Raio-X do metacaulim

O ensaio determina a composição semi-quantitativa dos compostos e uma estimativa das percentagens dos óxidos mais estáveis formados por elementos presentes no metacaulim, tais como Al₂O₃, SiO₂, Fe₂O₃, TiO₂, Na₂O, K₂O, CaO e

¹⁶ Notas de aula da Disciplina de Química dos Aglomerantes. Ministrada pelo professor Dr. Antônio Acacio em 2011.

MgO¹⁷. Segundo Rocha (2001), são elementos característicos do metacaulim o Si, Al, Fe e O.

O metacaulim foi passado na peneira #200 (0,075 mm), colocado em microtubo de 2 ml, identificado e enviado ao LABISE. O equipamento e o método estão detalhados no Item 6.1.1.4. O resultado do ensaio encontra-se na **Tabela 6.9**.

Tabela 6.9 - Fluorescência de Raio-X do metacaulim

Compostos	Metacaulim
Na ₂ O	nd
MgO	0,2
Al ₂ O ₂	32,6
SiO ₂	50,6
P ₂ O ₅	0,2
SO ₃	0,1
K ₂ O	1,9
CaO	0,8
Fe ₂ O ₃	8,9
NiO	tr
SrO	tr
ZrO ₂	0,1
ZnO	tr
TiO ₂	1,9
MnO	0,1
Cr ₂ O ₃	tr
BaO	0,1
PF	2,5
Total	99,9

Legenda:
tr = traços;
nd = não detectado

O metacaulim apresentou alto teor de SiO₂ e Al₂O₃, com os respectivos valores de 50,6% e 32,6%, e um percentual de 8,9% de Fe₂O₃, estes compostos são formados por elementos químicos característicos do metacaulim, onde o Fe₂O₃ é responsável pela coloração laranja do material pozolânico. O metacaulim apresentou um teor de perda ao fogo de 2,5%. Nota-se percentuais relativamente altos de 1,9% para o K₂O e TiO₂. Os outros compostos mostrados de forma semi-quantitativa são atribuídos a impurezas contidas no metacaulim.

¹⁷ (ROCHA, 2005, p. 21)

6.1.2.4 – Massa Unitária do metacaulim

A determinação da massa unitária foi de acordo com a NBR NM 45/2006, seguindo o método "C" que deve ser empregado em material em estado solto e anidro.

O procedimento do ensaio utilizado está descrito no item 6.1.1.5. Para o metacaulim executou-se 4 pesagens (Ver **Tabela 6.10**) e de cada uma delas foi subtraído o valor do recipiente, e dividido pelo volume do recipiente encontrou-se quatro valores de massa unitária. Destas medidas, tirou-se uma média, assim encontrou-se o valor da massa unitária no estado solto do metacaulim que é de **0,460 kg/dm³**.

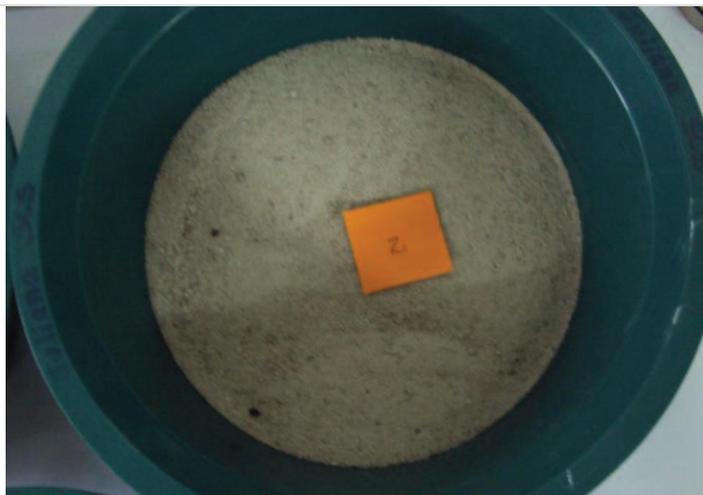
Tabela 6.10 - Obtenção das 4 pesagens do metacaulim para a massa unitária

Peso metacaulim + recipiente (kg)	Recipiente (kg)	Pesagens do metacaulim (kg)	Massa unitária (Kg/dm ³)
14,520	7,480	7,040	0,469
14,325	7,480	6,845	0,456
14,445	7,480	6,965	0,464
14,245	7,480	6,765	0,451
Média da Massa unitária do metacaulim			0,460

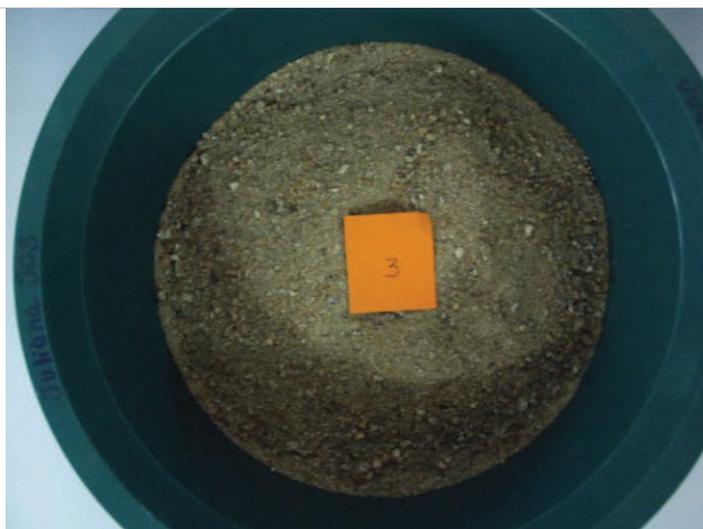
A massa unitária da cal é 0,675 kg/dm³, um valor que é superior ao do metacaulim. Fato que pode ser explicado pelo metacaulim ser um material pulverulento e leve. Desta forma, se formos pesar a mesma quantidade de cal e metacaulim em massa, necessitar-se-ia de uma maior quantidade em volume de metacaulim que de cal. Assim, como a massa unitária é inversamente proporcional ao volume, o metacaulim tem uma massa unitária menor que a da cal.

6.1.3 – Agregados miúdos

Na pesquisa se utilizou dois agregados miúdos, sendo o primeiro de aspecto granulométrico mais fino, de coloração acinzentada (Ver **Figura 6.14**) proveniente da Paraíba no Município do Conde, numa região denominada Caxitú. Sabe-se que este agregado miúdo é coletado de região próxima a rio.

Figura 6.14 - Agregado de coloração acinzentada

O segundo agregado possui aspecto granulométrico mais grosso que o primeiro agregado miúdo citado, de coloração mais escura (Ver **Figura 6.15**), e sua obtenção foi em um armazém de construção na cidade do Recife.

Figura 6.15 - Agregado de coloração mais escura

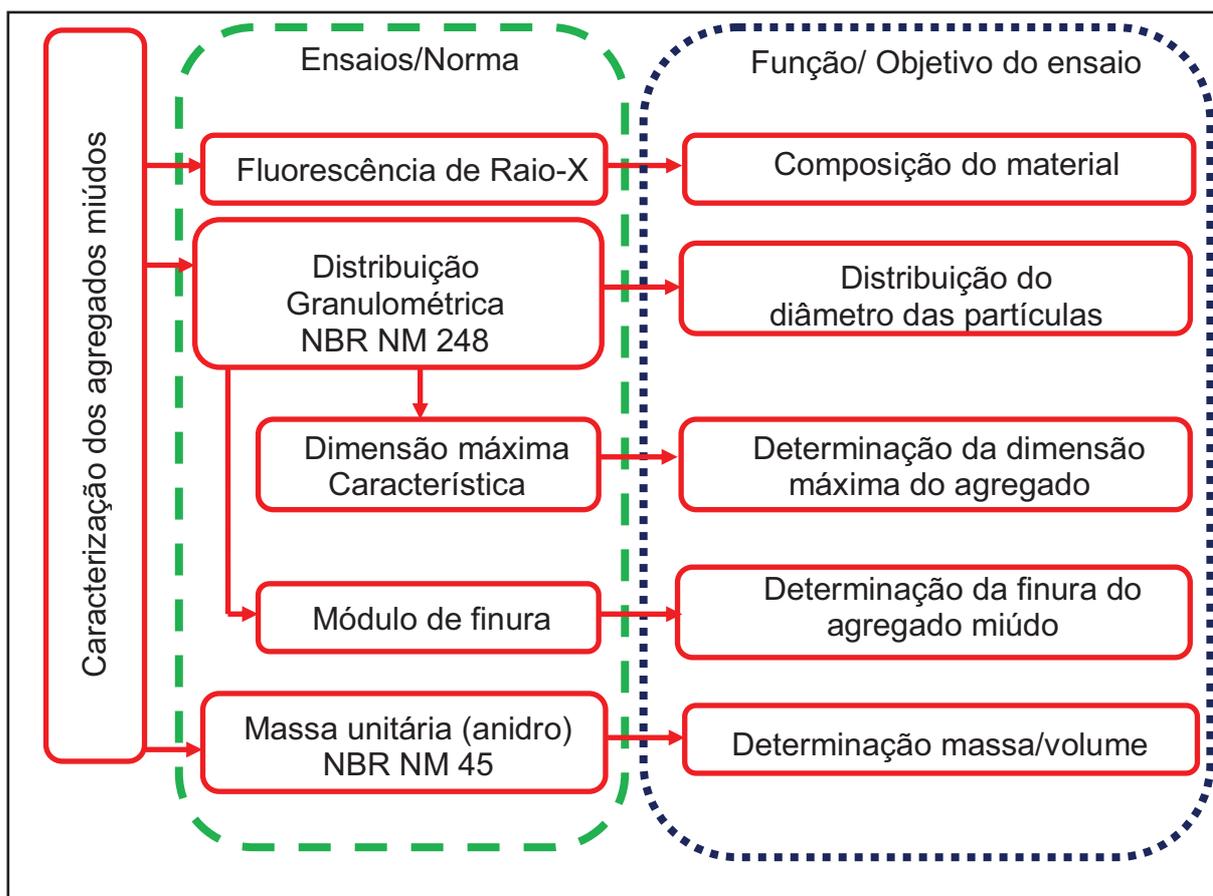
Os agregados para serem utilizados no decorrer da pesquisa, foram colocados em bandejas e levados a estufa a 100 - 105° C por 24 horas, e após breve período de esfriamento, passou-os na peneira da série normal 4,75 mm, e o material passante foi ensacado e lacrado, inclusive com material pulverulento dos

agregados. Para Mehta e Monteiro (2008, p. 260), o uso do material passante na peneira 4,75 mm contém partículas com dimensões menores que 4,75 mm.

A norma NBR 7211 de 2009, relata limites de porcentagens para o uso de agregado miúdo com material passante da peneira 75 μm para concretos devido ao fato desses materiais serem prejudiciais ao concreto pelo seu alto teor de micáceos, ferruginosos e argilominerais expansivos, causando patologias. Entretanto, Carneiro¹⁸ recomenda seu uso em argamassas para obras históricas, pois seu uso facilita o rolamento entre as partículas e na compactação do sistema. Desta forma, o material pulverulento foi usado em ambos os agregados miúdos.

A **Figura 6.16** abaixo mostra o esquema do programa experimental dos agregados miúdos, onde se relaciona os ensaios e/ou normas com suas respectivas funções e objetivos.

Figura 6.16 - Esquema do programa experimental dos agregados miúdos



¹⁸ Arnaldo Carneiro em suas aulas ministradas na disciplina de Tecnologia das Argamassas na UFPE em 2012.

6.1.3.1 – Fluorescência de Raio-X dos agregados miúdos

O ensaio visa à determinação da composição semi-quantitativas dos compostos dos dois agregados miúdos utilizados na pesquisa. As duas tipologias de agregado miúdo tiveram o mesmo procedimento de ensaio. Passou-os na peneira #200 (0,075 mm), e o material passante foi posto em um microtubo de 2 ml, identificado e enviado ao LABISE. O método e o equipamento foram os mesmos descritos no Item 6.1.1.4. Nas **Tabelas 6.11 e 6.12** estão os resultados expressos das percentagens em peso dos agregados miúdos, acinzentado e o de coloração mais escura, respectivamente.

Tabela 6.11 - Fluorescência de Raio-X do agregado de coloração acinzentada

Compostos	Agregado de coloração acinzentado
Na ₂ O	nd
MgO	0,0
Al ₂ O ₂	0,2
SiO ₂	96,4
P ₂ O ₅	tr
SO ₃	0,0
K ₂ O	0,0
CaO	0,2
Fe ₂ O ₃	0,3
NiO	tr
SrO	nd
ZrO ₂	1,3
ZnO	tr
TiO ₂	1,1
MnO	nd
Cr ₂ O ₃	nd
BaO	nd
PF	0,4
Total	99,9

Legenda:
tr = traços;
nd = não detectado

O agregado miúdo de coloração acinzentada apresentou alto teor de SiO₂ com valor de 96,4% que deve ser atribuído possivelmente ao alto teor de sílica. A

areia apresentou diversas percentagens sem grande significância, inclusive da perda ao fogo com baixo valor de 0,4%.

Tabela 6.12 - Fluorescência de Raio-X do agregado de coloração mais escura

Compostos	Agregado de coloração mais escura
Na ₂ O	0,6
MgO	0,9
Al ₂ O ₂	13,4
SiO ₂	56,6
P ₂ O ₅	0,3
SO ₃	0,7
K ₂ O	5,3
CaO	6,7
Fe ₂ O ₃	9,5
NiO	nd
SrO	0,2
ZrO ₂	0,9
ZnO	nd
TiO ₂	2,0
MnO	0,2
Cr ₂ O ₃	0,1
BaO	0,2
PF	2,4
Total	99,8

Legenda:
tr = traços;
nd = não detectado

O agregado miúdo de coloração mais escura apresentou teores semi-quantitativos altos de Al₂O₂ e SiO₂, respectivamente 13,4% e 56,6%, que podem ser atribuídos a presença de argilominerais que são formados basicamente de sílica (SiO₂) e hidróxido de alumínio (Al₂(OH)₃)¹⁹, tais compostos apresentam como características a plasticidade e absorção de água. Por deter hidróxidos na sua composição, fato que leva à perda de água durante a elevação da temperatura a 1000° C²⁰, explica o valor da perda ao fogo ter sido superior a da areia de colocação

¹⁹ (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, *Material da disciplina de Geologia de Engenharia III: Argilominerais*)

²⁰ZATTA, em sua dissertação de mestrado, relata nos ensaios de TGA e DTA com caulinita e haloisita, que tais compostos, que são argilominerais, apresentaram decomposição térmica em 250° C e em 509 - 512° C, onde ocorreu perda de massa decorrente da perda de água dos materiais.

acinzentada. A presença significativa de óxidos de potássio, de cálcio e de ferro, com os respectivos valores de 5,3%, 6,7% e 9,5, são compostos que se apresentam como componentes químicos de agregados miúdos.

6.1.3.2 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos

O ensaio está baseado com a norma vigente NBR NM 248 de 2003 que prescreve a determinação da composição granulométrica dos agregados miúdos e graúdos do concreto, entretanto é utilizada como norte para ensaios de composição granulométrica de agregados miúdos, uma vez que também os engloba.

A norma também descreve e caracteriza parâmetros de análise das curvas granulométricas, tais como a dimensão máxima característica e o módulo de finura. A dimensão máxima característica é uma grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, que corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou série intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

O módulo de finura é a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100. A classificação quanto ao módulo de finura do agregado é descrito como:

- $(M.F) > 3,0$ - Granulometria grossa
- $2,0 < (M.F) < 3,0$ - Granulometria média
- $(M.F) < 2,0$ - Granulometria fina.

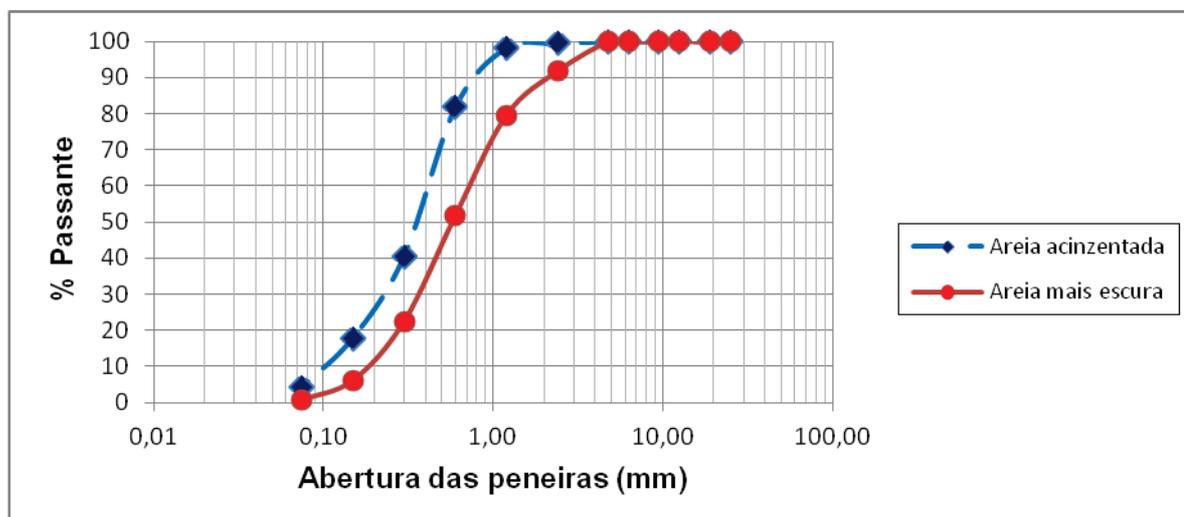
A série de peneira usada foi a normal abaixo da 2,36 mm, pois os agregados miúdos utilizados são materiais passantes na peneira 4,75 mm, conforme o Item 6.1.3. Foi usado um quilo de para cada agregado miúdo no ensaio. A série de peneira foi posta no agitador mecânico por um período de 5 minutos, tempo suficiente para permitir a separação e classificação prévia dos diferentes tamanhos dos grãos de cada amostra de areia.

Após a agitação mecânica, era destacada cada peneira do conjunto e encaixada em um fundo e colocando uma tampa, e prosseguindo de agitação manual por um período de 2 minutos²¹. O material retido em cada peneira foi pesado²² e anotado o valor da pesagem, e separado em folha de papel devidamente identificada com o material e a peneira retida.

Cada tela da peneira foi escovada em ambos os lados e o material removido pelo lado interno da peneira foi considerado como retido e o desprendido na parte externa como passante. Acrescentando o material passante na peneira superior. E o procedimento foi executado até que todas as peneiras do conjunto fossem agitadas manualmente e verificadas.

A **Figura 6.17** traz as curvas granulométricas dos dois agregados miúdos, onde a curva azul representa a areia acinzentada, e a curva de cor vermelha representa a areia mais escura.

Figura 6.17 - Gráfico das curvas granulométricas dos agregados miúdos



A areia de coloração acinzentada possui um perfil mais uniforme que a areia de coloração mais escura. Fato que pode ser percebido pelo grau mais acentuado da inclinação da curva azul. Entretanto, ambas são curvas uniformes por deter uma grande quantidade de material passante em determinadas peneiras. A curva azul encontra-se mais a esquerda do gráfico do que a curva vermelha, fato que determina uma maior quantidade de material de granulometria mais fina na areia

²¹ A norma determina que o tempo mínimo de agitação seja de 2 minutos.

²² Inclusive o material removido pelo lado interno da peneira

acinzentada em relação a areia mais escura. Na **Tabela 6.13** estão os valores da dimensão máxima característica e do módulo de finura dos agregados.

Tabela 6.13 - Dimensão máxima característica e módulo de finura dos agregados miúdos

	Dimensão máxima característica ($D_{m\acute{a}x}$)	Módulo de finura (M.F)*
Agregado de coloração acinzentada	1,2	1,62
Agregado de coloração mais escura	4,8	2,48

A $D_{m\acute{a}x}$ e o (M.F) da areia de acinzentada é, respectivamente, 1,2 mm e 1,62. A areia mais escura possui os respectivos valores de 4,8 mm e 2,48. Os valores dos diâmetros máximo característico das areias refletem as características das curvas granulométricas, visto que, a areia acinzentada possui um diâmetro máximo com valor inferior a da areia mais escura, por apresentar uma curva mais a esquerda do gráfico e possuir uma granulometria mais fina que a segunda areia citada.

A areia acinzentada possui um valor de (M.F) abaixo de 2, caracterizando-se por ser uma areia de granulometria fina, a areia mais escura tem um valor maior que 2 e inferior a 3, característica de areias de granulometria média.

As curvas granulométricas, o $D_{m\acute{a}x}$ e o M.F caracterizaram as areias de forma macroscópica, onde seus valores especificam a areia de cor acinzentada como sendo uma areia fina e a areia de coloração mais escura como uma areia de granulometria média.

6.1.3.3 – Massa unitária dos agregados miúdos

A determinação da massa unitária foi de acordo com a NBR NM 45/2006, assim como em todos os materiais do trabalho, e seguiu o método "C" descrito na norma.

O procedimento do ensaio utilizado para os dois agregados miúdos está descrito no item 6.1.1.5. Para cada tipo de agregado miúdo, executou-se 3 pesagens (Ver **Tabela 6.14** e **6.15**) e de cada uma das pesagens foi subtraído o valor do recipiente, encontrando-se 3 medidas das pesagens para a massa unitária. Estas medidas foram usadas para retirar uma média e seu valor dividido pelo volume do

recipiente, assim encontrou-se o valor da massa unitária no estado solto dos agregados.

Tabela 6.14 - Obtenção das 3 pesagens do agregado acinzentado para a massa unitária

Peso metacaulim + recipiente (kg)	Recipiente (kg)	<i>Pesagens do agregado acinzentado</i>
30,715	7,480	23,235 kg
30,725	7,480	23,245 kg
30,745	7,480	23,265 kg

Tabela 6.15 - Obtenção das 3 pesagens do agregado amarronzado para a massa unitária

Peso metacaulim + recipiente (kg)	Recipiente (kg)	<i>Pesagens do agregado amarronzado</i>
29,845	7,480	22,365 kg
29,730	7,480	22,250 kg
29,875	7,480	22,395 kg

Obtendo a massa unitária de **1,55 kg/dm³** para o agregado fino, e **1,49 kg/dm³** para o agregado médio. O fato da massa unitária da areia fina ser superior ao valor da areia média, é explicado pela areia média ao ser lançada no recipiente, deixar um quantitativo de vazios superior ao da areia fina. Desta forma, se ao se pesar a mesma quantidade de areia fina e média em massa, necessitar-se-ia de uma maior quantidade em volume de areia de granulometria média que a da granulometria fina. Visto que, a massa unitária é inversamente proporcional ao volume, a areia de granulometria média tem uma massa unitária de valor inferior a da areia de granulometria fina.

6.2 – Composição das argamassas

Este estudo confrontou cinco traços de argamassa mista à base de cal hidratada, metacaulim e mistura binária de agregado miúdo, sendo mantida a proporção de ligante e agregado em volume constante 1:3.

Contudo, a literatura mostra que para uma maior precisão dos cálculos, os traços devem ser em massa. Assim, os traços foram transformados de volume para massa.

A variação de um traço para outro está na proporção de cal e metacaulim, sendo a cal substituída em massa por metacaulim nas seguintes porcentagens: 0%, 5%, 10%, 15% e 20%.

Após um estudo para a definição da mistura binária dos agregados miúdos que obtivesse maior continuidade, foi determinada a composição granulométrica constante para todos os traços. A **Tabela 6.16** mostra a designação dos traços e a composição em volume e em massa com as proporções de cal hidratada e metacaulim. A discriminação da transformação de volume para massa se encontra no **Apêndice B.3**.

Tabela 6.16 - Designação e composição das argamassas

Designação	Composição em volume	Materiais (em massa)
A	1:3	Cal hidratada: areia = 1:3
B	1:3	Cal hidratada : metacaulim : M. B.* = 0,95 : 0,05 : 3
C	1:3	Cal hidratada : metacaulim : M.B = 0,9 : 0,1 : 3
D	1:3	Cal hidratada : metacaulim : M.B. = 0,85 : 0,15 : 3
E	1:3	Cal hidratada : metacaulim : M. B. = 0,80 : 0,20 : 3

*M. B. = Mistura binária de agregados miúdos

6.2.1 – Definição da granulometria de estudo

A definição da curva granulométrica com mistura binária dos agregados miúdos foi constante para todos os traços, não tomando-a como variável. Nesta pesquisa, não houve a busca de uma curva granulométrica ideal, mas uma curva mais contínua. Tal fato se deve a viabilidade de facilitar uma posterior reprodução das argamassas estudadas em obras de restauro. Disseminando os resultados para as futuras intervenções em revestimento histórico.

Como critério de escolha da percentagem da mistura binária dos agregados miúdos, foi determinada como parâmetro a curva granulométrica que tivesse a maior massa unitária no estado solto, buscando um menor índice de vazios da composição granulométrica.

Para Carneiro e Cincotto (1999), a distribuição granulométrica, dimensão do grão e a forma que ele possui, têm influência direta no empacotamento do sistema e consequente controle do volume de vazios.

Selmo (1989) afirma que a distribuição granulométrica da areia influencia no índice de vazios. Tristão menciona três tipos de curvas, sendo elas: contínua, descontínua e uniforme. A contínua é aquela que contém todos os tamanhos de grãos, onde existe uma distribuição normal de tamanhos e a curva apresenta-se contínua. A granulometria descontínua ou aberta não possui todos os tamanhos dos grãos, faltam certas frações granulométricas e sua curva apresenta-se com patamares. A última curva é formada por grãos que apresentam os mesmos tamanhos, onde sua curva é bastante inclinada e com um grande coeficiente de declividade, o que explica a predominância de poucos tamanhos de grãos.

A literatura informa que os agregados miúdos de granulometria muito uniforme, independente do formato dos grãos, podem comprometer a trabalhabilidade das argamassas. Para Carneiro *et al* (1997), há um consequente enrijecimento, impedindo o deslizamento dos grãos da areia entre si, e o que acarreta numa maior demanda de pasta para envolver os grãos de material inerte.

Segundo os autores, a massa unitária é o parâmetro mais adequado de correlação da distribuição granulométrica da areia versus as propriedades das argamassas.

A massa unitária é definida como a quantidade de massa capaz de ser acomodada a um recipiente de volume unitário, em condições de adensamento padronizadas que integram a um só tempo, a distribuição granulométrica, forma dos grãos e a capacidade de empacotamento. Desta forma, os autores concluem que a massa unitária do agregado miúdo é um parâmetro relevante para o desempenho das argamassas.

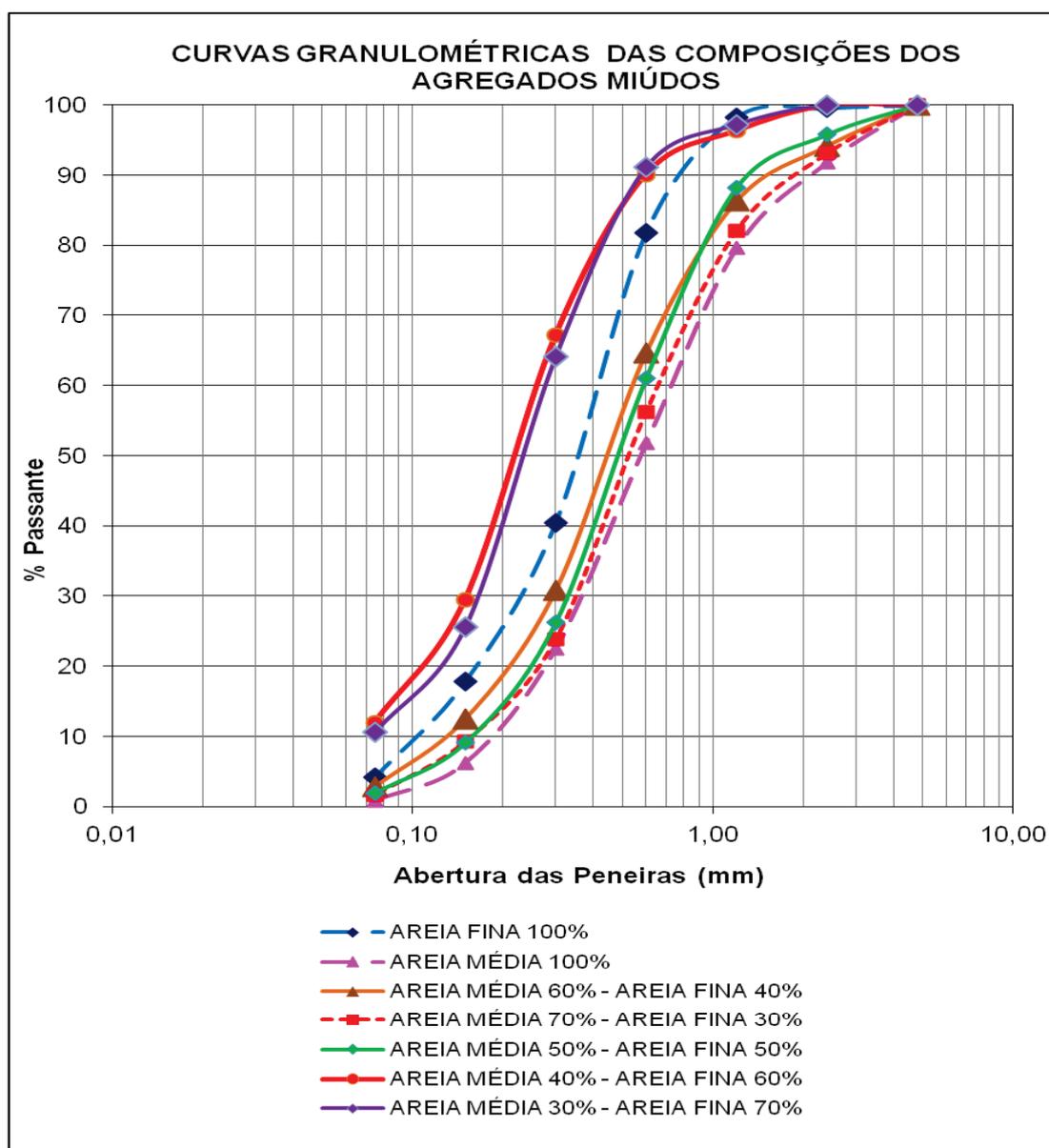
O procedimento de ensaio da determinação das curvas granulométricas é descrito no Item 6.1.3.2. Para a determinação da curva granulométrica, de acordo com a NBR 248 de 2003, usada na pesquisa foi efetuado o ensaio com as percentagens descritas na **Tabela 6.17**²³ A **Figura 6.18** mostra as curvas granulométricas das sete amostras.

²³ Os detalhamentos do ensaio com todas as tabelas e os resultados estão no **Apêndice B.1**

Tabela 6.17 - Granulometrias ensaiadas para a determinação da percentagem dos agregados miúdos na mistura binária.

Numeração da amostra	Percentagem dos agregados miúdos	
	Areia média	Areia fina
Amostra 01	0	100
Amostra 02	100	0
Amostra 03	60	40
Amostra 04	70	30
Amostra 05	50	50
Amostra 06	40	60
Amostra 07	30	70

Figura 6.18 - Estudo das curvas granulométricas para a definição da mistura binária usada na pesquisa



A Amostra 01 (100% areia fina) possui o perfil mais uniforme das granulometrias estudadas. As amostras 06 (40% areia média e 60% areia fina) e 07 (30% areia média e 70% areia fina) possuem um comportamento semelhante, sendo menos uniforme que a Amostra 01, em virtude do menor coeficiente de declividade. As Amostras 05 (50% areia média e 50% areia fina) e 03 (60% areia média e 40 areia fina) tem um perfil semelhante e mais uniforme que as curvas das Amostras 02 (100% areia média) e 04 (70% areia média e 30% areia fina).

Desta forma, por haver uma semelhança entre as curvas, o critério da massa unitária foi tomado como parâmetro de escolha da mistura binária dos agregados miúdos. A composição granulométrica que detinha a maior massa unitária e uma curva mais contínua é a com 70% de agregado miúdo de coloração mais escura (areia média) e 30% de agregado acinzentado (areia fina) (Ver **Tabela 6.18** e **Figura 6.19**).²⁴

Tabela 6.18 - Massa unitária das composições granulométricas para a determinação da mistura binária do estudo

Composições granulométricas	Massa unitária das composições granulométricas
100% A.M.	1,49
100% A.F.	1,55
70% A.M. - 30% A.F.	1,604
60% A.M. - 40% A.F.	1,6
50% A.M. - 50% A.F.	1,588
60% A.F. - 40% A.M.	1,596
70% A.F. - 30% A.M.	1,594

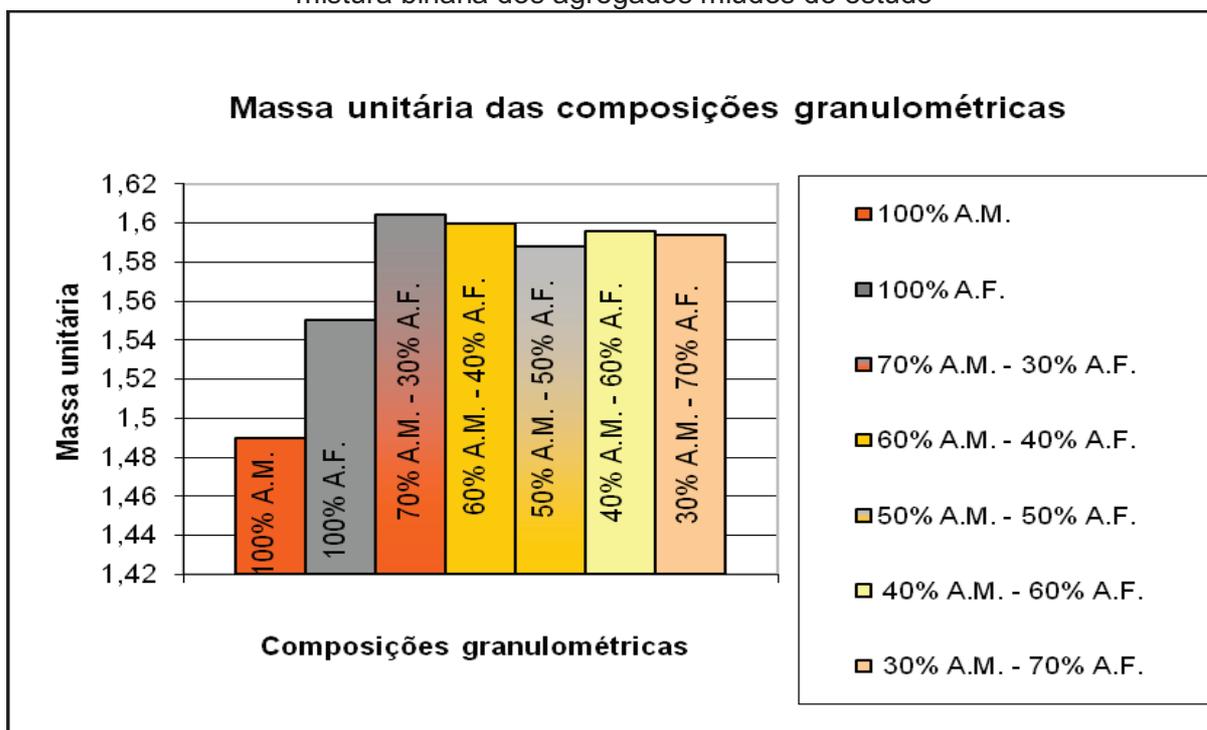
Legenda:

A.F. - Areia fina

A.M. - Areia média

²⁴ No **Apêndice B.2** estão as tabelas com os cálculos das massas unitárias das composições granulométricas.

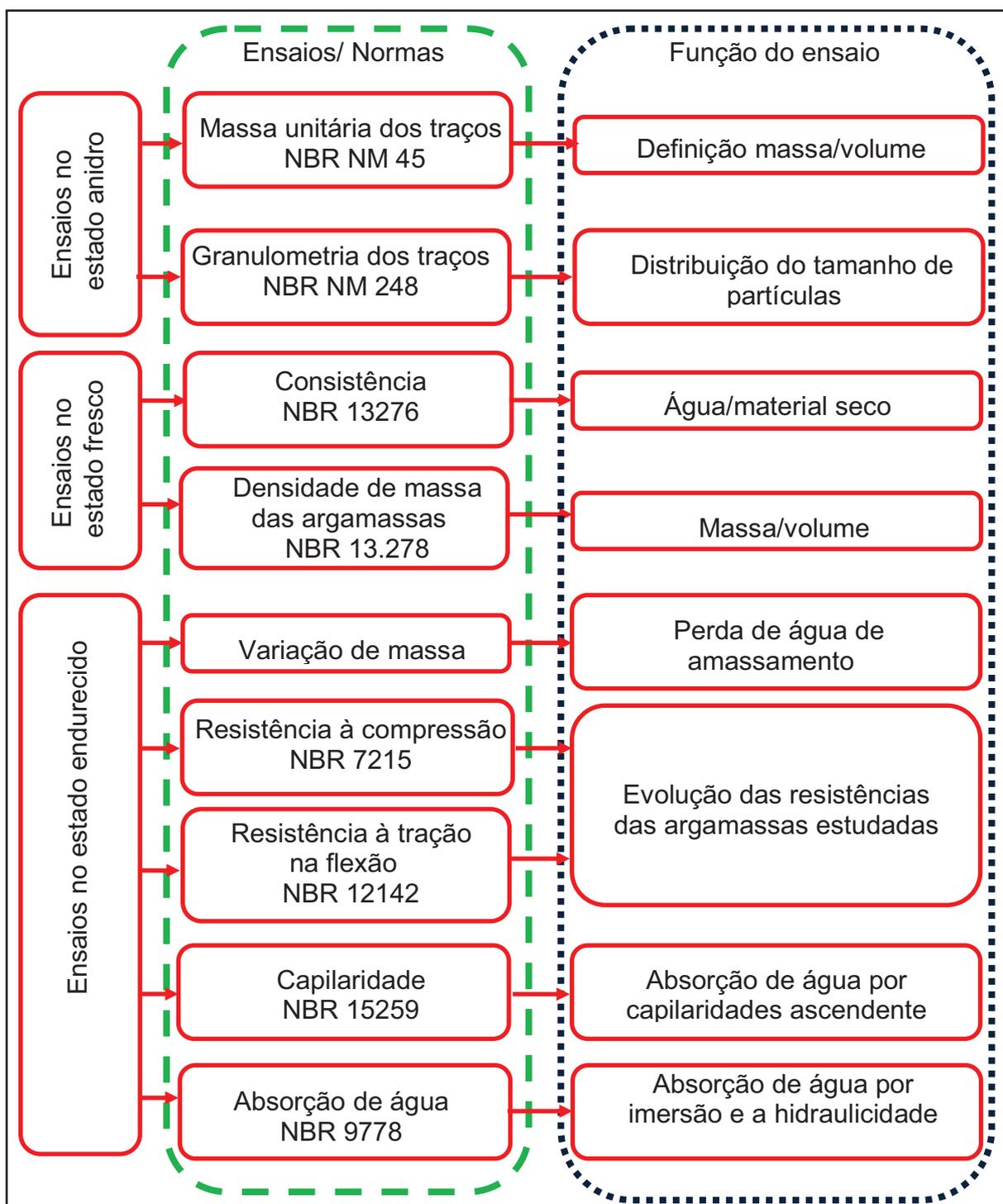
Figura 6.19 - Massa unitária das composições granulométricas para a determinação da mistura binária dos agregados miúdos do estudo



6.3 – Programa experimental e resultados das argamassas

O programa experimental das argamassas teve como objetivo caracterizar suas propriedades físicas nos estados anidro, fresco e endurecido para a viabilidade do uso destas para intervenções em revestimento nas obras históricas. A **Figura 6.20** mostra o esquema do programa experimental das argamassas.

Figura 6.20 - Esquema do Programa experimental das argamassas



6.3.1 – Moldagem, desmoldagem e cura das argamassas

As argamassas²⁵ foram moldadas em laboratório a uma temperatura ambiente de 25°C. Foram moldados cerca de 25 corpos de prova com dimensões de 5 x 10 cm (forma cilíndrica) e 15 corpos de prova com dimensões de 4 x 4 x 16 cm (forma retangular)²⁶ por traço de argamassa. O quantitativo de água foi variável em virtude da fixação da consistência para todas as argamassas. O Item 6.3.3.1 explana como foi determinada a consistência e o teor de água das misturas. A moldagem foi executada em duas bateladas. (Ver **Apêndice B.3**)

O material seco foi posto na argamassadeira com capacidade de 15 litros, e o quantitativo de água foi definido para o espalhamento de 260 mm ± 10 mm²⁷. O adensamento na forma cilíndrica com diâmetro interno 5 por 10 cm foi três camadas uniformemente distribuídas com 10 golpes cada uma. Na forma retangular, a argamassa foi adensada em duas camadas uniformemente distribuídas com 20 golpes cada uma. As argamassas permacerraram nas formas até seu endurecimento que variou de traço para traço.

O desmolde da argamassa A (com 0% de metacaulim) foi no nono dia, e apresentava uma nata carbonatada na superfície que havia contato com o ar. Após a retirada de forma lenta, o endurecimento ocorria em 24 horas. A argamassa B (com 5% de metacaulim) teve sua desmoldagem ao 7º dia, e as demais argamassas foram desmoldadas no quarto dia.²⁸

Todas as argamassas foram curadas ao ar, em virtude da dificuldade de endurecimento nos primeiros dias de desmolde (Ver **Figura 6.21**). A variação de tipos de cura não estava no escopo e nos objetivos do estudo desta pesquisa. Foi observado que as argamassas tiveram uma retração durante a secagem de cerca de 1 a 2 mm. (Ver **Figura 6.22**)

²⁵ No **Apêndice B.3** está descrito os cálculos das quantidades de materiais na transformação de volume para massa dos traços.

²⁶ Exceto o traço A que foram moldados apenas 10 corpos-de-prova retangulares.

²⁷ O mínimo de espalhamento foi de 260 mm, pois foi percebida a dificuldade de moldagem dos corpos de prova e a consistência das argamassas com valores inferiores a 260 mm detinham um aspecto mais seco e com menor trabalhabilidade.

²⁸ Exceto a argamassa C em virtude da data coincidir com um domingo, desta forma, foi desmoldada no 5º dia.

Figura 6.21 - Cura ao ar dos corpos de prova**Figura 6.22 - Retração por secagem dos corpos de prova do traço A**

6.3.2 – Ensaio nas argamassas no estado anidro

6.3.2.1 – Densidade de massa dos traços no estado solto

O procedimento do ensaio está descrito no Item 6.1.1.5.1. Contudo, os agregados miúdos foram postos primeiro na lona e seguidos dos pulverulentos para evitar perda do material. O **Apêndice B.4** possui os dados completos do ensaio. As

densidades de massa no estado solto dos traços estão apresentadas na **Tabela 6.19**.

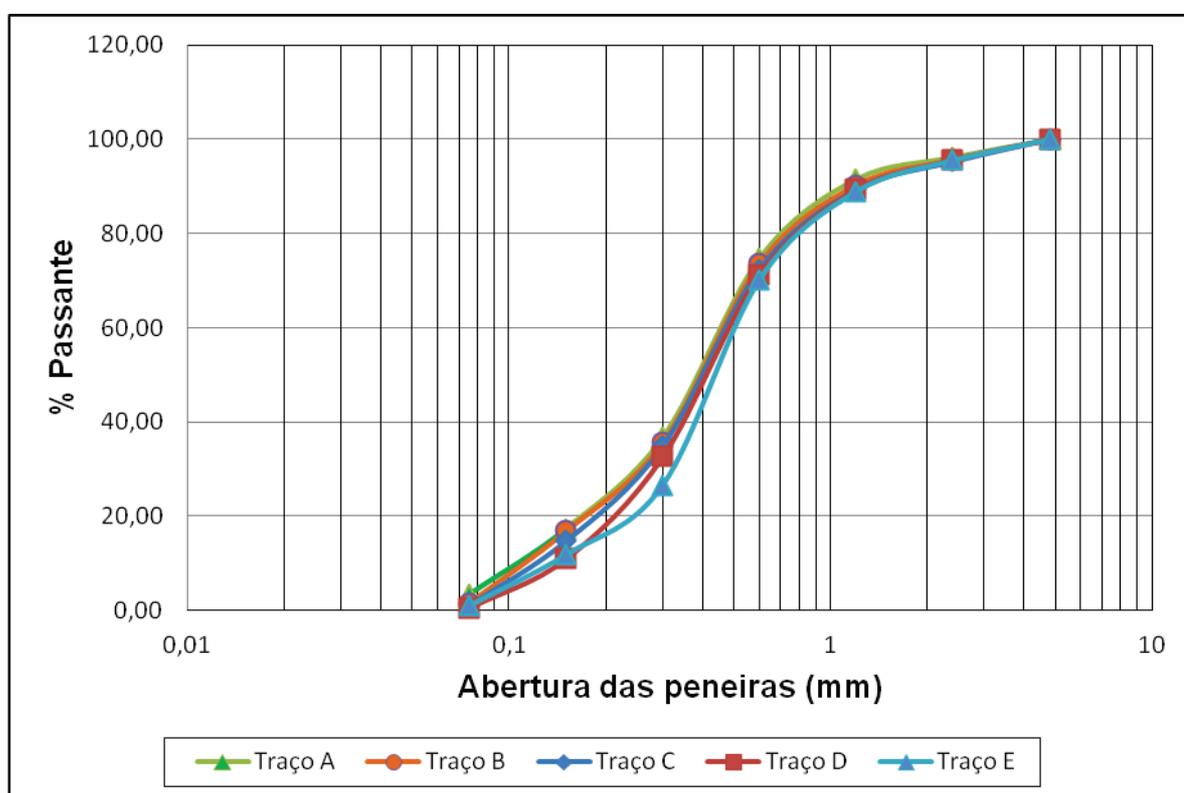
Tabela 6.19 - Densidade de massa dos traços no estado solto

Traços	Densidade de massa dos traços no estado solto
A	1,389
B	1,394
C	1,408
D	1,408
E	1,404

6.3.2.2 – Granulometria das argamassas

O procedimento do ensaio está descrito no [Item 6.1.3.2](#). O **Apêndice B.5** possui os dados completos do ensaio. A cal usada foi a flocos que foi passada em um almofariz ou gral de porcelana e amassada com um pistilo, até que os grumos fossem dissolvidos. As curvas granulométricas estão apresentadas na **Figura 6.23**.

Figura 6.23 - Curvas granulométricas das argamassas do estado anidro.



6.3.3 – Ensaio nas argamassas no estado fresco

6.3.3.1 – Consistência

O ensaio visou a determinação de uma consistência constante para todas as argamassas, sendo definida a água teórica para cada traço através do gráfico espalhamento / água/material seco. Entretanto, foi percebido durante a execução do ensaio para determinação dos pontos do gráfico, que havia uma perda de água durante o ensaio, por evaporação e pelo manuseio da argamassa. Sendo assim, na determinação da água teórica havia um excesso para obter a trabalhabilidade constante desejada.

Desta forma, o ensaio determinou a água teórica, e com esse dado aproximado, foi determinada a água de moldagem. Para a definição desta, o ensaio foi repetido três vezes para obter a relação água/material seco para cada traço, sendo o resultado afirmado nas 3 repetições, só assim foi efetuada a moldagem.

De início, os materiais foram pesados, de acordo com cada traço em massa. O **Apêndice B.3** descreve os valores de cada traço deste ensaio. O material seco foi posto na argamassadeira de laboratório com capacidade de 5 litros, aplicando a velocidade baixa por 90 segundos; após esta homogeneização mecânica, foi executada a homogeneização manual com espátula e posteriormente voltou-se a mecânica em velocidade média. Este procedimento foi executado acrescentando água na mistura de forma gradativa e determinando a consistência da argamassa na mesa (flow-table), conforme a norma NBR 13276 (2002), que foi fixado $260 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$. O valor foi escolhido por facilitar a aplicação da argamassa no substrato em canteiros de obra.

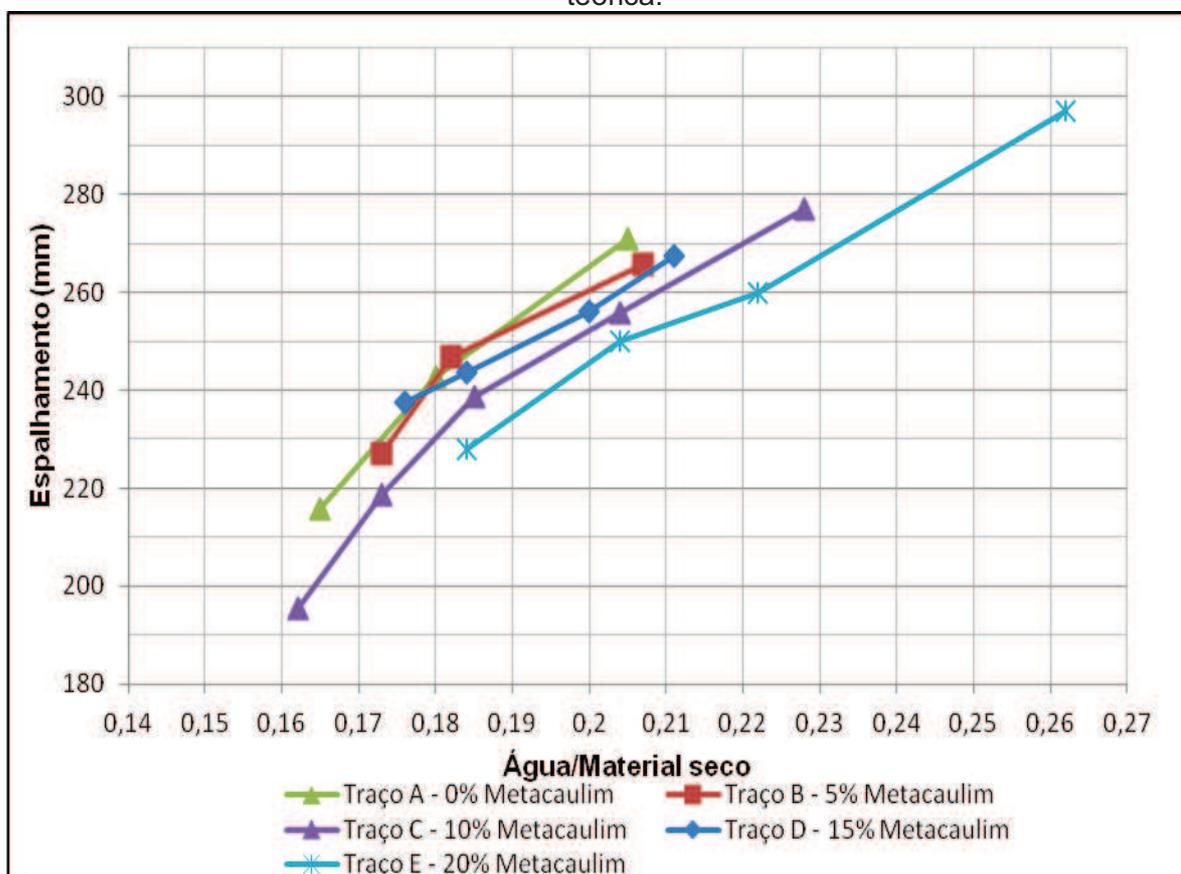
Seguindo a norma, o molde em forma de tronco-cônico foi enchido, colocando-o de modo centralizado sobre a mesa para obtenção do índice de consistência. Enchido em três camadas sucessivas, com alturas aproximadamente iguais; e aplicadas em cada uma delas, respectivamente, 15, 10 e 5 golpes com o soquete, para distribuir uniformemente a argamassa no molde. Quando houve a necessidade, foi completo o volume do molde com mais argamassa.

Após o rasamento na borda superior do molde, a manivela da mesa foi acionada para obter o espalhamento, de modo que a mesa subiu e desceu 30 vezes

em 30 segundos de maneira uniforme. As medidas foram realizadas com paquímetro, aferindo três diâmetros e tirando a média desses, expressa em milímetros.

Desta forma, a água foi adicionada aos poucos e a consistência foi verificada, até que foi obtido no mínimo três valores de espalhamento²⁹; logo foi conseguido no mínimo três pontos em um gráfico com a relação: espalhamento (eixo Y) / água/material seco (eixo X). Com o gráfico, foi obtida a água ideal para o espalhamento de 260 mm. O **Apêndice C.1** mostra com detalhes os diâmetros e as relações água/material secos encontrados para cada argamassa. A **Figura 6.24** mostra o gráfico com o espalhamento das argamassas versus a relação água/material seco para a determinação da água teórica. A **Tabela 6.20** mostra os valores encontrados das relações água/material seco teórico e as relações água/material seco de moldagem, e o quantitativo de dias para a desmoldagem de cada traço.

Figura 6.24 - Gráfico do espalhamento / água/material seco para a determinação da água teórica.



²⁹ Nas argamassas D e E foram 4 pontos, na argamassa C foi 5 pontos, e nas demais 3 pontos.

Tabela 6.20 - Dados da relação A/MS teórico, A/MS da moldagem e o quantitativo de dias para a desmoldagem para cada argamassa

Argamassa	A/MS teórico	A/MS da moldagem	Quantitativo de dias para a desmoldagem
A	0,195	0,18	9°
B	0,2	0,184	7°
C	0,208	0,185	4°
D	0,203	0,187	4°
E	0,222	0,195	4°

6.3.3.2 – Densidade de massa das argamassas

O ensaio foi baseado na norma NBR 13278 (1995), entretanto, foram seguidos os seguintes procedimentos: As dez formas cilíndricas foram numeradas e pesadas antes da moldagem e seus valores anotados. O adensamento foi feito em três camadas distribuídas uniformemente e foram efetuados 10 golpes por camada. As formas com as argamassas foram pesadas e tiveram seus valores anotados.

Desta forma, foi subtraído do valor do recipiente cheio do vazio, obtendo o valor da argamassa no estado fresco em cada corpo de prova. Este valor foi dividido pelo volume das formas e obtida a densidade de massa de 10 corpos de prova por traço de argamassa. Destes valores foram retirados uma média da densidade de massa no estado fresco de cada argamassa. Os **Apêndices C.2** e **C.3** possuem todos os dados e tabelas do ensaio. A **Tabela 6.21** mostra os valores encontrados para a densidade de massa no estado fresco das argamassas, assim como o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 6.21 - Densidade de massa no estado fresco das argamassas e os respectivos valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Traços	Densidade de massa no estado fresco	Desvio Padrão (S)	Coeficiente de variação (%)
Traço A - 0% metacaulim	2,00	0,01	0,62
Traço B - 5% metacaulim	2,01	0,008	0,41
Traço C - 10% metacaulim	2,03	0,010	0,50
Traço D - 15% metacaulim	2,04	0,017	0,86
Traço E - 20% metacaulim	2,04	0,015	0,72

6.3.4 – Estado endurecido

6.3.4.1 – Variação de massa

O ensaio tem como objetivo ver a variação de massa das argamassas no estado endurecido com a intenção de analisar a perda de massa decorrente da evaporação de água e das reações de hidratação.

Segundo Carneiro (1999), a variação de massa nas primeiras idades ocorre pela perda de água de amassamento por evaporação, que é mais intensa nos dois primeiros dias e parando praticamente aos 28 dias. Nos primeiros dois dias, ocorrem as reações dos aluminatos e a partir dos 28 dias ocorre a hidratação da belita com a formação dos compostos de CSH.

O autor³⁰ informa que a reação do hidróxido de cálcio e o ar é uma reação que ocorre lentamente, com a formação de CaCO_3 pela substituição de 1 mol de H_2O por 1 mol de CO_2 ; sendo a massa molecular do anidro carbônico do ar (CO_2) maior que a da água (H_2O), formando o carbonato de cálcio (CaCO_3) que tem massa maior em relação ao composto de origem, hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Assim, a argamassa, no estado endurecimento, vai lentamente aumentando sua massa.

O ensaio foi realizado em 10 corpos de prova que foram pesados na data de desmoldagem³¹ até cerca de 60 dias³². O **Apêndice C.4** possui as tabelas das pesagens e os detalhes da obtenção dos resultados para cada argamassa. As **Figuras 6.25, 6.26, 6.27, 6.28 e 6.29** mostram a variação de massa, respectivamente, das argamassas A, B, C, D e E até a idade de 60 dias.

³⁰ (CARNEIRO, 1999, cap. 3, p. 56 e 57.)

³¹ Exceto os da argamassa A que foram pesados no dia seguinte a desmoldagem.

³² Exceto pela argamassa D que foi pesada até a idade de 53 dias. As demais argamassas foram pesadas a idades superiores do gráfico como pode ser percebido pelos dados do **Apêndice C.4**.

Figura 6.25 - Variação de massa da argamassa A

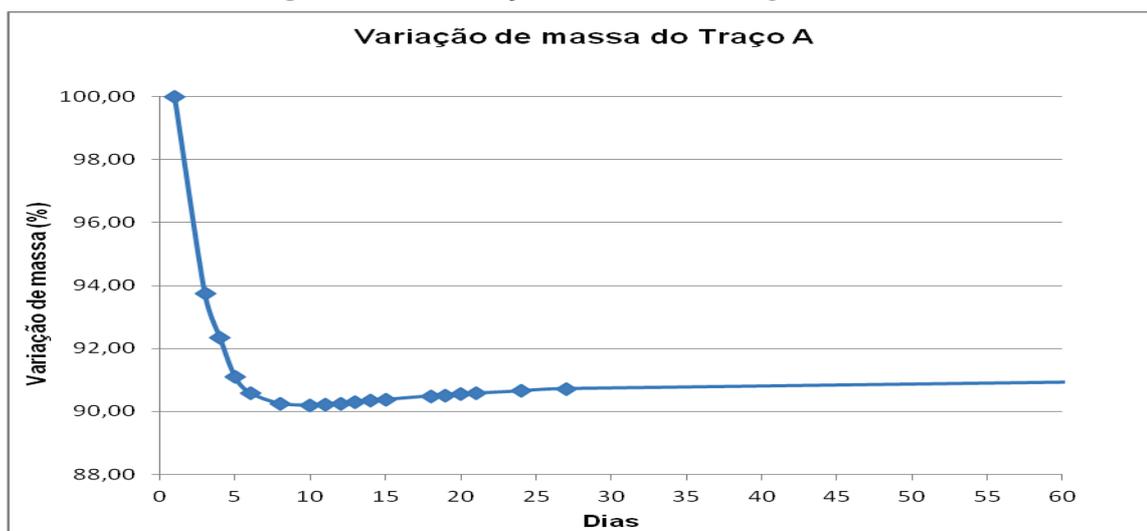


Figura 6.26 - Variação de massa da argamassa B

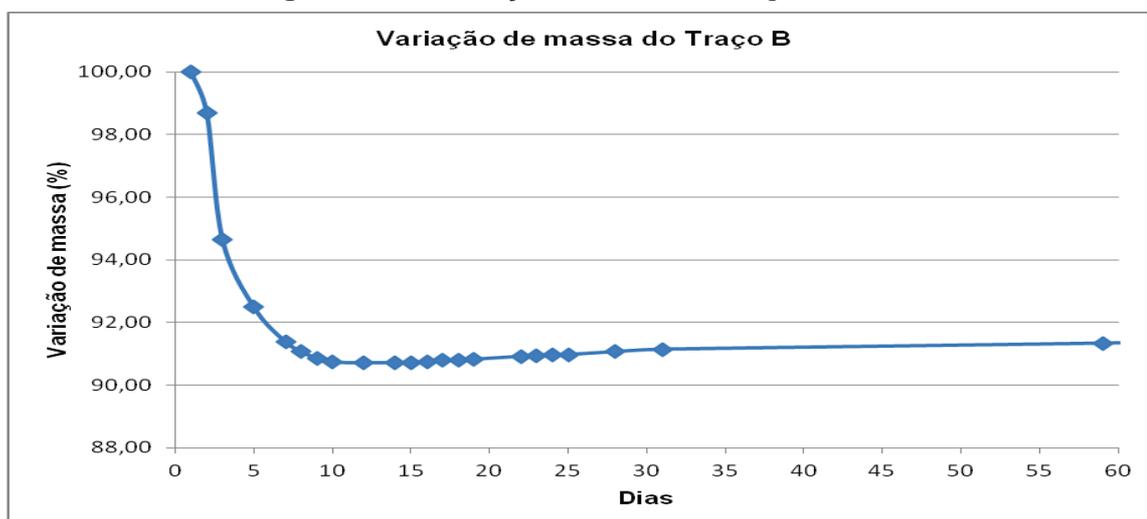


Figura 6.27 - Variação de massa da argamassa C

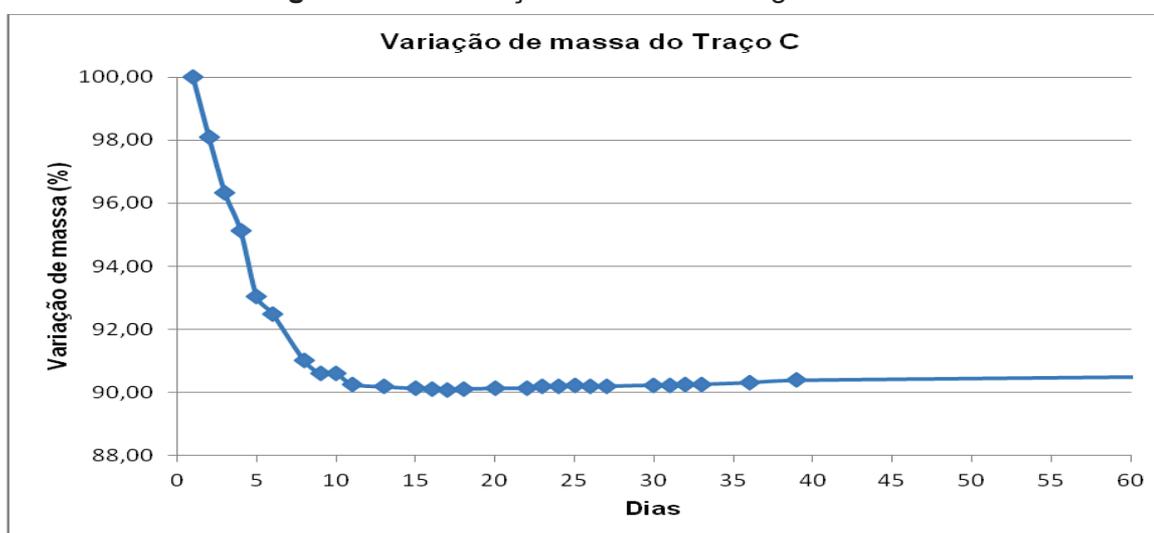
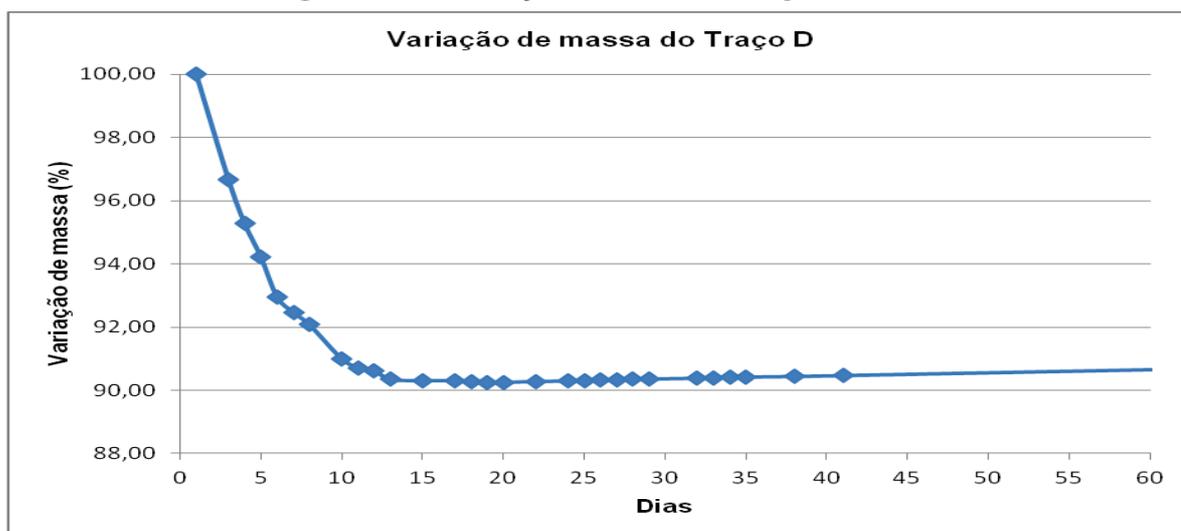
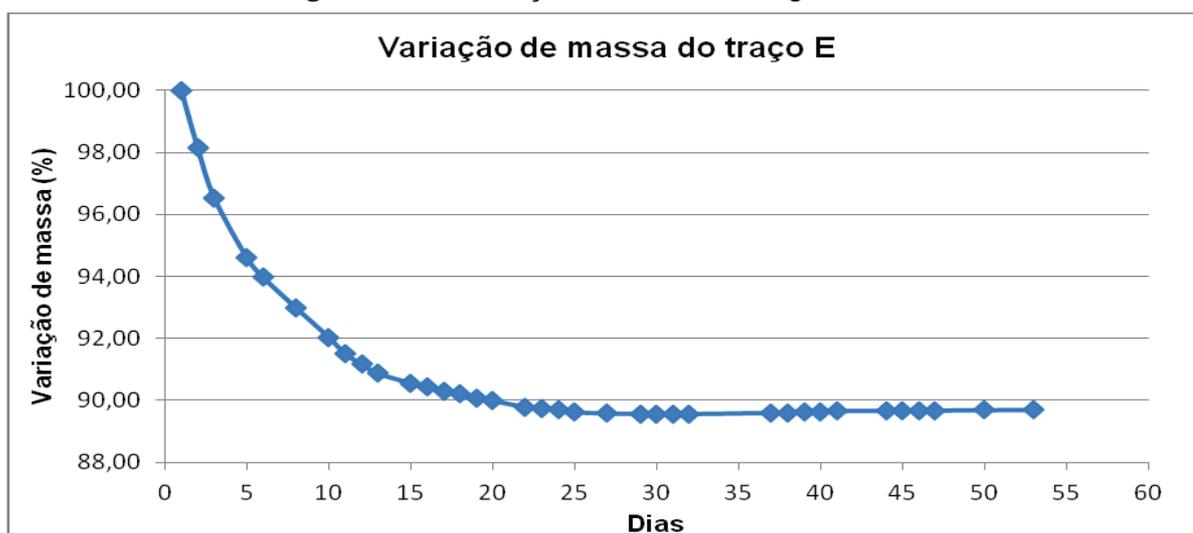


Figura 6.28 - Variação de massa da argamassa D**Figura 6.29 - Variação de massa da argamassa E**

6.3.4.2 – Resistência à compressão e à tração na flexão

O ensaio de resistência à compressão foi determinado pela norma NBR 7215 (1996), e os corpos de prova cilíndricos foram capeados para o nivelamento da superfície com enxofre com espessura máxima de 2mm, segundo a norma, que recebeu a carga no ensaio de compressão. O ensaio de resistência à tração na flexão seguiu a norma NBR 12142 (1991) com uso de três apoios para aplicação da carga.

As propriedades mecânicas foram avaliadas em três corpos de prova para cada ensaio, sendo os cilíndricos com dimensão de 5 x 10 cm utilizados para a compressão e retangulares com dimensão de 4 x 4 x 16 cm para a tração na flexão. A prensa hidráulica utilizada nos ensaios foi manual com capacidade para 20 toneladas forças com indicador digital de força sensível a um quilo da marca Solotest.

O ensaio de tração na flexão foi realizado em três pontos, onde é utilizada uma barra biapoiada com aplicação de carga no centro da distância entre os apoios, ou seja, existem três pontos de carga. (Ver **Figura 6.30**)

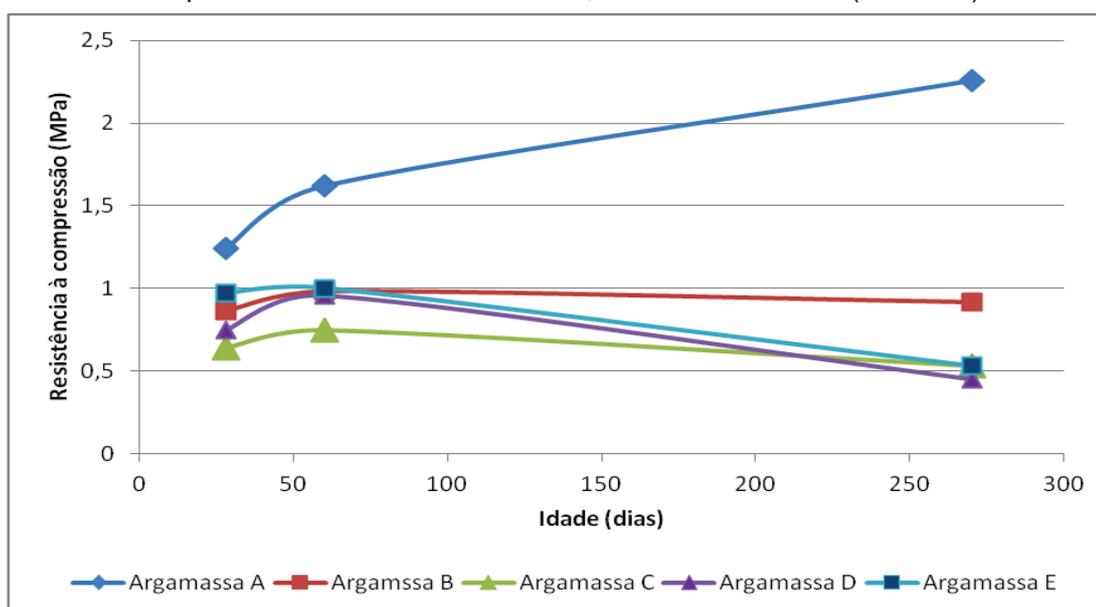
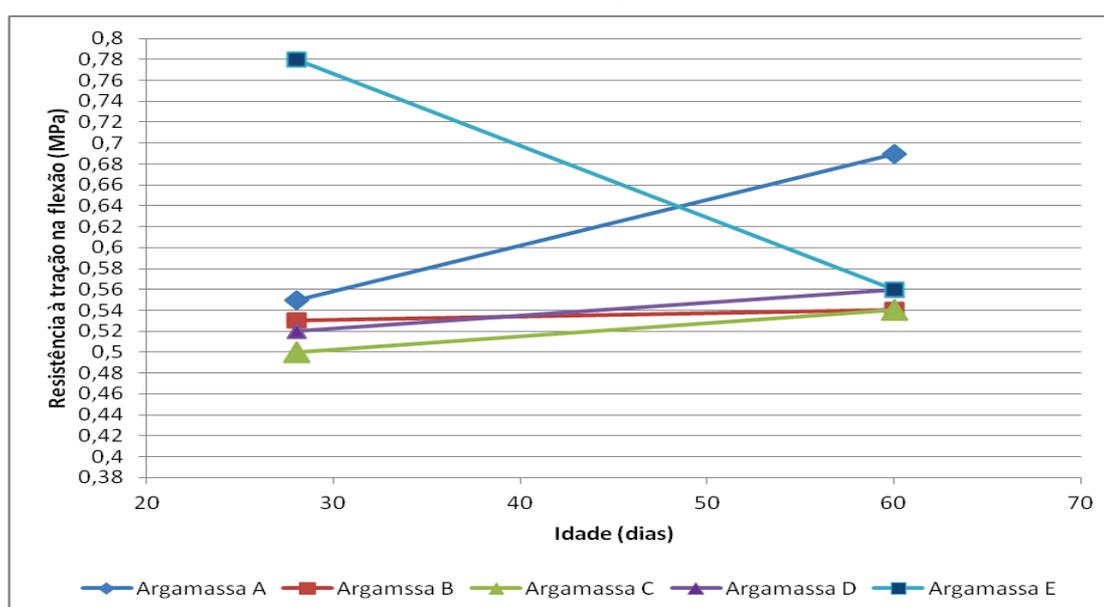
Figura 6.30 - Ensaio de resistência à tração na flexão no traço D aos 60 dias



A **Tabela 6.22** apresenta os resultados do ensaio de compressão e tração na flexão nas idades de 28 e 60 dias, assim como os resultados aos 9 meses de compressão. As **Figuras 6.31** e a **6.32** contêm as curvas das resistências das argamassas, e cada ponto da curva é a média aritmética da resistência obtida pelo ensaio de três corpos de prova. O **Apêndice C.5** contém todos os resultados dos ensaios detalhadamente.

Tabela 6.22 - Resultados da resistência à compressão e à tração na flexão

Argamassas	Compressão			Tração na Flexão	
	28 dias	60 dias	9 meses	28 dias	60 dias
Traço A	1,24	1,62	2,26	0,55	0,69
Traço B	0,87	0,98	0,92	0,53	0,54
Traço C	0,64	0,75	0,53	0,5	0,54
Traço D	0,75	0,96	0,45	0,52	0,56
Traço E	0,97	1,00	0,53	0,78	0,56

Figura 6.31 - Curvas das argamassas no ensaio de resistência mecânica à compressão nas idades de 28 dias, 60 dias e 9 meses (270 dias).**Figura 6.32** - Curvas das argamassas no ensaio de resistência mecânica à tração na flexão nas idades de 28 dias e 60 dias.

6.3.4.3 – Capilaridade

O ensaio foi baseado na norma NBR 15259 de 2005.

A logística para a preparação do ensaio se deu da seguinte maneira:

- a. Um recipiente foi nivelado sobre a bancada;
- b. Dois gradis metálicos foram postos e nivelados dentro do recipiente;
- c. Duas barras³³ foram postas sobre os gradis, de forma que ficassem com o mesmo afastamento de 3 cm, permitindo que a fase dos corpos de prova estivessem em contato direto com a água;
- d. Foi encontrado o nível nas superfícies das barras, para que a água posta no interior do recipiente atingisse os corpos de prova em alturas equivalente (Ver **Figura 6.33**);
- e. As fases de contato com a água dos corpos de prova foram lixados, e limpos com pincel de cerdas macias;
- f. Um corpo de prova teste, com marcação de 5 mm foi posto sobre as barras e foi colocada água até que a mesma estivesse na altura da marcação de 5 mm no corpo de prova teste (Ver **Figura 6.34**);
- g. Os três corpos de prova utilizados no ensaio eram retangulares com dimensões de 4 x 4 x 16 cm foram pesados antes do ensaio;

Figura 6.33 - Nivelamento das barras para o ensaio de capilaridade



Figura 6.34 - Corpo de prova teste para conferir a altura da lamina de água

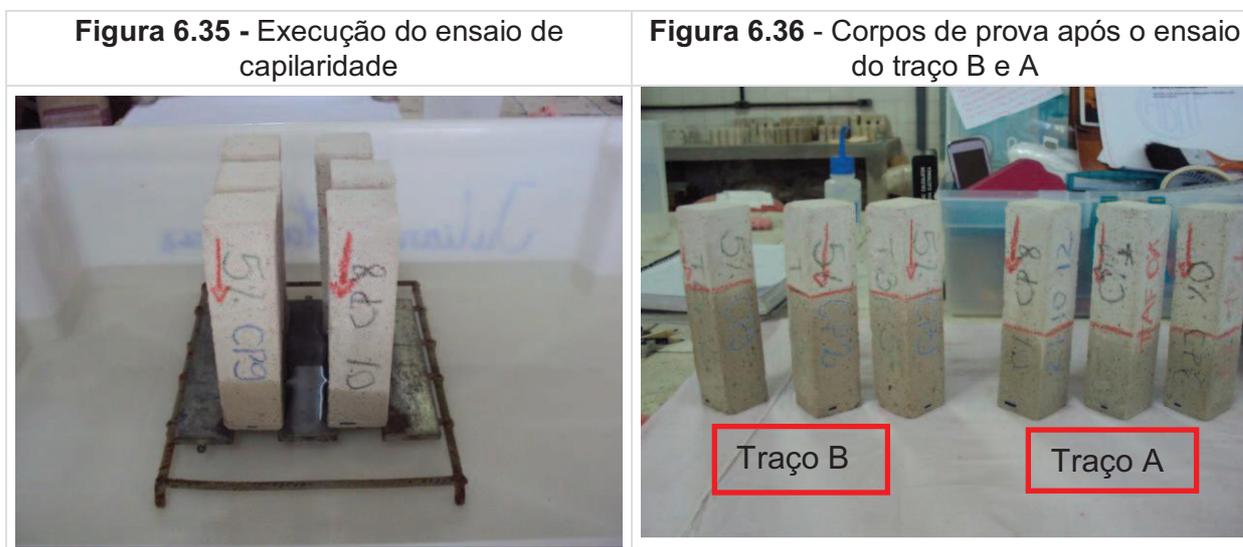


³³ As duas barras foram postas pois sem elas o espaçamento dos gradis não deixava os corpos de provas de forma segura, e durante um primeiro teste os corpos de provas caíam na água.

A absorção de água por capilaridade das argamassas foi determinada por meio de três corpos de prova por cada traço de argamassa nas idades de 30 e 60 dias.

As leituras foram iniciadas após 4 minutos do contato dos corpos de prova com a água. Dado os 4 minutos, os corpos de prova foram retirados do contato direto com a lamina de água, foi retirado o excesso de água com pano limpo, os corpos de prova foram postos em cima de uma toalha absorvente e foram pesados e tiveram seus resultados anotados conforme o tempo, em seguida foram postos sobre a lamina de água e foi acionado o cronometro até passar 6 minutos, obtendo um tempo de 10 minutos dos corpos de provas em contato com a água. E o processo de pesagem foi reiniciado como dito anteriormente.

As leituras foram efetuadas nos tempos de 0, 4, 10, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 90 e 100 minutos. Estas foram efetuadas de maneira que fosse possível a representação gráfica dos resultados em função da raiz quadrada do tempo, sendo as leituras realizadas em tempos equivalentes a números quadrados perfeitos, e as demais leituras de 10 e 90 minutos foram em função da obtenção do coeficiente de capilaridade (Ver **Figuras 6.35 e 6.36**).



Nas **Figuras 6.37 e 6.38** estão, respectivamente, os gráficos de capilaridade das argamassas aos 30 e 60 dias³⁴. No **Apêndice C.6** estão todas as tabelas referentes ao ensaio.

³⁴ Por motivos técnicos não foi possível a realização do ensaio aos 60 dias na argamassa C.

Figura 6.37 - Gráficos de capilaridade das argamassas na idade de 30 dias

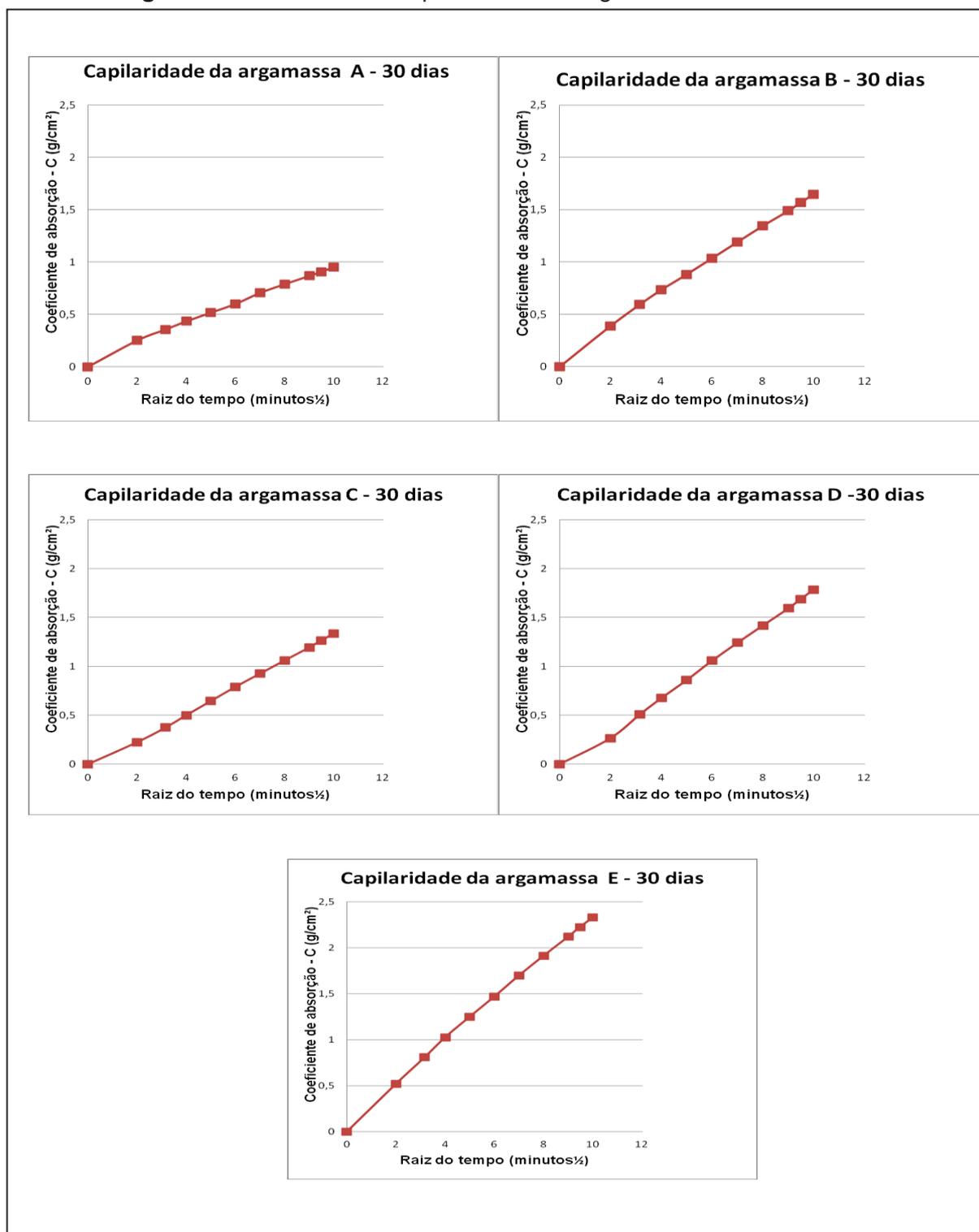
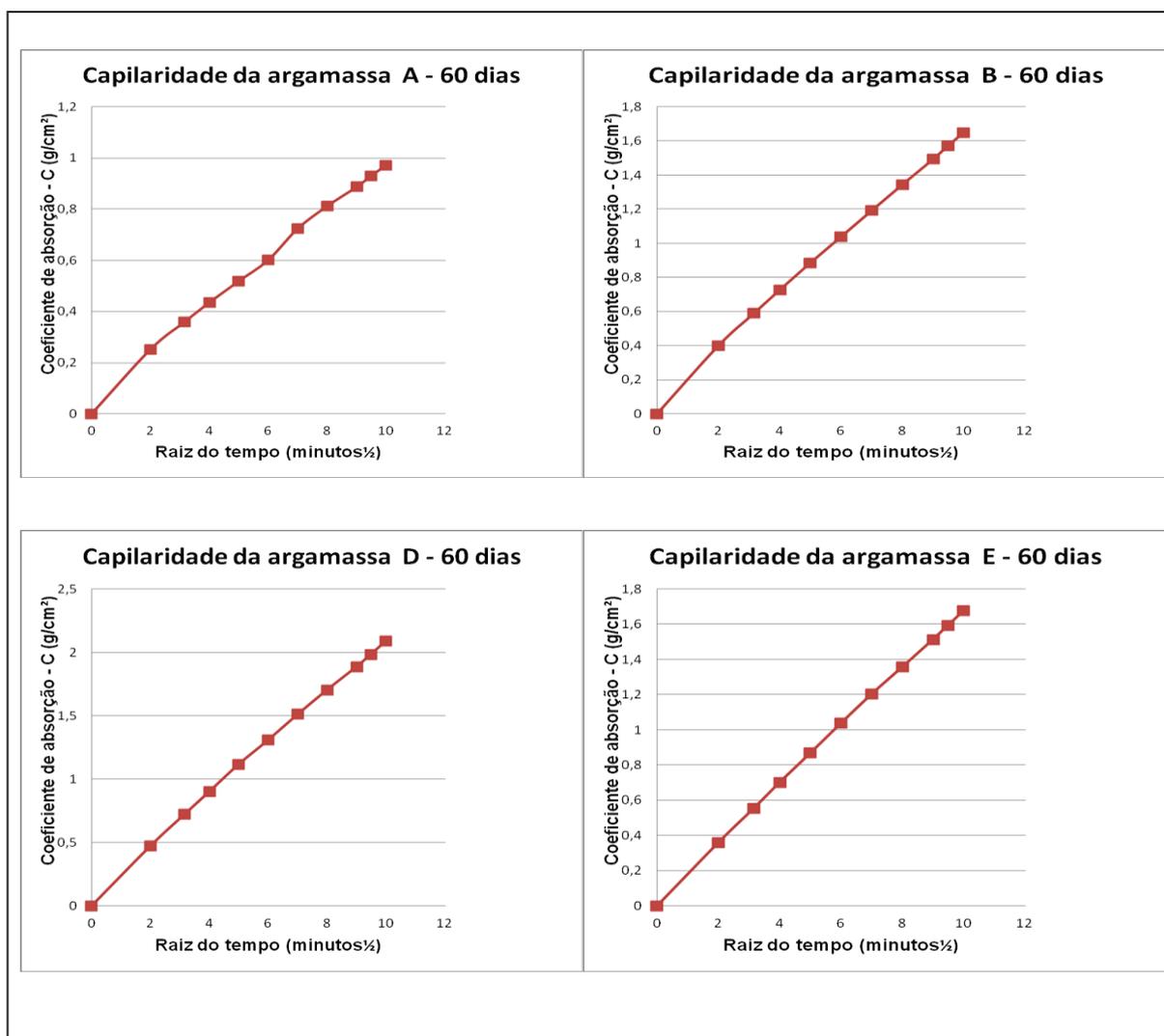


Figura 6.38 - Gráficos de capilaridade das argamassas na idade de 60 dias

6.3.4.4 – Absorção de água

O ensaio foi baseado na norma NBR 9778 de 2009 com os corpos de prova na idade de 90 dias. Os resultados dos valores da absorção das argamassas estão na **Tabela 6.23**.

A logística para a preparação do ensaio se deu da seguinte maneira:

- a. Os três corpos de prova foram pesados e tiveram seus valores anotados;
- b. Foram postos na estufa a uma temperatura de $(100 \pm 5)^\circ \text{C}$ por um período de 72 horas;

- c. Esperou-se esfriar os corpos de prova e foram pesados e seus valores anotados;
- d. Depois os corpos de prova foram postos em um recipiente com água da COMPESA por um período de 115 horas³⁵ em temperatura de 25°C (ambiente);
- e. Após o período de imersão, os corpos de prova foram retirados da água e o excesso de água retirado com toalha, e foram pesados e os valores anotados;
- f. Foram postos em um recipiente cheio de água que foi progressivamente elevado à ebulição de 15 minutos até no máximo 30 minutos. A ebulição foi mantida por um período de 5 horas, mantendo o nível da água constante;
- g. Depois desse período de 5 horas, os corpos de prova foram retirados da água e postos sobre uma toalha e esperou-se esfriar;
- h. As pesagens foram efetuadas;
- i. É válido ressaltar que os corpos de prova tiveram suas medidas aferidas antes de todas as etapas, e que o ensaio foi executado em todos os traços, exceto pela argamassa A por ser uma argamassa aérea e não resistir ao período de imersão.

A **absorção (A)** foi calculada da seguinte maneira:

$$A = (m_{\text{sat}} - m_s) \times 100/m_s$$

Onde:

m_{sat} é a massa da amostra saturada em água após a imersão e fervura;

m_s é a massa da amostra seca na estufa.

Tabela 6.23 - Absorção por imersão das argamassas mistas com metacaulim

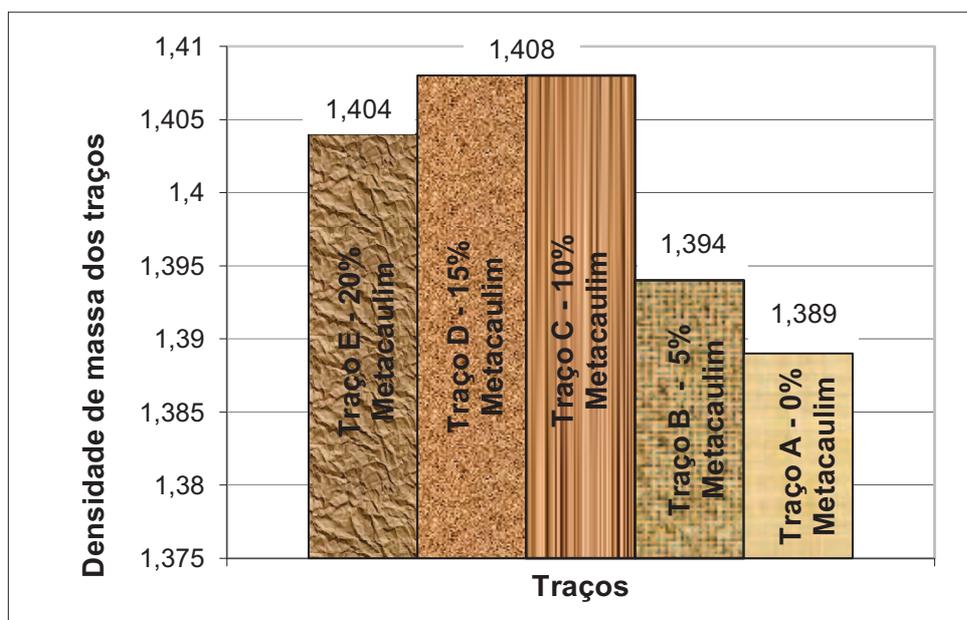
Absorção de água das argamassas mistas com metacaulim (em porcentagem)	
Argamassa B	10,38
Argamassa C	11,05
Argamassa D	9,71
Argamassa E	10,82

³⁵ A norma define 72 horas de imersão.

7 - ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

A adição de metacaulim nas argamassas influenciou nos valores da densidade de massa no estado solto até quando o teor era em 15% referente à massa da cal. O traço E teve um pequeno decréscimo da densidade de massa em relação ao traço D. Os traços das argamassas D e C tiveram o mesmo valor de densidade de massa no estado anidro que foi de 1,408, o que demonstra que os mesmos tiveram um empacotamento do sistema semelhante e que o teor acrescido de metacaulim não contribuiu de forma relevante para a densidade de massa no estado solto. (Ver **Figura 7.1**)

Figura 7.1 - Densidade de massa dos traços no estado anidro

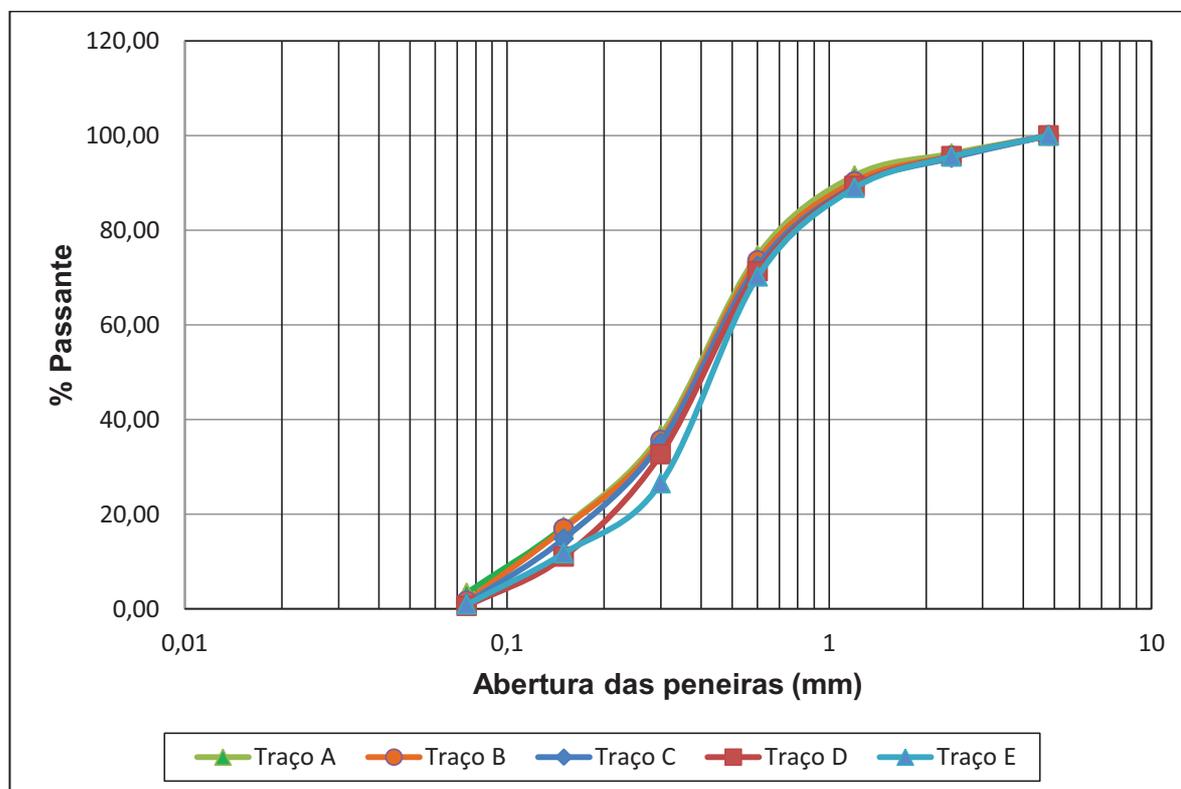


As argamassas apresentaram um perfil da curva granulométrica muito semelhante. As curvas se sobrepuseram por haver uma semelhança das proporções dos traços, não havendo uma grande disparidade entre os mesmos, exceto pelo teor de metacaulim e de cal. Desta forma, a diferenciação da granulometria se dá de forma sutil, no teor de material pulverulento. A adição de metacaulim terá um efeito mediante as reações ocorridas entre a cal e a modificação nos teores de adição de água na argamassa.

Contudo, as curvas D e E apresentam uma melhor distribuição granulométricas que os demais traços (Ver **Figura 7.2**). Houve uma melhor

distribuição do quantitativo de grãos nas peneiras na argamassa E, favorecido pelo acréscimo do teor de partículas finas do metacaulim.

Figura 7.2 - Curvas granulométricas das argamassas



O ensaio de consistência determinou a moldagem com uma trabalhabilidade de 26 cm de diâmetro com relações de água/material seco que tiveram seus valores crescentes com o aumento do teor de metacaulim. Fato que é explicado pelo aumento no teor de finos e a necessidade de um maior teor de água para envolver os grãos das partículas. Contudo, é válido ressaltar que foi necessário o uso da terceira casa decimal para determinar a trabalhabilidade desejada, em virtude de não haver uma grande disparidade nos teores de metacaulim nas argamassas.

A argamassa E, com 20% de metacaulim em relação à massa de cal, teve a maior relação água/material seco com 0,195, entretanto foi desmoldada com quatro dias como a argamassa D, o que pode ser explicado pelas reações químicas ocorridas entre a cal e o metacaulim originando produtos cimentantes como os aluminatos, o que favorece a sua solidificação em relação às demais argamassas com menores teores de metacaulim como informa Murat (1983) e Sabir et al (2001). As argamassas A e B apesar de terem uma menor relação A/MS foram

desmoldadas com 9 dias e 7 dias, respectivamente. Para que houvesse o endurecimento destas argamassas foi necessário o contato direto com o ar para que o dióxido de carbono (CO_2) reagisse com a cal hidratada, formando o carbonato de cálcio (CaCO_3). Quando as argamassas estavam nas formas este processo de endurecimento não ocorria, apenas uma nata carbonatada, e tão somente após uma desmoldagem com bastante cuidado é que a solidificação ocorria em 24 horas. Desta forma, o teor de metacaulim contribuiu para a solidificação das argamassas apesar da necessidade de uma maior relação água/material seco (Ver **Tabela 7.1**).

Tabela 7.1 - Dados da relação A/MS teórico, A/MS da moldagem e quantos dias se levou para efetuar a moldagem para cada argamassa

Argamassa	A/MS teórico	A/MS da moldagem	Desmolde
A	0,195	0,18	9 dias
B	0,2	0,184	7 dias
C	0,208	0,185	5 dias
D	0,203	0,187	4 dias
E	0,222	0,195	4 dias

Os resultados obtidos na densidade de massa no estado fresco mostram que o teor de metacaulim contribuiu para a compactação do sistema no estado fresco, onde quanto maior o teor de metacaulim na argamassa maior foi o valor encontrado da densidade de massa no estado fresco.

Contudo, os valores não tiveram grandes discrepâncias em seus resultados em virtude da pouca diferenciação do quantitativo nos teores de metacaulim. Nas argamassas D e E, não houve diferença nos valores, o que demonstra que a densidade de massa no estado fresco não sofreu alterações mediante ao aumento de 5% de metacaulim na argamassa E, mesmo detendo uma curva com melhor uma melhor distribuição granulométrica, o adensamento e a compactação foram os mesmos da argamassa D (Ver a **Figura 7.2** e **Tabela 7.2**).

O metacaulim tem uma densidade (no estado anidro) de **0,46 kg/dm³** e a cal **0,675 kg/m³**. Entretanto, a substituição da cal hidratada por metacaulim foi em massa, necessitando de um maior volume de metacaulim para o mesmo quantitativo de cal. O que acarretou em uma traço mais rico em material pozolânico, e que a adição favoreceu o adensamento e os valores da densidade de massa no estado fresco. O desvio padrão e coeficiente de variação demonstraram a confiabilidade dos resultados (Ver **Tabela 7.2**).

Tabela 7.2 - Densidade de massa no estado fresco das argamassas e os respectivos valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Traços	Densidade de massa no estado fresco	Desvio Padrão (S)	Coeficiente de variação (%)
Traço A - 0% metacaulim	2,00	0,01	0,62
Traço B - 5% metacaulim	2,01	0,008	0,41
Traço C - 10% metacaulim	2,03	0,010	0,50
Traço D - 15% metacaulim	2,04	0,017	0,86
Traço E - 20% metacaulim	2,04	0,015	0,72

Contudo, é válido ressaltar que se faz necessário estudos mais aprofundados de microscopia e de como são distribuídos os poros da estrutura no estado endurecido das argamassas estudadas. O teor de partículas finas do metacaulim contribuiu para a compactação do sistema e para o preenchimento dos espaços vazios, e para o aumento na densidade de massa no estado fresco, visto que, quanto maior a densidade de massa no estado fresco menor é o teor de ar incorporado.

No ensaio de variação de massa, até o 3º dia as argamassas tiveram uma perda de massa crescente onde quanto menor o teor de metacaulim maior a perda de massa, o que segundo Carneiro é decorrente da perda por evaporação da água de amassamento. A argamassa A perdeu 6,25% de massa enquanto que a argamassa E perdeu 3,46% apesar de ter sido moldada com uma relação água/material seco (A/MS) de 0,195 e a argamassa A com 0,18 (Ver **Tabela 7.3**). Desta forma, as argamassas com menores teores de metacaulim apesar de terem sido moldadas com uma menor relação A/MS tiveram uma maior perda de água de amassamento nas primeiras idades.

Tabela 7.3 - Perda de massa (%) das argamassas com 3 dias de idade.

Argamassa	Perda de massa no 3º dia de idade (%)
A	6,25
B	5,35
C	3,66
D	3,34
E	3,46

No 10º dia, as argamassas com menores teores de metacaulim continuam a perder mais massa que as com maior teor. Demonstrando que até o 10º dia, as

argamassas ainda estavam perdendo a água de amassamento, sendo que as com maior teor de metacaulim perderam menor percentagem de massa, exceto pela a argamassa C que teve uma maior perda de massa que a argamassa B (Ver **Tabela 7.4**).

Tabela 7.4 - Perda de massa (%) das argamassas com 10 dias de idade.

Argamassa	Perda de massa no 10° dia de idade (%)
A	9,80
B	9,27
C	9,39
D	9,00
E	7,96

A partir do 10° dia de idade, a argamassa A começa a ganhar lentamente massa em consequência da carbonatação do hidróxido de cálcio, e aos 15 dias possui uma perda de massa de 9,63%.

A argamassa B, do 10° ao 15° dia, teve corpos de prova que tiveram perda de massa, outros que mantiveram a massa constante, e outros que começaram a ganhar massa lentamente. Desta maneira, seu valor de perda de massa se manteve constante.

As argamassas C e D tiveram aumento da perda de massa, respectivamente, no 10° dia com 9,39% e 9,00% e no 15° dia com 9,87% e 9,69%. A argamassa E teve um aumento acentuado de perda de massa do 10° dia ao 15° dia que foi respectivamente 7,96% e 9,44%. Nesta idade, sua perda de massa chegou a valores semelhantes de perda de massa das demais argamassas. (Ver **Tabela 7.5**)

Tabela 7.5 - Perda de massa (%) das argamassas com 15 dias de idade.

Argamassa	Perda de massa no 15° dia de idade (%)
A	9,63
B	9,28
C	9,87
D	9,69
E	9,44

Aos 20 dias de idade, a argamassa A continua a ganhar paulatinamente massa em decorrência da carbonatação do hidróxido de cálcio. Os corpos de prova

da argamassa B, após o 15° dia, começaram a ganhar massa, atingindo uma perda de massa de 9,17% aos 19 dias. Na argamassa C tiveram corpos de prova que perderam massa, outros que mantiveram a massa constante, e outros que começaram a ganhar massa lentamente. Desta maneira, seu valor de perda de massa se manteve constante do 15° ao 20° dia de idade. As argamassas D e E mantiveram o comportamento de perda gradual de massa decorrente da perda de água de amassamento (Ver **Tabela 7.6**)

Tabela 7.6 - Perda de massa (%) das argamassas com 20 dias de idade.

Argamassa	Perda de massa no 20° dia de idade (%)
A	9,46
B	~9,17*
C	9,87
D	9,75
E	10,01

*aos 19 dias

Do 20° ao 27° dia, todas as argamassas apresentaram o comportamento de lento e gradativo de ganho de massa, exceto pela argamassa E que continuou a perder massa. As argamassas C e D tiveram um ganho mais discreto de massa do que as argamassas A e B (Ver **Tabela 7.7**)

Tabela 7.7 - Perda de massa (%) das argamassas com 27 dias de idade.

Argamassa	Perda de massa no 27° dia de idade (%)
A	9,28
B	~8,93*
C	9,8
D	9,66
E	10,42

*aos 28 dias

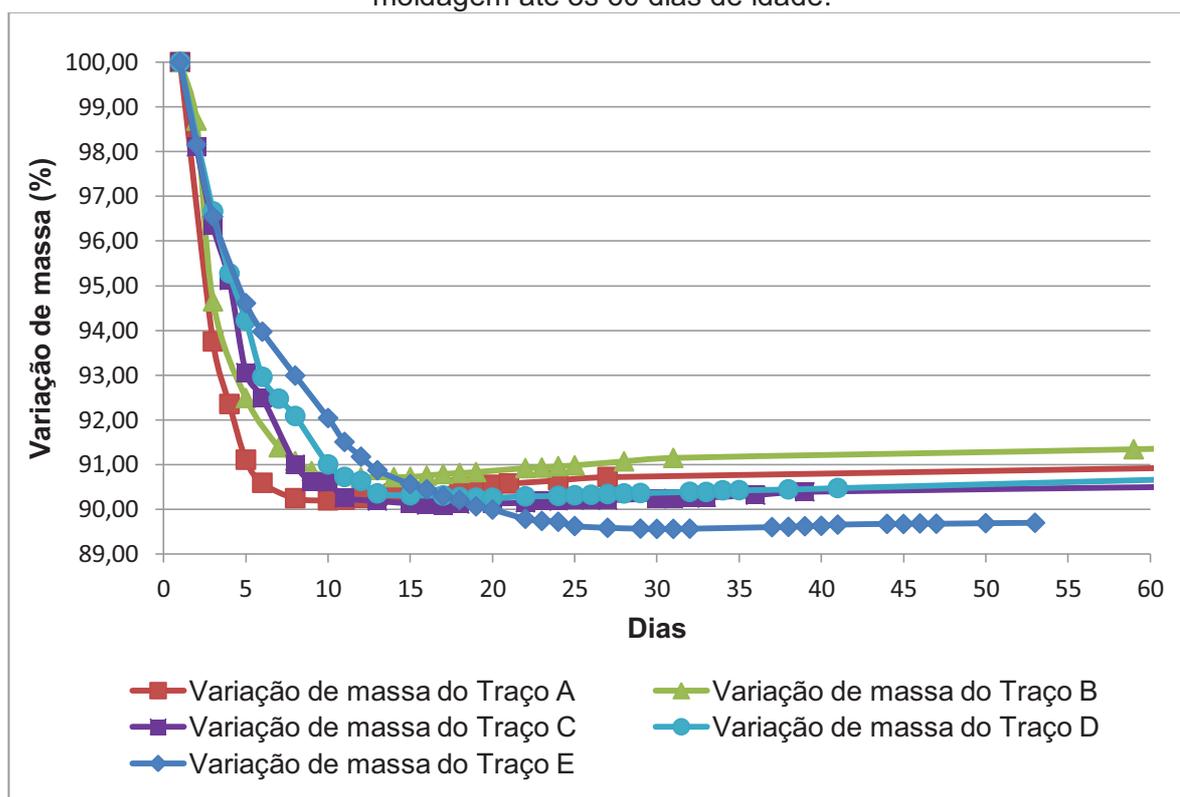
Do 27° ao 60° dia, as argamassas B, C e D continuaram a ganhar massa lentamente. A argamassa E continuou com seu comportamento de perder massa.

As argamassas ricas em cal tiveram um ganho mais rapidamente de massa, em virtude da carbonatação, e as argamassas B, C e D após o 20° dia deixam de perder massa decorrente da evaporação da água de amassamento e começam a

ganhar massa em virtude da predominância das reações de carbonatação. A argamassa com traço E continuou a perder massa em virtude da sua elevada relação A/MS e menor teor de cal em detrimento das demais argamassas. (Ver **Figura 7.3**)

A relação A/MS da argamassa E foi suficiente para que ocorresse a hidratação dos compostos e formação dos aluminatos e silicatos de cálcio hidratados (CSH) a partir do 28º dia, como diz a literatura, e houve provavelmente uma água contida nos poros capilares e esta água começa a ser perdida após o 20º dia de idade, em decorrência da maior compactação da argamassa e da diminuição dos tamanhos dos seus poros, desta forma, a água contida nos poros capilares demora mais tempo para ser liberada e para dar o início da carbonatação dos compostos de hidróxido de cálcio que não reagiram com o metacaulim.

Figura 7.3 - Gráfico da variação de massa dos traços das argamassas da data de moldagem até os 60 dias de idade.



Em relação às resistências mecânicas, a argamassa A teve um ganho de resistência contínuo dos 28 dias até os 9 meses, tendo uma resistência de 1,24 MPa aos 28 dias, e 2,26 MPa aos 9 meses, fato que não ocorreu nas demais argamassas e pode ser explicado pela colmatação dos poros em decorrência da

carbonatação do hidróxido de cálcio, que segundo Velosa (2006), com o aumento de volume da cristalização do carbonato de cálcio, preenche os vazios e colmatando - os.

Além do que a substituição da cal por metacaulim diminui o quantitativo de aglomerante (cal) por material pozolânico, que diminui a resistência mecânica, mas atribui à argamassa propriedades cimentantes como a resistência à água, transformando-a em hidráulica. A queda é atribuída à diminuição do teor de cal que proporciona à argamassa, no estado endurecido, a capacidade de absorver as deformações decorrentes da compressão.

As argamassas com metacaulim tiveram um comportamento semelhante com ganho de resistência à compressão aos 60 dias, e perda aos 9 meses. Onde as resistências das argamassas foram na seguinte ordem crescente $C < D < B < E$.

Não houve uma relação direta entre os teores de metacaulim, relação A/MS e as resistências. A argamassa E, aos 28 dias, teve uma resistência de 0,97 MPa, valor superior a argamassa B que teve um valor de 0,87 MPa. A primeira argamassa teve uma relação A/MS de 0,195 enquanto que a argamassa B deve 0,184, e valores de teores de cal e metacaulim, dispares respectivamente 20% e 5%. Não havendo um fator preponderante que explicasse os resultados.

Aos 9 meses de idade nas argamassas com teor de metacaulim, a argamassa que obteve maior valor na resistência mecânica à compressão foi a argamassa B com 0,92 MPa, seguido da C e E com 0,53 MPa, e a D com 0,45 MPa.

Contudo, as resistências à compressão tiveram valores próximos, não havendo grandes disparidades entre os resultados. Os valores das resistências à compressão foram inferiores a 1MPa nas argamassas com metacaulim, entretanto alcançaram valores superiores aos encontrados no trabalho de Velosa (2006) e estão dentro dos requisitos estabelecidos por Veiga (2003c), estando compatíveis com trabalhos relacionados à cal e metacaulim em argamassas de intervenção em obras históricas.

Em relação as resistências mecânicas à tração na flexão, a argamassa E teve o maior valor aos 28 dias, contudo aos 60 dias a resistência decresceu e seu valor se equiparou aos demais valores com outros teores de metacaulim. A argamassa A teve um pequeno acréscimo na resistência aos 60 dias chegando a 0,69 MPa.

Os resultados das resistências à tração na flexão foram muito semelhantes, não havendo grandes alterações em virtude das variações de A/MS e dos teores de metacaulim e cal. Contudo, os valores foram superiores aos encontrados nos estudos de Velosa e estão de acordo com valores propostos por Veiga.

Figura 7.4 - Gráfico da resistência mecânica à compressão das argamassas aos 28 dias, 60 dias e 9 meses de idade.

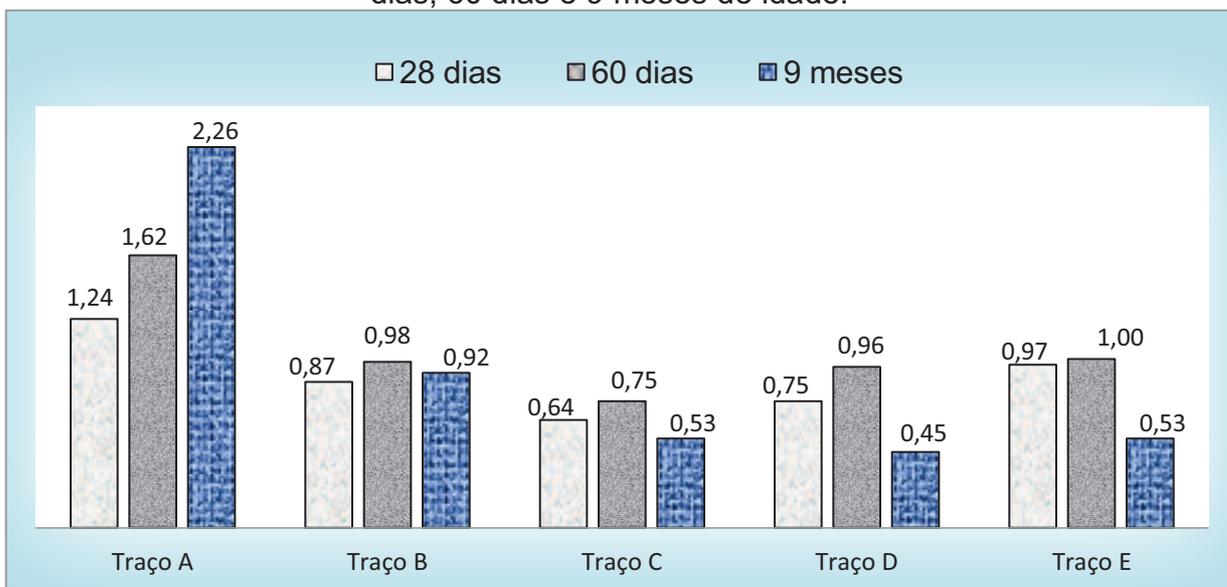
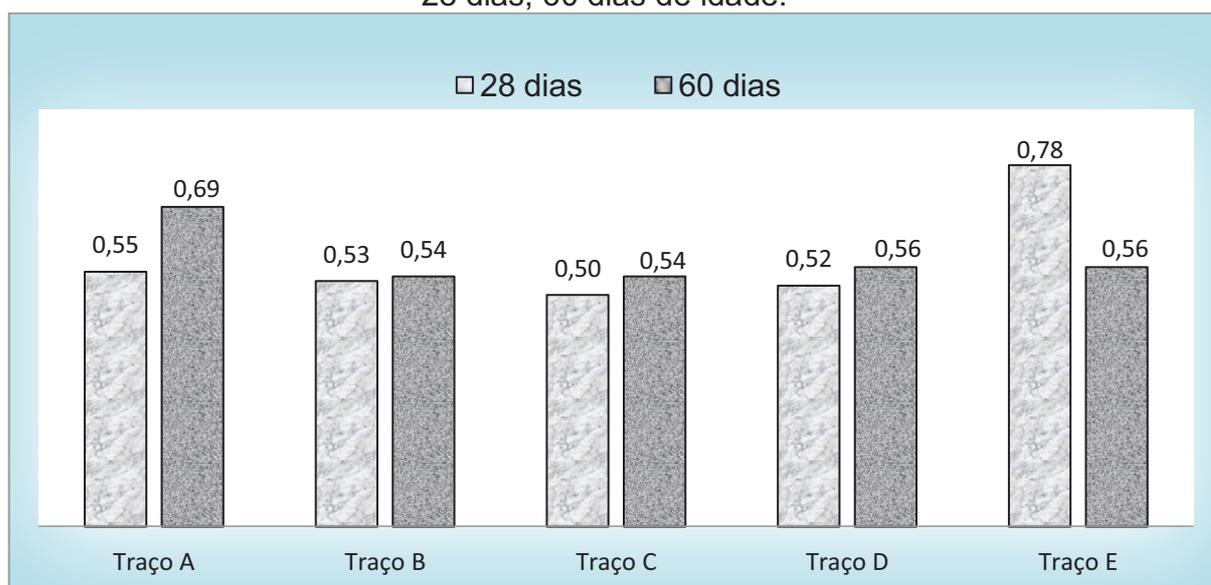


Figura 7.5 - Gráfico da resistência mecânica à tração na flexão das argamassas aos 28 dias, 60 dias de idade.



O ensaio de capilaridade mostrou que o teor de metacaulim influenciou na absorção da água por capilaridade ascendente, aumentando o coeficiente de

capilaridade das argamassas dosadas com a adição pozolânica, fato que pode ser atribuído ao aumento da porosidade, e conseqüente aumento do coeficiente de capilaridade.

Aos 30 dias de idade, nota-se que quanto maior o teor de metacaulim maior o coeficiente de capilaridade, esse comportamento não se aplica a argamassa B que teve um coeficiente maior que a argamassa C e praticamente idêntico a argamassa D. Aos 60 dias de idade, o comportamento se mantém, com exceção da argamassa D que obteve um valor do coeficiente superior as demais.

As argamassas A e B mantiveram seu coeficiente constante, enquanto que a argamassa E teve um decréscimo do coeficiente de capilaridade atingindo o mesmo valor da argamassa B aos 60 dias, e a argamassa D teve um acréscimo aos 60 dias. (Ver **Tabela 7.8**, e as **Figuras 7.6 e 7.7**). Em relação à secagem, as argamassas com metacaulim tiveram secagem satisfatória sendo observado o aspecto visual da perda de água após o ensaio.

Tabela 7.8 - Coeficiente de capilaridade das argamassas aos 30 e 60 dias de idade.

Coeficiente de capilaridade (g/cm ²)		
	30 dias	60 dias
Argamassa A	0,63	0,64
Argamassa B	1,08	1,08
Argamassa C	0,82	--
Argamassa D	1,10	1,35
Argamassa E	1,52	1,07

Segundo Velosa (2006, p. 179), é desejável que a absorção de água por capilaridade nas argamassas não seja elevada, mas que haja uma rápida capacidade de secagem desta umidade.

As argamassas com metacaulim apresentaram valores de capilaridade semelhantes a argamassa de cal com traço 1:3 estudado por Velosa (2006), e valores muito inferiores aos das argamassas com metacaulim do mesmo estudo, o que demonstra coerência nos resultados obtidos pelos coeficientes de capilaridade das argamassas estudadas com argamassa de cal, e os coeficientes de capilaridade estão dentro dos requisitos de argamassas atribuídos por Veiga, exceto pela argamassa D que obteve valor superior. Desta forma, as argamassas estudadas

estão dentro dos parâmetros de capilaridade de outros estudos referentes às argamassas de intervenção em obras de restauro.

Figura 7.6 - Gráfico da capilaridade das argamassas aos 30 dias de idade

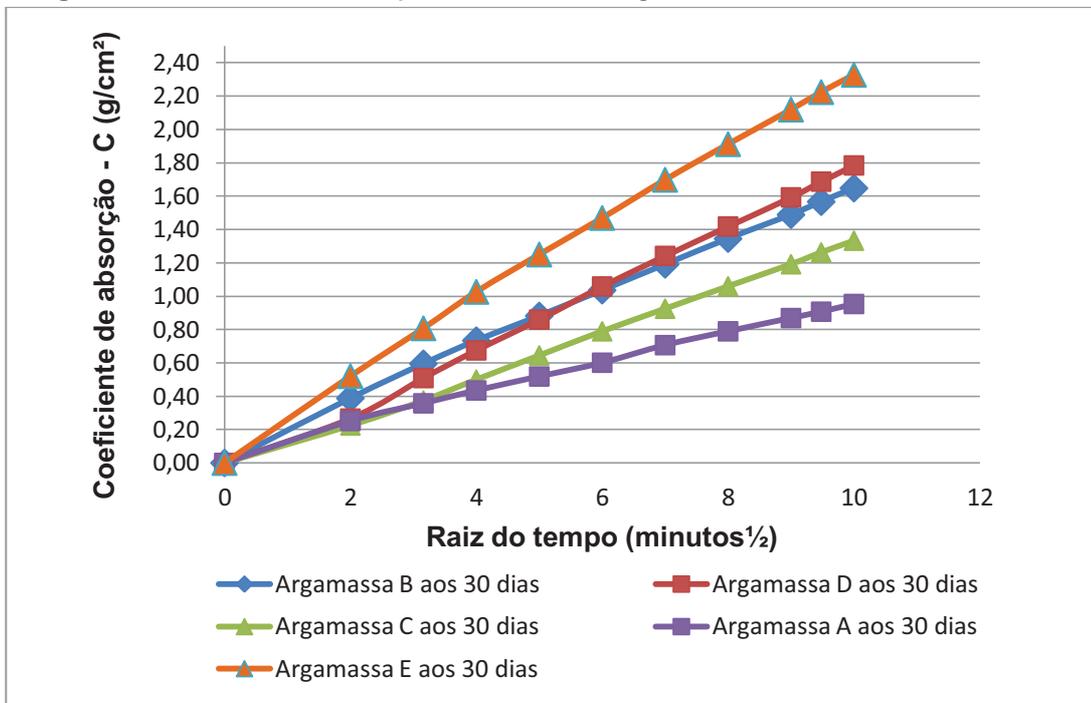
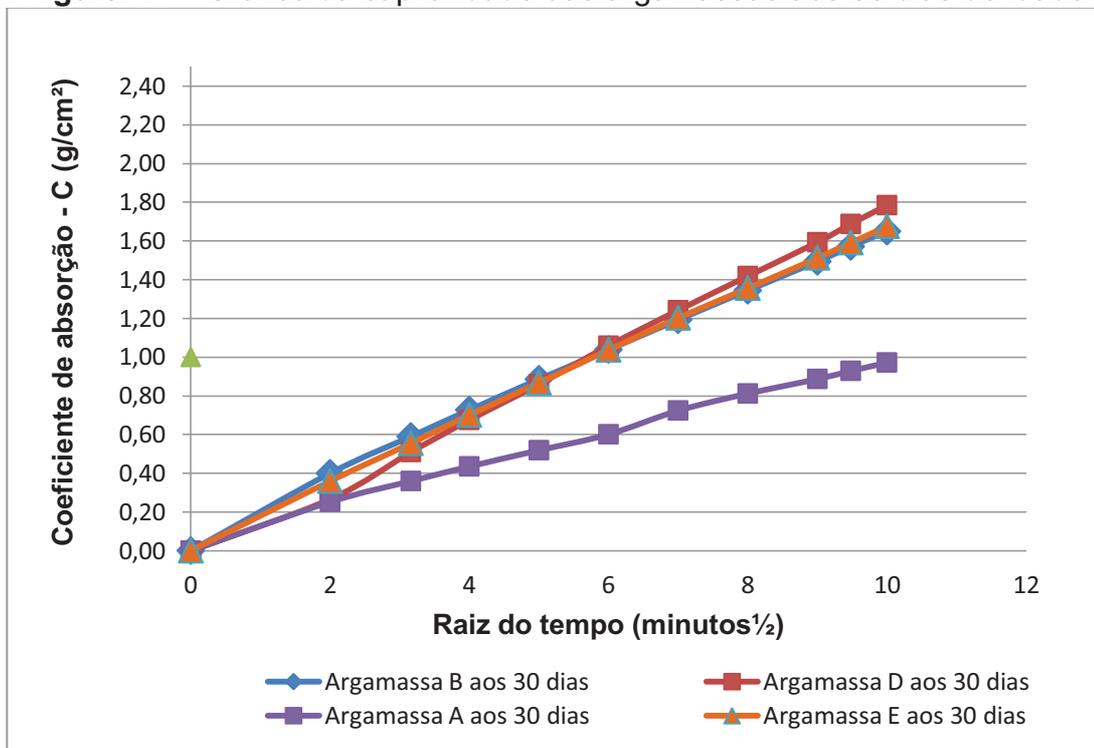


Figura 7.7 - Gráfico da capilaridade das argamassas aos 60 dias de idade.



O ensaio de absorção por imersão só foi possível sua execução tão somente nas argamassas contendo metacaulim, visto que, a argamassa com traço A por ter tão somente o aglomerante aéreo não resistiria ao período de imersão e iria se deteriorar.

Não foi possível a obtenção do índice de vazios, massa específica da amostra seca, massa específica da amostra saturada e massa específica real que o ensaio permite obter.

Nas argamassas com metacaulim, os valores encontrados em porcentagem na absorção por imersão são muito semelhantes, e não houve uma relação direta entre o teor de metacaulim e a relação A/MS, isto pode ser atribuído por não haver grande discrepância entre os teores de material pozolânico e de A/MS, exceto pela argamassa E, contudo o traço teve um valor de absorção muito semelhante ao da argamassa B, com teor de 5% de metacaulim e uma relação de A/MS de 0,182, enquanto que a argamassa E teve um teor de 20% de metacaulim e A/MS de 0,195.

A ausência dos outros resultados do ensaio não permitiu conclusões contundentes. Contudo, o ensaio demonstrou que TODAS as argamassas com metacaulim possuem propriedades hidráulicas, pois resistiram sem danos à ação prolongada de imersão em água por um período de 115 horas e à fervura sem apresentar perda de material e sem se desintegrarem.

Tabela 7.9 - Absorção por imersão das argamassas mistas com metacaulim aos 90 dias.

Absorção de água das argamassas mistas com metacaulim (%) (em porcentagem)	
Argamassa B	10,38
Argamassa C	11,05
Argamassa D	9,71
Argamassa E	10,82

8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho investigou as características mecânicas das argamassas mistas com cal hidratada maturada, adição de metacaulim e mistura binária de agregado miúdo com a proporção ligante e agregado mantida em volume constante 1:3. A cal hidratada CHII que passou por um processo de maturação e retirada da água não quimicamente combinada, e a adição de metacaulim foi em substituição da massa de cal em 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. As análises das características das argamassas foram nos estados anidro, fresco e endurecido com vistas a serem utilizadas nas argamassas de restauro. Segundo os dados adquiridos com os ensaios, pode-se apresentar as seguintes conclusões:

A maturação da cal hidratada CH II e a posterior retirada da água não quimicamente combinada na estufa na temperatura de 100 -105° C por 24 horas, e o apicoamento do material, originou a "cal em flocos" que é uma contribuição da pesquisa e um avanço, visto que o método não foi relatado em outras pesquisas.

O procedimento de maturação potencializou a retenção de água da cal, que minimiza o fissuramento em decorrência da perda de água de amassamento da argamassa com a cal para o substrato, segundo Melo *et al* (2007).

A maturação permitiu que os óxidos de cálcio e magnésio remanescentes fossem hidratados, o que diminuiu as possíveis cavidades e protuberâncias decorrentes da hidratação tardia dos óxidos de cálcio e de óxido magnésio. Segundo Sequeira *et al* (2007), Polisseni (2005, p. 53), Mehta e Monteiro (2008, p. 248), e Taylor (1997, p. 2), a hidratação tardia desses compostos gera o aumento volumétrico na cristalização, e desencadeia a instabilidade volumétrica nas argamassas.

O procedimento de retirada da água não quimicamente combinada após a maturação favoreceu os cálculos e a exatidão dos traços em massa do estudo, viabilizando o uso da "cal em flocos" em pesquisas futuras, contribuindo para a análise dos efeitos da maturação nas características das argamassas com cal hidratada nas intervenções em edificações históricas.

A retirada da água em excesso na maturação se torna inviável nas obras de restauro, mas pressupõe e ratifica que as cales utilizadas nestas obras sejam

maturadas e tenham adição do material pozolânico para potencializar sua durabilidade em relação à ação prolongada da água.

Nos ensaios no estado anidro das argamassas, observou-se que o percentual de metacaulim de até 15% sobre a massa de cal influenciou no empacotamento do sistema de acordo com os resultados da densidade de massa. Quanto maior for o teor de metacaulim nas argamassas, maior é o valor encontrado na densidade de massa, exceto pela argamassa E que teve valor um pouco inferior à argamassa D.

Não houve grande disparidade nas curvas granulométricas das argamassas a não ser pelo teor de material pulverulento, mas a substituição da cal por metacaulim propiciou uma melhor distribuição granulométrica nas argamassas D e E, com respectivos teores de metacaulim de 15 e 20%.

Os resultados demonstraram que quanto maior o teor de finos, maior a compactação do sistema no estado solto, e o teor de metacaulim contribuiu para melhorar a curva granulométrica das argamassas.

No estado fresco, quanto maior o teor de metacaulim nas argamassas maior foi a relação água/material seco para a mesma trabalhabilidade. O aumento no teor de finos necessitou de um maior quantitativo de água para a hidratação dos grãos.

Contudo, as argamassas com maior percentual de metacaulim tiveram um endurecimento e desmolde mais rápidos, em virtude das reações cimentantes ocorridas entre o hidróxido de cálcio e os compostos presentes na pozolana.

Uma das características das argamassas de cal que inviabilizam sua durabilidade é ser frágil a ação prolongada da água e a dificuldade de execução de aplicação no substrato em decorrência da secagem ser lenta, sendo necessário o uso de diversas camadas de revestimento para facilitar a carbonatação, como informa Veiga (2006). Nas argamassas com metacaulim a aplicação pode ser viabilizada mais rapidamente e obtendo um revestimento com características semelhantes às de cal, mas com uma durabilidade superior, fato importante para definição de traços de intervenções em argamassas históricas.

.As relações água/material seco não obtiveram grandes variações, sendo necessário o uso da terceira casa decimal para a sua determinação. A argamassa E

obteve a maior relação água/material seco que foi de 0,195, as demais argamassas tiveram relação água/material seco em torno de 0,18 variando a terceira casa decimal.

Em relação às densidades de massa no estado fresco, quanto maior o teor de pozolana maior a densidade das argamassas, entretanto a argamassa E com 20% de metacaulim teve o mesmo resultado da argamassa D com 15%. Nos estados anidro e fresco, as argamassas com metacaulim tiveram resultados que favorecem suas características mecânicas.

No estado endurecido, o ensaio de aferição da variação de massa constatou que quanto maior o teor de metacaulim, mais lento o ganho de massa, o que pode ser atribuído ao menor teor de cal. Em virtude da carbonatação e pelo menor quantitativo de água usada na mistura, as argamassas ricas em cal tiveram um ganho mais rápido de massa, e após 20° dia começaram a ganhar massa. A argamassa E, com 20% de metacaulim, continuou a perder massa em virtude da sua elevada relação água/material seco e menor teor de cal que as demais argamassas.

Em relação à resistência mecânica à compressão, as argamassas com a pozolana tiveram um comportamento semelhante aos 28 e aos 60 dias com a seguinte ordem crescente das resistências $C < D < B < E$.

A argamassa de cal estudada como parâmetro obteve uma maior resistência mecânica à compressão que as demais argamassas com pozolana, pois a argamassa de cal proporciona uma maior capacidade de absorção dos impactos, segundo Melo *et al* (2007). Entretanto, as argamassas de cal têm menor durabilidade que as com material pozolânico, visto que, as argamassas com cal possuem menor resistência à ação prolongada à água por serem constituídas de aglomerante aéreo.

As argamassas originais de cal possuem uma fragilidade maior que a argamassa de cal que foi estudada, em decorrência das ações climáticas e do envelhecimento e desgaste do tempo. Desta forma, é possível encontrar argamassas originais com características mecânicas de resistência à compressão bem inferior aos resultados obtidos na argamassa de cal utilizada neste estudo como parâmetro.

Os resultados da resistência à tração na flexão aos 28 dias na argamassa E teve o maior valor, entretanto aos 60 dias os valores se equipararam. A argamassa A, só com cal maturada, teve o maior resultado aos 60 dias.

As características mecânicas das argamassas com metacaulim foram compatíveis com as do estudo de Veiga (2003c) referentes ao material, e não são compatíveis com as de cimento que agredem tanto os substratos como as argamassas originais, segundo Magalhães (2011).

As argamassas mistas com pozolanas, segundo Velosa (2006) e Veiga (2006), apresentam aspecto e textura semelhante às argamassas originais em obras históricas, e possuem a capacidade de resistir às intempéries e à ação prolongada da água. por serem argamassas hidráulicas sem o módulo de elasticidade alto e livres dos sais solúveis.

A adição de metacaulim nas argamassas de cal favoreceu-as nas propriedades de durabilidade, relacionadas à ação prolongada da água, obtendo resistências mecânicas semelhantes às encontradas em obras históricas.

As argamassas estudadas possuem maior resistência à ação prolongada da água em virtude de serem hidráulicas, o que foi constatado no ensaio de absorção de água. Os resultados deste ensaio não tiveram grandes variações, entretanto, confirmaram as propriedades hidráulicas de todas as argamassas com metacaulim, pois resistiram sem danos à ação prolongada da água.

O ensaio de capilaridade mostrou que houve o aumento do coeficiente de capilaridade à medida que o percentual de pozolana é elevado nas argamassas. Tal fato pode ser explicado pela perda de água de amassamento, constatado no ensaio de variação de massa, e que a saída da água indica porosidade e as argamassas mistas tiveram uma maior perda de massa, contribuindo para um maior coeficiente de capilaridade e diminuição das resistências mecânicas. Esse comportamento não foi seguido pela argamassa B que teve uma resistência à compressão superior as argamassas D e C, entretanto possui menor teor de metacaulim que as mesmas.

A partir dos resultados encontrados na literatura, nos estudos de Velosa (2006) e Veiga (2003c), há a viabilização dos traços desta pesquisa em obras de restauro a partir de ensaios de caracterização e de compatibilidade das argamassas

estudadas com as originais. A abordagem das características mecânicas e físicas das argamassas mistas com metacaulim mostrou que há a possibilidade da utilização destas argamassas em obras de restauro em revestimentos históricos.

Estas argamassas poderão fazer parte de um estudo mais abrangente no tocante às famílias de revestimentos que facilitarão a conservação de monumentos históricos mediante a uma caracterização de argamassas originais e a busca de traços compatíveis com estas, contribuindo para a preservação do Patrimônio Histórico.

Contudo é válido ressaltar que há uma necessidade de aprofundamento do trabalho, com uma análise na microscopia e na evolução dos compostos hidratados nas argamassas e como estes compostos agem nas características químicas e físicas das argamassas estudadas.

Há a necessidade de uma abordagem em trabalhos futuros sobre o envelhecimento acelerado destas argamassas. É necessário também que haja estudos de aplicação das argamassas estudadas em substratos históricos para visualização tanto do processo de envelhecimento das argamassas como da compatibilização destas com as necessidades de movimentação das estruturas com substrato poroso como são estruturadas as edificações históricas.

O estudo comprovou que as argamassas de cal hidratada maturada com metacaulim são uma possibilidade para as intervenções em obras históricas visto que possuem características mecânicas semelhantes às utilizadas para este fim, entretanto se faz necessário estudo mais aprofundado a respeito do material.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGELAKOPOULOU, Eleni; BAKOLAS, Asterios; MOROPOULOU, Antonia. Properties of lime-metakolin mortars for the restoration of historic masonries. ***Applied Clay Science***, 2011, p. 15-19.

ALMEIDA, Frederico Faria Neves. ***Manual de Conservação de cantarias: manual***. Brasília: IPHAN, 2005.

ALMEIDA, N. G.; RODRIGUES, P. F.; PINTO, A. P.. Argamassas com base em cal aérea e cinza de casca de arroz para conservação do Patrimônio Construído. **2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção**. Lisboa: APFAC, 2007.

ALVAREZ, J. A. Cal hidráulica: Seu passado e futuro. ***In: Workshop in Lime Mortars: Past and Future***. Aveiro, [s.d].

ARAÚJO, Roberto A. Dantas de. ***O Ofício da Construção na Cidade Colonial: organização, materiais e técnicas (o caso pernambucano)***. vol. I e II. São Paulo: Tese de Doutorado em Arquitetura – Universidade de São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***NBR NM 45 - Agregado: Determinação de massa unitária e volume de vazios***. Rio de Janeiro, 2006.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***NBR 05733 - Cimento Portland de alta resistência inicial***. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***NBR 5751 - Materiais Pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica - índice de atividade pozolânica com cal***. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***NBR 6473 - Cal virgem e cal hidratada para argamassas - 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 7200 - Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimentos***, Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***NBR 7211 - Agregados para concreto - Especificação***, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***NBR 7215 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão***. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***NBR 7682 - Calda de cimento para injeção - Determinação do índice de fluidez***, Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***NBR 9205 - Cal hidratada para argamassas - Determinação da estabilidade***, Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***NBR 9206 - Cal hidratada para argamassas - Determinação da plasticidade***, Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9207 - Cal hidratada para argamassas - Determinação da capacidade de incorporação de areia no plastômetro de Voss**, Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9289 - Cal hidratada para argamassas - Determinação da finura**, Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9290 - Cal hidratada para argamassas - Determinação de retenção de água**, Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778 - Argamassa e Concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520 - Informação e documentação - Citações em Documentos - Apresentação**, Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142 - Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos**, Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653 - Cimento Portland - Materiais Pozolânicos**, Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276 - Argamassa para assentamento de paredes e tetos - Preparação da mistura e determinação do índice de consistência padrão**. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278 - Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**, Rio de Janeiro, 1995.

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.

AZEVEDO FORTES, Manoel de. **O engenheiro português**. Lisboa: Of. Manoel Fernandes da Costa, 1728 - 1729 - 2 vol. Disponível em: <http://purl.pt/14547/2/sa-3906-p/sa-3906-p_item2/sa-3906-p_PDF/sa-3906-p_PDF_24-C-R0150/sa-3906_0000_capa-capa_t24-C-R0150.pdf> Acessado em: 11.01.2013.

BALKSTEN, Kristin. Understanding Historic Mortars and their Variations - a Condition for Performing Restorations with Traditional Materials. **In: 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop**. Praga: 2010.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 3^o Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1988.

BEALL, C. **Masonry design and detailing for architects, engineers, and builders**. New York: Mc Graw-hill Book Company, 1987, p. 26, 91-3.

BEZERRA, A. J. V.; SOUZA, M. L. **Estudo comparativo de traços de argamassas com uso de cal e com substituição de 50% de metacaulim**. Recife: Trabalho desenvolvido na disciplina de Tecnologia das argamassas.

BEZERRA, A. J. V.; OLIVEIRA, J. R.; CARNEIRO, A. M. P.. Estudo do concreto com a substituição do cimento por diferentes porcentagens de metacaulim: a influência no teor de ar incorporado e na resistência mecânica à compressão. **52º Congresso Brasileiro de Concreto**. Fortaleza, 2010.

BONILLA, Tamara M. de A.; FERREIRA, Ana Florinda; NÓBREGA, Aline F.; SILVA, Elaine C. R.; SOUZA, Marília L. de; CARNEIRO, Arnaldo M.P. Lime-metakaolin mortars applied on the Soledade Palace, Recife, Brazil. In: J. Válek, C.; Groot, J.J. Hughes. **Historic Mortars and Rilem TC-203-RHM Final Workshop HMC2010**. Proceedings of the 2nd Conference and of the Final Workshop of RILEM TC 203-RHM, Prague, Czech Republic, 22-24 Sept., 2010. Rilem Pro 78, p.917-926. Bagnaux, France: RILEM Publications s.a.r.l., 2010.

BOFFEY, Geoff; HIRST, Elizabeth. The use of pozzolans in lime mortars. **Journal of Architectural Conservation**, Vol. 5, nº3, 1999, p 34-42.

BONILLA, Tamara M. A. ; CARNEIRO, Arnaldo. M. P. . Study of mortars for repair by anastylosis of ruins of Our Lady of Nazareth Church (Almagre ruins), Cabedelo, Paraíba, Brasil. In: **5th International Conference Structural Analysis of Historical Constructions**, 2007, New Delhi, India. Structural Analysis of Historical Constructions. Possibilities of numerical and experimental techniques. New Delhi: Macmillan India Ltd., 2007. v. 2. p. 739-746.

CAMPOS et al. A utilização da cal conchífera em monumentos históricos no Espírito Santo. **2º Congresso Português de argamassa e ETICS**. Lisboa, 2007.

CANEIRO, Arnaldo Manoel Pereira. **Contribuição ao estudo da influência da distribuição granulométrica do agregado nas propriedades de argamassas dosadas por curva granulométrica**. São Paulo: Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade Federal de São Paulo, 1999.

CARNEIRO, Arnaldo M. P.; CINCOTTO, Maria A.. Dosagem de argamassa através de curvas granulométricas. **Boletim Técnico de Escola Politécnica da USP**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/237, 1999.

CARNEIRO, Arnaldo M. P.; CINCOTTO, Maria A.; JOHN, Vanderley M.. A massa unitária como parâmetro de análise das características de argamassas. **Ambiente Construído**, São Paulo: v,1, n. 2, p. 37-44, 1997.

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

CARVALHO, Ayrton. Algumas notas sobre o uso da pedra na arquitetura religiosa no Nordeste. In: **Revista do Serviço do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional**. Rio de Janeiro: Ministério da Saúde e Educação, 1942. p. 277 – 294.

CASTRO, Alessandra L. de; LIBORIO, Jefferson B. L.. Considerações sobre o processo de produção de concreto de alto desempenho para estruturas pré-moldadas. **1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-moldado**. São Paulo, 2005.

CHAROLA, A. E.; HENRIQUES, F. M. A. Hydraulicity in lime mortars revisited, **PRO 12, Historic Mortars: Characteristics and Tests**. Proceedings of the Internacional RILEM Workshop., RILEM Publications S. A. R. L., Cachan Cedex, França, 1999, p. 95-104.

CHEN, J.; THOMAS, J.; TAYLOR, H. F. W.; JENNINGS, Hamlin M. Solubility and structure of calcium silicate hydrate. **Cement and Concrete Research**, nº 34, 2004, p. 1499-1519.

CHIAVERINI, J.. Metakaolin-lime mortars: a replica of Genoese 'porcellana' as mortar for restoration. **In: Proceedings of the 2nd Swiss geoscience meeting**, Lausanne, 2004.

COELHO, A. Z.; JALALI, S.; TORGAL, F. P. Desempenho comparado entre as argamassas comerciais para a reabilitação e argamassas de cal aérea e metacaulino. **3º Congresso Português de argamassa**. Lisboa, 2010.

COSTA, Pereira da. **Anais Pernambucanos**: 1701 -1739. Recife: Arquivo Público Estadual, 1953. vol. V. p. 437 – 445.

_____. _____.: 1824 - 1833. Recife: Arquivo Público Estadual, 1965. vol. IX, p. 351 - 354.

COUTINHO, A. S.. **Pozolanas, betões com pozolanas e cimentos pozolânicos**. Lisboa: LNEC, 1958.

COUTINHO, Joana Sousa. **Texto de apoio a disciplina de Ciência dos Materiais: Ligantes e Agregados**. Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia - FEUP, Versão 2002. Disponível em: <http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano1/CienciaDosMaterias/apontamentos/teorica_2002_003/JSC_CM_Total.pdf> Acessado em: 08.08.2012.

DASGUPTA, A.. **Indian J. Techonol.**, vol. 13, 1975, p. 355.

DOMONE, P.L. J. Concrete. **In: Construction Materials: Their Nature and Behaviour**. Edited by J. M. ILLSTON AND P. L. J. DOMONE. Theird Edition. New York: Spon Press, 2001, p. 119, 143-160.

EADES, J. L.; NICOLS, F. P.; GRIM, R. E.. Formation of new minerals with lime stabilization as proven by field experiments in Virginia. Highway Reasearch Board Bulletin. Nº 335, Washington, D. C. : National Academy of Sciences/ National Research Council, 1962.

ESTEFANO, Márcio. **Notas de aula**. São Paulo: Universidade Estadual Paulista, Disciplina de Materiais e Construção Civil, 4º parte, 2004. Disponível em: <<http://www.feg.unesp.br/~caec/downloads/3/materiap2.pdf>>. Acessado em: novembro de 2012.

FREITAS, V. P.; GONÇALVES, P. F.. Specification and time required for the application of a lime-based render inside historic buildings. **International Conference HMC 08 - Hystorical Mortars Conference: Characterization, Diagnosis, Repair and Compatibility**. Lisboa: LNEC, 2008.

FREYRE. Gilberto. **Um Engenheiro Francês no Brasil**. Rio de Janeiro: José Olympio, 1960.

FRIAS, M.; CABRERA, J.. Influence of MK on reaction kinetics in MK/lime and MK-blended cement systems at 20°C. **Cement and Concrete Research**. n° 31, 2001, p. 519-527.

GLENN, G. R.; HANDY, R. L.. **Res. Board**, Bull., 29, 1963, p. 70.

GONÇALVES, Teresa. **Pesquisa de mercado sobre revestimentos para paredes sujeitas a ação de sais solúveis**. 3° Ed. LNEC, Cadernos de Edifícios, n° 2, 2011, p. 175 - 190.

GUALTIERI, A. F.; VIANI, A.; MONTANARI, C.; Quantitative phase analysis of hydraulic limes using the Rietveld method. **Cement and Concrete Research**. Vol. 36, February 2006. p. 401-406.

GUERRA, Flávio. **Velhas igrejas e subúrbios históricos**. Recife: Itinerário, 1978.

GUERREIRO, Carlos; HENRIQUES, Fernando M. A.; PINTO, Ana Paula. Análise comparativa de argamassa de cal aérea, medianamente hidráulicas e de ligantes mistos para rebocos de edifícios antigos. **2° Congresso Português de argamassa e ETICS**. Lisboa, 2007.

GIBBONS, Pat. **Pozzolans for lime mortars**. www.BuildingConservation.com. Reino Unido, 2003. Disponível em: <<http://www.buildingconservation.com/articles/pozzo/li-me-pozzolans.htm>>. Acessado em: agosto de 2012.

GUIMARÃES, José Epitácio Passos. **A Cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. São Paulo: Pini, 2° Edição, 2002.

HE, C.; OSBAECK, B.; MAKOVICKY, E.. Pozzolanic Reaction of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects. **Cement and Concrete Research**, vol. 25, Is. 8, Dec. 1995, p. 1691-1702.

HENRIQUES, Fernando M. A.. **Humidade em paredes**. 4°Ed. Lisboa: LNEC, 2007.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL. **Cartas Patrimoniais**. 3ª Ed. revisada e aumentada. Rio de Janeiro: IPHAN, 2004.

_____. **Coletânea de Leis sobre Preservação do Patrimônio**. 3ª Ed. revisada e aumentada. Rio de Janeiro: IPHAN, 2006.

JAMLOV, J. **Mag. Concr. Res.**, vol. 15, 1963, p. 132.

JOHN, Vanderley Moacyr; NITA, Cloves. Materiais Pozolânicos: O metacaulim e a sílica ativa. **Boletim técnico da Escola Politécnica da USP**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/451, 2007.

KANAN, Maria Isabel. **Manual de conservação e intervenção em argamassas e revestimento à base de cal**. Brasília: Iphan/ Programa Monumenta, Cadernos Técnicos, n 8, 2008.

KHATIB, J. M.; WILD, S. Pore size distribution of metakaolin paste. **Cement and Concrete Research**, v.26, p.1545-1553, 1996.

LACERDA, C.S.; HELENE, P. R. L.. Estudo da influência da substituição de cimento Portland por metacaulim em concretos. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**. São Paulo, 2005.

- LEA, F. M.. The chemistry of pozzolanas. ***Symposium on the chemistry of Cements***, 1938.
- LEA, F. M.. The chemistry of cements and concrete. ***Edward Arnold Publishers***. Glasgow, 1970.
- LEA, F. M. ***The Chemistry of Cement and Concrete***. Third Edition. Chemical Publishing Company Inc., 1971.
- MAGALHÃES, A. Cristian. Patologias de rebocos antigos. 3º Ed. LNEC, ***Cadernos de Edifícios***, nº 2, 2011, p. 69 - 85.
- MAGALHÃES, A. C.; VEIGA, M. do R.; VELOSA, A. L.. Caracterização e avaliação do desempenho de possíveis argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. ***2º Congresso Português de argamassa e ETICS***. Lisboa, 2007.
- MASSAZZA, F.. Pozzolanic Cements. ***Cement & Concrete Composites***, v. 15, p.185-214, 1993.
- MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. ***Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais***. São Paulo: Editora IBRACON, 2008.
- MELLO, José Antônio Gonçalves de. ***Tempo dos Flamengos***. 2º Edição. Volume VX. Coleção Pernambucana. Recife: Governo do Estado de Pernambuco – Secretária de Educação e Cultura, 1978, p. 77.
- MELO, Antônio Acacio de. ***Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada***. São Paulo: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.
- MELO, Karoline A.; ANDRADE, Anderson F. L.; LIRA, Eguinaldo M.; FRANÇA, Marylinda S.; QUEIROZ, Maílson M.; CARNEIRO, Arnaldo M. P.. A influência do teor de cal hidratada nas propriedades de argamassas de cimento, cal e areia. ***2º Congresso Português de argamassa e ETICS***. Lisboa, 2007.
- MENEZES, José Luiz Mota. Algumas Notas sobre a Arquitetura Brasileira. ***In: Revista Arquivos. Nº 1. PMR/SEC***. Recife, 1976. p. 129 - 164.
- MORAIS, Hugo Miguel Pinela de Lacerda. ***Análise experimental de um murete de alvenaria de pedra tradicional***. Lisboa: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2011.
- MARQUES et al. Study of rehabilitation mortars: Construction of knowledge correlation matrix. ***Cement and Concrete Research***. Vol. 36, 2006, p. 1894-1902.
- MARAVELAKI-KALAITZAKIA et al. Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. ***Cement and Concrete Research***. Vol. 35, 2005, p. 1577-1586.
- MELO, Ulysses Pernambucano de. O Cabo de Santo Agostinho e a Baía de Suape. ***In: Revista do Inst. Arq. Hist. e Geo. Pernambucano***. Recife: 1981. Vol. 53.
- MLEZA, Y.; HAJJAJI, M.. Microstructural characterisation and physical properties of cured thermally activated clay-lime blends. ***Construction and Building Materials***. Vol. 26, janeiro de 2012, p. 226-232.

MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A.; AGGELAKOPOULOU, E.. Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis. ***Thermochimica Acta***, n° 420, 2004, p. 135-140.

MOTA, J. M. F.; OLIVEIRA, R.A.; SILVA, A.C.; FEITOSA, A.G.; SANTOS, W. W.; SIMÃO, D.W.G.. Influência da adição de metacaulim nas propriedades de argamassas inorgânicas. ***VI Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas***. Córdoba, 2010.

MOTHÉ, Leonardo Paes. ***Avaliação das condições ideais para a produção de metacaulinita através da análise da sua atividade pozolânica***. Campos dos Goytacazes: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2004.

MURAT, M. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. I. Preliminary investigation on metakaolinite. ***Cement and Concrete Research***, v.13, p. 259-266, 1983.

NASCIMENTO, Edson Silva do; SILVA, Marcela Gomes da. ***Técnicas de Análise Térmica Diferencial***. UFRN. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAA9XUAF/dta>>. Acessado em: 06.02.2013.

NETO, Antônio Acacio de Melo. ***Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada***. São Paulo: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo, 2002, cap. 3,

NETTO, Rafael Mantuano. ***Materiais pozolânicos***. Belo Horizonte: Monografia de conclusão do curso de especialização em Construção Civil – Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

NITA, Clovis. ***Utilização de pozolanas em compósitos de cimento reforçados com fibras de celulose e PVA***. São Paulo: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

NÓBREGA et al. Estudos das propriedades da argamassa de cal e pozolana; Influência do tipo de Metacaulim. ***3º Congresso Português de argamassa de construção***. Lisboa, 2010.

OLIVEIRA, Claudia T. de A. ***Água do poro de pastas de cimento de escória***. São Paulo: Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

PAIVA, Sérgio Carvalho; GOMES, Eduardo Alves de Oliveira; OLIVEIRA, Romilde Almeida de. Controle de qualidade da cal para argamassas: Metodologias alternativas. ***Revista Ciência & Tecnologia***. Recife: 2007, Ano 1, n° 1. Disponível em: < http://www.unicap.br/revistas/revista_e/artigo8.pdf>. Acessado em: novembro de 2012.

PALLADIO, Andrea. ***I Quattro libri dell'Architettura***. Veneza, Dominico de'Franceschi,1570, L. I, Cap. V, p. 8. Disponível em: <<http://lcweb2.loc.gov/service/rbc/rbc0001/2008/2008rosen0873/2008rosen0873.pdf>>. >Acessado em: 11.01.2013.

PARANDE, A. K.; BABU, B. R.; KARTHIK, M. A.; KUMAA R. D.. Study on strength and corrosion performance for steel embedded in metakaolin blended concrete/mortar. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 127-134, 2008.

POLISSENI, Antônio Eduardo. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício**. Porto Alegre: Tese de Doutorado em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005, p. 53.

POLLIO, Marcus Vitruvius. **Tratado de Arquitetura: Vitruvius**. Tradução, introdução e notas de M. Justino Maciel. São Paulo: Martins, 2007.

POSSER, Natália Dilda. **Proporcionamento de argamassas de reboco de recuperação**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004, cap. 2.

QUARCIONE, Valdecir Angelo. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento portland - Estudo da pasta**. São Paulo: Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

RAGO, Fabiola; CINCOTTO, Maria A.. Influência do tipo de cal hidratada na reologia das pastas. **Boletim técnico da Escola Politécnica da USP**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/233, 1999.

RIBEIRO, L. C.; LOPES, R. P.N.. As argamassas na antiguidade Greco-Romana: usos, definições e traduções. **2º Congresso Português de argamassa de construção**. Lisboa, 2007.

ROCHA, Guilherme Gallo Neves. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade**. Minas Gerais: Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas – Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

RODRIGUES, Francisco de Assis. **Diccionario tecnico e historico de pintura, esculptura, architectura e gravura**, Lisboa: Imprensa Nacional, 1875, p. 56.

ROJAS, M. F.; CABRERA, J. The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin - lime-water systems. **Cement and Concrete Resear**d, n° 32, 2002, p. 133-138.

ROQUE, João C. Almendra; LOURENÇO, Paulo B.. **Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria**. Disponível em: < http://www.civil.uminho.pt/masonry/Publications/Update_Webpage/2004_Roque_Lourenco1.pdf >. Acessado em: 14.04.2013.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 23, 2001, p. 441- 454.

SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Luiz Matos de. Calcário e Dolomito. In: LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando A. Freitas (editores). **Rochas e Minerais Industriais: Usos e especificações**. 2º Edição. - Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008, p. 363-391.

SANTIAGO, Cybele Celestino. **Argamassas tradicionais de cal**. Salvador: EDUFBA, 2007.

SANTOS, P. S. **Tecnologia de argilas aplicadas às argilas brasileiras**. Primeira Edição, vol. 1. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1975.

SCHACKOW, Adilson. **Propriedades de concretos contendo rejeitos particulados de tijolos de cerâmica vermelho**. Joinville: Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais – Universidade do Estado de Santa Catarina, 2011.

SEGURADO, João Emílio dos Santos. **Biblioteca de Instrução Profissional: Materiais de Construção**. 5º Ed. atualizada. Lisboa: Livraria Bertrand. s/d.

SELMO, Sílvia. **Dosagem de argamassas de cimento Portland e cal para revestimento externo da fachada de edifícios**. São Paulo: Dissertação de Mestrado em Engenharia de Construção Civil – Escola Politécnica de USP, 1989.

SERRY, M.A.; TAHA, A. S.; EL-HEMALY S. A. S.; EL-DIDAMONY, H. Metakaolin-lime hydration products. **Thermochimica Acta**, v. 79, p. 103-110, 1984.

SEQUEIRA, Ana Cristina; FRADE, Dina; GONÇALVES, Paulo. Cal hidráulica - Um ligante para a reabilitação. **2º Congresso Português de argamassa de construção**. Lisboa, 2007.

SHI, C.; DAY, R. L.. Pozzolanic reaction in the presence of chemical activation, Part. I, Reaction kinetics. **Cement and Concrete Research**, 30, 2000, p. 91-98.

SHVARZMAN et al, The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite. **Cement and Concrete Research**, vol. 33, 2003, p. 405-416.

SIDDIQUE, R.; KLAUS, J.. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A Review. **Applied Clay Science** 43, p 392-400, 2009.

SILVA, Hilton Barbosa. **Notas de aula de Materiais de Construção**. São Paulo: UNIP - Universidade Paulista.

SILVA, Narciso Gonçalves. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Curitiba: Dissertação de mestrado em Construção Civil – Universidade Federal do Paraná, 2006.

SMITH, Robert C.. **Igrejas, Casas e Móveis: Aspectos de Arte Colonial Brasileira**. Trad. Benício Whatley Dias. Recife: UFPE/IPHAN, 1979. 266 p.

SOUZA, Juliana Santa Cruz. **As Inovações Tecnológicas de Construção do Século XIX: Sincretismo Construtivo da Basílica de Nossa Senhora da Penha**. Recife: Trabalho de conclusão do curso de Arquitetura e Urbanismo, UFPE, 2010.

SOUZA, Juliana Santa Cruz; SILVA, C. F. C.; CARNEIRO, A. M. P.. Comparação das propriedades de argamassas com metacaulim para restauração de Obras históricas. **In: 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS**. Coimbra: 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, 2012.

SOUZA, P. S. L.; DAL MOLIN, D. C. C.. Estudo da viabilidade do uso de argilas calcinadas, como metacaulim de alta reatividade (MCAR). Guimarães: **Engenharia Civil**. n. 15, p. 45-54, Set. 2002.

SOUZA, P. S. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Comportamento da relação da resistência à compressão com a resistência à tração e com o módulo de elasticidade em concreto com metacaulim de alta reatividade, proveniente de rejeito industrial. In: **Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto**. Rio de Janeiro: IBRACON, 2006.

STÄTLING; MALQUORI; CIRILI. Pozzolana e cementi pozzolanici. **L'industria Italiani del Cemento**, 1948.

STRAETLING, W. Reaction Between Canceled Kaolin and Lime in Aqueous Solutions. **Zement-Verlag**. Berlim: 1938.

TAYLOR, H. F. W.. **The chemistry of cements**. Thomas Telford, 1997.

TEUTONICO, J. M.; MCCRAING, I.; BURNS, C.; ASHURST, J.. The Smeaton Project: Factors affecting the properties of lime-based mortars. **Bulletin of the Association for Preservation Technology (APT)**. Albany, N. Y.: 25, n 3-4, september, 1994.

TORGAL, F. P.; GOMES, J.P.C.; JALALI, S.. Argamassas antigas: reação pozolânica ou actividade alcalina? **2º Congresso Português de argamassa de construção**. Lisboa, 2007.

TRISTÃO, Fernando Avancine. **Influência na composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **Material da disciplina de Geologia de Engenharia III: Argilominerais**. Disponível em: <http://www.lapes.ufrgs.br/discipl_grad/geologia3/argilas.pdf> . Acessado em: 25 de março de 2013.

USBERCO, João; SALVADOR, Edgard. **Química geral**. 5º Ed. São Paulo: Saraiva, 1997.

VASCONCELLOS, Sylvio de. **Arquitetura no Brasil: Sistemas construtivos**. 4º Edição revista. Belo Horizonte: editora da UFMG, 1971.

VEIGA, M. Rosário. Comportamento de argamassas de revestimento de paredes. Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação. Lisboa: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1997.

VEIGA, M. Rosário. As Argamassas na conservação. In: **Actas das 1ªs Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro**. Aveiro: 2003a.

VEIGA, M. Rosário; AGUIAR, José. Definição de estratégias de intervenção em revestimentos de edifícios antigos. **1º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios**. Porto: 2003b.

VEIGA, Maria do Rosário. As argamassas de revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes. **Actas de 3º ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios**. Lisboa: LNEC, maio de 2003c.

VEIGA, M. Rosário. Comportamento de rebocos para edifícios antigos: Exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos. In: **Seminário "Sais solúveis em argamassas de edifícios antigos"**. Lisboa: LNEC, 14-15 de fevereiro de 2005.

VEIGA, Maria do Rosário. Intervenções em revestimentos antigos: conservar, substituir ou ... destruir. **2º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios**. Porto: FEUP, 2006.

VEIGA, M. R.; VELOSA, A.; MAGALHÃES, A. Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Characterization and performance evaluation. **Construction and Building Materials**. Vol. 23, January 2009, p. 318-327.

VELOSA, Ana L. P. Lomelino. **Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas**. Aveiro: Tese de Doutorado em Engenharia Civil - Universidade de Aveiro, 2006.

VELOSA, Ana Luisa. Influence of pozzolanic additions to lime mortars for building conservation purposes. 3º Ed. LNEC, **Cadernos de Edifícios**, nº 2, 2011, p. 103-115.

VELOSA, A. L.; VEIGA, M. R.; ROCHA, F. Utilização de metacaulim em argamassas para a conservação de edifícios. **VIII SBTA Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**. Curitiba, 19-22 de maio de 2009.

VELOSA, A. L.; ROCHA, F.; VEIGA, M. R.. Influence of chemical and mineralogical composition of metakaolin on mortars characteristics. **Acta Geodyn**. Geomater, 6, 121-126.

WALL, J.W.; DE WET, J. D.. **J. Am. Ceram. Soc.**, 55, 1972, p. 432.

ZATTA, Leandro. **Caulinita e haloisita "in-natura" e ativadas com ácido minerais como catalizadores heterogêneos para esterificação (m)etílica de ácidos graxos**. Curitiba: Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais - Universidade Federal do Paraná, 2010.

Apêndices

Tabelas dos resultados dos ensaios

APÊNDICE A - RESUMO DAS COMPOSIÇÕES DAS ARGAMASSAS ANTIGAS

Tratadista ou autor	Época e país em que viveu ou nacionalidade	Composição da argamassa	Traço	Observações
Vitrúvio ⁽¹⁾	Roma	Cal e areia de jazida	1 : 3	
		Cal e areia de rio ou mar	1 : 2	
Palladio ⁽²⁾	Obra de 1570 e Italiano	Cal e areia de jazida	1 : 3	
		Cal e areia de rio ou mar	1 : 2	
Plínio ⁽³⁾		Cal e areia de jazida	1 : 4	
		Cal e areia de rio ou mar	1 : 3	
Marco Terencio Varrão ⁽⁴⁾	Viveu de 116-27 a.c e Romano	Mármore pulverizado mais argila misturada com palha de trigo e bagaço de azeitonas prensadas.		Para uso em argamassa hidrófugas para parede e piso.
Tratadista Martini ⁽⁵⁾	Obra de 1482 – Italiano de Siena	Cal viva, cinzas de azinheiro, óleo azinheiro	1 : 0,5 e óleo em quantidade suficiente para empastar	Utilizada como argamassa hidrófuga, como por exemplo na junção de telhas.
		Cal viva, cinzas de azinheiro, vetriolo romano (ou sulfato de cobre) e óleo	1 (cal viva) : 0,5 (cinzas de azinheiro) : 0,25 (sulfato de cobre) + óleo em quantidade suficiente para empastar	
Mathias Ayres Ramos da Sylva de Eça ⁽⁶⁾	(1705-1763) Escritor português, nascido em São Paulo.	Areia e cal		Recriminava o uso de qualquer material diferente da areia e da cal nas argamassas

Apêndice A - Resumo das composições das argamassas antigas

Christino Rieger ⁽⁷⁾	Obra de 1763 Jesuíta austríaco	Coalhada de leite e cal viva (óxido de cálcio)		Betume para unir pedra com pedra, pedra com madeira, madeira com madeira.
		Pó de tijolo e cal		Para unir pedras de uma alvenaria irregular expostas ao ar ou à água.
Antoine de Ville ⁽⁸⁾	Obra de 1629 e Francês	Água como ligante		Caso específico, no uso de muralhas na Charra, cidade da Arábia, onde as pedras eram de sal.
J. da P. C. das Neves ⁽⁹⁾	Viveu no final do século XIX e português	Areia, cal, borra de ferro, pó de tijolo, massapez (pozolana), cinca de carvão		
Carlos Augusto Pinto Ferreira ⁽¹⁰⁾	Viveu no início do século XX e português	Pó de pedra, cal virgem	1 (pó de pedra) : 1 (cal virgem)	Utilizado para betume em cantaria
		Pó de pedra, cal virgem e azeite	1,725 litros (pó de pedra) : 1,725 litros (cal virgem) : 1,5 litros (azeite)	Utilizado para betume em cantaria
		Cal virgem e clara de ovo	Cal viva pulverizada amassada com clara de ovo.	Para betume de pedra e para mármore
Plínio (O Antigo) ⁽¹¹⁾	Nasceu em 23 d.c e faleceu em 79 d.c – Roma	Cal e pó de mármore	1,5 (cal) : 1 (pó de mármore)	Argamassa para revestimento
Cataneo ⁽¹²⁾	(Siena, 1510 - 1574) – Teórico Italiano	Cal feita com pó de mármore e pó de mármore	2/3 (cal feita com pó de mármore) : 1/3 (pó de mármore finamente moído)	Argamassa para revestimento - estuque

Bernard Forest de Belidor ⁽¹³⁾	Viveu de 1698 - 1761 – Catalão	Areia + cal ou cal + pó de material cerâmico		Material usado para unir pedras.
Gioseffe Viola Zanini ⁽¹⁴⁾	Viveu de 1599 - 1631 – Pintor e arquiteto Italiano.	Cal e pó de vidro		Para revestimento
		Cal e pó de mármore		Obturação no revestimento de marmorino
		Cal e pó de telha ou pedra de Istria moída		Usado para revestimento. Istria foi calcário muito usado nas construções italianas
		Cal e escória de ferro		Para revestimento
Matheus do Couto ⁽¹⁵⁾	Escrito entre 1631 e 1641 – Arquiteto português	Cal e areia	1:1,5	Cal feita de lioz
			1:1	Cal virgem com pouca dureza
			1:2	Cal virgem com maior dureza
Manuel de Azeredo Fontes ⁽¹⁶⁾	Datada de 1728 - 29 – Português	Cal e areia	1:1	Cal mais fraca
			1:2	Cal mais forte

Referências

⁽¹⁾ - POLLIO, Marcus Vitruvius. Tratado de Arquitetura: Vitruvío. Tradução, introdução e notas de M. Justino Maciel. São Paulo: Martins, 2007.

⁽²⁾ - Na obra "*I Quattro libri dell'Architettura*"

⁽³⁾ - Na obra *Naturalis Historia*.

- (4) - VARRON, Marco Terencio. *De las cosas del campo*, trad. de Domingo Tirado Benedí. México: UNAM, 1945. Cap. LVII, p. 55.
- (5) - MARTINI, Francesco di Giorgio. *Architettura civile e militare*. v. III, T. I, tratado I, p. 113
- (6) - EÇA, Mathias A. R. da Silva de. *Problema de architectura civil*. Lisboa: Antônio Rodrigues Galhardo, 1777. Parte II, Cap. X, p. 148/149.
- (7) - RIEGER, Christiano (Pe.). *Elementos de toda la architectura civil*. Madrid: Joachin Ibarra, 1763. Parte IV, Cap. I, p. 226/227.
- (8) - DE VILLE, Antoine. *Les fortifications*. Lyon: Phillipe Borde, 1641. Parte I. L I., p. 89.
- (9) - CASTANHEIRA DAS NEVES, J. da P. . Memoria sobre as investigações experimentais e ensaios de resistência dos materiaes de construcção. *Revista de Obras Públicas e Minas*, Nov./Dez., 1983, t. XXIV, p. 497-522, p. 501.
- (10) - FERREIRA, Carlos A. P.. *Engenheiro de Algibeira*, 5º ed.. Lisboa: A. M. Pereira/ Livraria Editora, 1903, p. 75.
- (11) - PLÍNIO (o Antigo). *Historia naturale*, trad. de Ludovico Domenichi..., L. XXXVI, Cap. XXVIII.
- (12) - CATANEO, Pietro. *I quattro primi libri di architettura* (Veneza, Figliuoli di Aldo, 1554), facsímile. Ridgewood: The Gregg Press Incorporated, 1964. L. II, Cap. XI, fls. 34v.
- (13) - BELIDOR, Bernard Forest de. *Dictionnaire portatif de l'ingenieur*. Paris: Charles-Antoine Jombert, 1755. p. 193.
- (14) - ZANINI, Gioseffe Viola. *Della architettura*, 2a impr., Pádua, Giacomo Cadorino, 1677. L.I, Cap. XVI, p. 68.
- (15) - COUTO, Matheus do (o velho). *Tractado de architectura*..., L. II, cap. IX, p. 37.
- (16) - AZEVEDO FORTES, Manoel de. *O engenheiro português*..., t.II,L. VI, cap. III, p. 282

APÊNDICE B.1 - DEFINIÇÃO DA MISTURA BINÁRIA DA GRANULOMETRIA DO ESTUDO

AREIA FINA (CAXITÚ) - 100%

Massa total da amostra seca 01

989,54

PENEIRAMENTO DE 100% DE AREIA FINA						Resultados	
# (mm)	Material Retido				% passa da amostra total	Classificacao	
	Massa (g)	Mi (g)	% Amostra Total	% Acumulada		Mod. Finura	1,62
6,3	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	Dim. Max.	1,2
4,8	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00		
2,4	4,39	4,39	0,44	0,44	99,56		
1,2	12,68	17,07	1,28	1,73	98,27		
0,6	163,15	180,22	16,49	18,21	81,79		
0,3	408,84	589,06	41,32	59,53	40,47		
0,15	223,87	812,93	22,62	82,15	17,85		
0,075	135,11	948,04	13,65	95,81	4,19		
Resto	41,50	989,54	4,19	100,00	0,00		

AREIA MÉDIA -100%

Massa total da amostra seca 02

993,94

PENEIRAMENTO DE 100% DE AREIA MÉDIA						Resultados	
# (mm)	Material Retido				% passa da amostra total	Classificacao	
	Massa (g)	Mi (g)	% Amostra Total	% Acumulada		Mod. Finura	2,48
6,3	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	Dim. Max.	4,8
4,8	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00		
2,4	81,76	81,76	8,23	8,23	91,77		
1,2	121,32	203,08	12,21	20,43	79,57		
0,6	276,54	479,62	27,82	48,25	51,75		
0,3	290,95	770,57	29,27	77,53	22,47		
0,15	161,98	932,55	16,30	93,82	6,18		
0,075	53,81	986,36	5,41	99,24	0,76		
Resto	7,58	993,94	0,76	100,00	0,00		

AREIA MÉDIA - 60% E AREIA FINA - 40%

Massa total da amostra seca 03

995,41

PENEIRAMENTO DE						Resultados	
# (mm)	Material Retido				% passa da amostra total	Classificacao	
	Massa (g)	Mi (g)	% Amostra Total	% Acumulada		Mod. Finura	2,12
6,3	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	Dim. Max.	4,8
4,8	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00		
2,4	58,24	58,24	5,85	5,85	94,15		
1,2	78,11	136,35	7,85	13,70	86,30		
0,6	215,38	351,73	21,64	35,34	64,66		
0,3	337,06	688,79	33,86	69,20	30,80		
0,15	182,44	871,23	18,33	87,52	12,48		
0,075	96,54	967,77	9,70	97,22	2,78		
Resto	27,64	995,41	2,78	100,00	0,00		

AREIA MÉDIA - 70% E AREIA FINA - 30%

Massa total da amostra seca 04

995,17

PENEIRAMENTO DE 70% DE AREIA MÉDIA + 30% DE AREIA FINA						Resultados	
# (mm)	Material Retido				% passa da amostra total	Classificacao	
	Massa (g)	Mi (g)	% Amostra Total	% Acumulada		Mod. Finura	2,35
6,3	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	Dim. Max.	4,8
4,8	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00		
2,4	68,69	68,69	6,90	6,90	93,10		
1,2	109,46	178,15	11,00	17,90	82,10		
0,6	257,09	435,24	25,83	43,74	56,26		
0,3	322,90	758,14	32,45	76,18	23,82		
0,15	144,40	902,54	14,51	90,69	9,31		
0,075	76,57	979,11	7,69	98,39	1,61		
Resto	16,06	995,17	1,61	100,00	0,00		

AREIA MÉDIA - 50% E AREIA FINA - 50%

Massa total da amostra seca 05

992,77

PENEIRAMENTO DE 50% DE AREIA MÉDIA + 50% DE AREIA FINA						Resultados	
# (mm)	Material Retido				% passa da amostra total	Classificacao	
	Massa (g)	Mi (g)	% Amostra Total	% Acumulada		Mod. Finura	2,20
6,3	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	Dim. Max.	2,4
4,8	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00		
2,4	42,09	42,09	4,24	4,24	95,76		
1,2	74,97	117,06	7,55	11,79	88,21		
0,6	270,10	387,16	27,21	39,00	61,00		
0,3	345,56	732,72	34,81	73,81	26,19		
0,15	169,89	902,61	17,11	90,92	9,08		
0,075	71,26	973,87	7,18	98,10	1,90		
Resto	18,90	992,77	1,90	100,00	0,00		

AREIA MÉDIA - 40% E AREIA FINA - 60%

Massa total da amostra seca 06

994,10

PENEIRAMENTO DE 40% DE AREIA MÉDIA + 60% DE AREIA FINA						Resultados	
# (mm)	Material Retido				% passa da amostra total	Classificacao	
	Massa (g)	Mi (g)	% Amostra Total	% Acumulada		Mod. Finura	2,05
6,3	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	Dim. Max.	2,4
4,8	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00		
2,4	36,10	36,10	3,63	3,63	96,37		
1,2	62,00	98,10	6,24	9,87	90,13		
0,6	228,18	326,28	22,95	32,82	67,18		
0,3	374,76	701,04	37,70	70,52	29,48		
0,15	174,14	875,18	17,52	88,04	11,96		
0,075	93,52	968,70	9,41	97,44	2,56		
Resto	25,40	994,10	2,56	100,00	0,00		

AREIA MÉDIA - 30% E AREIA FINA - 70%

Massa total da amostra seca 07

995,29

PENEIRAMENTO DE 30% DE AREIA MÉDIA + 70% DE AREIA FINA						Resultados		
#	(mm)	Material Retido			% passa da amostra total	Classificacao		
		Massa (g)	Mi (g)	% Amostra Total		% Acumulada	Mod. Finura	2,11
	6,3	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	Dim. Max.	2,4
	4,8	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00		
	2,4	28,33	28,33	2,85	2,85	97,15		
	1,2	60,17	88,50	6,05	8,89	91,11		
	0,6	268,57	357,07	26,98	35,88	64,12		
	0,3	383,32	740,39	38,51	74,39	25,61		
	0,15	148,92	889,31	14,96	89,35	10,65		
	0,075	84,23	973,54	8,46	97,81	2,19		
	Resto	21,75	995,29	2,19	100,00	0,00		

APÊNDICE B.2 - MASSA UNITÁRIA DAS COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS

Amostra 03 - Tabela da massa unitária da composição com **60% de areia média e 40% de areia fina.**

Foram executadas 3 pesagens com o recipiente tarado
Soma das três massas unitárias = 4,801

Pesagens	Massa unitária
24.030 kg	1,602
24.010 kg	1,600
23.995 kg	1,599
Média	1,600

Amostra 04 - Tabela da massa unitária da composição com **70% de areia média e 30% de areia fina.**

Foram executadas 3 pesagens com o recipiente tarado.
Soma das três pesagens = 4,814

Pesagens	Massa unitária
24.070 kg	1,604
24.060 kg	1,604
24.095 kg	1,606
Média	1,604

Amostra 05 - Tabela da massa unitária da composição com **50% de areia média e 50% de areia fina.**

Foram executadas 4 pesagens com o recipiente tarado
Soma das quatro massas unitárias = 6,353

Pesagens	Massa unitária
23850 kg	1,59
23900 kg	1,594
23790 kg	1,586
23740 kg	1,583
Média	1,588

Amostra 06 - Tabela da massa unitária da composição com **40% de areia média e 60% de areia fina.**

Foram executadas 3 pesagens com o recipiente tarado

Soma das quatro massas unitárias = 4,788

Pesagens	Massa unitária
23940 kg	1,596
23980 kg	1,598
23910 kg	1,594
Média	1,596

Amostra 07 - Tabela da massa unitária da composição com **70% de areia fina e 30% de areia média.**

Foram executadas 3 pesagens com o recipiente tarado

Soma das quatro massas unitárias = 4,784

Pesagens	Massa unitária
23935 kg	1,595
23915 kg	1,594
23915 kg	1,594
Média	1,594

APÊNDICE B.3 - CÁLCULO DAS QUANTIDADES DE MATERIAIS NA TRANSFORMAÇÃO DE VOLUME PARA MASSA DOS TRAÇOS

A proporção constante em todos os traços dos agregados miúdos, onde:
70% foi usado o agregado médio e 30% de agregado fino.

Se 100% é de agregado miúdo, e se o traço é 1:3, onde a relação é aglomerante: agregado, logo:

$$3 \text{ ___ } 100\% \quad \rightarrow \quad X = 3 \times 30 / 100 = \mathbf{0,9} \text{ (de agregado miúdo fino)}$$

$$X \text{ ___ } 30\%$$

$$1 \text{ ___ } 100\% \quad \rightarrow \quad Y = 1 \times 70 / 100 = \mathbf{2,1} \text{ (de agregado miúdo médio)}$$

$$Y \text{ ___ } 70\%$$

Dados de referência - Massa unitária no estado solto

Material	Massa unitária (kg/dm ³)
Cal	0,675
Metacaulim	0,460
Areia fina	1,55
Areia média	1,49

1:3 com 0% de metacaulim - Traço A

cal: areia fina: areia média

$$[(((1) \times (0,675)) / (0,675))] : [((0,9) \times (1,55)) / 0,675] : [(((2,1) \times (1,49)) / (0,675))]$$

$$1 \quad : \quad [1,395 / 0,675] \quad : \quad [3,129 / 0,675]$$

$$1 \quad : \quad 2,067 \quad : \quad 4,635$$

Dividindo tudo por 4

$$0,250: 0,517: 1,159 \text{ (em kg)}$$

$$250: 517: 1159 \text{ (em gramas)} \rightarrow \text{Valores utilizados no ensaio de consistência.}$$

1:3 com 5% de metacaulim - Traço B

Metacaulim:	cal:	areia fina:	areia média
$[(0,05) \times (0,46)] / (0,675)$	$[(0,95) \times (0,675)] / (0,675)$	$[(0,9) \times (1,55)] / 0,675$	$[(2,1) \times (1,49)] / (0,675)$
[0,023/0,675]	: 0,95	: [1,395/0,675]	: [3,129/0,675]
0,034	: 0,95	: 2,067	: 4,635
Dividindo tudo por 4			
0,0085: 0,2375: 0,517: 1,159 (em kg)			
8,5: 237,5: 517: 1159 (em gramas) → Valores utilizados no ensaio de consistência.			

1:3 com 10% de metacaulim - Traço C

Metacaulim:	cal:	areia fina:	areia média
$[(0,1) \times (0,46)] / (0,675)$	$[(0,9) \times (0,675)] / (0,675)$	$[(0,9) \times (1,55)] / 0,675$	$[(2,1) \times (1,49)] / (0,675)$
[0,046/0,675]	: 0,9	: [1,395/0,675]	: [3,129/0,675]
0,068	: 0,9	: 2,067	: 4,635
Dividindo tudo por 4			
0,017: 0,225: 0,517: 1,159 (em kg)			
17: 225: 517: 1159 (em gramas) → Valores utilizados no ensaio de consistência.			

1:3 com 15% de metacaulim - Traço D

Metacaulim:	cal:	areia fina:	areia média
$[(0,15) \times (0,46)] / (0,675)$	$[(0,85) \times (0,675)] / (0,675)$	$[(0,9) \times (1,55)] / 0,675$	$[(2,1) \times (1,49)] / (0,675)$
[0,069/0,675]	: 0,85	: [1,395/0,675]	: [3,129/0,675]
0,103	: 0,85	: 2,067	: 4,635
Dividindo tudo por 4			
0,025: 0,212: 0,517: 1,159 (em kg)			
25: 212: 517: 1159 (em gramas) → Valores utilizados no ensaio de consistência.			

1:3 com 20% de metacaulim - Traço E

Metacaulim:	cal:	areia fina:	areia média
$[(0,2) \times (0,46)] / (0,675)$	$[(0,8) \times (0,675)] / (0,675)$	$[(0,9) \times (1,55)] / 0,675$	$[(2,1) \times (1,49)] / (0,675)$
[0,092/0,675]	: [0,54/0,675]	: [1,395/0,675]	: [3,129/0,675]
0,136	: 0,8	: 2,067	: 4,635
Dividindo tudo por 4			
0,034: 0,200: 0,517: 1,159 (em kg)			
34: 200: 517: 1159 (em gramas) → Valores utilizados no ensaio de consistência.			

APÊNDICE B.4 - DENSIDADE DE MASSA DOS TRAÇOS NO ESTADO ANIDRO

Tabela da Densidade de massa (Estado solto) do **Traço A**

Foram executadas 3 pesagens com o recipiente tarado

Soma das três massas unitárias = 4,169

Pesagens	Densidade de massa
20.805 .kg	1,387
20.925 kg	1,395
20.815 kg	1,387
Média	1,389

Tabela da Densidade de massa do **Traço B**

Foram executadas 3 pesagens com o recipiente tarado

Soma das três massas unitárias = 4,183

Pesagens	Densidade de massa
20.910 kg	1,394
20.940 kg	1,396
20.900 kg	1,393
Média	1,394

Tabela da Densidade de massa do **Traço C.**

Foram executadas 3 pesagens com o recipiente tarado

Soma das três massas unitárias = 4,226

Pesagens	Densidade de massa
21.145 kg	1,409
21.115 kg	1,407
21.150 kg	1,41
Média	1,408

Tabela da Densidade de massa do **Traço D.**

Foram executadas 3 pesagens com o recipiente tarado

Soma das três massas unitárias = 4,226

Pesagens	Densidade de massa
21.095 kg	1,406
21.145 kg	1,409
21.175 kg	1,411
Média	1,408

Tabela da Densidade de massa do **Traço E**.

Foram executadas 3 pesagens com o recipiente tarado.

Soma das três pesagens = 4,212

Pesagens	Densidade de massa
20.915 kg	1,394
21.175 kg	1,411
21.110 kg	1,407
Média	1,404

APÊNDICE B.5 - GRANULOMETRIA DAS ARGAMASSAS

Traço A

Cal : AF + AM = 250 : 517 + 1159 TOTAL = 1926 g

Massa total da amostra seca 01

1924,70

Traço A					
#	(mm)	Material Retido			% passa da amostra total
		Massa (g)	Mi (g)	% Amostra Total	
6,3		0,00	0,00	0,00	100,00
4,8		0,00	0,00	0,00	100,00
2,4		73,30	73,30	3,81	96,19
1,2		89,80	163,10	4,67	91,53
0,6		324,10	487,20	16,84	74,69
0,3		731,50	1218,70	38,01	36,68
0,15		372,60	1591,30	19,36	17,32
0,075		269,10	1860,40	13,98	3,34
Resto		64,30	1924,70	3,34	0,00

Traço B

Metacaulim : cal : AF + AM = 8,5 : 237,5 : 517 + 1159 TOTAL = 1922 g

Massa total da amostra seca 02

1914,30

Traço B					
#	(mm)	Material Retido			% passa da amostra total
		Massa (g)	Mi (g)	% Amostra Total	
6,3		0,00	0,00	0,00	100,00
4,8		0,00	0,00	0,00	100,00
2,4		82,60	82,60	4,31	95,69
1,2		103,60	186,20	5,41	90,27
0,6		319,40	505,60	16,68	73,59
0,3		726,50	1232,10	37,95	35,64
0,15		358,30	1590,40	18,72	16,92
0,075		292,30	1882,70	15,27	1,65
Resto		31,60	1914,30	1,65	0,00

Traço C

Metacaulim : cal : AF + AM = 17 : 225 : 517 + 1159 TOTAL = 1918g

Massa total da amostra seca 03 1914,10

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA 01					
# (mm)	Material Retido				% passa da amostra total
	Massa (g)	Mi (g)	% Amostra Total	% Acumulada	
6,3	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
4,8	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
2,4	90,10	90,10	4,71	4,71	95,29
1,2	113,60	203,70	5,93	10,64	89,36
0,6	323,90	527,60	16,92	27,56	72,44
0,3	716,50	1244,10	37,43	65,00	35,00
0,15	386,40	1630,50	20,19	85,18	14,82
0,075	261,70	1892,20	13,67	98,86	1,14
Resto	21,90	1914,10	1,14	100,00	0,00

Traço D

Metacaulim : cal : AF + AM = 25 : 212 : 517 + 1159 TOTAL = 1913g

Massa total da amostra seca 04 1907,20

Traço D					
# (mm)	Material Retido				% passa da amostra total
	Massa (g)	Mi (g)	% Amostra Total	% Acumulada	
6,3	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
4,8	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
2,4	83,70	83,70	4,39	4,39	95,61
1,2	120,00	203,70	6,29	10,68	89,32
0,6	343,20	546,90	17,99	28,68	71,32
0,3	737,60	1284,50	38,67	67,35	32,65
0,15	412,60	1697,10	21,63	88,98	11,02
0,075	198,70	1895,80	10,42	99,40	0,60
Resto	11,40	1907,20	0,60	100,00	0,00

Traço E

Metacaulim: cal : AF + AM = 34 : 200 : 517 + 1159 TOTAL = 1910g

Massa total da amostra seca 05 1908,10

Traço E						
#	(mm)	Material Retido			% passa da amostra total	
		Massa (g)	Mi (g)	% Amostra Total		% Acumulada
6,3		0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
4,8		0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
2,4		84,90	84,90	4,45	4,45	95,55
1,2		126,10	211,00	6,61	11,06	88,94
0,6		357,20	568,20	18,73	29,79	70,21
0,3		833,10	1401,30	43,68	73,47	26,53
0,15		281,90	1683,20	14,78	88,26	11,74
0,075		206,90	1890,10	10,85	99,10	0,90
Resto		18,00	1908,10	0,94	100,05	-0,05

APÊNDICE C.1 - RESULTADO DO ENSAIO DE CONSISTÊNCIA E DETERMINAÇÃO DO TEOR DA ÁGUA TEÓRICA

Traço A

	Traço A	
	Água/ Material seco	Espalhamento
1° ponto	0,165	215,7
2° ponto	0,18	242,7
3° ponto	0,205	271

Traço B

	Traço B	
	Água/ Material seco	Espalhamento
1° ponto	0,173	227
2° ponto	0,182	246,7
3° ponto	0,207	265,7
4° ponto		

Traço C

	Traço C	
	Água/ Material seco	Espalhamento
1° ponto	0,162	195,4
2° ponto	0,173	218,7
3° ponto	0,185	238,7
4° ponto	0,204	255,7
5° ponto	0,228	277

Traço D

	Traço D	
	Água/ Material seco	Espalhamento
1° ponto	0,176	237,4
2° ponto	0,184	243,7
3° ponto	0,2	256
4° ponto	0,211	267,4

Traço E

	Traço E	
	Água/ Material seco	Espalhamento
1° ponto	0,184	228,00
2° ponto	0,204	250,00
3° ponto	0,222	260,00
4° ponto	0,262	297,00

APÊNDICE C.2 - RESULTADOS DA DENSIDADE DE MASSA NO ESTADO FRESCO

Observações:

→ Densidade de massa = Massa da argamassa / Volume da fôrma →

Volume da fôrma = $\pi r^2 h = \pi 2,5^2 10 \text{ (cm}^3\text{)}$	1 cm = 0,1 dm
Volume da fôrma = $\pi r^2 h = \pi 0,25^2 1 \text{ (dm}^3\text{)}$	

Legenda:

 → dado não utilizado devido a disparidade entre os demais

Traço A	n° do CP	fôrma + argamassa (gramas)	fôrma (gramas)	Massa de cada CP (g)	Massa de cada CP (kg)	Volume da fôrma ($V = \pi r^2 h$)	Densidade de massa no estado fresco
	A - CP1	1219,05	826,91	392,14	0,392	0,196	2,00
	A - CP2	1187,45	794,93	392,52	0,392		2,00
	A - CP3	1114,05	720,78	393,27	0,393		2,01
	A - CP4	1350,28	957,07	393,21	0,393		2,01
	A - CP5	1184,79	791,88	392,91	0,393		2,01
	A - CP6	1102,28	804,95	297,33	0,297		1,52
	A - CP7	1190,25	795,74	394,51	0,394		2,01
	A - CP8	1195,11	800,77	394,34	0,394		2,01
	A - CP9	1193,26	800,99	392,27	0,392		2,00
	A - CP10	1096,53	710,07	386,46	0,386		1,97
Média da massa unitária no estado fresco do Traço A							2,00

Traço B	n° do CP	fôrma + argamassa (gramas)	fôrma (gramas)	Massa de cada CP (g)	Massa de cada CP (kg)	Volume da fôrma ($V = \pi r^2 h$)	Densidade de massa no estado fresco
	B - CP1	1134,77	740,63	394,14	0,394	0,196	2,01
	B - CP2	1034,11	636,38	397,73	0,397		2,03
	B - CP3	1205,19	810,51	394,68	0,394		2,01
	B - CP4	1199,99	803	396,99	0,397		2,03
	B - CP5	1155,88	761,91	393,97	0,394		2,01
	B - CP6	1175,06	780,11	394,95	0,395		2,02
	B - CP7	1194,4	801,72	392,68	0,392		2,00
	B - CP8	1191,89	796,61	395,28	0,395		2,02
	B - CP9	1170,55	768,22	402,33	0,402		2,05
	B - CP10	1056,95	660,88	396,07	0,396		2,02
Média da massa unitária no estado fresco do Traço B							2,01

Apêndice C.2 - Resultados da densidade de massa no estado fresco

Traço C	n° do CP	fôrma + argamassa (gramas)	fôrma (gramas)	Massa de cada CP (g)	Massa de cada CP (kg)	Volume da forma ($V = \pi r^2 h$)	Densidade de massa no estado fresco
	C - CP1	1209,4	811,01	398,39	0,398	0,196	2,03
	C - CP2	1254,93	854,48	400,45	0,4		2,04
	C - CP3	1035,58	637,18	398,4	0,398		2,03
	C - CP4	1198,04	796,32	401,72	0,401		2,05
	C - CP5	1136,14	741,12	395,02	0,395		2,02
	C - CP6	1175,65	768,19	407,46	0,407		2,08
	C - CP7	1180,1	780,04	400,06	0,4		2,04
	C - CP8	1199,59	802,15	397,44	0,397		2,03
	C - CP9	1059,94	660,82	399,12	0,399		2,04
	C - CP10	1158,71	762,66	396,05	0,396		2,02
Média da massa unitária no estado fresco do Traço C							2,03

Traço D	n° do CP	fôrma + argamassa (gramas)	fôrma (gramas)	Massa de cada CP (g)	Massa de cada CP (kg)	Volume da forma ($V = \pi r^2 h$)	Densidade de massa no estado fresco
	D - CP1	1101,26	709,69	391,57	0,391	0,196	1,99
	D - CP2	1121,9	724,97	396,93	0,397		2,03
	D - CP3	1119,49	721,06	398,43	0,398		2,03
	D - CP4	1192,01	795,64	396,37	0,396		2,02
	D - CP5	1357,51	956,99	400,52	0,4		2,04
	D - CP6	1197,25	794,89	402,36	0,402		2,05
	D - CP7	1201,3	800,56	400,74	0,4		2,04
	D - CP8	1211,09	804,71	406,38	0,406		2,07
	D - CP9	1205,12	800,86	404,26	0,404		2,06
	D - CP10	1189,05	791,83	397,22	0,397		2,03
Média da massa unitária no estado fresco do Traço D							2,04

Traço E	n° do CP	fôrma + argamassa (gramas)	fôrma (gramas)	Massa de cada CP (g)	Massa de cada CP (kg)	Volume da forma ($V = \pi r^2 h$)	Densidade de massa no estado fresco
	E - CP1	1197,06	794,97	402,09	0,402	0,196	2,05
	E - CP2	1194,35	791,7	402,65	0,402		2,05
	E - CP3	1360,6	956,9	403,7	0,403		2,06
	E - CP4	1215,3	804,8	410,5	0,41		2,09
	E - CP5	1105,32	709,83	395,49	0,395		2,02
	E - CP6	1205,43	800,8	404,63	0,404		2,06
	E - CP7	1123,87	725,25	398,62	0,398		2,03
	E - CP8	1197,32	795,6	401,72	0,401		2,05
	E - CP9	1122,49	721,43	401,06	0,401		2,05
	E - CP10	1199,37	801,09	398,28	0,398		2,03
Média da massa unitária no estado fresco do Traço E							2,04

APÊNDICE C.3 - RESULTADOS DA MASSA UNITÁRIA, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DAS

Observações:

→ Massa Unitária (\bar{Y}) = Massa da argamassa / Volume da fôrma →

→ Desvio padrão (S) = $\sqrt{\sum(Y - \bar{Y})^2/n-1}$

Onde: \bar{Y} é a média da massa unitária e n é o número de corpos de prova

→ Coeficiente de variação = S/\bar{Y}

Legenda:

████████ → dado não utilizado devido a disparidade entre os demais

Traço A	n° do CP	Massa unitária no estado fresco	Desvio Padrão (S)	Coeficiente de variação (%)
	A - CP1	2,00	0,0124	0,62
	A - CP2	2,00		
	A - CP3	2,01		
	A - CP4	2,01		
	A - CP5	2,01		
	A - CP6	1,52		
	A - CP7	2,01		
	A - CP8	2,01		
	A - CP9	2,00		
	A - CP10	1,97		
Média da massa unitária (\bar{Y})		2		

Traço B	n° do CP	Massa unitária no estado fresco	Desvio Padrão (S)	Coeficiente de variação (%)
	B - CP1	2,01	0,008	0,41
	B - CP2	2,03		
	B - CP3	2,01		
	B - CP4	2,03		
	B - CP5	2,01		
	B - CP6	2,02		
	B - CP7	2,00		
	B - CP8	2,02		
	B - CP9	2,05		
	B - CP10	2,02		
Média da massa unitária (\bar{Y})		2,01		

Apêndice C.3 - Resultados da massa unitária, desvio padrão e coeficiente de variação das argamassas

Traço C	n° do CP	Massa unitária no estado fresco	Desvio Padrão (S)	Coeficiente de variação (%)
	C - CP1	2,03	0,0101	0,50
	C - CP2	2,04		
	C - CP3	2,03		
	C - CP4	2,05		
	C - CP5	2,02		
	C - CP6	2,08		
	C - CP7	2,04		
	C - CP8	2,03		
	C - CP9	2,04		
	C - CP10	2,02		
Média da massa unitária (ȳ)		2,03		

Traço D	n° do CP	Massa unitária no estado fresco	Desvio Padrão (S)	Coeficiente de variação (%)
	D - CP1	1,99	0,0175	0,86
	D - CP2	2,03		
	D - CP3	2,03		
	D - CP4	2,02		
	D - CP5	2,04		
	D - CP6	2,05		
	D - CP7	2,04		
	D - CP8	2,07		
	D - CP9	2,06		
	D - CP10	2,03		
massa unitária (ȳ)		2,04		

Traço E	n° do CP	Massa unitária no estado fresco	Desvio Padrão (S)	Coeficiente de variação (%)
	E - CP1	2,05	0,0147	0,72
	E - CP2	2,05		
	E - CP3	2,06		
	E - CP4	2,09		
	E - CP5	2,02		
	E - CP6	2,06		
	E - CP7	2,03		
	E - CP8	2,05		
	E - CP9	2,05		
	E - CP10	2,03		
Média da massa unitária		2,04		

APÊNDICE C.4 - RESULTADOS DA VARIAÇÃO DE MASSA

TRAÇO A	Endurecido	3° dia	4° dia	5° dia	6° dia	8° dia	10° dia	11° dia	12° dia	13° dia	14° dia	15° dia	18° dia	19° dia	20° dia
CP1 - A	369,31	352,33	346,12	337,59	334,07	332,46	332,47	332,48	332,7	332,83	333	333,11	333,5	333,58	333,72
CP2 - A	368,5	345,87	340,98	335,34	334,1	333,07	333,1	333,16	333,33	333,51	333,66	333,74	334,13	334,22	334,32
CP3 - A	369,69	343,6	337,37	334,23	334,05	332,86	332,35	332,41	332,51	332,74	332,9	332,99	333,36	333,48	333,6
CP4 - A	368,7	343,95	340,8	333,36	332,51	331,09	330,88	330,97	331,12	331,32	331,48	331,52	331,95	332,06	332,18
CP5 - A	366,61	344,86	341,98	338,65	334,98	332,54	332,15	332,2	332,4	332,59	332,76	332,87	333,34	333,43	333,57
CP6 - A	374,73	348,59	343,63	342,35	339,96	338,5	338,48	338,53	338,64	338,83	339	339,1	339,51	339,61	339,7
CP7 - A	366,34	344,89	338,51	335,23	333,19	332,54	332,54	332,58	332,75	332,93	333,09	333,18	333,6	333,69	333,81
CP8 - A	370,93	347,74	342	336,02	334,51	333,57	333,37	333,41	333,52	333,75	333,93	334,02	334,46	334,58	334,68
CP9 - A	366,56	341,95	335,91	333,17	331,39	330,68	330,37	330,44	330,62	330,73	330,93	331,06	331,48	331,57	331,68
Média	369,04	345,976	340,81	336,216	334,31	333,03	332,86	332,91	333,07	333,25	333,42	333,51	333,93	334,02	334,14
	369,04														
Perda de massa		0,0625	0,0765	0,0889	0,0941	0,0976	0,0980	0,0979	0,0975	0,0970	0,0965	0,0963	0,0952	0,0949	0,0946

TRAÇO A	21° dia	24° dia	27° dia	285° dia
CP1 - A	333,81	334,07	334,36	
CP2 - A	334,45	334,69	334,93	343,9
CP3 - A	333,71	333,96	334,24	
CP4 - A	332,3	332,54	332,8	
CP5 - A	333,68	333,95	334,25	337,9
CP6 - A	339,82	340,11	340,39	343,9
CP7 - A	333,9	334,16	334,48	337,9
CP8 - A	334,8	335,08	335,32	
CP9 - A	331,78	332,08	332,32	338,9
Média	334,25	334,52	334,79	340,5
Perda de massa	0,0943	0,0936	0,0928	0,0773

Massa média dos CPs no dia da desmoldagem do traço A	Idade	Perda de massa	% da perda	Massa média dos CPs (%)
369,04	1	0	0	100
	3	0,0625	6,25	93,75
	4	0,0765	7,65	92,35
	5	0,0889	8,89	91,11
	6	0,0941	9,41	90,59
	8	0,0976	9,76	90,24
	10	0,0980	9,80	90,20
	11	0,0979	9,79	90,21
	12	0,0975	9,75	90,25
	13	0,0970	9,70	90,30
	14	0,0965	9,65	90,35
	15	0,0963	9,63	90,37
	18	0,0952	9,52	90,48
	19	0,0949	9,49	90,51
	20	0,0946	9,46	90,54
	21	0,0943	9,43	90,57
	24	0,0936	9,36	90,64
	27	0,0928	9,28	90,72
	285	0,0773	7,73	92,27

Idade	Massa média dos CPs (%)
1	100,00
3	93,75
4	92,35
5	91,11
6	90,59
8	90,24
10	90,20
11	90,21
12	90,25
13	90,30
14	90,35
15	90,37
18	90,48
19	90,51
20	90,54
21	90,57
24	90,64
27	90,72
285	92,27



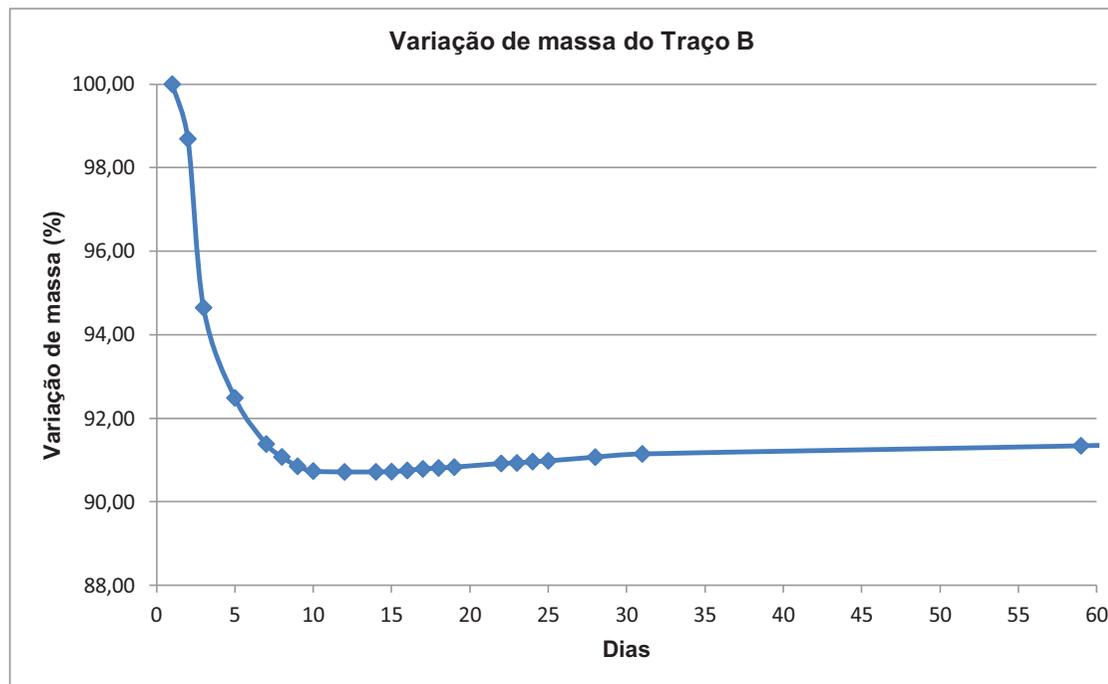
Obs:
Após o 10° dia a massa começa a se elevar

TRAÇO B	Desmoldagem	2° dia	3° dia	5° dia	7° dia	8° dia	9° dia	10° dia	12° dia	14° dia	15° dia	16° dia	17° dia	18° dia	19° dia
CP1 - B	370,15	366,32	348,42	342,07	339,38	338,4	338,09	337,77	337,87	337,9	337,94	338,05	338,19	338,26	338,34
CP2 - B	376,92	371,5	352,33	345,37	343	342,32	341,73	341,46	341,5	341,51	341,53	341,63	341,76	341,84	341,92
CP3 - B	371,37	366,87	349,73	344,45	340,76	339,95	338,93	338,35	337,99	337,99	338,01	338,13	338,29	338,39	338,45
CP4 - B	376,46	371,19	355,3	346,45	343,2	342,99	342,15	341,64	341,7	341,73	341,76	341,83	341,95	342,06	342,11
CP5 - B	370,02	363,79	348,7	341,14	340,45	338,69	337,31	337,15	336,96	336,92	336,92	337,04	337,18	337,24	337,35
CP6 - B	375,84	368,92	358,03	347,21	342,23	340,03	338,93	338,3	337,95	338,02	338,06	338,2	338,34	338,42	338,5
CP7 - B	372,56	366,52	358,95	351,82	341,32	338,59	337,39	336,25	335,95	335,95	335,97	336,1	336,27	336,36	336,44
CP8 - B	373,28	369,78	355,19	345,28	339,9	339,05	338,81	338,57	338,75	338,8	338,77	338,87	339,01	339,1	339,21
CP9 - B	380,18	377,61	356,32	351,6	346,59	345,95	345,1	344,82	344,77	344,7	344,73	344,81	344,93	345	345,05
CP10 - B	371,78	367,14	355,51	342,28	339,57	338,87	338,05	337,89	337,95	337,95	337,97	338,06	338,18	338,28	338,32
Média	373,856	368,964	353,85	345,767	341,64	340,48	339,65	339,22	339,14	339,147	339,17	339,27	339,41	339,5	339,569
	373,86														
Perda de massa		0,0131	0,0535	0,0751	0,0862	0,0893	0,0915	0,0927	0,0929	0,0929	0,0928	0,0925	0,0921	0,0919	0,0917

TRAÇO B	22° dia	23° dia	24° dia	25° dia	28° dia	31° dia	59° dia	75° dia	77° dia
CP1 - B	338,65	338,72	338,83	338,91	339,21	339,39			
CP2 - B	342,23	342,26	342,39	342,44	342,72	343,05			
CP3 - B	338,79	338,81	338,94	339,01	339,31	339,66	340,16	340,74	340,81
CP4 - B	342,41	342,46	342,59	342,63	342,97	343,37			
CP5 - B	337,64	337,7	337,82	337,9	338,13	338,47	339,26	339,97	340,05
CP6 - B	338,85	338,89	339,01	339,09	339,42	339,8	340,57	341	341,15
CP7 - B	336,81	336,85	336,97	337,05	337,36	337,81			
CP8 - B	339,53	339,57	339,69	339,74	340,18	340,24	341,14	341,64	341,82
CP9 - B	345,42	345,46	345,61	345,67	346,09	346,3	347,31	347,82	347,91
CP10 - B	338,67	338,71	338,81	338,87	339,27	339,45	340,44	341,05	341,03
Média	339,9	339,943	340,07	340,131	340,47	340,75	341,48	342,037	342,13
Perda de massa	0,0908	0,0907	0,0904	0,0902	0,0893	0,0886	0,0866	0,0851	0,0849

Massa média dos CPs no dia da desmoldagem do traço B	Idade	Perda de massa	% da perda	Massa média dos CPs (%)
373,86	1	0	0,00	100,00
	2	0,0131	1,31	98,69
	3	0,0535	5,35	94,65
	5	0,0751	7,51	92,49
	7	0,0862	8,62	91,38
	8	0,0893	8,93	91,07
	9	0,0915	9,15	90,85
	10	0,0927	9,27	90,73
	12	0,0929	9,29	90,71
	14	0,0929	9,29	90,71
	15	0,0928	9,28	90,72
	16	0,0925	9,25	90,75
	17	0,0921	9,21	90,79
	18	0,0919	9,19	90,81
	19	0,0917	9,17	90,83
	22	0,0908	9,08	90,92
	23	0,0907	9,07	90,93
	24	0,0904	9,04	90,96
	25	0,0902	9,02	90,98
	28	0,0893	8,93	91,07
	31	0,0886	8,86	91,14
	59	0,0866	8,66	91,34
	75	0,0851	8,51	91,49
	77	0,0849	8,49	91,51

Idade	Massa média dos CPs (%)
1	100,00
2	98,69
3	94,65
5	92,49
7	91,38
8	91,07
9	90,85
10	90,73
12	90,71
14	90,71
15	90,72
16	90,75
17	90,79
18	90,81
19	90,83
22	90,92
23	90,93
24	90,96
25	90,98
28	91,07
31	91,14
59	91,34
75	91,49
77	91,51



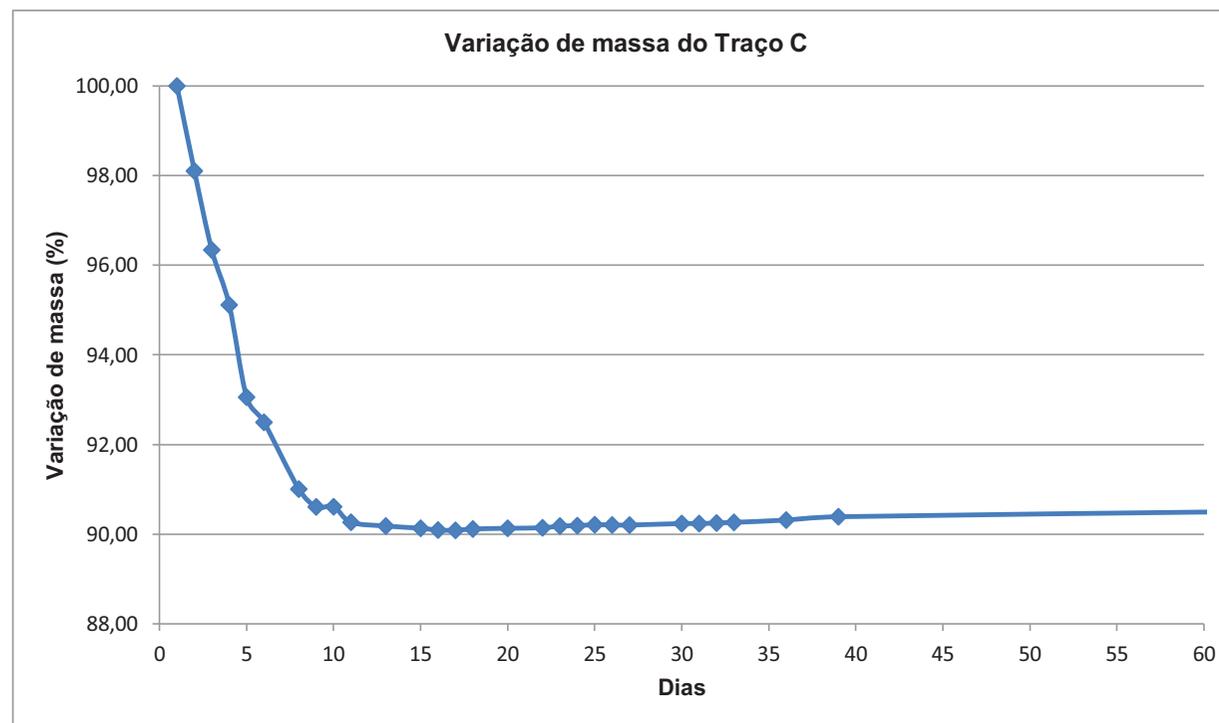
Obs:
Após o 9º dia a massa começa a se elevar

TRAÇO C	Desmoldagem	2° dia	3° dia	4° dia	5° dia	6° dia	8° dia	9° dia	10° dia	11° dia	13° dia	15° dia	16° dia	17° dia	18° dia
CP1 - C	379,35	368,36	363,94	357,62	352,48	348,69	343,33	341,94	341,95	341,59	341,61	341,63	341,53	341,56	341,6
CP2 - C	380,67	373,46	370,51	367,31	357,09	353,55	347,17	344,89	344,81	344,38	343,68	343,33	343,14	343,1	343,14
CP3 - C	382,14	376,54	368,74	365,51	360,04	354,07	348,62	345,47	344,61	343,48	342,95	342,77	342,61	342,59	343,6
CP4 - C	380,09	369,18	363,94	360,57	352,73	351,78	346,4	345,05	344,76	343,86	343,65	343,37	343,15	343,08	343,09
CP5 - C	374,57	370,74	360,18	354,19	347,58	344,41	339,21	338,45	338,38	337,89	337,7	337,56	337,5	337,48	337,49
CP6 - C	383,24	378,08	371,51	366,96	360,5	357,94	352,15	350,61	350,32	348,9	348,72	348,53	348,4	348,38	348,38
CP7 - C	384,41	375,95	368,09	362,52	356,17	354,89	347,89	346,43	345,79	344,44	344,19	344,16	344,1	344,02	344,05
CP8 - C	379,67	372,63	367,14	362,16	358,26	352,51	343,31	342,72	342,16	341,29	340,67	340,43	340,24	340,21	340,18
CP9 - C	378,23	369,98	361,71	356,02	340,42	348,45	343,57	343,15	343,04	342,43	342,42	342,3	342,1	342,11	342,12
CP10 - C	373,73	369,23	361,45	357,77	347,18	344,9	342,94	340,81		338,24	337,71	337,34	337,13	337,11	337,13
Média	379,61	372,415	365,72	361,063	353,25	351,12	345,46	343,952	343,98	342,65	342,33	342,14	341,99	341,96	342,078
	379,61														
Perda de massa		0,0190	0,0366	0,0489	0,0695	0,0751	0,0900	0,0939	0,0939	0,0974	0,0982	0,0987	0,0991	0,0992	0,0989

TRAÇO C	20° dia	22° dia	23° dia	24° dia	25° dia	26° dia	27° dia	30° dia	31° dia	32° dia	33° dia	36° dia	39° dia	67° dia
CP1 - C	341,75	341,82	342,13	342	342,04	342,12	342,08	342,28	342,25	342,29	342,36	342,54	343,06	
CP2 - C	343,34	343,41	343,61	343,6	343,58	343,61	343,61	343,71	343,71	343,68	343,72	343,92	344,2	345,08
CP3 - C	342,74	342,84	342,93	343,02	343,19	343,09	343,08	343,27	343,25	343,26	343,32	343,54	343,77	344,33
CP4 - C	343,27	343,26	343,49	343,42	343,46	343,36	343,36	343,47	343,46	343,54	343,58	343,82	344,18	344,8
CP5 - C	337,69	337,74	337,73	337,86	337,9	337,98	337,98	338,11	338,1	338,15	338,21	338,47	338,6	339,42
CP6 - C	348,53	348,46	348,6	348,58	348,78	348,73	348,7	348,8	348,77	348,83	348,88	349	349,17	
CP7 - C	344,21	344,27	344,35	344,34	344,47	344,47	344,46	344,55	344,56	344,66	344,71	344,9	345,12	346,03
CP8 - C	340,36	340,4	340,47	340,7	340,64	340,67	340,61	340,77	340,8	340,87	340,95	341,11	341,41	342,14
CP9 - C	342,26	342,32	342,47	342,53	342,64	342,6	342,61	342,71	342,7	342,75	342,8	342,88	343,13	
CP10 - C	337,24	337,3	337,53	337,56	337,72	337,56	337,62	337,74	337,77	337,83	337,87	338,16	338,54	
Média	342,139	342,182	342,33	342,361	342,44	342,42	342,41	342,541	342,54	342,586	342,64	342,83	343,118	343,63
Perda de massa	0,0987	0,0986	0,0982	0,0981	0,0979	0,0980	0,0980	0,0977	0,0977	0,0975	0,0974	0,0969	0,0961	0,0948

Massa média dos CPs no dia da desmoldagem do traço C	Idade	Perda de massa	% da perda	Massa média dos CPs (%)
379,61	1	0	0,00	100,00
	2	0,0190	1,90	98,10
	3	0,0366	3,66	96,34
	4	0,0489	4,89	95,11
	5	0,0695	6,95	93,05
	6	0,0751	7,51	92,49
	8	0,0900	9,00	91,00
	9	0,0939	9,39	90,61
	10	0,0939	9,39	90,61
	11	0,0974	9,74	90,26
	13	0,0982	9,82	90,18
	15	0,0987	9,87	90,13
	16	0,0991	9,91	90,09
	17	0,0992	9,92	90,08
	18	0,0989	9,89	90,11
	20	0,0987	9,87	90,13
	22	0,0986	9,86	90,14
	23	0,0982	9,82	90,18
	24	0,0981	9,81	90,19
	25	0,0979	9,79	90,21
	26	0,0980	9,80	90,20
	27	0,0980	9,80	90,20
	30	0,0977	9,77	90,23
	31	0,0977	9,77	90,23
	32	0,0975	9,75	90,25
	33	0,0974	9,74	90,26
	36	0,0969	9,69	90,31
	39	0,0961	9,61	90,39
	67	0,0948	9,48	90,52

Idade	Massa média dos CPs (%)
1	100,00
2	98,10
3	96,34
4	95,11
5	93,05
6	92,49
8	91,00
9	90,61
10	90,61
11	90,26
13	90,18
15	90,13
16	90,09
17	90,08
18	90,11
20	90,13
22	90,14
23	90,18
24	90,19
25	90,21
26	90,20
27	90,20
30	90,23
31	90,23
32	90,25
33	90,26
36	90,31
39	90,39
67	90,52



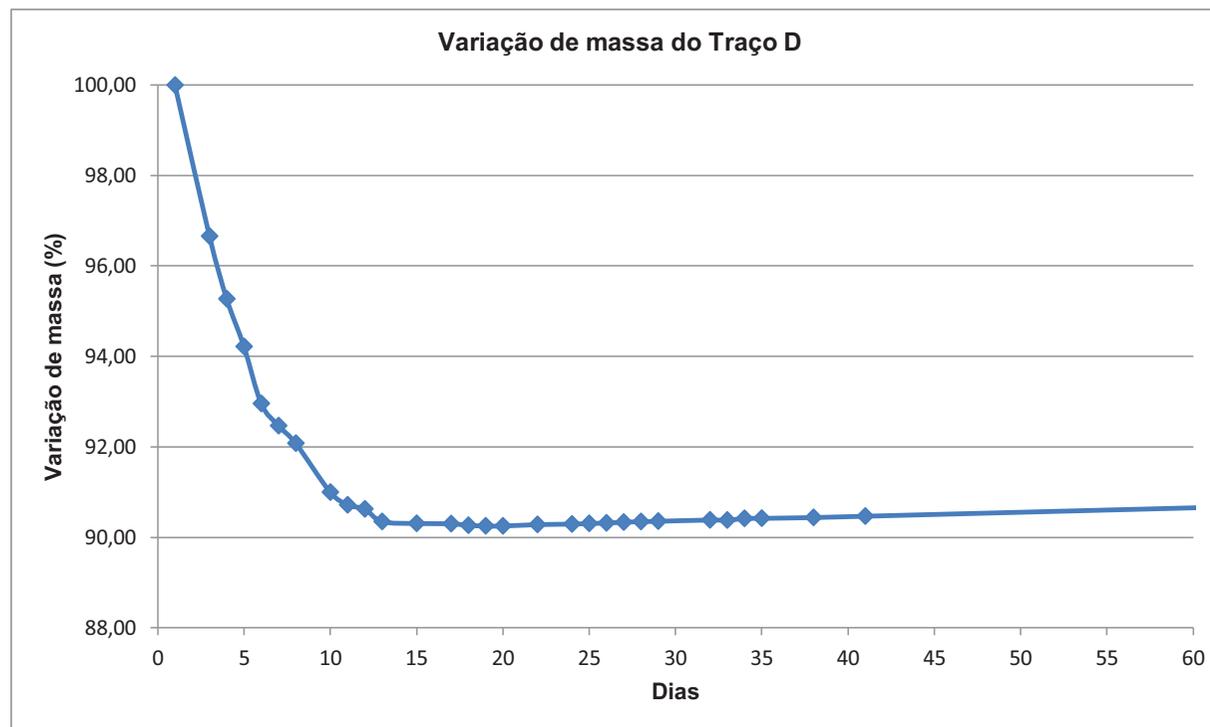
Obs:
Após o 10° dia a massa começa a se elevar

TRAÇO D	Desmoldagem	3° dia	4° dia	5° dia	6° dia	7° dia	8° dia	10° dia	11° dia	12° dia	13° dia	15° dia	17° dia	18° dia	19° dia
CP1 - D	374,58	362,77	358,19	349,67	346,99	343,77	343,46	339,31	338,04	337,79	336,95	336,85	336,88	336,77	336,78
CP2 - D	378,92	369,37	359,58	357,33	354,06	350,42	349,01	344,3	343,89	343,38	342,04	341,48	341,96	341,87	341,88
CP3 - D	380,65	369,51	366,81	362,26	357,82	351,38	350,15	344,82	344,08	343,79	343,25	343,12	342,89	342,78	342,62
CP4 - D	378,69	367,37	362,11	358,74	356,76	352,95	350,39	345,07	343,57	343,08	341,72	341,6	341,56	341,46	341,44
CP5 - D	381,22	364,36	360,32	355,98	354,49	351,83	350,36	348,57	347,12	346,57	345,06	344,55	344,34	344,12	343,99
CP6 - D	382,19	361,31	357,94	355,47	353,99	353,68	351,6	347,66	347,37	347,25	346,32	346,39	346,4	346,22	346,18
CP7 - D	378,85	369,37	365	360	336,72	351,61	349,95	346,54	345,44	344,98	344,25	344,24	344,11	343,95	343,87
CP8 - D	386,53	371,64	366,18	362,81	361,86	356,14	355,53	351,33	350,29	350,09	349,38	349,44	349,39	349,27	349,25
CP9 - D	386,25	379,58	373,79	370,7	364,16	359,28	357,41	353,23	351,09	350,61	349,03	348,9	348,83	348,67	348,62
CP10 - D	378,66	364,11	356,68	353,54	351,65	348,82	347,26	343,09	342,35	342,29	341,25	341,1	341,06	340,96	340,94
Média	380,65	367,939	362,66	358,65	353,85	351,99	350,51	346,392	345,32	344,983	343,93	343,77	343,742	343,61	343,557
	380,65														
Perda de massa		0,0334	0,0473	0,0578	0,0704	0,0753	0,0792	0,0900	0,0928	0,0937	0,0965	0,0969	0,0970	0,0973	0,0974

TRAÇO D	20° dia	22° dia	24° dia	25° dia	26° dia	27° dia	28° dia	29° dia	32° dia	33° dia	34° dia	35° dia	38° dia	41° dia	69° dia
CP1 - D	336,78	336,89	336,91	337	336,99	337,07	337,12	337,16	337,31	337,27	337,4	337,43	337,47	337,57	338,31
CP2 - D	341,88	341,99	342,07	342,08	342,14	342,22	342,25	342,27	342,4	342,33	342,46	342,43	342,55	342,7	343,25
CP3 - D	342,6	342,75	342,81	342,83	342,89	342,92	343,01	343,06	343,17	343,19	343,32	343,29	343,44	343,48	344,24
CP4 - D	341,45	341,53	341,58	341,62	341,7	341,74	341,8	341,81	341,96	341,96	342,23	342,23	342,23	342,36	
CP5 - D	343,99	344,06	344,03	344,11	344,12	344,22	344,27	344,3	344,39	344,4	344,48	344,5	344,59	344,71	
CP6 - D	346,2	346,34	346,35	346,45	346,48	346,51	346,55	346,6	346,66	346,73	346,75	346,81	346,96	347,08	
CP7 - D	343,85	343,96	343,99	344,05	344,11	344,23	344,26	344,29	344,35	344,37	344,43	344,46	344,55	344,62	345,53
CP8 - D	349,27	349,4	349,46	349,49	349,52	349,57	349,66	349,7	349,85	349,85	350,05	350,06	350,05	350,17	350,89
CP9 - D	348,62	348,78	348,83	348,87	348,93	349,01	349,02	349,04	349,18	349,14	349,41	349,32	349,31	349,5	350,34
CP10 - D	340,87	341,03	341,08	341,13	341,17	341,21	341,26	341,3	341,31	341,2	341,33	341,47	341,5	341,59	
Média	343,551	343,673	343,71	343,763	343,81	343,87	343,92	343,953	344,06	344,04	344,19	344,2	344,265	344,38	345,42
Perda de massa	0,0975	0,0971	0,0970	0,0969	0,0968	0,0966	0,0965	0,0964	0,0961	0,0962	0,0958	0,0958	0,0956	0,0953	0,0926

Massa média dos CPs no dia da desmoldagem do traço D	Idade	Perda de massa	% da perda	Massa média dos CPs (%)
380,65	1	0	0,00	100,00
	3	0,0334	3,34	96,66
	4	0,0473	4,73	95,27
	5	0,0578	5,78	94,22
	6	0,0704	7,04	92,96
	7	0,0753	7,53	92,47
	8	0,0792	7,92	92,08
	10	0,09	9,00	91,00
	11	0,0928	9,28	90,72
	12	0,0937	9,37	90,63
	13	0,0965	9,65	90,35
	15	0,0969	9,69	90,31
	17	0,097	9,70	90,30
	18	0,0973	9,73	90,27
	19	0,0974	9,74	90,26
	20	0,0975	9,75	90,25
	22	0,0971	9,71	90,29
	24	0,097	9,70	90,30
	25	0,0969	9,69	90,31
	26	0,0968	9,68	90,32
	27	0,0966	9,66	90,34
	28	0,0965	9,65	90,35
	29	0,0964	9,64	90,36
	32	0,0961	9,61	90,39
	33	0,0962	9,62	90,38
	34	0,0958	9,58	90,42
	35	0,0958	9,58	90,42
	38	0,0956	9,56	90,44
	41	0,0953	9,53	90,47
	69	0,0926	9,26	90,74

Idade	Massa média dos CPs (%)
1	100,00
3	96,66
4	95,27
5	94,22
6	92,96
7	92,47
8	92,08
10	91,00
11	90,72
12	90,63
13	90,35
15	90,31
17	90,30
18	90,27
19	90,26
20	90,25
22	90,29
24	90,30
25	90,31
26	90,32
27	90,34
28	90,35
29	90,36
32	90,39
33	90,38
34	90,42
35	90,42
38	90,44
41	90,47
69	90,74



Obs:
Após o 22º dia a massa começa a se elevar

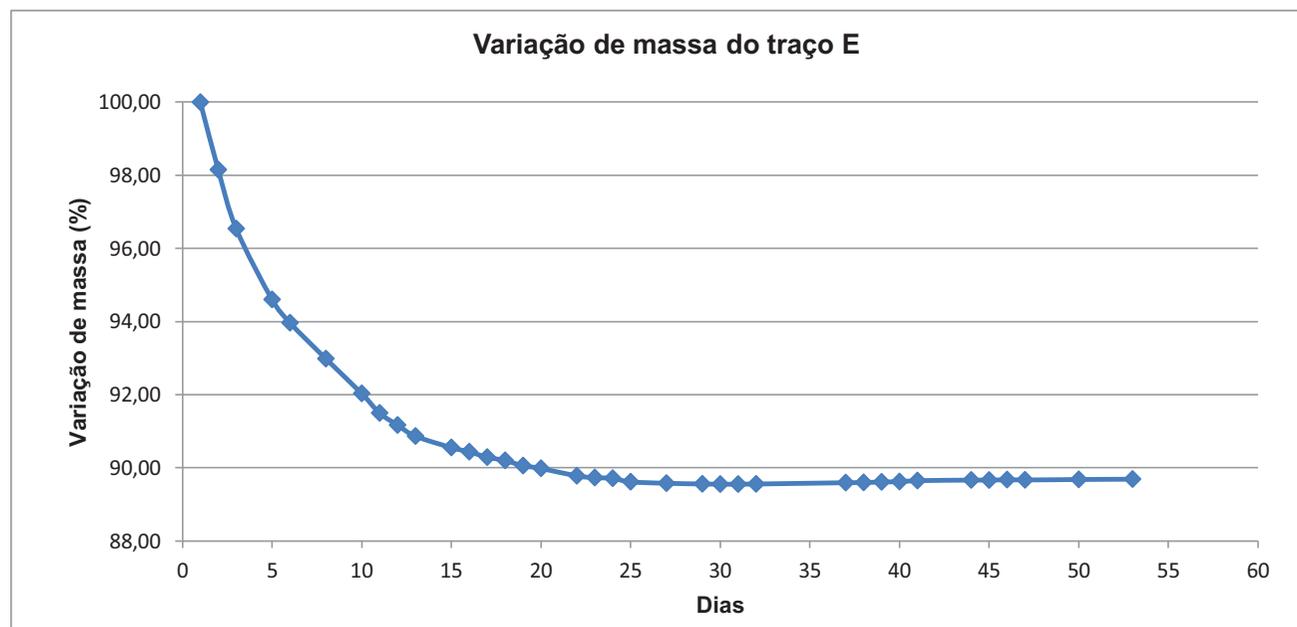
TRAÇO E	Desmoldagem	2° dia	3° dia	5° dia	6° dia	8° dia	10° dia	11° dia	12° dia	13° dia	15° dia	16° dia	17° dia	18° dia	19° dia
CP1 - E	384,17	378,49	371,98	364,76	362,01	356,08	348,64	348,34	347,7	346,4	345,44	345,46	345,19	344,9	344,44
CP2 - E	385,01	381,32	375,5	365,47	361,73	357,31	353,72	352,68	350,26	348,78	347,57	347,36	346,01	345,65	345,21
CP3 - E	384,05	378,09	373,4	365,65	360,72	355,66	353,83	351,95	350,95	350,54	349,64	349,06	348,52	347,87	346,71
CP4 - E	386,04	379,3	368,02	362	361,29	360,6	357,16	356,23	355,69	354,18	353,29	352,32	351,54	350,94	350,43
CP5 - E	376,45	368,14	363,19	353,61	351,73	345,91	343,12	342,27	340,22	339,88	338,8	338,63	338,35	338,17	337,7
CP6 - E	381,53	372,56	365,28	354,88	353,85	352,58	349,97	349,08	348,91	347,54	347,3	347,05	346,65	346,32	345,89
CP7 - E	376,58	367,86	363,79	357,89	356,28	353,77	350,5	347,87	345,82	344,55	342,79	342,23	341,65	341,44	341,15
CP8 - E	381,74	372,4	365,19	359,11	358,21	356,42	351,98	348,9	347,56	346,93	344,17	344,25	344	343,73	343,2
CP9 - E	383,22	375,3	372,55	367,81	363,97	358,44	353,16	349,94	348,27	347,33	346,14	344,78	344,2	343,88	343,31
CP10 - E	378,44	373,27	366,35	360,12	357,19	352,72	351,14	345,56	344,84	342,55	341,63	341,22	340,6	340,39	339,79
Média	381,72	374,673	368,53	361,13	358,7	354,95	351,32	349,282	348,02	346,87	345,68	345,24	344,67	344,33	343,78
	381,72														
Perda de massa		0,0185	0,0346	0,0539	0,0603	0,0701	0,0796	0,0850	0,0883	0,0913	0,0944	0,0956	0,0971	0,0980	0,0994

TRAÇO E	20° dia	22° dia	23° dia	24° dia	25° dia	27° dia	29° dia	30° dia	31° dia	32° dia	37° dia	38° dia	39° dia	40° dia	41° dia
CP1 - E	344,13	343,13	342,98	342,95	342,66										
CP2 - E	344,94	344,38	344,07	344,02	343,64	343,71	343,6	343,58	343,59	343,6	343,76	343,78	343,85	343,88	344,06
CP3 - E	346,41	345,88	345,46	345,38	344,93	344,99	344,85	344,82	344,81	344,82	344,96	344,99	345,03	345,07	345,23
CP4 - E	350,31	349,29	349,15	349,11	348,83	348,82	348,73	348,71	348,65	348,68	348,8	348,82	348,87	348,89	348,93
CP5 - E	337,48	336,91	336,85	336,86	336,67	336,75	336,75	336,73	336,74	336,77	336,91	336,93	336,97	337,05	337,14
CP6 - E	345,47	344,08	343,82	343,77	343,39										
CP7 - E	340,89	340,2	339,97	339,92	339,48	339,4	339,36	339,36	339,38	339,42	339,56	339,59	339,66	339,69	339,77
CP8 - E	343,07	342,43	342,20	342,17	341,87										
CP9 - E	342,8	342,08	341,8	341,8	341,32										
CP10 - E	339,54	338,82	338,73	338,68	338,23	338,03	337,99	337,94	337,97	337,96	338,06	338,06	338,13	338,13	338,21
Média	343,50	342,72	342,54	342,47	342,10	341,95	341,88	341,86	341,86	341,88	342,01	342,03	342,09	342,12	342,22
Perda de massa	0,1001	0,1022	0,1026	0,1028	0,1038	0,1042	0,1044	0,1044	0,1044	0,1044	0,1040	0,1040	0,1038	0,1037	0,1035

TRAÇO E	44° dia	45° dia	46° dia	47° dia	50° dia	53° dia
CP1 - E						
CP2 - E	344,12	344,07	344,07	344,07	344,1	344,14
CP3 - E	345,29	345,23	345,23	345,21	345,3	345,37
CP4 - E	349,01	349,03	349,13	349,06	349,11	349,17
CP5 - E	337,19	337,21	337,28	337,29	337,29	337,34
CP6 - E						
CP7 - E	339,84	339,86	339,93	339,86	339,93	340,01
CP8 - E						
CP9 - E						
CP10 - E	338,25	338,26	338,29	338,3	338,34	338,24
Média	342,28	342,28	342,32	342,30	342,35	342,38
Perda de massa	0,1033	0,1033	0,1032	0,1033	0,1032	0,1031

Massa média dos CPs no dia da desmoldagem do traço E	Idade	Perda de massa	% da perda	Massa média dos CPs (%)
381,72	1	0	0,00	100,00
	2	0,0185	1,85	98,15
	3	0,0346	3,46	96,54
	5	0,0539	5,39	94,61
	6	0,0603	6,03	93,97
	8	0,0701	7,01	92,99
	10	0,0796	7,96	92,04
	11	0,0850	8,50	91,50
	12	0,0883	8,83	91,17
	13	0,0913	9,13	90,87
	15	0,0944	9,44	90,56
	16	0,0956	9,56	90,44
	17	0,0971	9,71	90,29
	18	0,0980	9,80	90,20
	19	0,0994	9,94	90,06
	20	0,1001	10,01	89,99
	22	0,1022	10,22	89,78
	23	0,1026	10,26	89,74
	24	0,1028	10,28	89,72
	25	0,1038	10,38	89,62
27	0,1042	10,42	89,58	
29	0,1044	10,44	89,56	
30	0,1044	10,44	89,56	
31	0,1044	10,44	89,56	
32	0,1044	10,44	89,56	
37	0,1040	10,40	89,60	
38	0,1040	10,40	89,60	
39	0,1038	10,38	89,62	
40	0,1037	10,37	89,63	
41	0,1035	10,35	89,65	
44	0,1033	10,33	89,67	
45	0,1033	10,33	89,67	
46	0,1032	10,32	89,68	
47	0,1033	10,33	89,67	
50	0,1032	10,32	89,68	
53	0,1031	10,31	89,69	

Idade	Massa média dos CPs (%)
1	100,00
2	98,15
3	96,54
5	94,61
6	93,97
8	92,99
10	92,04
11	91,50
12	91,17
13	90,87
15	90,56
16	90,44
17	90,29
18	90,20
19	90,06
20	89,99
22	89,78
23	89,74
24	89,72
25	89,62
27	89,58
29	89,56
30	89,56
31	89,56
32	89,56
37	89,60
38	89,60
39	89,62
40	89,63
41	89,65
44	89,67
45	89,67
46	89,68
47	89,67
50	89,68
53	89,69



APÊNDICE C.5 - RESULTADOS DAS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS À COMPRESSÃO E À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Apêndice C.5 - Resultados das resistências mecânicas à compressão e à tração na flexão

Traço A - COMPRESSÃO						
IDADE		Tn.f	0	Kg.f/cm ²	MPa	Media
		28 dias	0,3	300	15,28	
	0,23	230	11,72	1,17		
	0,26	260	13,25	1,32		
	0,24	240	12,23	1,22		
60 dias		0,3	300	15,28	1,53	1,62
		0,33	330	16,81	1,68	
		0,34	340	17,32	1,73	
		0,3	300	15,28	1,53	
9 meses		0,43	430	21,91	2,19	2,26
		0,44	440	22,41	2,24	
		0,46	460	23,43	2,34	

Traço C - COMPRESSÃO						
IDADE		Tn.f	Kg.f	Kg.f/cm ²	MPa	Media
		30 dias		0,12	120	
	0,12		120	6,11	0,61	
	0,13		130	6,62	0,66	
	0,13		130	6,62	0,66	
60 dias		0,15	150	7,64	0,76	0,75
		0,15	150	7,64	0,76	
		0,15	150	7,64	0,76	
		0,14	140	7,13	0,71	
9 meses		0,09	90	4,58	0,46	0,53
		0,11	110	5,60	0,56	
		0,11	110	5,60	0,56	
		0,11	110	5,60	0,56	

Traço B - COMPRESSÃO						
IDADE		Tn.f	Kg.f	Kg.f/cm ²	MPa	Media
		28 dias		0,18	180	
	0,17		170	8,66	0,87	
	0,16		160	8,15	0,82	
	0,17		170	8,66	0,87	
60 dias		0,17	170	8,66	0,87	0,98
		0,18	180	9,17	0,92	
		0,2	200	10,19	1,02	
		0,2	200	10,19	1,02	
9 meses		0,18	180	9,17	0,92	0,92
		0,18	180	9,17	0,92	
		0,18	180	9,17	0,92	
		0,19	190	9,68	0,97	

Traço D - COMPRESSÃO						
IDADE		Tn.f	Kg.f	Kg.f/cm ²	MPa	Media
		28 dias		0,14	140	
	0,14		140	7,13	0,71	
	0,16		160	8,15	0,82	
	0,15		150	7,64	0,76	
60 dias		0,19	190	9,68	0,97	0,96
		0,19	190	9,68	0,97	
		0,19	190	9,68	0,97	
		0,18	180	9,17	0,92	
9 meses		0,08	80	4,08	0,41	0,45
		0,09	90	4,58	0,46	
		0,09	90	4,58	0,46	
		0,09	90	4,58	0,46	

Traço E - COMPRESSÃO						
IDADE		Tn.f	Kg.f	Kg.f/cm ²	MPa	Media
		28 dias	0,15	150	7,64	
	0,19	190	9,68	0,97		
	0,2	200	10,19	1,02		
	0,18	180	9,17	0,92		
60 dias		0,2	200	10,19	1,02	1,00
		0,18	180	9,17	0,92	
		0,19	190	9,68	0,97	
9 meses		0,2	200	10,19	1,02	0,53
		0,11	110	5,60	0,56	
		0,1	100	5,09	0,51	
		0,1	100	5,09	0,51	

LEGENDA:
Tn.f = Tonelada-força
Kg.f = Quilograma-força
OBSERVAÇÕES:
1 Tn.f = 1000 Kg.f
Kg.f/cm ² /10 = MPa
Área = 3,14 x r ² = 3,14 x 2,5 = 19,6
r = 2,5 cm

Traço A - TRAÇÃO NA FLEXÃO						
IDADE		Tn.f	Kg.f	Kg.f/cm ²	MPa	Media
		28 dias	0,08	80	5,00	
	0,09	90	5,63	0,56		
	0,09	90	5,63	0,56		
	0,09	90	5,63	0,56		
60 dias		0,1	100	6,25	0,63	0,69
		0,12	120	7,50	0,75	
		0,1	100	6,25	0,63	
		0,12	120	7,50	0,75	

Traço D - TRAÇÃO NA FLEXÃO						
IDADE		Tn.f	Kg.f	Kg.f/cm ²	MPa	Media
		28 dias	0,08	80	5,00	
	0,09	90	5,63	0,56		
	0,08	80	5,00	0,50		
	0,08	80	5,00	0,50		
	0,09	90	5,63	0,56		
60 dias		0,09	90	5,63	0,56	0,56
		0,09	90	5,63	0,56	
		0,09	90	5,63	0,56	
		0,09	90	5,63	0,56	

Traço B - TRAÇÃO NA FLEXÃO						
IDADE		Tn.f	Kg.f	Kg.f/cm ²	MPa	Media
		28 dias	0,09	90	5,63	
	0,08	80	5,00	0,50		
	0,09	90	5,63	0,56		
	0,08	80	5,00	0,50		
60 dias		0,08	80	5,00	0,50	0,54
	0,08	80	5,00	0,50		
	0,1	100	6,25	0,63		

Traço E - TRAÇÃO NA FLEXÃO						
IDADE		Tn.f	Kg.f	Kg.f/cm ²	MPa	Media
		28 dias	0,12	120	7,50	
	0,12	120	7,50	0,75		
	0,13	130	8,13	0,81		
	0,13	130	8,13	0,81		
60 dias		0,09	90	5,63	0,56	0,56
	0,09	90	5,63	0,56		
	0,09	90	5,63	0,56		
	0,08	80	5,00	0,50		

Traço C - TRAÇÃO NA FLEXÃO						
IDADE		Tn.f	Kg.f	Kg.f/cm ²	MPa	Media
		28 dias	0,08	80	5,00	
	0,08	80	5,00	0,50		
	0,08	80	5,00	0,50		
	0,08	80	5,00	0,50		
60 dias		0,08	80	5,00	0,50	0,54
	0,09	90	5,63	0,56		
	0,09	90	5,63	0,56		

APÊNDICE C.6 - RESULTADOS DO ENSAIO DE CAPILARIDADE

Capilaridade da argamassa A aos 30 dias				Capilaridade da argamassa A aos 30 dias			
Peso dos CPs (em gramas)				Aumento de peso (gramas)			
Tempo (min)	CP6	CP7	CP8	Tempo (min)	CP6	CP7	CP8
0	456,45	463,54	459,72	0	0	0	0
4	460,68	467,38	463,74	4	4,23	3,84	4,02
10	462,46	469	465,42	10	6,01	5,46	5,7
16	463,75	470,18	466,66	16	7,3	6,64	6,94
25	465,12	471,5	467,98	25	8,67	7,96	8,26
36	466,49	472,78	469,3	36	10,04	9,24	9,58
49	468,24	474,41	470,98	49	11,79	10,87	11,26
64	469,59	475,7	472,32	64	13,14	12,16	12,6
81	470,91	476,93	473,58	81	14,46	13,39	13,86
90	471,51	477,53	474,21	90	15,06	13,99	14,49
100	472,48	478,19	474,8	100	16,03	14,65	15,08

Capilaridade da argamassa A aos 30 dias						
Tempo (min)	CP6		CP7		CP8	
	Aumento do peso	At	Aumento do peso	At	Aumento do peso	At
0	0	0	0	0	0	0
4	4,23	0,26	3,84	0,24	4,02	0,25
10	6,01	0,38	5,46	0,34	5,7	0,36
16	7,3	0,46	6,64	0,41	6,94	0,43
25	8,67	0,54	7,96	0,50	8,26	0,52
36	10,04	0,63	9,24	0,58	9,58	0,60
49	11,79	0,74	10,87	0,68	11,26	0,70
64	13,14	0,82	12,16	0,76	12,6	0,79
81	14,46	0,90	13,39	0,84	13,86	0,87
90	15,06	0,94	13,99	0,87	14,49	0,91
100	16,03	1,00	14,65	0,92	15,08	0,94

Tempo (min)	At - CP6	At - CP7	At - CP8	At - Média
0	0	0	0	0
4	0,26	0,24	0,25	0,25
10	0,38	0,34	0,36	0,36
16	0,46	0,41	0,43	0,44
25	0,54	0,50	0,52	0,52
36	0,63	0,58	0,60	0,60
49	0,74	0,68	0,70	0,71
64	0,82	0,76	0,79	0,79
81	0,90	0,84	0,87	0,87
90	0,94	0,87	0,91	0,91
100	1,00	0,92	0,94	0,95

Capilaridade da argamassa A aos 30 dias	
Tempo (min)	At média
0	0
2	0,25
3,16	0,36
4	0,44
5	0,52
6	0,60
7	0,71
8	0,79
9	0,87
9,48	0,91
10	0,95

$At = mt - m0 / 16$

At = absorção de água por capilaridade, para cada tempo (g/cm²);

mt = é a massa do corpo de prova em cada tempo, em gramas;

m0 é massa inicial do corpo de prova, em gramas;

t corresponde aos tempos de 10 min e 90 min, em segundos

Capilaridade da argamassa B aos 30 dias			
Peso dos CPs (em gramas)			
Tempo (min)	CP2	CP5	CP9
0	447,83	443,83	446,31
4	454,52	449,83	452,25
10	457,86	453,17	455,5
16	460,08	455,39	457,72
25	462,41	457,84	460,05
36	464,72	460,38	462,59
49	467,43	462,84	464,85
64	469,73	465,4	467,4
81	472,01	467,71	469,7
90	473,18	469,11	470,87
100	474,48	470,39	472,18

Capilaridade da argamassa B aos 30 dias			
Aumento de peso (gramas)			
Tempo (min)	CP2	CP5	CP9
0	0	0	0
4	6,69	6	5,94
10	10,03	9,34	9,19
16	12,25	11,56	11,41
25	14,58	14,01	13,74
36	16,89	16,55	16,28
49	19,6	19,01	18,54
64	21,9	21,57	21,09
81	24,18	23,88	23,39
90	25,35	25,28	24,56
100	26,65	26,56	25,87

Capilaridade da argamassa B aos 30 dias						
Tempo (min)	CP2		CP5		CP9	
	Aumento do peso	At	Aumento do peso	At	Aumento do peso	At
0	0	0	0	0	0	0
4	6,69	0,42	6	0,38	5,94	0,37
10	10,03	0,63	9,34	0,58	9,19	0,57
16	12,25	0,77	11,56	0,72	11,41	0,71
25	14,58	0,91	14,01	0,88	13,74	0,86
36	16,89	1,06	16,55	1,03	16,28	1,02
49	19,6	1,23	19,01	1,19	18,54	1,16
64	21,9	1,37	21,57	1,35	21,09	1,32
81	24,18	1,51	23,88	1,49	23,39	1,46
90	25,35	1,58	25,28	1,58	24,56	1,54
100	26,65	1,67	26,56	1,66	25,87	1,62

Tempo (min)	At - CP2	At - CP5	At - CP9	At - Média
0	0	0	0	0
4	0,42	0,38	0,37	0,39
10	0,63	0,58	0,57	0,60
16	0,77	0,72	0,71	0,73
25	0,91	0,88	0,86	0,88
36	1,06	1,03	1,02	1,04
49	1,23	1,19	1,16	1,19
64	1,37	1,35	1,32	1,35
81	1,51	1,49	1,46	1,49
90	1,58	1,58	1,54	1,57
100	1,67	1,66	1,62	1,65

Capilaridade da argamassa B aos 30 dias	
Tempo (min)	At média
0	0
2	0,39
3,16	0,60
4	0,73
5	0,88
6	1,04
7	1,19
8	1,35
9	1,49
9,48	1,57
10	1,65

$$At = mt - m0 / 16$$

At = absorção de água por capilaridade, para cada tempo (g/cm²);

mt = é a massa do corpo de prova em cada tempo, em gramas;

m0 é massa inicial do corpo de prova, em gramas;

t corresponde aos tempos de 10 min e 90 min, em segundos

Capilaridade da argamassa C aos 30 dias			
Peso dos CPs (em gramas)			
Tempo (min)	CP1	CP5	CP6
0	456,33	450,1	459,87
4	459,63	453,59	463,87
10	462,2	456,06	466
16	464,1	457,94	468,24
25	466,36	460,1	470,78
36	468,47	462,31	473,42
49	470,5	464,41	475,78
64	472,5	466,48	478,16
81	474,48	468,54	480,48
90	475,55	469,6	481,75
100	476,61	470,71	482,95

Capilaridade da argamassa C aos 30 dias			
Aumento de peso (gramas)			
Tempo (min)	CP1	CP5	CP6
0	0	0	0
4	3,3	3,49	4
10	5,87	5,96	6,13
16	7,77	7,84	8,37
25	10,03	10	10,91
36	12,14	12,21	13,55
49	14,17	14,31	15,91
64	16,17	16,38	18,29
81	18,15	18,44	20,61
90	19,22	19,5	21,88
100	20,28	20,61	23,08

Capilaridade da argamassa C aos 30 dias						
Tempo (min)	CP1		CP5		CP6	
	Aumento do peso	At	Aumento do peso	At	Aumento do peso	At
0	0	0	0	0	0	0
4	3,3	0,21	3,49	0,22	4	0,25
10	5,87	0,37	5,96	0,37	6,13	0,38
16	7,77	0,49	7,84	0,49	8,37	0,52
25	10,03	0,63	10	0,63	10,91	0,68
36	12,14	0,76	12,21	0,76	13,55	0,85
49	14,17	0,89	14,31	0,89	15,91	0,99
64	16,17	1,01	16,38	1,02	18,29	1,14
81	18,15	1,13	18,44	1,15	20,61	1,29
90	19,22	1,20	19,5	1,22	21,88	1,37
100	20,28	1,27	20,61	1,29	23,08	1,44

Tempo (min)	At - CP1	At - CP5	At - CP6	At - Média
0	0	0	0	0
4	0,21	0,22	0,25	0,22
10	0,37	0,37	0,38	0,37
16	0,49	0,49	0,52	0,50
25	0,63	0,63	0,68	0,64
36	0,76	0,76	0,85	0,79
49	0,89	0,89	0,99	0,92
64	1,01	1,02	1,14	1,06
81	1,13	1,15	1,29	1,19
90	1,20	1,22	1,37	1,26
100	1,27	1,29	1,44	1,33

Capilaridade da argamassa C aos 30 dias	
Tempo (min)	At média
0	0
2	0,22
3,16	0,37
4	0,50
5	0,64
6	0,79
7	0,92
8	1,06
9	1,19
9,48	1,26
10	1,33

$$At = mt - m0 / 16$$

At = absorção de água por capilaridade, para cada tempo (g/cm²);

mt = é a massa do corpo de prova em cada tempo, em gramas;

m0 é massa inicial do corpo de prova, em gramas;

t corresponde aos tempos de 10 min e 90 min, em segundos

Capilaridade da argamassa D aos 31 dias			
Peso dos CPs (em gramas)			
Tempo (min)	CP3	CP7	CP8
0	456,19	446,27	445,8
4	460,45	450,22	450,36
10	464,8	453,38	454,52
16	467,57	455,74	457,35
25	470,63	458,3	460,6
36	473,94	461,08	464,04
49	476,98	463,59	467,29
64	479,89	466,09	470,35
81	482,74	468,54	473,43
90	484,24	469,9	475,1
100	485,83	471,29	476,78

Capilaridade da argamassa D aos 31 dias			
Aumento de peso (gramas)			
Tempo (min)	CP3	CP7	CP8
0	0	0	0
4	4,26	3,95	4,56
10	8,61	7,11	8,72
16	11,38	9,47	11,55
25	14,44	12,03	14,8
36	17,75	14,81	18,24
49	20,79	17,32	21,49
64	23,7	19,82	24,55
81	26,55	22,27	27,63
90	28,05	23,63	29,3
100	29,64	25,02	30,98

Capilaridade da argamassa D aos 31 dias						
Tempo (min)	CP3		CP7		CP8	
	Aumento do peso	At	Aumento do peso	At	Aumento do peso	At
0	0	0	0	0	0	0
4	4,26	0,27	3,95	0,25	4,56	0,29
10	8,61	0,54	7,11	0,44	8,72	0,54
16	11,38	0,71	9,47	0,59	11,55	0,72
25	14,44	0,90	12,03	0,75	14,8	0,93
36	17,75	1,11	14,81	0,93	18,24	1,14
49	20,79	1,30	17,32	1,08	21,49	1,34
64	23,7	1,48	19,82	1,24	24,55	1,53
81	26,55	1,66	22,27	1,39	27,63	1,73
90	28,05	1,75	23,63	1,48	29,3	1,83
100	29,64	1,85	25,02	1,56	30,98	1,94

Tempo (min)	At - CP3	At - CP7	At - CP8	At - Média
0	0	0	0	0
4	0,27	0,25	0,29	0,27
10	0,54	0,44	0,54	0,51
16	0,71	0,59	0,72	0,68
25	0,90	0,75	0,93	0,86
36	1,11	0,93	1,14	1,06
49	1,30	1,08	1,34	1,24
64	1,48	1,24	1,53	1,42
81	1,66	1,39	1,73	1,59
90	1,75	1,48	1,83	1,69
100	1,85	1,56	1,94	1,78

Capilaridade da argamassa D aos 30 dias	
Tempo (min)	At média
0	0
2	0,27
3,16	0,51
4	0,68
5	0,86
6	1,06
7	1,24
8	1,42
9	1,59
9,48	1,69
10	1,78

$At = mt - m0 / 16$

At = absorção de água por capilaridade, para cada tempo (g/cm^2);

mt = é a massa do corpo de prova em cada tempo, em gramas;

m0 é massa inicial do corpo de prova, em gramas;

t corresponde aos tempos de 10 min e 90 min, em segundos

Capilaridade da argamassa E aos 30 dias			
Peso dos CPs (em gramas)			
Tempo (min)	CP13	CP23	CP25
0	452,54	451,1	458,47
4	460,55	460,23	466,31
10	464,83	465,3	470,75
16	468,13	468,74	474,5
25	471,53	472,97	477,62
36	474,81	476,94	480,88
49	478,14	481,06	484,42
64	481,39	484,87	487,61
81	484,51	488,58	490,74
90	485,86	490,56	492,44
100	487,06	492,59	494,18

Capilaridade da argamassa E aos 30 dias			
Aumento de peso (gramas)			
Tempo (min)	CP13	CP23	CP25
0	0	0	0
4	8,01	9,13	7,84
10	12,29	14,2	12,28
16	15,59	17,64	16,03
25	18,99	21,87	19,15
36	22,27	25,84	22,41
49	25,6	29,96	25,95
64	28,85	33,77	29,14
81	31,97	37,48	32,27
90	33,32	39,46	33,97
100	34,52	41,49	35,71

Capilaridade da argamassa E aos 30 dias						
Tempo (min)	CP13		CP23		CP25	
	Aumento do peso	At	Aumento do peso	At	Aumento do peso	At
0	0	0	0	0	0	0
4	8,01	0,50	9,13	0,57	7,84	0,49
10	12,29	0,77	14,2	0,89	12,28	0,77
16	15,59	0,97	17,64	1,10	16,03	1,00
25	18,99	1,19	21,87	1,37	19,15	1,20
36	22,27	1,39	25,84	1,62	22,41	1,40
49	25,6	1,60	29,96	1,87	25,95	1,62
64	28,85	1,80	33,77	2,11	29,14	1,82
81	31,97	2,00	37,48	2,34	32,27	2,02
90	33,32	2,08	39,46	2,47	33,97	2,12
100	34,52	2,16	41,49	2,59	35,71	2,23

Tempo (min)	At - CP13	At - CP23	At - CP25	At - Média
0	0	0	0	0
4	0,50	0,57	0,49	0,52
10	0,77	0,89	0,77	0,81
16	0,97	1,10	1,00	1,03
25	1,19	1,37	1,20	1,25
36	1,39	1,62	1,40	1,47
49	1,60	1,87	1,62	1,70
64	1,80	2,11	1,82	1,91
81	2,00	2,34	2,02	2,12
90	2,08	2,47	2,12	2,22
100	2,16	2,59	2,23	2,33

$$At = mt - m_0 / 16$$

At = absorção de água por capilaridade, para cada tempo (g/cm²);

mt = é a massa do corpo de prova em cada tempo, em gramas;

m₀ é massa inicial do corpo de prova, em gramas;

t corresponde aos tempos de 10 min e 90 min, em segundos

Capilaridade da argamassa E aos 30 dias	
Tempo (min)	At média
0	0
2	0,52
3,16	0,81
4	1,03
5	1,25
6	1,47
7	1,70
8	1,91
9	2,12
9,48	2,22
10	2,33

Apêndice C.6 - Resultados dos ensaio de capilaridade

Capilaridade da argamassa A aos 30 dias	
Tempo (min)	At média
0	0
2	0,25
3,16	0,36
4	0,44
5	0,52
6	0,60
7	0,71
8	0,79
9	0,87
9,48	0,91
10	0,95

Capilaridade da argamassa B aos 30 dias	
Tempo (min)	At média
0	0
2	0,39
3,16	0,60
4	0,73
5	0,88
6	1,04
7	1,19
8	1,35
9	1,49
9,48	1,57
10	1,65

Capilaridade da argamassa C aos 30 dias	
Tempo (min)	At média
0	0
2	0,22
3,16	0,37
4	0,50
5	0,64
6	0,79
7	0,92
8	1,06
9	1,19
9,48	1,26
10	1,33

Capilaridade da argamassa D aos 30 dias	
Tempo (min)	At média
0	0
2	0,27
3,16	0,51
4	0,68
5	0,86
6	1,06
7	1,24
8	1,42
9	1,59
9,48	1,69
10	1,78

Capilaridade da argamassa E aos 30 dias	
Tempo (min)	At média
0	0
2	0,52
3,16	0,81
4	1,03
5	1,25
6	1,47
7	1,70
8	1,91
9	2,12
9,48	2,22
10	2,33

Coeficiente de capilaridade aos 30 dias	
Argamassa A	0,63
Argamassa B	1,08
Argamassa C	0,82
Argamassa D	1,10
Argamassa E	1,52

Capilaridade da argamassa A aos 60 dias			
Peso dos CPs (em gramas)			
Tempo (min)	CP5	CP13	CP16
0	468,66	462,84	460,84
4	472,78	466,63	465,02
10	474,45	468,28	466,87
16	475,66	469,48	468,09
25	477,01	470,78	469,46
36	478,35	472,06	470,78
49	480,33	474,03	472,72
64	481,75	475,44	474,11
81	483,01	476,6	475,29
90	483,71	477,26	475,94
100	484,4	477,91	476,67

Capilaridade da argamassa A aos 60 dias			
Aumento de peso (gramas)			
Tempo (min)	CP5	CP13	CP16
0	0	0	0
4	4,12	3,79	4,18
10	5,79	5,44	6,03
16	7	6,64	7,25
25	8,35	7,94	8,62
36	9,69	9,22	9,94
49	11,67	11,19	11,88
64	13,09	12,6	13,27
81	14,35	13,76	14,45
90	15,05	14,42	15,1
100	15,74	15,07	15,83

Capilaridade da argamassa A aos 60 dias						
Tempo (min)	CP5		CP13		CP16	
	Aumento do peso	At	Aumento do peso	At	Aumento do peso	At
0	0	0	0	0	0	0
4	4,12	0,26	3,79	0,24	4,18	0,26
10	5,79	0,36	5,44	0,34	6,03	0,38
16	7	0,44	6,64	0,42	7,25	0,45
25	8,35	0,52	7,94	0,50	8,62	0,54
36	9,69	0,61	9,22	0,58	9,94	0,62
49	11,67	0,73	11,19	0,70	11,88	0,74
64	13,09	0,82	12,6	0,79	13,27	0,83
81	14,35	0,90	13,76	0,86	14,45	0,90
90	15,05	0,94	14,42	0,90	15,1	0,94
100	15,74	0,98	15,07	0,94	15,83	0,99

Tempo (min)	At - CP5	At - CP13	At - CP16	At - Média
0	0	0	0	0
4	0,26	0,24	0,26	0,25
10	0,36	0,34	0,38	0,36
16	0,44	0,42	0,45	0,44
25	0,52	0,50	0,54	0,52
36	0,61	0,58	0,62	0,60
49	0,73	0,70	0,74	0,72
64	0,82	0,79	0,83	0,81
81	0,90	0,86	0,90	0,89
90	0,94	0,90	0,94	0,93
100	0,98	0,94	0,99	0,97

Capilaridade da argamassa A aos 60 dias	
Tempo (min)	At média
0	0
2	0,25
3,16	0,36
4	0,44
5	0,52
6	0,60
7	0,72
8	0,81
9	0,89
9,48	0,93
10	0,97

$$At = mt - m0 / 16$$

At = absorção de água por capilaridade, para cada tempo (g/cm²);

mt = é a massa do corpo de prova em cada tempo, em gramas;

m0 é massa inicial do corpo de prova, em gramas;

t corresponde aos tempos de 10 min e 90 min, em segundos

Capilaridade da argamassa B aos 60 dias			
Peso dos CPs (em gramas)			
Tempo (min)	CP13	CP14	CP17
0	465,91	460,87	471,51
4	472,08	466,89	478,49
10	475,02	469,77	481,8
16	477,14	471,87	484,15
25	479,56	474,33	486,89
36	481,9	476,7	489,52
49	484,27	479,11	492,13
64	486,53	481,53	494,74
81	488,82	483,86	497,28
90	490,01	485,09	498,57
100	491,27	486,31	499,87

Capilaridade da argamassa B aos 60 dias			
Aumento de peso (gramas)			
Tempo (min)	CP13	CP14	CP17
0	0	0	0
4	6,17	6,02	6,98
10	9,11	8,9	10,29
16	11,23	11	12,64
25	13,65	13,46	15,38
36	15,99	15,83	18,01
49	18,36	18,24	20,62
64	20,62	20,66	23,23
81	22,91	22,99	25,77
90	24,1	24,22	27,06
100	25,36	25,44	28,36

Capilaridade da argamassa B aos 60 dias						
Tempo (min)	CP13		CP14		CP17	
	Aumento do peso	At	Aumento do peso	At	Aumento do peso	At
0	0	0	0	0	0	0
4	6,17	0,39	6,02	0,38	6,98	0,44
10	9,11	0,57	8,9	0,56	10,29	0,64
16	11,23	0,70	11	0,69	12,64	0,79
25	13,65	0,85	13,46	0,84	15,38	0,96
36	15,99	1,00	15,83	0,99	18,01	1,13
49	18,36	1,15	18,24	1,14	20,62	1,29
64	20,62	1,29	20,66	1,29	23,23	1,45
81	22,91	1,43	22,99	1,44	25,77	1,61
90	24,1	1,51	24,22	1,51	27,06	1,69
100	25,36	1,59	25,44	1,59	28,36	1,77

Tempo (min)	At - CP13	At - CP14	At - CP17	At - Média
0	0	0	0	0
4	0,39	0,38	0,44	0,40
10	0,57	0,56	0,64	0,59
16	0,70	0,69	0,79	0,73
25	0,85	0,84	0,96	0,89
36	1,00	0,99	1,13	1,04
49	1,15	1,14	1,29	1,19
64	1,29	1,29	1,45	1,34
81	1,43	1,44	1,61	1,49
90	1,51	1,51	1,69	1,57
100	1,59	1,59	1,77	1,65

Capilaridade da argamassa B aos 60 dias	
Tempo (min)	At média
0	0
2	0,40
3,16	0,59
4	0,73
5	0,89
6	1,04
7	1,19
8	1,34
9	1,49
9,48	1,57
10	1,65

$$At = mt - m_0 / 16$$

At = absorção de água por capilaridade, para cada tempo (g/cm²);

mt = é a massa do corpo de prova em cada tempo, em gramas;

m₀ é massa inicial do corpo de prova, em gramas;

t corresponde aos tempos de 10 min e 90 min, em segundos

Capilaridade da argamassa D aos 60 dias			
Peso dos CPs (em gramas)			
Tempo (min)	CP2	CP6	CP10
0	454,36	457,6	445,13
4	462,76	465,15	451,88
10	466,57	469,62	455,58
16	469,59	472,57	458,24
25	473,01	476,15	461,56
36	476,16	479,37	464,37
49	479,56	482,59	467,46
64	482,74	486,06	470,08
81	485,85	489,02	472,77
90	487,47	490,65	474,16
100	489,27	492,36	475,68

Capilaridade da argamassa D aos 60 dias			
Aumento de peso (gramas)			
Tempo (min)	CP2	CP6	CP10
0	0	0	0
4	8,4	7,55	6,75
10	12,21	12,02	10,45
16	15,23	14,97	13,11
25	18,65	18,55	16,43
36	21,8	21,77	19,24
49	25,2	24,99	22,33
64	28,38	28,46	24,95
81	31,49	31,42	27,64
90	33,11	33,05	29,03
100	34,91	34,76	30,55

Capilaridade da argamassa D aos 60 dias						
Tempo (min)	CP2		CP6		CP10	
	Aumento do peso	At	Aumento do peso	At	Aumento do peso	At
0	0	0	0	0	0	0
4	8,4	0,52	7,55	0,47	6,75	0,42
10	12,21	0,76	12,02	0,75	10,45	0,65
16	15,23	0,95	14,97	0,94	13,11	0,82
25	18,65	1,17	18,55	1,16	16,43	1,03
36	21,8	1,36	21,77	1,36	19,24	1,20
49	25,2	1,58	24,99	1,56	22,33	1,40
64	28,38	1,77	28,46	1,78	24,95	1,56
81	31,49	1,97	31,42	1,96	27,64	1,73
90	33,11	2,07	33,05	2,07	29,03	1,81
100	34,91	2,18	34,76	2,17	30,55	1,91

Tempo (min)	At - CP2	At - CP6	At - CP10	At - Média
0	0	0	0	0
4	0,52	0,47	0,42	0,47
10	0,76	0,75	0,65	0,72
16	0,95	0,94	0,82	0,90
25	1,17	1,16	1,03	1,12
36	1,36	1,36	1,20	1,31
49	1,58	1,56	1,40	1,51
64	1,77	1,78	1,56	1,70
81	1,97	1,96	1,73	1,89
90	2,07	2,07	1,81	1,98
100	2,18	2,17	1,91	2,09

Capilaridade da argamassa D aos 60 dias	
Tempo (min)	At média
0	0
2	0,47
3,16	0,72
4	0,90
5	1,12
6	1,31
7	1,51
8	1,70
9	1,89
9,48	1,98
10	2,09

$$At = mt - m0 / 16$$

At = absorção de água por capilaridade, para cada tempo (g/cm²);

mt = é a massa do corpo de prova em cada tempo, em gramas;

m0 é massa inicial do corpo de prova, em gramas;

t corresponde aos tempos de 10 min e 90 min, em segundos

Capilaridade da argamassa E aos 60 dias			
Peso dos CPs (em gramas)			
Tempo (min)	CP3	CP9	CP10
0	454,62	441,1	441,86
4	459,64	447,37	447,82
10	462,73	450,53	450,96
16	465,12	452,88	453,24
25	467,8	455,56	455,86
36	470,57	458,27	458,53
49	473,23	460,97	461,1
64	475,75	463,48	463,46
81	478,31	466,01	465,86
90	479,56	467,28	467,12
100	480,95	468,69	468,36

Capilaridade da argamassa E aos 60 dias			
Aumento de peso (gramas)			
Tempo (min)	CP3	CP9	CP10
0	0	0	0
4	5,02	6,27	5,96
10	8,11	9,43	9,1
16	10,5	11,78	11,38
25	13,18	14,46	14
36	15,95	17,17	16,67
49	18,61	19,87	19,24
64	21,13	22,38	21,6
81	23,69	24,91	24
90	24,94	26,18	25,26
100	26,33	27,59	26,5

Capilaridade da argamassa E aos 60 dias						
Tempo (min)	CP3		CP9		CP10	
	Aumento do peso	At	Aumento do peso	At	Aumento do peso	At
0	0	0	0	0	0	0
4	5,02	0,31	6,27	0,39	5,96	0,37
10	8,11	0,51	9,43	0,59	9,1	0,57
16	10,5	0,66	11,78	0,74	11,38	0,71
25	13,18	0,82	14,46	0,90	14	0,88
36	15,95	1,00	17,17	1,07	16,67	1,04
49	18,61	1,16	19,87	1,24	19,24	1,20
64	21,13	1,32	22,38	1,40	21,6	1,35
81	23,69	1,48	24,91	1,56	24	1,50
90	24,94	1,56	26,18	1,64	25,26	1,58
100	26,33	1,65	27,59	1,72	26,5	1,66

Tempo (min)	At - CP3	At - CP9	At - CP10	At - Média
0	0	0	0	0
4	0,31	0,39	0,37	0,36
10	0,51	0,59	0,57	0,55
16	0,66	0,74	0,71	0,70
25	0,82	0,90	0,88	0,87
36	1,00	1,07	1,04	1,04
49	1,16	1,24	1,20	1,20
64	1,32	1,40	1,35	1,36
81	1,48	1,56	1,50	1,51
90	1,56	1,64	1,58	1,59
100	1,65	1,72	1,66	1,68

Capilaridade da argamassa E aos 60 dias	
Tempo (min)	At média
0	0
2	0,36
3,16	0,55
4	0,70
5	0,87
6	1,04
7	1,20
8	1,36
9	1,51
9,48	1,59
10	1,68

$At = mt - m0 / 16$

At = absorção de água por capilaridade, para cada tempo (g/cm²);

mt = é a massa do corpo de prova em cada tempo, em gramas;

m0 é massa inicial do corpo de prova, em gramas;

t corresponde aos tempos de 10 min e 90 min, em segundos

Apêndice C.6 - Resultados do ensaio de capilaridade

Capilaridade da argamassa A aos 60 dias	
Tempo (min)	At média
0	0
2	0,25
3,16	0,36
4	0,44
5	0,52
6	0,60
7	0,72
8	0,81
9	0,89
9,48	0,93
10	0,97

Capilaridade da argamassa B aos 60 dias	
Tempo (min)	At média
0	0
2	0,40
3,16	0,59
4	0,73
5	0,89
6	1,04
7	1,19
8	1,34
9	1,49
9,48	1,57
10	1,65

Capilaridade da argamassa D aos 60 dias	
Tempo (min)	At média
0	0
2	0,47
3,16	0,72
4	0,90
5	1,12
6	1,31
7	1,51
8	1,70
9	1,89
9,48	1,98
10	2,09

Capilaridade da argamassa E aos 60 dias	
Tempo (min)	At média
0	0
2	0,36
3,16	0,55
4	0,70
5	0,87
6	1,04
7	1,20
8	1,36
9	1,51
9,48	1,59
10	1,68

Coeficiente de capilaridade aos 60 dias	
Argamassa A	0,64
Argamassa B	1,08
Argamassa D	1,35
Argamassa E	1,07

APÊNDICE C.7 - RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO POR IMERSÃO

Absorção	Argamassa B					
	N° dos CPs	m sat	m s	m sat - m s	A	Média
	CP3	374,7	339,97	3473	10,22	10,38
	CP8	376,9	340,88	3602	10,57	
CP10	375,4	340,19	3521	10,35		

Absorção	Argamassa C					
	N° dos CPs	m sat	m s	m sat - m s	A	Média
	CP2	381,87	344,76	3711	10,76	11,05
	CP3	382,84	344,12	3872	11,25	
CP8	379,07	341,12	3795	11,13		

Absorção	Argamassa D					
	N° dos CPs	m sat	m s	m sat - m s	A	Média
	CP3	377,46	343,57	3389	9,86	9,71
	CP7	379,31	344,76	3455	10,02	
CP9	381,91	349,64	3227	9,23		

Absorção	Argamassa E					
	N° dos CPs	m sat	m s	m sat - m s	A	Média
	CP4	384,31	348,31	3600	10,34	10,82
	CP5	374,14	336,7	3744	11,12	
CP10	374,28	337,17	3711	11,01		