

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Programa de Pós-Graduação em Construção Civil**

**Dissertação de Mestrado**

**AVALIAÇÃO DA INTRODUÇÃO DE CAL HIDRATADA NAS  
ARGAMASSAS APLICADAS SOBRE BLOCOS CERÂMICOS E SUA  
INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO E MORFOLOGIA.**

Autor: Giulliano Polito

Orientador: Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior

Co-Orientador: Prof. Dr. Maria Teresa Paulino Aguilar

Belo Horizonte

2008

**AVALIAÇÃO DA INTRODUÇÃO DE CAL HIDRATADA NAS  
ARGAMASSAS APLICADAS SOBRE BLOCOS CERÂMICOS E SUA  
INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO E MORFOLOGIA.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Área de concentração: Construção Civil

Orientador:

Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior

Co-Orientadora:

Prof. Dr. Maria Teresa Paulino Aguilár

Belo Horizonte

2008

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**Escola de Engenharia**

**Programa de Pós-Graduação em Construção Civil: Materiais de Construção**

**DISSERTAÇÃO INTITULADA “AVALIAÇÃO DA INTRODUÇÃO DE CAL HIDRATADA NAS ARGAMASSAS APLICADAS SOBRE BLOCOS CERÂMICOS E SUA INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO E MORFOLOGIA.”, DE AUTORIA DO MESTRANDO GIULLIANO POLITO, DEFENDIDA EM 18 DE MARÇO 2008 E SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA CONSTITUÍDA PELOS PROFESSORES:**

---

Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior  
Orientador - Escola de Engenharia/UFMG

---

Prof. Dr. Maria Teresa Paulino Aguilar  
Co-Orientador - Escola de Engenharia/UFMG

---

Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes  
Escola de Engenharia/UFMG

---

Prof. Dr. Paulo Roberto Gomes Brandão  
Escola de Engenharia/UFMG

*Elevo os olhos para os montes; de onde me  
virá o socorro? O meu socorro vem do  
SENHOR, que fez o céu e a terra.  
(Sl 121: 1-2)*

*Feliz o homem que acha sabedoria, e o  
homem que adquire conhecimento;  
porque melhor é o lucro que ela dá do que o  
da prata, e melhor a sua renda do que o ouro  
mais fino.  
Mais preciosa é do que pérolas, e tudo o que  
podes desejar não é comparável a ela.  
(Pv 3: 13-15)*

## AGRADECIMENTOS

Ao se completar mais esta etapa da vida, é importante olhar para trás e avaliar quantos contribuíram com esta realização. Muitos contribuíram, mas alguns de forma decisiva e direta. Desta forma, expresso aqui meus mais sinceros agradecimentos:

Ao Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Junior, pela sua orientação amiga e incentivo durante todo o trabalho.

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto Gomes Brandão, pela paciência, competência e exemplo de postura profissional. Por apoiar e disponibilizar recursos para a realização dos ensaios microestruturais

À Prof. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilár pelas deliciosas viagens pelo pensamento humano. Por sua integridade e sinceridade que propiciaram um convívio agradável e de amizade ao longo deste período.

Ao Roberto (Laboratório MEV) pela presteza e boa vontade na realização dos ensaios microestruturais.

A todos os colegas e professores do Departamento de Materiais e Construção que estiveram presentes e contribuíram para a conclusão desta Dissertação. Aos funcionários do DEMC e a todos que colaboraram, diretamente ou indiretamente, para a conclusão deste trabalho.

A Parana Engenharia e ao Eng. Sandro pelo apoio na confecção dos painéis de amostra.

A minha mãe Elizeth, pelos sacrifícios de uma vida inteira, pela dignidade e exemplo de coragem.

A minha esposa Elizandra pelo apoio e compreensão diante dos sacrifícios exigidos. Pelo consolo e encorajamento nos momentos difíceis. Pelo amor gratuito.

Ao meu filho Pedro por virar minha vida de cabeça para baixo e por trazer uma nova razão para viver.

Ao mestre da escola da vida, JESUS, que me revela a imensidão do poder de Deus em cada minúscula maravilha por ele criada. Que me ensina a colocar as pessoas acima dos bens e o Ser acima do Ter.

## RESUMO

Este trabalho investiga a resistência de aderência de revestimentos argamassados sobre a alvenaria de blocos cerâmicos, concentrando-se na análise da microestrutura da interface argamassa/substrato, correlacionando-se ao comportamento mecânico da argamassa e à adição de cal hidratada na argamassa. Neste estudo foram avaliados cinco traços distintos, composto de cimento:cal:areia (1:0:6; 1:1:6; 1:2:8; 1:2:10; 0:1:6), aplicados sobre substrato de bloco cerâmico seco, com a utilização de técnicas de preparação e aplicação comuns em canteiros de obra. Para a análise foi utilizada a técnica de microscopia eletrônica de varredura com microanalisador EDS (MEV-EDS), a fim de identificar os principais produtos de hidratação presentes na interface. A análise por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) foi utilizada para verificar a profundidade de penetração dos produtos de hidratação, além de ensaios de caracterização da argamassa nos estados plástico e endurecido. Os resultados dos estudos microestruturais demonstraram indícios de que a principal fase responsável pela resistência de aderência entre a argamassa e o bloco cerâmico é a etringita. Esta aderência se dá pelo intertravamento dos cristais e pela penetração dos mesmos no interior dos poros do substrato. Foram visualizados cristais de etringita formados no interior dos poros do substrato até uma profundidade de até 500µm. Esta penetração foi confirmada através da observação das variações nas concentrações de elementos químicos, em função da profundidade, utilizando-se a técnica de FRX. Não se observou nenhuma relação direta entre a profundidade de penetração do cálcio e a resistência de aderência. A profundidade e a quantidade de penetração do cálcio estão relacionadas à quantidade de aglomerantes, ou seja, cimento e/ou cal. Foram verificadas diferentes morfologias dos produtos de hidratação dos aglomerantes. Os cristais observados na interface são mais bem formados (euédricos) e maiores do que no restante da matriz e possuem uma orientação preferencial perpendicular à superfície do bloco. Nesta região a presença de etringita é preponderante e, em menores concentrações, o CSH (silicato de cálcio hidratado) e a calcita. Este fato se deve à maior mobilidade dos íons sulfato, alumínio e cálcio durante a hidratação do cimento e à proximidade ao substrato poroso, que proporciona a sucção do fluido contendo estes íons para o seu interior. Observou-se também diferentes morfologias para os cristais de etringita nos diversos traços utilizados, causada provavelmente pela variação do teor de cal e de aglomerante na argamassa. A variação da cal também influenciou na extensão de aderência e no adensamento da argamassa, afetando desta maneira os valores de resistência e a forma de

ruptura. Nos ensaios de arrancamento foi observado que após a ruptura da argamassa, uma fina camada permanece aderida ao tijolo, visível a olho nu, denotando que a ruptura ocorreu pela falta de coesão da argamassa próxima à interface, afastada cerca de 200  $\mu\text{m}$ . Este comportamento deixa a entender que o rompimento não ocorreu na faixa rica em etringita, e sim no interior da camada de argamassa, bem próxima à superfície de contato.

## ABSTRACT

This work aims to investigate the bond strength of the finishing coat of mortar applied onto a ceramic block (brick) masonry, focusing on the analysis of the microstructure of the mortar/substrate interface, correlating to mechanical behavior of the mortar and the addition of hydrated lime in the mortar. Five distinct mortar types applied on the dry ceramic block substrate were assessed, using techniques for preparation and implementing, which are common at the construction site. The study was carried out using the scanning electron microscope with EDS microanalyzer (SEM-EDS), in order to identify the main hydration products present at the interface. Also, X-ray fluorescence spectrometry (XRF) was used to verify the depth of penetration of the hydration products, moreover analysis of characterization of the mortar in hard and plastic form. The results showed evidence that the main phase responsible for the bond strength between the plaster and the ceramic block is etringite. The adherence occurs by the interlocking of etringite crystals and their penetration within the pores of the substrate, which were observed inside these pores until a depth of 500 $\mu$ m. This penetration was confirmed by the variations in the concentrations of related chemical elements, depending on depth, by the XRF technique. It wasn't observed any direct relation between the calcium penetration depth and the bond strength. The depth and calcium penetration quantity is related to the binders quantity, in other words, cement and/or lime. Different morphologies of the hydration products of the binders have been observed. The crystals formed at the interface are more euhedral and larger than the rest of the matrix and have a preferential orientation, perpendicular to the surface of the block. In this region, the presence of etringite is predominant and, in lower concentrations, there is also CSH (calcium silicate hydrate) and calcite. This is due to the increased mobility of sulfate, calcium and aluminum ions during the cement hydration and the proximity to the porous substrate, which provides the suction of the ions-bearing fluid to its interior. Different morphologies of the etringite crystals were also observed for the various mortar types used, probably caused by the variation of the contents of lime and binder in the mortar. The lime variation also influenced the mortar bond extension and thickness, in this way, affecting the strength values and rupture type (form). It was observed in the dig up tests that, after the rupture of the mortar, a thin layer remains bonded to the brick, seen at naked eye, showing that the rupture happened due to the consistency lack of the mortar close to the interface, around 200 $\mu$ m far. This behavior makes clear that the rupture didn't occur along the range full of etringite, but within the mortar layer, near the contact surface.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	22
2. OBJETIVO.....	24
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
3.1. MATERIAIS.....	25
3.1.1. ALVENARIA.....	25
3.1.2. PRINCIPAIS CONSTITUINTES DO REVESTIMENTO.....	26
3.2. CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO.....	55
3.2.1. TRABALHABILIDADE.....	55
3.3. CARACTERÍSTICA E PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO.....	64
3.3.1. ADERÊNCIA.....	64
3.3.2. PERMEABILIDADE.....	75
3.3.3. RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	76
3.3.4. ELASTICIDADE OU CAPACIDADE DE DEFORMAÇÃO.....	78
3.3.5. RETRAÇÃO.....	85
3.4. MICROESTRUTURA.....	87
3.4.1. MICROESTRUTURA DOS COMPOSTOS CIMENTÍCIOS.....	87
3.4.2. ESQUEMA DE HIDRATAÇÃO.....	94
3.4.3. MICROESTRUTURA DA INTERFACE ARGAMASSA/SUBSTRATO.....	95
3.4.4. MÉTODO DE INVESTIGAÇÃO E ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	99
4. METODO.....	105
4.1. SELEÇÃO DOS MATERIAIS E COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	105
4.1.1. BLOCO CERÂMICO.....	105
4.1.2. CIMENTO.....	105
4.1.3. CAL.....	105
4.1.4. AREIA.....	105
4.1.5. ADITIVOS E ADIÇÕES.....	106
4.1.6. PAINÉIS DE ALVENARIA.....	106
4.1.7. TRAÇOS UTILIZADOS.....	107
4.2. APLICAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	107
4.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BLOCO CERÂMICO.....	108
4.3.1. ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	108
4.3.2. IRA (INITIAL RATE OF ABSORPTION – ENSAIOS DE ABSORÇÃO INICIAL)	108

4.4.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO PLÁSTICO	109
4.4.1.	CONSISTÊNCIA (FLOW TABLE) .....	109
4.4.2.	RETENÇÃO DE ÁGUA .....	109
4.4.3.	MASSA ESPECÍFICA E AR INCORPORADO .....	110
4.5.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO .....	110
4.5.1.	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	110
4.5.2.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO .....	111
4.5.3.	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO .....	111
4.6.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA APLICADA .....	111
4.6.1.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	111
4.6.2.	PERMEABILIDADE .....	112
4.7.	AVALIAÇÕES MICROESTRUTURAIS .....	113
4.7.1.	MICROANALISADOR EDS E MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV) .....	113
4.7.2.	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX) .....	116
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	119
5.1.	RESULTADO E DISCUSSÕES DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BLOCO CERÂMICO .....	119
5.1.1.	ABSORÇÃO DE ÁGUA .....	119
5.1.2.	IRA (INITIAL RATE OF ABSORPTION – ENSAIO DE ABSORÇÃO INICIAL)	119
5.2.	RESULTADO E DISCUSSÕES DA CARACT. DOS AGLOMERANTES .....	120
5.2.1.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO .....	120
5.2.2.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA CAL .....	121
5.3.	RESULTADO E DISCUSSÕES DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS .....	123
5.3.1.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA AREIA .....	123
5.4.	RESULTADO E DISCUSSÕES DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO PLÁSTICO .....	124
5.4.1.	CONSISTÊNCIA (FLOW TABLE) .....	124
5.4.2.	RETENÇÃO DE ÁGUA .....	125
5.4.3.	MASSA ESPECÍFICA .....	126
5.4.4.	AR INCORPORADO .....	126
5.5.	RESULTADO E DISCUSSÕES DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO .....	127
5.5.1.	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	127

5.5.2.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	127
5.5.3.	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO .....	128
5.6.	RESULTADO E DISCUSSÕES DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA APLICADA SOBRE A BASE.....	128
5.6.1.	RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO SEGUNDO A NBR 13528 (1996) 128	
5.6.2.	EXTENSÃO DE ADERÊNCIA.....	130
5.6.3.	PERMEABILIDADE A ÁGUA.....	131
5.7.	RESULTADO E DISCUSSÕES DAS ANÁLISES DE CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL .....	137
5.7.1.	MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV) E MICROANALISADOR EDS .....	137
5.7.2.	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX) .....	158
5.8.	COMBINAÇÃO DOS RESULTADOS.....	162
6.	CONCLUSÕES.....	164
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	166
	ANEXO I - PLANILHAS DOS TESTES DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO .....	178

## LISTA DE TABELAS

TABELA III-1 – Característica dos principais componentes do clínquer Portland .....	27
TABELA III-2 – Tipo de cimento Portland em função de sua composição .....	28
TABELA III-3 - Variação nas propriedades de uma argamassa com a alteração da .....	31
TABELA III-4 - Perda de água da argamassa pela sucção dos tijolos em 4 minutos de contato .....	36
TABELA III-5 - Especificação de argamassa para alvenaria.....	37
TABELA III-6 – Massa específica das rochas .....	42
TABELA III-7 - Influência das características granulométricas das areias nas propriedades .	46
TABELA III-8 - Textura Superficial dos agregados (BS 812: Part 1:1975) com exemplos....	49
TABELA III-9 - Propriedades relacionadas com a trabalhabilidade das argamassas .....	56
TABELA III-10– Métodos empregados para avaliar a consistência e a plasticidade das argamassas .....	59
TABELA III-11– Influência do teor de finos (partículas <0,075mm) da mistura seca na plasticidade das argamassas.....	60
TABELA III-12– Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco .....	64
TABELA III-13 – Potencial de fissuração das argamassas (CSTB, 1982).....	85
TABELA III-14– Retração de algumas argamassas e uma pasta, aos 7 e 28 dias (adaptado de FIORITTO, 1994).....	86
TABELA IV-15 – Traços Cimento:Cal:Areia utilizados .....	107
TABELA V-16 – Absorção de água do bloco cerâmico de acordo com a ABNT NBR 8947 (1992) .....	119
TABELA V-17 – IRA do bloco cerâmico segundo a ASTM C67-97.....	120
TABELA V-18 – Ensaio de caracterização CPIIE32.....	120
TABELA V-19 – Ensaio de caracterização da cal, parte 1.....	121
TABELA V-20– Ensaio de caracterização da cal, parte 2.....	122
TABELA V-21 – Resultado de análise granulométrica da areia.....	123
TABELA V-22 Índice de consistência padrão segundo NBR 13276 (2002).....	124
TABELA V-23 - Retenção de águas segundo BSI 4551 (Mortars, Screeds and plaster. Londres 1981 .....	125
TABELA V-24 – Massa específica segundo NBR 13278 (1995).....	126
TABELA V-25 – Teor de ar incorporado segundo NBR 13278 (1995).....	126
TABELA V-26 – Resistência à compressão segundo NBR 13279 (1995).....	127
TABELA V-27 – Resistência à tração na flexão.....	127

TABELA V-28 – Módulo de elasticidade dinâmico obtido através de frequência ressonante .....	128
TABELA V-29 – Resistência de aderência à tração segundo ABNT NBR 13528 .....	129
TABELA V-30 – Medidas de permeabilidade na argamassa 1:0:6 .....	131
TABELA V-31 - Medidas de permeabilidade na argamassa 1:1:6 .....	132
TABELA V-32– Medidas de permeabilidade na argamassa 1:2:8 .....	133
TABELA V-33– Medidas de permeabilidade na argamassa 1:2:10 .....	134
TABELA V-34– Medidas de permeabilidade na argamassa 0:1:6 .....	135
TABELA V-35 – Maior valor da permeabilidade à água “in situ” segundo CSTC (1982)...	136
TABELA V-36 – Microanálise do bloco cerâmico puro .....	138
TABELA V-37 – Microanálise EDS, ponto 1 da figura 52 .....	139
TABELA V-38 - Microanálise EDS, ponto 1 da figura 53 .....	140
TABELA V-39 – Microanálise EDS da FIGURA 54D .....	141
TABELA V-40 – Microanálise EDS da fase da FIGURA 56 .....	144
TABELA V-41 – Microanálise EDS da FIGURA 58 .....	146
TABELA V-42 – Microanálise EDS dos pontos 1 e 2 da FIGURA 59 .....	147
TABELA V-43 – microanálise EDS dos pontos 1 e 2 da FIGURA 61.....	148
TABELA V-44 – Microanálise EDS dos pontos 1 e 2 da FIGURA 57 .....	150
TABELA V-45 – Microanálise EDS dos pontos 1 e 2 da FIGURA 65 .....	153
TABELA V-46 – Microanálise EDS da FIGURA 66 .....	156
TABELA V-47 – Microanálise EDS da FIGURA 61 .....	156
TABELA V-48 – Microanálise EDS dos pontos 1 e 2 da FIGURA 68 .....	157
TABELA V-49 – Análise dos resultados obtidos pelas argamassas .....	162

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3-1 – Conjunto de benefícios proporcionados pelas argamassas portadoras de cal hidratada .....	33
FIGURA 3-2 Eflorescência resultante de diversos tipos de argamassas.....	34
FIGURA 3-3 – Comparação de tamanho entre os poros da alvenaria e o das partículas de cal hidratada, de cimento portland e de bolhas de ar. ....	35
FIGURA 3-4 - Relação entre a composição da argamassa e resistência a compressão .....	39
FIGURA 3-5 – Representação esquemática da graduação dos agregados em uma mistura ....	45
FIGURA 3-6 – Classificação das formas de agregados .....	48
FIGURA 3-7 – Consistência das argamassas .....	57
FIGURA 3-8 – Variação na consistência pela influência das variações na composição de argamassas.....	58
FIGURA 3-9 – <i>Squeeze Flow</i> .....	61
FIGURA 3-10 – Variação para retenção de água para diferentes argamassas.....	62
FIGURA 3-11 – Perda de água de argamassas em função da sucção dos blocos .....	63
FIGURA 3-12 – Imagem no microscópio eletrônico de varredura obtida pela ampliação. ....	66
FIGURA 3-13 – fatores que exercem influência na aderência de argamassas sobre bases porosas.....	67
FIGURA 3-14 – Fotografias obtidas na lupa estereoscópica com ampliação de 20 vezes .....	68
FIGURA 3-15 – Processos ocorridos durante o desenvolvimento do sistema de aderência mecânico.....	71
FIGURA 3-16 – Etapas da realização do ensaio de determinação da resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa, segundo a NBR 13528 (ABNT, 1995) .....	72
FIGURA 3-17 - Tipos de ruptura no ensaio de aderência à tração de revestimentos de argamassa, considerando o revestimento aplicado diretamente ao substrato (sem chapisco)..	73
FIGURA 3-18 – Exemplo de determinação das relações de falha, para representação gráfica pelo método das otimizações de quadrantes.....	74
FIGURA 3-19 – Representação gráfica pelo método da otimização de quadrantes proposto por PAREK et al. (1995) .....	75
FIGURA 3-20 – Aspecto de curvas de módulo de deformação estático à tração e à compressão de argamassas (TAMIN, 1986) .....	82
FIGURA 3-21 – Classificação das areias quanto à distribuição granulométrica e sua influência na retração plástica .....	87
FIGURA 3-22 – Fotomicrografia de morfologia típica de portlandita. Imagem obtida com eletrons retroespalhados .....	88
FIGURA 3-23 – Fotomicrografia da morfologia da etringita. Imagem gerada com elétrons retroespalhadosFonte: FREITAS, 2007.....	89

FIGURA 3-24 – Dimensão de sólidos e poros na hidratação da pasta de cimento .....	91
FIGURA 3-25 – Morfologia típica do CSH tipo I .....	92
FIGURA 3-26 – Crescimento longitudinal das fibras de CSH durante o processo de hidratação do C <sub>3</sub> S .....	93
FIGURA 3-27 – Curva aproximada de evolução das fases hidratadas e da porosidade da pasta de cimento em função do tempo de hidratação .....	95
FIGURA 3-28 – Representação esquemática do mecanismo de aderência entre argamassa e bloco cerâmico.....	98
FIGURA 3-30 – Aparelho para realização da espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX).....	104
FIGURA 4-31 – A) Aspecto final da alvenaria utilizada como base; B) Limpeza e taliscamento da alvenaria .....	106
FIGURA 4-32 – Execução dos Painéis: A) Preparação da argamassa; B) Aplicação da argamassa; C) Sarrafeamento da argamassa; D) Vista dos painéis acabados .....	108
FIGURA 4-33 – Execução de teste de aderência .....	112
FIGURA 4-34 – Execução de ensaio de permeabilidade à água.....	113
FIGURA 4-35 – Amostra com aproximadamente 25mm x 25mm x 15mm.....	113
FIGURA 4-36 – Plano observado no MEV .....	114
FIGURA 4-37 – A) Equipamento utilizado para metalização das amostras; B) Amostra metalizada com fita de carbono pronta para análise no MEV .....	115
FIGURA 4-38 – Vista interna do equipamento MEV/EDS utilizado .....	115
FIGURA 4-39 – A) Amostra posicionada no equipamento antes do seu fechamento B)Momento da execução da Microscopia Eletrônica de Varredura.....	116
FIGURA 4-40 – Diagrama de extração do material para análise FRX.....	116
FIGURA 4-41 – A) Material proveniente do lixamento da amostra; B) Momento da extração do material por lixamento manual .....	117
FIGURA 4-42 – Medição da espessura de camada retirada por lixamento da amostra.....	117
FIGURA 5-43 – Interface entre argamassa e bloco de concreto.....	125
FIGURA 5-44 – Observação da superfície de rompimento .....	130
FIGURA 5-45 – Extensão de aderência das argamassas.....	130
FIGURA 5-46 – Evolução da permeabilidade na argamassa 1:0:6.....	132
FIGURA 5-47 - Evolução da permeabilidade na argamassa 1:1:6 .....	133
FIGURA 5-48 - Evolução da permeabilidade na argamassa 1:2:8 .....	134
FIGURA 5-49 - Evolução da permeabilidade na argamassa 1:2:10 .....	135
FIGURA 5-50 - Evolução da permeabilidade na argamassa 0:1:6 .....	136
FIGURA 5-51 – Interface do tijolo após de destacamento da argamassa .....	137

FIGURA 5-52 – Fotomicrografia da interface bloco cerâmico – argamassa tipo 1- 1:0:6; vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. Imagem obtida com elétrons secundários (IES).....	139
FIGURA 5-53 - Fotomicrografia da interface bloco cerâmico – argamassa tipo 1- 1:0:6 vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. (IES).....	139
FIGURA 5-54 – Fotomicrografias do perfil do bloco cerâmico aderido à argamassa tipo 1 - 1:0:6. IER. ....	142
FIGURA 5-55 – Fotomicrografias da argamassas tipo 1 – 1:0:6 e tipo 4 - 1:2:10 com o menor aumento possível. IER.....	143
FIGURA 5-56 – Fotomicrografia da interface do bloco cerâmico – Argamassa tipo 1 – 1:0:6. Vista de perfil sem o destacamento da argamassa. IER. ....	144
FIGURA 5-57 – Fotomicrografia da argamassa tipo 1 – 1:0:6. Imagem obtida com elétrons secundários (IES).....	145
FIGURA 5-58 – Fotomicrografias da argamassa tipo 4 – 1:2:10. IER. ....	146
FIGURA 5-59 – Fotomicrografia da interface tijolo-argamassa no traço 1 - 1:0:6. Vista de perfil, sem o destacamento de ambos. IES. ....	147
FIGURA 5-60 – Fotomicrografia da interface tijolo/argamassa do traço 2 – 1:1:6. IES.....	148
FIGURA 5-61 – Fotomicrografias da interface do tijolo/argamassa do traço 2 – 1:1:6. IES. ....	149
FIGURA 5-62 – Fotomicrografias da interface do tijolo/argamassa do traço 3. Imagens obtidas com elétrons secundários e retroespalhados. ....	150
FIGURA 5-63 – Fotomicrografia da interface argamassa/tijolo do traço 3 – 1:2:8. IES.....	150
FIGURA 5-64 – Fotomicrografias da interface argamassa tijolo dos traços 4 – 1:2:10 – (A) e traço 1 – 1:0:6 – letra (B). Vista de perfil sem o destacamento da argamassa. IER.....	151
FIGURA 5-65 – Fotomicrografia da interface argamassa/tijolo do traço 4 – 1:2:10. Vista de perfil, sem o destacamento da argamassa. IER. ....	152
FIGURA 5-66 – Fotomicrografias dos cristais de etringita nos traços 1, 2, 3, 4. IES. ....	155
FIGURA 5-67 – Fotomicrografia da interface argamassa/tijolo do traço 4 – 1:2:10. IER. ....	156
FIGURA 5-68 – Fotomicrografia da interface argamassa/tijolo do traço 5 - 0:1:6. Imagens obtidas com elétrons retroespalhados.....	157
FIGURA 5-69- Relação Ca/Si versus profundidade de penetração no tijolo.....	158
FIGURA 5-70- Relação Ca/Al versus profundidade de penetração no tijolo. ....	158
FIGURA 5-71 - Relação Ca/Fe versus profundidade de penetração no tijolo. ....	159
FIGURA 5-72 - Relação Ca/S versus profundidade de penetração no tijolo.....	159
FIGURA 5-73 - Relação Ca/Ti versus profundidade de penetração no tijolo.....	160
FIGURA 5-74 – Relação Ca/K versus profundidade de penetração no tijolo.....	160

## LISTA DE NOTAÇÕES

### ALFABETO LATINO

. E: módulo de elasticidade dinâmico

### ALFABETO GREGO

.  $\gamma_{arg}$ : massa específica da argamassa

.  $v$ : velocidade de propagação do som

.  $\rho$ : massa específica

.  $\Sigma$ : somatório

### ABREVIATURAS

. ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland

. ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

. Af: Área da face de revestimento do componente

. ASTM: American Society for Testing and Materials

. CP I: Cimento Portland comum

. CP II: Cimento Portland composto

. CP II-E-32: Cimento Portland com escória e classe de resistência de 32 MPa

. CP III: Cimento Portland de Alto-Forno

. CP IV: Cimento Portland Pozolânico

sulfatos

. CP V: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

. CP: Corpo de prova

. CSTB: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

. CSTC: Centre Scientifique et Technique de la Construction

.  $E$ : Módulo de Young

- .  $E_d$ : Módulo de elasticidade dinâmico
- . EDS: Energy dispersive spectrometer (espectrômetro dispersivo em energia)
- . EE.UFMG: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais
- . FRX: Espectrometria de fluorescência de raios-X
- . IES: Imagem obtida por elétrons secundários
- . IRA: Initial rate of absorption – ensaio de absorção inicial
- .  $m_1$ : Massa do corpo de prova seco
- .  $m_2$ : Massa do corpo de prova em estado saturado em água
- . ME – Massa específica
- . MED – Módulo de elasticidade dinâmico
- . MET: Microscopia eletrônica de transmissão
- . MEV: Microscópio eletrônico de varredura (ou microscopia eletrônica de varredura)
- .  $M_f$ : Massa do conjunto de discos molhados de papel filtro
- .  $M_f$ : Massa final do componente
- .  $M_m$ : Massa do molde vazio
- .  $M_{ma}$ : Massa do molde cheio de argamassa
- .  $M_{se}$ : Massa do componente após secagem em estufa
- .  $M_{se}$ : Massa do conjunto de discos secos
- .  $M_w$ : Massa total de água acrescentada a mistura
- . NBR: Norma Brasileira
- . PA – Permeabilidade à água
- . RA – Retenção de água
- . RC – RESISTÊNCIA à compressão
- . relação a/c: relação água/cimento
- . RT – Resistência à tração
- . TAI – Teor de ar incorporado
- . UR: Umidade relativa

## UNIDADES

- . Å: angstrom
- . cm<sup>2</sup>: centímetro quadrado
- . cm<sup>3</sup>: centímetro cúbico
- . dm<sup>3</sup>: decímetro cúbico
- . eV: elétron-volt
- . g: grama
- . g/cm<sup>2</sup>: grama por centímetro quadrado
- . g/dm<sup>3</sup>: grama por decímetro cúbico
- . keV: quiloelétron-Volt
- . kgf/cm<sup>2</sup>: quilograma força por centímetro quadrado
- . km/h: quilômetro por hora
- . m: metro
- . m<sup>2</sup>: metro quadrado
- . m/s<sup>2</sup>: metro por segundo ao quadrado
- . mm: milímetro
- . mm/m: milímetro por metro
- . N: newton
- . nm: nanometro
- . N/mm<sup>2</sup>: newton por milímetro quadrado
- . N/m<sup>3</sup>: newton por metro cúbico
- . MPa: megapascal
- . µm: micrometro
- . #: mesh (malha de peneira)

## SÍMBOLOS E COMPOSTOS QUÍMICOS

- .  $\text{CaCO}_3$ : carbonato de cálcio (calcita)
- .  $\text{CaO}$ : óxido de cálcio
- .  $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$  (ou  $\text{C}_2\text{S}$ ): silicato dicálcico
- .  $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$  (ou  $\text{C}_3\text{S}$ ): silicato tricálcico
- .  $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$  (ou  $\text{C}_3\text{A}$ ): aluminato tricálcico
- .  $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{CaSO}_4.32\text{H}_2\text{O}$ : trissulfo-aluminato de cálcio hidratado (ou etringita)
- .  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ : hidróxido de cálcio (portlandita)
- . CSH: silicato de cálcio hidratado

## 1. INTRODUÇÃO

A aderência da argamassa à base pode ser definida como a capacidade que a interface alvenaria-argamassa possui de absorver tensões tangenciais (cisalhamento) e normais (tração) a ela, sem romper-se (SABBATINI, 1998).

Numa análise macro, a aderência pode ser avaliada através do ensaio de arrancamento, preconizado pela norma ABNT NBR 13.528 (Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração) sendo os resultados obtidos comparados com os limites especificados na norma ABNT NBR 13.749 (Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação).

Numa análise microscópica pode-se definir o sistema de aderência mecânico de uma argamassa à base como o resultado do intertravamento de produtos da hidratação do cimento no interior dos poros do substrato.

O estudo e perfeito entendimento do mecanismo de aderência da argamassa ao substrato poroso e dos fatores intervenientes nesta ligação é de grande importância, pois grande parte das manifestações patológicas nos revestimentos é devida à falhas nessa aderência (CARASEK, 1996).

A perda de aderência de um revestimento argamassado acarreta prejuízos econômicos significativos e pode colocar em risco vidas humanas, além de comprometer a durabilidade e conforto das edificações. Desta forma, torna-se fundamental conhecer os materiais, os mecanismos de aderência e os fatores que interferem na aderência da argamassa ao substrato, visando estabelecer parâmetros que orientem o projeto e execução de tais revestimentos.

Muitos autores têm discorrido sobre este tema e muito contribuíram para o seu melhor entendimento. No Brasil podemos citar: CARASEK et al., 1996, 1997, 2001, 2007; SABBATINI, 1998, CARVALHO JR. 2005. No entanto, muito ainda há para se percorrer até que tenhamos completo conhecimento sobre o comportamento da argamassa no tocante à sua aderência ao substrato.

A análise microestrutural da interface argamassa/substrato poroso tem muito a contribuir para o melhor entendimento do comportamento de aderência, uma vez que o comportamento de

todo material é conseqüência de sua microestrutura. Com relação ao tijolo cerâmico, seu comportamento em relação à aderência está relacionado aos seus poros e estrutura dos mesmos (forma, textura interna, distribuição, tamanho), já na argamassa, seu comportamento de aderência está relacionado aos produtos de hidratação dos aglomerantes formados no interior destes poros.

No capítulo terceiro deste trabalho, é apresentado o estado da arte do conhecimento sobre os materiais e técnicas utilizadas neste trabalho, bem como dos mecanismos envolvidos na aderência entre a argamassa e o substrato. O capítulo quarto apresenta a metodologia utilizada no trabalho tanto na etapa de caracterização dos materiais, quanto na determinação da resistência de aderência e análise microestrutural. No capítulo quinto são apresentados os resultados e apreciação sobre os mesmos. No capítulo sexto são apresentadas as principais conclusões obtidas do trabalho experimental.

## 2. OBJETIVO

Tendo em vista a grande variedade de traços possíveis na execução de revestimentos argamassados e os diversos tipos de substratos existentes, o presente trabalho se restringirá ao estudo das argamassas de revestimento (reboco/emboço) aplicadas diretamente sobre a alvenaria de blocos cerâmicos, sem umidecimento e utilizando técnicas tradicionais de canteiro para preparação e aplicação.

Com relação aos constituintes da argamassa serão avaliados cinco traços (cimento:cal:areia) em volume: 1:0:6; 1:1:6; 1:2:8; 1:2:10; 0:1:6. A consistência adotada será plástica, entre 280 a 320mm no ensaio *flow table*.

A partir destes parâmetros os objetivos desta pesquisa serão os seguintes:

- Avaliar a microestrutura responsável pela aderência mecânica da argamassa à base, utilizando as técnicas de microscopia eletrônica de varredura com microanálise EDS e espectrometria de fluorescência de raios-X.
- Correlacionar as análises microestruturais ao desempenho mecânico do revestimento.
- Correlacionar as análises microestruturais ao traço utilizado, particularmente à introdução da cal hidratada.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo será apresentado o atual estado da arte dos materiais e técnicas utilizadas neste trabalho.

#### **3.1. Materiais**

##### **3.1.1. Alvenaria**

###### **3.1.1.1. Bloco cerâmico**

Bloco cerâmico é definido por CARVALHO JR. (2005) como um componente de alvenaria, com furos prismáticos e/ou cilíndricos perpendiculares às faces que os contêm. Os blocos podem ser classificados em bloco de vedação e bloco estrutural. Os blocos de vedação não têm função de suportar outras cargas verticais além do peso próprio. Os Blocos estruturais são concebidos para suportar cargas adicionais ao seu peso próprio.

Segundo PETRUCCI (1973), são qualidades apresentadas pelos blocos cerâmicos a uniformidade e planicidade das faces, o peso por unidade de volume, a boa absorção de som, o isolamento térmico, e a dificuldade de propagação de umidade.

Uma das propriedades do bloco cerâmico que afetam diretamente o desempenho dos revestimentos é a absorção inicial de água. Segundo CARASEK (1996), a taxa inicial de sucção de água (IRA) do tijolo define sua capacidade de aderência com as argamassas de assentamento e revestimento. Ainda de acordo com a autora, inúmeros autores apresentam valores de IRA ótimos ou valores de IRA mínimos e máximos com vistas à garantia de uma aderência adequada. Para tijolos cerâmicos, os valores mais aceitos oscilam entre 10 e 30 g/200 cm<sup>2</sup>/min. No entanto, GALLEGOS (1995) afirma que o IRA e seus ensaios similares não podem representar com fidelidade o comportamento absorvente do tijolo frente à argamassa, ao longo do tempo. Isto porque o IRA não está relacionado com a distribuição dos tamanhos dos poros e sim apenas com o conteúdo dos poros capilares do substrato; além disso, ele é medido com relação a água livre e não água restringida na argamassa; e finalmente, o ensaio é determinado em um minuto, por estar limitado a esse curto espaço de tempo, não mede a real capacidade de sucção de água que, na prática, pode ser mais elevada, uma vez que as força

capilares poderão continuar atuando durante um período mais prolongado. O autor também chama a atenção para o fato de blocos de diferentes matérias primas, com o mesmo valor de IRA, em geral produzirem resistências de aderência diferentes.

De acordo do MCGINLEY (1990), a consistência da argamassa juntamente com a taxa de sucção de água do substrato (IRA) afetam a água disponível na interface e que, por conseguinte, ambos afetam a resistência de aderência do conjunto.

### **3.1.2. Principais Constituintes do revestimento**

#### **3.1.2.1. Aglomerantes**

Os aglomerantes mais utilizados na produção de argamassas são o cimento Portland e a cal aérea. Segundo CARASEK (1996), enquanto ao cimento é atribuída a resistência de aderência, à cal são atribuídas a extensão e a durabilidade da aderência. As propriedades das argamassas também são influenciadas pela qualidade e proporção dos materiais. Desta forma, apresentam-se na seqüência alguns aspectos do papel destes aglomerantes no desempenho das argamassas.

##### **3.1.2.1.1. Cimento**

O cimento é o mais ativo, do ponto de vista químico, dos componentes de uma argamassa. É imprescindível que seja utilizado de forma correta, e para isto, é preciso conhecer bem suas características e propriedades.

Várias são as definições para cimento Portland apresentadas pelos autores pesquisados. Uma das mais simples é a apresentada pela Associação Brasileira de cimento Portland – ABCP (2002), onde afirma que o cimento Portland é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação da água. Depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido à ação da água o cimento Portland não se decompõe mais.

O principal componente do cimento Portland é o clínquer, e seus principais compostos químicos e as propriedades deles decorrentes, segundo SILVA(1998) são apresentados na TABELA III-1.

TABELA III-1 – Característica dos principais componentes do clínquer Portland

<b>Componentes</b>	<b>C<sub>3</sub>S</b>	<b>C<sub>2</sub>S</b>	<b>C<sub>3</sub>A</b>	<b>C<sub>4</sub>AF</b>
<b>Fórmula aproximada</b>	3CaO.SiO <sub>2</sub>	2CaO.SiO <sub>2</sub>	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Nome</b>	Alita	Belita	Celita	Brownmillerita
<b>Teor médio (%)</b>	65	15	12	8
<b>Principais impurezas</b>	MgO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> , MgO, alcalis	SiO <sub>2</sub> , MgO
<b>Taxas de reação com a água</b>	média	lenta	rápida	lenta
<b>Contribuição para resistência à compressão:</b>				
<b>- idades iniciais (1 a 3 dias)</b>	Excelente	Pouca	Boa	Pouca
<b>- idades posteriores</b>	Boa	Excelente	Pouca	Pouca
<b>Calor de hidratação (cal/g)</b>	120	60	320	100

Fonte: SILVA, 1998

Vários são os tipos de cimentos produzidos. Segundo a ABCP (2002), os tipos de cimento Portland em função de suas composições, são apresentados na TABELA III-2.

TABELA III-2 – Tipo de cimento Portland em função de sua composição

Tipo de Cimento Portland	Sigla	Composição (% de massa)			
		Clinker + Gesso	Escória Granulada de alto-forno (sigla E)	Material pozolânico (sigla Z)	Material carbonático (sigla F)
<b>Comum</b>	CP I	100	0	0	0
	CP I-S	95-99		1-5	
<b>Composto</b>	CP II-E	56-94	6-34	-	0-10
	CP II-Z	76-94	-	6-14	0-10
	CP II-F	90-94	-	-	6-10
<b>Alto-Forno</b>	CP III	25-65	35-70	-	0-5
<b>Pozolânico</b>	CP IV	45-85	-	15-50	0-5
<b>Alta Resistência inicial</b>	CP V ARI	95-100	0	0	0-5

Fonte: ABCP, 2002

A escolha do tipo de cimento para cada uso depende das características desejadas para a argamassa. Segundo SABBATINI (1998), cimentos com classes de resistência diferente (por exemplo: CII-E32 ou CII-E40) irão produzir argamassas com resistências mecânicas variáveis, no entanto a trabalhabilidade e a resiliência das argamassas não sofrerão influência significativa.

Ainda segundo SABBATINI (1998), cimentos que apresentam maior finura (maior superfície específica) tem potencial para dar maior trabalhabilidade à argamassa e maior retenção de água (por exemplo: CP V). Segundo CARASEK (1996), a maior finura também proporciona menor tempo de início de pega e maior resistência de aderência. KIHARA & CENTURIONE (2005) concordam com a afirmação anterior e afirmam que quanto maior for a finura de um cimento, maior será a velocidade de hidratação e, conseqüentemente, maior calor gerado. YOUNG et al. Acrescenta à essa lista de conseqüência da finura do cimento a maior necessidade de água para manter a mesma trabalhabilidade. De acordo com CARVALHO JR. (2005), o cimento CP V não é recomendado para a execução de argamassas. Esta afirmação é compartilhada por CARASEK et. Al. (2001), observando que apesar dos maiores valores de resistência de

aderência obtidos com o cimento CP V, sua finura maior pode conduzir mais facilmente à fissuração, comparando-se com outros cimentos, utilizando-se os mesmos consumos.

Para SABBATINI (1998), os cimentos de endurecimento mais lento podem produzir argamassas mais resilientes, como é o caso dos cimentos pozolânicos.

### **3.1.2.1.2. Cal**

A cal desempenha um importante papel na composição das argamassas. Além de ser um material aglomerante, por sua finura, contribui para as propriedades no estado fresco da argamassa.

A cal é quimicamente uma mistura de hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$  e  $\text{Mg(OH)}_2$ , fração de óxidos não hidratados ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ) e contaminantes, sendo que deste total são os hidróxidos que possuem a capacidade aglomerante, como também possuem maior área superficial e energia superficial elevada. Provavelmente são os mais ativos durante o estado plástico da cal (JOHN, 2003).

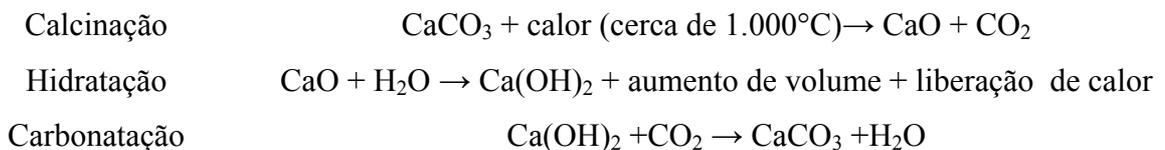
As cales podem ser classificadas em calcíticas (elevado teor de carbonato de cálcio –  $\text{CaCO}_3$ ), dolomíticas (contém carbonato de cálcio e carbonato de magnésio –  $\text{CaMg(CO}_3)_2$ ) e magnesianas (contém carbonato de cálcio e carbonato de magnésio, em menor quantidade do que as dolomíticas)

A qualidade da cal utilizada é muito importante para o desempenho da argamassa produzida. Segundo JOHN (2003), como os óxidos, hidróxidos e carbonatos de cálcio e magnésio são integralmente solúveis em meio ácido, uma fração insolúvel em teores elevados é um indicador seguro de adulteração na cal. As cales hidratadas também possuem massa específica e aparente significativamente menor que as cales adulteradas.

De acordo com autores citados por CARASEK (1996), as argamassas preparadas com cal dolomítica atingem maiores resistências de aderência do que as preparadas com a cal calcítica. Este resultado, em parte, foi atribuído aos grandes cristais de carbonato de cálcio (macrocrístais) formados pela cal dolomítica, diferentemente dos microcrístais formados pela

cal cálcica. Foram observados também maiores retenções de água nas argamassas produzidas com a cal dolomítica. Segundo CARASEK (2007), Alguns estudos indicam a existência de uma relação direta entre a proporção de hidróxido de magnésio, presente na cal hidratada e a resistência de aderência. Desta forma, uma argamassa preparada com cal dolomítica apresenta aderência superior a uma cal com mesmo traço preparada com cal cálcica. A autora atribui tal fato à diferença de retenção de água superior da cal dolomítica. Entretanto, CINCOTTO et al.(1995) afirmam que a cal dolomítica apresenta uma hidratação mais lenta, ocorrendo simultaneamente à carbonatação, podendo ocasionar aumento de volume que compromete a argamassa. Em seus experimentos CINCOTTO & RAGO observaram que a cal cálcica se apresenta mais viscosa, possui maior consistência, maior tensão limite de escoamento e menor plasticidade do que a cal dolomítica.

O ciclo da cal, desde a matéria prima até o endurecimento, é descrito pelas seguintes reações químicas:



Segundo RAGO & CINCOTTO (1999), ao reagir com o CO<sub>2</sub> a cal libera a água retida em torno de suas partículas e assim colabora também com a cura do cimento

De acordo com BOYNTON (1980), a cal, em contraste com o cimento, desenvolve resistência muito lentamente através da carbonatação pelo CO<sub>2</sub> da atmosfera. A resistência final é cerca de 35-40 vezes menor do que do cimento. PETRUCCI (1973) atribui esta lentidão no ganho de resistência ao pequeno teor de CO<sub>2</sub> existente na atmosfera, cerca de 0,04%.

É unânime entre os autores pesquisados o benefício proporcionado à argamassa com a adição de cal. SABBATINI (1998) afirma que a adição da cal em substituição ao cimento melhora as propriedades ligadas à trabalhabilidade, retenção de água e à capacidade de absorver deformações (resiliência), e apresenta a TABELA III-3 com a variação das propriedades da argamassa em função à variação da proporção de cal.

**TABELA III-3 - Variação nas propriedades de uma argamassa com a alteração da composição relativa de cimento e cal**

Propriedade		Aumento na proporção da cal no aglomerante	
Resistência à compressão	(E)	Decresce	Propriedades melhoradas com maior teor relativo de cimento
Resistência à tração	(E)	Decresce	
Capacidade de aderência	(E)	Decresce	
Durabilidade	(E)	Decresce	
Impermeabilidade	(E)	Decresce	
Resistência à altas temperaturas	(E)	Decresce	
Resistências iniciais	(F)	Decresce	
Retração na secagem inicial	(F)	Cresce	
Retenção de água	(F)	Cresce	Propriedades melhoradas com maior teor relativo de cal
Plasticidade	(F)	Cresce	
Trabalhabilidade	(F)	Cresce	
Resiliência	(F)	Cresce	
Módulo de elasticidade	(E)	Decresce	
Retração na secagem reversível	(E)	Decresce	
Custo		Decresce	

Obs.: Estados: (E) = Endurecido; (F) Fresco.

Fonte: SABBATINI

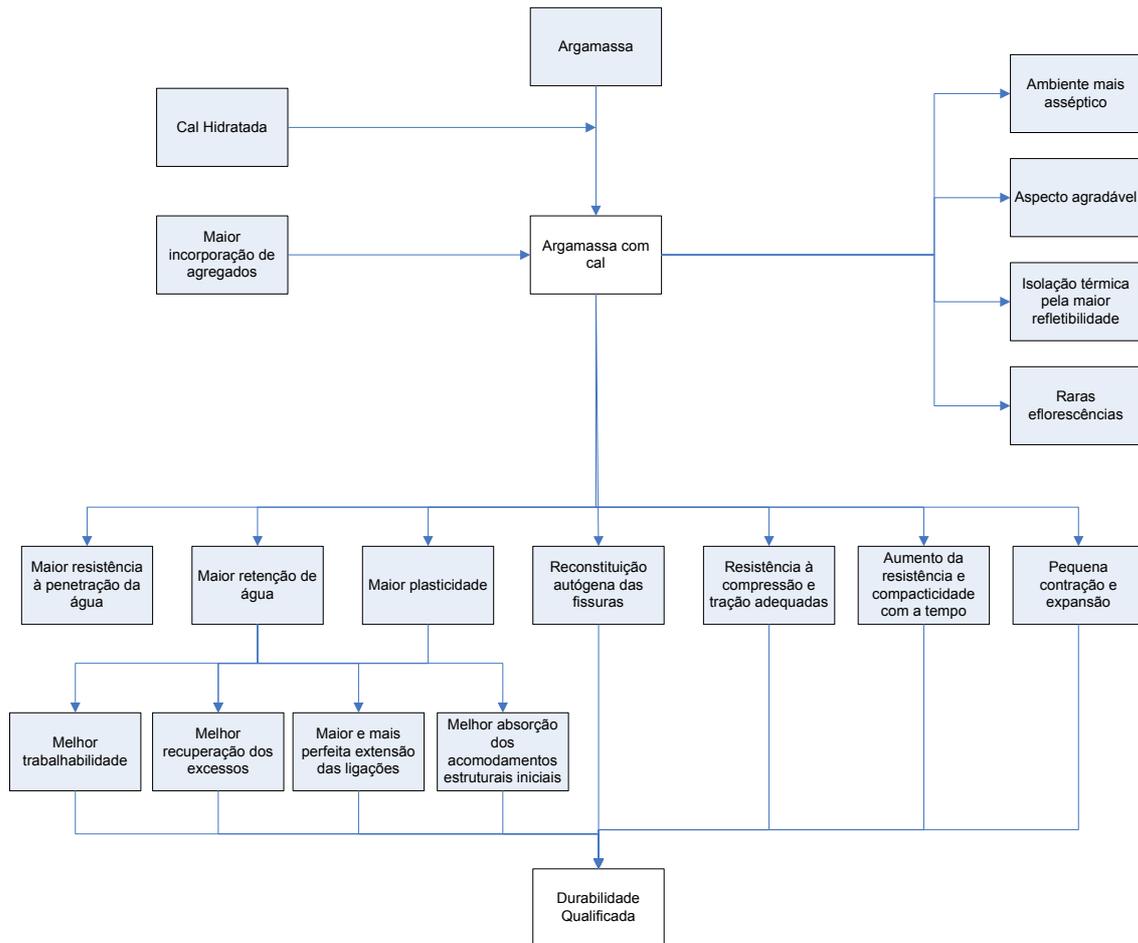
BOYNTON (1980) descreve como atributos da cal na argamassa: Plasticidade e trabalhabilidade; alta retenção de água; alta capacidade de cobrir grãos de areia; Maior flexibilidade; resistência de aderência; menor eflorescência; argamassa mais clara. GUIMARÃES (2002) acrescenta a esta lista a perfeição das ligações, recuperação maior das sobras e melhor absorção dos acomodamentos estruturais iniciais.

Segundo JOHN (2003), uma argamassa necessita de uma tensão de escoamento relativamente alta, pois uma vez aplicada na parede não deve escorrer. Por outro lado, o coeficiente de viscosidade plástica deve ser o menor possível, de forma a diminuir o trabalho de adensamento e espalhamento. Ainda segundo o autor, não existe um método adequado para caracterizar a reologia das argamassas, dificultando a comparação de produtos plastificante e retentores de água utilizados na formulação das argamassas.

Segundo CARASEC (1996), a maior plasticidade e retenção de água conferem à argamassa mista (cimento e cal) preenchimento mais fácil e completo de toda a superfície do substrato, propiciando maior extensão de aderência. A autora também afirma que a durabilidade de aderência é proporcionada pela habilidade da cal em evitar minúsculas fissuras e preencher os vazios através da sua carbonatação que se processa ao longo do tempo. A esta característica dá-se o nome de reconstituição autógena.

Segundo AGOPYAN (1985), a cal proporciona à argamassa capacidade de retenção de água, favorecendo a hidratação do cimento. Para o autor, a retenção é causada pelas pequenas partículas de cal, favorecem também o endurecimento e a aderência da argamassa ao substrato. A cal carbonatada possui uma solubilidade muito pequena, minimizando os efeitos da lixiviação quando sujeitas à percolação de água. Para PASSOS GUIMARÃES (1997) a capacidade de reter água da cal está vinculada à presença de cristalinos muito pequenos que retêm a sua volta uma película líquida firmemente aderida e confere vantagens relevantes às argamassa, especialmente às argamassas mistas no estado fresco e no processo de cura.

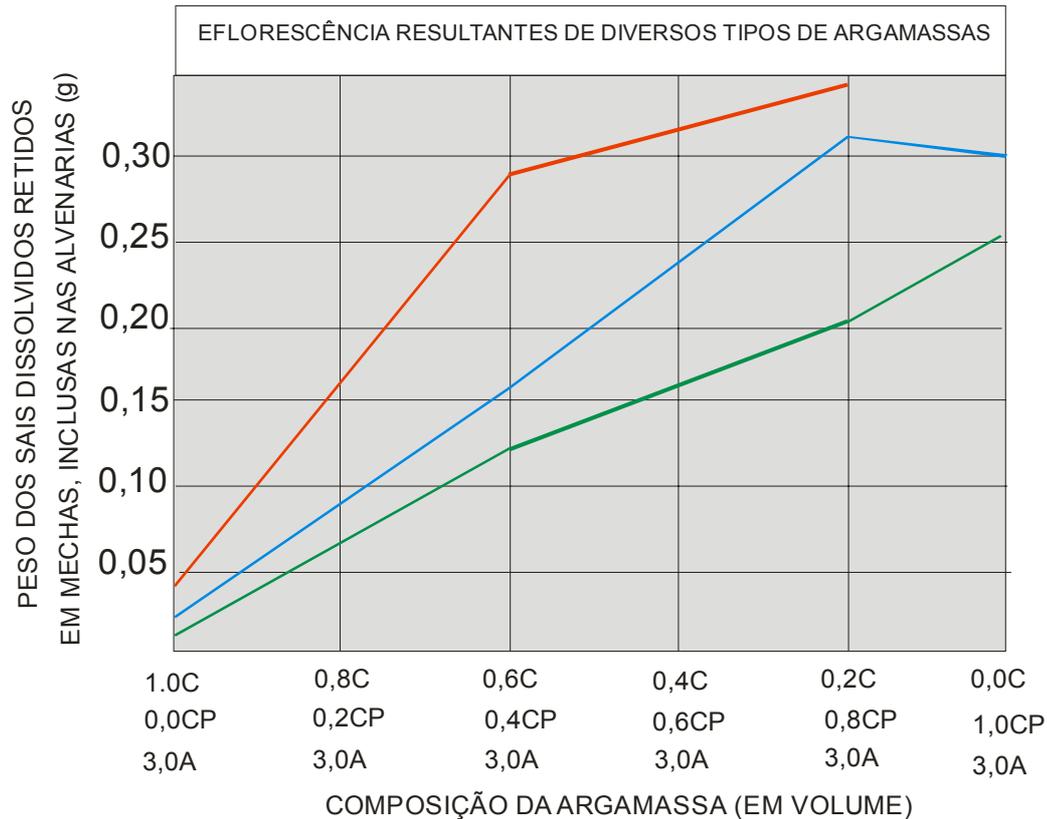
Para exemplificar o conjunto de benefícios proporcionados pela introdução da cal nas argamassas, GUIMARÃES (2002) apresenta a FIGURA 3-1.



**FIGURA 3-1 – Conjunto de benefícios proporcionados pelas argamassas portadoras de cal hidratada**

Fonte: GUIMARÃES (2002)

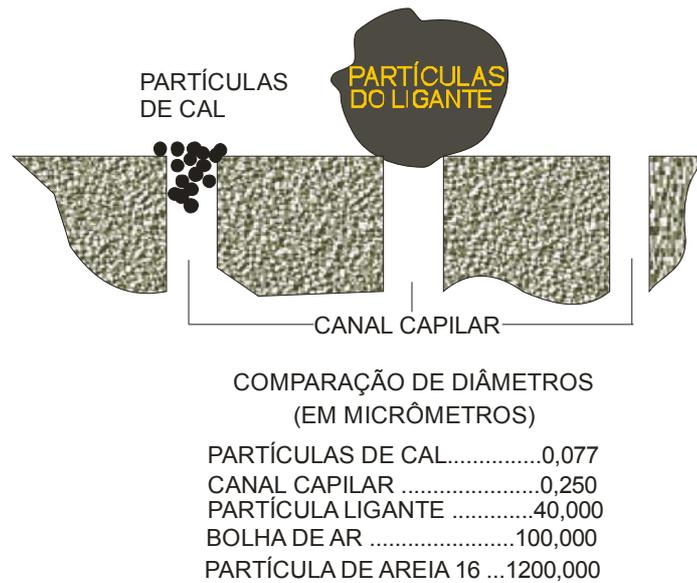
GUIMARÃES (2002) atribui à utilização da cal na argamassa a redução sensível das ocorrências de eflorescência. O autor atribui esta característica ao pequeno teor de álcalis. Três fatores causam as eflorescências, com igual importância: teor de sais solúveis nos materiais, presença de água e pressão hidrostática. O autor apresenta a FIGURA 3-2.



**FIGURA 3-2** Eflorescência resultante de diversos tipos de argamassas

Fonte: GUIMARÃES, 2002

GUIMARÃES (2002) apresenta uma posição contraditória em relação a todos os outros autores pesquisados. Segundo o autor, uma das mais importantes virtudes da utilização da cal nas argamassas é uma maior resistência à penetração da água. O autor atribui esta característica ao fato das partículas de cal possuir menor diâmetro, penetrando e obstruindo as fendas mais estreitas. Além disso, absorvem um filme de água ao seu redor – quer pela alta tensão superficial (entre o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e a solução saturada no local), quer por exibir um certo grau de cataforese, demonstrado na FIGURA 3-3.



**FIGURA 3-3 – Comparação de tamanho entre os poros da alvenaria e o das partículas de cal hidratada, de cimento portland e de bolhas de ar.**

Fonte: WALKER, 1982

A Cal introduz melhorias sensíveis na capacidade de retenção água da argamassa. Esta característica se deve ao fato de possuir cristalinicos muitos pequenos e com capacidade de reter uma película de água a sua volta, firmemente aderida. A capacidade de retenção de água permite regular a perda de água para elementos construtivos vizinhos de alta porosidade, melhor trabalhabilidade, maior recuperação de sobras da aplicação, melhor absorção das movimentações devido à maior flexibilidade das ligações, estocagem de água necessária às reações do cimento (GUIMARÃES (2002). Argamassas com baixa retenção de água tem problemas de exsudação, demandando constantes remisturas, reduzindo a produtividade (JOHN, 2003).

A cal confere à argamassa uma propriedade chamada “reconstituição autógena”. Segundo GUIMARÃES (2002), enquanto houver hidróxido de cálcio e/ou de magnésio livres na massa das argamassas, a água que circula pelos espaços intergranulares da alvenaria provoca reações químicas. Esses sais podem ser dissolvidos ou colocados em dispersões coloidais que transportam para outros vazios, onde precipitam e se fixam após recarbonatação, preenchendo a descontinuidade. As virtudes deste processo de refletem não apenas na melhoria do comportamento técnico do conjunto, como na resistência mecânica, resistência à penetração de água e aumento da compacidade.

### 3.1.2.1.3. Proporção entre cimento e cal

Saber dosar corretamente a proporção entre a cal e o cimento é essencial para se atingir às características ideais, tanto no estado fresco quanto no endurecido da argamassa.

De acordo com CARASEK (1996), argamassas com alto teor de cimento em geral apresentam elevada resistência de aderência, no entanto, possuem baixa extensão de aderência e são menos duráveis, uma vez que são mais suscetíveis ao desenvolvimento de fissuras. BOYNTON (1980) afirma que argamassas com altos teores de cimento se tornam extremamente duras e possuem uma tendência inerente a fissurarem entre a argamassa e o substrato, mas não nela mesma. A baixa retenção de água existente nas argamassas com muito cimento permite a rápida perda de água para substratos porosos, fato que prejudica a aderência ao substrato. DAVIDSON (1969) apresenta na TABELA III-4 a influência da proporção entre cimento e a cal para perda de água da argamassa pela sucção de tijolos.

**TABELA III-4 - Perda de água da argamassa pela sucção dos tijolos em 4 minutos de contato**

SUCÇÃO INICIAL DO TIJOLO	ÁGUA PERDIDA DO TOTAL EM ARGAMASSA PELA SUCÇÃO		
	1:0:3	1:1:6	1:2:9
12.5	25%	15%	10%
15	38%	24%	19%
20	45%	30%	27%
30	50%	34%	32%
40	52%	36%	33%
50	50%	36%	33%
60	47%	33%	32%
70	41%	32%	29%

Fonte: DAVIDSON, 1969

CARASEK (1996) afirma que argamassas ricas em cal possuem alta extensão de aderência, tanto em nível micro quanto em nível macroscópico. Sendo mais plásticas, têm maior capacidade de “molhar” a superfície e preencher as cavidades do substrato; microscopicamente

possuem uma microestrutura na interface com o substrato mais densa e mais contínua, além de apresentar menor incidência de micro fissuras da interface, comparativamente às argamassas produzidas somente com cimento.

CARASEK (1996) chega a afirmar que a argamassa “ideal” é aquela que reúne as qualidades do cimento e da cal. BOYNTON (1980) apresenta uma tabela de composição para argamassas mistas (TABELA 5). GALLEGOS (1995) sugere que a proporção de cal nas argamassas seja a mínima necessária para que a retenção água seja igual ou superior a 75%. Em seus experimentos, CARASEK (1996) observou um aumento da resistência de aderência da argamassa com a adição de 6% cal em relação à massa dos constituintes secos. Por outro lado quando elevado demasiadamente, a consequência foi a queda da resistência de aderência, apesar da alta extensão obtida. LAWRENCE & CAO (1988) propõem que a argamassa ótima, com vistas à aderência e durabilidade, seja preparada com um traço próximo de 1:0,5:4,5 (cimento:cal:areia) e não o consagrado 1:1:6.

**TABELA III-5 - Especificação de argamassa para alvenaria**

Tipos de argamassas	Especificação de propriedades		Especificação de proporções		
	Fluência após sucção (mínimo %)	Resistência a compressão – 28 dias – MPa	Partes por volume – Cimento Portland	Partes por volume – Cal Hidratada	Areia - medida sem condição de umidade
O	70	2,41	1	De 1¼ a 2½	Não menos do que 2,25 e não mais do que 3 vezes a soma dos volumes de cimento e cal
N	70	5,17	1	De ½ a 1¼	
S	70	12,41	1	De ¼ a ½	
M	70	17,24	1	¼	

Resumo de especificações e propriedades contidas na norma ASTM C-270 sobre argamassas.

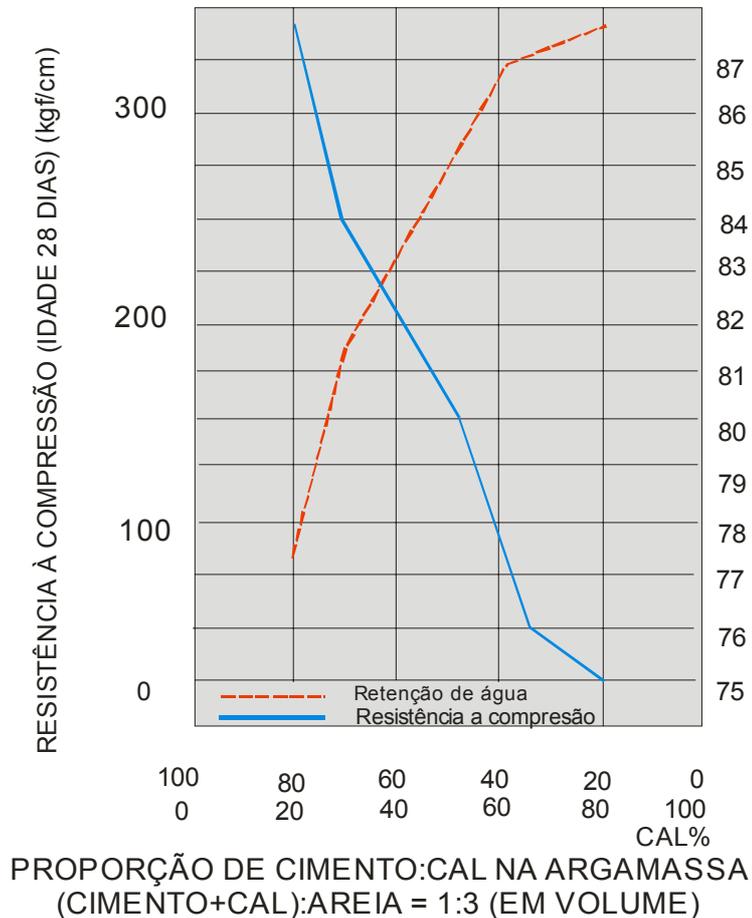
Fonte: BOYTON, 1980

Em seus experimentos, ANDEREG (1942) observa uma tendência de acréscimo na resistência de aderência e na resistência à compressão à medida que a relação cimento/cal aumenta, para todas as idades. Segundo JOHN(2003) a adição de cal hidratada à argamassa reduz significativamente o módulo de elasticidade sem afetar na mesma proporção a resistência à tração, que em última análise é a máxima resistência de aderência da argamassa. Assim a adição de cal hidratada à argamassa tende a aumentar a vida útil.

HAN & KISHITANI (1984) observaram em seus experimentos que a forma de ruptura no ensaio de aderência é modificada conforme a proporção de cal na argamassa. De uma forma geral os traços confeccionados com cimento e areia, em volume, na proporção 1:3 apresentavam ruptura na interface por deficiência de aderência. Os traços com proporção 1:1:6 (cimento: Cal : Areia em volume) a ruptura se deu no interior da camada de argamassa, por falta de coesão.

A proporção Cimento/Argamassa influi diretamente na capacidade de retenção de água da argamassa. BOYNTON & GUTSCHICK (1966) apresentam o FIGURA 3-4 com a variação da retenção de água e resistência à compressão em função da proporção de Cimento/Cal da argamassa.

### RELAÇÃO ENTRE A COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA E RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO



**FIGURA 3-4 - Relação entre a composição da argamassa e resistência a compressão**

Fonte: BOYNTON & GUTSCHICK, 1966

#### 3.1.2.2. Agregados

Várias são as definições para agregado. Segundo NETO (2005) a mais aceita define agregado como um material granular, sem forma ou volume definido, de dimensões e propriedades adequadas às obras de engenharia, em particular à fabricação de concretos e argamassas de cimento Portland. Já GUIMARÃES (1997) define agregado como um material particulado de origem mineral, onde predomina o quartzo, de diâmetro entre 0,06 e 2,0 mm. BAUER (1979) tem ainda uma outra definição para agregado, para ele agregado é um material particulado, incoesivo, de atividade praticamente nula, constituído de mistura de partículas cobrindo extensa gama de tamanhos. Apesar das várias definições, não existe entre elas diferenças significativas.

Agregado foi tratado por muito tempo como um material inerte, sem muita influência no comportamento das argamassas. Com o maior entendimento do real papel desempenhado pelos agregados nas propriedades da argamassa e do concreto, este ponto de vista está sendo seriamente questionado. NEVILLE (1997) afirma que o agregado não é inerte na exata acepção da palavra, e suas propriedades têm influência no desempenho do concreto. MEHTA & MONTEIRO (2006) chega a afirmar (em negrito) que é impróprio tratar os agregados com menos respeito do que o cimento.

É consenso entre os autores pesquisados que as propriedades do agregado (areia) interferem direta ou indiretamente no comportamento da argamassa fresca ou no desempenho da argamassa endurecida. Para PETRUCCI (1973) a adição de areia à argamassa de cimento e cal barateia o produto, elimina em parte as modificações de volume e facilita a passagem de anidrido carbônico do ar para recarbonatação do hidróxido de cálcio e conseqüente solidificação do conjunto. GUIMARÃES (1997) afirma que as propriedades mecânicas das areias que interferem no comportamento das argamassas são o inchamento, a higroscopia, a coesão aparente e a friabilidade. Outros autores também incluem nesta lista a granulometria, a forma e textura das partículas e a presença de substâncias deletérias.

### **3.1.2.2.1. Classificação**

Existem diversas propostas de classificação para os vários tipos de agregados. A maioria dos autores pesquisados concorda na classificação segundo a origem do agregado, a dimensão da partícula e a massa específica. NEVILLE (1997) propõe a classificação também em relação ao tipo de rocha. Nosso estudo será focado nas areias por ser o tipo de agregado utilizado nas argamassas.

#### **3.1.2.2.1.1. Segundo origem**

Os agregados podem ser classificados segundo a sua origem em:

- a) Naturais: São encontradas na natureza já na forma de utilização, não sendo necessário beneficiamento, a não ser lavagem e classificação granulométrica, quando for o caso. Segundo CARVALHO JR. (2005) este agregado é constituído essencialmente de quartzo e é resultante de antiga erosão de rochas quartzosas e posterior sedimentação de material silicoso. De acordo com NETO (2005) as areias naturais podem ser encontradas em: leitos de rio, cavas e dunas, sendo que esta última não é utilizada para o preparo de argamassas devido à sua grande finura e seu teor de cloretos.
- b) Britados: Estão sendo cada vez mais utilizados devido à exaustão das jazidas de areias naturais próximas aos grandes centros. Segundo NETO (2005), a areia de britagem tem sido valorizada especialmente devido a sua curva granulométrica e à natureza e quantidade de finos presentes. É obtida através da britagem de rochas ígneas ou metamórficas.
- c) Artificiais: São derivadas de processos industriais. A escória de alto forno depois de resfriada é britada e classificada.
- d) Reciclados: Proveniente o beneficiamento de entulho de construção ou demolição, sendo devidamente selecionada para esta utilização.

#### **3.1.2.2.1.2. Segundo as dimensões**

Os agregados podem ser classificados quanto à dimensão dos grãos, de acordo com a NBR7211 (ABNT, 2004), em graúdo e miúdo. Entretanto, no nosso estudo nos interessa apenas o agregado miúdo, cujos grãos passam pela peneira com malha de 4,75mm e ficam retidos na peneira malha 0,075mm, de acordo com a NBR 7217 (ABNT, 2004).

#### **3.1.2.2.1.3. Segundo o peso específico**

Os agregados podem ser divididos segundo o peso específicos em leves, médios e pesados. As areias estão classificadas como médio e tem o peso específico entre 1400 e 1700 kg/m<sup>3</sup>, de acordo com a TABELA III-6.

TABELA III-6 – Massa específica das rochas

<b>Rocha</b>	<b>Massa específica</b>
calcário	1400 kg/m <sup>3</sup>
arenito	1450 kg/m <sup>3</sup>
cascalho	1600 kg/m <sup>3</sup>
granito	1500 kg/m <sup>3</sup>
areia	1500 kg/m <sup>3</sup>
basalto	1500 kg/m <sup>3</sup>
escória	1700 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: BAUER, 1979, Adaptado

#### **3.1.2.2.1.4. Segundo o tipo de rocha**

As rochas são classificadas em três tipos: ígneas, metamórficas e sedimentares.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), as rochas ígneas são formadas pelo resfriamento do magma e o seu grau de cristalinidade e granulação variam com a velocidade de resfriamento. Baixa velocidade de resfriamento, forma material completamente cristalino e granulação grosseira. Alta velocidade de resfriamento, forma material com cristais menores, granulação fina e pode conter algum vidro. Agregados deste grupo normalmente apresentam excelente qualidade, pois adquirem granulação média a grosseira, resistentes, partículas equidimensionais na britagem, baixa porosidade, e absorção de água.

Ainda de acordo com MEHTA & MONTEIRO (1994), as rochas sedimentares são rochas estratificadas, usualmente depositadas no leito de rios, lagos e mares, ou acumuladas através da força do vento. O agregado mais utilizado na produção de argamassas, a areia, é um importante integrante do grupo de sedimento não consolidado. As areias grossas normalmente consistem em fragmento de rochas, enquanto as areias finas consistem predominantemente de grãos minerais. Outra importante rocha sedimentar é o calcário, muito utilizado na produção de areias artificiais. Em relação à qualidade dos agregados, as areias apresentam excelente dureza, forma arredondada e superfície lisa. Os calcários quando britados tendem a produzir partículas planas ou alongadas, podendo variar amplamente as propriedades de absorção, resistência e durabilidade.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (2006), é importante notar que as rochas ígneas e as sedimentares podem diferir amplamente em suas características, como por exemplo, forma, textura, porosidade, resistência e sanidade. Este fato se deve às diferentes formas de consolidação da rocha. Rochas formadas sob baixas pressões tendem a ser porosas e fracas, enquanto rochas formadas sob altas pressões tendem a ser densas e resistentes.

Finalmente as rochas metamórficas são rochas ígneas ou sedimentares que sofreram alterações na sua textura, na estrutura cristalina ou na composição mineralógica devido a condições químicas ou físicas.

### **3.1.2.2.2. Características dos agregados**

Para podermos produzir uma argamassa de qualidade, precisa-se conhecer certas características dos agregados que a compõe. Segundo MEHTA & MONTEIRO (2006) as propriedades no estado fresco são influenciadas pela porosidade, massa específica, granulometria, forma e textura superficial dos agregados. As propriedades no estado endurecido são influenciadas pela porosidade, composição mineralógica, resistência a compressão, dureza, módulo de elasticidade.

MEHTA & MONTEIRO (1994) propõem, afim de minimizar a superposição de aspectos, a seguinte divisão das propriedades:

- Características dependentes da porosidade: massa específica, absorção de água, resistência, dureza, módulo de elasticidade e sanidade;
- Características dependentes das condições prévias de exposição e condicionantes de fabricação: tamanho, forma e textura;
- Características dependentes da composição química e mineralógica: resistência, dureza, módulo de elasticidade e substâncias deletérias.

### **3.1.2.2.1. Inchamento**

GUIMARÃES (2002) atribui o fenômeno de inchamento à formação de uma película de água em torno dos grãos, causando o afastamento das mesmas. Para o autor, esta propriedade influi no comportamento das argamassas. Segundo BAUER (1979) este comportamento depende da natureza e da granulometria da areia, sendo que o valor do inchamento aumenta até atingir um determinado teor de umidade a partir do qual começa diminuir. NEVILLE (1997) afirma que o volume aumenta com o teor de umidade até cerca de 5% ou 8%, quando o inchamento chega a valores de 20% a 30%. A partir deste ponto, adicionando-se mais água, as películas se fundem e a água se desloca para os vazios entre as partículas, de modo que o volume da areia decresce, até que quando atinge a saturação seu volume a praticamente igual ao da areia totalmente seca. Segundo NEVILLE (1997), areias mais finas incham muito mais que areias mais grossas e areias proveniente de britagem incham mais que areias naturais.

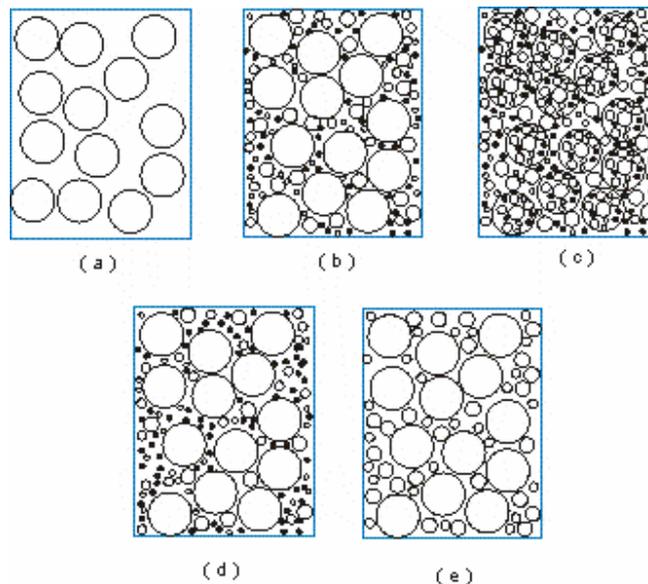
### **3.1.2.2.2. Granulometria**

Distribuição granulométrica nos mostra a distribuição dos grãos entre várias dimensões, geralmente é expressa em termos de porcentagem individual ou acumulada. São utilizadas também para avaliação da composição granulométrica a dimensão máxima e o módulo de finura. A dimensão máxima é definida pela norma NBR 7211 (ABNT, 2004) como “dimensão máxima característica” e é a abertura nominal da peneira na qual o agregado possui uma porcentagem acumulada igual ou imediatamente inferior a 5%. Já o módulo de finura corresponde à soma das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal, em massa, dividida por 100.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), existem várias razões para a especificação de limites granulométricos e de dimensão máxima dos agregados, sendo que mais importante delas diz respeito à trabalhabilidade e custo. Ainda segundo o autor, areias muito grossas perdem trabalhabilidade, enquanto areia muito finas aumentam o consumo de água e conseqüentemente de cimento. Com relação à dimensão máxima, MEHTA & MONTEIRO (1994) afirmam que quanto maior, menor será a área superficial por unidade de volume que tem que ser coberta pela pasta de cimento.

Para NETO (2005), uma distribuição granulométrica equilibrada produz maior trabalhabilidade e economia, além de proporcionar uma estrutura mais fechada, com menor volume de vazios. Segundo YOUNG (2003), quando uma distribuição equilibrada é utilizada, as partículas menores ocupam os espaços entre as maiores e exemplifica com a FIGURA 3-5.

CARASEK (1996) afirma que uma distribuição granulométrica contínua contribui para bons resultados de aderência. CARASEK et al. (2001) afirmam ainda que com o aumento do teor de areia, existe uma redução na resistência de aderência. Alguns autores denominam a areia de o esqueleto indeformável da massa, pois ela garante a durabilidade reduzindo a retração.



**FIGURA 3-5 – Representação esquemática da graduação dos agregados em uma mistura: (a) tamanho uniforme; (b) graduação contínua; (c) substituição das partículas pequenas por partículas grandes; (d) falha na graduação de agregados; (e) falha graduação de agregados**

Fonte: YOUNG, J. F., 2003

SABATINI (1998) apresenta na TABELA III-7 uma sinopse qualitativa da influência dos parâmetros granulométricos nas principais propriedades das argamassas.

**TABELA III-7 - Influência das características granulométricas das areias nas propriedades das argamassas de assentamento**

<b>Propriedades</b>	<b>Características da areia</b>		
	<b>Quanto menor o módulo de finura</b>	<b>Quanto mais descontínua for a granulometria</b>	<b>Quanto maior o teor de grãos angulosos</b>
Trabalhabilidade	Melhor	Pior	Pior
Retenção de água	Melhor	Variável	Melhor
Resiliência	Variável	Pior	Pior
Retração na secagem	Aumenta	Aumenta	Variável
Porosidade	Variável	Aumenta	Variável
Aderência	Pior	Pior	Melhor
Resistências mecânicas	Variável	Pior	Variável
Impermeabilidade	Pior	pior	Variável

Fonte: SABATINI, 1998

O termo variável é utilizado quando não existe uma influência definitiva, ou quando a influência depende de outros fatores.

De acordo com SABATINI (1998), a areia que apresenta melhor potencial de produzir uma argamassa adequada é a de granulometria contínua e classificada como média (módulo de finura entre 1,8 e 2,8) e que tenha predominância de grãos arredondados. Entretanto, segundo CARNEIRO et al. (1997) o módulo de finura não permite caracterizar objetivamente a areia e que melhores correlações podem ser feitas com a massa unitária.

Segundo GALLEGOS (1989) existem evidências de que as areias grossas aumentam a resistência à compressão e produzem argamassas ásperas, enquanto que as areias muito finas reduzem a resistência de aderência. Em seus experimentos CASALI & PRUDÊNCIO JR. (2005) concluíram que a granulometria da areia influencia mais a trabalhabilidade da argamassa do que o teor de cal.

### 3.1.2.2.3. Forma e textura

Segundo YOUNG (2003), a forma e a textura o agregado afeta a trabalhabilidade do concreto fresco através da sua influência sobre a necessidade de pasta de cimento. MEHTA & MONTEIRO (2006) afirma que a forma e a textura das partículas influenciam mais as propriedades do concreto no estado fresco do que no endurecido. Para BAUER (1979), a forma do grão tem importante efeito para a compacidade, trabalhabilidade da argamassa e ângulo de atrito interno. Para exemplificar o efeito da forma sobre o ângulo de atrito BAUER (1979) cita o fenômeno das pilhas de areia natural com ângulo de repouso de 37°, enquanto as areias de britagem possuem um ângulo de mais de 45°.

Para MEHTA & MONTEIRO (1994), as partículas ásperas, angulosas e alongadas requerem mais pasta de cimento para produzir a mesma trabalhabilidade de partículas lisas e arredondadas. NETO (2005) afirma que as partículas arredondadas permitem a diminuição do consumo de água e ganho de trabalhabilidade. YOUNG (2003) chama esta última de partícula ideal para boa trabalhabilidade FIGURA 3-6. NEVILLE (1997) afirma que a forma equidimensional das partículas é preferível, pois quanto mais se afastam deste formato, maior área superficial possuem e se acomodam de modo anisotrópico.

A Norma Brasileira que trata da definição de forma e textura superficial dos agregados miúdo é a NBR 7389 (ABNT, 1992).

Quando falamos em forma, estamos nos referindo às características geométricas do agregado, tais como arredondada, angulosa, alongada ou achatada. BAUER (1979) classifica as areias quanto à forma do grão em alongadas, cúbicas, lamelares e discóides.

As Partículas tendem a ser arredondadas quando são formadas por atrito, perdendo suas arestas e vértices. Classificam se nesta categoria as areis de leitos de rio, zonas marítimas e depósitos eólicos.

As areias provenientes de britagem tendem a possuir vértices e arestas bem definidas e são chamadas de angulosas.

MEHTA & MONTEIRO (1994) afirma as formas alongadas lamelares devem ser evitadas ou limitadas. YOUNG (2003) acrescenta que estas formas alongadas aumentam o atrito entre as partículas e superfície específica do grão, aumentando também a necessidade de pasta.

### Arredondados



Esférica



Irregular



Muito Irregular

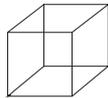


Achatado

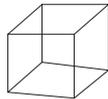


Alongado

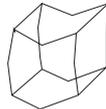
### Angulares



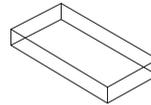
Cúbico



Irregular



Muito Irregular



Achatado



Alongado

**FIGURA 3-6 – Classificação das formas de agregados**

Fonte: YOUNG, J. Francis, 2003

A textura superficial é definida por MEHTA & MONTEIRO (2006) como o grau de quanto à superfície de um agregado é lisa ou áspera. É baseada em análise visual. Esta propriedade depende da dureza, granulação e porosidade da rocha matriz e da sua subsequente exposição ao atrito. Segundo NEVILLE (1997), quanto mais dura, densa e de granulação fina, mais fraturas lisas possui TABELA III-8.

TABELA III-8 - Textura Superficial dos agregados (BS 812: Part 1:1975) com exemplos

Grupo	Textura	Característica	Exemplos
1	Vítrea	Fratura conchoidal	Calcedônia, escória vitrificada
2	Lisa	Erodido por água, ou devido a fratura de cristais finos ou laminares	Seixo, ardósia, mármore, alguns riólitos
3	Granulosa	Fratura mostrando grãos uniformes mais ou menos arredondados	Arenito, oolito
4	Áspera	Fratura áspera de rochas finas ou grosseiramente granuladas com cristais não facilmente visíveis	Basalto, felsito, calcário
5	Cristalina	Com constituintes cristalinos facilmente visíveis	Granito, gabro, gnaisse
6	Alveolar	Com poros e cavidades visíveis	Tijolo, pedra pomes, espuma ede, escória, clínquer, argila expandida

Fonte: Neville, A.M., 1997

Para NEVILLE (1997), a textura superficial tem influência sobre a aderência à pasta de cimento e também a demanda de água da mistura. O Autor classifica a textura superficial em polidas, opacas, lisas ou ásperas. Segundo VALDEHITA ROSELO (1976), areias com grãos mais angulosos aumentam a resistência de aderência, uma vez que aumentam o coeficiente de atrito da interface.

#### 3.1.2.2.4. Substâncias deletérias

MEHTA & MONTEIRO (2006) definem substâncias deletérias como capazes de prejudicar a trabalhabilidade, a pega e endurecimento e a durabilidade do concreto. NEVILLE (1997) as classificam em três categorias: Impurezas que interferem no processo de hidratação do cimento; películas que impedem a aderência efetiva entre o agregado e a pasta; e partículas fracas ou não são.

As impurezas mais comuns são de origem orgânica, geralmente produtos de decomposição de matéria vegetal. Segundo NETO (2005), além de introduzirem fragmentos de baixa resistência, ainda provoca manchas superficiais.

Argila e outros materiais pulverulentos formam uma película superficial e interferem na aderência entre o agregado e a pasta de cimento. Estes materiais também afetam a trabalhabilidade e aumenta o consumo de água. As normas limitam o teor máximo de materiais passante na peneira 75 $\mu$ m.

GUIMARÃES (2002) recomenda um método simples para se verificar a qualidade da areia no canteiro de obra. O teste consiste em se colocar uma porção de areia em um frasco transparente e agitar vigorosamente, cerca de 90 vezes no sentido horizontal, e deixar repousa por 20 minutos. Após este período verifica-se o frasco. Se a água sobre o depósito de areia for clara, a areia ensaiada é de boa qualidade, se a água se mostrar muito turva, é provável que seja de má qualidade. CARVALHO JR. (2005) afirma que em caso dúvida, pode-se verificar a qualidade da areia através do ensaio de determinação de teor de argila (norma ABNT NBR 7218, 1987) e de impurezas orgânicas (norma ABNT NBR 7220, 1987).

#### **3.1.2.2.5. Higroscopia**

Segundo BAUER (2000), a areia seca possui duas fases: sólidos (grãos) e vazios (ar); já a areia úmida possui três fases: sólidos, água e ar; e finalmente a areia saturada volta a possuir somente duas fases: sólidos e água. Devido às pequenas dimensões dos vazios existentes na areia seca, esta pode apresentar uma ascensão capilar, também chamada de higroscopia. Isto quer dizer que ao ter contato com a água em sua base, a água no interior da massa alcança um nível superior ao da água no exterior. Quanto mais fina for a areia, maior será a ascensão capilar.

#### **3.1.2.2.6. Coesão aparente**

BAUER (2000) define a coesão de um material como a resistência ao cisalhamento quando o material está sujeito à compressão. Segundo o autor, as areias apresentam coesão quando úmidas, causada pela tensão capilar da água. Está coesão é chamada de coesão aparente. Quando secas ou saturadas as areias não possuem coesão. De acordo com GUIMARÃES (2002), o valor da coesão aparente nas areias cresce rapidamente de zero (para teor de umidade nulo) até o máximo, para decrescer em seguida até se anular novamente para a areia saturada.

### **3.1.2.2.7. Friabilidade**

Segundo GUIMARÃES (2002), as areias perdem qualidade quando contêm grãos friáveis. O Novo Dicionário Aurélio define como friável a capacidade de reduzir-se a fragmentos ou a pó, de partir com facilidade, de se desagregar com facilidade.

### **3.1.2.3. Adições**

Segundo CARVALHO JR. (2005), adições são materiais finos e capazes de conferir algumas propriedades à argamassa, e que na maioria das vezes não possuem poder aglomerante e sim, aglutinante. CARASEK (1996) afirma que as adições possuem alta superfície específica e quando adicionadas às argamassas conferem alta plasticidade e trabalhabilidade.

CARVALHO (2005) cita como adições mais comuns presentes nas argamassas as pozolanas (materiais provenientes de rochas vulcânicas e outros com atividade pozolânica), o pó calcário, também conhecido como filer (material muito fino constituído de calcário ou dolomitos) e os pigmentos.

CARASEK (1996) cita as argilas, muitas vezes presentes nos saibros, como uma adição comumente utilizada. Esta prática tem grande incidência em pequenas construções. Devida à sua área específica relativamente elevada, tem boa capacidade de conferir plasticidade à argamassa. Pelo fato de ser um material natural, não processado e de baixo custo, é utilizado na argamassa em substituição à cal, no entanto, seu uso indiscriminado, sem critérios técnicos, sem controle tecnológico e baseado exclusivamente no empirismo tem levado à ocorrência de um grande número de patologias.

Outras adições que tem merecido a atenção dos pesquisadores da área de argamassas são as fibras poliméricas, os rejeitos industriais e a sílica ativa.

### 3.1.2.4. Aditivos

Existe um consenso entre os autores pesquisados com relação à definição de aditivo. Basicamente todas as definições encontradas afirmam ser o aditivo uma substância utilizada em pequenas porcentagens, inferiores a 5%, com o intuito de modificar algumas propriedades dos concretos ou argamassas. Estas modificações podem ser no estado fresco ou sólido. NEVILLE (1997) afirma ainda que as melhorias podem ser físicas ou econômicas.

Segundo CARASEK (1996) o principal aditivo empregado na produção de argamassas é o incorporador de ar. Este produto é adicionado com a finalidade de melhorar a plasticidade e diminuir a quantidade de água. Os incorporadores de ar também aumentam a retenção de água e reduzem a exsudação, sendo muitas vezes utilizado como substituto da cal. Segundo CARVALHO JR. (2005) os incorporadores de ar são aditivos sulfatantes, ou agentes tensoativos que atuam na molécula de água da argamassa diminuindo sua tensão superficial, formando microbolhas de ar, estáveis, homoganeamente distribuídas na argamassa provocando um efeito mais umectante, melhorando a trabalhabilidade, controlando a permeabilidade e aumentando o rendimento. As microbolhas de ar melhoram a plasticidade e a trabalhabilidade da argamassa, tornando-a pseudoplástica, pois o ar desempenha papel fluidificante. Tem ainda um papel hidrófugo, diminuindo a capilaridade da argamassa. Isto ocorre porque as bolhas de ar interrompem a capilaridade, melhorando ainda sua resistência aos efeitos do congelamento em regiões muito frias.

No entanto, existem algumas características mecânicas da argamassa que diminuem com a introdução do incorporador de ar, mais em particular o módulo de elasticidade do que resistência à tração, de acordo com CARVALHO JR. (2005). A diminuição do módulo de elasticidade torna a argamassa mais deformável e conseqüentemente menos propensa à fissuração.

Com relação à diminuição da resistência à tração, CARASEK et al. (2001) afirmam a diminuição da aderência se deve à redução da superfície de contato pela presença das bolhas de ar. CARASEK (1996) também constatou com o uso de lupa estereoscópica que argamassas com alto teor de ar incorporado apresentam grande quantidade de bolhas de ar na interface e conseqüentemente menor extensão de aderência. CINCOTO et al (1995) sugerem ainda um

limite de dosagem para a utilização de aditivos incorporadores de ar em argamassas devido a seus impactos na resistência de aderência.

Apesar da maioria dos autores correlacionarem a perda de resistência de aderência com o teor de ar incorporado, OPPERMANN & RUDERT (1983) afirmam não ser possível. Em seus estudos os autores encontraram argamassas com altos teores de ar incorporado, cerca de 20%, e elevadas resistências de aderência. Em estudos como MEV, os autores afirmam ser mais importante o tamanho das bolhas do que a quantidade.

CARVALHO JR. (2005) lembra também que uma outra forma de se adicionar ar incorporado a uma argamassa é o tempo de mistura, principalmente no caso de argamassas industrializadas.

Outros aditivos que são utilizados na produção de argamassas são: Retentores de água, Hidrofugantes, Plastificantes, impermeabilizantes e adesivos. Os retentores de água têm a função de reter a água adicionada à argamassa, impossibilitando a perda por evaporação ou exsudação. Os hidrofugantes têm como principal função repelir a água que porventura queira entrar na argamassa. Os Plastificantes diminuem a tensão superficial da pasta constituída, proporcionando maior resistência à compressão e fluidez. Os aditivos impermeabilizantes têm como função impedir totalmente a passagem de água. Os aditivos adesivos melhoram a aderência da argamassa ao substrato.

### **3.1.2.5. Água de amassamento**

Segundo CARASEK (2001), água é um ingrediente essencial na argamassa por duas funções primordiais: (1) possibilita que a mistura seja trabalhável; (2) combina-se quimicamente com os aglomerantes proporcionando o endurecimento e resistência da argamassa.

É usual dizer que se a água serve para beber, então pode ser utilizada na produção de concretos. Esta afirmação é feita também pelo AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI 318 (2002). PETRUCCI (1970) acrescenta que a recíproca não é verdadeira, ou seja, muitas águas utilizáveis sem dano na confecção de concretos não podem ser ingeridas pelo homem. Como exemplo NEVILLE (1997) cita águas com pH entre 6,0 e 9,0, sem sabor salobre, no entanto

com cor escura ou cheiro desagradável, fatos estes que não significam necessariamente a presença de substâncias deletérias.

NEVILLE (1997) chama a atenção para algumas exceções onde águas potáveis não são indicadas para a produção de concreto, e cita como exemplo algumas regiões áridas onde a água é salobra e com teor excessivo de cloretos.

REIS (2004) afirma que o excesso de impurezas na água de amassamento pode afetar a resistência e o tempo de pega do concreto. O AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI 318 (2002) inclui como consequência do excesso de impurezas na água de amassamento a instabilidade de volume e possíveis eflorescências e corrosões de armadura. Diante as semelhanças entre os dois materiais (argamassa e Concreto), no que diz respeito à matriz cimentícia, estas considerações podem ser levadas em conta também na produção de argamassas.

Para SILVA (1998), a água ideal para a produção de concretos deve possuir pH entre 6,0 e 8,0 e indica a NBR 11560 como referência para o controle da qualidade da água de amassamento. REIS (2004) considera satisfatório para a produção de concretos com pH entre 5,8 e 8,0 e cita os seguintes limites máximos, segundo a NBR 6118: matéria orgânica 3mg/l; resíduos sólidos 5000mg/l; sulfatos 600mg/l; cloretos 1000mg/l; açúcar 5mg/l.

É consenso entre os autores pesquisados a grande importância da água na produção de concretos e argamassas. CARASEK (1996) afirma que a água é um ingrediente essencial à argamassa por desempenhar duas funções primordiais: a) Permite a trabalhabilidade da mistura; e, b) combina quimicamente com os aglomerantes proporcionando o endurecimento e resistência da argamassa.

Com relação à quantidade de água e os resultados de aderência das argamassas, CARASEK (2001) afirma que o conteúdo de água deve ser o máximo possível compatível com a trabalhabilidade e mantendo a coesão e a plasticidade da argamassa. Ainda segundo a autora, a baixa relação água/cimento (a/c), aspecto tão importante para o aumento de resistência à compressão dos concretos, perde sua importância na obtenção de uma adequada resistência de aderência de revestimentos. A autora explica que argamassas com alta relação a/c (geralmente

na faixa de 0,7 a 2,8), perdem rapidamente água por sucção ao entrar em contato com o substrato.

### **3.2. Características e propriedades no estado fresco**

A seguir são detalhadas as propriedades da argamassa no estado fresco. No entanto, para se efetuar este estudo é interessante buscar o conceito de reologia. Segundo TATTERSALL (1976), reologia é a ciência voltada para o estudo da deformação e escoamento de um fluido, sob influência de tensões, considerada adequada a materiais “complexos” que não se enquadram numa simples classificação de sólido, líquido ou gás.

#### **3.2.1. Trabalhabilidade**

Segundo DAVISON (1961), a trabalhabilidade é a mais importante propriedade da argamassa no estado plástico. Trabalhabilidade é definida por CARASEK (2007) como a propriedade da argamassa no estado fresco que determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas. Ainda segundo a autora, a trabalhabilidade é uma propriedade complexa resultante da conjunção de diversas outras propriedades. Apesar de o pedreiro reconhecer a trabalhabilidade de uma argamassa com facilidade, é impossível mensurá-la em laboratório. A trabalhabilidade é uma propriedade de avaliação indefinível, arbitrária e pessoal, sendo na realidade uma combinação de várias características reológicas da argamassa: plasticidade, coesão, consistência, massa específica, adesão, de acordo com ISBERNER (1969) (TABELA III-9). CINCOTTO et al. (1995) afirma que a trabalhabilidade não se constitui uma propriedade per si, na medida em que depende do julgamento subjetivo por parte de quem a aplica.

TABELA III-9 - Propriedades relacionadas com a trabalhabilidade das argamassas

<b>Propriedades</b>	<b>Definição</b>
<b>Consistência</b>	É a maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob ação de cargas.
<b>Plasticidade</b>	É a propriedade pela qual a argamassa tende a conservar-se deformada após a retirada das tensões de deformação.
<b>Retenção de água e de consistência</b>	É a capacidade de a argamassa fresca manter sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam a perda de água.
<b>Coesão</b>	Refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa e as ligações químicas da pasta aglomerante.
<b>Exsudação</b>	É a tendência de separação da água (pasta) da argamassa, de modo que a água sobe e os agregados descem pelo efeito da gravidade. Argamassas de consistência fluida apresentam maior tendência de exsudação.
<b>Densidade de massa</b>	Relação entre a massa e o volume de material
<b>Adesão inicial</b>	União inicial da argamassa no estado fresco ao substrato

Fonte: CARASEK, H., 2007

De acordo com SABBATINI (1989), uma argamassa é considerada de boa trabalhabilidade quando distribui-se facilmente, preenchendo todas as reentrâncias, agarra-se à colher de pedreiro, não segrega ao ser transportada, não endurece com o contato com o componente de sucção elevada e permanece plástica por tempo suficiente para que seja dado seu acabamento. Segundo CARASEK (2007), para cada tipo ou função de argamassa, algumas propriedades são mais importantes do que outras.

Para BOMBLED & KALVENES (1967) a trabalhabilidade resulta do efeito de rolamento de grãos de agregados lubrificados pela pasta de cimento e relaciona-se com o atrito interno, a coesão e a viscosidade, sendo que a quantificação destes parâmetros é problemática.

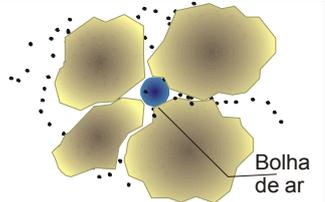
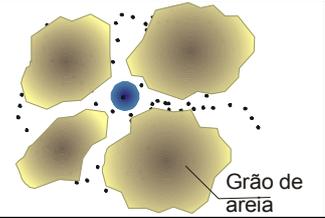
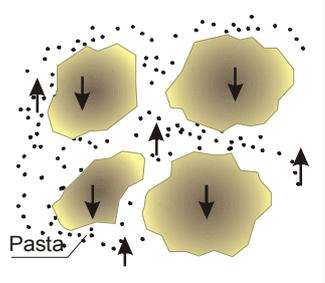
### **3.2.1.1. Consistência e plasticidade**

De acordo com CARASEK (1996), Consistência e plasticidades são os principais fatores condicionantes da trabalhabilidade.

Segundo CINCOTTO et al. (1995) a consistência é a propriedade pela qual a argamassa resiste à deformação e a plasticidade é a tendência a reter a deformação após a redução do esforço.

Geralmente o aplicador modifica estas propriedades através da alteração da quantidade de água de amassamento, uma vez que os demais componentes da argamassa são pré-fixados.

Vários autores classificam as argamassas segundo sua consistência em: seca, plástica e fluida (FIGURA 3-7). Estas determinadas pela quantidade de pasta aglomerante ao redor dos grãos de areia. Na argamassa seca, a pasta preenche os vazios entre os grãos, que permanecem em contato. Na argamassa plástica uma fina película de pasta age como lubrificante na superfície dos grãos. E finalmente na argamassa fluida os grãos estão imersos na pasta, segundo ROSELLO (1976).

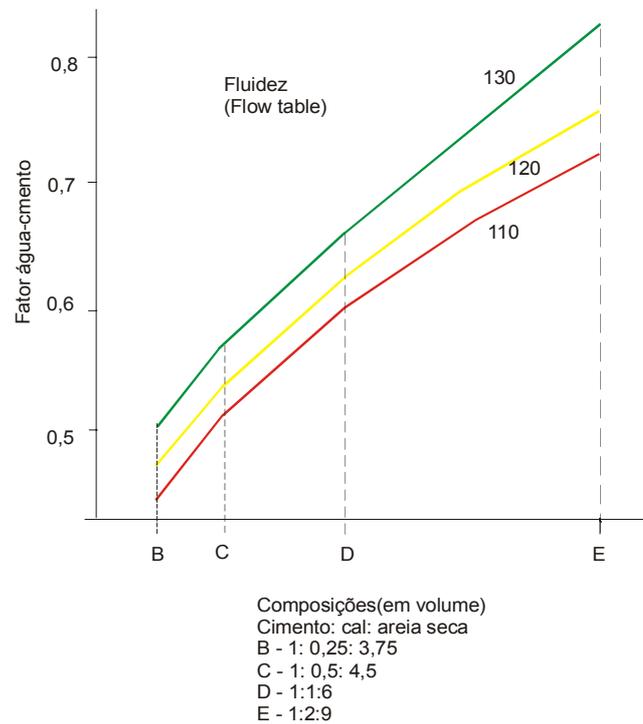
<b>CONSISTÊNCIA</b>	<b>Argamassa Seca</b>	A pasta aglomerante somente preenche os vazios entre os agregados, deixando-os ainda em contato. Existe o atrito entre as partículas que resulta em uma massa áspera.	
	<b>Argamassa Plástica</b>	Uma fina camada de pasta aglomerante “molha” a superfície dos agregados, dando uma boa adesão entre eles com uma estrutura pseudo-sólida.	
	<b>Argamassa Fluida</b>	As partículas de areado estão imersas no interior da pasta aglomerante, sem coesão inteira e com tendência de depositar-se por gravidade (segregação). Os grãos de areia ao oferecem nenhuma resistência ao deslizamento, mas a argamassa é tão líquida que se espalha sobre a base, sem permitir a execução adequada do trabalho.	

**FIGURA 3-7 – Consistência das argamassas**

Fonte: CARASEK, H., 2007

Os autores pesquisados concordam que a consistência de uma argamassa é influenciada diretamente pela relação água/aglomerante; relação aglomerante areia; granulometria da areia e natureza e qualidade do aglomerante.

A FIGURA 3-8 demonstra a influência das variações na composição e da relação Água/cimento na consistência da argamassa.

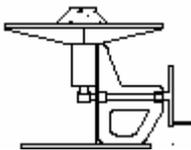
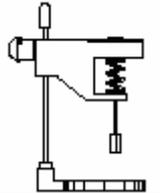
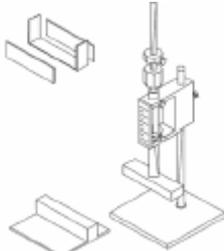


**FIGURA 3-8 – Variação na consistência pela influência das variações na composição de argamassas**  
 Fonte: CINCOTTO, H. et al, 1995

Apesar de a relação aglomerante/areia permanecer constante em todos os traços, observa-se que quanto maior o teor de cal, maior deverá ser o fator água/cimento para se atingir a fluidez da argamassa.

Avaliar, quantificar e prescrever valores de trabalhabilidade das argamassas em laboratório não é tarefa fácil, tendo em vista que ela depende das características intrínsecas da mistura, das propriedades do substrato, da qualidade do aplicador e da técnica utilizada, de acordo com CARASEK (2007). No entanto, existem vários métodos consagrados para a medida da consistência, conforme descritos no TABELA III-10.

TABELA III-10– Métodos empregados para avaliar a consistência e a plasticidade das argamassas

<b>Método</b>	<b>Norma</b>	<b>Esquema</b>	<b>Propriedade avaliada</b>	<b>Parâmetro reológico que controla o fenômeno</b>
<b>Mesa de consistência</b> ( <i>Flow Table</i> )	NBR 7215 NBR 13276		Consistência e plasticidade	Viscosidade
<b>Penetração do cone</b>	ASTM C 780		Consistência	Tensão de escoamento
<b>Vane teste</b>	BS 1377 e ASTM D 4648 (solos)		Consistência	Tensão de escoamento
<b>Gtec teste</b>	-		Consistência, plasticidade e coesão	Tensão de escoamento e viscosidade

Fonte: CARASEK, H., 2007

Segundo CARASEK (1996) os estudos encontrados que relacionam consistência e plasticidades da argamassa com a sua capacidade de aderência, geralmente utilizaram o ensaio de *Flow Table*. Ainda segundo a autora, de uma forma geral, os ensaios demonstram que quanto maior a fluidez inicial da argamassa, maiores são as chances de obtenção de altas resistências de aderência. Entretanto, existe um ponto ótimo, a partir do qual a resistência de aderência começa a diminuir, ficando este ponto, nas pesquisas citadas, oscilando entre 200-230mm.

Cabe salientar, que de acordo com os autores pesquisados, os métodos de ensaio apresentados não definem completamente a trabalhabilidade, podendo duas argamassas de mesmo resultado no ensaio de *Flow Table*, obterem resultados práticos de aplicação completamente divergentes.

A plasticidade, de acordo com CINCOTTO et al (1995), é influenciada pelo teor de ar, natureza e teor dos aglomerantes e pela intensidade de mistura das argamassas. CINCOTTO (2007) acrescenta como fatores que influencia a plasticidade o tipo e teor de agregados, o tempo de mistura, a presença de aditivos e o conteúdo de finos da argamassa. A TABELA III-11, associa o conteúdo de finos da argamassa à sua plasticidade.

**TABELA III-11– Influência do teor de finos (partículas <0,075mm) da mistura seca na plasticidade das argamassas**

<b>Plasticidade</b>	<b>% mínima de finos da argamassa</b>	
	<b>Sem aditivo plastificante</b>	<b>Com aditivo plastificante</b>
<b>Pobre (áspera, magra)</b>	<15	<10
<b>Média (plástica)</b>	15 a 25	10 a 20
<b>Rica (gorda)</b>	>25	>20

Fonte: LUHERTA VARGAS; MONTEVERDE COMBA,1984

De acordo com CARDOSO et al (2005), um método mais recente e completo que surge para avaliação da trabalhabilidade das argamassas é o *Squeeze Flow* (FIGURA 3-9). Este método baseia-se na medida do esforço necessário para compressão uniaxial de uma amostra cilíndrica de argamassa entre duas placas paralelas. Este ensaio permite a variação da taxa de cisalhamento e da magnitude das deformações, possibilitando detectar pequenas alterações nas características reológicas dos materiais, ao contrário dos métodos tradicionais, que não fornecem um valor medido, mas um perfil do comportamento reológico de acordo com solicitações impostas.



**FIGURA 3-9 – Squeeze Flow**

Fonte: CARASEK, H., 2007

### **3.2.1.2.Retenção de água**

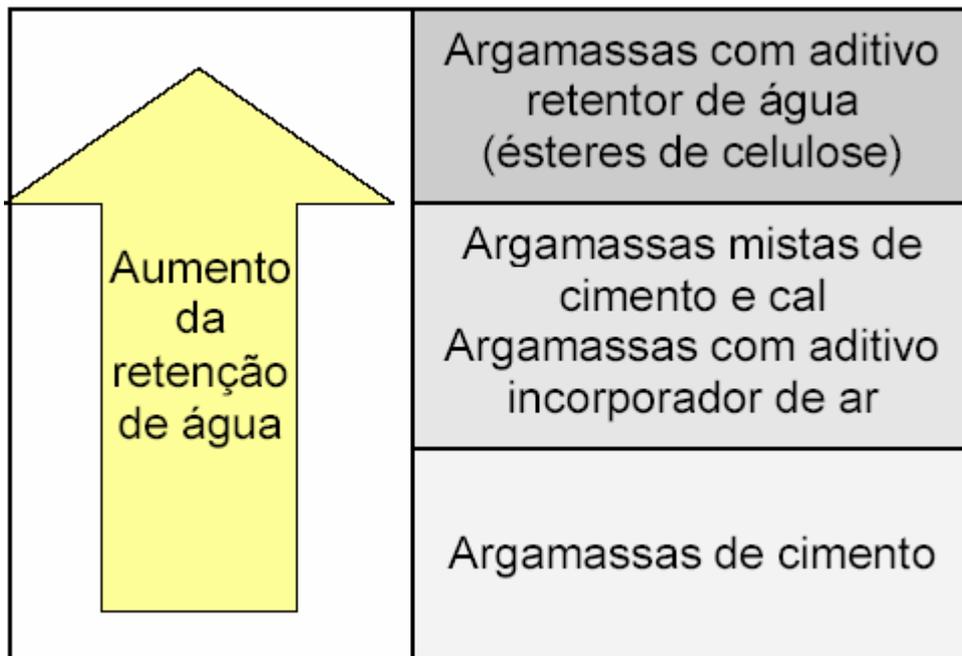
CINCOTTO et al (1995) define retenção de água como a capacidade da argamassa fresca em manter sua consistência ou trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provoquem perda de água (evaporação, absorção pelo componente, sucção). A retenção de água torna-se mais importante quando a argamassa é aplicada sobre superfícies com alta sucção de água ou sob condições climáticas desfavoráveis, afirma CARASEK (2007).

Todos os autores pesquisados concordam com a afirmação que a retenção de água além de interferir no comportamento da argamassa no estado fresco, afeta também as propriedades da argamassa no estado endurecido. Segundo CINCOTTO et al (1995) a influência sobre as propriedades no estado endurecido se dá na medida em que determina as condições de hidratação do cimento e a carbonatação da cal, responsáveis pela evolução do processo de endurecimento. A retenção de água tem influência sobre as condições de contato da argamassa com a base e a retenção de umidade.

De acordo com CINCOTTO et al (1995) os fatores que influem na capacidade de retenção de água da argamassa são: a área específica dos materiais constituintes e o número dos íons ativos por unidade de superfície; a relação cal/cimento no traço; a relação agregado aglomerante. Ainda segundo a autora, os aglomerantes, em função de sua área específica, são os principais responsáveis pela capacidade de retenção de água da argamassa. Vários autores concordam que as argamassas que contém cal apresentam características favoráveis de retenção de água pela

elevada superfície específica da cal e pela grande capacidade de adsorção de seus cristais (até 100% do seu volume).

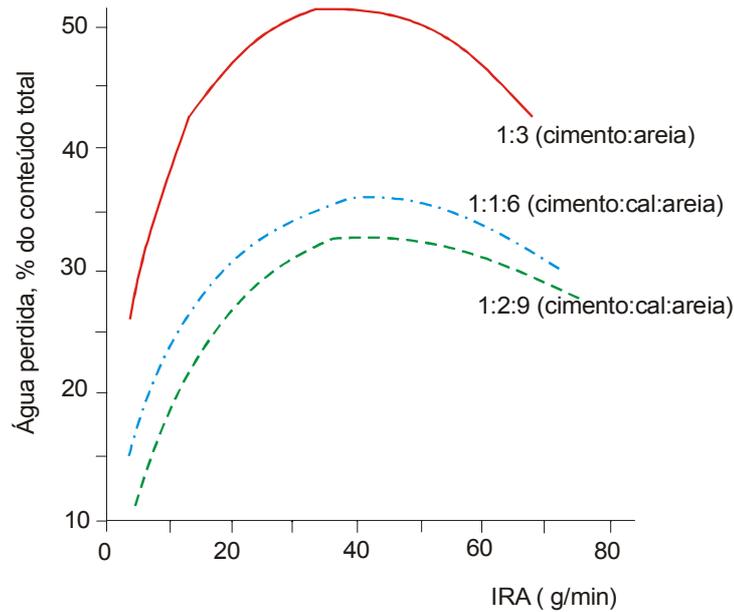
SABBATINI (1989) conclui que para aumentar-se a capacidade de retenção de água da argamassa, deve-se aumentar a superfície específica dos constituintes ou utilizando-se aditivos que por suas características adsorvam a água (ex. derivados de celulose) ou impeçam a percolação da água (aeradores) FIGURA 3-10.



**FIGURA 3-10 – Variação para retenção de água para diferentes argamassas**

Fonte: CARASEK, H., 2007

Segundo DAVIDSON (1961) a capacidade de retenção de água de uma argamassa varia largamente com o potencial de sucção do substrato. O autor observou que para diferentes tipos de argamassa a perda de água por sucção é crescente em função do IRA do substrato até valores entre 30 g/min e 50 g/min, diminuindo para valores maiores, FIGURA 3-11.



**FIGURA 3-11 – Perda de água de argamassas em função da sucção dos blocos (tempo de contato 4 minutos)**

Fonte: DAVIDSON, 1961

SABBATINI afirma que a falta de boa retenção de água por parte da argamassa pode ocasionar a absorção excessiva de água pelo substrato aumentando o potencial de retração por secagem; a redução da resistência de aderência e mecânica devido a prejuízo causado à hidratação do cimento e carbonatação da cal, menor capacidade de absorver deformações devido ao maior módulo de elasticidade da argamassa endurecida, menor resistência. E como consequência de todos estes fatores haverá ainda prejuízo na durabilidade e na estanqueidade da parede.

### 3.2.1.3. Massa específica

A massa específica da argamassa varia com o teor de ar (principalmente quando incorporado por meio de aditivos) e com a massa específica dos materiais constituintes, afirma CARASEK (2007). A massa específica da argamassa endurecida é um pouco menor do que o valor no estado fresco, devido à saída de parte da água. A TABELA III-12 apresenta uma classificação das argamassas quanto à densidade.

TABELA III-12– Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco

Argamassa	Densidade de massa A (g/cm <sup>3</sup> )	Principais agregados empregados	Usos/observações
Leve	< 1,40	Vermiculita, perlita, argila expandida	Isolamento térmico e acústico
Normal	$2,30 \leq a \leq 1,40$	Areia de rio (quartzo) e calcário britado	Aplicações convencionais
Pesada	> 2,30	Barita (sulfato de bário)	Blindagem de radiação

Fonte: CARASEK, H., 2007

#### 3.2.1.4. Adesão inicial

A adesão inicial é definida por CARASEK (2007) como a capacidade de união inicial da argamassa no estado fresco a uma base. Esta propriedade está diretamente relacionada com as características reológicas da pasta aglomerante, especificamente a sua tensão superficial. Segundo ROSELLO (1989) a baixa tensão superficial da pasta é a responsável pela adesão física ao substrato e aos grãos do agregado. Para CARASEK (2007) a redução da tensão superficial favorece a “molhagem” do substrato, reduzindo o ângulo de contato entre as superfícies e implementando a adesão. Ainda segundo a autora, esse fenômeno propicia um maior contato físico da pasta com os grãos de agregado e também com a base, melhorando, assim, sua adesão.

A tensão superficial da argamassa pode ser modificada pela alteração de sua composição, sendo ela função inversa do teor de cimento. A adição de cal também diminui a tensão superficial da argamassa. Efeitos semelhantes podem ser obtidos com aditivos incorporadores de ar e retentores de água.

### 3.3. Característica e propriedades no estado endurecido

#### 3.3.1. Aderência

De acordo com SABBATINI (1989), a resistência de aderência pode ser definida como a capacidade que a interface substrato-argamassa possui de absorver tensões sem romper-se. Segundo CARASEK (2007), o termo aderência descreve a resistência e extensão do contato

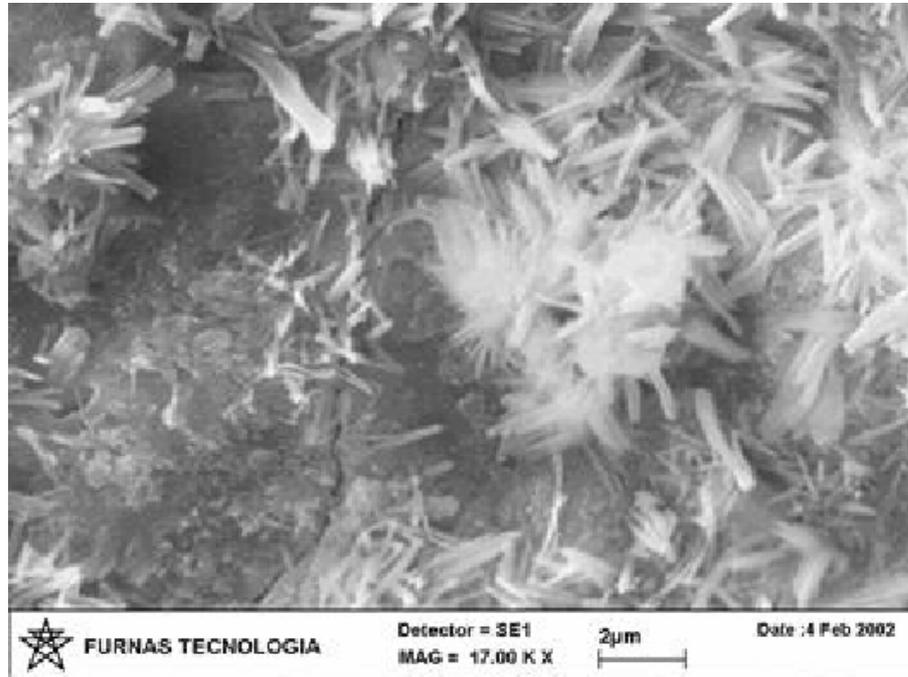
entre a argamassa e uma base, sendo, portanto incorreto falar-se de aderência de uma argamassa sem especificar em que material ela está aplicada. Ainda segundo a autora, a aderência é uma propriedade que depende da interação de dois materiais. Para SUGO et al. (2001) a aderência da argamassa à base se dá por um sistema complexo que envolve o transporte dos fluidos e dos finos da argamassa para interface argamassa/base, seguido da hidratação dos materiais cimentícios. CINCOTTO et al (1995) corroboram com esta afirmação anterior, dizendo que a aderência é significativamente influenciada pelas condições da base, como a porosidade e absorção de água, resistência mecânica, textura superficial e pelas próprias condições de aplicação. Para CARASEK (2001) a aderência deriva da conjunção de três propriedades da interface argamassa-substrato: a resistência de aderência à tração, a resistência de aderência ao cisalhamento e a extensão de aderência, sendo esta correspondente à razão entre a área de contato efetivo e a área total possível de ser unida.

### **3.3.1.1. Mecanismos de ligação argamassa-substrato**

De acordo com CARASEK (2007), a aderência da argamassa endurecida ao substrato é um fenômeno essencialmente mecânico, causado pela penetração da pasta aglomerante nos poros ou entre as rugosidades da superfície de aplicação. Ainda segundo a autora, parte da água de amassamento, que contem em dissolução ou em forma coloidal os componentes do aglomerante, penetra pelos poros e pelas cavidades do substrato, onde ocorrem os fenômenos de precipitação dos produtos de hidratação do cimento e da cal, produzindo um efeito de ancoragem da argamassa à base.

CARASEK (1996), através de estudos realizados com o MEV, observou que a aderência é decorrente do intertravamento principalmente de etringita ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$  – trissulfoaluminato de cálcio hidratado: um dos produtos da hidratação do cimento) no interior dos poros do substrato. O aumento localizado da concentração de etringita se deve ao fato de ao se misturar o cimento Portland com a água, a gipsita utilizada como reguladora de pega do cimento dissolve-se e libera íons sulfato e cálcio. Esses íons são os primeiros a entrar em solução, seguidos pelos íons aluminato e cálcio provenientes da dissolução do  $\text{C}_3\text{A}$  do cimento. Devido ao efeito de sucção imposto pelo substrato poroso, estes íons são carregados para o interior dos poros causando a referida ancoragem. Com a precipitação da etringita e a dissolução mais rápida dos íons  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{AlO}_4^{-4}$  e  $\text{Ca}^{2+}$ , os poros são preenchidos prioritariamente por eles, sobrando menos espaço para precipitação de outros produtos de

hidratação do cimento, como o CSH, ou mesmo produtos posteriores da carbonatação da cal como a calcita. Por isto estes últimos aparecem em menor quantidade na região da interface FIGURA 3-12.



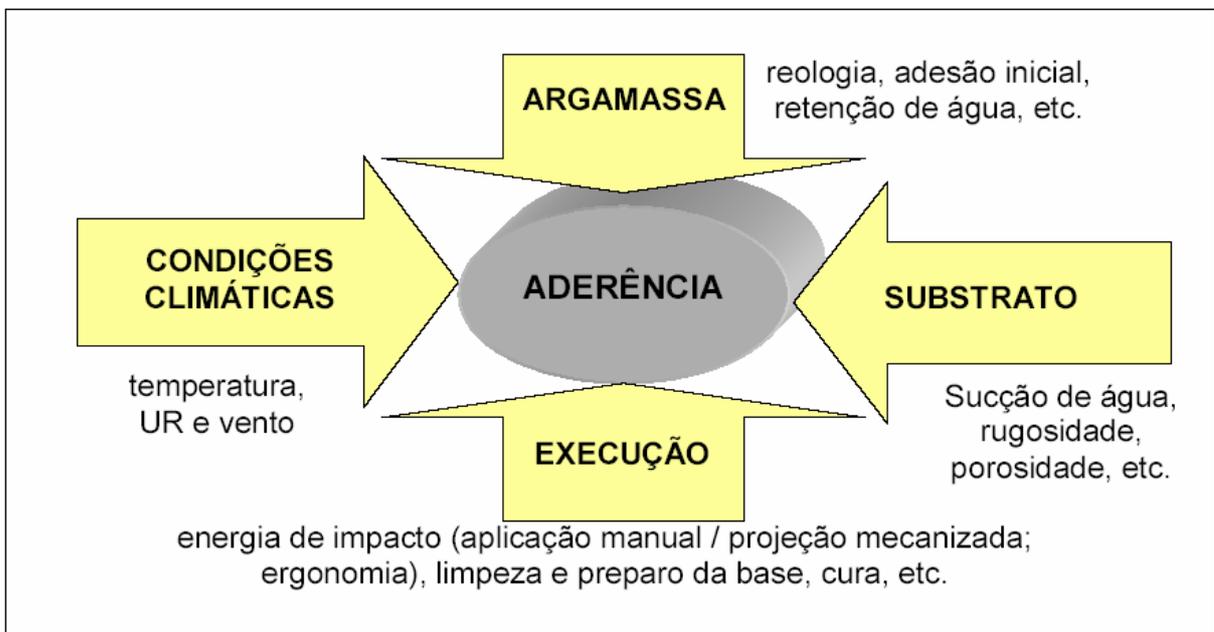
**FIGURA 3-12 – Imagem no microscópio eletrônico de varredura obtida pela ampliação (17.000X) de um ponto do bloco contendo pasta aglomerante, em que se pode ver a etringita, principal responsável pelo intertravamento da argamassa ao bloco (SCARTEZINI 2002).**

Fonte: CARASEK, 2007

GALLEGOS (1995), em seu trabalho sobre aderência entre argamassa e substrato de alvenaria, identifica como causa da aderência a penetração de cristais de cimento nos poros, sendo este fenômeno dependente da interação hídrica entre a argamassa e a alvenaria, da temperatura, da retenção de água e da composição da argamassa e do processo construtivo. O autor também identifica a etringita como substância presente nos poros da alvenaria formando cristais hexagonais em forma de agulhas, com diâmetro de  $0,5\mu\text{m}$ . TAHA & SHRIVE (2001) concluem, em concordância com autores já citados, que a interface argamassa/tijolo é rica em etringita. Já METHA (2006) afirma que com o progresso da hidratação do cimento a etringita é usualmente convertida em monosulfoaluminato, que é mais estável que a etringita. Entretanto, STARK & MÖSER, discordam desta afirmação. Os autores afirmam que contrariamente aos modelos de hidratação anteriores, a etringita não se torna instável e não se converte gradualmente em monosulfoaluminatos. Ambos são produtos finais da hidratação do cimento. Todavia, a existência da etringita nas idades mais avançadas tem sido atribuída à

ausência de água (provocada pela absorção do tijolo) necessária para que o processo de hidratação continue (LAWRENCE & CAO 1988).

Observando-se os mecanismos de ligação, pode-se concluir que quanto maior for o contato entre a argamassa e o substrato, maior será a aderência obtida. Desta maneira, a aderência está diretamente relacionada à trabalhabilidade da argamassa, com a energia de aplicação, além é claro, das características e propriedades dos substratos e de fatores externos (CARASEK 2007). A autora apresenta na FIGURA 3-13, os 14 principais fatores que exercem influência sobre a aderência.



**FIGURA 3-13 – fatores que exercem influência na aderência de argamassas sobre bases porosas**  
Fonte: CARASEK, 2007

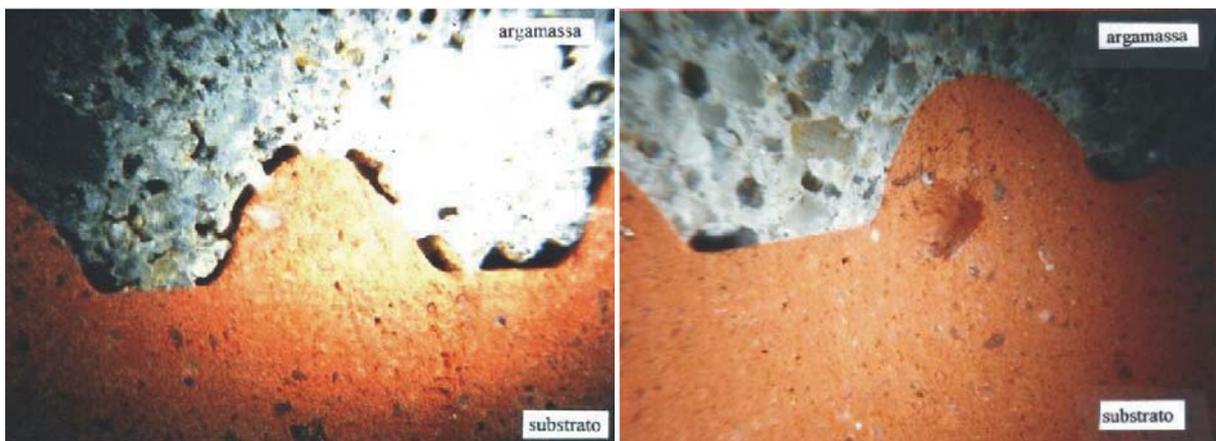
### 3.3.1.2. Influência dos materiais constituintes da argamassa

Segundo CARASEK (2007), o tipo e as características físicas do cimento podem influenciar os resultados de aderência, sendo, que a mais significativa é a finura do cimento. De maneira geral, quanto mais fino o cimento, maior a resistência de aderência obtida. No entanto, em virtude de sua finura, cimentos de alta resistência inicial podem levar à retração e fissuração.

A cal contribui com importantes propriedades plastificantes e de retenção de água, devido sua finura. Devido a isto, argamassas com cal preenchem mais facilmente e de maneira mais completa toda a superfície do substrato, proporcionando maior extensão de aderência CASASEK (2007). GALLEGOS (1995) corrobora com esta afirmação quando ressalta o fato de que argamassas de cimento sem a presença da cal produz argamassa pouco trabalháveis que geram contato tentacular – forte, porém incompleto – na interface e se retrai ao avançar em seu processo de hidratação.

A cal proporciona ainda maior durabilidade da aderência devido a sua capacidade de evitar fissuras e preencher vazios pela reação de carbonatação que se processa ao longo do tempo (reconstituição autógena).

De acordo com CARASEK (2007), a capacidade de “molhar” a superfície e preencher o substrato proporcionado pela adição da cal à argamassa, leva ao nível microscópico a uma interface mais densa, contínua e com menor incidência de microfissuras do que obteria com uma argamassa somente a base de cimento. Sendo assim, a autora faz a afirmação de que as argamassas “ideais” são aquelas que reúnem as qualidades do cimento e da cal, FIGURA 3-14. Os vazios na interface provocam concentração de esforços e diminuem a área que necessita ser danificada para provocar o descolamento.



**FIGURA 3-14 – Fotografias obtidas na lupa estereoscópica com ampliação de 20 vezes: (a) argamassa 1:3 (cimento e areia, em volume) aplicada sobre bloco cerâmico; (b) argamassa 1:1/4:3 (cimento, cal e areia, em volume) aplicada sobre o mesmo tipo de bloco cerâmico empregado em (a).**

Fonte: CARASEK, H., 1996

Segundo JOHN (2003), a influência da adição da cal na aderência dos revestimentos é um assunto complexo, uma vez que depende das propriedades da base, como absorção e

rugosidade, das propriedades da argamassa e das condições de adensamento durante sua projeção, sendo que o grau de adensamento é resultado da combinação entre a reologia da pasta, a energia de lançamento e a área de contato entre a argamassa e a base.

Os agregados também influenciam na capacidade de aderência. De acordo com CARASEK (2007), a aderência depende dos teores e características da areia empregada empregadas na produção da argamassa. De uma maneira geral, à medida que se aumenta o teor de areia, há uma redução na resistência de aderência e um aumento na durabilidade da aderência pela redução da retração.

Areias muito grossas não produzem argamassas com boa capacidade de aderir, pois prejudicam sua trabalhabilidade, reduzindo conseqüentemente a extensão de aderência. Entretanto, garantindo a trabalhabilidade da argamassa, quanto maior o módulo de finura das areias, maior será a resistência de aderência obtida. É importante também que a areia possua uma granulometria contínua, CARASEK (2007).

Segundo CARASEK (2007), areias com altos teores de finos (partículas inferiores a  $0,075\mu\text{m}$ ) podem prejudicar a aderência tomando o lugar dos produtos de hidratação do cimento ou produzindo argamassas com poros muito finos que dificultem a absorção da pasta de aglomerante pelo substrato, uma vez que o fluxo hidráulico se dá sempre no sentido dos poros maiores para os menores.

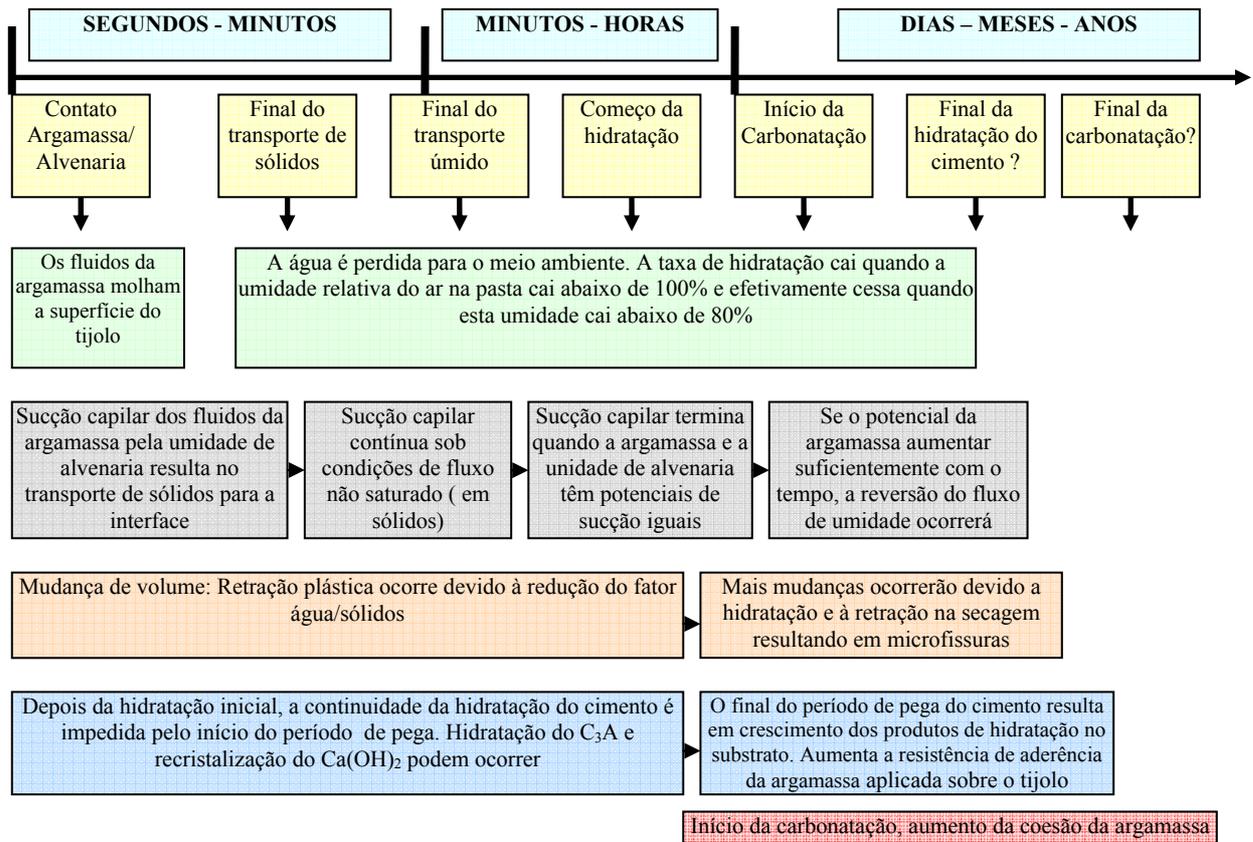
As características e propriedades do substrato também são decisivas no resultado de aderência. Segundo GALLEGOS (1995), a sucção, a quantidade de poros capilares e a estrutura dos mesmos (forma, textura e distribuição dos poros) e a textura da superfície da face de assentamento são as características do tijolo associados ao seu potencial de aderência com a argamassa. A sucção é avaliada através do ensaio IRA (ASTM C-67, 1997), que expressa a avidez de água dos poros capilares da face de assentamento nos primeiros momentos do seu contato com a água. Em tijolos cerâmicos pode variar de 10 a 160 gramas. A quantidade de poros capilares são somente os poros que tem contato com a superfície e possuem raio médio superior a  $0,1\mu\text{m}$ , podendo assim absorver água. Em tijolos cerâmicos variam entre 8 e 9% podendo alcançar 30%. A estrutura de poros em tijolos cerâmicos podem ser assimilados a condutos cilíndricos de textura suave, enquanto os poros de blocos de concreto se assemelham mais a uma sucessão de esferas secantes e são de textura rugosa.

DETRICHÉ et al (1985) propõem um modelo no qual o fluxo de água entre a argamassa e o substrato é encarado como a interação de dois sistemas de poros. Neste modelo, enquanto os raios médios dos capilares da argamassa forem superiores aos capilares do substrato, o movimento de água se efetua no sentido argamassa substrato. Com a evolução da hidratação da argamassa, os raios dos capilares diminuem. Quando os capilares da argamassa se tornam menores do que os do substrato, o fluxo de água muda de direção. Segundo WINSLOW & LIU (1990), os poros do substrato com diâmetros superiores a 5 $\mu$ m são inoperantes, pois não têm força capilar suficiente para vencer os poros da argamassa. De acordo com CARASEK (2001), o raio médio dos poros da argamassa pode ser modificado através da proporção aglomerante/agregado.

Para GROOT (1997) e LANGE et al. (1999), enquanto as características da absorção superficiais definem a taxa e o volume de água retirada da argamassa para a unidade de alvenaria, a qualidade da argamassa define a quantidade de água disponível na interface e a resistência dos produtos de hidratação do cimento, depositados nos poros superficiais do tijolo. A interação da absorção superficial do tijolo e da qualidade da argamassa determina a eficiência de dois processos que controlam o desenvolvimento da aderência na interface. MCGINLEY (2001) e TAHA et al. (2001) afirmam que o equilíbrio entre água requerida e a água disponível na interface argamassa/unidade de alvenaria contribui para o desenvolvimento da aderência na interface.

SUGO et al. (2001) apresentam FIGURA 3-15 que ilustra os diferentes processos que ocorrem durante o desenvolvimento do sistema de aderência mecânico de uma argamassa à base.

TAHA & SHRIVE (2001) descrevem um outro mecanismo de aderência da argamassa ao tijolo: a aderência química, onde a resistência de aderência é fornecida por forças covalentes ou forças de Van der Waals desenvolvidas entre o tijolo e os produtos de hidratação do cimento. KAMPF (2001) demonstrou que a resistência de aderência propiciada pelo sistema químico é cerca de 1/10 da resistência de aderência total. Entretanto o sistema de aderência químico pode ser melhorado substancialmente através da introdução de aditivos adesivos (CARVALHO JR., 2005).



**FIGURA 3-15 – Processos ocorridos durante o desenvolvimento do sistema de aderência mecânico**

Fonte: SUGO et al., 2001

Cabe aqui salientar a forte influência do fator humano do desempenho dos revestimentos quanto à aderência. Em seus estudos GONÇALVES & BAUER (2005) observaram que a resistência de aderência varia com a altura de aplicação, demonstrando que a ergonomia do operário influencia fortemente na aderência. A resistência mais alta foi observada próxima a 1,30m, que seria a posição em que o operário aplica a argamassa na posição ereta, permitindo maior liberação de energia de aplicação.

### 3.3.1.3. Medida da resistência e aderência

No Brasil, a avaliação da resistência de aderência à tração está prevista na norma NBR 13528 (ABNT, 1995). O princípio básico está resumido na FIGURA 3-16.

<p>1) Corte do revestimento perpendicularmente ao seu plano – delimitação do corpo-de-prova (CP). A norma atual permite o emprego de CPs circulares (de 5 cm de diâmetro) e quadrados (de 10 cm de lado).</p> <p><i>Importante: garantir o corte de toda a camada de revestimento, atingindo o substrato.</i></p>	
<p>2) Colagem de um dispositivo para acoplar o equipamento de tração (pastilha).</p> <p><i>Importante: colar a pastilha no centro do CP delimitado pelo corte para evitar a aplicação do esforço de tração excêntrico.</i></p>	
<p>3) Acoplamento do equipamento de tração e execução de esforço de tração até a ruptura.</p> <p>Obs.: existem vários equipamentos para essa finalidade.</p> <p><i>Importante: verificar a calibração do equipamento; garantir a correta velocidade de carregamento e garantir a perfeita perpendicularidade entre o esforço exercido pelo equipamento e o revestimento.</i></p>	
<p>4) Cálculo da resistência de aderência.</p> <p>Obs. a NBR 13749 estabelece parâmetros para a avaliação desta propriedade (ver Quadro 3).</p>	$Ra = \frac{F}{A}, \text{ em MPa}$ <p>F = carga de ruptura; A = área do CP</p>
<p>5) Análise da superfície de ruptura após o arrancamento (Figura 16), anotando o percentual de cada tipo de ruptura.</p>	

**FIGURA 3-16 – Etapas da realização do ensaio de determinação da resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa, segundo a NBR 13528 (ABNT, 1995)**

Fonte: CARASEK, 2007

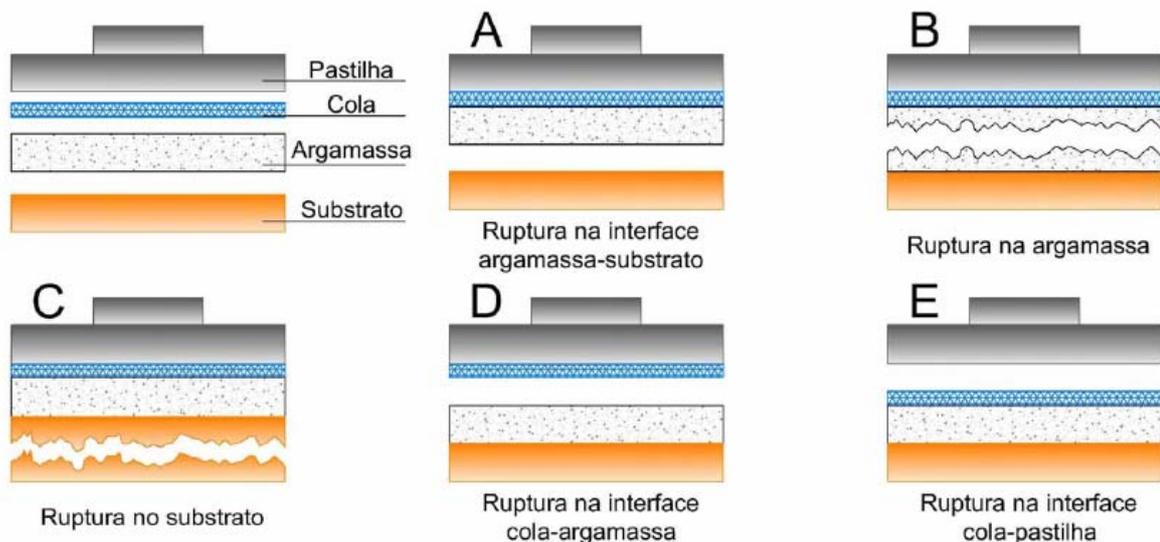
Os resultados apresentam, geralmente, alta dispersão, variando da ordem de 10% a 35%. Segundo CARASEK (2007), isto acontece pelo fato de a resistência de aderência ser influenciada por diversos fatores, além de a metodologia atual ser muito aberta.

De acordo com CARASEK (1996), o cálculo da média e do coeficiente de variação dos resultados obtidos no ensaio deve ser realizado criteriosamente e, em geral, somente para os corpos de prova que apresentem o mesmo tipo de ruptura, tendo em vista que a magnitude dos valores de tensão obtidos é diferenciada em função do tipo de ruptura.

Quando da realização do ensaio de arrancamento, um aspecto deve ser observado: tão importante quanto os valores de resistência de aderência obtidos é a análise do tipo de ruptura. Segundo CARASEK (2007), a ruptura pode ser do tipo coesiva, quando ocorre no interior da argamassa ou da base (tipos B e C, da FIGURA 3-17), os valores são menos preocupantes, ao

menos que sejam muito baixos. A ruptura pode ser do tipo adesiva (tipo A), ou seja, ocorre na interface argamassa/substrato. Neste caso os valores devem ser mais elevados, pois existem potencial maior para patologias. A ruptura do tipo D significa que a porção mais fraca é a camada superficial do revestimento, significando, em caso de valores são baixos, que a resistência superficial é inadequada (pulverulência). E finalmente na ruptura do tipo E houve um defeito de colagem, devendo este ensaio ser desprezado.

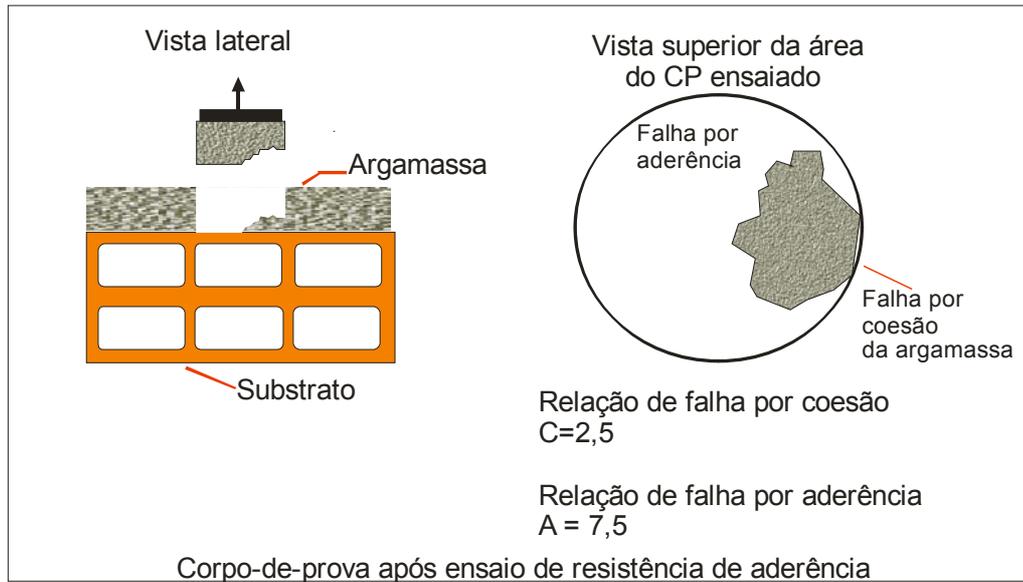
CARASEK (1999) observou em seus estudos que nas primeiras idades existe uma predominância de ruptura no interior da argamassa, próxima a região da interface, indicando baixa coesão da argamassa nesta região. Já nas idades mais avançadas a ruptura predominante é realmente de interface.



**FIGURA 3-17 - Tipos de ruptura no ensaio de aderência à tração de revestimentos de argamassa, considerando o revestimento aplicado diretamente ao substrato (sem chapisco)**

Fonte: CARASEK,H, 2007

Cabe observar que somente no caso de ruptura do tipo A é que o valor da resistência de aderência é igual ao valor obtido no ensaio. Quando ocorrem rupturas diferenciadas e simultâneas no mesmo corpo de prova. Deve-se anotar o percentual aproximado da área de cada uma delas, mediante análise da superfície de fratura (FIGURA 3-18).



**FIGURA 3-18 – Exemplo de determinação das relações de falha, para representação gráfica pelo método das otimizações de quadrantes**

Fonte: CARASEK, 1996

PAREEK, OHAMA & DEMURA (1995) propõem um método, denominado de otimização de quadrantes, para representação gráfica dos tipos de ruptura possíveis nos ensaios de determinação de resistência de aderência. O gráfico é dividido em quadrantes, sendo a divisão vertical o ponto onde a relação entre os tipos de falha (Falha por coesão – Tipo B / falha por aderência – Tipo A) é igual a 5, ou seja, 50% de cada tipo de falha, e a divisão horizontal é o valor mínimo de resistência de aderência aceitável, ou seja, os valores determinados pela norma adotada (FIGURA 3-19).

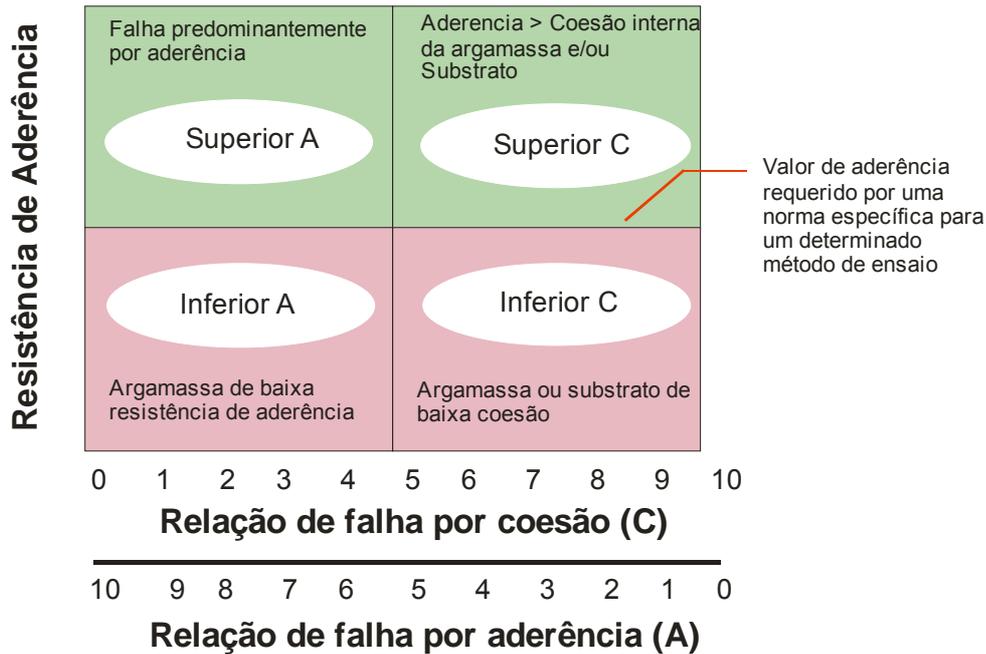


FIGURA 3-19 – Representação gráfica pelo método da otimização de quadrantes proposto por PAREK et al. (1995)

Fonte: CARASEK, 1996

Caso um ponto ensaiado esteja posicionado no quadrante superior A, significa que neste caso predominou a ruptura na interface, porém o valor obtido foi aceitável uma vez que é superior ao prescrito pela norma. Entretanto, se o ponto estiver situado no quadrante inferior C significa que ocorreu ruptura pela falta de coesão da argamassa, do substrato ou de ambos e este valor está abaixo da resistência mínima determinada pela norma.

Segundo CARASEK (1996), as rupturas no ensaio de resistência de aderência geralmente ocorrem por deficiência de aderência da argamassa ao substrato, ou por falta de coesão da argamassa. Em ambos os casos o aumento do teor de cimento é favorável, seja pelo aumento da coesão interna da argamassa devida às forças de Van der Waals, seja pela maior quantidade de cristais de etringita precipitados na interface.

### 3.3.2. Permeabilidade

MEHTA & MONTEIRO (2006) definem permeabilidade como a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido para o interior de um sólido poroso. Esta propriedade é caracterizada pela passagem de água através da argamassa endurecida por meio da infiltração

sob pressão, capilaridade ou difusão de vapor de água. Ainda de acordo com o autor, a permeabilidade é controlada pelo tamanho e continuidade dos poros e a grande responsável por esta permeabilidade é a água adicionada, pois o seu teor determina o espaço total e, após, o espaço vazio, depois que a água for consumida pelas reações de hidratação ou evaporada para o ambiente. Segundo CINCOTTO et al. (1995), influenciam grandemente a permeabilidade, a granulometria do agregado, a natureza e o teor de aglomerante, além das características do substrato. Ainda segundo os autores, de modo geral, as argamassas de cimento são menos permeáveis, diminuindo com o aumento do teor de cimento. A permeabilidade reduz também, à medida que evolui o endurecimento da argamassa e é diretamente proporcional à relação água/aglomerante e inversamente proporcional à resistência da pasta aglomerante. De acordo com MEHTA & MONTEIRO (2006) com o progresso da hidratação, a porosidade diminui e junto com ela a permeabilidade e quando a relação água/cimento é alta e o grau de hidratação é baixo, a pasta de cimento terá alta porosidade capilar; ela conterá um número relativamente elevado de poros grandes e bem conectados e portanto um coeficiente de permeabilidade alto. NEVILLE (1997) confirma as afirmações acima quando afirma que a permeabilidade da pasta de cimento é controlada pela porosidade capilar e varia com a evolução da hidratação, sendo que no estado plástico o escoamento de água é controlado pelo tamanho, forma e concentração das partículas de cimento, enquanto que na pasta endurecida depende do tamanho, forma e concentração das partículas de gel e da descontinuidade ou não dos capilares. O autor afirma ainda que a pasta de cimento tem permeabilidade tanto menor quanto maior é o teor de cimento e que cimentos mais grossos tendem a produzir pastas hidratadas com porosidade maior do que as produzidas por cimentos mais finos.

Segundo MOSQUERA et al. (2003) a adição de cal em argamassas de cimento aumenta significativamente a porosidade total, além de levar ao aparecimento de poros maiores.

### **3.3.3. Resistência mecânica**

A resistência mecânica das argamassas depende da estrutura física dos produtos resultantes da hidratação do cimento e da carbonatação da cal, e diz respeito à capacidade destas a resistirem às tensões de tração, compressão, cisalhamento ou abrasão que estes revestimentos possam estar submetidos. Segundo CARVALHO JR. (2005), a resistência mecânica é influenciada basicamente pela natureza dos aglomerantes, natureza dos agregados, proporção aglomerante/agregado, relação água/cimento e técnica de execução. Os esforços que geram

essas tensões provêm de cargas estáticas ou dinâmicas provocadas pelo tipo de uso da edificação, de efeitos climáticos e das condições de exposição.

A resistência à compressão está presente na argamassa a partir do seu endurecimento. Em seus estudos, AGUILAR et al. (2004) sugerem para argamassas de boa qualidade uma resistência a compressão superior a 2,5MPa para argamassas mistas e 10 MPa para argamassas de cimento e areia. Segundo CARASEK (1996), diversos autores afirmam que existe uma dependência entre a resistência a compressão e a resistência de aderência da argamassa. Nos resultados obtidos por CARVALHO JR. et al. (1995) é verificada a existência de uma relação direta entre as duas resistências, ou seja, ao se variar as proporções aglomerante/agregado, houve uma variação no mesmo sentido as resistências à compressão e de aderência. No entanto ISBERNER (1964) e HAN & KISHITANI (1984) encontraram uma relação inversa entre as duas propriedades, ou seja, ao se aumentar a resistência de compressão diminuía a resistência de aderência. Estes resultados, aparentemente contraditórios, são explicados pelo fato de que nestes últimos experimentos as proporções dos traços foram mantidas e variou-se apenas a relação água/aglomerante. Desta forma, os autores obtiveram melhores resultado de aderências com as argamassas mais fluídas e, portanto menores resistências à compressão.

De acordo com CINCOTTO et al. (1995) o proporcionamento dos materiais constituintes da argamassa tem influência sobre a resistência mecânica. Ensaio demonstram que as resistências à tração e à compressão aumentam com a adição de pequenos volumes, no entanto, volumes maiores ocasionam decréscimos significativos nas resistências. Ainda segundo os autores, o aumento do volume de cal provoca um decréscimo significativo do módulo de elasticidade.

Segundo AGUILAR et al. (2004), a resistência mecânica à tração de materiais frágeis está relacionada à presença e propagação de microtrincas. Dessa forma, é possível que se tenha argamassas com o mesmo módulo de elasticidade e com diferentes resistências mecânicas. A argamassa mais adequada para uso é aquela que se deforma mais e que suporta maiores tensões de tração. As argamassas podem ser classificadas segundo sua resistência a flexo-tração e módulo de elasticidade dinâmico:

- argamassas de baixa fissuração  $\sigma_f / E_d \geq 0,04\%$
- argamassas de alta fissuração  $\sigma_f / E_d \geq 0,03\%$

A resistência ao desgaste superficial ou à abrasão é influenciada pelo teor de aglomerante, pela granulometria da areia e sua natureza.

Outras solicitações a que estão expostas as argamassas são as movimentações térmicas e higroscópicas, tanto do próprio revestimento, como do substrato. A higroscopia pode ocorrer por meio de difusão, por capilaridade ou por forças externas e pode ocorrer entre as várias camadas (reboco, emboço, chapisco, substrato) gerando tensões cisalhantes nas interfaces. As movimentações térmicas ocorrem devido às oscilações de temperatura e causam variações dimensionais, cuja magnitude e amplitude dependem do coeficiente de dilatação térmica da argamassa, da umidade relativa do ambiente e da aderência à base (CINCOTTO, 1995).

### **3.3.4. Elasticidade ou capacidade de deformação**

O módulo de elasticidade foi inicialmente concebido pelo matemático inglês Robert Hooke (1635-1703) e é baseado no comportamento linear das deformações sob carregamento nos materiais. Como para o concreto a falta de linearidade começa já em pequenas tensões e o termo elasticidade pressupõe que cessada a solicitação, a deformação desaparece em qualquer nível de carregamento, atualmente tem se preferido utilizar a expressão “módulo de deformação”. Segundo AGUILAR et al. (2004) o módulo de deformação é uma aproximação razoável do módulo de Young para materiais que obedecem a lei de Hooke, desde que se tenha uma velocidade de deformação controlada, uma máquina rígida e corpos de prova sem defeitos.

Os esforços mais importantes sofridos pela argamassa após a aplicação, no que diz respeito à sua aderência é a tensão de cisalhamento causada pelos esforços cíclicos causados pela molhagem e secagem das mesmas, somado a isto os esforços oriundos da fluência, e retração da estrutura, retração por secagem e carbonatação da argamassa. Estes esforços cíclicos provocam danos progressivos – microfissuras – na argamassa, na base e principalmente na interface entre ambas. A magnitude das tensões de cisalhamento na interface serão maiores, quanto maior for o módulo de elasticidade da argamassa, desta forma, a argamassa de revestimento ideal tem módulo de elasticidade muito baixo. Argamassas com maior resistência inicial de aderência podem ter vida útil inferior à outra de menor aderência inicial (JOHN, 2003).

De acordo com CINCOTO et al. (1995) a elasticidade é a capacidade da argamassa em deformar-se sem que ocorra ruptura, retornando às suas dimensões iniciais quando as solicitações que lhe são impostas são interrompidas. BASTOS (2003) define módulo de deformação como a relação entre a tensão existente em um corpo e a deformação produzida por esta tensão, ou seja, representa a capacidade que um determinado corpo tem de deformar-se, sem se romper, sob um determinado nível de tensões. AGUILAR et al. (2004) afirmam que a capacidade de deformação está relacionada com a energia das ligações atômicas e com o fator de empacotamento do arranjo atômico.

Um baixo módulo de deformação significa, para um dado valor de tensão, que a argamassa um valor de deformação alto. Em seus estudos, AGUILAR et al. (2004) sugerem para argamassas de boa qualidade um quociente resistência à tração por flexão/módulo de elasticidade dinâmico igual ou inferior a 0,04%. GOMES (1995) sugerem módulo de deformação de argamassas inferiores a 10GPa, e igual ou inferior ao módulo de suporte. Estes valores indicam apenas que as argamassas se deformam quando sujeitas a pequenas cargas, e que para uma mesma deformação elástica o suporte estará sujeito a uma carga maior do que a argamassa. Segundo AGUILAR et. al. (2004), qualificar a argamassa pelo módulo de elasticidade parece não ser adequado. Para os autores, o que se deseja é que a argamassa não atinja a deformação de fratura quando submetida à deformação, sendo assim sugerem a determinação da deformação de fratura devida à tensões de tração.

Segundo CINCOTTO et al. (1995) o módulo de deformação determina a ocorrência de fissuras no revestimento e influi decisivamente sobre o grau de aderência da argamassa à base, sobre a estanqueidade da superfície e sua durabilidade. De acordo com BASTOS (2003), avalia-se o risco de fissuração do revestimento avaliando conjuntamente a retração, a resistência à tração e o módulo de deformação, sabendo-se que as tensões de tração mais importantes surgem na argamassa aplicada sobre uma base porosa, onde a retração é restringida pela aderência. Para CARVALHO JR. (2005), o grau de fissuração é função do teor e natureza dos aglomerantes, teor e natureza dos agregados, capacidade de absorção da base, condições ambientais e técnicas de execução. Segundo CINCOTTO et al. (1995) as fissuras são decorrentes da elasticidade e resistência à tração inadequada frente às tensões de tração resultantes da retração de secagem, retração térmica ou ações externas ao revestimento. De acordo com CARVALHO JR. (2005), observa-se que em argamassas fracas, as ligações internas são menos resistentes e as tensões

podem ser dissipadas na forma de micro-fissuras nas interfaces microscópicas entre o grão de agregado e a pasta aglomerante. No entanto, em argamassas fortes, as tensões vão se acumulando e a ruptura ocorre na forma de fissuras macroscópicas. Ainda segundo o autor, a fissuração deve sempre ser evitada, pois a capacidade de aderência pode ficar comprometida ao redor da região fissurada. BASTOS (2003) afirma que a microfissuração atua de forma favorável ao desempenho mecânico do revestimento, uma vez que aumenta a capacidade de deformação da argamassa nas primeiras idades (módulo de deformação mais baixo), relaxando as tensões de tração existentes. Segundo TAMIN (1986) o revestimento ideal deve adquirir uma resistência inicial que seja suficiente para se opor ao desenvolvimento exagerado de microfissuras nas primeiras idades, mas é preciso que esta resistência não seja muito elevada, para que as microfissuras possam ser criadas e promover a relaxação das tensões devidas à retração. Segundo CONCOTTO (1995), a adequação da elasticidade e resistência à tração não significa a total inexistência de fissuras, mas sim a ocorrência de fissuras microscópicas e com pequeno distanciamento entre si, de forma a não propagarem por efeito térmico e higroscópico, não sendo assim prejudiciais à estanqueidade e à durabilidade do revestimento.

De acordo com FIGUEIREDO (2007), o conhecimento dos fatores que afetam o módulo de elasticidade das argamassas não está consolidado no meio técnico, tanto no que diz respeito à interferência de fatores intrínsecos (composição, porosidade, etc.), quanto extrínsecos (temperatura, movimentação do substrato, etc.) à argamassa. Da mesma forma não existe um consenso quanto qual metodologia de ensaio é mais adequada para determinação desta propriedade.

Existe uma grande variedade de métodos, parâmetros de ensaio, normas e formatos de corpos-de-prova adotados nas pesquisas sobre o tema, o que leva a impossibilidade de comparação entre os resultados e do claro entendimento de seu real significado. Segundo FIGUEIREDO (2007), esta grande variedade cria uma dificuldade no meio técnico em avaliar comparativamente as argamassas e até mesmo de realizar pesquisas que estabeleçam parâmetros para a argamassa. Existe ainda, certa distância entre os valores de propriedades medidas em corpos-de-prova isolados, e os valores no revestimento aplicado sobre uma base porosa (BASTOS, 2003). Ainda segundo o autor, os principais parâmetros em que se baseiam os métodos de ensaio são o tipo de ação física a ser aplicada sobre o corpo-de-prova, a velocidade do carregamento e a forma de se medir as deformações. Os tipos de ação podem ser estáticos ou dinâmicos. Entre os de carregamento estático, os mais comuns são os de

compressão, tração e flexão. Entre as consideradas dinâmicas estão a emissão de pulso ultrassônicos e a produção de ondas vibratórias (frequência ressonante).

No módulo de deformação estático refere-se ao ensaio com aplicação de carga crescente contínua, enquanto que no módulo de deformação dinâmico, é determinado por meio de vibrações aplicadas a corpos-de-prova com tensões de pequena intensidade (ANDRADE et al., 2006).

#### **3.3.4.1. Módulo de deformação estático**

Os ensaios de módulo de deformação estático apresentam certas dificuldades executivas a serem contornadas durante a sua realização. Trata-se da forma como efetuar as medidas das deformações ocorridas sob carregamento. Normalmente utiliza-se *strain gages* (dispositivo elétrico para medição da deformação), apesar de possuir limitações quanto ao preparo da superfície (polimento) para sua colagem, uma vez que a superfície da argamassa pode ser apresentar friável. Segundo FIGUEIREDO (2007) mesmo em casos em que a argamassa se deforme bastante, as deformações são muito pequenas ( $10^{-6}$ ) e a realização de medidas precisas demanda uma série de cuidados, que torna o ensaio caro e difícil de ser executado com confiabilidade.

**a) módulo à compressão** – A compressão não é o tipo de esforço a que uma argamassa de revestimento está usualmente submetida. Entretanto, boa parte dos resultados de ensaios de módulo de deformação em trabalhos publicados no Brasil, se refere aos ensaios de compressão. Segundo JOHN (2007), isto se deve ao fato de até o momento não existirem normas brasileiras para avaliação desta propriedade, sendo assim os ensaios de módulo de deformação das argamassas tem sido realizados baseados na normalização de concreto segundo a NBR 8522 (ABNT, 2003) – Determinação do módulo de deformação estático e digrama de tensão/deformação. Nesta norma é traçado a curva tensão/deformação à partir da leitura de deformações para carregamentos sucessivos. No entanto, este ensaio exige grande controle tecnológico, pois as deformações medidas são da ordem de micrometros. A vantagem deste método é que se obtém a curva de comportamento do material.

**b) Módulo à tração** - Sendo o desempenho da argamassa à tração muito importante frente aos esforços a que está submetida, é interessante o conhecimento da resistência a tração direta e de seu módulo de deformação à tração. Neste ensaio aplica-se um esforço de tração longitudinal e mede-se ao mesmo tempo, a deformação ocasionada pela tensão aplicada, na mesma direção, utilizando-se extensômetros elétricos colados à argamassa (*strain gages*). As dificuldades mais comuns neste tipo de ensaio são: a forma de prender as extremidades do corpo-de-prova de maneira eficaz, permitindo a ruptura em uma posição válida, e a colagem do extensômetro em sua superfície. Segundo BASTOS (2003), alguns autores a partir da comparação entre o módulo de deformação à compressão e à tração de diferentes tipos de argamassas concluíram que as curvas dos resultados se sobrepunham (FIGURA 3-20).

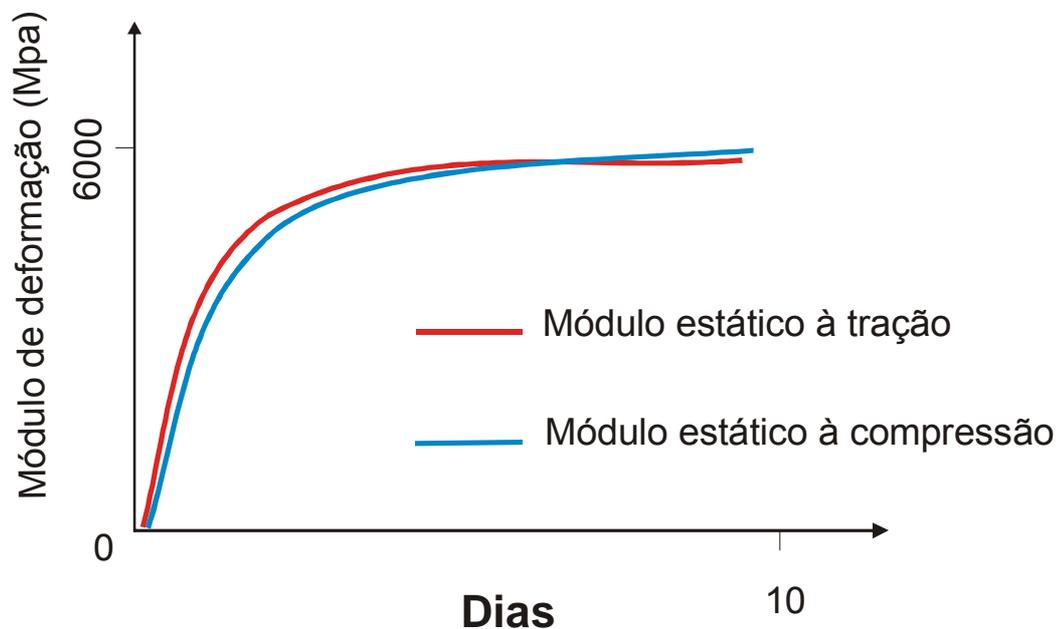


FIGURA 3-20 – Aspecto de curvas de módulo de deformação estático à tração e à compressão de argamassas (TAMIN, 1986)

Fonte: BASTOS, 2003

**c) Módulo na Flexão** – Este ensaio é de realização mais simples em laboratório do que o de tração direta. A deformação pode ser medida de duas maneiras: Medindo a flexa (em mm) no meio do corpo de prova ou medindo diretamente a deformação (mm/mm) na sua face tracionada por meio de *strain gages*.

### 3.3.4.2. Módulo de deformação dinâmico

Segundo AGUILAR (2002), o princípio da determinação do módulo de deformação dinâmico baseia-se na existência de uma relação matemática entre a velocidade do som, através do material e a frequência de ressonância, e o módulo de deformação do material. Ainda segundo o autor, estas relações dizem respeito a um meio sólido, considerado homogêneo, isotrópico e perfeitamente elástico, podendo, no entanto, ser aplicadas a materiais menos homogêneos, como argamassas, desde que as dimensões do corpo-de-prova sejam suficientemente grandes para minimizar os efeitos da heterogeneidade do material. De acordo com MEHTA & MONTEIRO (1994); NEVILLE (1997), o módulo dinâmico corresponde a uma deformação instantânea muito pequena e é considerado igual ao módulo tangente inicial determinado no ensaio estático sendo, portanto, bem maior do que o módulo secante determinado por carregamento de corpo-de-prova.

Estudos realizados por JOHN (2007) comparando os métodos de frequência ressonante e velocidade ultrasônica revelaram que existe uma correlação entre as duas metodologias de ensaio para determinação do módulo de deformação e que o formato do corpo-de-prova influencia nos resultados dos ensaio, podendo no entanto, esta diferença ter sido oriunda pela diferença de densidade de massa aparente causado pelos diferentes formatos e diferentes condições de adensamento.

- a) Velocidade ultrasônica – Os ensaios de ultra sonografia podem ser utilizados tanto em corpos de prova isolados como em argamassas aplicadas e aderidas a um substrato poroso. A norma que prescreve o método é a NBR 8802/04 – Concreto endurecido – determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica (ABNT, 1994). Entretanto, esta norma não menciona o cálculo do módulo de deformação. A Norma Britânica BS 1881: Part203 :1986 – Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete (BSI, 1986) apresenta a relação entre o módulo de deformação dinâmico do concreto e a velocidade dos pulsos ultra-sônicos. Este ensaio é feito colocando-se um transdutor-emissor em contato direto com a argamassa, que transforma o pulso elétrico em onda de choque que atravessa o corpo-de-prova até o receptor que o transforma novamente em pulso elétrico. O aparelho mede o tempo, em  $\mu\text{s}$  (microsegundos), que a onda leva para atravessar o corpo-de-prova. O cálculo do módulo de elasticidade através da relação

apresentada pela norma BS 1881: Part 203 depende do conhecimento do coeficiente de Poisson do material ensaiado.

$$E_d = \rho V^2 (1+n)(1-2n)/(1-n),$$

Onde:

$E_d$  - módulo de deformação dinâmico (MPa)

$V$  - velocidade de pulso (km/s)

$\nu$  - Coeficiente de Poisson

$\rho$  - densidade do corpo-de-prova ( $\text{kg/m}^3$ )

- b) Frequência ressonante – A norma que prescreve a obtenção do módulo de deformação dinâmico através da frequência ressonante é a BS 1881: Part 209:1990 – Testing concrete – Recommendations for the measurement of dynamic modulus of elasticity (BSI, 1990). Neste ensaio, fazendo-se variar a frequência com que as ondas vibratórias atravessam longitudinalmente um corpo-de-prova prismático, encontra-se sua frequência fundamental de vibração longitudinal. Sendo que esta frequência depende do módulo de elasticidade do material, sua densidade e seu comprimento.

$$E_d = 4n^2 L^2 \nu^2 10^{-6}, \quad (2)$$

onde:

$E_d$  - módulo de deformação dinâmico (MPa)

$\rho$  - densidade do corpo-de-prova ( $\text{kg/m}^3$ )

$N$  - frequência fundamental no modo de vibração longitudinal do corpo-de-prova (Hz)

$L$  - comprimento do corpo-de-prova (m)

Analisando todos os métodos de ensaios do módulo de deformação apresentados, BASTOS (2003) conclui que os métodos de determinação dinâmicos apresentam algumas vantagens em relação aos métodos de ensaios estáticos. Estas vantagens se devem ao fato de serem não destrutivos e serem de simples realização, permitindo que um experimento seja desenvolvido em um mesmo corpo de prova em diferentes idades.

GOMES (1995) apresenta em sua tese de doutorado, uma correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência a tração na flexão das argamassas, apontando para a propensão a fissuração das mesmas em função de valores obtidos (TABELA III-13).

TABELA III-13 – Potencial de fissuração das argamassas (CSTB, 1982)

Propriedade	Baixa Fissurabilidade	Média Fissurabilidade	Alta Fissurabilidade
$E_d$ Módulo de elasticidade dinâmico (Mpa)	$E_d \leq 7000$	$7000 \leq E_d \leq 12000$	$E_d \geq 12000$
$\Delta/l$ Retração (mm/m)	$\Delta/l < 0,7$	$0,7 \leq \Delta/l \leq 1,2$	$\Delta/l > 1,2$
$E_d/f_t$ Correlação entre Módulo de elasticidade dinâmico e tração na flexão	$E_d/f_t \leq 2500$	$2500 \leq E_d/f_t \leq 3500$	$E_d/f_t > 3500$

Fonte: GOMES, 1995

### 3.3.5. Retração

Segundo CARASEK (2007) a retração é resultado de um mecanismo complexo, associado com variação de volume da pasta de aglomerante. CINCOTTO et al. (1995) afirma que a retração tem papel fundamental no desempenho do revestimento quanto à estanqueidade e durabilidade. Principalmente as pastas com alta relação água/aglomerante, retraem ao perder a água em excesso. Parte da retração é devido às reações químicas de hidratação do cimento, parte é devido a perda de água para o substrato, mas a parcela principal é devido à secagem. Segundo CARASEK (2007) a retração começa no estado fresco e continua após o endurecimento da argamassa. Ainda segundo a autora, se a secagem é lenta a argamassa tem tempo suficiente para atingir a resistência a tração necessária para suportar as tensões internas que surgem. Mas sob condições adversas de clima que acelerem a evaporação, a perda de água gera fissuras de retração, semelhantemente à argamassa aplicada sob substrato muito absorvente. Estas fissuras são mapeadas (aproximadamente poliédricas), formando ângulos aproximados de 90 graus. Quanto maior a espessura do revestimento maior a retração esperada.

CINCOTTO et al. (1995), fazendo analogia ao comportamento do concreto, afirma que a perda de água ocasiona movimentações reversíveis e irreversíveis, sendo que a primeira está associada à perda de água para o substrato e a segunda associada ao processo de secagem. Ainda segunda a autora a carbonatação dos hidróxidos de cálcio e magnésio também provoca

retração, porem sem efeito físico. De acordo com CARASEK (2007), a tensão de tração na argamassa oriunda da retração é função direta do seu módulo de elasticidade. Desta forma, argamassas muito ricas em cimento sofrem notável influência da retração, estando mais sujeitas às tesões de tração que causarão fissuras.

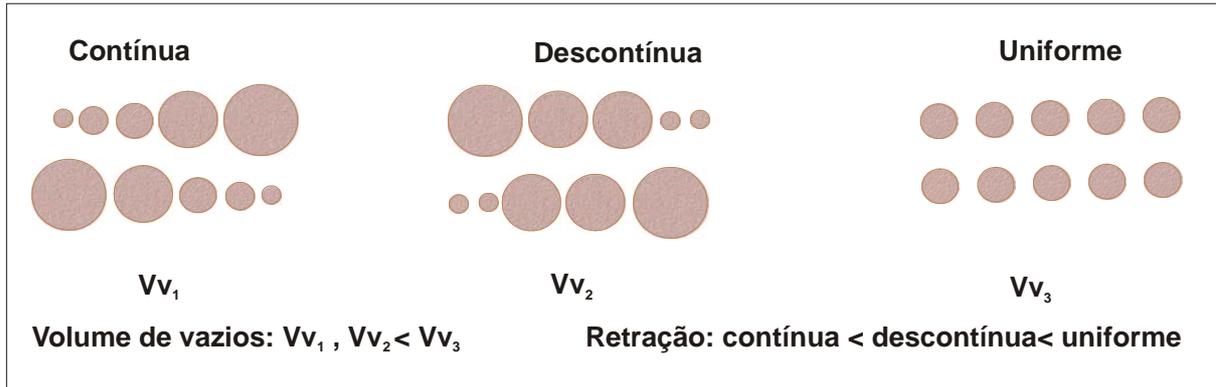
Segundo CINCOTTO et al. (1995), nas primeiras horas após a aplicação a retração é regulada pela retenção de água da argamassa, daí a importância de se considerar a adição de cal como fator inibidor da retração. Ainda segundo os autores, o proporcionamento adequado cimento:cal:areia pode diminuir o potencial de retração da argamassa (TABELA III-14).

**TABELA III-14– Retração de algumas argamassas e uma pasta, aos 7 e 28 dias (adaptado de FIORITTO, 1994)**

Material	Relação a/agl	Retração aos 28 dias (%)	Retração aos 7 dias	
			‰	% aos 28 dias
Argamassa cimento:cal:areia (volume)	1:0:3	0,47	0,607	65%
	1:0:5	0,64	0,649	58%
	1:3:12	0,88	0,642	76%
Pasta de cimento	0,30	1,416	1,018	72%

Fonte: CARASEK, 2007

Em seus estudos, AGUILAR et al. (2004) sugerem para argamassas de boa qualidade uma retração igual ou inferior a 0,07mm/m. De acordo com CINCOTTO et al. (1995) dentre os outros fatores que tem influência sobre a retração, o papel mais importante cabe ao agregado. Este componente atua como o esqueleto indeformável da argamassa, evitando parte das variações. Segundo CARASEK (2007), a granulometria da areia determina o volume de vazios a ser preenchido pela pasta aglomerante. Quanto maior o volume de vazios, maior o potencial de retração da argamassa (FIGURA 3-21).



**FIGURA 3-21 – Classificação das areias quanto à distribuição granulométrica e sua influência na retração plástica**

Fonte: CARASEK, 2007, p. 885

### 3.4. Microestrutura

Atualmente, o desenvolvimento das argamassas está relacionado ao estudo de sua microestrutura. Este estudo permite uma melhor caracterização de seus constituintes, e da interação destes com as interfaces e a forma de distribuição pela argamassa. Busca-se identificar os mecanismos responsáveis pela aderência, resistência mecânica, capacidade de deformação e durabilidade, afim de melhorar seu desempenho nas edificações.

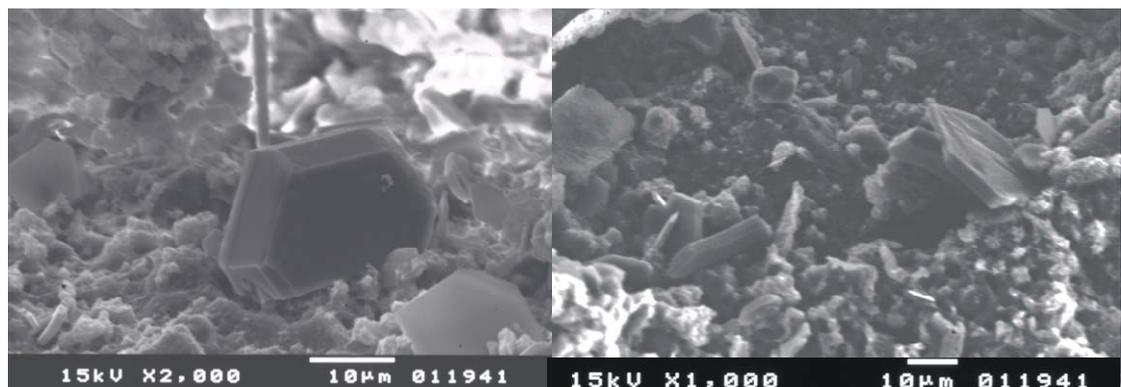
#### 3.4.1. Microestrutura dos compostos cimentícios

De acordo com PAULON (2005), o cimento Portland, quando, hidratado sob condições normais, permite o desenvolvimento de diversas formas morfológicas de gel de silicato de cálcio hidratado (abreviado com CSH), de hidróxido de cálcio (abreviado com CH), de trissulfoaluminato de cálcio hidratado (denominado de etringita), de monosulfoaluminato de cálcio hidratado, sendo que, geralmente, o CSH constitui a maior porção do sistema. Em seus estudos com ESEM (environmental scanning electron microscope), STARK et al. (2001) encontraram grande heterogeneidade na microestrutura de hidratação da pasta de cimento. Segundo os autores, a formação da microestrutura é muito dependente da composição do clínquer, da finura de moagem e do processo de transporte na microestrutura de hidratação do cimento hidratado.

Segue descrição detalhada das principais fases presentes na microestrutura das pastas de cimento:

Hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ): também chamado de portlandita. A estrutura contém octaedros  $\text{Ca(OH)}_6$  ligados, com os grupos OH ao constitui ponte de hidrogênio. A morfologia dos cristais muda durante o curso da hidratação (SILVA, 1998). Nas primeiras idades, aparece como placas hexagonais finas, muitas vezes com dezenas de micrometros de espessura. Posteriormente os cristais crescem massivamente, perdendo seu contorno hexagonal e invadem e envolvem outras regiões e constituintes. Segundo MEHTA & MONTEIRO (2006), ao contrário do CSH, o Hidróxido de cálcio tem sua estequiometria definida. Ele tende a formar cristais grandes, sob a forma de prismas hexagonais distintos, sendo que a morfologia dos cristais varia bastante, apresentando desde pilha de placas bem definidas até formas não definidas. A morfologia é definida pelo espaço disponível. Ainda segundo o autor, comparado ao CSH, a contribuição do hidróxido de cálcio para a resistência devido as força de van der Waals é limitado, consequência de uma área específica consideravelmente menor.

Esta fase representa de 20 a 25% do volume de sólidos em uma pasta completamente hidratada (MEHTA & MONTEIRO, 2006).



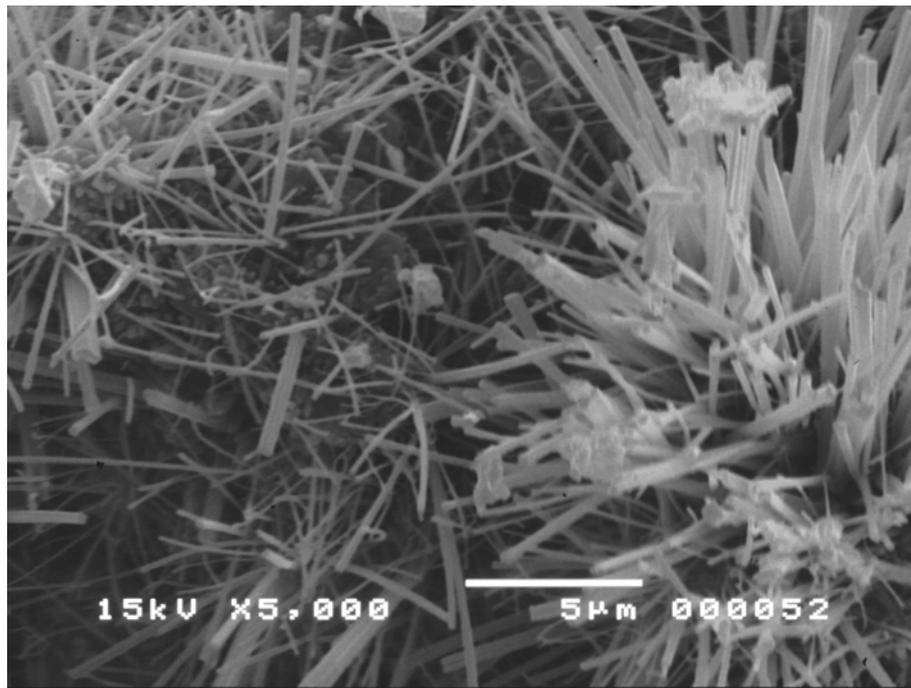
**FIGURA 3-22 – Fotomicrografia de morfologia típica de portlandita. Imagem obtida com eletrons retroespalhados**

Fonte: O autor

- a) Etringita ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ): Possui estrutura em colunas de  $\text{Ca}_3\text{Al(OH)}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  dispostas paralelamente ao eixo das agulhas, com íons de sulfato e moléculas de água. Outros compostos com estruturas semelhantes são agrupados sob o

termo de  $AF_t$  (SILVA, 1998). Segundo SILVA (1998), a etringita apresenta aspectos morfológicos de bastões estreitos, relativamente longos ( $4\text{--}5\mu\text{m}$ ) com lados completamente paralelos e sem ramificações. Os bastões de etringita podem se apresentar ocos ou maciços. CARVALHO JR. (2005) define a morfologia característica da etringita como agregados radiais de fitas euédricas. DUPIN et al. (1988) observaram que cristais de etringita com aproximadamente  $0,05\ \mu$ , e que algumas vezes, esses cristais podem estar agrupados formando cristais aparentes de  $0,2$  ou  $0,3\ \mu\text{m}$  de diâmetro, podendo chegar a até  $0,8\mu\text{m}$ . Segundo STARK et al. (2001), O crescimento longitudinal da etringita pode possivelmente ser atribuído à liberação do sulfato e penetração do íon aluminato.

Esta fase representa de 20 a 25% do volume de sólidos em uma pasta completamente hidratada (MEHTA & MONTEIRO & MONTEIRO, 2006).



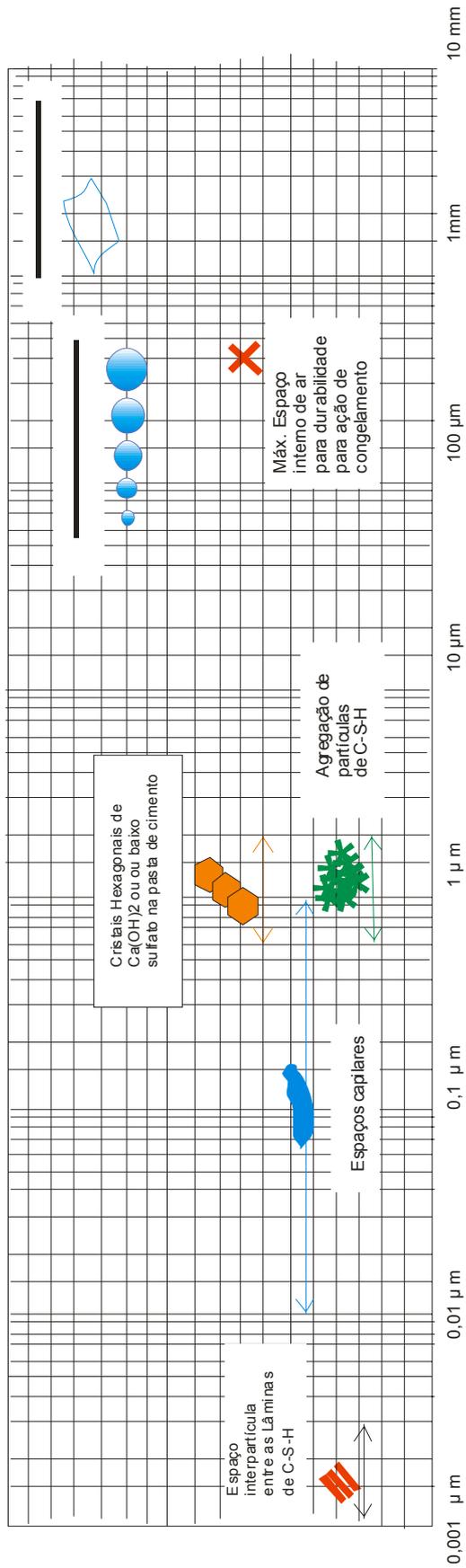
**FIGURA 3-23 – Fotomicrografia da morfologia da etringita. Imagem gerada com elétrons retroespalhados**Fonte: FREITAS, 2007

- b) Silicato de cálcio hidratado (CSH): Segundo SILVA (1998), a pasta de cimento apresenta algumas fases quase amorfas, sendo que CSH representa entre 60 e 70% do peso da pasta endurecida. Esta característica, aliada ao fato do CSH não apresentar composição estequiométrica fixa, torna sua caracterização no nível atômico muito difícil. A relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  (C/S) varia muito na literatura, podendo variar de 0,8 a 3,0. SILVA (1998) afirma que o arranjo atômico do CSH gel é ainda uma questão

aberta e que o CSH é encontrado em diversas morfologias diferentes, difíceis de serem identificados e classificados.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (2006), A relação C/S do CSH varia entre 1,5 e 2,0 e sua morfologia varia de fitas pouco cristalinas a um reticulado cristalino.

Esta fase representa de 50 a 60% do volume de sólidos em uma pasta completamente hidratada (MEHTA & MONTEIRO, 2006).

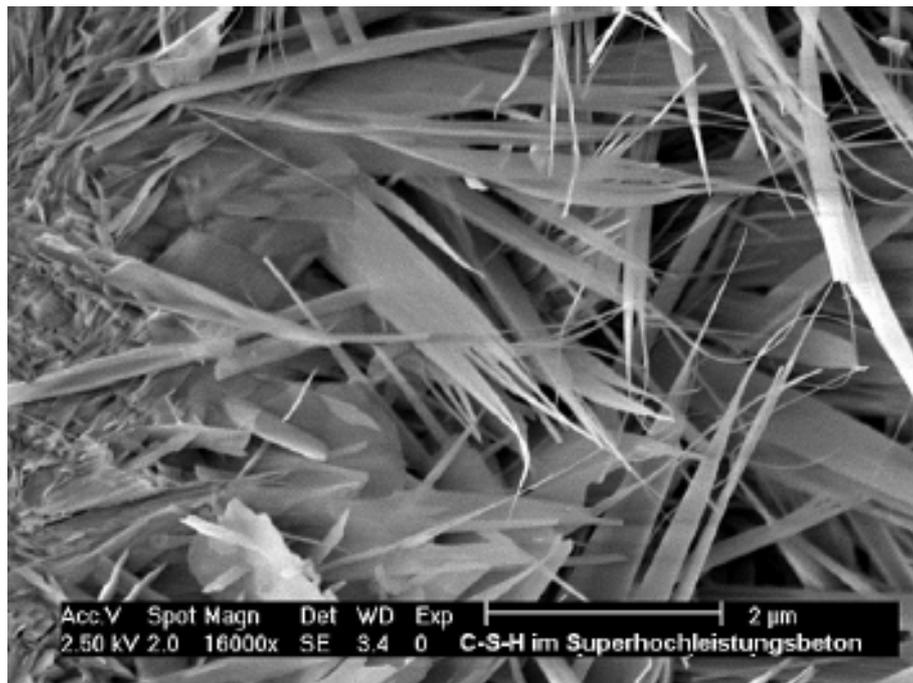


**FIGURA 3-24 – Dimensão de sólidos e poros na hidratação da pasta de cimento**

Fonte: MEHTA & MONTEIRO & MONTEIRO , 2006

Existem várias classificações para as morfologias de CSH. De acordo com STARK & MÖSER (2001) as várias teorias existentes sobre a morfologia e estrutura das fases de CSH surgem de diferentes métodos de investigação. A mais aceita entre os autores consultados é a de DIAMOND (1976). O autor classifica a fase CSH em 4 tipos morfológicos:

Gel CSH tipo I – Encontrado principalmente nas primeiras idades e formado por fibras (partículas aciculares, cristais tubulares), com dimensões típicas de 0,5 a 2  $\mu\text{m}$  de comprimento e 0,2 $\mu\text{m}$  de largura. Apresentam-se agrupadas, com cada agrupamento partindo de um núcleo comum. Não são muito paralelas, afinando nas extremidades. Pode-se dividir em duas ou mais porções nas extremidades. Este comportamento está relacionado com a forma de crescimento dos cristais. Apresentam-se mais claras que os grãos de cimento. São dominantes em pastas de cimento imaturas (SILVA, 1998).



**FIGURA 3-25 – Morfologia típica do CSH tipo I**

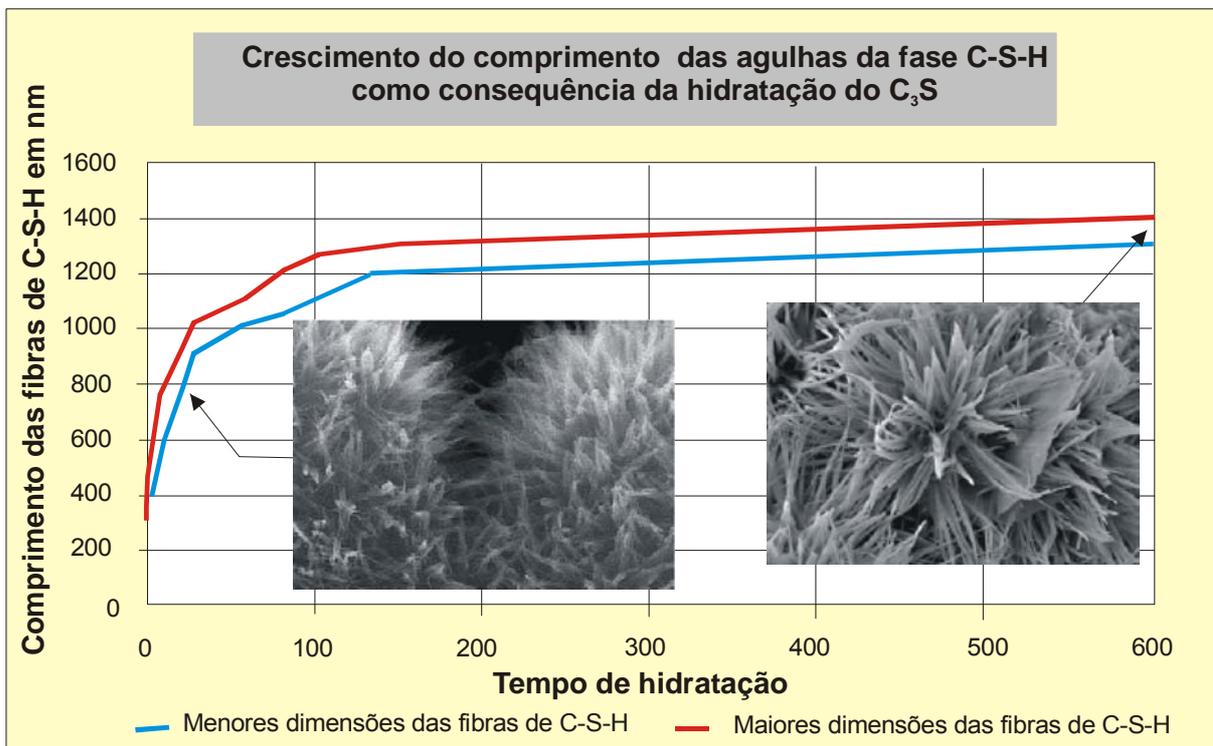
Fonte: ECKART et. al, 1999

Gel CSH tipo II – Ocorre em conjunto com o CSH tipo I e forma uma rede reticular ou em favo de mel. Envolve o crescimento de partículas alongadas com dimensões típicas de 0,5 a 2  $\mu\text{m}$  de comprimento e 0,5 $\mu\text{m}$  de largura, que se interceptam e aparentemente se interpenetram nos pontos de interseção.

Gel CSH tipo III – Se apresenta na forma de pequenos discos ou esferas, muitas vezes não maiores que  $0,3\mu\text{m}$ . Sobressai-se em pastas de maior idade e caracteriza-s por ser uma massa compacta e homogênea. Aparentemente constituem grande parte do produto total de hidratação. Aparecem especialmente com o avanço da hidratação (SILVA, 1998).

Gel CSH tipo IV – Material com morfologia difícil de ser definida e massiça. É encontrado em pastas de maior idade. Chamados de produtos internos porque são recobertos por outros compostos com o avanço da hidratação. Geralmente é visto quando se empregam técnicas especiais de preparação, e a amostra não é apenas fraturada.

O processo de crescimento das agulhas de CSH, segundo STARK et al. (2001), são apresentados na FIGURA 3-26.



**FIGURA 3-26 – Crescimento longitudinal das fibras de CSH durante o processo de hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$**   
 Fonte: STARK & MÖSER, 2001

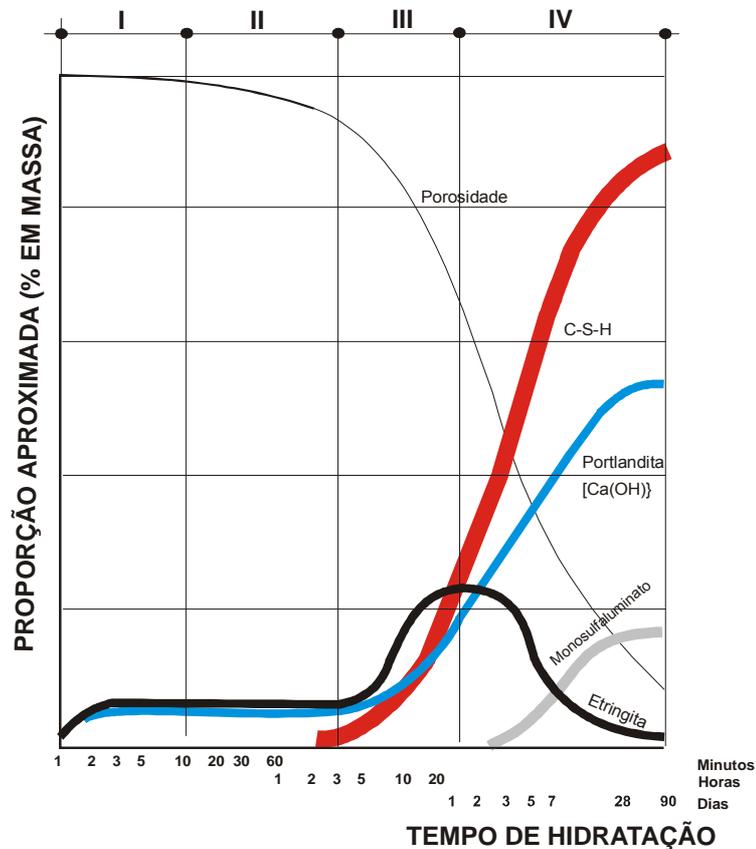
Segundo STARK et al. (2001), por causa de sua pequena dimensão e ótimo intertravamento o CSH é capaz de desenvolver altas resistências de aderência.

### 3.4.2. Esquema de hidratação

Segundo PAULON (2005), quando os componentes anidros do cimento Portland estão dissolvidos, os íons mais móveis são os primeiros a se propagarem no filme de água e segue a seguinte ordem: sódio, potássio, sulfato, alumínio. CARASEK (1996) afirma que ao se misturar o cimento com a água, a gipsita, utilizada como reguladora de pega do cimento, se dissolve primeiro e libera os primeiros íons a entrar em ação: de sulfato e de cálcio. Em seguida o  $C_3A$  também se dissolve, liberando os íons de aluminato e cálcio. MEHTA & MONTEIRO (1994) corrobora as afirmações anteriores quando afirma que a etringita é geralmente o primeiro hidrato a se cristalizar devido à elevada relação sulfato/aluminato na fase aquosa nas primeiras horas de hidratação.

Os primeiros núcleos a se formarem são aqueles formados pelos íons mais móveis, a etringita e a portlandita (PAULON, 2005). Segundo STARK & MÖSER (2001), através de análise com ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope), os pequenos cristais de etringita tem o comprimento de aproximadamente 500nm e a espessura superior a 250nm. Durante as primeiras horas a morfologia dos cristais permanece praticamente inalterada. Mínimo crescimento de cristais é observado. O principal crescimento longitudinal desta fase ocorre entre 12 e 24 horas. O comprimento dos cristais supera 2,5 $\mu$ m e a sua espessura se mantém constante todo o tempo. De acordo com PAULON (2005), como ainda não existem obstáculos ao seu crescimento, os cristais ganham tamanho considerável, maior que durante a hidratação onde o espaço é limitado. Os cristais formam uma rede aberta que são progressivamente saturados com íons menos móveis, tais como silício e alumínio. Uma segunda geração de cristais se forma então nos vazios deixados pelos cristais de primeira geração. São encontrados CSH e, novamente etringita e portlandita em tamanhos menores. Segundo STARK & MÖSER (2001), as fases CSH são pequenas (aproximadamente 200nm de comprimento), isoladas e fortemente heterogêneas. Em 24 horas as fases de CSH crescem continuamente até o comprimento de 600nm. As pontas das agulhas têm somente 5nm, aproximadamente. O resultado é uma forte interligação de microestruturas. A estrutura da ordem de  $\mu$ m de cristais de portlandita é determinada por pilhas de cristais com a espessura entre 20 e 200nm.

A evolução das fases hidratadas e da porosidade da pasta de cimento durante o processo de hidratação são apresentados na FIGURA 3-21.



**FIGURA 3-27 – Curva aproximada de evolução das fases hidratadas e da porosidade da pasta de cimento em função do tempo de hidratação**

Fonte: ZAMPIERI, 1993

A presença da cal hidratada em argamassas mistas altera certamente a composição mineralógica dos produtos do endurecimento. Este aspecto é pouco estudado do ponto de vista científico, mas certamente aumentando o teor de  $\text{Ca(OH)}_2$ , e  $\text{MgO(OH)}_2$ , que com a carbonatação se transformam em carbonatos, reduzindo a fração volumétrica ocupada pelo CSH do cimento. O CSH é associado a altas resistências mecânicas e altos módulos de elasticidade e também grandes movimentações dimensionais por variação de umidade.

### 3.4.3. Microestrutura da interface argamassa/substrato

Segundo SILVA & LIBÓRIO, a zona de transição é a região de contato entre a pasta e os agregados e é a região mais frágil dos concretos e argamassas. Essa região não é peculiar

apenas nas superfícies dos agregados, mas também está presente em outras interfaces em compósitos à base de materiais cimentícios, tal como a região da interface argamassa-substrato. A microestrutura da pasta de cimento merece atenção especial nas zonas de contato com o substrato. As características da microestrutura da pasta na zona de transição dependem de vários fatores (PAULON, 2006). Segundo CARASEK (1996), parece ainda não existir um consenso sobre as características microestruturais da zona de contato e os produtos responsáveis pelo intertravamento. Alguns pesquisadores defendem a existência de uma grande concentração de cálcio na interface, caracterizando que a ligação é proveniente dos hidróxidos ou silicatos de cálcio; outros, no entanto afirmam existir uma maior concentração de etringita nesta região.

VOSS (1933) apud CARASEK (1996) afirma existir uma camada adjacente ao tijolo composta por cálcio, provavelmente na forma de hidróxido e carbonato, responsável pela aderência. O Autor afirma que a espessura da camada varia com o teor de cal na argamassa e quanto maior a quantidade de cal, maior a espessura, menor a resistência mecânica e menor a aderência.

CHASE (1984) apud CARASEK (1996), através de estudos experimentais com MEV (Microscópio Eletrônico de varredura), afirma ser o CSH e seu subsequente entrelaçamento sobre o tijolo o responsável pela aderência entre a argamassa e o tijolo. O Autor afirma ainda que não há uma penetração significativa de CSH no interior dos poros do substrato.

LAURENCE (1987) apud CARASEK (1996), identificou em seus experimentos duas camadas distintas. Uma primeira camada, mais próxima da superfície do tijolo, formada por um filme rico em cálcio onde existe uma precipitação preferencial de cristais de hidróxidos de cálcio em placas. Uma segunda camada composta principalmente por CSH e por alguns cristais de etringita. O autor afirma que a propriedade de aderência deriva do intertravamento destes produtos e que a diferença entre as duas pastas reside numa morfologia completamente diferente. Pastas contendo cal resultam em uma interface mais compacta e contínua, com menor quantidade de microfissuras e maior quantidade de cristais de hidróxido de cálcio. Existe ainda uma diferença no tipo de silicatos encontrados. Na pasta de cimento os silicatos são do tipo I e na pasta mista o CSH é do tipo II e III.

Apesar de entre os autores anteriormente citados parecer existir um consenso sobre a existência de uma grande concentração de cálcio na camada mais próxima à interface, outros autores, em

uma posição bastante contraditória, afirmam ser a zona de contato entre a argamassa e o tijolo composta principalmente por cristais de etringita.

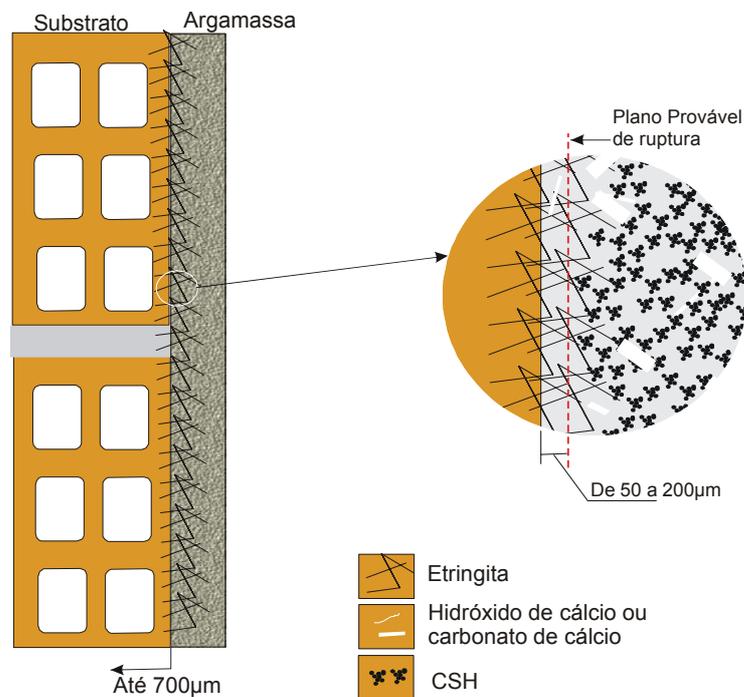
Segundo CARASEK (1997), ao se analisar a argamassa em diferentes distâncias da zona de contato com o tijolo, à medida que se aproxima do substrato maior será a concentração de etringita e menor a concentração de portlandita. De acordo com a autora, tal fato é explicado pelo fato de ao se misturar água ao cimento, a gipsita é a primeira a se solubilizar e liberar íons sulfato. Estes íons são então sugados pelo substrato poroso e levados à interface. Os íons então se depositam sobre os grãos de aluminato tricálcio do cimento e iniciam a formação dos cristais de etringita. Desta maneira, os cristais de portlandita não podem se desenvolver na região da interface em quantidades significativas.

GRANDET (1973) e DUPIN et al. (1988) apud CARASEK (1996) confirmaram em seus experimentos que a aderência entre a pasta e o substrato é proveniente do intertravamento mecânico da etringita nos poros do tijolo, uma vez que ela é principal produto de hidratação do cimento cristalizado na interface. Os cristais de etringita possuem forma acicular e diâmetro aparente de  $0,05\mu\text{m}$ , podendo estar agrupado formando cristais de  $0,2$  ou  $0,3\mu\text{m}$ . Isto explica o fato de que quando os poros do substrato têm dimensões aproximadamente iguais ao diâmetro das agulhas de etringita, a resistência de aderência é baixa. Da mesma forma, quando os poros do substrato são grandes, a tensão de ruptura é mais elevada. Neste caso, a ruptura ocorrerá dentro da argamassa próxima à interface, uma vez que esta região está menos hidratada. Esta variação do grau de hidratação ao longo da espessura da argamassa, sendo que a menor hidratação se dá próxima à interface, é atribuída ao efeito de sucção do substrato. Este retira parte da água de emassamento da argamassa que está próxima, não deixando água suficiente para hidratação completa da pasta e uma região de menor resistência.

Em seus experimentos, CARASEK (1996) encontrou partículas de CSH, que pareciam estar apenas depositados sobre a superfície do substrato. A autora concluiu ser isto causado pelo fato de que estando os poros do substrato já preenchidos com etringita, o CSH só pode se desenvolver a uma pequena distância da interface. A autora encontrou também produtos amorfos, constituídos principalmente por cálcio (aproximadamente 70%), podendo ser os mesmo um tipo de hidróxido de cálcio ou carbonato de cálcio, tendo em vista que existe uma considerável variação morfológica do hidróxido de cálcio proveniente do cimento. A autora levanta ainda a suposição de que o efeito de sucção exercido pelo substrato pode alterar a

morfologia dos produtos de hidratação da interface, tendo em vista que em regiões da argamassa pouco afastadas do substrato, foram encontrados produtos de hidratação de morfologias típicas.

CARASEK (1996) constatou em seus experimentos a existência de penetração dos produtos de hidratação dos aglomerantes da pasta a profundidades entre 100 e 1600 $\mu\text{m}$ . Os principais produtos encontrados foram Ca, S, Al e Fe. Ao analisar a superfície do tijolo após o destacamento da argamassa, a autora observou uma camada de pasta aglomerante de 50 a 200 $\mu\text{m}$ . Nas regiões com maior quantidade de pasta os principais produtos identificados foram CSH gel, hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio (calcita). Esses produtos parecem estar apenas depositados sobre a superfície do tijolo, não apresentando evidências de penetração nos poros do substrato. Entretanto, nas regiões com menor quantidade de pasta foram observados cristais de etringita nascendo do interior dos poros do substrato, sendo ricos em cálcio e enxofre. Com bases nestes resultados CARASEK (1996) afirma que a aderência é um fenômeno mecânico proveniente do intertravamento de cristais de etringita no interior dos poros do substrato. A ruptura que macroscopicamente é identificada como falha de aderência, não acontece nesta região rica em etringita, e sim, em uma camada adjacente, aproximadamente 50 a 200 $\mu\text{m}$ , sendo portanto falha de coesão da argamassa próxima à interface. Entretanto a autora não pode explicar a causa da ruptura nesta região (FIGURA 3-28).



**FIGURA 3-28 – Representação esquemática do mecanismo de aderência entre argamassa e bloco cerâmico**

Fonte: CASAREK (2001)

A diferença de morfologia e desempenho da interface pode ser função do “efeito superfície”. Denominou-se de efeito superfície a tendência de um filme de água acumular-se próximo à superfície que estão em contato com a argamassa. Quanto maiores e planas são estas superfícies, maior essa tendência (CARASEK, 1996). Este efeito é responsável por uma região com alta relação a/c na interface com o tijolo cerâmico.

CARASEK (1996) observou que não havia relação direta entre a profundidade de penetração dos produtos de hidratação da argamassa no interior do tijolo e a resistência de aderência; no entanto, apresentou uma relação direta entre resistência de aderência e a quantidade de cal na argamassa, que por sua vez produz redução da resistência de aderência da argamassa. A autora também observou que o cálcio penetrou mais profundamente do que o enxofre, podendo ser explicado pela menor dimensão do íon cálcio em relação ao íon  $SO_4^{2-}$ .

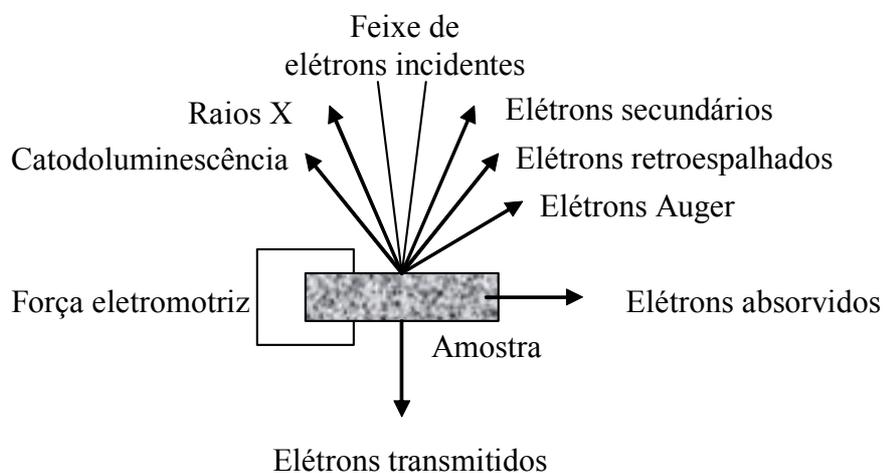
### **3.4.4. Método de investigação e análise microestrutural**

#### **3.4.4.1. Microscópio eletrônico de varredura (MEV)**

Entre os tipos de microscopia utilizados no estudo de engenharia de materiais, o MEV (Microscópio eletrônico de varredura) tem se mostrado o mais versátil, destacando-se na análise de superfícies irregulares e pela excelente profundidade de foco e amplas faixas de aumento (FREITAS, 2006). Segundo MOLIN (2007), dependendo do material, a MEV permite alcançar aumentos de até 900.000 vezes, sendo que o aumento máximo para obtenção de uma boa imagem é de cerca de 10.000 vezes. Ainda segundo o autor as grandes vantagens do MEV são sua alta resolução (na ordem de 2 a 5 nm), a profundidade de foco com formação de imagens tridimensionais, a facilidade de preparação de amostra, em relação ao MET, e a possibilidade de combinar a análise microestrutural com análise química.

O princípio da microscopia eletrônica de varredura é fundamentado na emissão de um feixe de elétrons por um filamento de tungstênio, que concentrado, controlado e reduzido por um sistema de lentes eletromagnéticas, diafragmas e bobinas, incide sobre uma amostra provocando uma série de emissões de sinais relacionados com a interação do feixe de elétrons e a amostra (PAULON, 2005). Segundo MOLIN (2007), parte do feixe de elétrons é refletido e

coletado por detectores que convertem o sinal em imagem de elétrons retroespalhados, elétrons de “Auger” ou de elétrons secundários (FIGURA 3-29).



**FIGURA 3-29 – Processos de interação possíveis durante a incidência de um feixe de elétrons em uma amostra sólida**

Fonte: BRANDÃO, 2001

Para a microscopia eletrônica de varredura, os sinais de maior interesse para formação de imagens são os elétrons secundários e os retroespalhados.

Os elétrons secundários apresentam energia relativamente baixa ( $<100\text{eV}$ ) e provém de uma área (volume) relativamente pequena da amostra ( $<10\text{nm}$ ). Apresentam excelente resolução e potencial para formação de imagens com aumentos máximos de 30.000 a 100.000 vezes. O contraste depende da massa específica do material, sendo que menores massas específicas terão tonalidade mais escura, e vice e versa. Com relação à topografia, os topos apresentam tonalidades mais claras e os vales tonalidades mais escuras (BRANDÃO, 2001). Segundo MOLIN (2007) elétrons secundários fornecem imagens de maior resolução, com grande profundidade de campo, permitindo observar a morfologia dos cristais através do espectro tridimensional da amostra analisada. De acordo com PAULON (2005) são de grande utilidade na obtenção de informações topográficas, possibilitando a formação de imagens tridimensionais e a visualização de detalhes da microestrutura dos poros e de interstícios entre as partículas.

Os elétrons retroespalhados apresentam energia relativamente alta (20 a  $25\text{keV}$ ) e provém de uma área de aproximadamente  $100\text{nm}$  de diâmetro. Apresentam média resolução e potencial de

formação de imagens com aumentos máximos de 5000X. O contraste depende da massa específica do material, da topografia e ainda da composição química (número atômico) do material analisado (BRANDÃO, 2001). Segundo PAULON (2005), o coeficiente de retro espelhamento varia diretamente com o número atômico do material analisado, possibilitando obter imagens tridimensionais e informações quanto a composição química.

De acordo com BRANDÃO (2001), o vértice do feixe de elétrons deve apresentar o mínimo diâmetro possível, pois quanto menor, maior será o nível de detalhes observados.

Segundo MOLIN (2007), Os elétrons secundários fornecem imagens da topografia da superfície da amostra e são responsáveis pela obtenção de imagens de alta resolução, enquanto que os retroespalhados fornecem imagem característica de variação de composição. Ainda segundo o autor, a imagem de retroespalhados tem menor resolução do que a de elétrons secundários porque as de liberação de elétrons retroespalhados abrangem uma área maior na superfície analisada.

De acordo com PAULON (2005), para a execução da microscopia eletrônica de varredura, a superfície do material analisado deve ser boa condutora elétrica e ser estável em vácuo. Materiais isolantes devem ser recobertos com uma fina camada de material condutor. BRANDÃO (2001) observa a necessidade de preparação da amostra, através por exemplo da metalização desta com ouro, pela técnica de *sputter*. Desta forma, a mostra, agora condutora, é aterrada no momento a microscopia, permitindo que a carga negativa oriunda da absorção dos elétrons do feixe primário se dissipe, além da remoção do calor.

RIBAS (1996) afirma que o filme aplicado durante a metalização da amostra é da ordem de 10 a 20 nm de espessura e é obtida por evaporação à vácuo ( $10^{-4}$  torr), à alta tensão, de metais como Al, Cu, Ni, Pt, Au, etc. Ainda segundo o autor, a preparação da amostra pode gerar muitos problemas de observação e análise.

Segundo MOLIN (2007), as amostras podem ser brutas, polidas ou até mesmo lapidadas, desde que as características morfológicas a serem estudadas estejam expostas na superfície, possibilitando sua interação com o feixe de elétrons.

As imagens obtidas pela microscopia eletrônica de varredura apresentam uma barra de escala como parte integrante de imagem. Esta escala facilita um rápido exame do tamanho e características morfológicas dos produtos observados.

Apesar de todas as vantagens oferecidas pela microscopia eletrônica de varredura, alguns autores afirmam que a necessária preparação das amostras pode modificar a microestrutura da mesma. STARK (2001) demonstrou em seus estudos que os métodos tradicionais de preparação de amostras, ou seja, secagem, vácuo e metalização, danificam dramaticamente a morfologia da fase CSH. Um outro método utilizado para evitar causar danos às amostras é o ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope). Neste método, diferentemente do MEV onde a secagem e metalização são essenciais, na maioria dos casos não é necessário parar a hidratação do cimento durante o ensaio.

O ESEM opera em baixo vácuo. A amostra pode ser examinada com um campo de emissão com fonte de feixe de elétrons em uma câmara de alta pressão. À medida que a pressão do gás residual na amostra excede a pressão do vapor de água saturado, amostras contendo umidade podem ser observadas sem secagem prévia. Isto viabiliza a realização de investigações de processos dinâmicos ou reações que ocorram na presença de fase líquida ou gasosa (exemplo: hidratação do cimento). A vantagem do ESEM é eliminar a possibilidade de danos às amostras durante a desidratação, secagem, ou metalização. Isto evita o mascaramento de informações e eventual destruição de feições estruturais delicadas, incapazes de resistirem a condições de alto vácuo (MOLIN, 2007).

#### **3.4.4.2. Microanalisador EDS**

Ao microscópio eletrônico de varredura pode ser acoplado o sistema EDS (Energy-dispersive spectroscopy), o qual possibilita a determinação da composição qualitativa e semiquantitativa das amostras, a partir da emissão de raios-X característicos. É possível identificar-se a composição de regiões com até 1µm de diâmetro (MOLIN, 2007). Segundo BRANDÃO (2001), as principais características do microanalisador EDS são:

- Apresenta funcionamento conceitualmente simples;

- Apresenta somente um componente essencial: o detector de estado sólido, constituído de silício (Si) dopado com lítio (Li);
- Gera espectro simultâneo;
- É relativamente barato, em comparação com os demais instrumentos utilizados para este tipo de análise;
- Não tem partes móveis.

O limite de detecção é da ordem de 1%, mas pode variar de acordo com as especificações utilizadas durante a análise. Um elemento existente na amostra na ordem de 10% ou mais pode ser identificado em apenas 10s, levando cerca de 100s para a avaliação de um elemento na ordem de 1%. O primeiro passo para analisar-se uma mostra desconhecida é a identificação dos elementos presentes, através da análise qualitativa, sob pena de se comprometer a análise quantitativa em caso de erro na identificação. Normalmente os elementos em maior quantidade são identificados com elevada precisão, no entanto quando os elementos se encontram em pequenas quantidades ou em traço, erros podem acontecer. Para o EDS, concentrações acima de 10% são consideradas altas, entre 1% e 10% pequenas e abaixo de 1% , traço.

Segundo SILVA (1998) o EDS desempenha um papel fundamental, facilitando a identificação das fases hidratadas.

#### **3.4.4.3. Fluorescência de raios-X (FRX)**

A fluorescência de raios-X é uma técnica analítica, relativamente simples e, em geral, não destrutiva, utilizada na determinação qualitativa e quantitativa de elementos que compõem uma amostra. Esta técnica está baseada no princípio de que um átomo bombardeado com raios-X, emanados por um tubo operado em condições de alta voltagem, alguns de seus elétrons são ejetados.

De acordo com a AMPTEK INC. (2005), a fluorescência de raios-X é largamente utilizada para a avaliação dos elementos que compõem materiais, uma vez que é um método rápido e não destrutivo.

Como possui um limite de sensibilidade baixo, da ordem de partes por milhão, e ampla capacidade de detecção, com boa reprodutibilidade, a fluorescência de raios-X é uma técnica utilizada tanto na detecção de elementos em quantidades maiores, quanto menores e até traços. As amostras analisadas podem estar na forma líquida, em pó ou sólidas (MOLIN, 2007).



**FIGURA 3-30 – Aparelho para realização da espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX).**

## **4. METODO**

### **4.1. Seleção dos materiais e composição das argamassas**

#### **4.1.1. Bloco Cerâmico**

O bloco cerâmico utilizado nas alvenarias (ver maiores detalhes nos testes de caracterização destes materiais apresentados adiante) possui dimensão 29cm x 19cm x 9cm . Este bloco foi escolhido devido à larga utilização pelas construtoras e por ser um produto normatizado. **A argila utilizada na produção do bloco cerâmico é da região de Belo Horizonte.**

#### **4.1.2. Cimento**

O cimento escolhido foi o CP II –E-32, identificado por CARVALHO JR. (2005) como um dos aglomerantes mais utilizados nas composições das argamassas.

#### **4.1.3. Cal**

Para composição dos traços de argamassa foi escolhida a cal hidratada CH-I calcítica, bastante comum em nossa região, devido a significativa presença de jazidas de calcário próximas à Belo Horizonte. A utilização de cal aditivada e com garantia de 0% de óxidos não hidratados, permitiu a mistura do traço de uma única vez, eliminando assim a operação de maturação prévia da mistura de cal e areia.

#### **4.1.4. Areia**

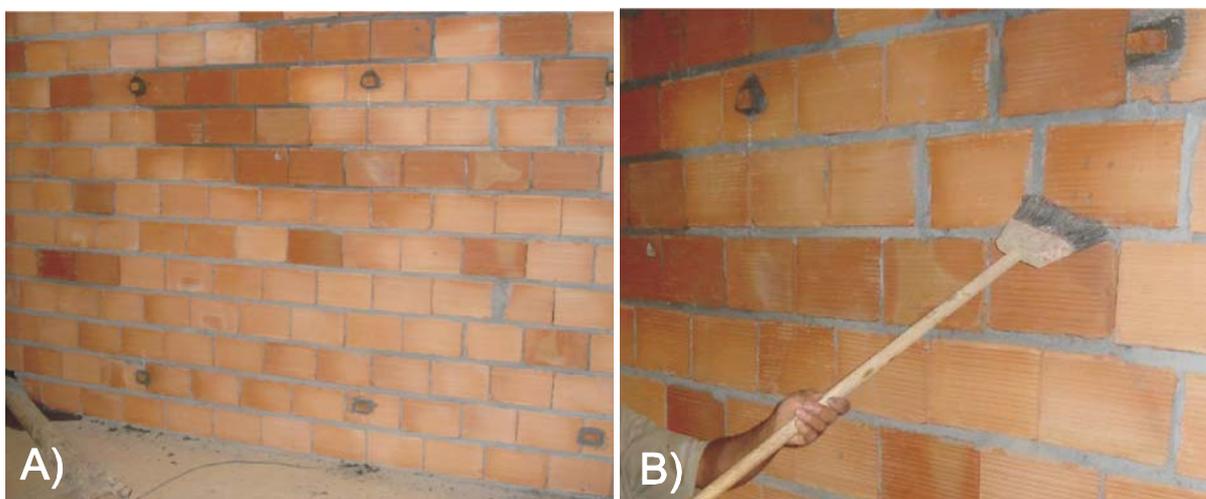
A areia utilizada foi de rio, lavada, de granulometria média e peneirada para retirada de impurezas (ver maiores detalhes nos testes de caracterização destes materiais apresentados adiante).

#### 4.1.5. Aditivos e adições

Não foi adicionado aos traços qualquer tipo de adições e aditivo, a não ser os já existentes na composição da cal utilizada.

#### 4.1.6. Painéis de alvenaria

Os Painéis de alvenaria utilizados como base para a aplicação dos revestimentos foram escolhidos de uma obra de construção de um hotel situado à Avenida Bias Fortes 783, em Belo Horizonte, construído pela Paranas Engenharia e Comércio SA. A escolha foi aleatória e a confecção dos painéis seguiu as práticas usuais de produção, não sendo tomado nenhum cuidado especial com relação as mesmas, obtendo-se o produto final apresentado na FIGURA 4-31A) . O painel de alvenaria possuía mais de 28 dias no momento da aplicação do revestimento argamassado. Antes da aplicação da argamassa foi realizada a limpeza da base e o taliscamento, conforme FIGURA 4-31B).



**FIGURA 4-31 – A) Aspecto final da alvenaria utilizada como base; B) Limpeza e taliscamento da alvenaria**

#### 4.1.7. Traços utilizados

Os traços utilizados foram os seguintes:

**TABELA IV-15 – Traços Cimento:Cal:Areia utilizados**

TRAÇO	CIMENTO	CAL	AREIA
1	1	0	6
2	1	1	6
3	1	2	8
4	1	2	10
5	0	1	6

Foram realizados 10 painéis de reboco, com as dimensões 1,5m x 1,0m, sendo 2 para cada traço (prova e contra prova). Foram feitos 6 ensaios de arrancamento e extraídas 4 amostras para realização de ensaios no MEV/EDS e 4 para realização de ensaios de FRX/DRX em cada painel.

#### 4.2. Aplicação das argamassas

As argamassas foram produzidas seguindo as técnicas usuais de obra, ou seja, dosagem em volume, mistura mecânica utilizando betoneira. As mesmas foram aplicadas no painel de seguindo as técnicas padrão utilizadas nos canteiros de obra, ou seja, projeção manual utilizando colher de pedreiro, sarrafeamento e desempeno com régua de alumínio (FIGURA 4-32). O Substrato encontrava-se seco no momento da aplicação da argamassa. O serviço foi executado sem a incidência direta de luz solar, em ambiente interno, entre 8:00 e 11:00 da manhã, de um dia nublado



**FIGURA 4-32 – Execução dos Painéis: A) Preparação da argamassa; B) Aplicação da argamassa; C) Sarrafeamento da argamassa; D) Vista dos painéis acabados**

### **4.3. Ensaios de caracterização do bloco cerâmico**

#### **4.3.1. Absorção de água**

O bloco cerâmico foi limpo e seco em estufa a  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , até que fosse obtida massa constante. Após sua pesagem em balança com precisão de 1g, o bloco foi imerso em água fervente, onde permaneceu por 2 horas. O bloco, imerso em água, é deixado esfriar até a temperatura ambiente, quando então é novamente pesado. A absorção é obtida através da relação entre a massa seca e a massa úmida.

#### **4.3.2. IRA (Initial rate of absorption – ensaios de absorção inicial)**

A norma que descreve este ensaio é a ASTM C67-97 (1997). O Índice expressa a absorção de água capilar inicial do bloco equivalente a uma área padrão de  $193,55\text{ cm}^2$ , em um minuto de imersão em 3,18mm de coluna de água. É expresso em gramas (g).

## 4.4. Ensaio de caracterização da argamassa no estado plástico

### 4.4.1. Consistência (flow table)

Neste ensaio, a argamassa previamente misturada, sob condições controladas, é aplicada na mesa de ensaio, em três camadas sucessivas, aplicando-se 15, 10 e 5 golpes respectivamente em cada camada. Então, a argamassa é forçada a deformar-se mediante quedas padronizadas, acionadas por manivela, 30 vezes em 30 segundos. Após a última queda da mesa, três diâmetros são medidos ao longo do perímetro. O índice de consistência corresponde à média das três medidas, expresso em milímetros e arredondado para o número inteiro mais próximo.

### 4.4.2. Retenção de água

Neste ensaio, um molde cilíndrico de aço, com 100mm de diâmetro e 25 mm de altura e previamente pesado com precisão de 0,1g (Mm), é preenchido com argamassa em 10 camada iguais até formar um pequeno excesso. Posteriormente o excesso de argamassa é arrasado e o molde é pesado (Mma). Sob a superfície da argamassa são colocadas duas telas de gaze (tipo cirúrgica de trama aberta, com 110mm de aresta), 12 discos de papel filtro (previamente pesados com precisão de 0,1g : Mse) e uma placa rígida (110mm de diâmetro, 5mm de espessura e uma das faces contendo usinagem lisa) com um peso de 2kg em cima. Passados dois minutos da aplicação do carregamento, o conjunto de papéis filtro é retirado e imediatamente pesado com precisão de 0,1g (Mf). O Valor do índice de retenção de água é calculado pela equação:

$$Ra = \frac{[1 - (Mf - Mse)] \times 100}{AF \times (Mma - Mm)}$$

Onde:

Ra: retenção de água, arredondada ao número inteiro mais próximo

AF: fator água/argamassa fresca:  $AF = \frac{Mw}{M+Mw}$

$$M+Mw$$

Mw: massa total de água acrescentada à mistura, em g

M: Soma das massas dos componentes anidros da argamassa, em g

Mf: massa do conjunto discos molhados de papel-filtro, em g

Mse: massa do conjunto de discos secos, em g

Mma: massa do molde com argamassa, em g

Mm: massa do molde vazio, em g

#### **4.4.3. Massa específica e ar incorporado**

Para determinação da massa específica, utiliza-se um recipiente cilíndrico, rígido, de volume e massa conhecidos. Após o preenchimento com argamassa, adensamento e nivelamento da superfície determina-se a massa do conjunto. A massa específica da argamassa é definida pela equação:

$$\gamma_{\text{arg}} = \frac{M_{\text{ma}} - M_{\text{m}}}{V_{\text{m}}}$$

Onde:

$\gamma_{\text{arg}}$ : massa específica da argamassa, em g/dm<sup>3</sup>

Mma: massa do molde cheio de argamassa, em g

Mm: massa do molde vazio, em g

Vm: volume do molde em dm<sup>3</sup>

Para determinação do teor de ar incorporado utiliza-se um método baseado na Lei de Boyle. Neste método utiliza-se uma campânula de medida e um sistema de vedação. Introduce-se água até determinada altura, sobre a amostra de volume conhecido de argamassa. Aplica-se sobre a água uma pressão de ar pré-estabelecida através de uma pequena bomba. O volume de ar da amostra de argamassa é determinado pela quantidade de água que penetra sobre a aplicação da pressão.

### **4.5. Ensaio de caracterização da argamassa no estado endurecido**

#### **4.5.1. Resistência à compressão**

Para este ensaio foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos de 5cm x 10cm, com argamassa recém preparada e consistência padrão. Após cura úmida de 48 horas em câmara úmida com

umidade relativa do ar de 95% os corpos de prova foram desmoldados e mantidos imersos em água, exceto os da argamassa sem cimento, que foram mantidos ao ar até a idade do ensaio.

Para realização dos ensaios, os corpos de prova foram capeados com enxofre e seu diâmetro medido com paquímetro em duas posições ortogonais em seu terço médio, registrando-se a média em milímetros. Após a ruptura axial dos corpos de prova, foram calculadas as resistências dividindo a carga de ruptura pela área da seção do corpo de prova e expressas em MPa.

#### **4.5.2. Resistência à tração na flexão**

Neste ensaio são utilizados corpos de prova prismáticos de seção transversal quadrada. Este corpo de prova é submetido a esforços de flexo-tração em três pontos. São avaliados neste ensaio o módulo de ruptura do material e sua tenacidade, onde a carga de ruptura corresponde, geralmente, à tensão máxima obtida no ensaio antes que a fibras passem a atuar, e a tenacidade à medida da quantidade de energia absorvida pelo material até a ruptura.

#### **4.5.3. Módulo de elasticidade dinâmico**

Para este ensaio foram moldados 2 corpos de prova cilíndricos de 5cm x 10cm , com argamassa recém preparada e consistência padrão. Após cura úmida de 48 horas em câmara úmida com umidade relativa do ar de 95% os corpos de prova foram desmoldados e mantidos imersos em água, exceto os da argamassa sem cimento, que foram mantidos ao ar até a idade do ensaio.

### **4.6. Ensaio de caracterização da argamassa aplicada**

#### **4.6.1. Resistência à tração**

A determinação da resistência de aderência à tração é feita através do arrancamento de placas metálicas de 50mm de diâmetro coladas com cola epóxi sobre a superfície da argamassa. No equipamento utilizado é feita a leitura da força necessária para ruptura, KN (FIGURA 4-33). Após o rompimento os corpos de prova têm seu diâmetro medido e calcula-se a tensão em MPa.



**FIGURA 4-33 – Execução de teste de aderência**

Após o rompimento é feita a análise da superfície da interface para se verificar onde a ruptura de deu. Ela pode ocorrer no substrato, na interface ou no revestimento argamassado, ou ainda em combinações destas situações.

#### **4.6.2. Permeabilidade**

Este ensaio de permeabilidade foi realizado “in situ”, utilizando-se o método do cachimbo recomendado pelo CSTC (1982). Neste método, um cachimbo de vidro graduado é acoplado à superfície a ser ensaiada, utilizando-se um mástique, no nosso caso silicone. Após o preenchimento com água, registra-se o nível da água em  $\text{cm}^3$ , a cada um minuto, até que se completem 15 minutos, ou que a marca da água atinja  $4\text{cm}^3$  (FIGURA 4-34). Para cada tipo de argamassa foram realizados três ensaios, em pontos diversos, e distanciados de no mínimo 1m. Este método permite exercer uma pressão inicial de 92mm de água, o que equivale à ação estática de um vento com velocidade aproximada de 140km/h.



FIGURA 4-34 – Execução de ensaio de permeabilidade à água

## 4.7. Avaliações microestruturais

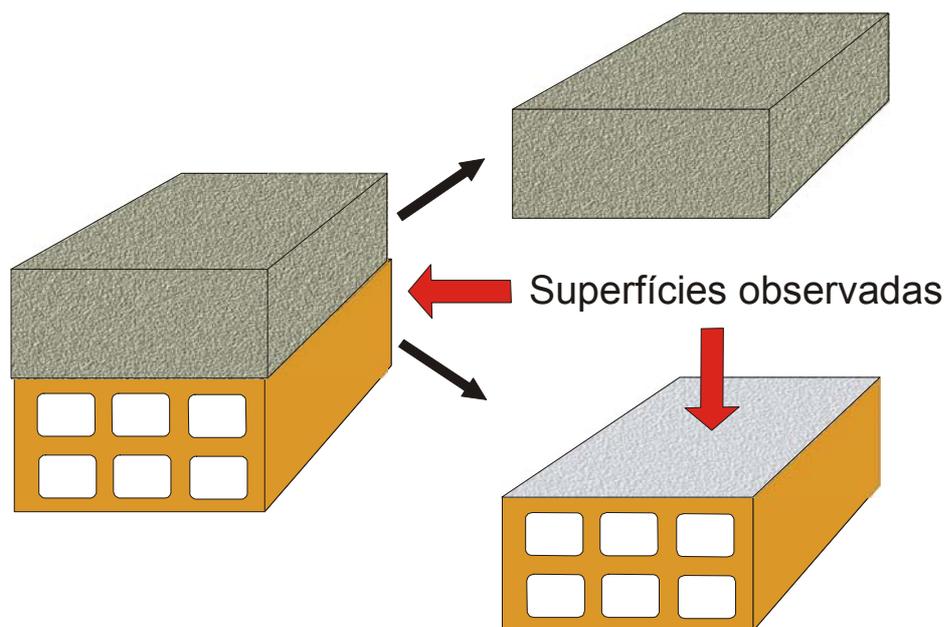
### 4.7.1. Microanalisador EDS e microscópio eletrônico de varredura (MEV)

A primeira etapa para a realização das análises microestruturais foi a extração e preparo das amostras. Foram extraídos corpos de prova da alvenaria através de serra mármore. Posteriormente esta amostra foi reduzida a pedaços de 25mm x 25mm x 15mm (FIGURA 4-35). Tamanho este suficiente para introdução no porta amostra do MEV/EDS.



FIGURA 4-35 – Amostra com aproximadamente 25mm x 25mm x 15mm

Quando a intenção é fazer análise da face frontal do tijolo cerâmico, destaca-se a argamassa antes da preparação da amostra, caso seja a intenção analisar o perfil de penetração da pasta, a preparação é feita sem o destacamento dos dois materiais (FIGURA 4-36).

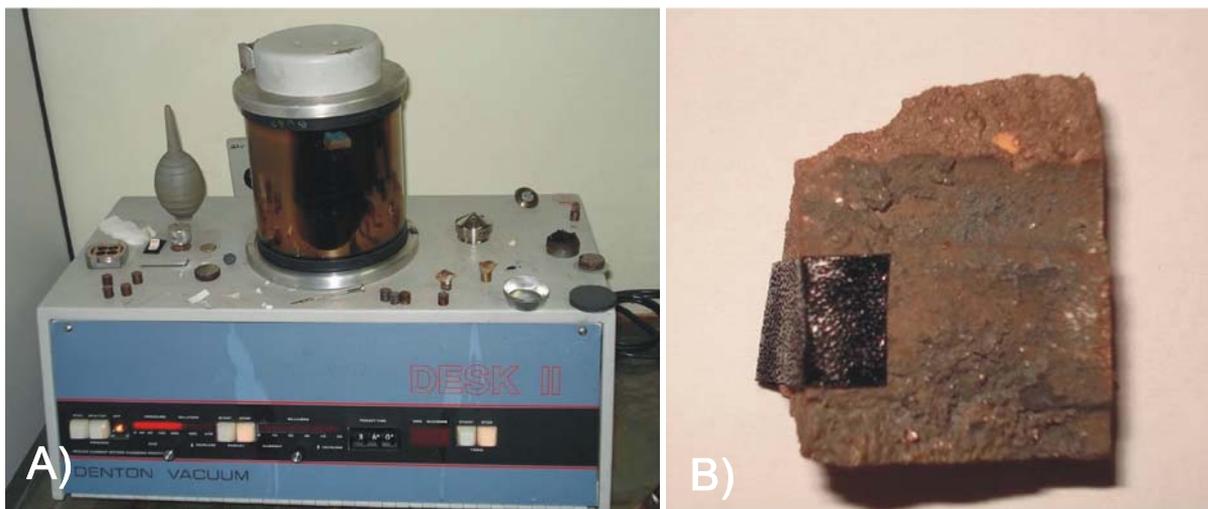


**FIGURA 4-36 – Plano observado no MEV**

Paralela à análise da morfologia do material através do MEV, foi identificado os constituintes através de análise química pontual, utilizando-se microanalisador EDS.

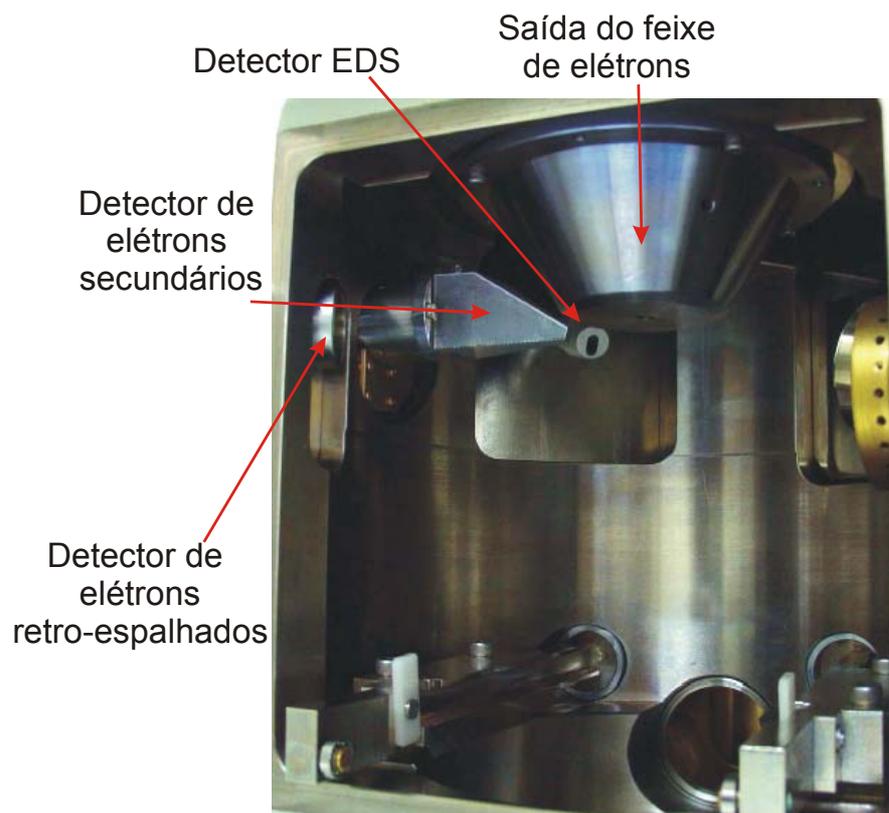
As análises através do MEV/EDS foram focadas a interface argamassa/tijolo, com a finalidade de identificar os produtos de hidratação dos aglomerantes que penetraram no substrato e seus teores.

As amostras foram submetidas a um vácuo de 100 militorr ( $1 \text{ atm} = 750 \text{ militorr}$ ) e posteriormente pulverizadas com um filme de ouro. Este filme condutor tem a finalidade de tornar a amostra condutora, melhorando a imagem e facilitando a dissipação de calor durante o ensaio. Após a metalização foi colada uma fita de carbono para fixar a amostra e fazer o contato elétrico com o equipamento (FIGURA 4-37).



**FIGURA 4-37 – A) Equipamento utilizado para metalização das amostras; B) Amostra metalizada com fita de carbono pronta para análise no MEV**

A FIGURA 38 mostra visão interna do MEV/EDS utilizado no experimento.



**FIGURA 4-38 – Vista interna do equipamento MEV/EDS utilizado**

A FIGURA 4-39 mostra B) vista externa do MEV/EDS utilizado no experimento e A) a amostra posicionada para início dos trabalhos.

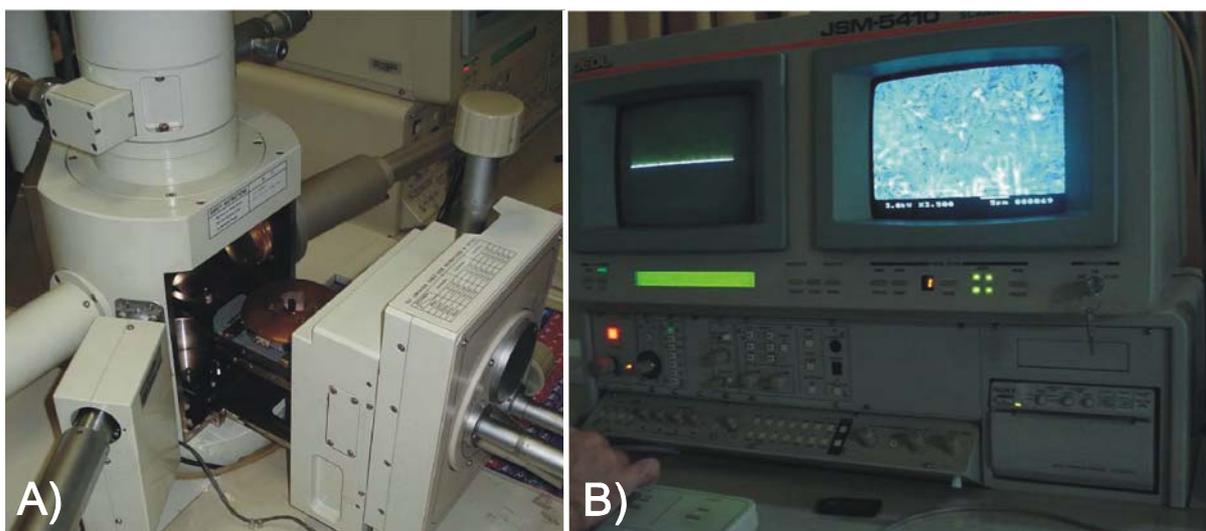


FIGURA 4-39 – A) Amostra posicionada no equipamento antes do seu fechamento B) Momento da execução da Microscopia Eletrônica de Varredura

#### 4.7.2. Fluorescência de raios-X (FRX)

As amostras que foram utilizadas para análise da fluorescência de raios-X foram extraídas por lixamento manual da superfície do tijolo cerâmico após o destacamento da argamassa (FIGURAS 4-40 e 4-41). A profundidade de extração foi medida com utilização de um paquímetro (FIGURA 4-42). O método de extração pode introduzir erros no ensaio, uma vez que o lixamento pode não estar sendo feito paralelamente a superfície.

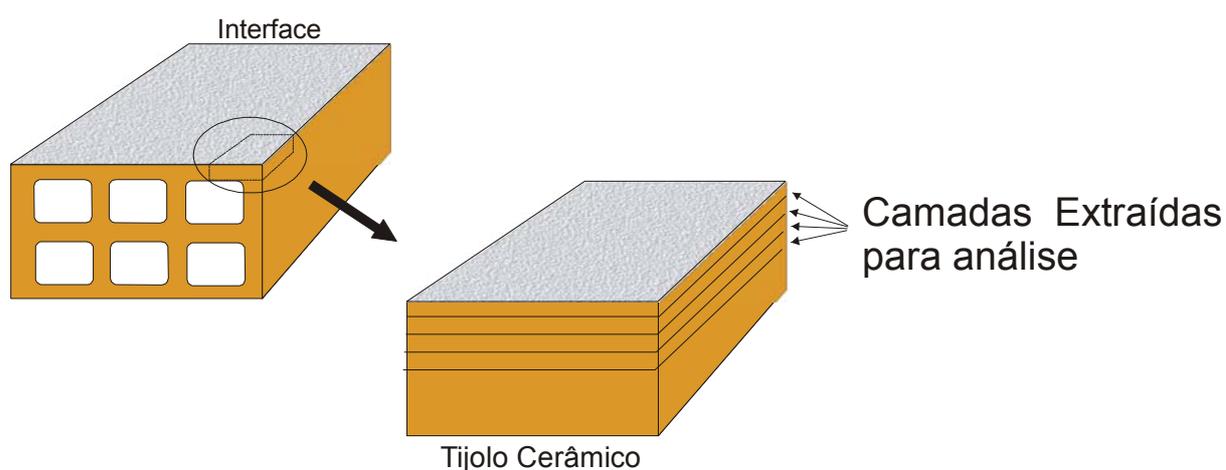
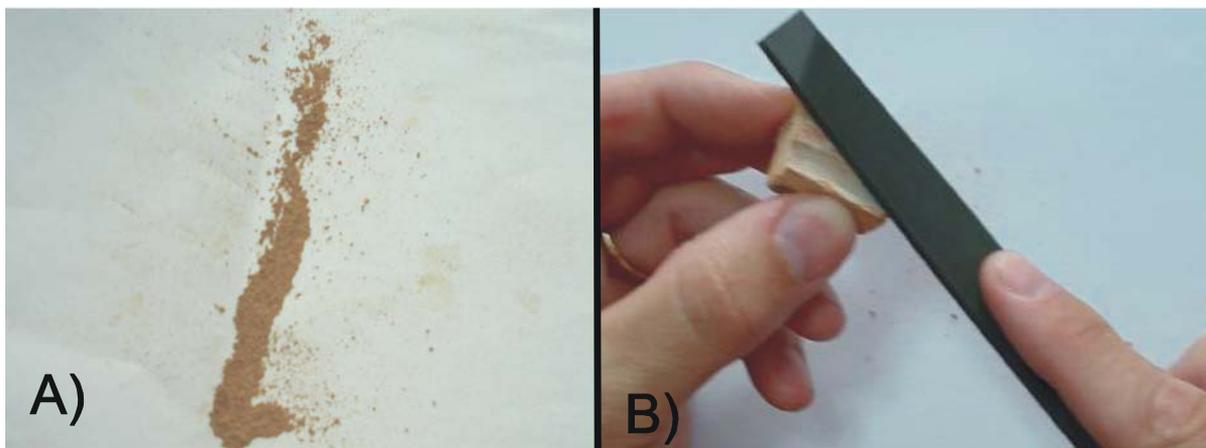


FIGURA 4-40 – Diagrama de extração do material para análise FRX



**FIGURA 4-41 – A) Material proveniente do lixamento da amostra; B) Momento da extração do material por lixamento manual**

Cada fração lixada, referente a uma espessura específica, foi colocada no porta amostra e em seguida prensada para então ser introduzida no espectômetro de fluorescência de raios-X, marca Philips, modelo PW-2400, com tubo de anodo de ródio.



**FIGURA 4-42 – Medição da espessura de camada retirada por lixamento da amostra**

O elemento base escolhido para identificar a penetração da pasta de aglomerante nos poros do substrato foi o cálcio. Este produto está presente em grande quantidade nos produtos de hidratação do cimento e da cal e em pequenas quantidades no bloco cerâmico puro, servindo desta forma como um indicador do perfil de penetração da pasta no substrato. A penetração do produtos de hidratação do cimento no tijolo constitui-se o mecanismo de aderência de uma argamassa à base.

Com a finalidade de reduzir a imprecisão das medidas realizadas, os resultados serão apresentados por uma relação entre o cálcio e outros constituintes principais do sistema argamassa/bloco cerâmico, neste caso ( silício, alumínio, ferro, titânio e potássio). Desta forma, caso ocorram erros de medida do aparelho na determinação do teor de cálcio, também ocorrerá na determinação do outro elemento, anulando assim o erro, uma vez que o resultado é apresentado em proporção.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresentam-se os resultados dos ensaios realizados nos laboratórios do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais e do Departamento de Materiais de Construção da Engenharia Civil, ambos pertencentes à Escola de Engenharia da UFMG.

### 5.1. Resultado e discussões dos ensaios de caracterização do bloco cerâmico

#### 5.1.1. Absorção de água

TABELA V-16 – Absorção de água do bloco cerâmico de acordo com a ABNT NBR 8947 (1992)

Bloco Cerâmico (n°)	M <sub>h</sub> (g)	M <sub>g</sub> (g)	Absorção de água (%)
1	4300	5050	17,44%
2	4400	5100	15,91%
3	4450	5200	16,85%
4	4450	5150	15,73%
5	4500	5100	13,33%
6	4350	5100	17,24%
7	4450	5100	14,61%
8	4500	5100	13,33%
9	4350	5200	15,56%
10	4500	5050	12,22%
11	4450	5100	14,61%
12	4500	5250	16,67%
13	4350	5200	19,54%
Média			15,62%
Desvio Padrão			2,00

As 13 amostras para prova e 13 para contra prova foram analisadas conforme as recomendações da ABNT NBR 8947 (1992) – Telha cerâmica – Determinação da massa e da absorção de água – Método de ensaio. Todas as amostras atenderam aos requisitos preconizados pela ABNT NBR 7171 – Bloco cerâmico para alvenaria – Especificação que limita a absorção entre 8% e 25%.

#### 5.1.2. IRA (Initial rate of absorption – Ensaio de absorção inicial)

Foram analisadas 13 amostra e os valores obtidos estão de acordo com os valores apontados por GALEGOS (1995), entre 10 e 160 gramas.

TABELA V-17 – IRA do bloco cerâmico segundo a ASTM C67-97

Bloco Cerâmico (nº)	Mse (g)	Mf (g)	Af (cm <sup>2</sup> )	IRA (g)
1	4300	4350	551	17,56
2	4400	4450	551	17,56
3	4450	4500	551	17,56
4	4450	4500	551	17,56
5	4500	4550	551	17,56
6	4350	4400	551	17,56
7	4450	4500	551	17,56
8	4500	4550	551	17,56
9	4350	4550	551	17,56
10	4500	4550	551	17,56
11	4450	4500	551	17,56
12	4500	4550	551	17,56
13	4350	4400	551	17,56
<b>Média</b>				17,56
<b>Desvio Padrão</b>				0,00

## 5.2. Resultado e discussões da caracterização dos aglomerantes

### 5.2.1. Ensaio de caracterização do cimento

Os dados referentes à caracterização do cimento foram fornecidos pelo fabricante, apresentados no TABELA V-18. Todos os resultados estão em consonância com os limites apresentados pelas normas brasileiras.

TABELA V-18 – Ensaio de caracterização CPIIE32

<b>Ensaio de caracterização do Cimento</b>		
<b>A/C (%)</b>	27,50	
<b>Tempo de Pega – Início (min) – NBR 11581</b>	208,00	
<b>Resistência à compressão (NBR7215)</b>	<b>3 dias</b>	20,40
	<b>7 dias</b>	26,00
	<b>28 dias</b>	39,90
<b>Resíduos Insolúveis (%) – NBR 5744</b>	1,25	
<b>SO<sub>3</sub> (%)</b>	1,62	
<b>Perda ao fogo – NBR 5743</b>	5,69	





### 5.3. Resultado e discussões dos ensaios de caracterização dos agregados

A areia utilizada na produção da argamassa foi submetida ao ensaio de granulometria e apresentou módulo de finura de 2,74, conforme TABELA V-21.

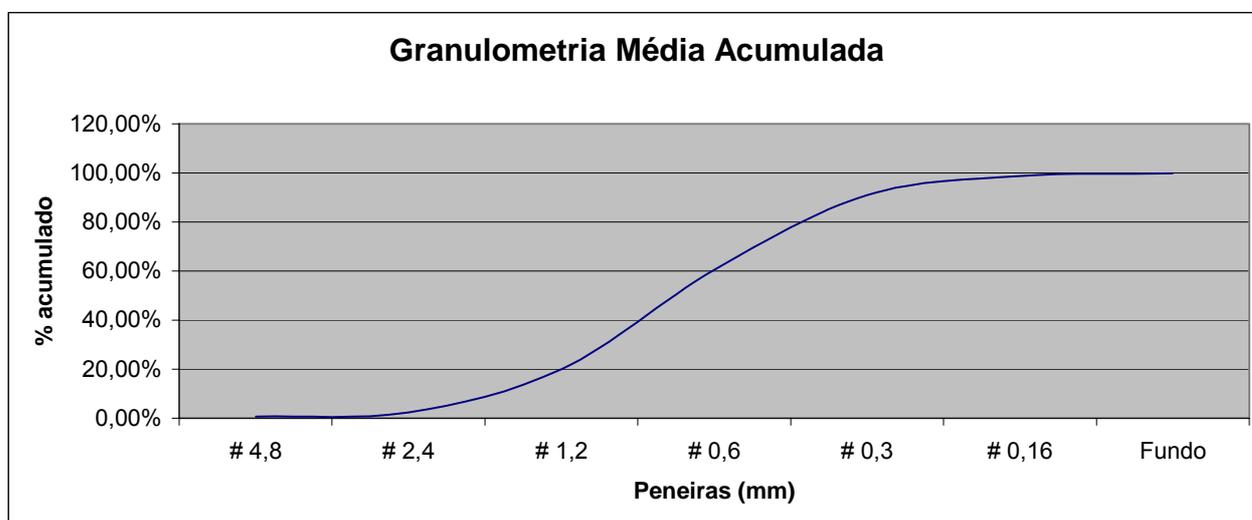
#### 5.3.1. Ensaio de caracterização da areia

TABELA V-21 – Resultado de análise granulométrica da areia  
Relatório de Análise Granulométrica

Material: Areia  
Data da análise: 16/3/2007

Malha da Peneira	Amostra 1		Amostra 2		Amostra Média		Limite granulométrico (NBR - 7211)
	Material Retido (g)	% Retida	Material Retido (g)	% Retida	% Retida	% retida acumulada	
# 4,8	6,1	0,61%	5,8	0,58%	0,60%	0,60%	0 - 11
# 2,4	18,6	1,86%	15,9	1,59%	1,73%	2,32%	0 - 25
# 1,2	177,3	17,73%	176,1	17,61%	17,67%	19,99%	10 - 45
# 0,6	406,7	40,67%	402,6	40,26%	40,47%	60,46%	41 - 65
# 0,3	304,3	30,43%	307,2	30,72%	30,58%	91,03%	70 - 92
# 0,16	75,3	7,53%	80,1	8,01%	7,77%	98,80%	90 - 100
Fundo	10,2	1,02%	11,3	1,13%	1,08%	99,88%	
Total	998,5	99,85%	999	99,90%	99,88%		

Módulo de Finura: 2,74  
Dimensão máx. Caract. (mm): 4,80



## 5.4. Resultado e discussões dos ensaios de caracterização da argamassa no estado plástico

### 5.4.1. Consistência (flow table)

A seguir apresentam-se os resultados obtidos nos testes realizados para obtenção do índice de consistência padrão das argamassas utilizadas.

**TABELA V-22 Índice de consistência padrão segundo NBR 13276 (2002)**

<b>Tipo de Argamassa</b>	<b>Índice de consistência padrão (mm)</b>
1:0:6 – Traço 1	250
1:1:6 – Traço 2	270
1:2:8 – Traço 3	280
1:2:10 – Traço 4	280
0:1:6 – Traço 5	260

Os resultados confirmam a influência do teor de cal na plasticidade da argamassa. Os efeitos desta plasticidade podem ser observados da FIGURA 5-43. A interface entre o tijolo cerâmico e a argamassa 1:0:6, sem cal, apresenta menor extensão de aderência e menor uniformidade. A argamassa também apresenta maior quantidade de vazios.

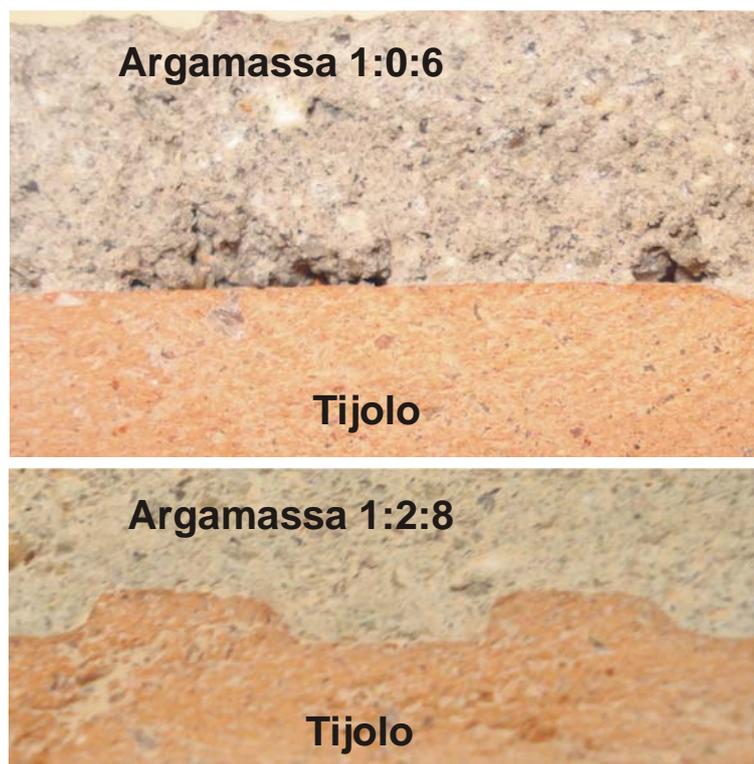


FIGURA 5-43 – Interface entre argamassa e bloco de concreto

#### 5.4.2. Retenção de água

Os resultados obtidos no ensaio de retenção de água confirmam a influência da cal neste comportamento das argamassas. Todos os ensaios atenderam ao requisito mínimo da norma BS 4551 que define como valor mínimo 80%. Entretanto, à medida que o teor de cal na argamassa aumenta, aumenta em muito o percentual de retenção de água. Esta característica se deve à capacidade da cal de reter uma película de água firmemente aderida ao redor de seus finos grãos.

TABELA V-23 - Retenção de águas segundo BSI 4551 (Mortars, Screeds and plaster. Londres 1981

Tipo de argamassa	Retenção de água (%)
1:0:6 – Traço 1	85,84
1:1:6 – Traço 2	86,62
1:2:8 – Traço 3	92,02
1:2:10 – Traço 4	94,82
0:1:6 – Traço 5	83,40

### 5.4.3. Massa específica

**TABELA V-24 – Massa específica segundo NBR 13278 (1995)**

<b>Tipo de argamassa</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
1:0:6 – Traço 1	2,08
1:1:6 – Traço 2	1,98
1:2:8 – Traço 3	2,00
1:2:10 – Traço 4	2,05
0:1:6 – Traço 5	1,95

Não foram observadas diferenças significativas de massa específica entre as argamassas analisadas.

### 5.4.4. Ar incorporado

**TABELA V-25 – Teor de ar incorporado segundo NBR 13278 (1995)**

<b>Tipo de argamassa</b>	<b>Ar incorporado (%)</b>
1:0:6 – Traço 1	18
1:1:6 – Traço 2	20
1:2:8 – Traço 3	20
1:2:10 – Traço 4	20
0:1:6 – Traço 5	21

As variações nos valores obtidos de ar incorporado podem ser explicadas pelo teor de cal da argamassa. Quanto maior o teor de cal, maiores são os valores de ar incorporado medidos.

## 5.5. Resultado e discussões dos ensaios de caracterização da argamassa no estado endurecido

### 5.5.1. Resistência à compressão

TABELA V-26 – Resistência à compressão segundo NBR 13279 (1995)

Tipo de argamassa	Média da resistência à compressão em 4 CPs (MPa)
Traço 1 – 1:0:6	11,75
Traço 2 – 1:1:6	11,25
Traço 3 – 1:2:8	5,75
Traço 4 – 1:2:10	7,25
Traço 5 – 0:1:6	*

\* o corpo de prova rompeu antes da estabilização do carregamento

Todos os resultados estão condizentes com a lógica de que os traços que contém maior quantidade de cal em relação ao aglomerante cimento devam apresentar menores valores de resistência à compressão.

### 5.5.2. Resistência à tração na flexão

TABELA V-27 – Resistência à tração na flexão

Tipo de argamassa	Tração na flexão Média de 2 medições (MPa)
Traço 1 – 1:0:6	1,36
Traço 2 – 1:1:6	1,48
Traço 3 – 1:2:8	1,12
Traço 4 – 1:2:10	0,71
Traço 5 – 0:1:6	*

\* o corpo de prova rompeu antes da estabilização do carregamento

Os resultados de resistência à tração na flexão acompanham a tendência observada, e esperada, da resistência à tração, ou seja, à medida em que se aumenta o percentual de cal na argamassa em relação ao aglomerante cimento, a resistência diminui. Entretanto, o traço 2 apresentou resistência superior ao traço 1 que contém maior percentual de cimento. Este fato pode ser decorrente da moldagem do corpo de prova, ou pode indicar que a cal hidratada, quando adicionada em pequenos teores, aumenta a plasticidade, melhorando o adensamento e consequentemente a resistência mecânica da argamassa.

### 5.5.3. Módulo de elasticidade dinâmico

**TABELA V-28 – Módulo de elasticidade dinâmico obtido através de frequência ressonante**

<b>Tipo de argamassa</b>	<b>Módulo de elasticidade dinâmico – Ed Média de 10 medições (GPa)</b>
<b>Traço 1 – 1:0:6</b>	<b>13,66</b>
<b>Traço 2 – 1:1:6</b>	<b>14,39</b>
<b>Traço 3 – 1:2:8</b>	<b>11,94</b>
<b>Traço 4 – 1:2:10</b>	<b>9,48</b>
<b>Traço 5 – 0:1:6</b>	<b>2,89</b>

Os resultados apresentados pelos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico foram inconclusivos.

## 5.6. Resultado e discussões dos ensaios de caracterização da argamassa aplicada sobre a base

### 5.6.1. Resistência de aderência à tração segundo a NBR 13528 (1996)

**TABELA V-29 – Resistência de aderência à tração segundo ABNT NBR 13528**

Traços de argamasa (Cimento:Cal:Areia)	Ensaio de arrancamento realizados com idade mínima de 28 dias (Mpa)	
	Média (de 12 ensaios)	Desvio Padrão
1:0:6	0,84	0,22
1:1:6	0,63	0,29
1:2:8	0,54	0,2
1:2:10	0,51	0,25
0: 1:6*	-	-

Obs: Não foi possível realizar o ensaio pois a argamassa se descolava durante a preparação da amostra devido à sua baixa resistência

Os resultados obtidos nos testes de arrancamento, segundo a ABNT NBR 13528 – Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração, são apresentados na TABELA V- 29. Todos os resultados atendem com folga os limites sugeridos pela norma ABNT NBR 13749, 0,20MPa para rebocos internos e 0,30MPa para rebocos externos, com exceção do traço 5 – 0:1:6, em que as amostras romperam-se por coesão durante a preparação. Isto pode ser explicado pela lenta carbonatação da cal, uma vez que este traço não possuía cimento.

Os resultados confirmaram as expectativas, ou seja, à medida que se aumentava o teor de cal, diminuía-se a resistência de aderência.

Um fato interessante observado através de análises individuais foi que em pontos onde o revestimento foi aplicado parcialmente sobre a junta de assentamento, as tensões de aderência foram maiores do que quando somente sobre o tijolo. Este fato também foi observado por CARASEK et al. (1999). Provavelmente isto se deve ao fato de que sendo materiais de mesma composição a aderência melhora.

### 5.6.2. Extensão de aderência



FIGURA 5-44 – Observação da superfície de rompimento

Após o rompimento das amostras analisou-se as superfícies de rompimento, afim de identificar o tipo de falha ocorrido. A falha é classificada em adesão, quando existe um rompimento interno na argamassa ou no tijolo, ou aderência, quando a falha ocorre na interface dos dois materiais (FIGURA 5-45).

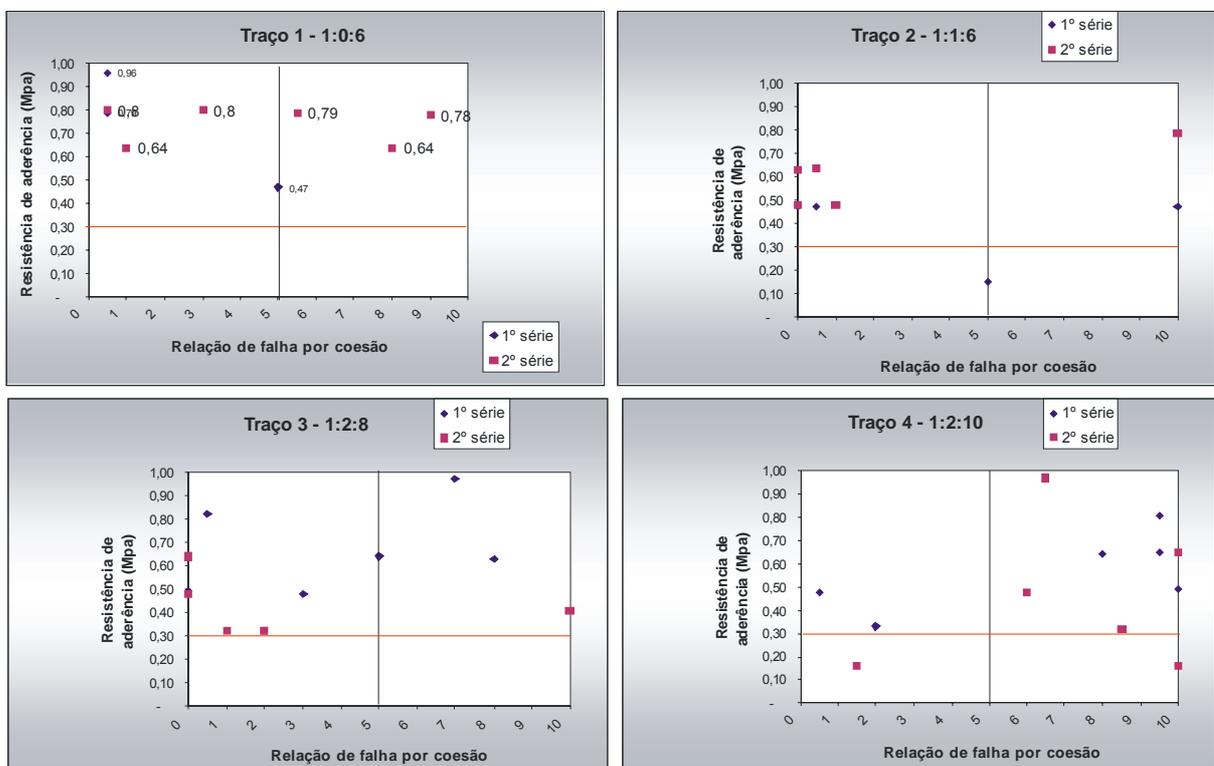


FIGURA 5-45 – Extensão de aderência das argamassas

Ao se analisar tipo de falha nos rompimentos do ensaio de aderência pode-se observar que no traço 1 – 1:0:6 os tipos de falhas são muito variados, provavelmente pelos altos valores de aderência apresentados e pela resistência mecânica da argamassa. Todos os valores obtidos são muito acima da norma. No traço 2 – 1:2:8 parece haver uma forte tendência pela falha por adesão, provavelmente porque a introdução da cal influenciou mais negativamente a aderência do que a resistência mecânica da argamassa, sendo que os resultados de aderência são inferiores ao do traço 1. No traço 3 – 1:2:8 o tipo de falha é muito variado, provavelmente devido à maior perda de resistência mecânica da argamassa com o aumento do teor de cal. Os valores de rompimento, apesar de serem superiores ao exigido pela norma são muito próximos ao limite. No traço 4 – 1:2:10 parece existir uma forte tendência pela falha por coesão, provavelmente ocasionada pela perda acentuada de resistência mecânica da argamassa causada pelo novo aumento do teor de cal. Neste traço também apareceram os únicos resultados abaixo do limites estipulados pela norma. Pode-se observar claramente a influência da cal na resistência de aderência da argamassa e as mudanças no tipo de falha à medida que se varia o teor de cal.

Cabe ainda ressaltar que a ruptura aqui caracterizada como de aderência, na verdade é uma ruptura por falta de coesão da argamassa, ocorrida muito próxima da interface tijolo-argamassa, cerca de 50 $\mu$ m. Este fato também é observado por CARASEK et al. (1999) e CARASEK (1996).

### 5.6.3. Permeabilidade a água

TABELA V-30 – Medidas de permeabilidade na argamassa 1:0:6

Tempo (min)	Experimento 1 (cm <sup>3</sup> )	Experimento 2 (cm <sup>3</sup> )	Experimento 3 (cm <sup>3</sup> )
1	0,00	0,00	0,00
2	0,50	0,00	0,00
3	1,00	0,50	0,50
4	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,40	1,00
6	1,00	1,40	1,00
7	1,20	1,40	1,50
8	1,30	2,00	1,50
9	1,40	2,00	1,50
10	1,50	2,00	1,80
11	1,50	2,80	2,00
12	1,50	2,80	2,00
13	1,50	2,80	2,00
14	1,50	2,80	2,00
15	1,50	3,00	2,00

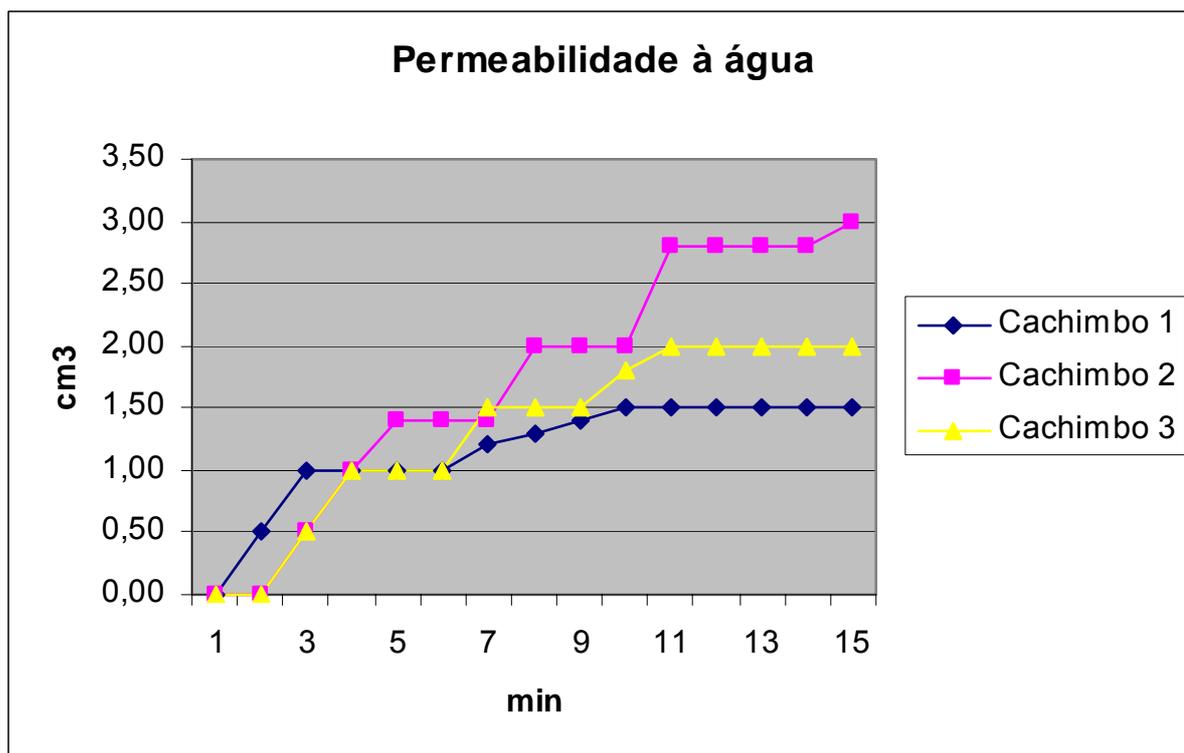


FIGURA 5-46 – Evolução da permeabilidade na argamassa 1:0:6

TABELA V-31 - Medidas de permeabilidade na argamassa 1:1:6

Tempo (min)	Experimento 1 (cm <sup>3</sup> )	Experimento 2 (cm <sup>3</sup> )	Experimento 3 (cm <sup>3</sup> )
1	0,50	0,00	0,00
2	1,00	0,00	0,00
3	1,20	0,20	0,00
4	1,50	0,20	0,50
5	2,00	0,20	0,50
6	2,00	1,00	1,00
7	2,00	1,20	1,00
8	2,50	1,20	1,20
9	3,00	1,30	1,30
10	3,00	1,50	1,30
11	3,50	1,80	1,80
12	3,80	2,00	1,80
13	4,00	2,00	2,00
14	4,20	2,10	2,00
15	4,50	2,30	2,10

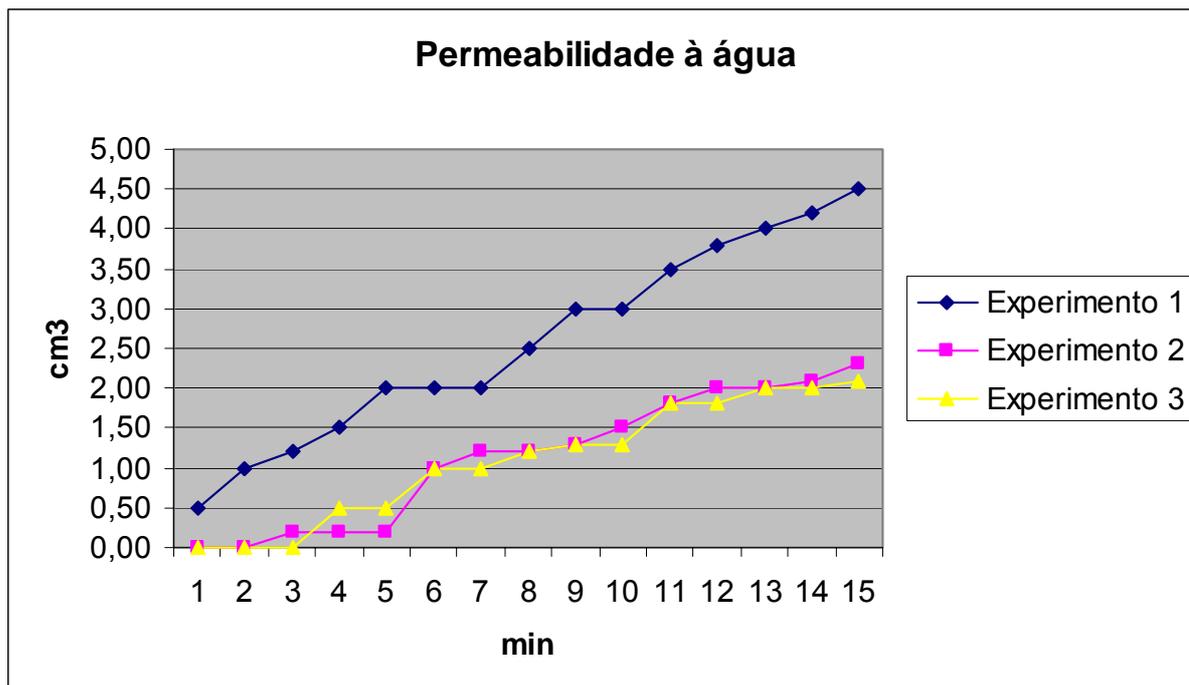


FIGURA 5-47 - Evolução da permeabilidade na argamassa 1:1:6

TABELA V-32- Medidas de permeabilidade na argamassa 1:2:8

Tempo (min)	Experimento 1 (cm <sup>3</sup> )	Experimento 2 (cm <sup>3</sup> )	Experimento 3 (cm <sup>3</sup> )
1	0,00	1,00	1,00
2	0,00	1,00	1,00
3	0,20	1,50	1,60
4	0,30	2,00	2,10
5	0,30	2,40	2,20
6	0,40	2,70	2,50
7	0,50	3,00	2,90
8	0,70	3,40	3,00
9	0,90	3,70	3,00
10	1,00	3,90	3,20
11	1,00	4,20	3,40
12	1,00	4,50	3,60
13	1,10	4,80	3,60
14	1,20	5,00	3,90
15	1,20	5,00	4,00

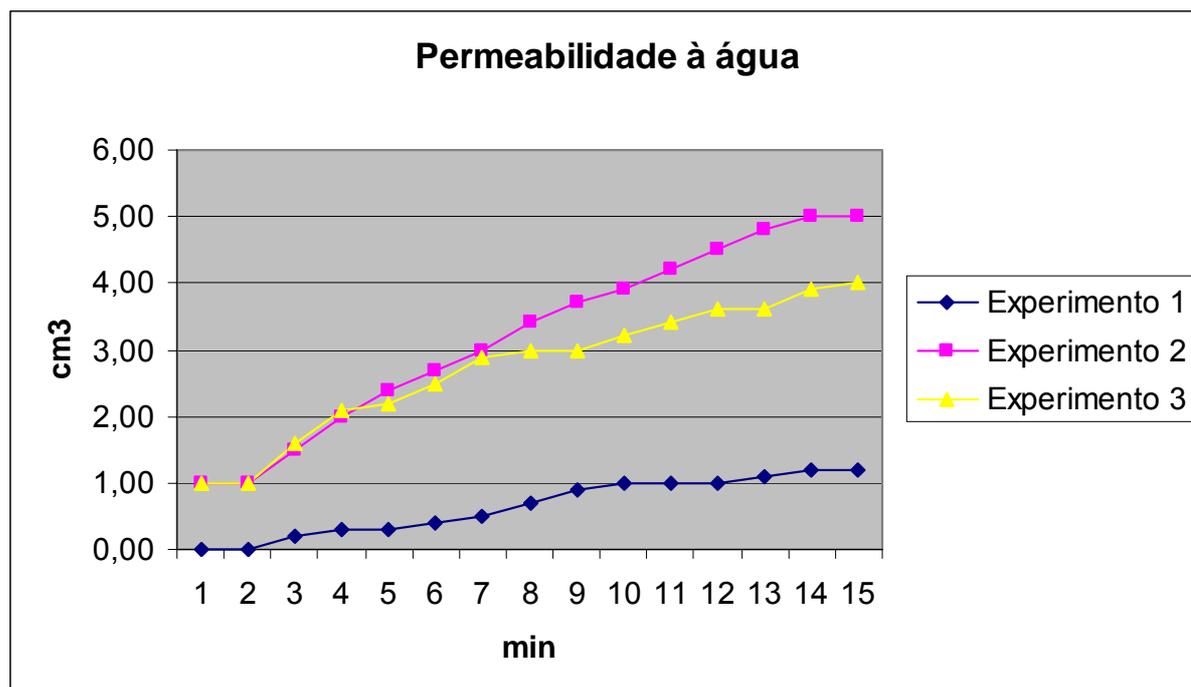


FIGURA 5-48 - Evolução da permeabilidade na argamassa 1:2:8

TABELA V-33– Medidas de permeabilidade na argamassa 1:2:10

Tempo (min)	Experimento 1 (cm <sup>3</sup> )	Experimento 2 (cm <sup>3</sup> )	Experimento 3 (cm <sup>3</sup> )
1	1,00	0,50	0,50
2	1,30	1,00	1,00
3	2,00	1,80	1,80
4	2,20	2,80	3,00
5	2,80	3,00	3,50
6	3,00	3,50	4,00
7	3,30	4,00	4,90
8	3,90	4,50	5,70
9	4,00	5,00	6,30
10	4,50	5,60	7,00
11	5,00	6,10	7,90
12	5,30	7,00	8,40
13	5,60	7,30	9,00
14	6,00	7,80	9,30
15	6,10	8,10	10,00

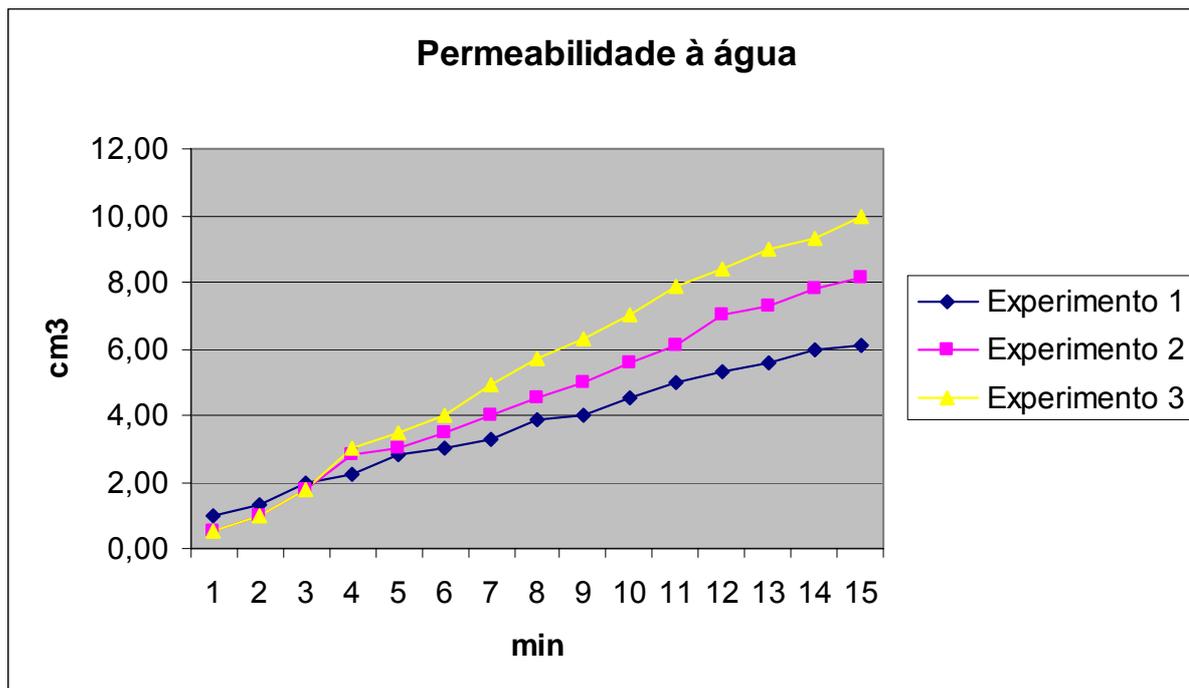
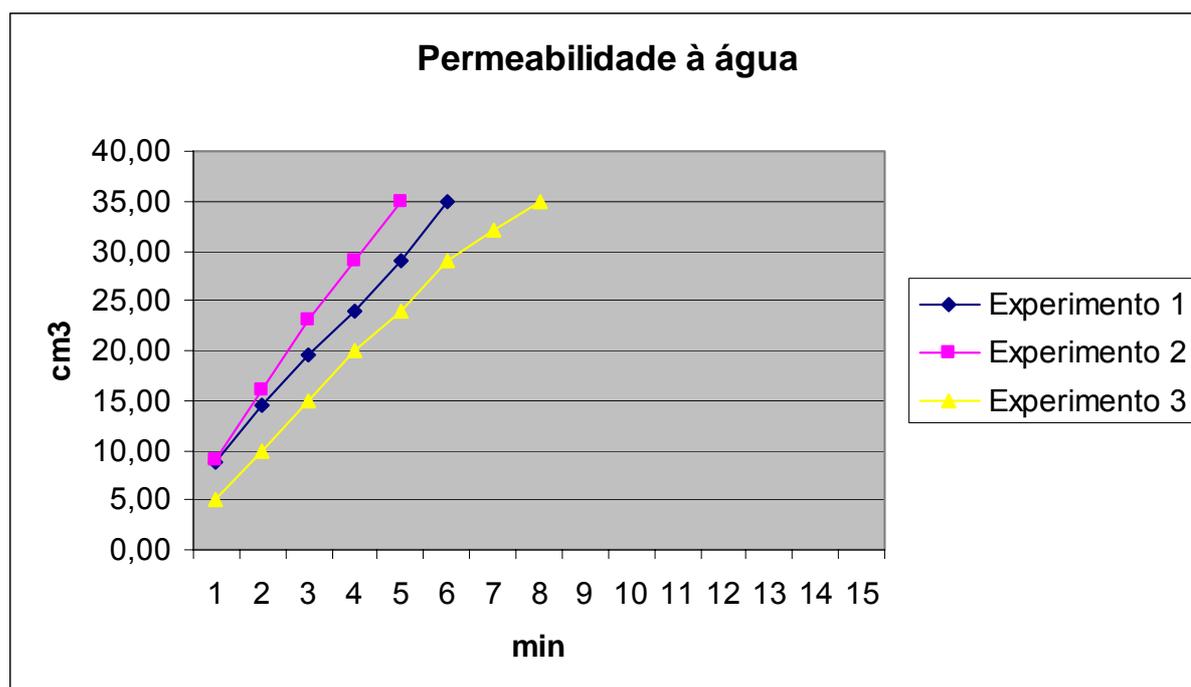


FIGURA 5-49 - Evolução da permeabilidade na argamassa 1:2:10

TABELA V-34- Medidas de permeabilidade na argamassa 0:1:6

Tempo (min)	Experimento 1 (cm <sup>3</sup> )	Experimento 2 (cm <sup>3</sup> )	Experimento 3 (cm <sup>3</sup> )
1	8,80	9,00	5,00
2	14,50	16,00	10,00
3	19,50	23,00	15,00
4	24,00	29,00	20,00
5	29,00	35,00	24,00
6	35,00		29,00
7			32,00
8			35,00
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			



**FIGURA 5-50 - Evolução da permeabilidade na argamassa 0:1:6**

**TABELA V-35 – Maior valor da permeabilidade à água “in situ” segundo CSTC (1982)**

Tipo de argamassa	Maior valor da permeabilidade – medido aos 15 minutos de contato da água presente no cachimbo com a superfície da argamassa – (cm <sup>3</sup> )
Tipo 1 – 1:0:6	3,0
Tipo 2 – 1:1:6	4,5
Tipo 3 – 1:2:8	5,0
Tipo 4 – 1:2:10	10,0
Tipo 5 – 0:1:6	-

A menor permeabilidade medida no traço 1 – 1:0:6 condiz com a bibliografia que afirma ser a permeabilidade inversamente proporcional à quantidade de cimento da argamassa. Da mesma forma, a grande permeabilidade medida no traço 5 – 0:1:6, onde não existe cimento, confirma a teoria que afirma que quanto maior o teor de cal a argamassa maior será sua permeabilidade. Esta mesma teoria explica o comportamento das demais argamassas.

Correlacionado estes dados com os obtidos da resistência à compressão e tração na flexão, pode-se concluir que a permeabilidade é inversamente proporcional a estas.

## 5.7. Resultado e discussões das análises de caracterização microestrutural

Uma dificuldade encontrada no estudo da microestrutura é que o tijolo cerâmico e a argamassa, mesmo macroscopicamente tão diferentes, inclusive em sua cor, microscopicamente são parecidos e possuem em sua composição muitos elementos químicos em comum, entre eles: cálcio e silício, alumínio e ferro.

Ao se destacar a argamassa do tijolo para efetuar a análise, observou-se que em todas elas, uma fina camada de argamassa permaneceu aderida, visível a olho nu (FIGURA 5-51). Observou-se também que na medida em que se aumentou o teor de cal na argamassa, a camada se tornou maior e mais uniforme. Este fato se deve à maior plasticidade conferida pela cal à argamassa. A forma como a ruptura ocorreu demonstra que a tensão exercida excedeu a capacidade de coesão próxima à interface, confirmando a existência de uma região de menor resistência neste local.



FIGURA 5-51 – Interface do tijolo após de destacamento da argamassa.

### 5.7.1. Microscópio eletrônico de varredura (MEV) e microanalisador EDS

A seguir são apresentados e discutidos os principais aspectos observados no estudo da microestrutura da interface argamassa/substrato, o qual foi realizado com microscópio

eletrônico de varredura (MEV) dotado de microanalisador EDS - espectrômetro de dispersão de energia. O equipamento utilizado foi o MEV JEOL JSM-5410 com EDS THERMO NORAN TN-M3055. São apresentadas imagens obtidas tanto através de sinais de elétrons retroespalhados (ER) quanto por elétrons secundários (ES).

Como a argamassa e o tijolo possuem baixa condutividade térmica e elétrica, foi necessária a aplicação de uma fina camada de material condutivo (ouro). Esta camada é aplicada através de evaporações de ouro sob vácuo ( $10^{-2}$  mbar), resultando em um filme de espessura da ordem de nanômetros. Esta película evita a geração de cargas eletrostáticas que prejudicam a qualidade da imagem e permite a dissipação do calor produzido pelo bombardeamento de elétrons.

Inicialmente foi feita uma microanálise do bloco cerâmico (TABELA V-36).

**TABELA V-36 – Microanálise do bloco cerâmico puro**

<b>PONTO</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>CaO</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Σ</b>
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Caracterização do Tijolo Cerâmico	35,2	53,8	1,1	1,9	1,0	7,0	100,0

De acordo com os elementos identificados, os principais constituintes são o silício e o alumínio. Isto pode acarretar algumas dificuldades na análise dos constituintes da argamassa, uma vez que a mesma também contém estes elementos.

Na FIGURA 5-52 os elevados teores de cálcio, silício, alumínio e enxofre, associados à morfologia característica, fitas euédricas formadas por coalescência de bastões estreitos (0,05µm) e longos (4-5µm), indicam presença de cristais de etringita. Na FIGURA 5-53 é possível visualizar finos cristais de etringita unidos formando feixes mais espessos. **Em ambas, o espaço entre os cristais de etringita são preenchidos provavelmente por cristais de portlandita com sinais de provável início de carbonatação.**

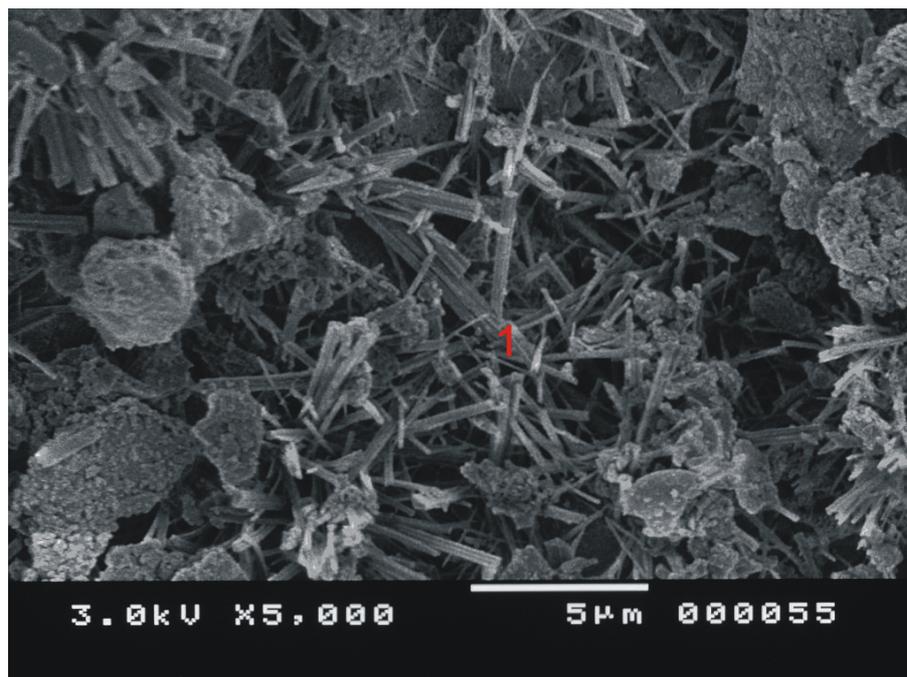


FIGURA 5-52 – Fotomicrografia da interface bloco cerâmico – argamassa tipo 1- 1:0:6; vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. Imagem obtida com elétrons secundários (IES).

TABELA V-37 – Microanálise EDS, ponto 1 da figura 5-52

PONTO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	Σ (%)	Interpretação
1	14,0	39,8	6,3	2,3	33,5	3,5	0,6	100,0	Etringita

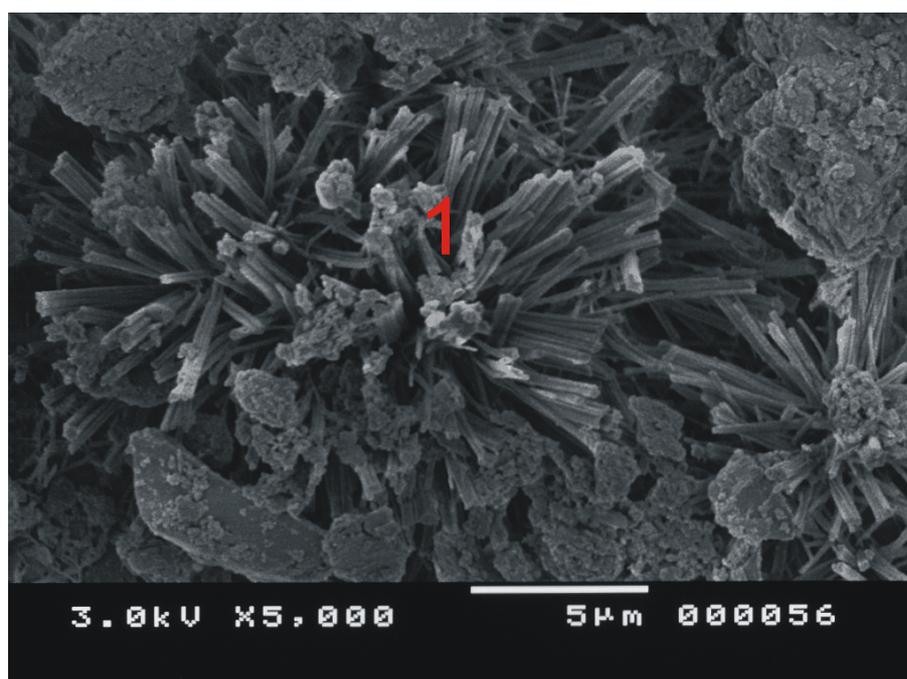


FIGURA 5-53 - Fotomicrografia da interface bloco cerâmico – argamassa tipo 1- 1:0:6 vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. (IES).

TABELA V-38 - Microanálise EDS, ponto 1 da figura 5-53

PONTO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	∑ (%)	Interpretação
1	14,48	19,94	20,87	37,36	7,34	100,0	Etringita

Todas as fotomicrografias da FIGURA 5-54 (pág. 142) foram realizadas na interface do tijolo com a argamassa 1 – 1:0:6, de perfil, sem o destacamento entre eles. Foi utilizada imagem de elétrons retroespalhados.

A fotomicrografia 5-54 A apresenta a interface entre o tijolo e a argamassa, traço 1 - 1:0:6, vista de perfil e sem o destacamento entre eles. É nítida a pequena extensão de aderência causada pela falta de plasticidade da argamassa. Grandes vazios se formaram principalmente nas regiões em curva, o que faz supor que as estrias na superfície do tijolo, com a finalidade de aumentar a aderência pelo aumento da superfície, podem neste caso provocar sua diminuição. São observados também produtos oriundos da penetração do cimento no interior de poros do tijolo. Esta penetração não se dá de forma uniforme nem em termos de profundidade nem em extensão. Desta forma, existem áreas com grande penetração e outras com nenhuma. Esta diferença pode ser causada pela extensão de aderência, técnica de aplicação e principalmente pela porosidade aberta do tijolo. A profundidade em que os cristais de etringita foram encontrados chega a até 500µm. No entanto, autores pesquisados afirmam ter encontrado penetrações de cálcio a até 1,8 mm de profundidade. Fica bem claro também que apesar de macroscopicamente a argamassa e o tijolo serem completamente diferentes, ao nível microscópico a diferença não é tão nítida assim.

A fotomicrografia 5-54D apresenta cristais de etringita com 30µm de comprimento e 0,5µm de espessura, com direção preferencial de crescimento dos cristais perpendicular à superfície do substrato, podendo indicar que a proximidade do substrato interfere na morfologia argamassa. Esta interferência pode ser causada pela absorção do bloco que cria um fluxo de água, íons e grãos de cimento. Pode ser observado o agulhamento do substrato pelos cristais de etringita, sendo este mecanismo responsável pela aderência mecânica da argamassa ao substrato. Aparecem somente os cristais de etringita, pelo fato de os íons sulfato e alumínio serem os primeiros a solubilizar-se, sendo também os primeiros a serem absorvidos pelo substrato poroso, preenchendo todos os espaços vazios e tendo também espaço para se formarem. Nesta região também não existiu extensão de aderência boa, devido à baixa plasticidade da argamassa, evitando assim o crescimento de outras fases, como por exemplo CSH.

As fotomicrografias 54B, C, e E apresentam cristais de etringita formados no interior de poros do substrato. Os cristais se formaram mais intensamente em regiões próximas à superfície, como no caso da fotomicrografia E, a cerca de 100 $\mu$ m. Mas também foram encontrados cristais em profundidades maiores, como no caso das fotomicrografias B e C, a cerca de 500 $\mu$ m. A etringita parece ser o único cristal a se formar no interior do substrato. Isto talvez possa ocorrer pelo fato da etringita ser a primeira fase a cristalizar-se no interior dos poros, não deixando espaço para os outros cristais se formarem.

**TABELA V-39 – Microanálise EDS da FIGURA 5-54D**

<b>PONTO</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b><math>\Sigma</math></b>	<b>Interpretação</b>
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
1	15,5	8,3	28,9	45,1	2,1	100,0	Etringita

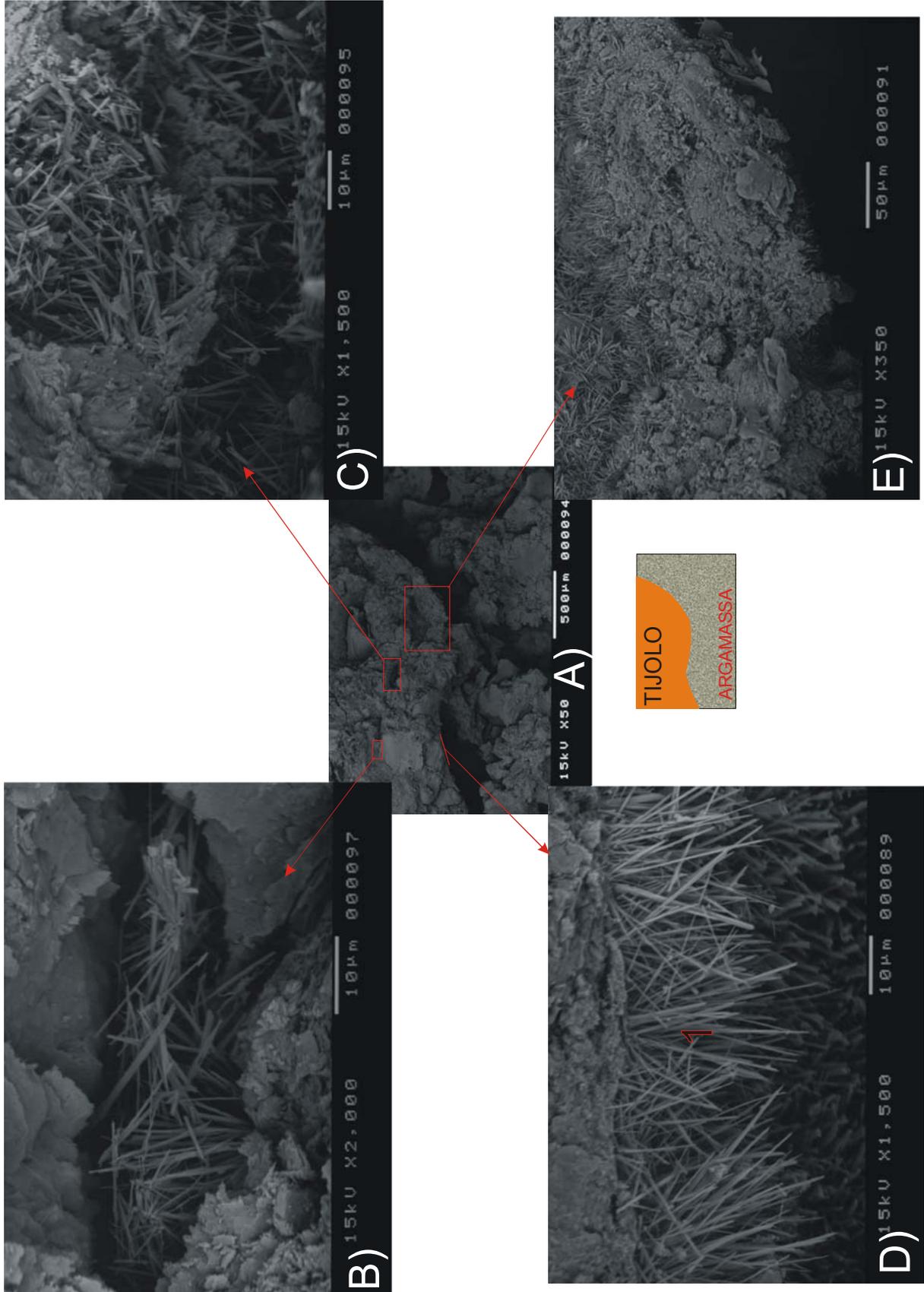
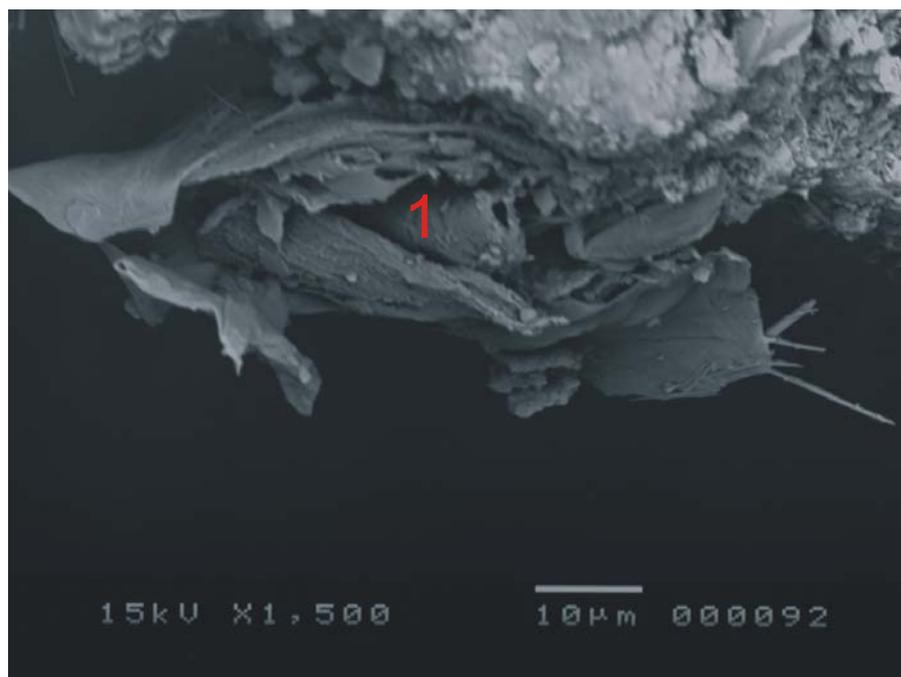


FIGURA 5-54 – Fotomicrografias do perfil do bloco cerâmico aderido à argamassa tipo 1 - 1:0:6. IER.



**FIGURA 5-55 – Fotomicrografias da argamassas tipo 1 – 1:0:6 e tipo 4 – 1:2:10 com o menor aumento possível. IER.**

A FIGURA 5-55 apresenta fotomicrografias das argamassas tipo 1 – 1:0:6 e tipo 4 – 1:2:10. É nítida a diferença de adensamento entre as duas. O traço 1 apresenta grandes vazios com dimensões maiores de 50  $\mu\text{m}$ . No entanto, o traço 4 apresenta pequenos poros, não mostra vazios característicos de mau adensamento e é mais homogêneo. Também é possível observar bolhas de ar. Estas bolhas são causadas pelo ar incorporado na argamassa. A diferença entre os dois traços pode ser explicada pela presença de cal no traço 4. A cal confere maior plasticidade, maior retenção de água e maior quantidade de ar incorporado. Nos ensaios realizados, o traço 1 é o que apresentou os menores valores de ar incorporado e retenção de água.



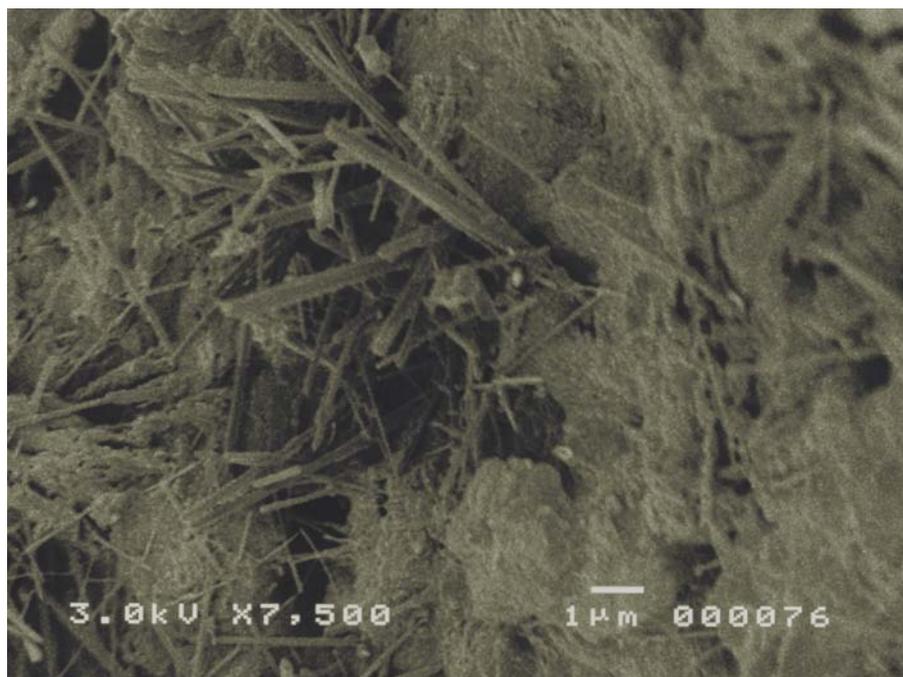
**FIGURA 5-56 – Fotomicrografia da interface do bloco cerâmico – Argamassa tipo 1 – 1:0:6. Vista de perfil sem o destacamento da argamassa. IER.**

**TABELA V-40 – Microanálise EDS da fase da FIGURA 5-56**

<b>PONTO</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> (%)	<b>SiO<sub>2</sub></b> (%)	<b>K<sub>2</sub>O</b> (%)	<b>CaO</b> (%)	<b>∑</b> (%)	<b>Interpretação</b>
1	13,0	29,8	11,6	45,6	100,0	Portlandita

A fase da FIGURA 5-56 se desenvolveu no espaço deixado na interface do tijolo cerâmico – argamassa, devido à baixa plasticidade da argamassa tipo 1 – 1:0:6. De acordo com a microanálise EDS realizada, a fase trata-se possivelmente de hidróxido de cálcio.

Foi observado que a morfologia dos cristais no interior da argamassa é diferente da observada na interface. Na interface, os cristais são maiores e mais bem formados, sendo sua direção preferencial de crescimento perpendicular ao substrato. Nesta região, a fase preponderante é a etringita. No interior da argamassa, os cristais são menores e na maioria das vezes estão misturados com outras fases. A fase preponderante nesta região é o CSH.



**FIGURA 5-57 – Fotomicrografia da argamassa tipo 1 – 1:0:6. Imagem obtida com elétrons secundários (IES).**

A fotomicrografia da FIGURA 5-57 demonstra a morfologia típica dos cristais de etringita com aproximadamente  $0,5\mu\text{m}$  de espessura, sem direção preferencial, parcialmente envolvida por outra fase, provavelmente CSH.

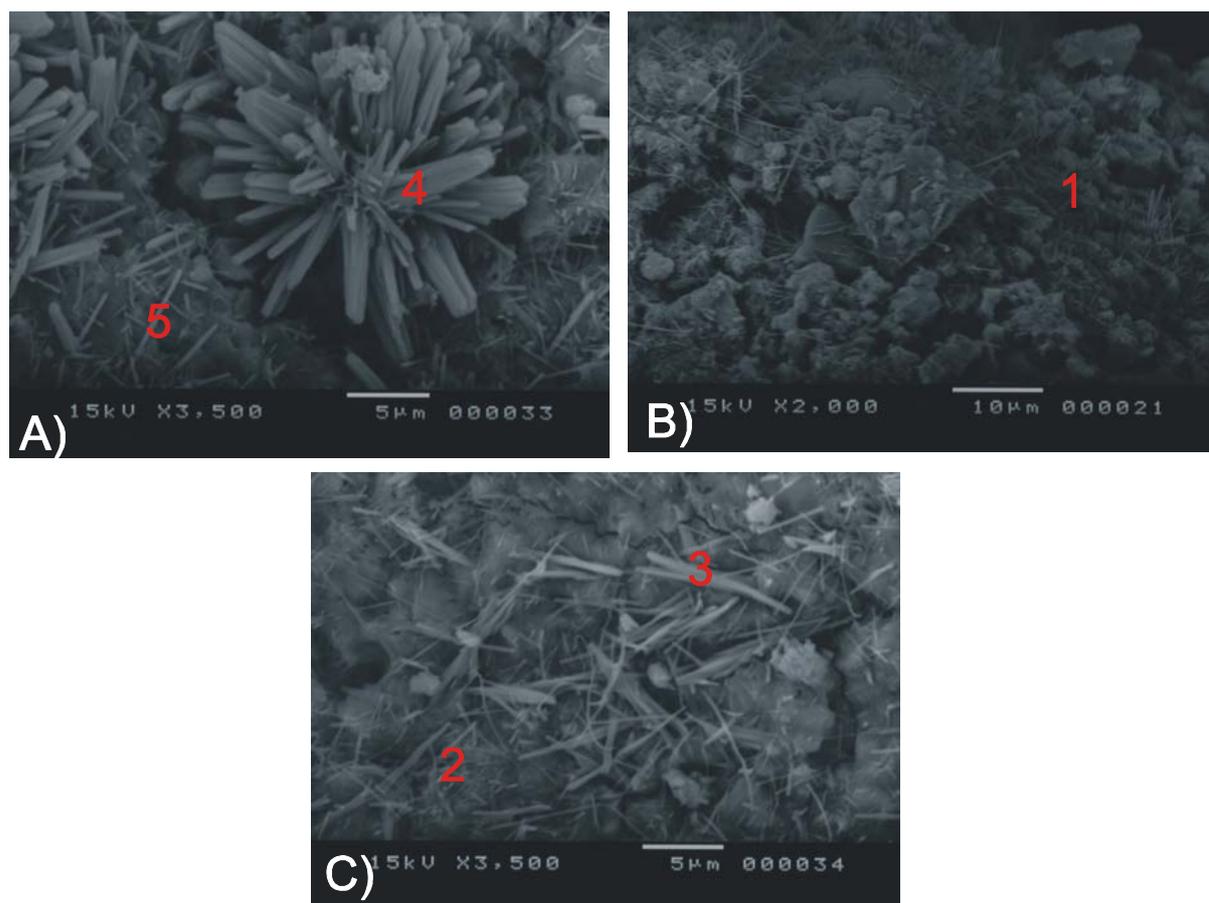


FIGURA 5-58 – Fotomicrografias da argamassa tipo 4 – 1:2:10. IER.

TABELA V-41 – Microanálise EDS da FIGURA 5-58

PONTO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	K <sub>2</sub> O	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	∑ (%)	Interpretação
1	2,4	5,1	-	-	-	92,5	-	100,0	Portlandita
2	2,0	4,8	-	-	-	87,8	5,4	100,0	Portlandita
3	11,8	6,8	17,1	0,7	-	61,0	2,7	100,0	Etringita
4	5,8	7,4	13,1	-	-	73,7	-	100,0	Etringita
5	3,6	6,2	8,3	-	1,5	80,4	-	100,0	Portlandita + Etringita

A FIGURA 5-58 apresenta fotomicrografias da argamassa tipo 4 – 1:2:10 mostrando morfologias típicas da argamassa. A fotomicrografia 5-58A apresenta, no ponto 4, um grupo de cristais de etringita bem formado no interior de uma bolha de ar. A morfologia euédrica é definida quando há espaço disponível, como neste caso. Ao contrário, pouco espaço origina morfologia anédrica. No ponto 5 há portlanditas com pouca etringita. A fotomicrografia 5-58B apresenta vários cristalitos de portlandita, associados às outras fases. A fotomicrografia 5-58C apresenta, no ponto 2, a presença de portlandita e no ponto 1 agulhas de etringita.

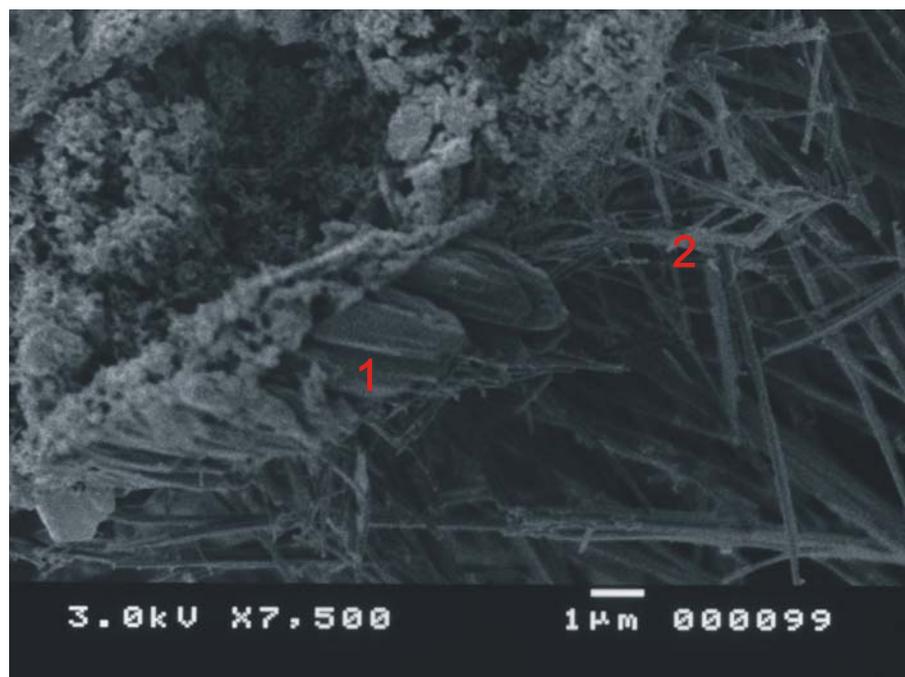


FIGURA 5-59 – Fotomicrografia da interface tijolo-argamassa no traço 1 - 1:0:6. Vista de perfil, sem o destacamento de ambos. IES.

TABELA V-42 – Microanálise EDS dos pontos 1 e 2 da FIGURA 5-59

PONTO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	∑ (%)	Interpretação
1	4,0	7,9	7,7	80,4	100,0	Portlandita
2	15,3	12,6	24,2	47,9	100,0	Etringita

A FIGURA 5-59 apresenta ao fundo (ponto 2) cristais com a morfologia típica da etringita, com fitas de espessura aproximada de 0,3 µm e grande comprimento. Os altos teores de SO<sub>3</sub> identificados na análise EDS confirmam a suposição. Entretanto, os cristais em primeiro plano (ponto 1), em formato de placas com comprimento de 3,0 µm, largura de 1,5 µm e espessura de 0,2 µm parecem ser portlanditas vistas como lamelas subédricas. As microanálises EDS apresentadas na TABELA 42 confirmam as afirmações anteriores.

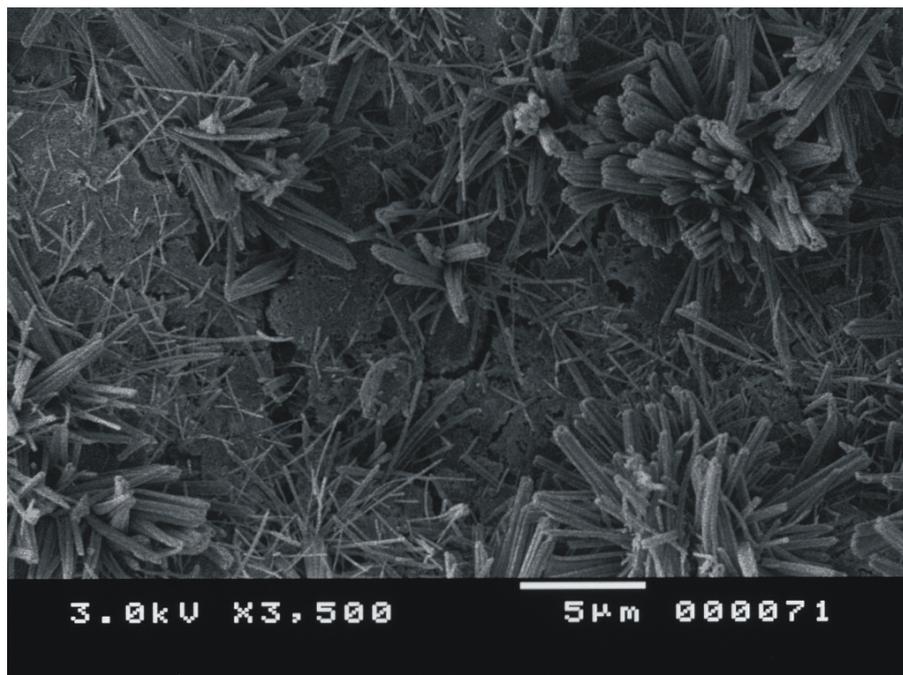


FIGURA 5-60 – Fotomicrografia da interface tijolo/argamassa do traço 2 – 1:1:6. IES.

A FIGURA 5-60 apresenta cristais típicos de etringita saindo de dentro dos poros do tijolo. Os cristais se formam perpendicularmente à superfície e as fitas típicas se agrupam em feixes radiais. Microtrincas da superfície do tijolo aparecem ao fundo e também ajudam na ancoragem da argamassa.

A FIGURA 5-61 apresenta cristais de etringita no ponto 1. Esta afirmação é confirmada pela morfologia típica e pelos altos teores de  $\text{SO}_3$ . Entretanto, a fotomicrografia mostra outra fase, quase amorfa, preenchendo os vazios entre as agulhas de etringita, provavelmente CSH. A partícula marcada pelo ponto 2, pelas dimensões, pela morfologia e pelos resultados da microanálise EDS, parece ser um grão de agregado da argamassa.

TABELA V-43 – microanálise EDS dos pontos 1 e 2 da FIGURA 5-61

PONTO	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	$\text{SiO}_2$ (%)	$\text{SO}_3$ (%)	$\text{K}_2\text{O}$ (%)	$\text{CaO}$ (%)	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	$\text{MgO}$ (%)	$\Sigma$ (%)	Interpretação
1	9,5	32,0	16,6	1,6	37,6	2,1	0,6	100,0	Etringita
2	16,9	44,3	-	1,2	36,1	-	1,5	100,0	Grão de agregado

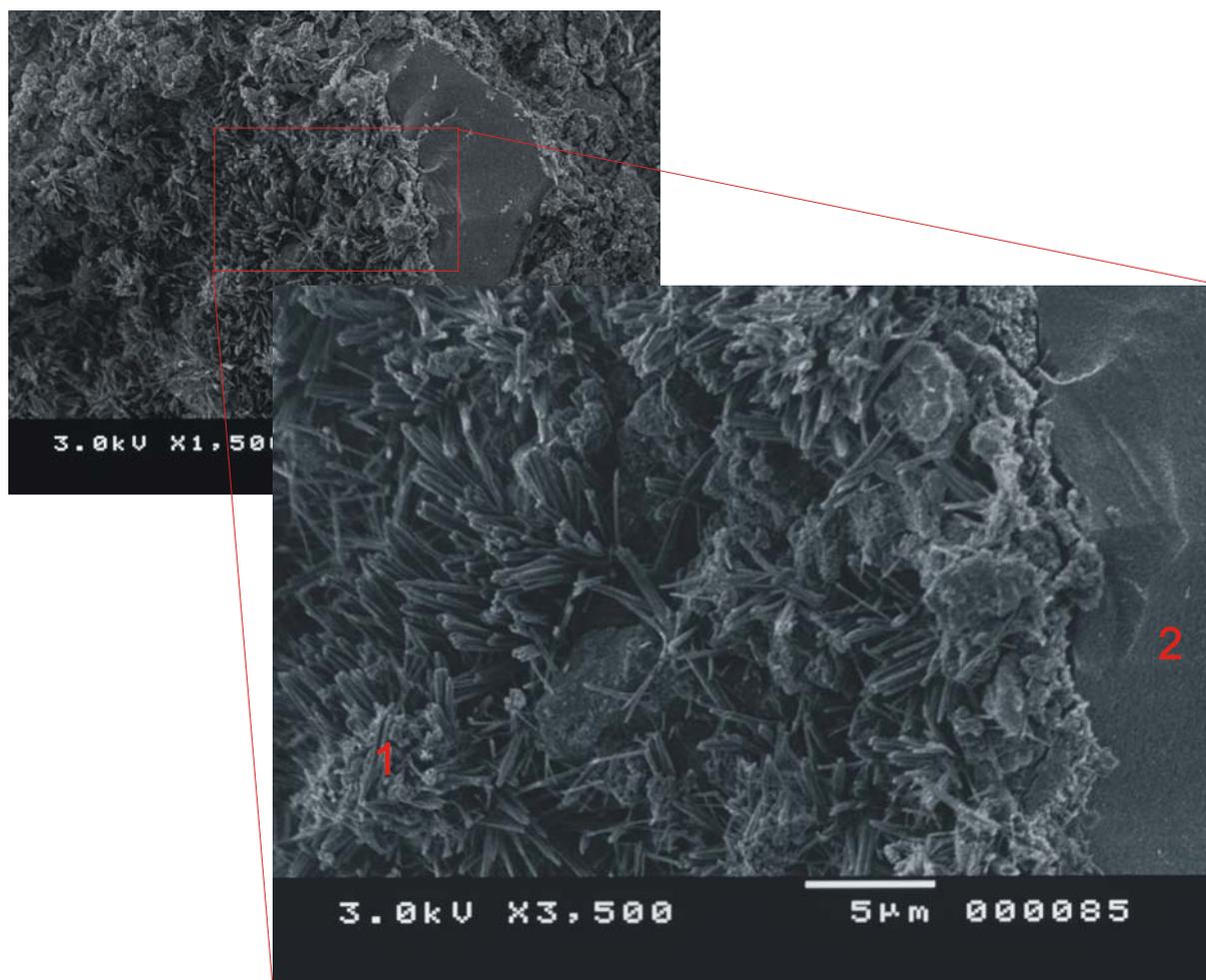


FIGURA 5-61 – Fotomicrografias da interface do tijolo/argamassa do traço 2 – 1:1:6. IES.

A FIGURA 5-62 apresenta duas fotomicrografias da interface tijolo/argamassa do traço 3 – 1:2:8, ambas com o mesmo aumento, no entanto a foto 5-62A foi obtida com elétrons secundários e a foto 5-62B foi obtida com elétrons retroespalhados. A área à esquerda das fotos mostra muitas fitas e agulhas, enquanto a parte à direita apresenta fases equiaxiais subédricas.

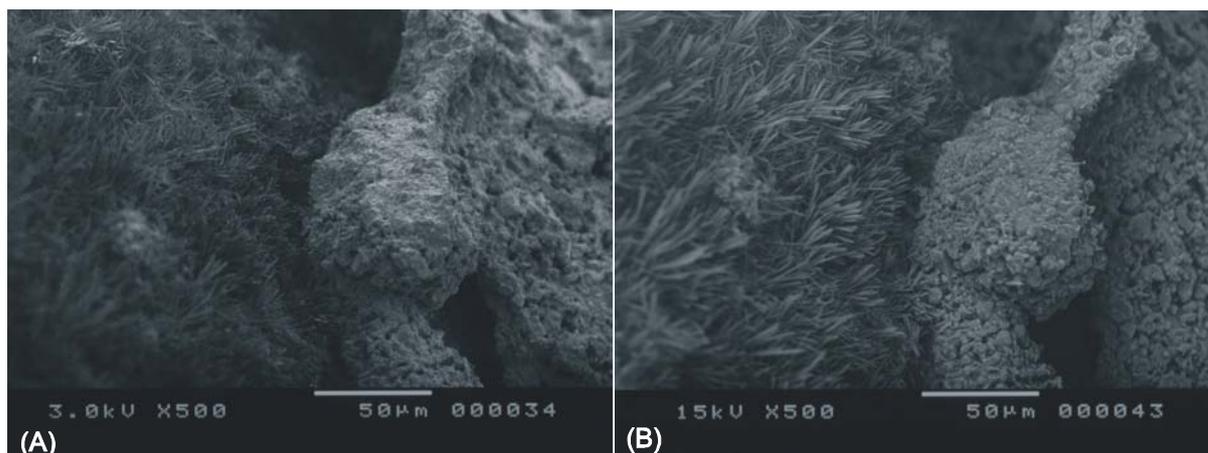


FIGURA 5-62 – Fotomicrografias da interface do tijolo/argamassa do traço 3. Imagens obtidas com elétrons secundários e retroespalhados.

A FIGURA 5-63 apresenta cristais de etringita de morfologia típica, com comprimento aproximado de 15µm e espessura de 0,6 µm e direção preferencial perpendicular à superfície do bloco cerâmico. A composição é confirmada pelo alto teor de SO<sub>3</sub> na microanálise EDS da TABELA V-44.

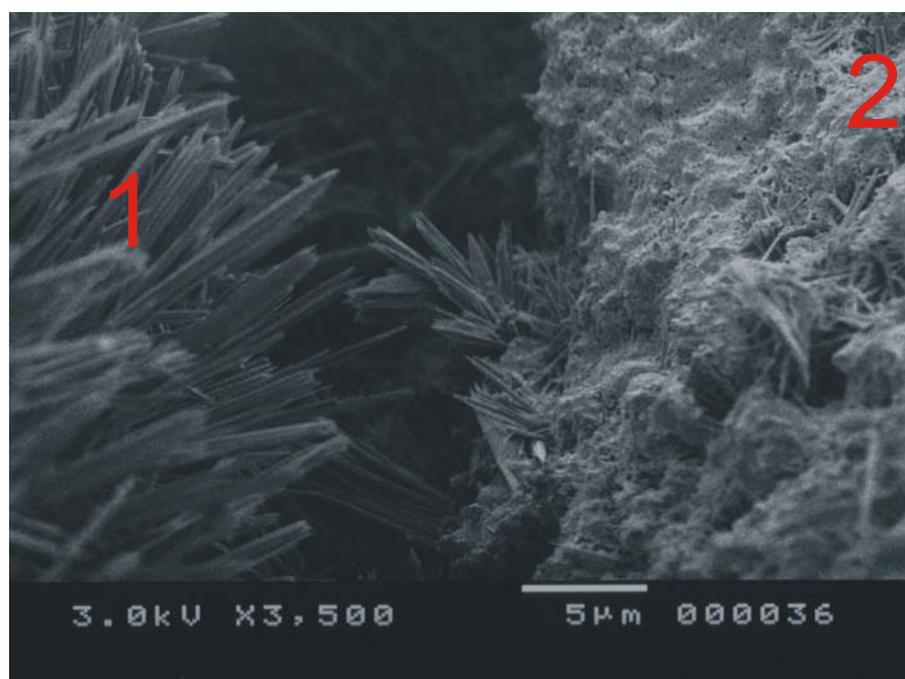


FIGURA 5-63 – Fotomicrografia da interface argamassa/tijolo do traço 3 – 1:2:8. IES.

TABELA V-44 – Microanálise EDS dos pontos 1 e 2 da FIGURA 5-63

PONTO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Σ	Interpretação
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
1	-	13,9	3,8	34,4		47,9	-	100,0	Etringita
2	1,0	11,4	26,0	14,0	0,9	44,3	2,4	100,0	Tijolo

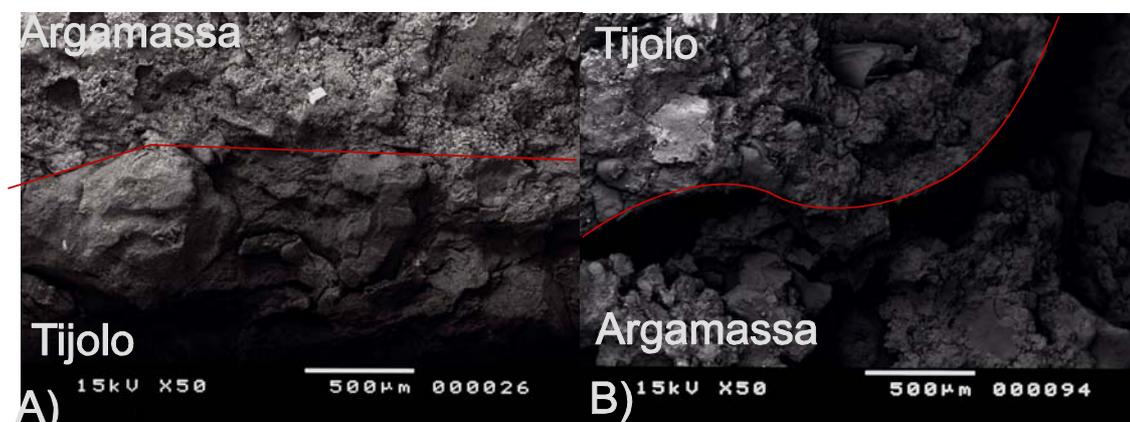


FIGURA 5-64 – Fotomicrografias da interface argamassa tijolo dos traços 4 – 1:2:10 – (A) e traço 1 – 1:0:6 – letra (B). Vista de perfil sem o destacamento da argamassa. IER.

A FIGURA 5-64 deixa nítida a maior extensão de aderência do traço 4. Esta diferença pode ser explicada pela introdução da cal no traço 4. A cal proporciona maior plasticidade, retenção de água e ar incorporado, favorecendo assim melhoria na extensão de aderência. Este fato também fica claro a olho nu, quando da preparação das amostras. Ao se destacar a argamassa do tijolo, o filme remanescente de argamassa sobre o tijolo se torna mais fino e homogêneo, à medida que o teor de cal na argamassa aumenta. Na FIGURA 5-64 fica claro também que, apesar de a olho nu a argamassa e o tijolo cerâmico serem inconfundíveis, com textura e cor totalmente diferentes, na microscopia eletrônica a diferença não é tão nítida assim, exigindo às vezes, durante a observação, microanálises EDS para se ter certeza sobre qual superfície se estava trabalhando.

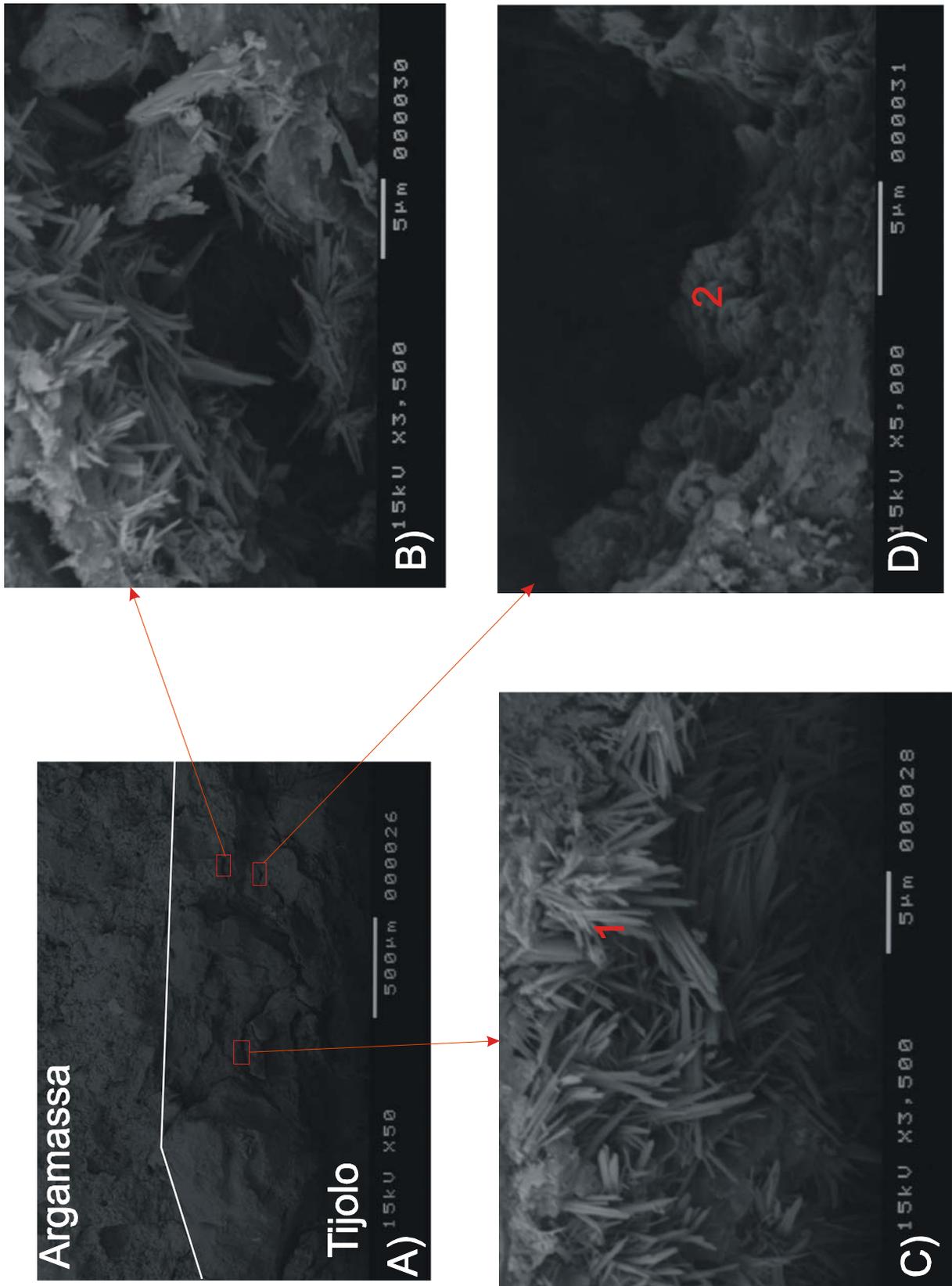


FIGURA 5-65 – Fotomicrografia da interface argamassa/tijolo do traço 4 – 1:2:10. Vista de perfil, sem o destacamento da argamassa. IER.

TABELA V-45 – Microanálise EDS dos pontos 1 e 2 da FIGURA 5-65

PONTO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Σ (%)	Interpretação
1	18,8	21,9	22,3	0,9	33,2	2,9	100,0	Etringita
2	7,9	12,4	-	-	77,5	2,2	100,0	Portlandita

A FIGURA 5-65 apresenta fotomicrografias de cristais precipitados no interior dos vazios do tijolo. A fotomicrografia 5-65B apresenta cristais de etringita formados no interior de um vazio a 250µm da superfície do substrato. Na fotomicrografia 5-65C aparecem cristais de etringitas formados no interior de vazios do tijolo a 375µm de profundidade. Finalmente, na fotomicrografia 5-65D aparece a portlandita subédrica, em um vazio do tijolo a uma profundidade de 450µm. A presença destes produtos no interior do tijolo pode ser explicada pela sucção exercida pelos capilares do substrato sob a argamassa no momento da aplicação. Esta sucção leva para o interior do tijolo os íons mais solúveis procedentes da pasta. São eles: sulfato, alumínio e cálcio. No interior dos poros estes íons reagem, precipitando e formando os cristais observados. O fato de a fase portlandita ter penetrado mais do que a etringita pode ser explicado pelo tamanho dos íons. O íon cálcio é menor que o íon sulfato, podendo desta forma penetrar mais profundamente no substrato. Isto pode explicar também porque, apesar das argamassas com cal terem maior penetração de cálcio, possuem uma resistência de aderência inferior, pois sabe-se que esta resistência de aderência está ligada à penetração da etringita, que é formada pelos íons sulfato.

Nas análises feitas, pode ser percebida uma diferença na morfologia dos cristais de etringita precipitados nos diversos traços utilizados (FIGURA 5-66). A etringita formada no traço 1 – 1:0:6, fotomicrografia 5-66A, possui a morfologia que mais se assemelha à morfologia descrita pela literatura. A etringita apresenta bastões estreitos (aproximadamente 0,3µm), relativamente longos (aproximadamente 20µm), com lados paralelos e sem ramificações. Também não foi observada a formação de feixes de agulhas. As etringitas formadas nos traços onde houve a adição de cal, ou seja, traços 2, 3 e 4, possuem uma morfologia diferenciada. Neste caso as agulhas possuem um comprimento aproximado bem menor (traço 2 = 5µm; traço 3 = 6,5µm; traço 4 = 4,5 µm). As agulhas (fitas) se agrupam em feixes formando uma espessura aproximada bem maior (traço 2 = 2µm; traço 3 = 1µm; traço 4 = 1,25 µm). Os lados também não são sempre paralelos e as agulhas terminam em pontas. Apesar das diferentes morfologias,

as microanálises EDS (TABELA V-46) apresentam resultados similares e confirmam a composição de etringitas, com altos teores de enxofre e alumínio.

As diferenças na morfologia das etringitas parece não interferir na sua importância para a aderência da argamassa ao substrato, uma vez que em nenhum caso a ruptura ocorreu na interface, ou seja, na região onde existe a preponderância de etringitas, e sim em uma região logo acima (cerca de 100 $\mu$ ).

No traço 5, não foi observada a presença de etringita. Isto se explica pelo fato do traço 5 não conter cimento, sendo que a etringita é uma fase formada pelos compostos do cimento.

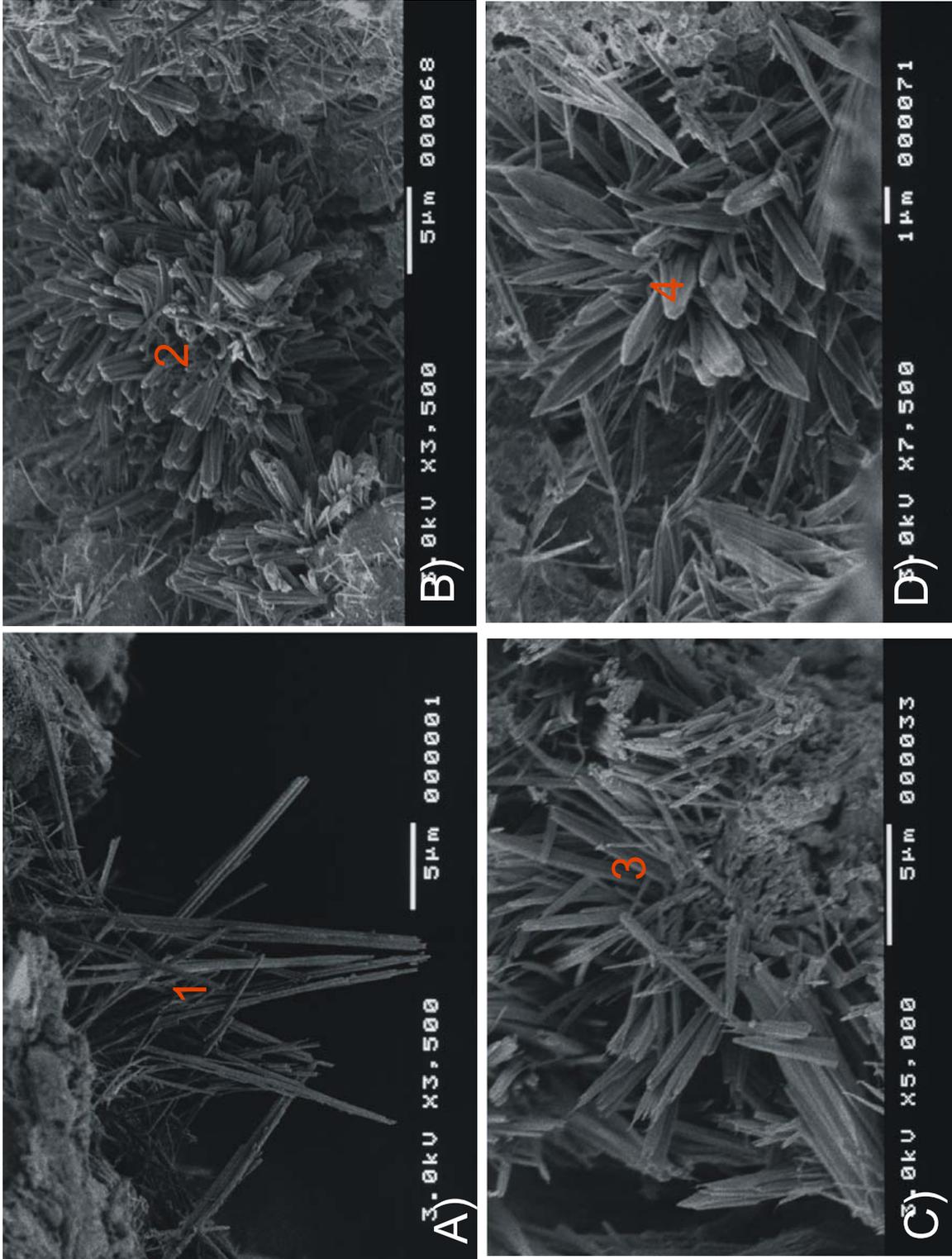


FIGURA 5-66 – Fotomicrografias dos cristais de etringita nos traços 1, 2, 3, 4. IES.

TABELA V-46 – Microanálise EDS da FIGURA 5-66

PONTO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Σ (%)	Interpretação
1	15,5	8,4	28,9	1,6	0,6	45,2	2,1	100,0	Etringita
2	9,6	32,0	16,6	-	-	37,6	2,2	100,0	Etringita
3	13,9	3,7	34,4	-	-	48,0	-	100,0	Etringita
4	13,9	15,6	25,4	-	-	43,3	1,8	100,0	Etringita

Com a finalidade de medir a espessura da camada aderida ao tijolo após o destacamento da argamassa, a amostra foi embutida em resina poliéster cristal e submetida a posterior polimento. Foram feitas fotomicrografias utilizando elétrons retroespalhados (FIGURA 5-67) e confirmadas com microanálise EDS (TABELA V-47). A espessura de camada foi medida através da escala de barra da própria figura. Os valores médios encontrados foram de 200µm. Isto confirma as afirmações de que o rompimento não ocorre propriamente na interface, e sim em uma região muito próxima a ela.

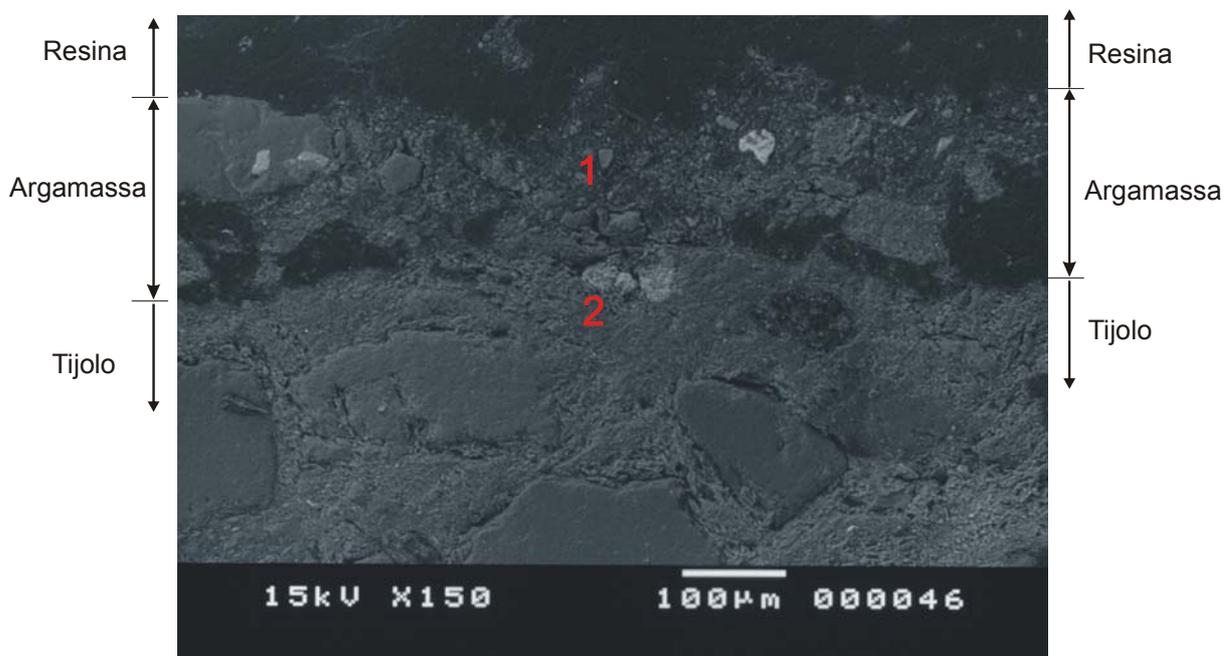
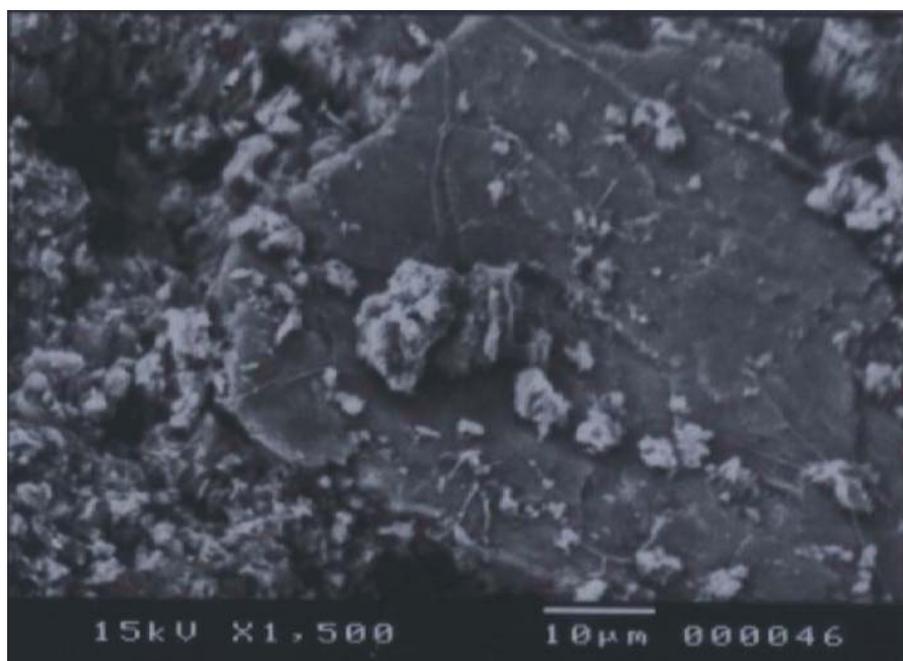


FIGURA 5-67 – Fotomicrografia da interface argamassa/tijolo do traço 4 – 1:2:10. IER.

TABELA V-47 – Microanálise EDS da FIGURA 5-67

PONTO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Σ (%)	Interpretação
1	17,3	38,3	1,9	0,00	33,0	9,5	100,0	Argamassa
2	29,2	47,5	2,1	1,8	9,0	10,2	100,0	Tijolo



**FIGURA 5-68 – Fotomicrografia da interface argamassa/tijolo do traço 5 - 0:1:6. Imagens obtidas com elétrons retroespalhados**

**TABELA V-48 – Microanálise EDS dos pontos 1 e 2 da FIGURA 68**

<b>PONTO</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> (%)	<b>SiO<sub>2</sub></b> (%)	<b>Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b> (%)	<b>K<sub>2</sub>O</b> (%)	<b>CaO</b> (%)	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> (%)	<b>∑</b> (%)	<b>Interpretação</b>
1	32,8	47,4	11,8	0,6	4,6	2,8	100,0	Tijolo cerâmico
2	11,9	22,4	-	-	63,1	2,6	100,0	Calcita ou portlandita

No caso da argamassa tipo 5 – 0:1:6, a fase responsável pela aderência é a calcita, uma vez que não existe a formação de cristais de etringita, hidróxido de cálcio e CSH. Estes constituintes são produtos de hidratação do cimento. A FIGURA 5-68 apresenta uma lamela de portlandita sobre a superfície do tijolo cerâmico.

### 5.7.2. Fluorescência de raios-X (FRX)

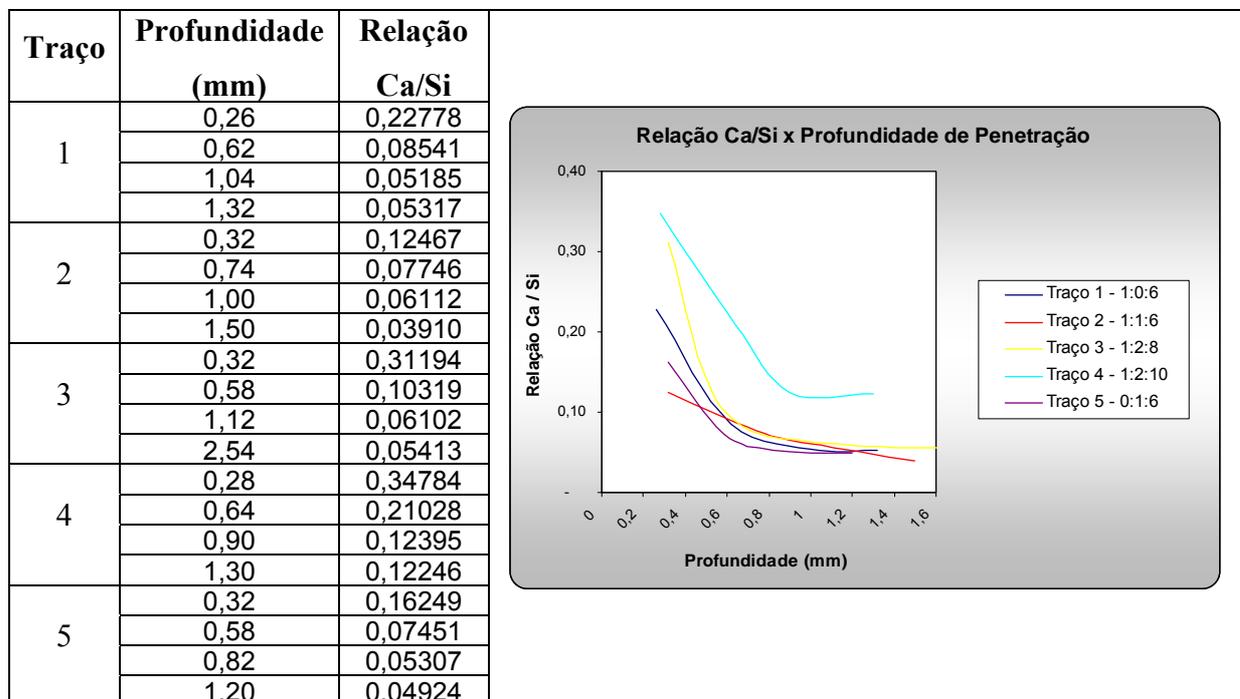


FIGURA 5-69- Relação Ca/Si versus profundidade de penetração no tijolo.

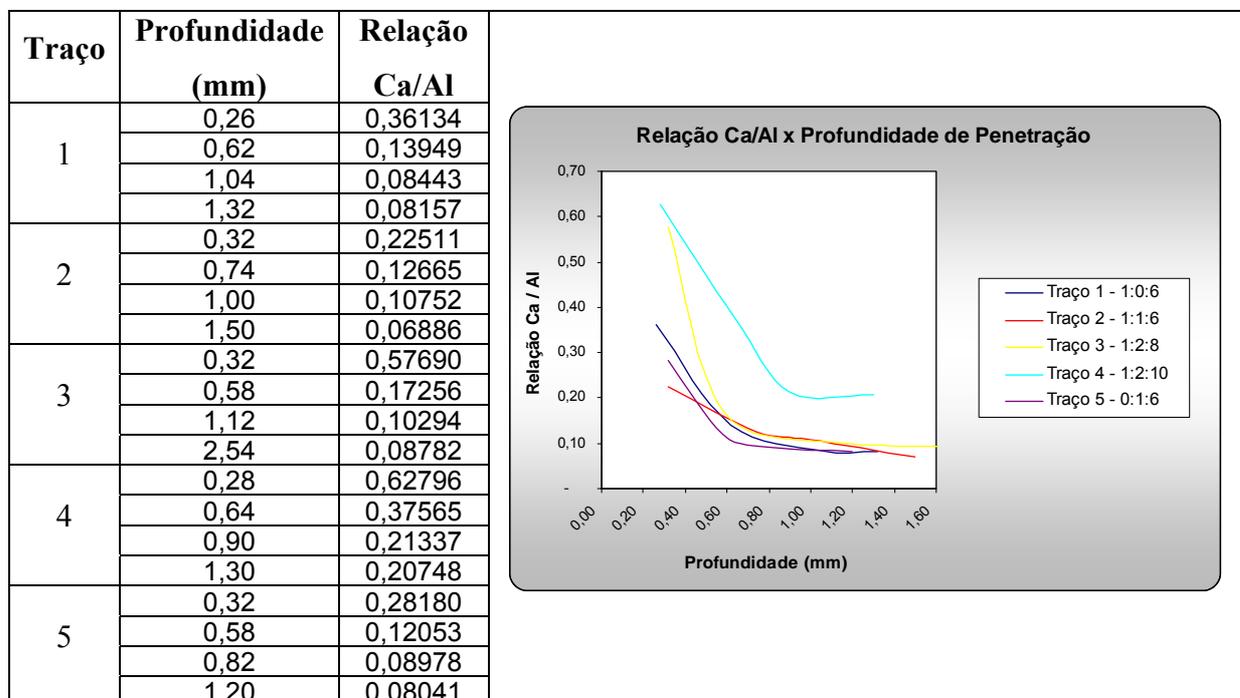


FIGURA 5-70- Relação Ca/Al versus profundidade de penetração no tijolo.

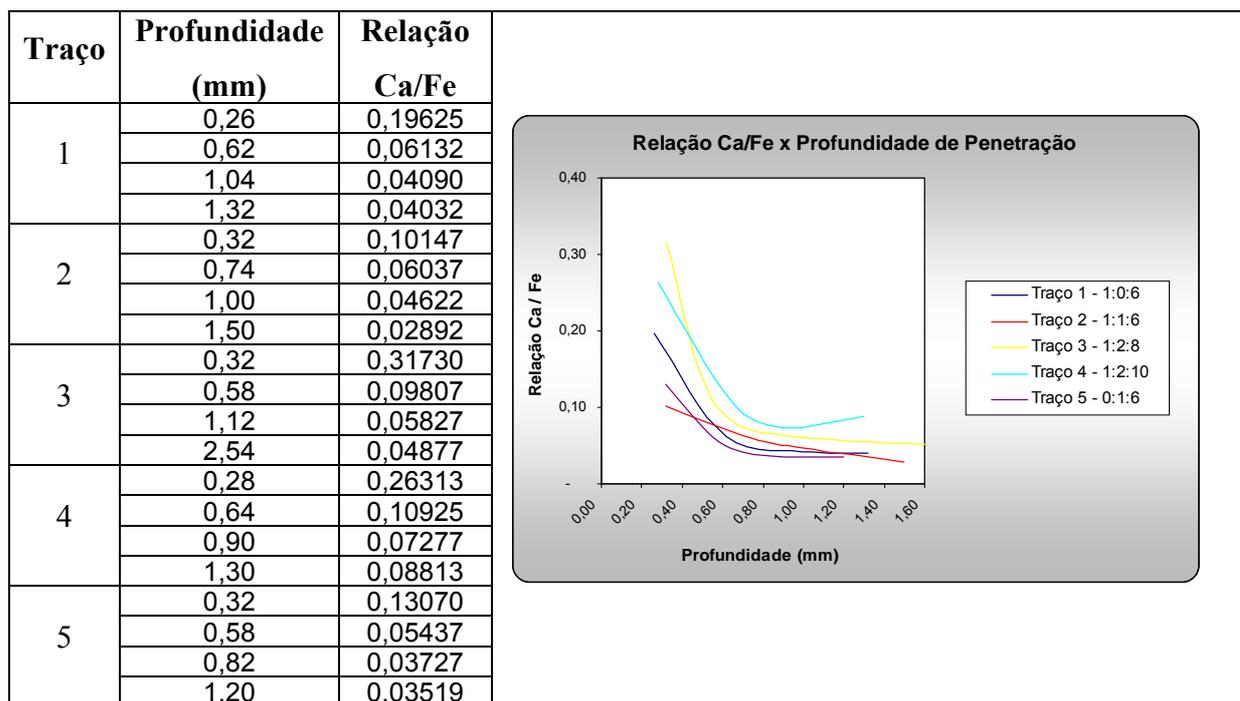


FIGURA 5-71 - Relação Ca/Fe versus profundidade de penetração no tijolo.

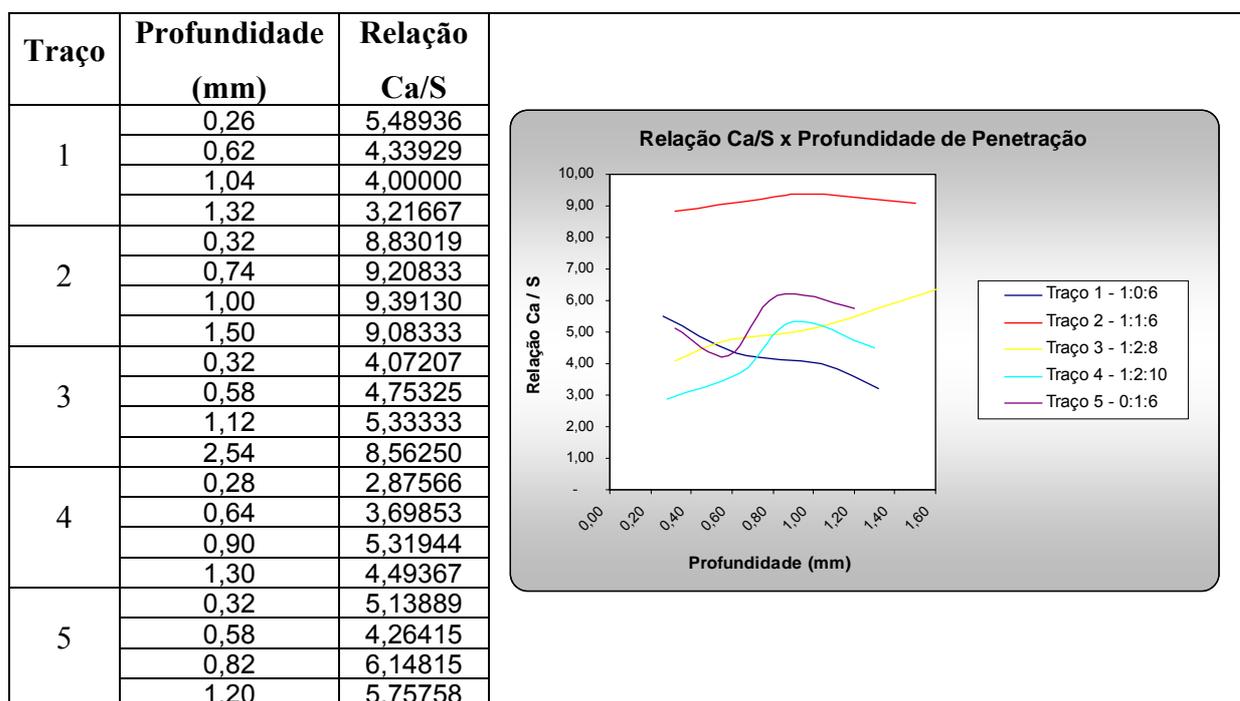


FIGURA 5-72 - Relação Ca/S versus profundidade de penetração no tijolo.

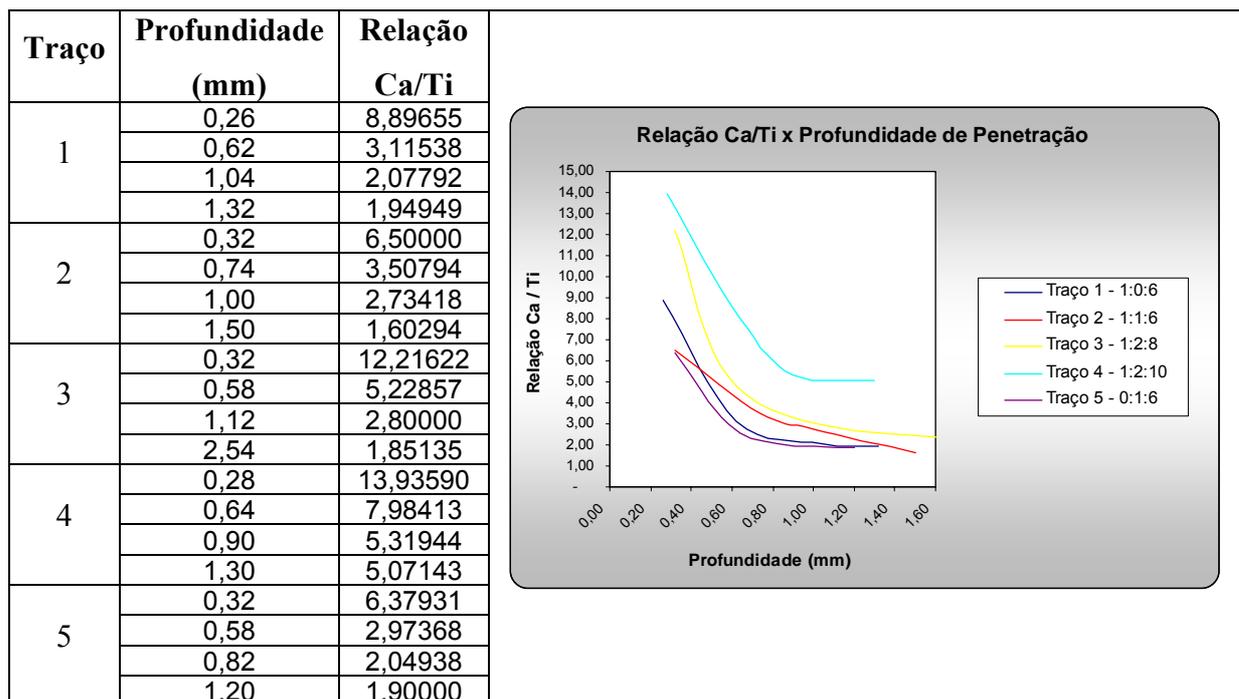


FIGURA 5-73 - Relação Ca/Ti versus profundidade de penetração no tijolo.

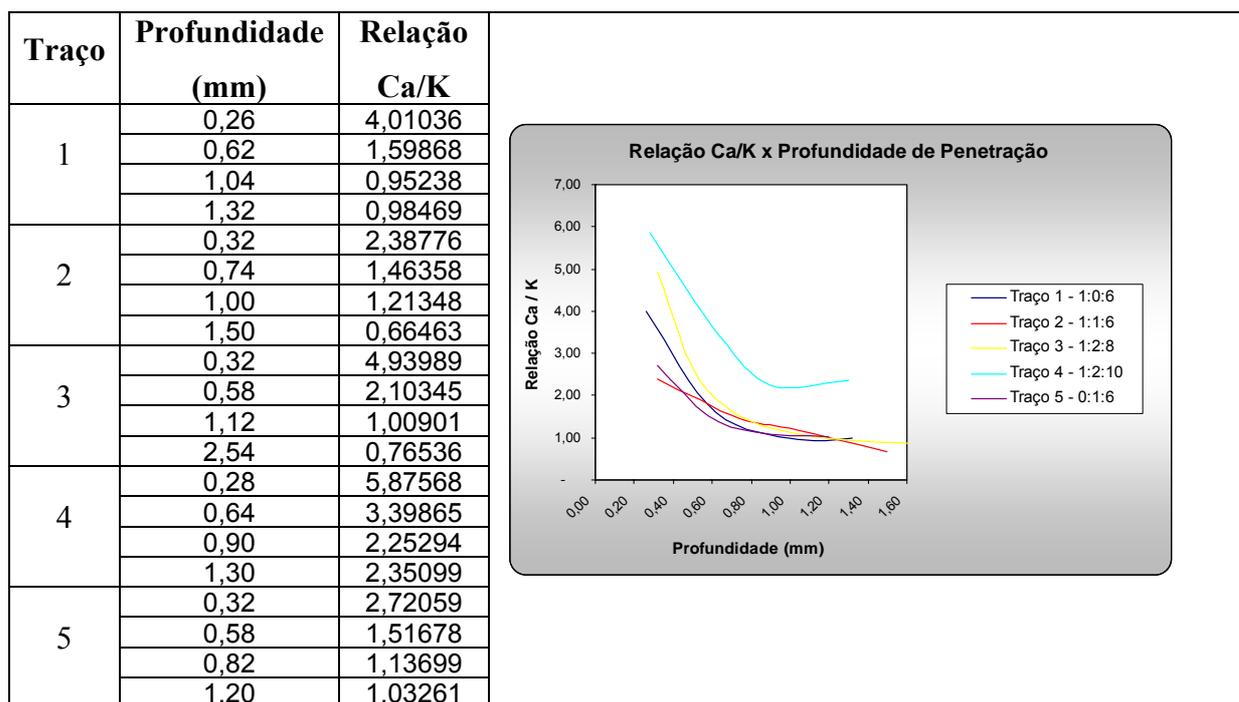


FIGURA 5-74 – Relação Ca/K versus profundidade de penetração no tijolo.

Observa-se na superfície do bloco uma região, próxima à interface, com composição química diferente. Este fato indica que houve a penetração de produtos da pasta aglomerante para o interior do bloco. Nas profundidades analisadas, os produtos que foram identificados como provenientes da penetração da pasta foram o cálcio e o enxofre.

Este fato pode ser explicado pela maior solubilidade dos íons sulfato, alumínio e cálcio, provenientes do cimento e do hidróxido de cálcio proveniente da cal. A sucção do substrato carrega estes íons para o interior dos poros, onde vão se precipitar na forma de hidratos ocupando os vazios superficiais.

O traço 4 obteve as maiores penetrações de Ca, seguido do traço 3 e do traço 1. Este resultado pode ter sido causado pela maior quantidade de cal nos traços 3 e 4. A cal, além de conferir maior plasticidade e melhorar a extensão de contato entre a argamassa e o tijolo cerâmico, também é portadora de grande quantidade de Ca em sua composição. Entretanto, este fato não explica as maiores penetrações também de Al, Fe, Ti e K. Desta forma, parece mesmo ser a maior plasticidade a responsável pela maior penetração dos produtos de hidratação dos aglomerantes no interior dos poros do substrato.

O fato de o traço 2 ter apresentado comportamento destoante ao comportamento dos demais traços pode indicar que houve falha na extração da amostra.

A quantidade do Ca, Al, Fe, Ti e K nos poros do tijolo decai à medida em que a profundidade aumenta, entretanto, a partir de uma certa profundidade, que varia de 0,6mm a 0,8 mm, a taxa de redução se torna bem menor, parecendo tender para uma reta paralela ao eixo X.

A relação Ca/Si se apresenta como boa referência da penetração do cálcio, uma vez que o Si está presente na argamassa na areia ( $\text{SiO}_2$ ) e esta apresenta dimensões grandes demais para penetrar nos poros do tijolo, levando a crer que o Si identificado refere-se somente ao existente no tijolo cerâmico.

Diferentemente das outras, a relação Ca/S apresentou uma tendência ascendente. Isto pode ser explicado pela maior mobilidade do íon cálcio e sua maior facilidade de penetração e/ou maior presença deste elemento nos produtos de hidratação da argamassa, pois o cálcio, além de estar presente na etringita junto com o enxofre, também está presente na calcita e na portlandita.

Ao se comparar a quantidade e profundidade de penetração dos produtos de hidratação da argamassa com a resistência de aderência, parece não haver correlação direta entre eles, uma vez que os traços com maior penetração possuem resistências de aderência inferiores ao do traço 1. Esta incoerência pode ser causada pelo grande impacto da cal na resistência mecânica

da argamassa. Outros ensaios comparando a resistência de aderência, para um mesmo traço com diversas plasticidades podem vir a esclarecer este ponto.

O traço 5, sem cimento, apresentou os menores valores de penetração de produtos de hidratação no tijolo.

## 5.8. Combinação dos resultados

**TABELA V-49 – Análise dos resultados obtidos pelas argamassas**

<b>Tipo de argamassa</b>	<b>ICP (mm)</b>	<b>RA (%)</b>	<b>ME (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>TAI (%)</b>	<b>RC (MPa)</b>	<b>MED (Gpa)</b>	<b>RT (MPa)</b>	<b>PA (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ARR (MPa)</b>
Tipo 1 – 1:0:6	270	85,84	2,08	18	11,75	13,66	1,36	3,0	0,84
Tipo 2 – 1:1:6	270	86,62	1,98	20	11,25	14,39	1,48	4,5	0,63
Tipo 3 – 1:2:8	260	92,02	2,00	20	5,75	11,94	1,12	5,0	0,54
Tipo 4 – 1:2:10	280	94,82	2,05	20	7,25	9,48	0,71	10,0	0,51
Tipo 5 – 0:1:6	270	83,40	1,95	21	-	2,89	-	-	-

Legenda:

ICP – Índice de consistência padrão  
 RA – Retenção de água  
 ME – Massa específica  
 TAI – Teor de ar incorporado  
 RC – Resistência à compressão  
 MED – Módulo de elasticidade dinâmico  
 RT – Resistência à tração  
 PA – Permeabilidade à água  
 ARR – Ensaio arrancamento

De uma forma geral, os resultados dos ensaios de caracterização da argamassa no estado fresco e endurecido, confirmam os resultados esperados, ou seja, para argamassas com consistências similares, as propriedades no estado fresco melhoram ao se aumentar o percentual de cal (retenção de água, teor de ar incorporado) e as propriedades no estado endurecido melhoram ao se aumentar o percentual de cimento (resistência à compressão, resistência à tração, resistência de aderência, permeabilidade). A exceção cabe ao módulo de elasticidade dinâmico que, de acordo com a literatura, quanto maior o percentual de cal, maior a capacidade da argamassa de absorver esforços, entretanto, os resultados obtidos neste trabalho foram inconclusivos.

Cabe ressaltar que tanto o desempenho no estado fresco, quanto no estado endurecido são importantes para o desempenho dos revestimentos, uma vez que as propriedades no estado

fresco facilitam a aplicação e proporcionam melhor adensamento, o que contribui também para um melhor desempenho no estado endurecido. Desta forma, a argamassa ideal deve possuir as qualidades proporcionadas pela introdução da cal e as proporcionadas pelo aglomerante cimento.

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados dos estudos microestruturais demonstraram indícios de que a principal fase responsável pela resistência de aderência entre a argamassa e o bloco cerâmico é a etringita. Esta aderência se dá pelo intertravamento dos cristais e pela penetração dos mesmos no interior dos poros do substrato. Foram visualizados cristais de etringita formados no interior dos poros do substrato a uma profundidade de até 500 $\mu$ m. Esta penetração foi confirmada através da observação das variações nas concentrações de elementos químicos, em função da profundidade, utilizando-se a técnica de FRX.

Não se observou nenhuma relação direta entre a profundidade de penetração do cálcio e a resistência de aderência. A profundidade e quantidade de penetração de cálcio parece estar relacionada à quantidade de aglomerantes, ou seja, cimento e/ou cal. Talvez possa existir correlação entre a profundidade de penetração do enxofre e a resistência de aderência, uma vez que o enxofre é um dos componentes da etringita.

Foram verificadas diferentes morfologias dos produtos de hidratação dos aglomerantes. Os cristais observados na interface são mais bem formados (euédricos) e maiores do que no restante da matriz e possuem uma orientação preferencial perpendicular à superfície do bloco. Nesta região a presença de etringita é preponderante e, em menores concentrações, o CSH (silicato de cálcio hidratado) e a calcita. Este fato se deve à maior mobilidade dos íons sulfato, alumínio e cálcio durante a hidratação do cimento e à proximidade ao substrato poroso, que proporciona a sucção do fluido contendo estes íons para o seu interior.

Observaram-se também diferentes morfologias para os cristais de etringita nos diversos traços utilizados, causada provavelmente pela variação do teor de cal e de aglomerante na argamassa. Esta diferença entre a morfologia dos cristais de etringita parece não interferir nos resultados de aderência entre a argamassa e o substrato, tendo em vista que em nenhum caso a ruptura ocorreu na interface, ou seja, na região onde existe a preponderância de etringita. A etringita do traço sem a adição de cal é a que mais se assemelha à descrição da literatura, ou seja, bastões estreitos (aproximadamente 0,3 $\mu$ m), relativamente longos (aproximadamente 20 $\mu$ m), com lados paralelos e sem ramificações. Já os cristais de etringitas formados nas argamassas com a adição de cal, apresentaram comprimento bem inferior (entre 4,5 $\mu$ m e

6,5 $\mu\text{m}$ ) e espessura bem maior (entre 1 $\mu\text{m}$  e 2 $\mu\text{m}$ ), com agrupamento de agulhas formando feixes. Os lados não são paralelos e as agulhas terminam pontiagudas. Esta diferença morfológica pode contribuir para diminuição de resistência mecânica da argamassa, uma vez que cristais mais longos e mais estreitos proporcionam melhor intertravamento com os outros produtos de hidratação da argamassa. A variação da cal também influenciou na extensão de aderência e no adensamento da argamassa, afetando desta maneira os valores de resistência e a forma de ruptura. Nos ensaios de arrancamento foi observado que após a ruptura da argamassa, uma fina camada permanece aderida ao tijolo, visível a olho nu, denotando que a ruptura ocorreu pela falta de coesão da argamassa próxima à interface, afastada cerca de 200  $\mu\text{m}$ . Este comportamento deixa a entender que o rompimento não ocorreu na faixa rica em etringitas, e sim no interior da camada de argamassa, bem próxima a superfície de contato.

Com relação à resistência de aderência, observou-se uma piora nos resultados na medida em que se aumentava o percentual de cal na argamassa. Já a permeabilidade à água “*in situ*” apresentou menores resultados nos traços com maior conteúdo de cimento.

Os resultados desta pesquisa estão de acordo com as bibliografias consultadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDEREGG, F.O. **The effect of absorption characteristics upon mortar properties.** *American Society for Testing Materials*, Proceeding, 1942. v.42, p.821-836 apud CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos; avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação.** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1996. 285p. (Tese, Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland.** 7. ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106)

AGUILAR, M. T. P., CORRÊA, E. C. S., CARVALHO JR., A. N., CETLIN, P. R. **Estudo do desempenho de argamassas de revestimento fabricadas com sílica ativa e escória.** In: CONGRESSO ANUAL DA ABM – INTERNACIONAL, 57, 2002, São Paulo. Anais... São Paulo: ABM, 2002. p186-194.

AGUILAR, M. T. P., CORRÊA, E. C. S., CETLIN, P. R. **Análise da capacidade de deformação do concreto: Módulo de Young x Módulo de Deformação.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46, 2004, São Paulo. Anais em CD... São Paulo: IBRACON, 2004.

ANDRADE, M. S. A, GAMBALE, E.A., SANTOS, S. B., **Modelos de predição do módulo de elasticidade do concreto.** CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48°, 2006, Anais, Rio de Janeiro. IBRACOM, 2006.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Michigan. ACI 318-02 e ACI 318R-02. **Building Code Requirements for Structural Concrete and Comentary.** ISBN 0-087031-065-8. 2002. 443p.

AMPTEK INC. *X-Ray Fluorescence (XRF)*. Em <<http://www.amptek.com/xrf.pdf>>. Acesso em 12 de janeiro de 2005. apud CARVALHO JR., A. N., **Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência**

**mecânico**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2005. 331p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

BASTOS, P.K.X. **Módulo de deformação de argamassas – conceito e métodos de determinação**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI, 2007, Recife. Anais. Recife:ANTAC, 2007.

BAUER, L.A. F., **Materiais de Construção**. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1994. Vol 1. 435p.

BOMBLÉD, J.P.; KALVENES, O. **Comportment rhéologique des pâtes, mortires et bétons; mesure, evolution, influence de certains parameters**. Revue des Materiaux de Construction et de Travaux Publics, Paris, (617): 39-52, fev.1967 apud SABBATINI, F.H. **Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistentes – ET-91**. São Paulo: ABCP, 1998. 44p.

BOYNTON, R.S., **Chemistry and Technology of Lime and Limestone**. 2 ed. New York : Wiley – Interscience Publication, 1980. 578p.

BOYNTON, R.S.; GUTSCHICK, K. **Efflorescence of masonry**, National Lime Association, Washington, 1966, USA apud GUIMARÃES, J.E.P. **A Cal; Fundamentos e Aplicações na Construção Civil**. 2.ed. São Paulo: Editora Pini, 2002. 341p.

BRANDÃO, P. R. G. **Notas de aula da disciplina Métodos de Instrumentação e Análise**. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas – CPGEM. EE.UFMG, 2001.

CALISTER, W.D., JR **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. Rio de Janeiro: Editora LTC , 2002.

CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos; avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1996. 285p. (Tese, Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana).

CARASEK, H. **Fatores que exercem influência na resistência de aderência de argamassas.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, II, 1997, Anais... Salvador: CETA/ANTAC, 1997. p133-146.

CARASEK, H., CASCUDO, O., CINCOTTO, M. A., DJANIKIAN, J. G. **Microestrutura da interface argamassa/tijolo cerâmico.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, II, 1997, Anais... Salvador: CETA/ANTAC, 1997. p469-483.

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: PECC/ANTAC, 2001. p.43-67.

CARDOSO, F.A.; PELEGGI, R.G., JOHN, V.M. **Caracterização reológica pelo método squeeze flow** In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas, Florianópolis, 2005. Anais, Florianópolis: UFSC/ANTAC, 2005, P. 121-143

CARVALHO JR., A. N.; SILVA, A.P.; FRANÇA, E.P. **Estudo coMParativo entre argamassas de cimento e argamassas mistas de cimento e cal para uso em emboço.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, I, 1995, Brasília. Anais. Goiania: UFG/ANTAC, 1995. P.261-270.

CARVALHO JR. JR., A. N. **Técnicas de Revestimento;** Apostila do Curso de Especialização em Construção Civil. 1.ed. Belo Horizonte: DEMC- EE.UFMG, 1999. 54p.

CARVALHO JR., A. N., **Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2005. 331p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

CENTURIONE, S.L., KIHARA, Y. **O cimento Portland,** Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON, Cap. 10, p.295-322, V. 1, ed. Geraldo C. Isaia, São Paulo. 2005

CEOTTO, L.H., BANDUK, R.C., NAKAKURA, E.H. **Revestimentos de Argamassas: Boas práticas em projetos, Execução e Avaliação**. Vol.1. Porto Alegre: ANTAC, 2005. 96p.

CHASE. G.W. **Investigation of interface between brick and mortar**. TMS Journal, v.3, n.2, p.T1-T9, july-dec. 1984 apud CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos; avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1996. 285p. (Tese, Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana).

CINCOTTO, M. A. **Patologias das argamassas de revestimentos: análise e recomendações**. In: VÁRIOS. Tecnologia das Edificações (Publicação IPT 1801). 2.ed. São Paulo: Editora Pini, 1989. p549-554.

CINCOTTO, M. A., SILVA, M. A. C., CARASEK, H. **Argamassas de revestimento; Características, propriedades e métodos de ensaio** (BT 68). 1.ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. 118p.

CINCOTTO, M.A.; QUARCIONI, V.A.; JOHN, V.M. **Cal na construção civil**, Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais, IBRACON, Cap. 22.1, p.695-725, V.1, ed. ed. Geraldo C. Isaias, São Paulo. 2007

DAVISON, J.I. **Masonry mortar**. Ottawa, National Research Council of Canadá, 1974. (Canadian Building Digest – 163) apud SABBATINI, F.H. **Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistentes – ET-91**. São Paulo: ABCP, 1998. 44p.

DAVISON J.I. **Curing of cement, Lime Mortars**, ASTM Special Technical Publication, n.472, 1969, Philadelphia, USA apud GUIMARÃES, J.E.P. **A Cal; Fundamentos e Aplicações na Construção Civil**. 2.ed. São Paulo: Editora Pini, 2002. 341p.

DAVISON, J.I. **Loss of moisture from fresh mortars to brick**. Materials, Research of Standards, Philadelphia, v.1, n.5, p. 385-388, May 1961 apud CINCOTTO, M. A., SILVA, M. A. C., CARASEK, H. **Argamassas de revestimento; Características, propriedades e métodos de ensaio** (BT 68). 1.ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. 118p.

DIAMOND, S. **The microstructure of cement paste in concrete.** In: International congress on the Chemistry of Cement, 8<sup>th</sup>, Proceedings. Rio de Janeiro, sept. 22-27, 1986. v1, p.122-147 apud CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos; avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação.** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1996. 285p. (Tese, Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana).

DUPIN, I.; DETRICHÉ, C.H.; MASO, J.C. **Accrochage direct d'un enduit sur un isolant par une liaison de type mécanique dans le cadre d'un procédé d'isolation par l'extérieur.** Matériaux et Constructions. V21, p.370-378, 1988 apud CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos; avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação.** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1996. 285p. (Tese, Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana).

ECKART, A., PALZER, S., HÄUBLER, F. **Nondestructive microstructural investigation on hydrating cement paste and tricalcium silicate by small angle neutron scattering,** 1999.

FARIAS, M.M.. **Agregados para a construção Civil,** Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais, IBRACON, Cap. 16, p.483-523, V.1, ed. ed. Geraldo C. Isaias, São Paulo. 2007

FIGUEIREDO, A.D, SILVA, A.C.M.A., MONTE, R. **Avaliação da influência do teor de ar no módulo de elasticidade de argamassas.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI, 2007, Recife. Anais. Recife:ANTAC, 2007.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos; estudos e procedimentos de execução.** 1.ed. São Paulo: Editora Pini, 1994. 221p.

FRANÇA, J.L. , VASCONCELLOS, A.C. **Manual para normalização de publicações técnico-científicas.** 7.ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2004. 242p.

FREITAS, J.M.C. **Influência da variação dos constituintes no desempenho da argamassa de revestimentos**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2007. 168p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil).

GALLEGOS, H. **Adhesion entre el mortero y las unidades de albañilería**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, I, 1995, Goiânia. Anais... Goiânia: UFG/ANTAC, 1995. p117-133.

GOMES, M.A., **Caracterização de argamassas tradicionais utilizadas nos revestimentos exteriores dos edifícios**. Lisboa: Universidade técnica de Lisboa - Instituto Técnico Superior, 1995. 269p.

GROOT, C. J. W. P. **The Characteristics of Brick and Mortar Considering Mortar/Brick Bond**. In: INTERNATIONAL BRICK/BLOCK MASONRY CONFERENCE, 11th, 1997, Shanghai. Proceedings ...Shanghai: Tongji University, 1997. p50-58. apud CARVALHO JR., A. N., **Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2005. 331p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

GUIMARÃES, J.E.P. **A Cal; Fundamentos e Aplicações na Construção Civil**. 2.ed. São Paulo: Editora Pini, 2002. 341p.

GUIMARÃES, J.E.P., GOMES, R.D., SEABRA, M.A. **Guia das argamassas nas construções: Construindo para sempre com cal hidratada**. 3.ed. São Paulo: Associação Brasileira dos Produtores de Cal, 2004. 40p.

HAN, K.M.; KISHITANI, K. **A study on the bond strength of brick masonry mortars**. Journal of the faculty of engineering. The University of Tokyo, v.37, n.4, p.757-798, Sept. 1984 apud CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos; avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1996. 285p. (Tese, Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana).

Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT. **Durabilidade dos concretos de cimento Portland**. São Paulo, 1993. 38p.

ISBERNER, A. W. **Properties of masonry cement mortars**. In: Designing engineering and constructing with masonry products. Houston, Gulf, 1969. p42-50 apud SABBATINI, F. H. **Argamassas de Assentamento para Paredes de Alvenaria Resistente**; Estudo Técnico ET-91. 2.ed.São Paulo: ABCP, 1998. 44p.

ISBERNER, A. W. **Masonry mortars – A progress report**. Skokie, Portland Cement Association, 1964. (report PCA.R&D.Ser.1086) apud CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos; avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1996. 285p. (Tese, Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana).

JOHN, V.M., BARROS, M.S.B., KUDO, E.K., MONTE, R. **Modulo de elasticidade dinâmico: CoMParação entre velocidade da onda ultrasônica e frequência ressonante**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI, 2007, Recife. Anais. Recife:ANTAC, 2007.

KAMPF, L. **Factors affecting Bond of Mortar to Brick**. **Symposium on Masonry Testing**, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM STP 1063, p217-234. apud TAHA, M. M. R., SHRIVE, N. G. The use of pozzolans to improve bond and bond strength. CARVALHO JR., A. N., **Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2005. 331p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

KIHARA, Y., CENTURIONE, S.L.. **O Cimento Portland**., Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON, Cap. 10, p.295 – 322, V. 1, ed. Geraldo C. Isaia, São Paulo. 2005

LAWRENCE, S. J., CAO, H. T. **An Experimental Study of the Interface between Brick and Mortar**. In: AMERICAN MASONRY CONFERENCE, 4th, 1987, Los Angeles. Proceedings ...Los Angeles, 1987. p48/1-48/14. apud CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos; avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1996. 285p. (Tese, Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana).

McGINLEY, W. M. **IRA and The flexural Bond Strength of Clay Brick Masonry, Masonry: Components to assemblages**, Matthys, J. H., Ed., AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM STP 1063, p217-234. apud CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos; avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1996. 285p. (Tese, Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana).

MEHTA & MONTEIRO, P. K., MONTEIRO, P. J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: Editora Pini, 1994.

METHA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 3 ed. USA: McGraw-Hill CoMPanies, Inc., 2006. 659p.

MINDELESS,S., YOUNG, J.F., DARWIN, D. **Concrete**. 2.ed. USA: Person Education Inc. 2003. 644p.

MOLIN, D.C.C.D. **Técnicas experimentais para estudo da microestrutura**, Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais, IBRACON, Cap. 14, p.403-436, V.1, ed. ed. Geraldo C. Isaias, São Paulo. 2007

NETO, C.S. **Agregados para concreto**, Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON, Cap. 11, p.323 – 343, V. 1, ed. Geraldo C. Isaias, São Paulo. 2005

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução Salvador E. Giammusso, 2.ed. São Paulo: Editora Pini, 1997.

OPPERMANN, B., RUDERT, V. **Untersuchungen zur verbesserung des haftverbundes mörstel/stein. Zement-Kalk-Gips**, n.1, 1983 apud CARASEK et al. **Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa**. apud SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, IV, 2001, Brasília. Anais... Brasília: PECC/ANTAC, 2001. p43-67.

PAREEK, S.N.; OHAMA, Y.; DEMURA, K. **Evaluation method for adhesion test results of bonded mortars to concrete substrates by square optimization method**. ACI Materials Journal. V92, n.4, p.355-360, july-aug. 1995. apud CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos; avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1996. 285p. (Tese, Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana).

PAULON, V.A.. **A microestrutura do concreto convencional**, Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON, Cap. 19, p.583 - 604, V. 1, ed. Geraldo C. Isaia, São Paulo. 2005

PETRUCCI, E.G.R. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro; Globo, 1973. 435p.

REIS, R.J.P. **Influência de areias artificiais de rochas britadas na estrutura e nas propriedades de concretos de cimento portland**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2004. 181p. (Dissertação de mestrado)

RIBAS S.M. Técnicas de observação e análise. Brasília: UNB, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, 1996, 22p. (notas de aula) apud SILVA, A.R., **Desenvolvimento e aplicação de uma metodologia para caracterização e análise estrutural de concretos de cimento Portland**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 1998. 410p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

ROSELLO, M.T.V. **Morteros de cemento para albañileria**. Madrid. I.E.T. 1976. apud SELMO, S.M.S Dosagem de argamassas de cimento portland e cal para revestimento externo de fachada de edificios. São Paulo, 1989. (dissertação de Mestrado apresentado à EPUSP/DECC) apud CINCOTTO, M. A., SILVA, M. A. C., CARASEK, H. **Argamassas de**

**revestimento; Características, propriedades e métodos de ensaio (BT 68).** 1.ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. 118p.

SABBATINI, F.H. **Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistentes – ET-91.** São Paulo: ABCP, 1998. 44p.

SELMO, S.M.S., **Revestimentos de argamassas de paredes e tetos de edifícios – projetos, execução e manutenção.** São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, 1996. 57p.

SILVA, A.R., **Desenvolvimento e aplicação de uma metodologia para caracterização e análise estrutural de concretos de cimento Portland.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 1998. 410p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas)

SILVA, V., LIBÓRIO, J.B.L. **Avaliação do Efeito da Sílica Extraída da Casca de Arroz na Aderência de Argamassas e Chapiscos.** SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, V, 2003, São Paulo. Anais... São Paulo: PECC/ANTAC, 2003. p385-399.

STARK, J., MÖSER, B., ECKART, F.A. **Neue ansätze zur zementhydratation, Teil 1.** Finger – Institut für Baustoffkunde, Bauhaus Universität Weimar, Weimar/Deutschland, 2001.

STARK, J., MÖSER, B., ECKART, F.A. **Neue ansätze zur zementhydratation, Teil 2.** Finger – Institut für Baustoffkunde, Bauhaus Universität Weimar, Weimar/Deutschland, 2001.

SUGO, H. O. **Strength and Microstructural Characteristics of Brick/Mortar Bond.** Newcastle: University of Newcastle, 2001. (Tese, Doutorado no Department of Civil, Surveing and Environmental Engineering). apud CARVALHO JR., A. N., **Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2005. 331p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

SUGO, H. O., PAGE, A. W., LAWRENCE, S. J. **Characterization of Bond Strengths of Mortars with Clay Masonry Units.** In: INTERNATIONAL BRICK/BLOCK MASONRY CONFERENCE, 11th, 1997, Shanghai. Proceedings ...Shanghai: Tongji University, 1997. p59-68. apud CARVALHO JR., A. N., **Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2005. 331p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

SUGO, H. O., PAGE, A. W., LAWRENCE, S.J. **The development of mortar/unit bond.** In: CANADIAN MASONRY SYMPOSIUM, 9th, Fredericton. Department of Civil Engineering – University of New Brunswick, 2001. apud CARVALHO JR., A. N., **Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2005. 331p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

TAHA, M. M. R., EL-DIEB, A. S., SHRIVE, N. G. **Sorptivity: A Reliable Measurement for Surface Absorption of Masonry Brick Units,** In Press, Materials and Structures, RILEM, 2001, France. apud CARVALHO JR., A. N., **Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2005. 331p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

TAHA, M. M. R., SHRIVE, N. G. **The use of pozzolans to improve bond and bond strength.** In: CANADIAN MASONRY SYMPOSIUM, 9th, Fredericton. Department of Civil Engineering – University of New Brunswick, 2001.apud CARVALHO JR., A. N., **Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2005. 331p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

TAMIN, P.F. **Étude du comportement mécanique des revêtements de façades-enduits.** Paris, 1986. 138p. Tese (Docteur-ingenieur em Sciences et Techniques du Batiment) – École Nationale des Ponts et Chaussées apud BASTOS, P.K.X. **Módulo de deformação de**

**argamassas – conceito e métodos de determinação.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI, 2007, Recife. Anais. Recife:ANTAC, 2007.

VOSS, W.C. **Permeability of brick masonry walls: an hypothesis.** American Aociety for testing Materials, Proceendigs, Philadelphia, 1933, v33, part 2, p.670-691 apud CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos; avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação.** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1996. 285p. (Tese, Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana).

WALKER, R. **Hydrated lime, an irreplaceable mortar plasticizer** – Anais do 7º Congresso Internacional de Cal , ILA, 1990, Roma, Itália apud GUIMARÃES, J.E.P. **A Cal; Fundamentos e Aplicações na Construção Civil.** 2.ed. São Paulo: Editora Pini, 2002. 341p.

ZAMPIERI, V. A. **Cimento Portland aditivado com pozolanas de argilas calcinadas: fabricação, hidratação e desempenho mecânico.** São Paulo: USP, 1993. 233p. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1993. apud CENTURIONE,S.L., KIHARA, Y. **O cimento Portland, Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações,** IBRACON, Cap. 10, p.295-322, V. 1, ed. Geraldo C. Isaia, São Paulo. 2005

## ANEXO I - Planilhas dos testes de resistência de aderência à tração

### Resistência de aderência à tração segundo NBR 13528 (1996)

Amostra: 1:0:6  
 Data de arrancamento: 29/03/2007 Idade da argamassa: 66 dias

#### 1 ° Série

Carga (N)	750	1250	1500	2000	1750	1750
Diametro (mm)	44,9	44,8	44,5	45,3	45	45,1
area (mm <sup>2</sup> )	1583,37	1576,33	1555,29	1611,71	1590,44	1597,51
Mpa	0,47	0,79	0,96	1,24	1,10	1,10

Ruptura na interface argamassa / Substrato	40,00%	95,00%	95,00%	100,00%	10,00%	20,00%
Ruptura da argamassa de revestimento	10,00%	5,00%	5,00%			
Ruptura do substrato	50,00%				90,00%	80,00%
Observações				Conincidente com junta de assentamento		

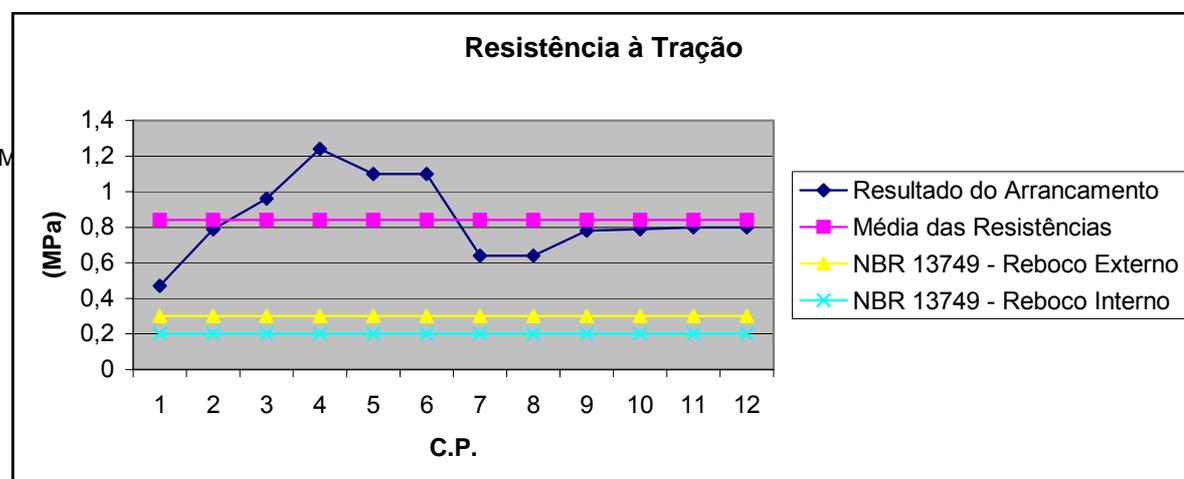
Data de arrancamento: 03/04/2007 Idade da argamassa: 72 dias

#### 2 ° Série

Carga (N)	1000	1000	1250	1250	1250	1250
Diametro (mm)	44,6	44,7	45,2	44,9	44,6	44,6
area (mm <sup>2</sup> )	1562,29	1569,30	1604,60	1583,37	1562,29	1562,29
Mpa	0,64	0,64	0,78	0,79	0,80	0,80

Ruptura na interface argamassa / Substrato	40,00%	90,00%	10,00%	45,00%	55,00%	70,00%
Ruptura da argamassa de revestimento					40,00%	
Ruptura do substrato	60,00%	10,00%	90,00%	55,00%	5,00%	30,00%
Observações	Conincidente com junta de assentamento				Conincidente com junta de assentamento	

Média (de 12 ensaios)	0,84	NBR - 13.749 - Reboco Externo	0,30
Desvio Padrão	0,22	NBR - 13.749 - Reboco Interno	0,20



## Resistência de aderência à tração segundo NBR 13528 (1996)

Amostra: 1:1:6

Data de arrancamento: 29/03/2007

Idade da argamassa: 66 dias

### 1 ° Série

Carga (N)	750	750	750	250	2000	1750
Diametro (mm)	45,2	45,3	45,1	45,4	45,6	44,9
area (mm <sup>2</sup> )	1604,60	1611,71	1597,51	1618,84	1633,13	1583,37
Mpa	0,47	0,47	0,47	0,15	1,22	1,11

Ruptura na interface argamassa / Substrato	100,00%		95,00%	50,00%	30,00%	50,00%
Ruptura da argamassa de revestimento						
Ruptura do substrato		100,00%	5,00%	50,00%	70,00%	50,00%
Observações				Conincidente com junta de assentamento	Conincidente com junta de assentamento	Conincidente com junta de assentamento

Data de arrancamento: 03/04/2007

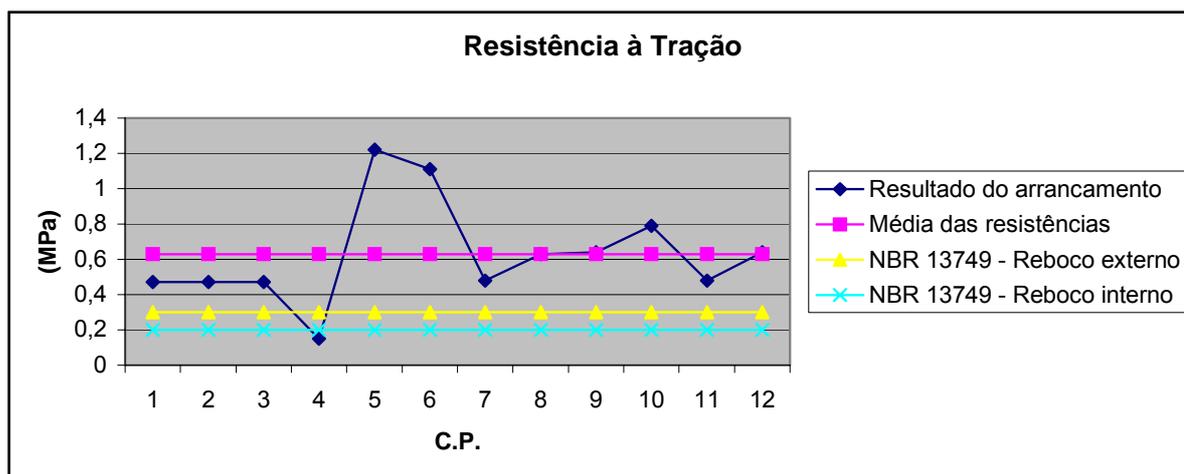
Idade da argamassa: 72 dias

### 2 ° Série

Carga (N)	750	1000	1000	1250	750	1000
Diametro (mm)	44,6	44,8	44,6	44,9	44,8	44,7
area (mm <sup>2</sup> )	1562,29	1576,33	1562,29	1583,37	1576,33	1569,30
Mpa	0,48	0,63	0,64	0,79	0,48	0,64

Ruptura na interface argamassa / Substrato	90,00%	100,00%	95,00%		100,00%	95,00%
Ruptura da argamassa de revestimento	10,00%		5,00%	20,00%		5,00%
Ruptura do substrato				80,00%		
Observações						

Média (de 12 ensaios)	0,63	NBR - 13.749 - Reboco Externo	0,30
Desvio Padrão	0,29	NBR - 13.749 - Reboco Interno	0,20



## Resistência de aderência à tração segundo NBR 13528 (1996)

Amostra: 1:2:8

Data de arrancamento: 29/03/2007

Idade da argamassa: 66 dias

### 1 ° Série

Carga (N)	1550	1000	750	1250	1000	750
Diametro (mm)	45,2	44,9	44	44	44,7	44,7
area (mm <sup>2</sup> )	1604,60	1583,37	1520,53	1520,53	1569,30	1569,30
Mpa	0,97	0,63	0,49	0,82	0,64	0,48

Ruptura na interface argamassa / Substrato	30,00%	20,00%	100,00%	95,00%	50,00%	70,00%
Ruptura da argamassa de revestimento						30,00%
Ruptura do substrato	70,00%	80,00%		5,00%	50,00%	
Observações						

Data de arrancamento: 03/04/2007

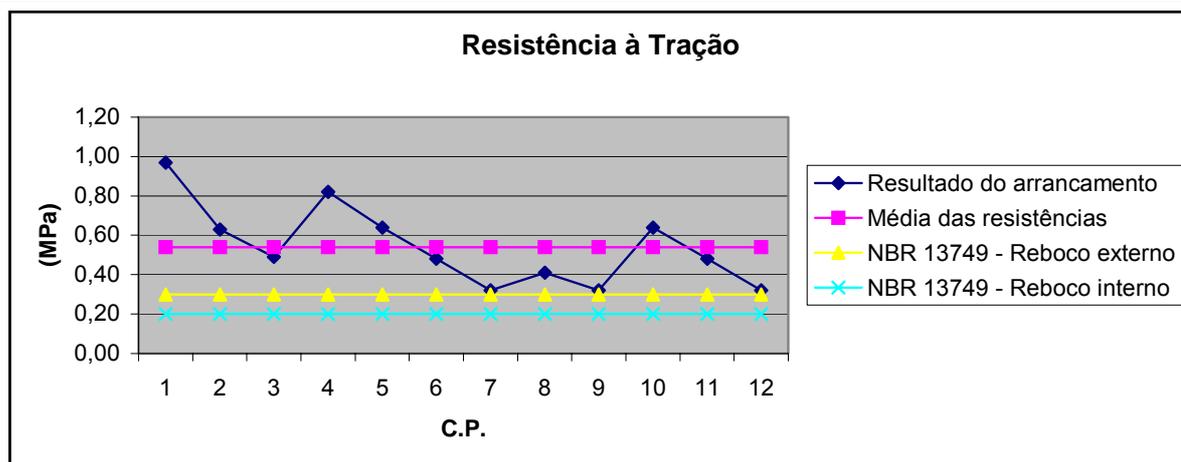
Idade da argamassa: 72 dias

### 2 ° Série

Carga (N)	500	1000	500	1000	750	500
Diametro (mm)	44,5	55,6	44,5	44,6	44,6	44,8
area (mm <sup>2</sup> )	1555,29	2427,95	1555,29	1562,29	1562,29	1576,33
Mpa	0,32	0,41	0,32	0,64	0,48	0,32

Ruptura na interface argamassa / Substrato	80,00%		80,00%	100,00%	100,00%	90,00%
Ruptura da argamassa de revestimento	20,00%	5,00%	20,00%			10,00%
Ruptura do substrato		95,00%				
Observações	Conincidente com junta de assentamento			Conincidente com junta de assentamento		

Média (de 12 ensaios)	0,54	NBR - 13.749 - Reboco Externo	0,30
Desvio Padrão	0,20	NBR - 13.749 - Reboco Interno	0,20



### Resistência de aderência à tração segundo NBR 13528 (1996)

Amostra: 1:2:10

Data de arrancamento: 29/03/2007

Idade da argamassa: 66 dias

#### 1 ° Série

Carga (N)	750	1000	750	500	1000	1250
Diametro (mm)	44,6	44,7	44,3	44,1	44,2	44,2
area (mm <sup>2</sup> )	1562,29	1569,30	1541,34	1527,45	1534,39	1534,39
Mpa	0,48	0,64	0,49	0,33	0,65	0,81

Ruptura na interface argamassa / Substrato	95,00%	20,00%		80,00%	5,00%	5,00%
Ruptura da argamassa de revestimento	5,00%		50,00%			
Ruptura do substrato		80,00%	50,00%	20,00%	95,00%	95,00%
Observações			Concidente com junta de assentamento			

Data de arrancamento: 03/04/2007

Idade da argamassa: 72 dias

#### 2 ° Série

Carga (N)	250	250	1500	750	500	1000
Diametro (mm)	44,6	44,4	44,3	44,6	44,5	44,3
area (mm <sup>2</sup> )	1562,29	1548,31	1541,34	1562,29	1555,29	1541,34
Mpa	0,16	0,16	0,97	0,48	0,32	0,65

Ruptura na interface argamassa / Substrato		85,00%	35,00%	40,00%	15,00%	
Ruptura da argamassa de revestimento	20,00%	10,00%	60,00%		20,00%	100,00%
Ruptura do substrato	80,00%	5,00%	5,00%	60,00%	65,00%	
Observações				Concidente com junta de assentamento		

Média (de 12 ensaios)	0,51	NBR - 13.749 - Reboco Externo	0,30
Desvio Padrão	0,25	NBR - 13.749 - Reboco Interno	0,20

