

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

TESE DE DOUTORADO

Avaliação do perfil de penetração dos compostos hidratados do aglomerante de argamassas aplicadas sobre bloco cerâmico através de análises químicas, microestruturais, mineralógicas e de resistência de aderência

Autor: Giulliano Polito

Orientador: Prof. Ph.D. Paulo Roberto Gomes Brandão

Co-orientador: Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Junior

Maio/2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Giulliano Polito

AVALIAÇÃO DO PERFIL DE PENETRAÇÃO DOS COMPOSTOS HIDRATADOS DO
AGLOMERANTE DE ARGAMASSAS APLICADAS SOBRE BLOCO CERÂMICO
ATRAVÉS DE ANÁLISES QUÍMICAS, MICROESTRUTURAIS, MINERALÓGICAS E
DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas
Gerais

Área de concentração: Ciência e Engenharia de Materiais
Orientador: Prof. Ph.D. Paulo Roberto Gomes Brandão
Co-orientador: Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Junior

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2013

Àquele que é o único digno de receber toda a honra e toda a glória: Jesus Cristo. E àqueles que são a razão e a inspiração para minhas superações e conquistas: minha mãe, minha amada esposa e meus filhotes queridos.

AGRADECIMENTOS

Inúmeras foram às pessoas que, de alguma forma, contribuíram para realização deste projeto. Registro aqui meu agradecimento pelo apoio à conclusão deste importante passo em minha carreira:

A Deus, grande responsável por mais esta vitória em minha vida.

Ao professor Paulo Brandão, pela orientação, disponibilidade, paciência e amizade durante todo o percurso. Ao final deste trabalho fica a certeza de que continuará a admiração e uma grande amizade.

Ao professor, co-orientador e amigo Antônio Junior pelo apoio, contribuições e confiança depositados.

À Professora Clésia Nascentes pelas contribuições, sugestões e apoio nas análises químicas realizadas.

À Priscila pela dedicação e pelo apoio incondicional na realização das análises.

Aos técnicos Isabel de Souza Batista Carvalho pelas análises por espectrometria de fluorescência de raios-X semiquantitativa e Roberto Couceiro Lois pelas análises de microscopia eletrônica de varredura e microanálise EDS.

Ao técnico Carlson Nazareth pelas análises de espectrometria de fluorescência de raios-X quantitativa.

À minha mãe, Elizeth, pelo apoio e incentivo sempre dados ao longo de minha vida e pelos sacrifícios que fez para que eu pudesse chegar até aqui.

À minha esposa, Elizandra e a meus filhos, Pedro, Filipe e Júlia por estarem ao meu lado durante toda a jornada e por suportar minhas ausências e falhas neste período.

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Argamassa	4
3.1.1. Proporção entre cal e cimento.....	4
3.1.2. Características e propriedades no estado fresco.....	8
3.1.2.1. Trabalhabilidade	8
3.1.2.2. Consistência e plasticidade	9
3.1.2.3. Retenção de água	13
3.1.2.4. Massa específica.....	14
3.1.2.5. Adesão inicial	15
3.1.3. Características e propriedades no estado endurecido.....	15
3.1.3.1. Aderência	15
3.1.3.1.1. Mecanismos de ligação.....	17
3.1.3.1.2. Influência dos materiais constituintes.....	19
3.1.3.1.3. Medição da aderência.....	21
3.1.3.2. Permeabilidade.....	25
3.1.3.3. Resistência mecânica.....	26
3.1.3.4. Retração.....	26
3.1.3.5. Módulo de deformação.....	27
3.2. Microestrutura.....	29
3.2.1. Microestrutura dos compostos cimentícios.....	29
3.2.2. Esquema de hidratação	33
3.2.3. Microestrutura da interface argamassa-substrato.....	34
3.2.4. Métodos de investigação e análise microestrutural	36

3.2.4.1.	Microscópio eletrônico de varredura (MEV)	36
3.2.4.2.	Microanalisador EDS	38
3.2.4.3.	Fluorescência de raios-X (FRX).....	39
4.	METODOLOGIA	40
4.1.	Seleção dos materiais e composição das argamassas.....	40
4.1.1.	Bloco cerâmico	40
4.1.2.	Cimento	41
4.1.3.	Cal	42
4.1.4.	Areia	42
4.1.5.	Argamassa industrializada	44
4.1.6.	Painéis de alvenaria.....	44
4.1.7.	Traços Utilizados.....	45
4.1.8.	Preparação das argamassas.....	45
4.1.9.	Aplicação das argamassas	47
4.2.	Ensaio de caracterização do bloco cerâmico	48
4.2.1.	Absorção de água	48
4.3.	Ensaio de caracterização da argamassa no estado plástico	49
4.3.1.	Índice de Consistência (flow table).....	49
4.3.2.	Retenção de água.....	50
4.3.3.	Massa específica e ar incorporado.....	52
4.4.	Ensaio de caracterização da argamassa no estado endurecido.....	54
4.4.1.	Resistência à compressão	54
4.4.2.	Resistência à tração na flexão	55
4.4.3.	Módulo de elasticidade.....	55
4.5.	Ensaio de caracterização da argamassa aplicada	56
4.5.1.	Resistência de aderência à tração	56
4.6.	Extração dos corpos de prova dos revestimentos aplicados.....	58

4.7.	Avaliações microestruturais	58
4.7.1.	Microscópio eletrônico de varredura com microanalisador EDS (MEV-EDS)	58
4.7.1.1.	Análise em corpos de prova no estado natural	60
4.7.1.1.1.	Realização das análises.....	60
4.7.1.1.2.	Preparação dos corpos de prova	61
4.7.1.2.	Análise em corpos de prova embutidos em resina.....	62
4.7.1.2.1.	Embutimento dos corpos de prova.....	62
4.7.1.2.2.	Realização das análises.....	63
4.7.2.	Avaliações Químicas.....	64
4.7.2.1.	Preparação dos corpos de prova	64
4.7.2.1.1.	Preparação dos corpos de prova em estado natural	64
4.7.2.1.2.	Preparação de amostras para análise em pó	67
4.7.2.2.	Espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX)	70
4.7.2.3.	Espectrometria de absorção atômica.....	72
4.7.2.4.	Análise de pH	73
4.7.2.4.1.	Em meio líquido	73
4.7.2.4.1.1.	Medição com pHmetro.....	74
4.7.2.4.1.2.	Medição com reagentes colorimétricos.....	74
4.7.2.4.2.	Medição estado natural.....	75
4.7.2.4.3.	Medição com fita teste	76
4.7.2.5.	Análise de enxofre	77
4.7.2.6.	Análise de alumínio	79
4.7.2.7.	Análise de cálcio.....	81
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	84
5.1.	Resultado e discussões dos ensaios de caracterização da argamassa no estado plástico.....	84
5.1.1.	Consistência (flow table)	84

5.1.2.	Retenção de água.....	85
5.1.3.	Massa específica	86
5.1.4.	Ar incorporado	86
5.2.	Resultado e discussões dos ensaios de caracterização da argamassa no estado endurecido	87
5.2.1.	Resistência à compressão	87
5.2.2.	Resistência à tração na flexão	87
5.2.3.	Módulo de elasticidade estático	88
5.3.	Resultado e discussões dos ensaios de caracterização da argamassa aplicada sobre a base	88
5.3.1.	Resistência de aderência à tração segundo a NBR 13528 (1995)	88
5.3.2.	Tipo de ruptura.....	89
5.4.	Combinação dos resultados de caracterização da argamassa	91
5.5.	Resultado e discussões das análises de caracterização microestrutural	92
5.5.1.	Microscópio eletrônico de varredura (MEV) e microanalisador EDS.....	92
5.6.	Análises mineralógicas e químicas	103
5.6.1.	Difração de raios-X (DRX).....	103
5.6.2.	Fluorescência de raios-X.....	105
5.6.2.1.	Método semiquantitativo no bloco cerâmico	105
5.6.2.2.	Método quantitativo no bloco cerâmico e na argamassa	111
5.6.3.	Espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado – ICP (chama) 125	
5.6.4.	pH	127
5.6.4.1.	Análise realizada com pHmetro	127
5.6.4.2.	Análises de pH em solução	128
5.6.4.3.	Fita de pH.....	129
5.6.4.4.	pH com amostra em estado natural	130
5.6.5.	Enxofre	138

5.6.5.1.	Enxofre em fita	138
5.6.5.2.	Enxofre em solução	139
5.6.5.3.	Enxofre em estado natural.....	139
5.6.6.	Alumínio	139
5.6.6.1.	Alumínio em fita.....	139
5.6.6.2.	Alumínio em solução	140
5.6.6.3.	Alumínio em estado natural	140
5.6.7.	Cálcio.....	140
5.6.7.1.	Cálcio em fita.....	140
5.6.7.2.	Cálcio em solução	141
6.	CONCLUSÕES.....	142
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	145
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	146
	ANEXO I – Planilha de resultados de resistência de aderência.....	153
	ANEXO II - Processo: Extração de amostra para FRX	159
	ANEXO III - Processo: Execução da argamassa.....	163
	ANEXO IV - Processo: Preparação de amostra (embutimento) para realização de ensaio no MEV – EDS.....	166
	ANEXO V - Processo: Preparação de amostra para realização de ensaio com reagentes em estado natural.....	171
	ANEXO VI - Processo: Ensaio colorimétrico em solução.....	176

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Variação nas propriedades de uma argamassa com a alteração da.....	5
Tabela 3.2 - Propriedades relacionadas com a trabalhabilidade das argamassas.....	9
Tabela 3.3 - Métodos empregados para avaliar a consistência e a plasticidade das argamassas.....	12
Tabela 3.4 - Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco.....	15
Tabela 3.5 - Retração de algumas argamassas e uma pasta, aos 7 e 28 dias (adaptado de FIORITTO, 1994).....	27
Tabela 4.1 - Resultado do ensaio de absorção de água.....	41
Tabela 4.2 - Resultado dos ensaios de caracterização do cimento CP II E- 32.....	41
Tabela 4.3– Resultados dos ensaios de caracterização da areia.....	43
Tabela 4.4 - Traços utilizados.....	45
Tabela 4.2 Temperatura usada para determinação de alumínio por GFAAS.....	72
Tabela 4.3 - Concentrações de alumínio ($\mu\text{g.g}^{-1}$) obtidas após extração do bloco cerâmico e das 3 argamassas avaliadas em diferentes meios.....	73
Tabela 5.1 - Índice de consistência padrão segundo NBR 13276 (2002).....	84
Tabela 5.2 - Retenção de águas segundo BSI 4551 (Mortars, screeds and plaster. Londres 1981).....	86
Tabela 5.3 - Massa específica segundo NBR 13278 (1995).....	86
Tabela 5.4 - Teor de ar incorporado segundo NBR 13278 (1995).....	86
Tabela 5.5 - Resistência à compressão segundo NBR 13279 (1995).....	87
Tabela 5.6 - Resistência à tração na flexão.....	87
Tabela 5.7 - Módulo de elasticidade estático.....	88
Tabela 5.8 - Resistência de aderência.....	88
Tabela 5.9 - Combinação dos resultados dos ensaios de caracterização das argamassas.....	91

Tabela 5.10 – Microanálise EDS da Figura 5.5 – Fotomicrografia da superfície do bloco cerâmico.	93
Tabela 5.11 – Microanálise EDS da Figura 5.8	96
Tabela 5.12 – Microanálise EDS da Figura 5.10	98
Tabela 5.13 –Microanálise EDS da Figura 5.11	99
Tabela 5.14 – Microanálise EDS da Figura 5.12	100
Tabela 5.15 – Microanálise EDS da figura 5.19.....	101
Tabela 5.16- Resultados das análises de espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado – ICP	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Conjunto de benefícios proporcionados pelas argamassas portadoras de cal hidratada.....	7
Figura 3.2 - Consistência das argamassas.....	10
Figura 3.3 - Variação na consistência pela influência das variações na composição de argamassas.....	11
Figura 3.4 - <i>Squeeze flow</i>	13
Figura 3.5 - Variação para retenção de água para diferentes argamassas.....	14
Figura 3.6 - Fatores que exercem influência na aderência de argamassas sobre bases porosas.	16
Figura 3.7 - Processos ocorridos durante o desenvolvimento do sistema de aderência mecânico.....	17
Figura 3.8 - Fotomicrografia da interface tijolo/argamassa no MEV- IES, onde se podem ver cristais típicos de etringita (1), responsável pelo intertravamento, saindo de dentro de microfissuras do bloco (2).	19
Figura 3.9 - Interface entre argamassa e bloco: a) foto por microscópio estereoscópico de argamassa com boa extensão de aderência; b) foto por microscópio estereoscópico de argamassa com falhas na interface; c) foto por microscopia eletrônica de varredura de uma interface com boa extensão de aderência, aumento 50X; d) foto por microscopia eletrônica de varredura de uma interface com falhas na extensão de aderência, aumento 50X. MEV/IER	20
Figura 3.10 - Etapas da realização do ensaio de determinação da resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa, segundo a NBR 13528 (ABNT, 1995).....	22
Figura 3.11 - Tipos de ruptura no ensaio de aderência à tração de revestimentos de argamassa, considerando o revestimento aplicado diretamente ao substrato (sem chapisco).....	23
Figura 3.12 - Exemplo de determinação das relações de falha, para representação gráfica pelo método das otimizações de quadrantes.	24
Figura 3.13 - Representação gráfica pelo método da otimização de quadrantes proposto por PAREK <i>et al.</i> (1995).	25
Figura 3.14 - Classificação das areias quanto à distribuição granulométrica e sua influência na retração plástica.	27
Figura 3.15 - Fotomicrografia de morfologia típica de portlandita. MEV-IER.....	30

Figura 3.16 - Etringita formada no interior de um poro. MEV-IES.	31
Figura 3.17 - Fotomicrografias dos cristais de etringita. MEV-IES. a) traço sem adição de cal hidratada - morfologia típica de cristais de etringita; b); c) e d) traços com adição de cal hidratada – cristais de etringita com diferenças morfológicas.	32
Figura 3.18 - Curva aproximada de evolução das fases hidratadas e da porosidade da pasta de cimento em função do tempo de hidratação.	34
Figura 3.19 - Fotomicrografias do perfil do bloco cerâmico aderido à argamassa - 1:0:6. a) vista geral; b) cristais de etringita no interior de poros a 100µm de profundidade; c) cristais de etringita no interior de poros a 100µm de profundidade; d) cristais de etringita perpendiculares à superfície do substrato; e) cristais de etringita no interior de poros a 100µm de profundidade. MEV-IER.	35
Figura 3.20 - Representação esquemática do mecanismo de aderência entre argamassa e bloco cerâmico.	36
Figura 3.21 - Processos de interações possíveis durante a incidência de um feixe de elétrons em uma amostra sólida.	37
Figura 4.1 - Bloco Cerâmico.	40
Figura 4.2 - Aspecto final da alvenaria utilizada como base para aplicação das argamassas.	44
Figura 4.3 - Processo de execução das argamassas. a) método Speed; b) dosagem dos materiais; c) pesagem dos materiais; d) mistura; e) descarga da argamassa; f) descanso da argamassa.	47
Figura 4.4 - Processo de execução da argamassa. a) taliscas; b) projeção da argamassa; c) sarrafeamento; d) aspersão de água; e) desempenho; f) identificação dos painéis.	48
Figura 4.5 - Ensaio do índice de consistência. a) mesa de ensaio e forma; b) adensamento controlado; c) forma preenchida; d) material adensado sem a forma; e) argamassa deformada após aplicação dos golpes; f) medição do valor da deformação.	50
Figura 4.6 - Ensaio de retenção de água: a) moldes com argamassa e peso cilíndrico de 2kg; b) posicionamento do conjunto de papéis filtro sobre o molde com argamassa; c) posicionamento do peso cilíndrico sobre o conjunto para realização do ensaio. ...	52
Figura 4.7 - Ensaio de teor de ar incorporado: a) equipamento preparado para receber a argamassa; b) água sendo adicionada no reservatório; c) aplicação de pressão para posterior alívio e realização da leitura manométrica.	54
Figura 4.8 - Execução do ensaio de resistência de aderência: a) corte do revestimento; b) placas coladas; c) aplicação do esforço de tração.	57

Figura 4.9 – Recipiente para acondicionamento das amostras extraídas.....	57
Figura 4.10 - Processo de marcação dos revestimento: a) carimbos utilizados; b) revestimento marcado para o corte.....	58
Figura 4.11 - Processo de análise no MEV-EDS. a) equipamento MEV utilizado; b) amostra posicionada no equipamento antes do seu fechamento; c) filamento de tungstênio; d) momento da execução da microscopia eletrônica de varredura; e) parte externa do equipamento de EDS; f) momento de execução da análise no EDS.....	59
Figura 4.12 - Vista interna do equipamento MEV-EDS utilizado – a) saída do feixe de elétrons; b) detector de EDS; c) detector de elétrons secundários; d) detector de elétrons retroespalhados.....	60
Figura 4.13 - Planos observados no MEV.	60
Figura 4.14 – Metalização das amostras: a) amostra a ser preparada para análise; b) equipamento utilizado para metalização das amostras; c) amostra destaca e metalizada, com fita de carbono, pronta para análise de topo no MEV.	61
Figura 4.15 - Processo de embutimento: a) limpeza do material; b) embutimento em resina; c) corte para exposição da superfície; d) polimento da superfície; e) metalização da superfície de análise; f) corpo de prova pronto para análise.....	63
Figura 4.16 – Superfície plana observada no MEV para medição de espessura. Diâmetro = 25,4mm.....	64
Figura 4.17 - Processo de aplicação da parafina. a) derretimento da parafina; b) imersão da amostra recém-extraída; c) amostra com cobertura de parafina.	64
Figura 4.18 - Corpo de prova inutilizado devido à grande penetração de resina em seu interior.....	65
Figura 4.19 - Processo de preparação de corpos de prova para análise com reagentes colorimétricos em estado natural. a) amostra embutida em cilindro de resina; b) corte do corpo de prova; c) corpo de prova pronto para análise.....	66
Figura 4.20 - Equipamento adaptado para corte dos corpos de prova. a) mesa de corte para azulejos e pedras; b) mecanismo adaptado à mesa de corte; c) corpo de prova fixado ao suporte para corte.....	67
Figura 4.21 - Preparação de amostra para fixação no torno mecânico. a) aplicação de resina epóxi; b) colocação da amostra; c) amostra colada e identificada.	68
Figura 4.22 - Diagrama de extração do material para análise.	69
Figura 4.23 - Processo de extração de material para análises em pó. a) torno mecânico utilizado para extração; b) escala de avanço de 0,1mm; c) ferramenta e	

amostra afixados no equipamento; d) extração do material; e) material embalado e identificado; f) amostra após a extração do material.....	70
Figura 4.24 - Processo de análise por FRX. a) amostras enviadas para a análise; b) amostra prensada pronta para realização do ensaio; c) equipamento utilizado para as análises.....	71
Figura 4.25 - PHmetro.....	74
Figura 4.26 - Escala de cor do indicador universal de pH utilizado.....	75
Figura 4.27 - Superfície de aplicação do reagente de pH.....	75
Figura 4.28 – Reagentes formulados para análise de pH em estado natural.....	76
Figura 4.29 – Teste de pH em tiras.	77
Figura 4.30 – Teste para análise de SO ₂ – 4 em tiras.	78
Figura 4.31 – Teste para análise de SO ₄ em solução.....	78
Figura 4.32 - Teste para análise de Al em tiras.	80
Figura 4.33 – Teste para análise de Al em solução.....	81
Figura 4.34 – Teste para análise de Ca em solução.....	82
Figura 4.35 – Teste para análise de Ca em tiras.	83
Figura 5.1 - a) traço 1:1:6 (cimento:cal:areia); b) traço 1:0:6 (cimento:cal:areia); c) argamassa industrializada.....	85
Figura 5.2 - Resistência de aderência do traço 1.	89
Figura 5.3 - Resistência de aderência do traço 2.	90
Figura 5.4 - Resistência de aderência do traço 3.	90
Figura 5.5 – Fotomicrografia da superfície do bloco cerâmico. MEV -imagem obtida com elétrons retroespalhados (IER).....	93
Figura 5.6 - Fotomicrografia da interface – argamassa tipo 1- 1:1:6; vista de perfil do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. MEV -imagem obtida com elétrons retroespalhados (IER).	94
Figura 5.7 - Fotomicrografia do bloco cerâmico – argamassa tipo 1- 1:1:6; vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. MEV -imagem obtida com elétrons secundários (IES).....	95

Figura 5.8 - Fotomicrografia do bloco cerâmico – argamassa tipo 1- 1:1:6; vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. MEV -imagem obtida com elétrons secundários (IES). Detalhe da fotomicrografia 5.7, com aumento de 7500X.	96
Figura 5.9 - Fotomicrografia do bloco cerâmico – argamassa tipo 1- 1:1:6; vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. MEV -imagem obtida com elétrons secundários (IES).....	97
Figura 5.10 - Fotomicrografia do bloco cerâmico – argamassa tipo 1- 1:1:6; vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. MEV -imagem obtida com elétrons secundários (IES). Detalhe da fotomicrografia 5.9, com aumento de 7500X..	98
Figura 5.11 - Fotomicrografia do bloco cerâmico – argamassa tipo 1- 1:1:6; vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. MEV -imagem obtida com elétrons secundários (IES).	99
Figura 5.12 - Fotomicrografia do bloco cerâmico – argamassa tipo 1- 1:1:6; vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. MEV -imagem obtida com elétrons secundários (IES).	100
Figura 5.13 - Fotomicrografia do bloco cerâmico – argamassa tipo 1- 1:1:6; vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. MEV -imagem obtida com elétrons secundários (IES).	101
Figura 5.14 - Fotomicrografia do bloco cerâmico – argamassa tipo 2- 1:0:6; vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. MEV -imagem obtida com elétrons secundários (IES).	102
Figura 5.15 - Fotomicrografia do bloco cerâmico – argamassa tipo 2- 1:0:6; vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. MEV -imagem obtida com elétrons secundários (IES).	103
Figura 5.16 – Difração de raios X da argamassa 1 (1:1:6).....	104
Figura 5.17 – Difração de raios X da argamassa 2 (1:0:6).....	104
Figura 5.18 – Difração de raios-X da argamassa 3 – industrializada.	105
Figura 5.19 - Fluorescência de raios-X semiquantitativa do bloco – argamassa 1 (1:1:6).....	106
Figura 5.20 Fluorescência de raios-X semiquantitativa do bloco – argamassa 2 (1:0:6).	107
Figura 5.21 Fluorescência de raios-X semiquantitativa do bloco – argamassa 3 (industrializada).....	108
Figura 5.22 – Fluorescência de raios-X semiquantitativa do bloco cerâmico para K..	109
Figura 5.23– Fluorescência de raios-X semiquantitativa do bloco cerâmico para Ti. .	109

Figura 5.24– Fluorescência de raios-X semiquantitativa do bloco cerâmico para S...	110
Figura 5.25 – Fluorescência de raios-X semiquantitativa do bloco cerâmico para Al.	110
Figura 5.26 – Fluorescência de raios-X semiquantitativa do bloco cerâmico para Si.	110
Figura 5.27 – Fluorescência de raios-X quantitativa do bloco cerâmico e argamassa - Traço 1 (1:1:6).....	112
Figura 5.28 – Fluorescência de raios-X quantitativa do bloco cerâmico - Traço 2 (1:0:6).....	113
Figura 5.29 – Fluorescência de raios-X quantitativa do bloco cerâmico - Traço 3 – Industrializada.	114
Figura 5.30 – Fluorescência de raios-X quantitativa do bloco cerâmico e argamassa para Al_2O_3	115
Figura 5.31 – Fluorescência de raios-X quantitativa do bloco cerâmico para SiO_2	116
Figura 5.32 – Fluorescência de raios-X quantitativa do bloco cerâmico para TiO_2	117
Figura 5.33 – Fluorescência de raios-X quantitativa do bloco cerâmico para CaO	118
Figura 5.34 – Fluorescência de raios-X quantitativa do bloco cerâmico para K_2O	119
Figura 5.35 – Fluorescência de raios-X quantitativa do bloco cerâmico para SO_3	120
Figura 5.36 - Fluorescência de raios-X quantitativa do bloco cerâmico para Na_2O	121
Figura 5.37 - Resultados de medição de pH através de pHmetro.....	127
Figura 5.38 - Resultado dos ensaios de pH em solução com indicador universal formulado.	129
Figura 5.39 - Ensaio de medição de pH em fitas.	130
Figura 5.40 - Ensaio com reagentes colorimétricos de pH em amostras em estado natural.....	131
Figura 5.41 - Ensaio com o reagente 1 em amostras em estado natural.	132
Figura 5.42 Ensaio com o reagente 2 em amostras em estado natural.	133
Figura 5.43 - Ensaio com o reagente 3 (fenolftaleína) em amostras em estado natural.	134
Figura 5.44 - Ensaio com o reagente 4 (timolftaleína) em amostras em estado natural.	135
Figura 5.45 – Resultado do ensaio de S em fita.	138

Figura 5.46- Resultado do ensaio de Al em fita.....139

Figura 5.47 - Resultado do ensaio de Ca em fita.....140

ABREVIATURAS

a/c – Relação água/cimento

EDS – *Energy-dispersive spectroscopy*

ESEM - *Environmental scanning electron microscope*

FRX – Fluorescência de raios X

IER - Imagem de elétrons retroespalhados

IES - Imagem de elétrons secundários

MEV - Microscópio eletrônico de varredura

SBTA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas

Sputter - Técnica de recobrimento de amostras através de deposição de material condutor.

GFAAS - *Graphite furnace atomic absorption spectrometry*

RESUMO

O presente trabalho é fruto de um projeto experimental que investigou as variações químicas ocorridas na interface entre revestimentos de argamassa aplicados sobre alvenaria de bloco cerâmico, bem como nas regiões próximas, tanto no interior do bloco, quanto no interior da argamassa. A análise desta interface tem muito a contribuir para o melhor entendimento das propriedades dos materiais que a compõem, dos mecanismos de aderência, bem como dos fatores que interferem no seu desempenho. Buscou-se também o desenvolvimento de uma metodologia prática, confiável e não destrutiva capaz de identificar as variações químicas ocorridas na região da interface, através de análises colorimétricas dos elementos Ca, Al, S e da variação do pH. Verificou-se que as regiões próximas à interface, tanto do lado do bloco cerâmico, quanto do lado da argamassa, apresentam composição química muito diferente dos materiais que compõem o sistema, se analisados de forma isolada. Esta variação foi provocada pela migração de Ca, S e Al da argamassa para o substrato. A intensidade desta migração apresentou relação inversa à propriedade de retenção de água da argamassa. Os resultados de aderência apresentaram relação direta com a quantidade de Ca identificado na primeira camada (200 μ m) do bloco. A quantidade de Ca absorvido pelo substrato não foi influenciada pela introdução da cal na argamassa. A variação dos elementos químicos identificados, principalmente relacionada a mudança na concentração do Ca, provoca a variação do pH nesta região, alteração esta que foi frequentemente verificada por quase todos os métodos testados. No caso da argamassa, o pH diminui na medida em que se aproxima da interface, ocorrendo exatamente o contrário quando analisado o comportamento do pH no bloco cerâmico. O pH na primeira camada do bloco apresentou relação direta com os resultados de aderência obtidos.

Palavras chaves: argamassa; interface; aderência; pH; bloco cerâmico

ABSTRACT

Evaluation of the penetration profile of the hydrated compounds from the mortars binder within the ceramic block, by means of chemical, microstructural, mineralogical and adherence resistance analyses.

This work is the result of an experimental study that investigated the chemical changes occurring at the interface between a mortar applied over a masonry ceramic block and nearby regions, both within the block and in the interior of the mortar. The analysis of this interface has contributed significantly to better understanding the properties of the materials which make up this interface and the mechanisms of adhesion, as well as the factors that interfere with the performance. This research also sought to develop a practical, reliable and non-destructive methodology capable of identifying the chemical variations occurring in the interface region by means of colorimetric analysis of the elements Ca, Al, S and the pH variation. It was achieved that the interface regions closer to both sides of the ceramic block and the mortar, have very different chemical compositions as compared to the bulk of the materials. This variation was caused by the migration of Ca, Al and S from the mortar to the substrate. The intensity of this migration was inversely related to the mortar water retention property. The adhesion results were directly related to the Ca concentration in the block first layer (200 μ m). The amount of Ca absorbed by the substrate was not influenced by the introduction of lime in the mortar. The chemical change verified, mainly related to the Ca variation, causes the pH change in this region. This variation was easily identified by almost all methods tested. In the case of the mortar, the pH decreases closer to the interface, but the opposite occurs when the pH of the ceramic block is measured. The pH value in the block's first layer was directly related to the adhesion results obtained.

Keywords: mortar; interface; adhesion; pH

1. INTRODUÇÃO

Os revestimentos de argamassa são largamente utilizados nas edificações como uma camada protetora da estrutura e da alvenaria, conferindo também estanqueidade e conforto aos seus usuários.

Apesar de utilizar este sistema desde a antiguidade, e ser uma prática bastante difundida no Brasil, os métodos utilizados em obra fundamentam-se basicamente no empirismo, empirismo este que tem gerado uma grande quantidade de patologias. A ocorrência de tantos problemas expõe uma fragilidade do sistema. Um dos problemas mais comuns é o descolamento devido à perda de aderência, ocasionado prejuízos, tanto para o morador, quanto para as construtoras que são obrigadas a realizar reparos na edificação.

O revestimento de argamassa é submetido a inúmeros esforços e agressões durante os anos, que acabam por diminuir sua vida útil. Uma das propriedades mais importantes é a sua aderência à base, podendo ser definida como a capacidade que a interface argamassa-substrato possui de absorver tensões tangenciais (cisalhamento) e normais (tração) a ela, sem romper-se.

A perda de aderência de um revestimento de argamassa compromete a vida útil, a habitabilidade e a segurança de uma edificação e expõe outros sistemas (estruturas, alvenarias, ambientes internos, etc.) a agressões que podem levar à ocorrência de outras patologias.

A aderência da argamassa ao substrato é proveniente, principalmente, do intertravamento mecânico dos produtos de hidratação do cimento no interior dos poros do bloco cerâmico. Esta interação depende das propriedades da argamassa, do bloco cerâmico, do processo e das condições de aplicação e da qualificação da mão de obra utilizada. Esta multiplicidade de fatores envolvidos torna seu entendimento uma tarefa complexa.

A análise da interface argamassa/substrato tem muito a contribuir para o melhor entendimento das propriedades dos materiais que a compõem, dos mecanismos de

aderência, bem como dos fatores que interferem no seu desempenho. A obtenção deste conhecimento possibilita o estabelecimento de parâmetros que orientem o projeto, a execução, a inspeção e a manutenção de tais revestimentos, combatendo o empirismo e conseqüentemente diminuindo a incidência de manifestações patológicas. Entretanto, muito há ainda para se percorrer até que se tenha completo entendimento sobre o comportamento da argamassa no tocante a sua aderência ao substrato.

As análises microscópicas e químicas desta interação podem representar um caminho a ser desbravado e podem agregar muito ao conhecimento já existente, uma vez que o comportamento de um material é fortemente influenciado por sua microestrutura.

Muitos autores têm discorrido sobre este tema e muito contribuíram para o seu melhor entendimento. No Brasil podemos citar os estudos de CARASEK et al., 1996, 1997, 2001, 2007; que apresentam-se como uma importante contribuição ao meio científico através da pesquisa aprofundada do mecanismo de aderência entre argamassas à base de cimento Portland e substratos porosos. Também podemos citar os estudos de SCARTEZINI, 1999; SABBATINI, 1998; e CARVALHO JR, 2005.

Esta tese foi estruturada em sete capítulos onde, o primeiro capítulo trata da introdução e o segundo apresenta os objetivos. No capítulo terceiro 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 análises microestrutural e química. No capítulo quinto são relatados os resultados obtidos e a análise dos mesmos. O capítulo sexto mostra as principais conclusões obtidas do trabalho experimental. No capítulo sétimo são propostas sugestões para trabalhos futuros.

2. OBJETIVOS

Como objetivo geral deste trabalho, busca-se analisar as variações químicas ocorridas na interface entre revestimentos de argamassa aplicados sobre alvenaria de bloco cerâmico, bem como nas regiões próximas, tanto no interior do bloco, quanto no interior da argamassa e, contribuir para o melhor entendimento dos mecanismos de aderência envolvidos e dos principais fatores intervenientes nesta propriedade.

Como objetivo específico deste trabalho, busca-se o desenvolvimento de uma metodologia prática, confiável e não destrutiva capaz de identificar as variações ocorridas na região da interface, através de análises químicas quantitativas e colorimétricas, principalmente dos elementos Ca, Al, S e da variação do pH.

A hipótese é que existem variações químicas na interface argamassa/bloco cerâmico que explicam a aderência entre estes materiais e é possível fazer a identificação dessas regiões por meio de análises químicas colorimétricas. Estas variações são provenientes da penetração dos produtos de hidratação da pasta aglomerante no interior dos poros do substrato.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os principais aspectos encontrados na literatura sobre o tema deste trabalho. Foi dada especial atenção às propriedades das argamassas relacionadas ao seu desempenho em relação à resistência de aderência. Não menos importante foi a abordagem feita às propriedades da interface entre a argamassa e o bloco cerâmico.

3.1. Argamassa

3.1.1. Proporção entre cal e cimento

A argamassa “ideal” deve reunir as qualidades do cimento e da cal. Desta forma, a dosagem é fundamental para se atingir as propriedades ideais, tanto no estado fresco, quanto no endurecido.

O alto teor de cimento confere à argamassa elevada resistência mecânica e de aderência, no entanto, maior susceptibilidade à fissuração entre a argamassa e o substrato. No estado fresco, confere baixa retenção de água, o que permite rápida perda de água para substratos porosos, prejudicando sua aderência (BOYNTON,1980; CARASEK,1996).

Segundo GALLEGOS (1995), argamassas de cimento sem a presença de cal apresentam baixa trabalhabilidade e geram contato tentacular, forte, porém incompleto, na interface com o substrato, sofrendo retração à medida que o processo de hidratação avança.

O benefício proporcionado no desempenho da argamassa com a introdução parcial da cal é unânime entre os autores pesquisados. A adição da cal em substituição ao cimento melhora as propriedades ligadas à trabalhabilidade, à retenção de água e à capacidade de absorver deformações (resiliência). Ao reagir com o CO₂, a cal libera água retida em torno de suas partículas, colaborando assim com a hidratação do cimento. Entretanto, a cal desenvolve resistência muito lentamente, através da carbonatação pelo CO₂ e atinge resistências finais cerca de 30-40 vezes menores do que a do cimento (BOYNTON, 1980; CINCOTTO *et al.*, 2007; SABBATINI,1988).

A variação nas propriedades das argamassas com a introdução da cal é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - 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	
Resistência de aderência	(E)	Decresce	
Impermeabilidade	(E)	Decresce	
Resistência a 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	

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

Fonte: SABBATINI, 1998.

Uma boa argamassa necessita de valores de tensão de escoamento relativamente altos, para que, quando aplicada, não escorra e um baixo coeficiente de viscosidade plástica, afim de diminuir o trabalho de espalhamento e adensamento.

Os autores consultados discorrem uma extensa lista de benefícios proporcionados pela introdução da cal na argamassa. A maior plasticidade e trabalhabilidade conferem à argamassa mista (cimento e cal) melhor preenchimento de toda superfície do substrato, proporcionando maior extensão de aderência. A melhoria na retenção de

água da argamassa reduz a exsudação e regula a perda de água para elementos construtivos vizinhos de alta porosidade. Também proporciona melhor trabalhabilidade, melhor recuperação de sobras, melhor absorção das movimentações devido à maior flexibilidade das ligações e estocagem de água necessária às reações do cimento.

A utilização da cal introduz um processo chamado de “reconstituição autógena” que ocorre quando há a dissolução ou dispersão do hidróxido de cálcio/magnésio livres pela água que circula pelos espaços intergranulares da alvenaria e os mesmos são transportados para outros vazios, onde se precipitam e se fixam após recarbonatação. Este processo evita microfissuras e confere à argamassa melhor comportamento técnico do conjunto através da maior durabilidade da aderência, maior resistência mecânica, maior resistência à penetração de água, maior compactidade. A baixa solubilidade da cal carbonatada minimiza os efeitos da lixiviação e eflorescência nas argamassas, quando sujeitas à percolação de água. O menor módulo de elasticidade permite à argamassa absorver melhor as movimentações estruturais (CARASEK, 1996; GUIMARÃES, 2002).

GUIMARÃES (2002) apresenta os benefícios proporcionados pela introdução da cal (Figura 3.1).

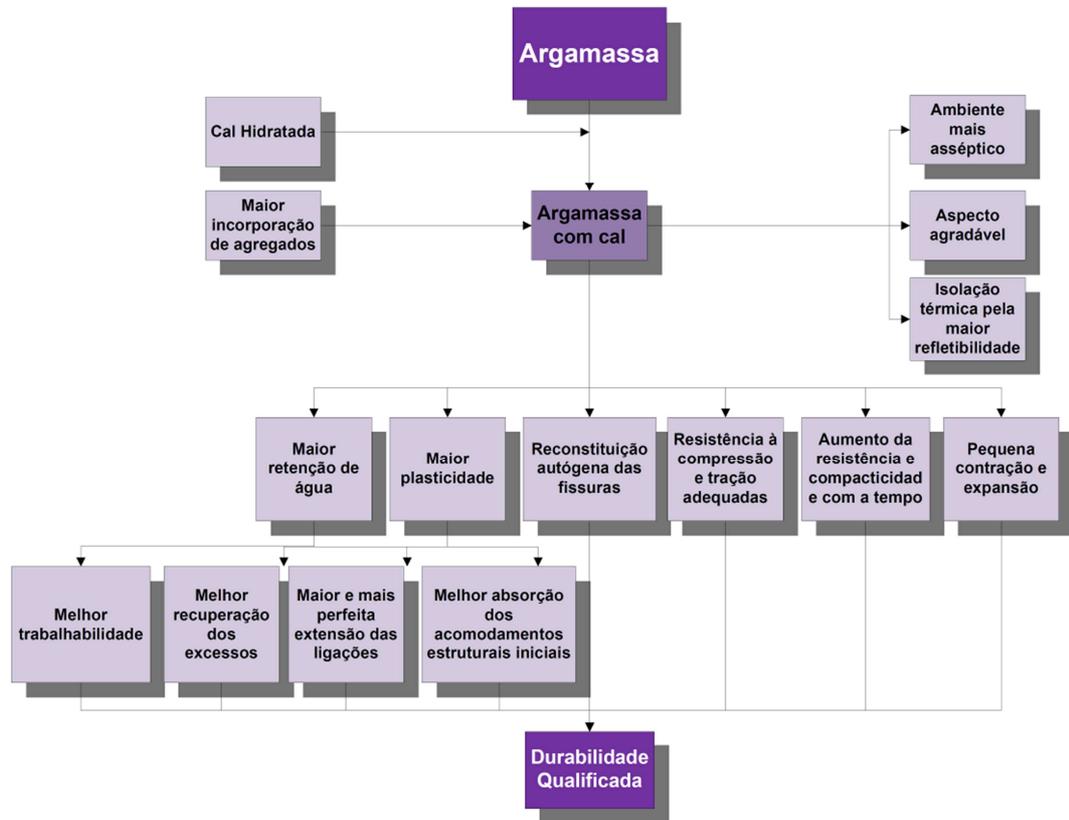


Figura 3.1 - Conjunto de benefícios proporcionados pelas argamassas portadoras de cal hidratada.

Fonte: GUIMARÃES, 2002.

As argamassas ricas em cal são mais plásticas e têm maior capacidade de molhar a superfície e preencher as cavidades do substrato, proporcionando, desta forma, maior extensão de aderência, e com microestrutura de interface com o substrato mais densa e contínua (CARASEK,1996).

A introdução da cal reduz significativamente o módulo de elasticidade sem afetar na mesma proporção a resistência de tração, que em última análise, representa a máxima resistência de aderência da argamassa (JOHN, 2003). Em seus experimentos, CARASEK (1996) observou um aumento da resistência de aderência com a introdução de até 6% de cal em relação à massa dos constituintes secos, devido à melhoria da extensão de aderência. A partir deste valor, observou uma queda da aderência.

A forma de ruptura dos ensaios de aderência também varia em função da proporção de cal na argamassa. Argamassas ricas em cimento (1:3) apresentam ruptura de

interface por deficiência de aderência. Argamassas com adição de cal (1:1:6) apresentam ruptura no interior da argamassa, por falta de coesão (HAN & KISHITANI, 1984).

3.1.2. Características e propriedades no estado fresco

A seguir serão detalhadas as propriedades das argamassas no estado fresco.

3.1.2.1. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é a mais importante propriedade da argamassa no estado fresco e determina a facilidade com que pode ser misturada, transportada, aplicada, consolidada e acabada. Trata-se de uma propriedade complexa resultante da conjunção de diversas outras propriedades. 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 (Tabela 3.2) (CARASEK, 2007; DAVISON, 1961; ISBERNER, 1969).

De acordo com CINCOTO (1995) a trabalhabilidade não se constitui uma propriedade per si, na medida em que depende do julgamento subjetivo por parte de quem aplica.

Uma argamassa é considerada de boa trabalhabilidade quando se distribui facilmente, preenchendo todas as reentrâncias, não agarra-se à colher durante a projeção, não segrega ao ser transportada, não endurece em contato com substrato de elevada absorção e permanece plástica até a realização do acabamento. A importância de cada propriedade é relativa ao tipo e função da argamassa (CARASEK, 2007; SABBATINI, 1989).

Tabela 3.2 - Propriedades relacionadas com a trabalhabilidade das argamassas

Propriedades	Definição
Consistência	É a maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob ação de cargas.
Plasticidade	É a propriedade pela qual a argamassa tende a conservar-se deformada após a retirada das tensões de deformação.
Retenção de água e de consistência	É a capacidade de a argamassa fresca manter sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam a perda de água.
Coesão	Refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa e as ligações químicas da pasta aglomerante.
Exsudação	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.
Densidade de massa	Relação entre a massa e o volume de material
Adesão inicial	União inicial da argamassa no estado fresco ao substrato

Fonte: CARASEK, 2010.

3.1.2.2. Consistência e plasticidade

A consistência (propriedade pela qual a argamassa resiste à deformação) e a plasticidade (tendência a reter deformação após a redução do esforço) são os principais fatores condicionantes da trabalhabilidade (CARASEK, 1996; CINCOTTO *et al.*, 1995).

Segundo a consistência, a argamassa pode ser classificada em seca, plástica e fluida, sendo determinada pela quantidade de pasta de aglomerante ao redor dos grãos de areia (Figura 3.2).

A consistência da argamassa é influenciada diretamente pela relação água/aglomerante, relação aglomerante/areia, teor de ar incorporado, intensidade e tempo de mistura, granulometria da areia, teor de finos, presença de aditivos e natureza e qualidade do aglomerante. Geralmente o aplicador modifica a consistência e plasticidade da argamassa através da alteração da quantidade de água de emassamento, uma vez que os demais componentes são pré-fixados (CARASEK, 1996; CINCOTTO, 2007).

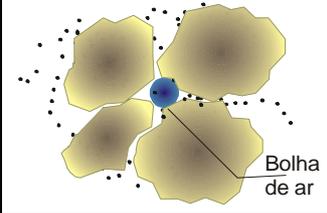
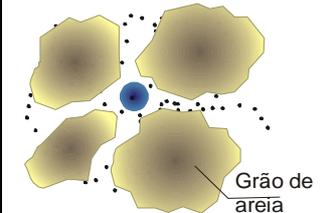
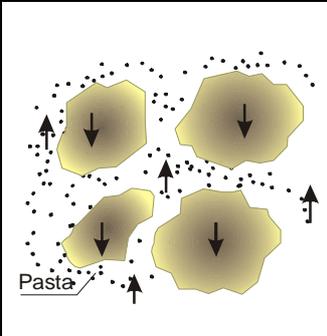
CONSISTÊNCIA	Argamassa seca	A pasta aglomerante somente preenche os vazios entre os agregados, deixando-os ainda em contato. Existe o atrito entre as partículas que resulta em uma massa áspera.	 Bolha de ar
	Argamassa plástica	Uma fina camada de pasta aglomerante adere à superfície dos agregados, dando uma boa adesão entre eles com uma estrutura pseudo-sólida.	 Grão de areia
	Argamassa fluida	As partículas de agregado estão imersas no interior da pasta aglomerante, sem coesão interna e com tendência de depositar-se por gravidade (segregação). Os grãos de areia ao oferecem nenhuma resistência ao deslizamento. Neste caso, a argamassa é tão líquida que se espalha sobre a base, sem permitir a execução adequada do trabalho.	 Pasta

Figura 3.2 - Consistência das argamassas.

Fonte: CARASEK, 2010.

A Figura 3.3 demonstra a influência das variações na composição e na relação água/cimento na consistência da argamassa. Observa-se que apesar da relação aglomerante/areia permanecer constante em todos os traços, quanto maior a proporção de cal, maior o fator água/cimento para se atingir a fluidez da argamassa.

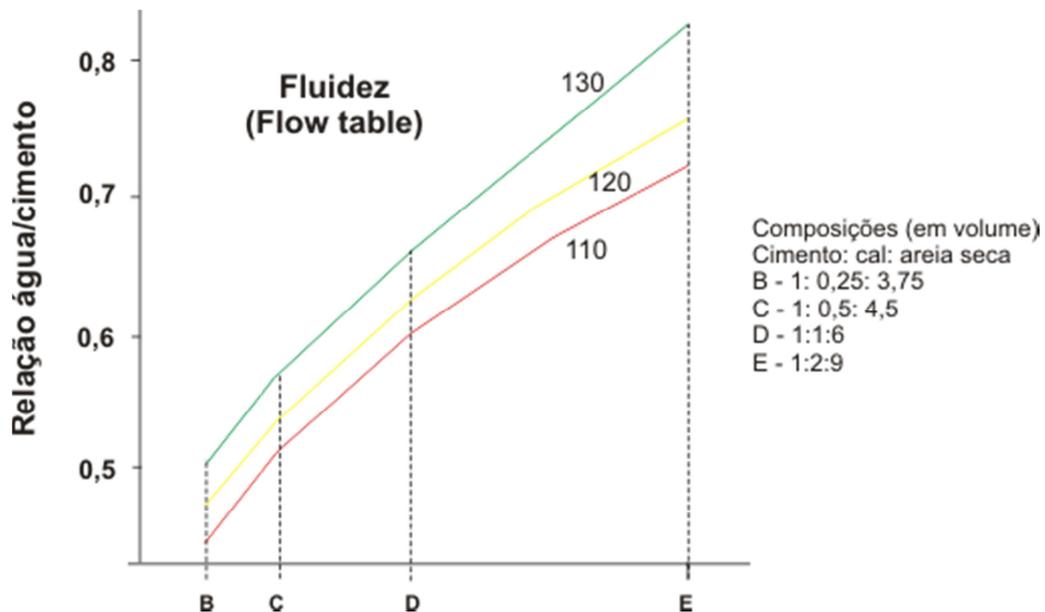


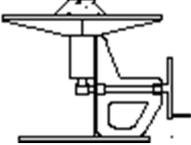
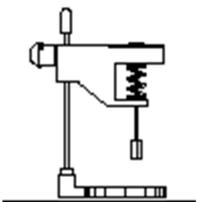
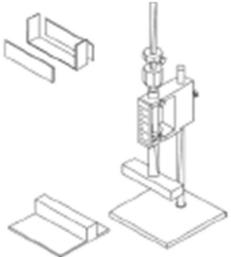
Figura 3.3 - Variação na consistência pela influência das variações na composição de argamassas.

Fonte: CINCOTTO *et al.*, 1995.

Devido às características intrínsecas da mistura, das propriedades dos substratos, da qualidade do aplicador e da técnica utilizada, torna-se muito difícil avaliar, quantificar e prescrever valores de trabalhabilidade das argamassas em laboratório. Existem vários métodos consagrados (Tabela 3.3). A maioria dos estudos que relacionam a consistência e plasticidade da argamassa com sua capacidade de aderência utilizam o ensaio de *flow table*. Entretanto, os métodos utilizados não definem completamente a trabalhabilidade, podendo duas argamassas de mesmo resultado no ensaio *flow table*, obterem resultados práticos de aplicação muito distintos (CARASEK, 2007).

O *Squeeze Flow* é um novo método, mais completo, para a avaliação da trabalhabilidade das argamassas (Figura 3.4). 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 (CARDOSO *et al.*, 2005).

Tabela 3.3 - Métodos empregados para avaliar a consistência e a plasticidade das argamassas

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

Fonte: CARASEK, 2010.

De forma geral, 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. Este ponto oscila entre 200 e 230 mm (CARASEK, 1996).



Figura 3.4 - Squeeze flow.

Fonte: COSTA, 2006.

3.1.2.3. Retenção de água

A retenção de água é a capacidade da argamassa fresca em manter sua consistência ou trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provoquem perda de água. Esta propriedade torna-se mais importante quando a argamassa é aplicada sobre superfícies com alta sucção de água ou sob condições climáticas adversas (CARASEK, 2007; CINCOTTO *et al.*, 1995).

A retenção de água também influencia nas propriedades da argamassa no estado endurecido, uma vez que determinada as condições de hidratação do cimento e da carbonatação da cal, responsáveis pela evolução do processo de endurecimento (CINCOTTO *et al.*, 1995).

Os fatores que influenciam na capacidade de retenção de água de uma argamassa são: a área específica dos materiais constituintes e o número de íons ativos por unidade de superfície; a relação cal/cimento; a relação agregado/aglomerante. Devido à sua grande área específica, os aglomerantes são os principais responsáveis pela retenção de água da argamassa, principalmente a cal com sua elevada superfície específica e capacidade de adsorção de seus cristais (até 100% do seu volume). Outra forma de se aumentar a retenção de água de uma argamassa é através da introdução de aditivos que adsorvam água, como por exemplo, derivados de celulose, ou que impeçam a percolação de água, como por exemplo, aeradores (Figura 3.5) (CINCOTTO *et al.*, 1995; SABBATINI, 1989).

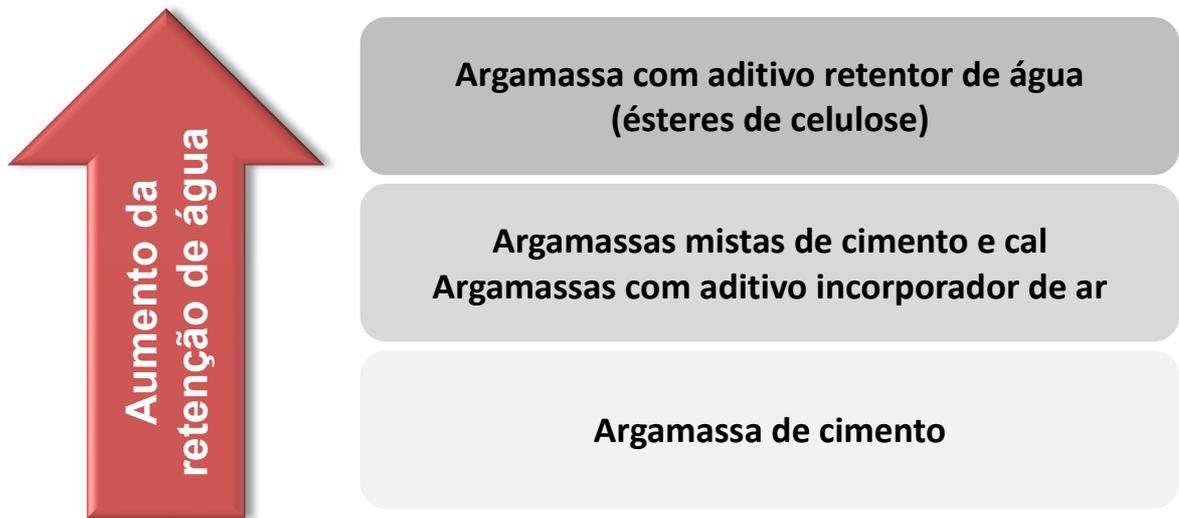


Figura 3.5 - Variação para retenção de água para diferentes argamassas.
Fonte: CARASEK, 2010.

A deficiência desta propriedade por parte da argamassa pode ocasionar: a perda excessiva de água para o substrato, aumentando o potencial de retração por secagem; a redução da resistência de aderência e mecânica devido ao 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 conseqüentemente menor durabilidade e estanqueidade da parede revestida (SABBATINI, 1998).

3.1.2.4. 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. A massa específica da argamassa endurecida é um pouco menor do que o valor no estado fresco, devido à saída de parte da água (CARASEK, 2007). A Tabela 3.4 apresenta uma classificação das argamassas quanto à sua densidade.

Tabela 3.4 - Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco

Argamassa	Densidade de massa A (g/cm³)	Principais agregados empregados	Usos/observações
Leve	< 1,40	Vermiculita, perlito, argila expandida	Isolamento térmico e acústico
Normal	2,30 ≤ a ≤ 1,40	Areia de rio (quartzo) e calcário britado	Aplicações convencionais
Pesada	> 2,30	Barita (sulfato de bário)	Blindagem de radiação

Fonte: CARASEK, 2010.

3.1.2.5. Adesão inicial

Adesão inicial é a capacidade de união inicial entre a argamassa no estado fresco e o substrato. Esta propriedade está diretamente relacionada à reologia da pasta aglomerante, particularmente à tensão superficial. A redução da tensão superficial da pasta favorece a molhagem do substrato, reduz o ângulo de contato entre as superfícies, propicia um maior contato físico com os grãos de areia, tornando-se a responsável pela adesão. A tensão superficial pode ser modificada pela alteração da composição da argamassa, sendo ela inversa do teor de cimento. A adição de cal diminui a tensão superficial da argamassa. Efeitos semelhantes podem ser obtidos através de aditivos incorporadores de ar e retentores de água (CARASEK, 2007).

3.1.3. Características e propriedades no estado endurecido

3.1.3.1. Aderência

A resistência de aderência pode ser definida como a capacidade que a interface substrato-argamassa possui de absorver tensões sem romper-se, sendo uma propriedade que depende da interação de dois materiais. Desta forma, a aderência é significativamente influenciada pelas propriedades da base, tais como porosidade, absorção de água, resistência mecânica, textura superficial (CARASEK, 2007; CINCOTTO *et al.*, 1995; SABBATINI, 1989).

Segundo CARASEK (2007), a aderência também é influenciada pela extensão de aderência, ou seja, quanto maior for a área de contato entre a argamassa e o substrato, maior será a aderência obtida. Sendo assim, pode-se afirmar que a aderência está diretamente relacionada à trabalhabilidade da argamassa, com a

energia de aplicação, além das características e propriedade dos substratos e de fatores externos (Figura 3.6). Cabe ressaltar também a importância do fator humano no desempenho dos revestimentos quanto a aderência. Devido à ergonomia do trabalho a aderência varia em função da altura de aplicação. Os maiores valores de aderência são encontrados em torno de 1,3m de altura, ou seja, na posição em que o operário projeta a argamassa na posição ereta, permitindo maior energia de aplicação (GONÇALVES; BAUER, 2005).

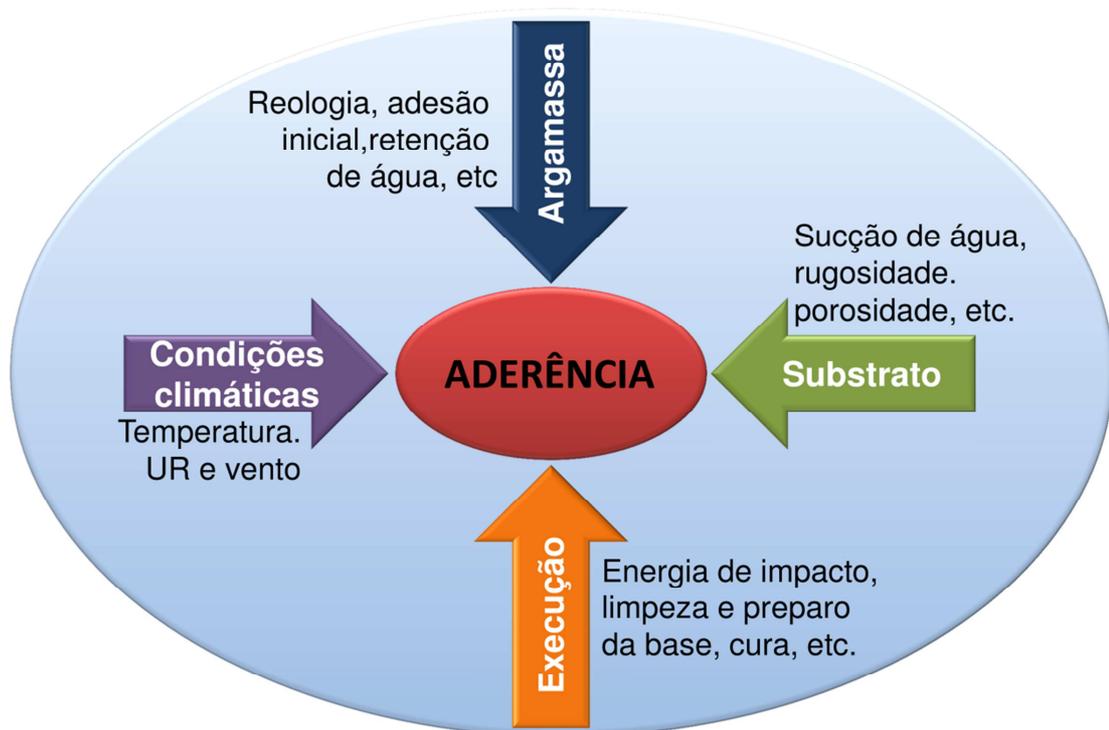


Figura 3.6 - Fatores que exercem influência na aderência de argamassas sobre bases porosas.

Fonte: CARASEK, 2007.

A aderência da argamassa ao substrato ocorre através de um complexo sistema que envolve o transporte do fluido e dos finos da argamassa para o interior da base, seguido da hidratação dos aglomerantes. Desta forma, a aderência entre a argamassa e o substrato depende de três propriedades desta interface: a resistência de aderência à tração; a resistência de aderência ao cisalhamento; e a extensão de aderência, que é a razão entre a área de contato efetivo e a área total possível de ser aderida (CARASEK, 2001; SUGO *et al.*, 2001).

SUGO *et al.* (2001) apresentam os diferentes processos que ocorrem durante o desenvolvimento do sistema de aderência mecânico de uma argamassa à base (Figura 3.7).

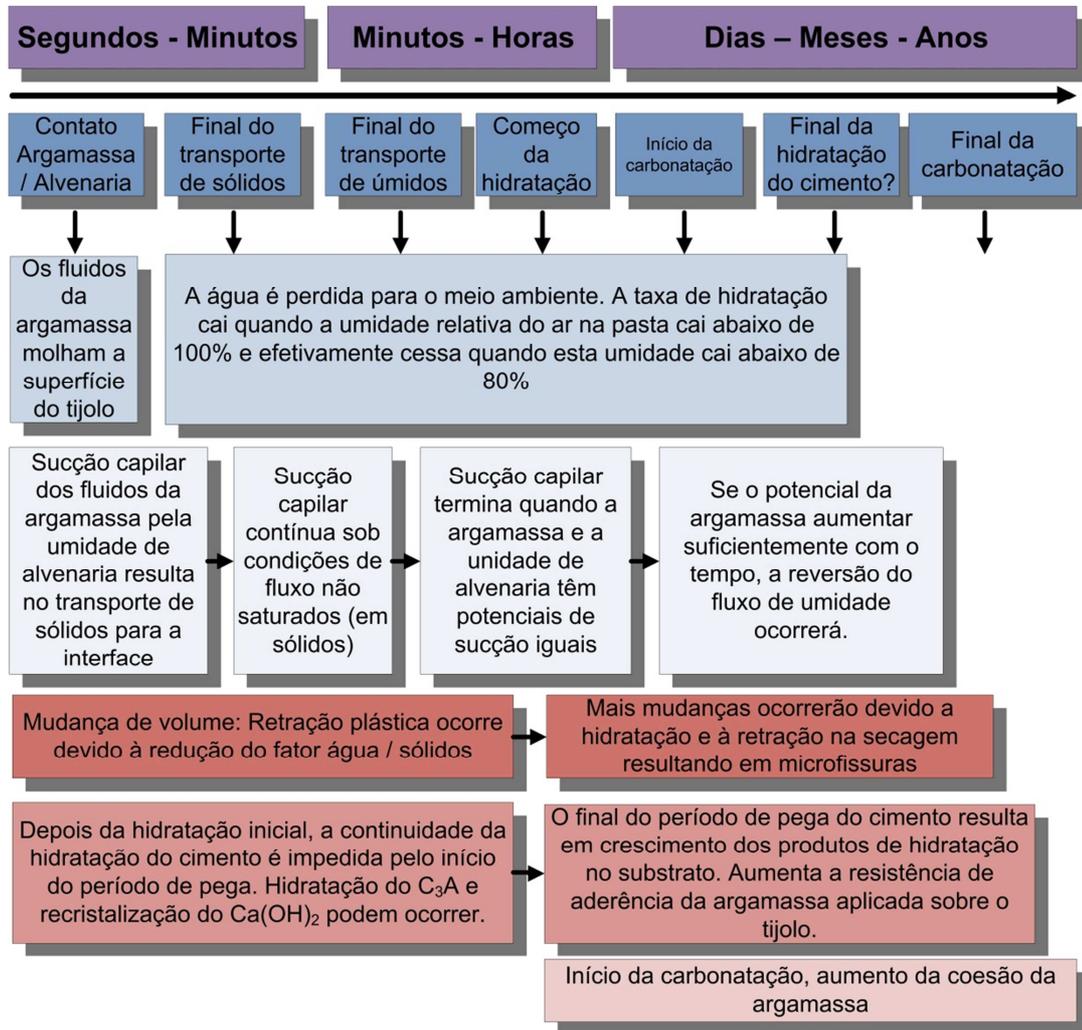


Figura 3.7 - Processos ocorridos durante o desenvolvimento do sistema de aderência mecânico.

Fonte: SUGO *et al.*, 2001.

3.1.3.1.1. Mecanismos de ligação

A aderência da argamassa endurecida ao substrato é, em sua essência, um fenômeno mecânico, causado pela penetração dos componentes aglomerantes, em solução ou na forma coloidal na água de amassamento, nos poros ou rugosidades da base. Com a precipitação dos produtos de hidratação do cimento e da cal, é produzido um efeito de ancoragem mecânica da argamassa à base. O principal responsável por esta

ancoragem é o trissulfoaluminato de cálcio hidratado ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ – etringita) através do seu intertravamento no interior dos poros do substrato (CARASEK, 2007; POLITO, 2008).

Em análises realizadas com o microscópio eletrônico de varredura – MEV, em argamassas aplicadas sobre blocos cerâmicos, é possível identificar uma predominância de cristais de etringita nas regiões próximas à interface. Este aumento localizado da concentração se deve ao fato de que ao se misturar o cimento Portland com a água, a gipsita utilizada como reguladora de pega do cimento dissolve-se levemente e libera íons sulfato (SO_4^{2-}) e cálcio (Ca^{2+}). Em seguida são liberados íons aluminato (AlO^-) e cálcio (Ca^{2+}), provenientes da dissolução do C_3A do cimento. Através do efeito de sucção imposto pelo substrato poroso, estes íons são carreados para o interior dos poros, sendo que, este fenômeno depende da interação hídrica entre a argamassa e alvenaria, da temperatura, da retenção de água, da composição da argamassa e do processo construtivo. Com a precipitação da etringita, os poros são preenchidos prioritariamente por ela, restando menos espaço para a precipitação de outros produtos de hidratação do cimento nesta região, como o CSH, ou mesmo produtos posteriores da carbonatação da cal, como a calcita (Figura 3.8) (CARASEK, 1996; CARASEK, 2007; POLITO, 2008).



Figura 3.8 - Fotomicrografia da interface tijolo/argamassa no MEV- IES, onde se podem ver cristais típicos de etringita (1), responsável pelo intertravamento, saindo de dentro de microfissuras do bloco (2).

Fonte: POLITO, 2008.

Existe ainda outro mecanismo de aderência entre a argamassa e o substrato: a aderência química, onde a resistência é proporcionada por ligações covalentes, ou forças de van der Waals. Este mecanismo representa cerca de 1/10 da resistência total de aderência. Entretanto, o sistema químico pode ser melhorado substancialmente com a introdução de aditivos adesivos (CARVALHO JR., 2005; KAMPF, 2001; TAHA & SHRIVE, 2001).

3.1.3.1.2. Influência dos materiais constituintes

O tipo e as características físicas dos componentes da argamassa podem influenciar nos resultados de aderência, principalmente dos aglomerantes.

Com relação ao cimento, de maneira geral, quanto mais fino, maior a resistência de aderência obtida. No entanto, cimentos de alta resistência inicial, em função da sua finura, podem levar a elevada retração e fissuração. Já a cal, devido à sua contribuição com propriedades como plasticidade e retenção de água, proporciona maior extensão de aderência, pois a argamassa preenche mais facilmente e, de forma mais completa, a superfície do substrato. Desta forma, argamassas com cal, tanto a

olho nu, quanto no nível microscópico, apresentam uma interface mais densa, contínua e com menor incidência de microfissuras do que argamassas somente a base de cimento (Figura 3.9) (CARASEK,2007; POLITO,2008).

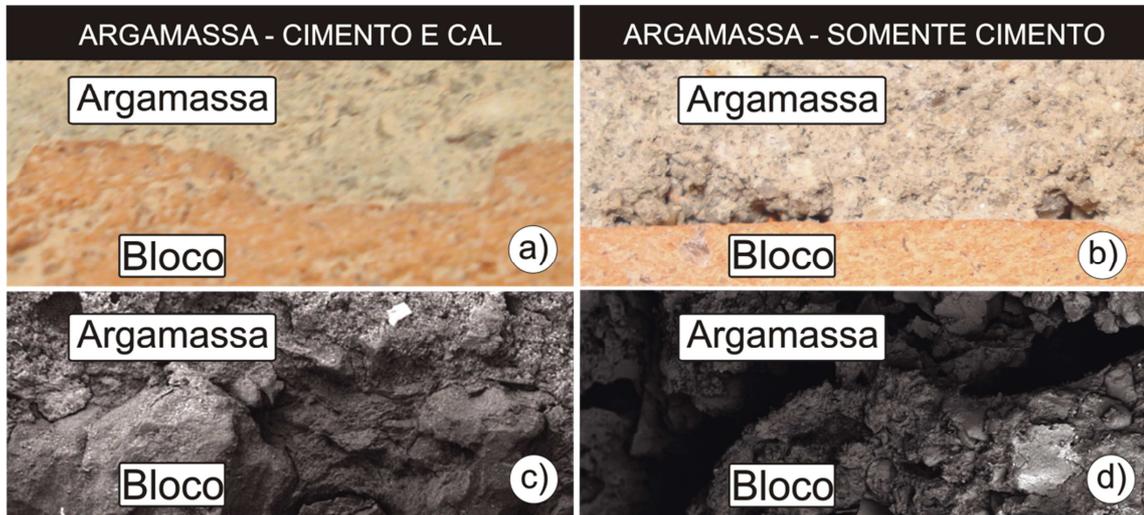


Figura 3.9 - Interface entre argamassa e bloco: a) foto por microscópio estereoscópico de argamassa com boa extensão de aderência; b) foto por microscópio estereoscópico de argamassa com falhas na interface; c) foto por microscopia eletrônica de varredura de uma interface com boa extensão de aderência, aumento 50X; d) foto por microscopia eletrônica de varredura de uma interface com falhas na extensão de aderência, aumento 50X. MEV/IER .

Fonte: POLITO, 2008.

A cal também proporciona maior durabilidade à aderência, uma vez que, diminui o módulo de elasticidade, permitindo à argamassa absorver mais movimentações, além de evitar fissuras e preencher vazios através da reconstituição autógena.

Os teores e características dos agregados também influenciam nos resultados de aderência. De maneira geral, à medida que se aumenta o teor de areia, ocorre uma redução na resistência de aderência e um aumento na durabilidade da aderência pela redução da retração (CARASEK, 1996).

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. 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, em função do fluxo hidráulico (CARASEK, 2007).

Este fluxo de água existente entre a argamassa e o substrato pode ser entendido como uma interação entre dois sistemas de poros. Desta forma, o sentido da água seria dos poros maiores para os menores, ou seja, enquanto os raios médios dos capilares da argamassa forem superiores aos capilares do substrato, o sentido da água será da argamassa para o substrato. Com o avanço da hidratação da argamassa, os raios capilares diminuem, sendo que, quando os capilares da argamassa se tornarem menores do que os do substrato, o sentido do fluxo de água se alternará. O raio médio dos poros da argamassa também pode ser alterado através da proporção entre aglomerante e agregado (CARASEK, 2001).

O substrato também é decisivo nos resultados de aderência. Propriedades como sucção, quantidade de poros capilares e a estrutura dos mesmos (forma, textura, distribuição), além da textura da face de aplicação estão associados ao potencial de aderência do substrato com a argamassa (GALLEGOS, 1995).

Enquanto as características de absorção definem a taxa e o volume de água retirado da argamassa pelo substrato, a qualidade da argamassa define a quantidade de água disponível na interface e a resistência dos produtos de hidratação do cimento, depositados nos poros do bloco. A interação entre a absorção superficial do substrato e as propriedades da argamassa, ou seja, o equilíbrio entre água disponível e água requerida, contribui para o desenvolvimento da aderência na interface (GROOT, 1997; MCGINLEY, 2001).

3.1.3.1.3. Medição da aderência

No Brasil, as normas NBR 13528 (ABNT, 2010) e NBR 15258 (ABNT, 2005) definem o método para avaliação da resistência de aderência, conforme descrito na Figura 3.10.

Neste método, os resultados apresentam, geralmente, alta dispersão, variando da ordem de 10% a 35%. Isto acontece devido ao grande número de fatores que influenciam o resultado. A média e o coeficiente de dispersão de variação dos

resultados obtidos devem ser calculados criteriosamente, em geral, somente para os corpos de prova que apresentam mesmo tipo de ruptura, tendo em vista que a magnitude dos valores de tensão obtidos é diferenciada em função do tipo de ruptura (CARASEK, 2007).

<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 diâmetro). Importante: garantir o corte de toda a camada de revestimento, atingindo o substrato.</p>	
<p>2) Colagem de um dispositivo para acoplar o equipamento de tração (pastilha). Importante: colar a pastilha no centro do CP delimitado pelo corte para evitar a aplicação do esforço de tração excêntrico.</p>	
<p>3) Acoplamento do equipamento de tração e execução de esforço de tração até a ruptura. Obs.: existem vários equipamentos para essa finalidade. 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.</p>	
<p>4) Cálculo da resistência de aderência. Obs.: a NBR 13749 estabelece parâmetros para a avaliação desta propriedade.</p>	<p style="text-align: center;">$R_a = F/A$, em MPa F = carga de ruptura; A=área do CP</p>
<p>5) Análise da superfície de ruptura após o arrancamento, anotando o percentual da cada tipo de ruptura.</p>	

Figura 3.10 - 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, 2010.

Tão importante quanto os valores de resistência de aderência obtidos é a análise da forma de ruptura. A ruptura é denominada como do tipo coesiva quando ocorre no interior da argamassa ou no substrato (tipo B e C, da Figura 3.11). Neste caso, os valores são menos preocupantes, a não ser que sejam muito baixos. A ruptura é denominada como do tipo adesiva (tipo A) quando ocorre na interface argamassa/substrato. Neste caso, os valores devem ser mais elevados, pois existe um potencial maior para patologias. Quando a ruptura acontece na camada superficial da argamassa (tipo D), indica que esta é a camada mais fraca do revestimento. Neste caso, quando os resultados são baixos significa que a resistência inicial é inadequada (pulverulência). E finalmente, quando a ruptura ocorre entre a pastilha e a cola, significa que houve falha na colagem, devendo o resultado ser desprezado (CARASEK, 2007).

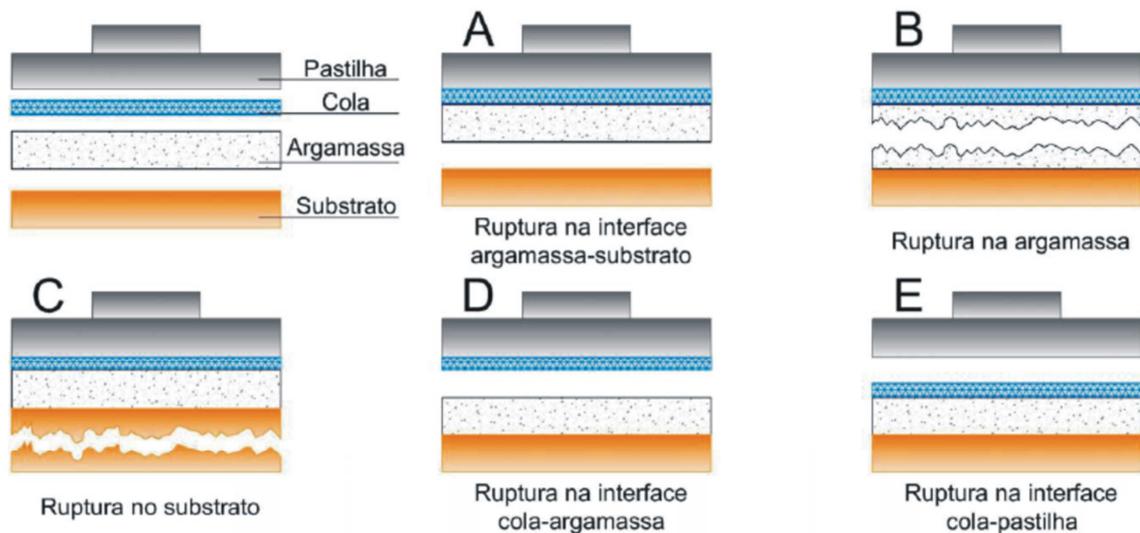


Figura 3.11 - Tipos de ruptura no ensaio de aderência à tração de revestimentos de argamassa, considerando o revestimento aplicado diretamente ao substrato (sem chapisco).

Fonte: CARASEK, 2010.

Somente no tipo A de ruptura, o valor da resistência de aderência é igual ao valor obtido no ensaio. No caso de ocorrerem tipos diferenciados de ruptura no mesmo corpo de prova, deve analisar e registrar o percentual aproximado da área de cada uma delas (Figura 3.12).

Corpo de prova após ensaio de resistência de aderência

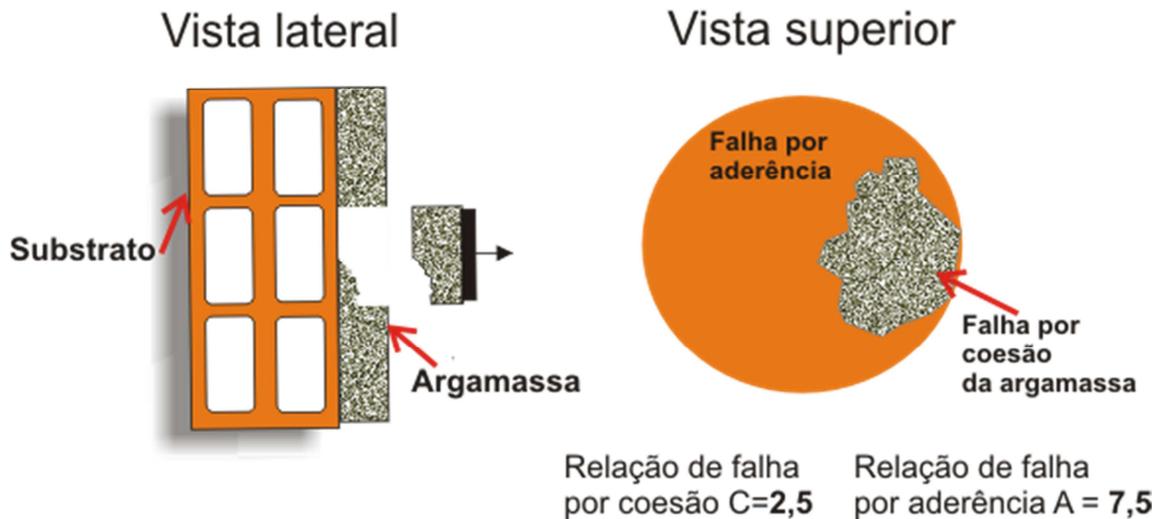


Figura 3.12 - Exemplo de determinação das relações de falha, para representação gráfica pelo método das otimizações de quadrantes.

Fonte: CARASEK, 1996.

Os resultados de resistência de aderência podem ser analisados pelo método de otimização de quadrantes. Neste caso, 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 3.13).

Quando um ponto posiciona-se no quadrante superior A, significa que a ruptura da interface foi predominante e seu valor foi aceitável, uma vez que, é superior ao limite da norma. Entretanto, quando um ponto situa-se no quadrante inferior C, significa que a ruptura ocorreu por coesão ou da argamassa ou do substrato e que seu valor é inferior ao mínimo definido pela norma. Geralmente, as rupturas no ensaio de resistência de aderência 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 (CARASEK, 1996).

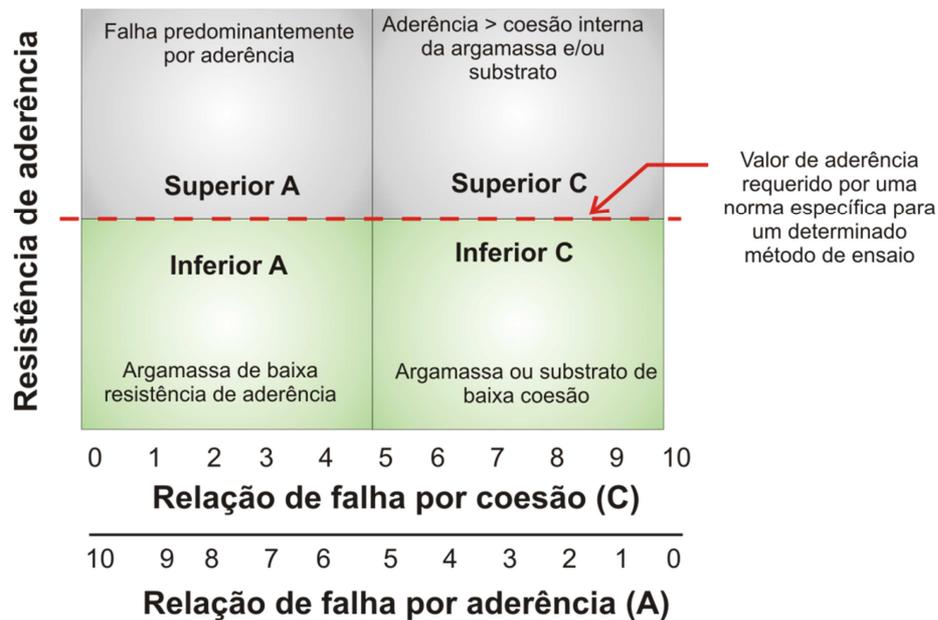


Figura 3.13 - Representação gráfica pelo método da otimização de quadrantes proposto por PAREK *et al.* (1995).

Fonte: CARASEK, 1996.

3.1.3.2. Permeabilidade

A permeabilidade é a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido para o interior de um sólido poroso. É caracterizada pela passagem de água através da argamassa endurecida por meio da infiltração sob pressão, capilaridade ou difusão de vapor de água. A permeabilidade é controlada pelo tamanho e continuidade dos poros. A permeabilidade é determinada, principalmente pela água adicionada, uma vez que seu teor determina o espaço total e, após, o espaço vazio, depois que a água for consumida pelas reações de hidratação ou pela evaporação para o ambiente. Resumindo, a permeabilidade é diretamente proporcional à relação água cimento e inversamente proporcional à resistência da pasta aglomerante. Também influenciam grandemente a permeabilidade: a granulometria da areia; a natureza e teor de aglomerante; e as características do substrato (CINCOTTO *et al.*, 1995; MEHTA & MONTEIRO, 2006).

Na medida em que a hidratação do cimento avança, a porosidade diminui e com ela a permeabilidade. Argamassas a base de cimento são menos permeáveis, diminuindo com o aumento do teor de cimento, enquanto que a adição de cal em argamassas de cimento aumenta significativamente a porosidade total e o tamanho dos poros (CINCOTTO *et al.*, 1995).

3.1.3.3. Resistência mecânica

A resistência mecânica da argamassa é sua capacidade de resistir a tensões de tração, compressão, cisalhamento ou abrasão, no qual o revestimento possa estar submetido devido às cargas estáticas ou dinâmicas provocadas pelo clima, condições de exposição e tipo de uso da edificação. A resistência mecânica é influenciada basicamente pela natureza dos aglomerantes, natureza dos agregados, proporção aglomerante/agregado, relação água/cimento e técnica de execução (CARVALHO JR., 2005).

3.1.3.4. Retração

A retração é proveniente de um mecanismo complexo envolvendo variações de volume da pasta aglomerante e possui papel fundamental no desempenho do revestimento quanto à sua estanqueidade e durabilidade. Parte da retração é provocada pelas reações químicas de hidratação do cimento, parte é devido à perda de água para o substrato, mas, a principal parcela é devido à secagem. A retração esperada é tão maior quanto maior for a relação água/cimento e a espessura do revestimento. Em condições adversas que acelerem a secagem, a argamassa não atinge resistência à tração suficiente para suportar as tensões internas que surgem. Nestas condições aparecem no revestimento endurecido fissuras mapeadas (aproximadamente poliédricas), formando ângulos aproximados de 90 graus (CARASEK, 2007; CINCOTTO *et al.*, 1995).

A tensão à tração na argamassa é função direta do seu módulo de elasticidade, que por sua vez, sofre grande influência da quantidade de cimento no traço. Assim sendo, um proporcionamento adequado pode diminuir o potencial de retração da argamassa (CARASEK, 2007; CINCOTTO *et al.*, 1995) (Tabela 3.5).

Nas primeiras horas após a aplicação, a retração é regulada pela retenção de água da argamassa, daí a importância da adição de cal ao traço como agente inibidor da retração. Argamassas de boa qualidade devem apresentar retração igual ou inferior a 0,07mm/m (AGUILAR *et al.*, 2004; CINCOTTO *et al.*, 1995).

Tabela 3.5 - 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	0,396	65%
	1:0:5	0,64	0,379	58%
	1:3:12	0,88	0,489	76%
Pasta de cimento	0,30	1,416	1,018	72%

Fonte: CARASEK, 2007.

Entre os outros fatores que influenciam a retração, o agregado desempenha o papel mais importante. O agregado atua como um esqueleto indeformável da argamassa, evitando parte das variações. A distribuição granulométrica da areia determina o volume de vazios a ser preenchido pela pasta aglomerante. Desta forma, quanto menor for o empacotamento, ou seja, quanto maior for o volume de vazios, maior potencial de retração da argamassa (CARASEK, 2007; CINCOTTO *et al.*, 1995) (Figura 3.14).

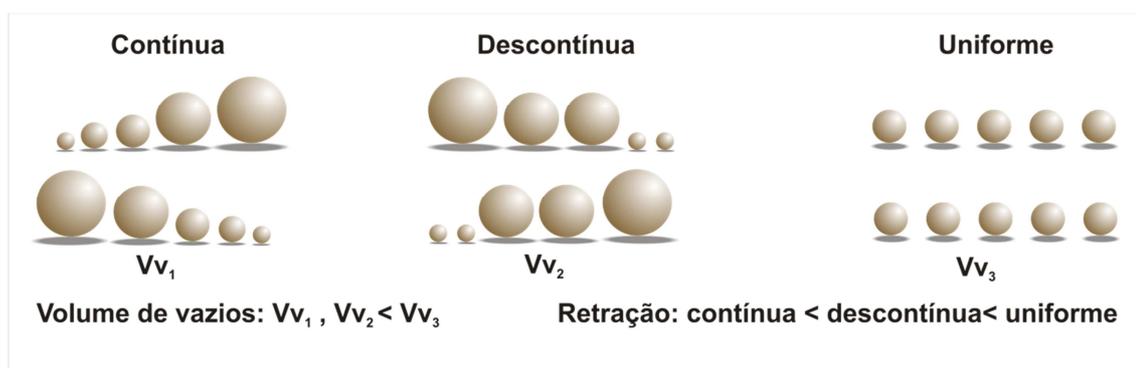


Figura 3.14 - Classificação das areias quanto à distribuição granulométrica e sua influência na retração plástica.

Fonte: CARASEK, 2010.

3.1.3.5. Módulo de deformação

O módulo de deformação pode ser definido 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 romper, sob um determinado nível de tensões (BASTOS, 2007).

Dentre os esforços sofridos pela argamassa, com relação à propriedade de aderência, pode-se destacar: a tensão de cisalhamento causada por variações de umidade na argamassa; os movimentos da estrutura; a retração por secagem; os oriundos da

fluência; e a carbonatação da argamassa. Estes esforços provocam danos progressivos – microfissuras – na argamassa, principalmente a interface com o substrato. A intensidade das tensões de cisalhamento na interface será tão maior, quanto maior for o módulo de elasticidade da argamassa. Desta forma, um baixo módulo de deformação significa, para um dado valor de tensão, que a argamassa terá um valor de deformação alto (AGUILAR *et al.*, 2004; JOHN, 2003).

O módulo de deformação determina a ocorrência de fissuras no revestimento e influi decisivamente sobre o grau de aderência da argamassa ao substrato, sobre a estanqueidade da superfície e sobre sua durabilidade. Em argamassa com baixo módulo de deformação as tensões são dissipadas na forma de micro-fissuras nas interfaces microscópicas entre o grão de agregado e a pasta aglomerante, enquanto que em argamassa com alto módulo de deformação, as tensões se acumulam e a ruptura ocorre na forma de fissuras macroscópicas. Desta forma, a micro-fissuração atua de forma favorável ao desempenho mecânico, uma vez que aumenta a capacidade de deformação da argamassa nas primeiras idades, relaxando as tensões de tração existentes (BASTOS, 2003; CARVALHO JR., 2005; CINCOTTO *et al.*, 1995).

O conhecimento dos fatores que afetam o módulo de deformação das argamassas não está consolidado no meio técnico, tanto no que diz respeito aos fatores intrínsecos (composição, porosidade, etc.), quanto extrínsecos (temperatura, movimentação do substrato, etc) à argamassa. Também não existe consenso sobre qual a metodologia de ensaio mais adequada para determinação desta propriedade. Os principais parâmetro em que se baseiam os métodos de ensaio são o tipo de ação física a ser aplicada sobre o corpo de prova, a velocidade de carregamento e a forma de medir as deformações. Neste trabalho, será utilizado o método de determinação estático através da flexão (FIGUEIREDO *et al.*, 2007).

Os ensaios de módulo de deformação estático apresentam certas dificuldades executivas associadas à medição das deformações ocorridas durante o carregamento, uma vez que, as deformações são muito pequenas (10^{-6}). Normalmente utilizam-se *strain gages*, ou seja, dispositivos elétricos para medição da deformação (BASTOS, 2003).

3.2. Microestrutura

O contínuo desenvolvimento das argamassas está associado a um melhor entendimento de sua microestrutura, buscando identificar os mecanismos responsáveis pela aderência, resistência mecânica, capacidade de deformação e durabilidade.

3.2.1. Microestrutura dos compostos cimentícios

O cimento Portland, durante sua hidratação, sob condições normais, propicia o desenvolvimento de diversas fases com morfologias distintas: gel de silicato de cálcio hidratado (CSH); hidróxido de cálcio (CH); trissulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita) e monossulfatoaluminato de cálcio hidratado. A formação da microestrutura está relacionada a diversos fatores como a composição do clínquer, a finura da moagem, o processo de transporte da água na microestrutura do cimento hidratado, entre outros (PAULON, 2005; STARK *et al.* 2001).

O hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), também denominado portlandita, possui estequiometria definida e forma cristais cuja morfologia muda durante o curso de sua hidratação. Representa de 20% a 25% do volume de sólidos em uma pasta de cimento completamente hidratada. Nas primeiras idades, aparece como prismas hexagonais distintos, muitas vezes com dezenas de micrometros de espessura (Figura 3.15). Entretanto, sua morfologia pode variar bastante, apresentando desde pilhas de placas bem definidas até formas indefinidas. Posteriormente os cristais crescem maciçamente, perdendo seu contorno hexagonal e invadindo e envolvendo outras regiões e constituintes. Sua morfologia é definida pelo espaço disponível. Sua contribuição para resistência da argamassa é limitada em função de sua área específica consideravelmente menor do que outros constituintes como o CSH (SILVA, 1998; MEHTA; MONTEIRO, 2006).

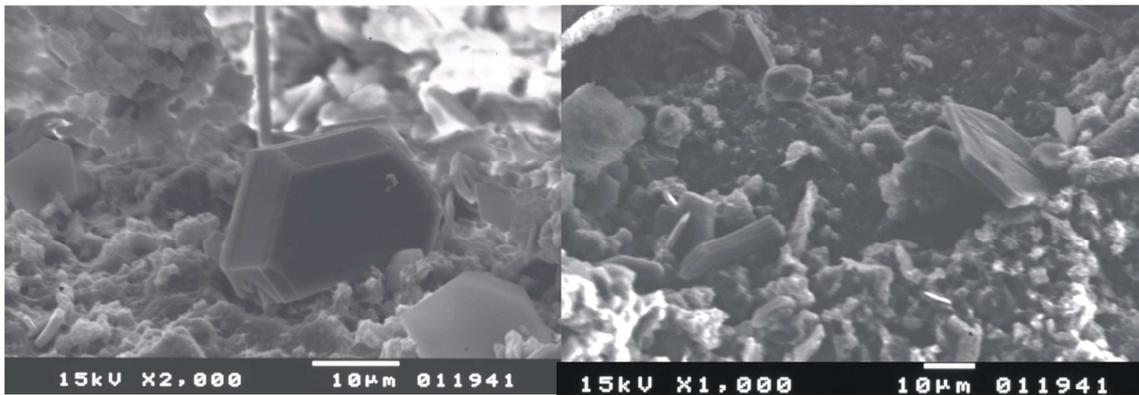
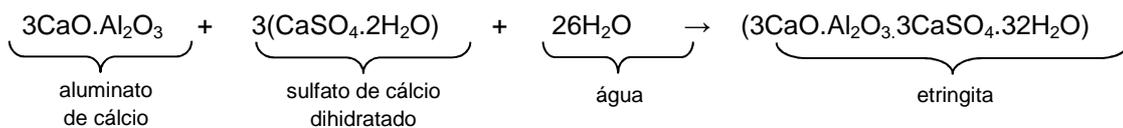


Figura 3.15 - Fotomicrografia de morfologia típica de portlandita. MEV-IER.

Fonte: POLITO, 2008.

Os sulfoaluminatos de cálcio representam de 15% a 20% do volume de sólidos da pasta hidratada, sendo os principais compostos a etringita e monossulfato de cálcio. A etringita (AFt) tem sua formação condicionada a uma alta relação $\text{SO}_4^{2-}/\text{Al}(\text{OH})_4^-$, junto com a presença de Ca^{2+} , OH^- e água, conforme a seguinte equação:



A etringita apresenta aspectos morfológicos de bastões estreitos ($0,5\mu\text{m}$), relativamente longos ($4-5\mu\text{m}$), com lados completamente paralelos e sem ramificações, ocos ou maciços. Sua morfologia pode ser definida como agregados radiais de fitas euédricas (Figura 3.16). Os cristais podem se apresentar agrupados formando grupos euédricos de até $0,8\mu\text{m}$ de diâmetro. Seu crescimento é no sentido do comprimento dos bastões e pode possivelmente ser atribuído à liberação do sulfato e penetração do íon alumínio (CARVALHO JR., 2005; SILVA, 1998, DUPIN *et al.*, 1988; MEHTA; MONTEIRO, 2006; STARK *et al.*, 2001).

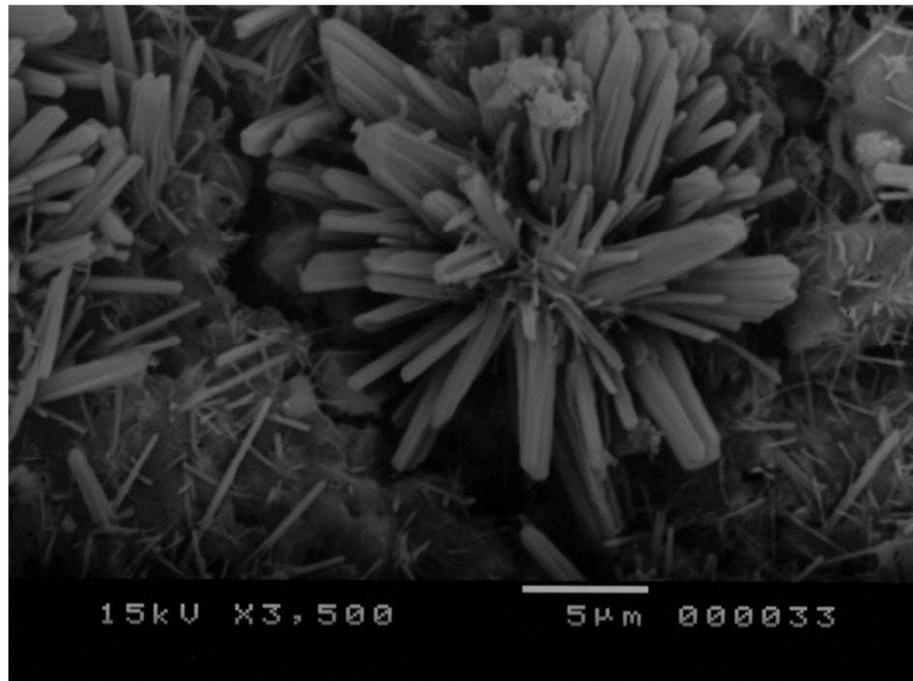


Figura 3.16 - Etringita formada no interior de um poro. MEV-IES.

Fonte: POLITO, 2008.

A morfologia da etringita pode sofrer pequenas alterações em função da adição de cal hidratada na argamassa. Quanto maior o consumo de cimento, maior o comprimento das agulhas. À medida que se introduz cal hidratada, os cristais se tornam mais curtos e mais largos (POLITO, 2008), Figura 3.17.

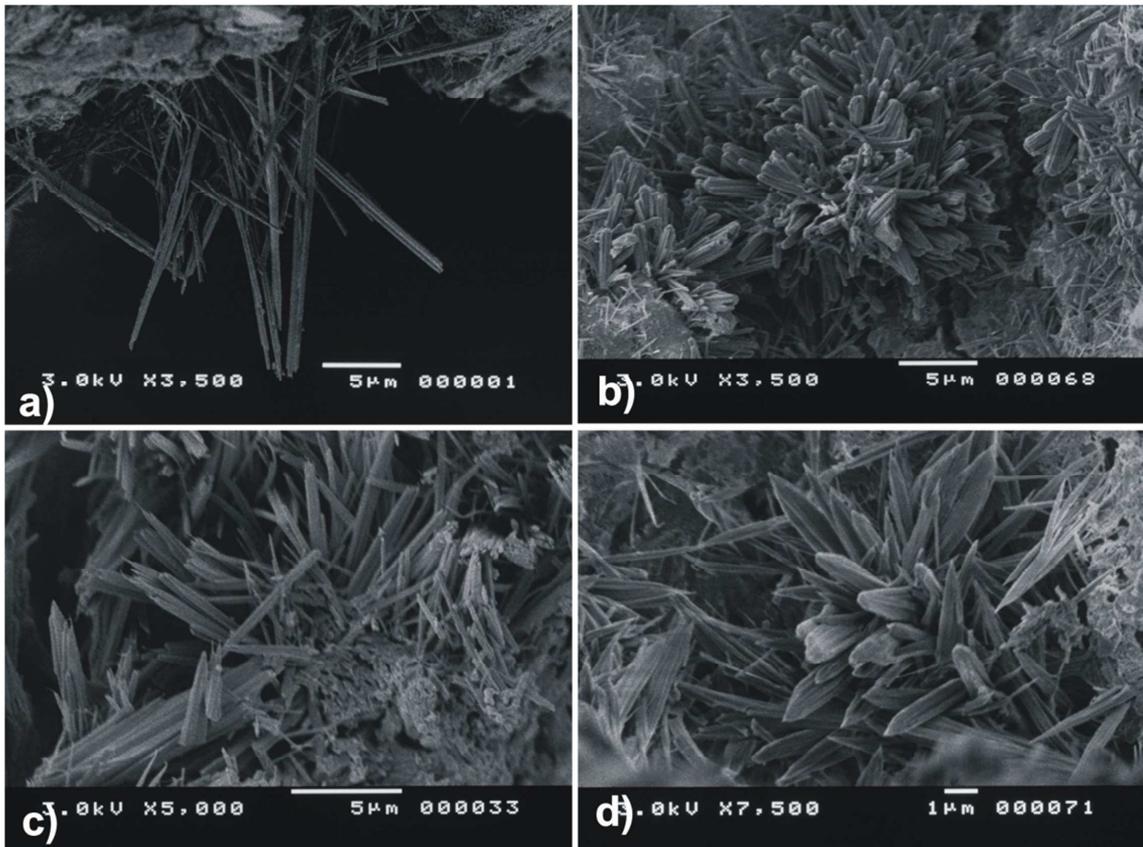
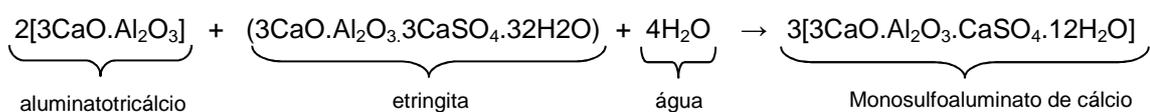


Figura 3.17 - Fotomicrografias dos cristais de etringita. MEV-IES. a) traço sem adição de cal hidratada - morfologia típica de cristais de etringita; b); c) e d) traços com adição de cal hidratada – cristais de etringita com diferenças morfológicas.

Fonte: POLITO, 2008.

A etringita é o primeiro cristal a se formar devido à alta relação sulfato/alumínio na fase aquosa durante a primeira hora de hidratação. Depois de o sulfato ter sido consumido, as características da solução se alteram com o aumento da concentração de aluminatos devida à renovação da hidratação do C_3A e do C_4AF . A etringita torna-se então instável e é gradativamente convertida em monossulfoaluminato de cálcio (TAYLOR, 1996).

A reação de conversão da etringita em monossulfoaluminato de cálcio é descrita na seguinte equação:



O silicato de cálcio hidratado (CSH) representa de 50 a 60% da massa da pasta endurecida. Apresenta-se quase amorfo e é encontrado em diversas morfologias diferentes, difíceis de serem identificados e classificadas (varia de fitas pouco cristalinas a um reticulado cristalino). Não possui composição estequiométrica fixa, tornando sua caracterização no nível atômico muito difícil. A relação C/S varia entre 0,8 e 3,0 e seu arranjo atômico é ainda uma questão em aberto. O CSH é associado a altas resistências mecânicas e altos módulos de elasticidade e também a grandes movimentações dimensionais por variação de umidade (MEHTA e MONTEIRO, 2006; SILVA, 1998)

3.2.2. Esquema de hidratação

Ao se adicionar água ao cimento, a gipsita, utilizada como reguladora de pega, 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 íons de alumínio e de cálcio.

Os primeiros núcleos a se formarem são aqueles compostos pelos íons mais móveis, a etringita e a portlandita. Ao se formarem, os cristais de etringita possuem comprimento aproximado de 500nm e espessura superior a 250 nm. Esta morfologia permanece praticamente inalterada durante as primeiras horas de hidratação. O principal crescimento dos cristais ocorre entre 12 e 24 horas onde o comprimento dos cristais supera 2,5 μm enquanto seu diâmetro permanece inalterado. Nesta etapa, como ainda não existem obstáculos ao seu crescimento, os cristais atingem tamanho considerável.

Os cristais de etringita formam uma rede aberta e são progressivamente saturados com íons menos móveis, tais como silício e alumínio, formando uma segunda geração de cristais nos vazios deixados pelos cristais de primeira geração. Formam-se então CSH e, novamente etringita e portlandita em tamanhos menores. As fases CSH são pequenas (aproximadamente 200nm de comprimento), isoladas e fortemente heterogêneas. Em 24 horas, a fase CSH cresce continuamente até o diâmetro de 600nm. Com pontas de agulhas de somente 5nm aproximadamente, o CSH promove uma forte interligação de microestruturas. A evolução das fases hidratadas durante o processo de hidratação é retratada na Figura 3.18 (CARASEK, 1996; MEHTA & MONTEIRO, 2006; PAULON, 2005; STARK & MÖSER, 2001).

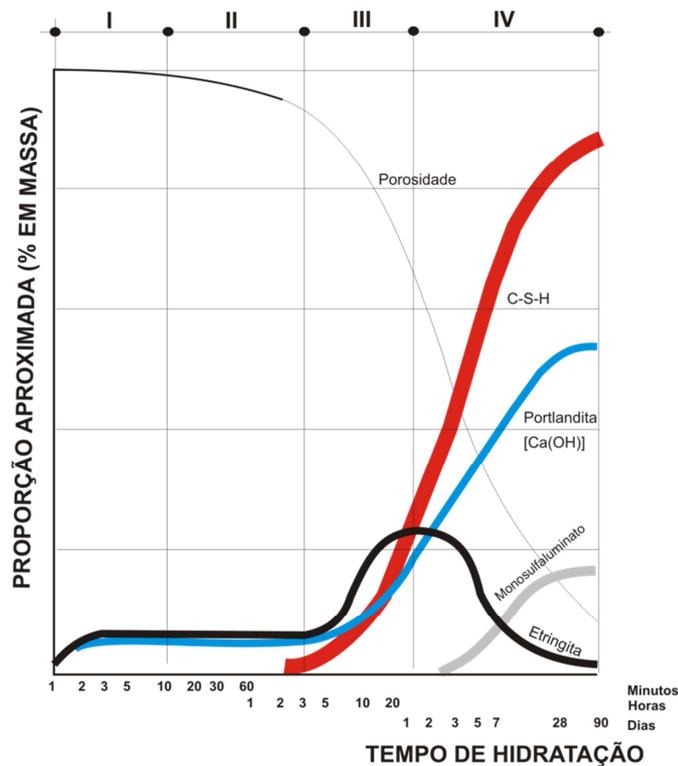


Figura 3.18 - Curva aproximada de evolução das fases hidratadas e da porosidade da pasta de cimento em função do tempo de hidratação.

Fonte: ZAMPIERI, 1993.

A presença de cal hidratada em argamassas mistas altera a composição mineralógica dos produtos do endurecimento. Certamente, o aumento do teor de Ca(OH)_2 e Mg(OH)_2 , que com a carbonatação se transformam em carbonato, diminuem a fração volumétrica ocupada pelo CSH do cimento. Entretanto, este aspecto é pouco estudado do ponto de vista científico.

3.2.3. Microestrutura da interface argamassa-substrato

A região de contato entre a argamassa e o substrato, também chamada de zona de transição, é uma região peculiar. É a região mais frágil do sistema e merece atenção especial quanto a sua microestrutura. As características da microestrutura da pasta na zona de transição dependem de vários fatores (CARASEK, 1996; PAULON, 2005).

Ao se analisar a argamassa em diferentes distâncias da zona de contato, à medida que se aproxima do substrato, maior será a concentração de etringita e menor a concentração de portlandita. Este fato é explicado pelo processo de hidratação do cimento, onde os íons de sulfato são os primeiros a serem liberados. Estes íons são sugados pelo substrato poroso e levados à interface, onde se depositam sobre os

grãos de aluminato tricálcico e iniciam a formação dos cristais de etringita (CARASEK, 1996).

O processo de sucção proveniente do substrato, também chamado de “efeito superfície”, provoca o acúmulo de um filme de água próximo à superfície, sendo responsável por uma elevada relação a/c nesta região. Entretanto, sobre substratos muito absorventes, este pode retirar parte da água de emassamento da argamassa próxima, não deixando água suficiente para a hidratação completa da pasta, resultando em uma região de menor resistência.

Os produtos de hidratação dos aglomerantes da pasta penetram a profundidades entre 0,1 e 1,6 mm no interior do substrato. A principal fase encontrada é a etringita. Não existe evidência de penetração de CSH, hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio (CARASEK, 1996; POLITO, 2008) (Figura 3.19).

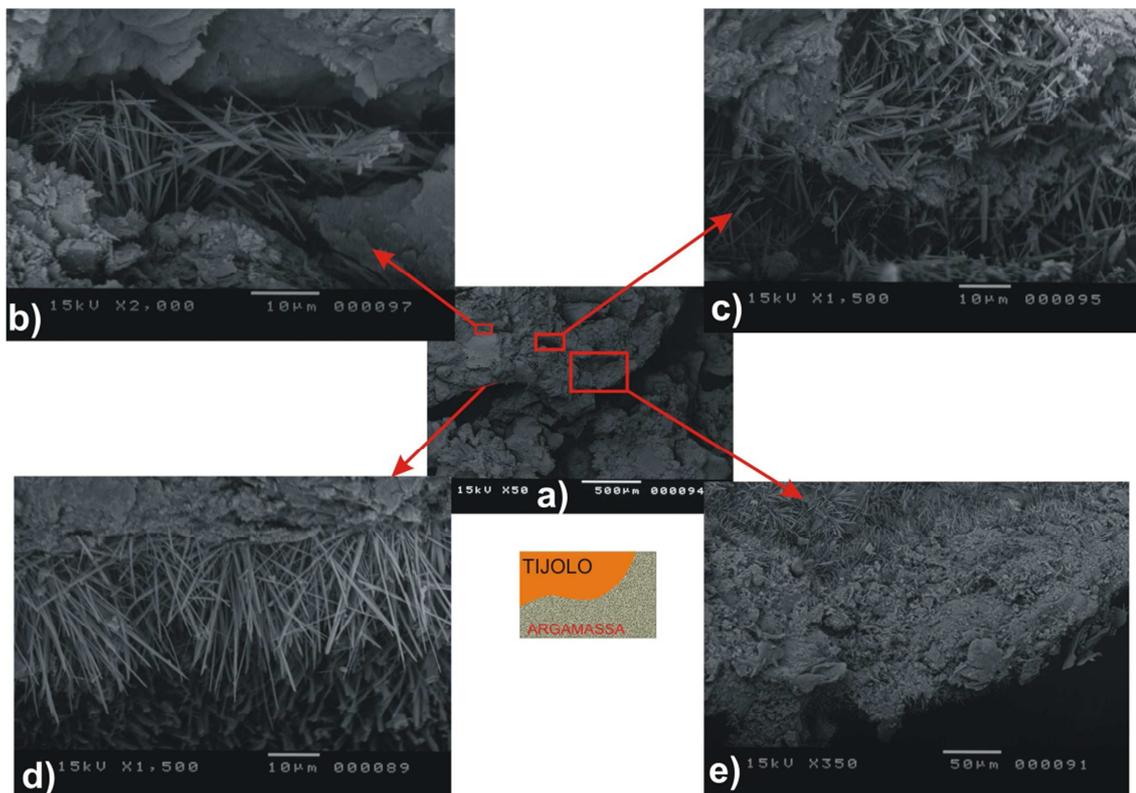


Figura 3.19 - Fotomicrografias do perfil do bloco cerâmico aderido à argamassa - 1:0:6. a) vista geral; b) cristais de etringita no interior de poros a 100µm de profundidade; c) cristais de etringita no interior de poros a 100µm de profundidade; d) cristais de etringita perpendiculares à superfície do substrato; e) cristais de etringita no interior de poros a 100µm de profundidade. MEV-IER.

Fonte: POLITO,2008.

Ao se destacar a argamassa do substrato, o rompimento não ocorre exatamente na interface (região rica em etringita) e sim em uma camada adjacente, com aproximadamente 50 a 200 μm . Desta forma, trata-se de uma falha de coesão da argamassa próxima à interface e não uma falha de aderência ao substrato. Nas regiões com maior quantidade de pasta, os principais produtos identificados foram CSH gel, hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio (calcita). Entretanto, nas regiões com menor quantidade de pasta observam-se, predominantemente, cristais de etringita. (CARASEK, 1996).

Desta forma, pode-se afirmar que a aderência é um fenômeno mecânico proveniente do intertravamento de cristais de etringita no interior dos poros do substrato (CARASEK, 1996), como ilustrado na Figura 3.20.

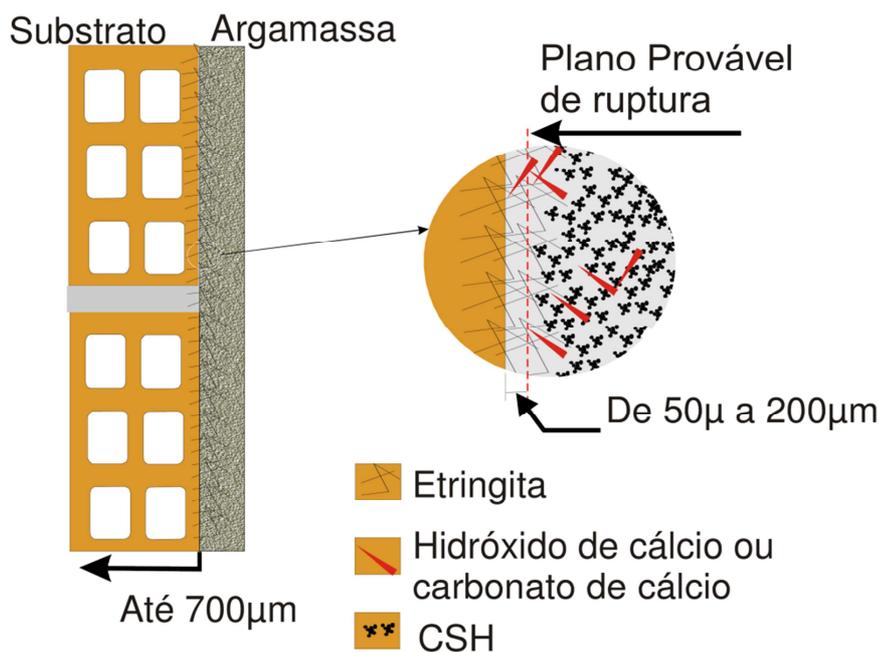


Figura 3.20 - Representação esquemática do mecanismo de aderência entre argamassa e bloco cerâmico.

Fonte: CARASEK, 2010.

3.2.4. Métodos de investigação e análise microestrutural

3.2.4.1. Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

O MEV (microscópio eletrônico de varredura) é reconhecido por sua versatilidade devido à facilidade de preparação das amostras e a possibilidade de combinar análise

microestrutural com análise química (EDS). O equipamento pode alcançar aumentos de até 200.000 vezes, com uma resolução intrínseca da ordem de 0,8 a 5nm. Apresenta profundidade de foco com formação de imagens tridimensionais (BRANDÃO, 2010; MOLIN, 2007).

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. Componentes desta radiação são coletados pelos detectores específicos e o sinal resultante é amplificado e exibido num tubo de raios catódicos ou tela de televisão, varrido em sincronismo com a varredura da amostra (CARVALHO JR., 2007; PAULON, 2005). BRANDÃO (2010) identifica os processos de interação possíveis do elétron com a matéria conforme ilustrado na figura 3.21.

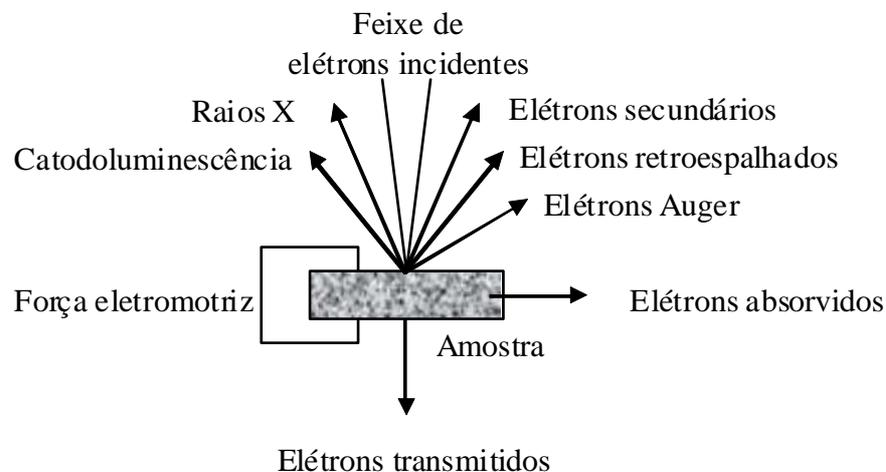


Figura 3.21 - Processos de interações possíveis durante a incidência de um feixe de elétrons em uma amostra sólida.

Fonte: BRANDÃO, 2010.

Os elétrons secundários apresentam energia relativamente baixa (<100 eV) e provém de uma área (volume) relativamente pequena da amostra (<10 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 fases com menores massas específicas terão tonalidade mais escura, e

vice-versa. Com relação à topografia, os topos apresentam tonalidades mais claras e os vales tonalidades mais escuras. Os elétrons secundários fornecem imagens de maior resolução, com grande profundidade de campo, permitindo observar a morfologia dos cristais com informação tridimensional da amostra analisada, sendo de grande utilidade na obtenção de informações topográficas e visualização de detalhes da microestrutura dos poros e de interstícios entre as partículas. (BRANDÃO, 2010; MOLIN, 2007; PAULON, 2005).

Os elétrons retroespalhados apresentam energia relativamente alta (15 a 25 keV) e provém de uma área de aproximadamente 100nm de diâmetro. Apresentam média resolução e potencial de formação de imagens com aumentos máximos de cerca de 5000X, em instrumentos convencionais. O contraste depende da massa específica do material, da topografia e ainda da composição química (número atômico) do material analisado. O coeficiente de retroespalhamento varia diretamente com o número atômico do material analisado, possibilitando obter imagens tridimensionais e informações gerais quanto à composição química (BRANDÃO, 2010; PAULON, 2005).

Para realização 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 (de 5 a 20 nm de ouro ou carbono), pela técnica de *sputter* e *arco voltáico*. Desta forma, a amostra, agora condutora, é aterrada no momento da microscopia, permitindo que a carga negativa e o calor oriundos da absorção dos feixes de elétrons se dissipem (BRANDÃO, 2010; PAULON, 2005; RIBAS, 1996).

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 (MOLIN, 2007; STARK, 2001).

3.2.4.2. Microanalisador EDS

O sistema EDS (energy-dispersive spectrometry) possibilita a determinação da composição qualitativa e semiquantitativa das amostras, a partir da emissão de raios-X característicos. O equipamento é acoplado ao MEV e possibilita identificar a composição de regiões com até 1,5 μm de diâmetro. As principais características do analisador são: funcionamento conceitualmente simples; não possui partes móveis; relativamente barato em comparação aos demais métodos e gera espectro

simultâneo. O EDS desempenha papel fundamental na identificação das fases formadas pela hidratação (SILVA, 1998; DAL MOLIN, 2007; BRANDÃO 2001).

O limite de detecção é da ordem de 1%, mas pode variar de acordo com as especificações utilizadas durante a análise. A identificação dos elementos presentes nas amostras pode durar de 10 s a 100 s, dependendo da quantidade existente. A precisão também varia em função da quantidade dos elementos, sendo mais preciso à medida que a quantidade aumenta. O limite de detecção é maior para os elementos de maior número atômico.

3.2.4.3. Fluorescência de raios-X (FRX)

A fluorescência de raios-X (FRX, ou energy-dispersive X-ray fluorescence – EDXRF) é uma técnica analítica, relativamente simples e, em geral, não destrutiva, utilizada na determinação qualitativa e quantitativa de elementos que compõem uma amostra.

A espectrometria de raios-X é baseada na perturbação dos orbitais eletrônicos dos átomos, que pode ser realizada pelo bombardeamento da espécie com elétrons de alta energia, raios-X de maior energia, raios gama ou partículas aceleradas carregadas. O termo fluorescência de raios-X refere-se especificamente à excitação por um feixe de raios-X primário. As emissões consistem em um contínuo da energia de raios-X e radiações características de cada elemento (CARVALHO JR., 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 preciso. Como possui um limite de detecção baixo, da ordem de partes por milhão, e ampla capacidade de análise, com boa reprodutibilidade, a fluorescência de raios-X é uma técnica utilizada tanto na quantificação de elementos em quantidades maiores, quanto menores e até traços. As amostras analisadas podem estar na forma líquida, em pó ou pastilhas vítreas (MOLIN, 2007; BRANDÃO, 2010).

4. METODOLOGIA

Na parte experimental deste trabalho foram executadas painéis em alvenaria de bloco cerâmico e sobre estes foram aplicados revestimentos de três diferentes tipos de argamassas. As únicas variáveis do estudo são os traços das argamassas, permanecendo fixo o tipo de substrato, o método e as condições de aplicação. As argamassas foram caracterizadas tanto no estado plástico, quanto no estado endurecido. Também foram extraídas amostras para realização de ensaios químicos. Neste capítulo é apresentada a caracterização dos materiais e dos métodos utilizados neste trabalho.

4.1. Seleção dos materiais e composição das argamassas

4.1.1. Bloco cerâmico

Foram utilizados para execução das alvenarias blocos cerâmicos de vedação de oito furos e com dimensões de 29 cm X 19 cm X 9 cm (Figura 4.1). A escolha do bloco cerâmico como substrato foi motivada pela larga utilização deste material pelas construtoras e por se tratar de um produto normatizado.

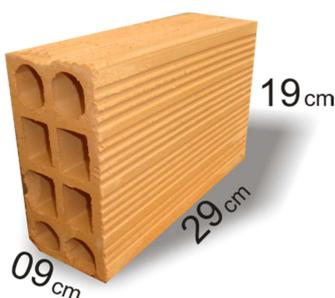


Figura 4.1 - Bloco Cerâmico.

Este bloco é produzido por extrusão e possui ondulações em suas laterais com a finalidade de aumentar sua área superficial e, conseqüentemente, facilitar a aderência das argamassas. A argila utilizada em sua confecção é oriunda da região metropolitana de Belo Horizonte.

Os blocos utilizados foram submetidos a ensaios amostras de 4 conjuntos, sendo cada um composto por 5 blocos cerâmicos. Os ensaios foram realizados conforme as normas NBR 15270-3:3:2005 – Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos e ensaios e NBR 15270-2:2005 – Bloco cerâmico para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos.

Tabela 4.1 - Resultado do ensaio de absorção de água

Média de absorção de água	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Lote 4	Média geral	Especificado (AA%)
	19,7%	18,7%	19,6%	19,5%	19,4%	8≤AA≤22

AA – Índice de absorção d água

Os blocos cerâmicos utilizados no experimento apresentaram adequada absorção de água, conforme especificações da NBR 15270. Este resultado significa que existe porosidade suficiente no bloco para a penetração dos produtos de hidratação dos aglomerantes, sem que, no entanto, o mesmo retire água em excesso da argamassa, prejudicando sua hidratação.

4.1.2. Cimento

Para produção das argamassas na área de testes foi utilizado o cimento Portland - CP II – E32. Este cimento foi escolhido devido a sua ampla utilização no mercado da construção civil e também, devido ao fato de apresentar características adequadas a sua utilização em argamassas de revestimento, tais como, tempo de início de fim de pega, resistência mecânica e potencial de fissuração da pasta.

O cimento utilizado atendeu a todos os requisitos normativos de propriedades e desempenho, conforme apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Resultado dos ensaios de caracterização do cimento CP II E- 32

Ensaio de caracterização do cimento	NBR 11578	
Consistência normal – NBR NM 43	28,4%	-
Finura na # n°200	0,36%	≤ 12,0%
Área sup. específica Blaine – NBR NM76	3740,0cm ² /g	≥ 2600cm ² /g
Massa específica – NBR NM 23	3,01g/cm ³	-
Tempo de pega – Início (min) – NBR NM 65	3:25 horas	≥1 hora
Tempo de pega – Fim (min) – NBR NM 65	4:23 horas	≤12 hora
Resistência à compressão (NBR 7215)	3 dias	≥ 10,0MPa
	7 dias	≥ 20,0MPa
	28 dias	≥ 32,0MPa

4.1.3. Cal

A cal utilizada no estudo foi a cal hidratada CH-I – calcítica, aditivada e com percentual de óxidos não hidratados menor do que 10% e aditivo incorporador de ar. Desta forma, foi possível a mistura do traço de uma única vez e sua aplicação imediata, eliminando assim a etapa de maturação prévia da mistura cal e areia. A cal calcítica é um produto bastante comum na região de Belo Horizonte devido a proximidade de jazidas de calcário.

4.1.4. Areia

A areia utilizada nos traços 1:0:6 (cimento:cal:areia) e 1:1:6 (cimento:cal:areia) foi originária de rio, lavada, de granulometria média. O material foi peneirado utilizando-se peneira com # 2,4 mm de abertura, com a finalidade de retirar impurezas presentes. Este procedimento foi adotado tanto para o material ensaiado, quanto para o material misturado para aplicação.

A areia foi ensaiada segundo as seguintes normas:

- NBR 7211 – Agregado para concreto – Especificação;
- NBR 7810 - Agregado em estado compactado seco – Determinação de massa unitária;
- NBR NM 30 – Agregado miúdo – Determinação da absorção de água;
- NBR NM 46 – Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira de 75 micrômetros, por lavagem;
- NBR NM 49 – Agregado fino – Determinação de impurezas orgânicas;
- NBR NM 52 – Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente;
- NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica;
- NBR 7218 – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis
- NBR 7251 – Agregado em estado solto – Determinação de massa unitária.

Tabela 4.3– Resultados dos ensaios de caracterização da areia

Ensaio	Resultado		NBR 7211	
Massa específica	2,35g/cm ³		Não especificado	
Teor de materiais pulverulentos	8,2% (**)		≤ 5,0%	
Absorção de água	7,3%		Não especificado	
Torrões de argila	4,9(**)		≤ 3,0%	
Impurezas orgânicas e húmicas	Mais clara		Mais clara	
Massa unitária	Seca H=4,0%	1,296kg/dm ³ __ kg/dm ³	Não especificado	
Composição granulométrica	# (mm)	% Retida Indiv. Acum.		Zona utilizável
	9,5	-	-	0
	6,3	-	-	0 a 7
	4,8	-	-	0 a 10
	2,4	0,4	0	0 a 25
	1,2	2,4	3	5 a 50
	0,6	13,2	16	15 a 70
	0,3	24,1	40	50 a 95
	0,15	29,3	69	85 a 100
	Fundo	30,6	100	—
Mód. Finura	1,28(**)		Não especificado	
Ø Max.	2,4mm		Não especificado	
Graduação	Areia		Não especificado	

(**) – não atende às exigências da NBR 7211

A areia ensaiada não atendeu aos requisitos mínimos definidos pela NBR 7211-Agregado para concreto – Especificação no teor de materiais pulverulentos com 8,2% e em Torrões de argila com 4,9%. Este resultado confirma a baixa qualidade das areias disponíveis no mercado.

O módulo de finura também ficou inferior ao considerado ideal para bons resultados de aderência pela literatura pesquisada (entre 1,8 e 2,8). A granulometria mais fina

demanda mais água de amassamento e conseqüentemente apresenta menor desempenho mecânico e maior propensão a fissuração.

4.1.5. Argamassa industrializada

A argamassa industrializada utilizada é composta por cimento Portland, areia de quartzo, areia calcária, plastificantes e aditivos químicos não-tóxicos. O produto é definido pelo fabricante como multiuso, podendo ser utilizada para reboco/emboço e assentamento de alvenaria, tanto internamente, quanto externamente. Sua classificação segundo a NBR13281:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Requisitos é P4, U5, A3. O fabricante apresenta como características do produto:

- densidade de massa no estado fresco: 1,9 g/cm³;
- resistência de aderência: $\geq 0,3$ MPa (28 dias);
- resistência de compressão: $\geq 4,0$ MPa (28 dias)

O consumo estimado para a argamassa industrializada é de 19 kg/m²/cm

4.1.6. Painéis de alvenaria

Os 3 painéis de alvenaria utilizados como base para a aplicação dos revestimentos foram executados nos laboratórios da Escola da Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. A argamassa de assentamento utilizada foi a argamassa industrializada e a junta de assentamento foi de 2 cm. Para execução dos painéis utilizou-se práticas usuais de produção, obtendo-se o produto final apresentado na Figura 4.2. O painel de alvenaria possuía mais de 28 dias após a execução, no momento da aplicação do revestimento de argamassa.



Figura 4.2 - Aspecto final da alvenaria utilizada como base para aplicação das argamassas.

4.1.7. Traços Utilizados

As argamassas aplicadas utilizaram os seguintes traços:

Tabela 4.4 - Traços utilizados

TRAÇO	CIMENTO	CAL	AREIA
1	1	1	6
2	1	0	6
3	Industrializada		

Os traços 1:1:6 (cimento/cal/areia) e 1:6 (cimento/areia) foram escolhidos devido serem comumente utilizados em construções que optam pelo preparo da argamassa na própria obra. Observa-se que a argamassa industrializada, apesar de estar em crescente utilização, ainda representa uma quantidade de utilização significativamente inferior que a preparada na obra.

Foram realizados 6 painéis de reboco, com as dimensões 1,5 m x 1,0 m, sendo 2 para cada traço (prova e contra prova). Foram executadas 2 séries de ensaios de arrancamento e extraídas amostras para realização de ensaios no MEV/EDS e para realização de análises de FRX, absorção atômica e com reagentes químicos em cada painel.

4.1.8. Preparação das argamassas

Antes de iniciar a preparação das argamassas dosadas na própria área de teste, foi realizada a medição da umidade da areia, a fim de evitar que o excesso de umidade compromettesse a dosagem do traço. O método utilizado foi o Speed, conforme Figura 4.3-a. A umidade encontrada foi de 4,3%.

Os traços foram dosados em volume, por se tratar da técnica mais usual utilizada nos canteiros de obra, com a utilização de balde graduado, conforme Figura 4.3-b. Cada traço foi preparado individualmente. O recipiente foi preenchido por gravidade e o excesso retirado com a ajuda de uma régua metálica, portanto, sem qualquer adensamento. Mesmo sendo dosado em volume, foi realizada a pesagem do material,

em balança digital Toledo modelo 2027 P3 e capacidade de 100 kg, para posterior conferência, caso necessário (Figura 4.3-c). A mistura do material foi realizada utilizando-se uma betoneira de 120 litros Menegotti.

A sequência de mistura utilizada para a argamassa dosada foi a seguinte: primeiro foi introduzida a areia, depois a cal hidratada, em seguida o cimento e finalmente a água, já com a betoneira em movimento (Figura 4.3-d). O tempo de mistura utilizado foi de 10 minutos. Para a argamassa industrializada a sequência de mistura foi primeiro a colocação dos materiais no estado anidro na betoneira e em seguida a introdução da água, já com a betoneira em movimento. O tempo de mistura utilizado neste caso foi de 6 minutos. Após a mistura a argamassa descansou por cerca de 10 minutos antes de iniciar a aplicação. As argamassas foram acondicionadas em caixotes plásticos até o momento de utilização.

A plasticidade da argamassa foi definida pelo aplicador. Entretanto, buscou-se permanecer na faixa de 255 ± 10 mm.



Figura 4.3 - Processo de execução das argamassas. a) método Speed; b) dosagem dos materiais; c) pesagem dos materiais; d) mistura; e) descarga da argamassa; f) descanso da argamassa.

4.1.9. Aplicação das argamassas

As argamassas foram aplicadas em dia seco, sem a incidência de luz solar ou ventos. O substrato apresentava-se seco, curado a mais de 28 dias e sem a presença de qualquer contaminante (óleos, graxas, poeira, bolor, etc.). Antes da aplicação, as paredes foram limpas utilizando-se vassoura do tipo piaçava.

Para balizar a aplicação do revestimento foram fixadas taliscas de cerâmica. Estas galgas visam garantir a espessura, que no caso foi fixada em 20 mm, a planicidade e o prumo do revestimento aplicado. O revestimento foi executado através da técnica

padrão utilizada nos canteiros de obra, ou seja, projeção manual da argamassa com colher de pedreiro, sarrafeamento com régua de alumínio e acabamento com aspersão de água através de brocha e desempenadeira de madeira. Após a execução, todos os painéis foram identificados através de placas de PVC. O processo descrito acima está demonstrado na Figura 4.4.



Figura 4.4 - Processo de execução da argamassa. a) taliscas; b) projeção da argamassa; c) sarrafeamento; d) aspersão de água; e) desempeno; f) identificação dos painéis.

4.2. Ensaios de caracterização do bloco cerâmico

4.2.1. Absorção de água

Este ensaio segue as diretrizes definidas pelas normas NBR 15270-3:2005 – Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – métodos de ensaios e a NBR 15270-2:2005 – Bloco cerâmico para alvenaria estrutural. Neste ensaio, 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. Ensaio de caracterização da argamassa no estado plástico

4.3.1. Índice de Consistência (flow table)

Este ensaio segue as diretrizes definidas pela norma NBR 13276:2002 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. 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. O processo é apresentado na Figura 4.5.

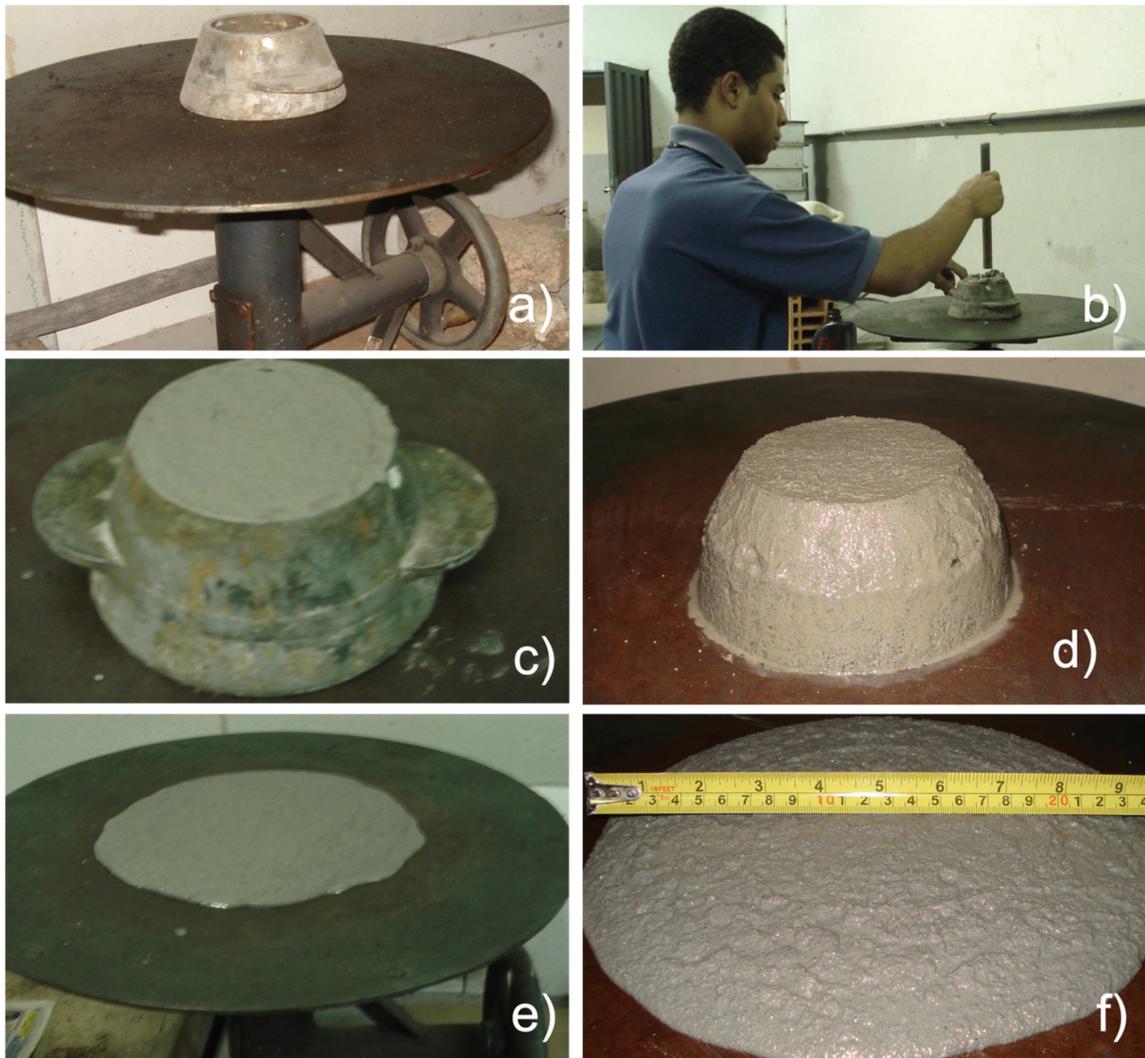


Figura 4.5 - Ensaio do índice de consistência. a) mesa de ensaio e forma; b) adensamento controlado; c) forma preenchida; d) material adensado sem a forma; e) argamassa deformada após aplicação dos golpes; f) medição do valor da deformação.

4.3.2. Retenção de água

Este ensaio segue as diretrizes definidas pela norma NBR 13277:1995 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Este método foi escolhido pelo fato estar disponível no laboratório utilizado. Neste ensaio, um molde cilíndrico de aço, com 100 mm de diâmetro e 25 mm de altura e previamente pesado com precisão de 0,1 g (Mm), é preenchido com argamassa em 10 camadas 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 110 mm de aresta), 12 discos de papel filtro (previamente pesados com precisão de 0,1 g : Mse) e uma placa rígida (110 mm de diâmetro, 5 mm de espessura e uma das faces contendo

usinagem lisa) com um peso de 2 kg em cima (Figura 4.6). Passados dois minutos da aplicação do carregamento, o conjunto de papéis filtro é retirado e imediatamente pesado com precisão de 0,1 g (Mf). O Valor do índice de retenção de água é calculado pela equação:

$$Ra = \frac{[1 - (Mf - Mse)]x100}{AFx(Mma - Mm)}$$

Onde:

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

AF: relação água/argamassa fresca:

$$AF = \frac{Mw}{M + Mw}$$

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.

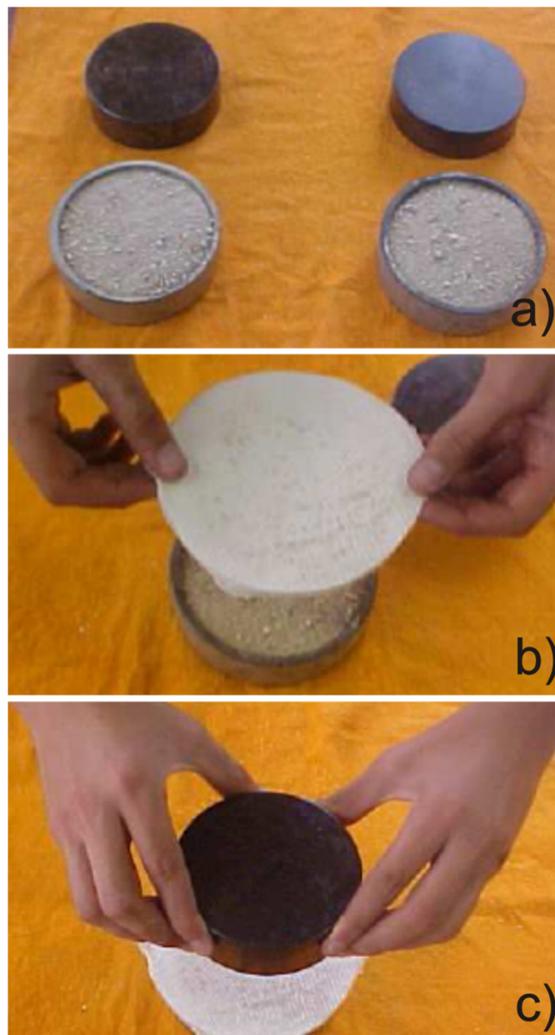


Figura 4.6 - Ensaio de retenção de água: a) moldes com argamassa e peso cilíndrico de 2kg; b) posicionamento do conjunto de papéis filtro sobre o molde com argamassa; c) posicionamento do peso cilíndrico sobre o conjunto para realização do ensaio.

4.3.3. Massa específica e ar incorporado

Este ensaio segue as diretrizes definidas pela norma NBR 13278:1995 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Neste ensaio, 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 determinam-se a massa do conjunto. A massa específica da argamassa é definida pela equação:

$$\mathbf{Varg} = \frac{Mma - Mm}{Vm}$$

Onde:

γ_{arg} : massa específica da argamassa, em g/dm^3 ;

Mma: massa do molde cheio de argamassa, em g;

Mm: massa do molde vazio, em g;

Vm: volume do molde em dm^3 .

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 (Figura 4.7).

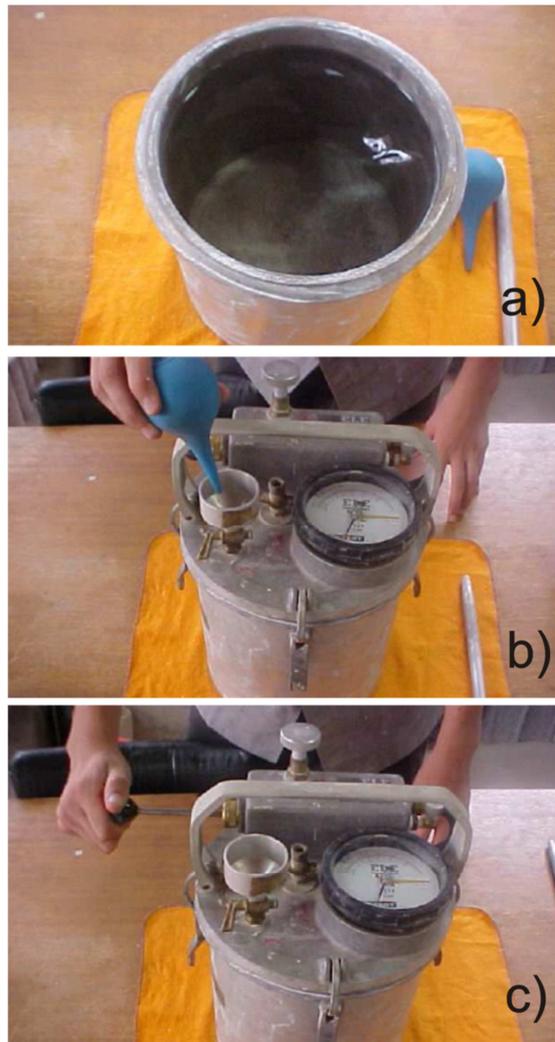


Figura 4.7 - Ensaio de teor de ar incorporado: a) equipamento preparado para receber a argamassa; b) água sendo adicionada no reservatório; c) aplicação de pressão para posterior alívio e realização da leitura manométrica.

4.4. Ensaios de caracterização da argamassa no estado endurecido

4.4.1. Resistência à compressão

Este ensaio segue as diretrizes definidas pela norma NBR 11686:1990 - Concreto fresco – Determinação do teor de ar pelo método pressométrico. Para este ensaio foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm , 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.

Para o rompimento, 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 a

resistência é calculada dividindo a carga de ruptura pela área da seção do corpo de prova. O resultado é expresso em MPa.

4.4.2. Resistência à tração na flexão

Este ensaio segue as diretrizes definidas pela norma NBR 13279:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e compressão. Neste ensaio são utilizados corpos de prova prismáticos de seção transversal de 4 cm x 4cm x 16 cm. Estes corpos de prova são moldados em duas camadas e adensados na mesa de adensamento com 30 quedas em cada camada.

Durante o ensaio, é aplicado esforço de flexo-tração uniforme e sem choque de (50 ± 10) N/s, até a ruptura do corpo de prova. A resistência à tração na flexão é dada pela seguinte equação:

$$R_f = \frac{1,5F_f L}{40^3}$$

Onde:

R_f : a resistência à tração na flexão, em megapascals;

F_f : a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em newtons;

L : a distância entre os suportes, em mm;

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 as fibras passem a atuar, e a tenacidade à medida da quantidade de energia absorvida pelo material até a ruptura.

4.4.3. Módulo de elasticidade

Este ensaio segue as diretrizes definidas pela norma NBR 8522:2003 – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e deformação e da curva tensão-deformação. Neste ensaio foram utilizados 3 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 até a idade do ensaio.

Os corpos de prova são posicionados no equipamento e é aplicado carregamento com aumento da deformação específica à velocidade de $(10\pm 2)\times 10^{-6} \text{ S}^{-1}$ (prensa com controle de deformação). Este nível de tensão é mantido por 60s e, em seguida, a carga é reduzida à mesma velocidade até o nível de tensão básica. São realizados mais dois ciclos de pré-cargas adicionais seguindo as mesmas diretrizes. Após todas as leituras de deformação terem sido efetuadas a carga do corpo de prova é aumentada até que se produza a ruptura.

O módulo de deformação, E_{ci} , em GPa, é dado pela fórmula:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} - 10^{-3} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3}$$

Onde:

σ_b : a tensão maior, em megapascals ($\sigma_b=0,3fc$);

σ_a : a tensão básica, em megapascals ($\sigma_a=0,5\text{MPa}$);

ε_b : a deformação específica média dos corpos de prova ensaiados sob a tensão maior;

ε_a : a deformação específica média dos corpos de prova ensaiados sob a tensão básica.

4.5. Ensaio de caracterização da argamassa aplicada

4.5.1. Resistência de aderência à tração

Este ensaio segue as diretrizes definidas pela norma NBR 13528:2010 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência de aderência à tração. Neste ensaio são realizados no mínimo 12 corpos de prova, espaçados entre si e dos cantos e quinas em no mínimo 50mm. O corte é realizado no revestimento, através de serra copo diamantada, com o mesmo diâmetro da placa metálica que será colada posteriormente, utilizando-se cola à base de resina epóxi. O corte deve ser estendido até aproximadamente 5mm dentro do substrato e não deve prejudicar a integridade do revestimento. O esforço de tração é aplicado perpendicularmente ao plano do revestimento com taxa de carregamento constante. No equipamento utilizado, a leitura da resistência é feita diretamente no equipamento digital e dispensa o cálculo da mesma. Este processo está demonstrado na Figura 4.8.

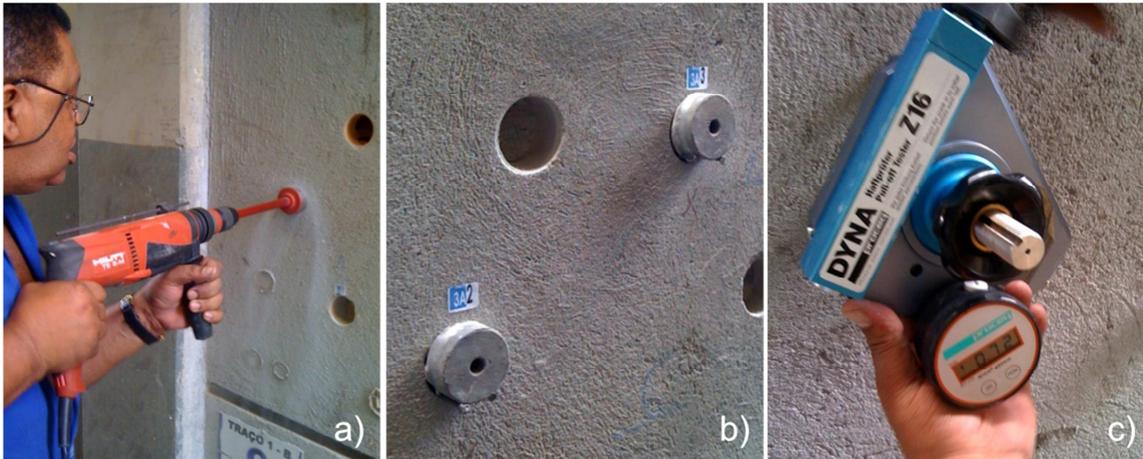


Figura 4.8 - Execução do ensaio de resistência de aderência: a) corte do revestimento; b) placas coladas; c) aplicação do esforço de tração.

Após o rompimento é feita a análise e registro da superfície de rompimento para se verificar onde a ruptura ocorreu. Ela pode ocorrer no substrato, na interface ou no revestimento argamassado, ou ainda em combinações destas situações. No caso de ruptura na interface, o valor da resistência de aderência é igual ao valor obtido no ensaio. No caso de ruptura no interior da argamassa ou no interior do substrato, o valor da resistência de aderência é superior ao obtido no ensaio. No caso de ruptura entre a placa e a cola significa que houve imperfeição na colagem da mesma.



Figura 4.9 – Recipiente para acondicionamento das amostras extraídas.

Com a finalidade de se organizar as amostras extraídas e se evitar trocas, foi utilizado como recipiente de apoio ao ensaio devidamente identificado. Este recipiente foi

confeccionado com uma placa de isopor com 100 mm de espessura, estampada com a mesma placa metálica utilizada para realizar o ensaio de aderência, aquecida (Figura 4.9).

4.6. Extração dos corpos de prova dos revestimentos aplicados

Após a aplicação e cura completa dos revestimentos argamassados, foram extraídos corpos de prova, com o objetivo de atender aos ensaios de microscopia eletrônica de varredura – MEV e microanalisador EDS, aos ensaios de absorção atômica e fluorescência de raios-X, e aos ensaios com reagentes químicos. Após a extração, cada corpo de prova recebeu tratamento e preparação apropriada, conforme descrito em cada método.

Para garantir que os corpos de prova tivessem o tamanho necessário a cada tipo de ensaio e evitar desperdício e retrabalho para reprocessamento das amostras, foi realizada a marcação das dimensões e identificação de cada tipo de amostra. A marcação prévia também elimina o risco de troca de amostras, uma vez que a peça é identificada antes mesmo do corte. Para isto foram utilizados carimbos emborrachados (do tipo que se utiliza em escritórios) confeccionados sob medida e tinta própria (Figura 4.10). O corte foi realizado a seco e utilizando-se equipamento serra mármore e disco diamantado. Após o corte, as amostras são novamente identificadas, desta vez com etiqueta adesiva e ensacadas.

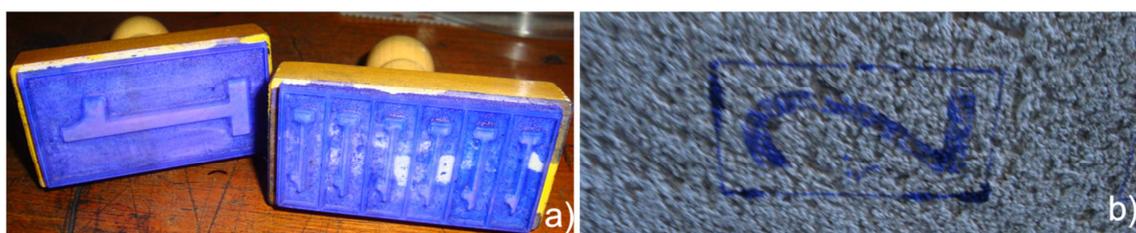
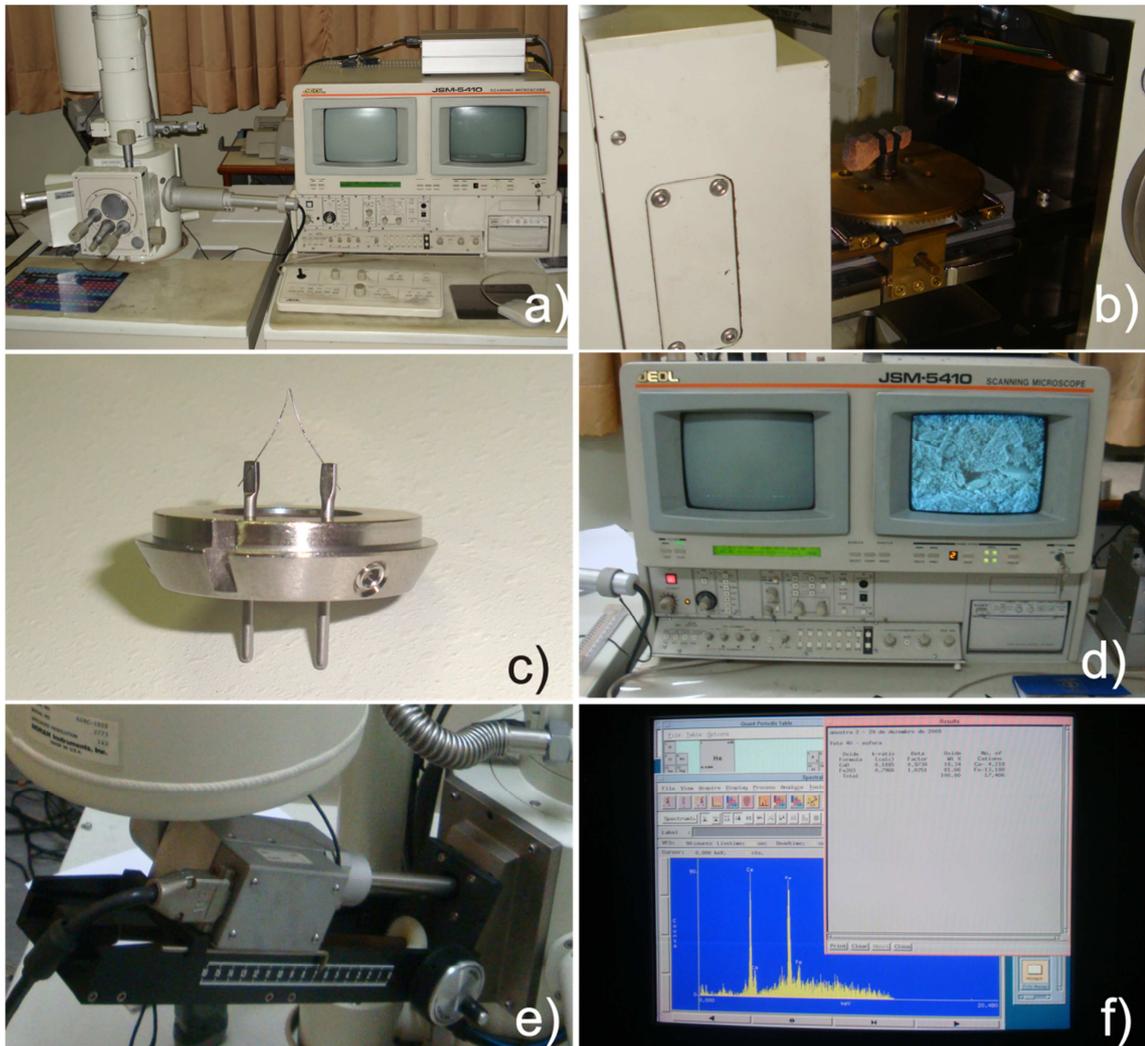


Figura 4.10 - Processo de marcação dos revestimento: a) carimbos utilizados; b) revestimento marcado para o corte.

4.7. Avaliações microestruturais

4.7.1. Microscópio eletrônico de varredura com microanalisador EDS (MEV-EDS)

Para realização das análises foi utilizado microscópio eletrônico de varredura, sob alto vácuo, MEV JSM-5410 com microanalisador EDS NORAN TN-M3055 (Figura 4.11 e 4.12).



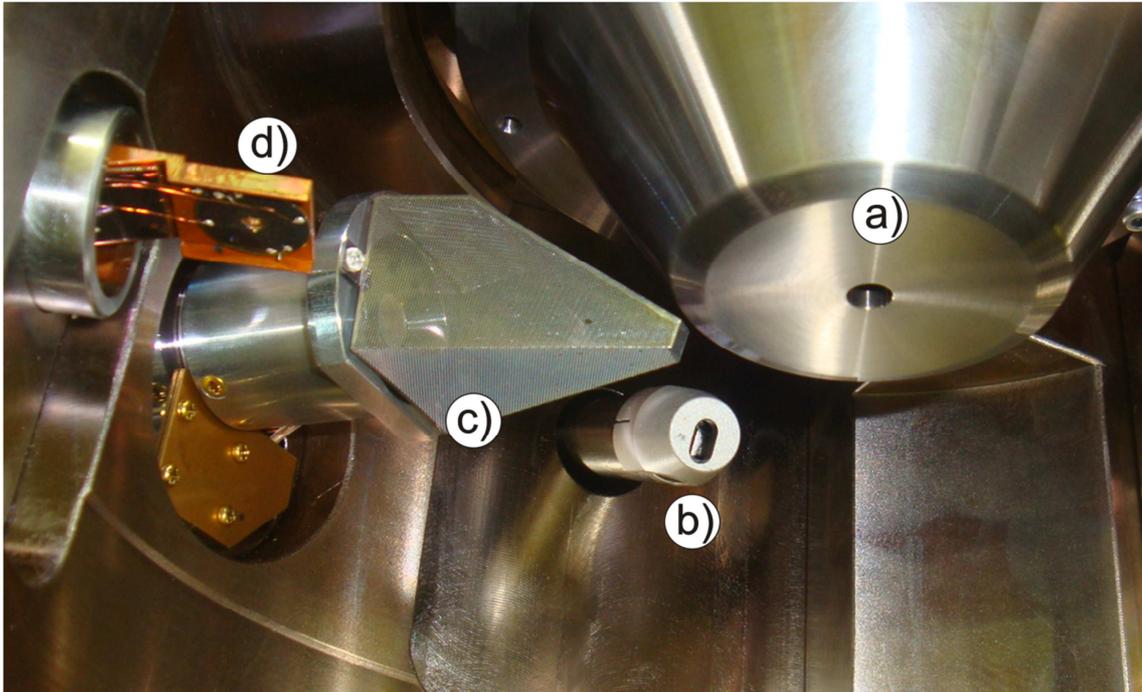


Figura 4.12 - Vista interna do equipamento MEV-EDS utilizado – a) saída do feixe de elétrons; b) detector de EDS; c) detector de elétrons secundários; d) detector de elétrons retroespalhados.

As análises foram realizadas utilizando corpos de prova em estado natural e embutidos.

4.7.1.1. Análise em corpos de prova no estado natural

4.7.1.1.1. Realização das análises

Foram realizadas imagens de dois planos de observação. O primeiro plano é perpendicular à interface com a argamassa e visa identificar as principais morfologias existentes nesta região. O segundo plano é paralelo à superfície do bloco cerâmico e visa identificar fases que tenham se formado no interior do mesmo, uma vez que os produtos de hidratação do cimento penetram no substrato (Figura 4.13).

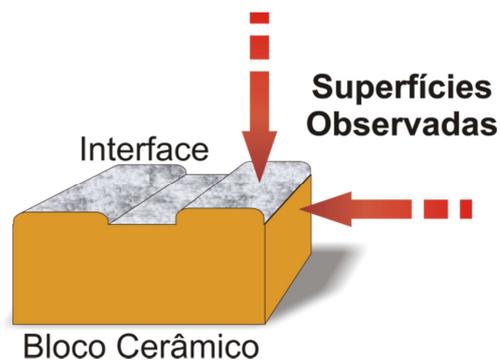


Figura 4.13 - Planos observados no MEV.

4.7.1.1.2. Preparação dos corpos de prova

Para análise da morfologia da argamassa na zona de transição, foram utilizados corpos de prova com dimensões aproximadas de 25mm x 25mm x 15mm, tamanho este suficiente para introduzi-los no porta-amostra do MEV/EDS. As amostras foram metalizadas, utilizando ouro, com a finalidade de torná-las condutoras, 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 4.14).

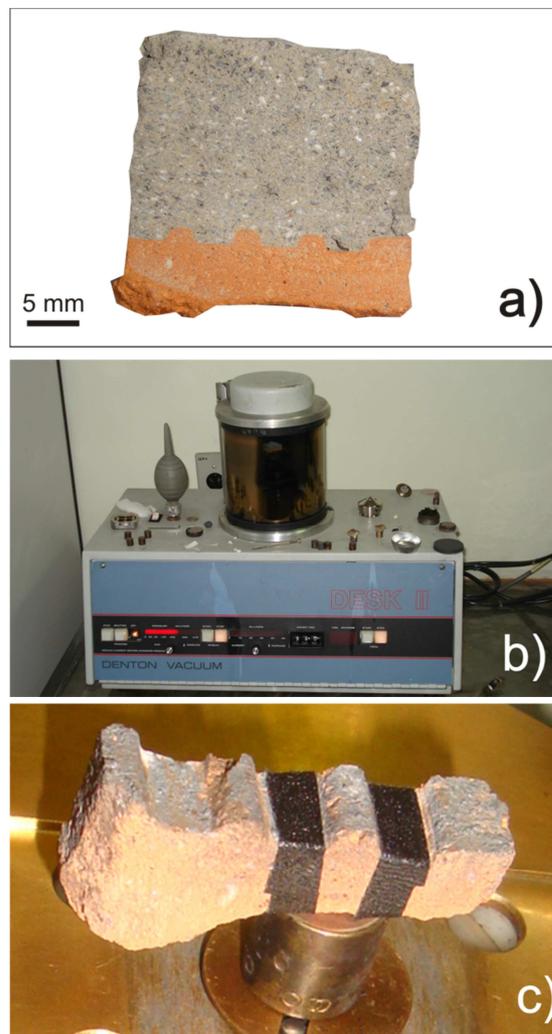


Figura 4.14 – Metalização das amostras: a) amostra a ser preparada para análise; b) equipamento utilizado para metalização das amostras; c) amostra destaca e metalizada, com fita de carbono, pronta para análise de topo no MEV.

4.7.1.2. Análise em corpos de prova embutidos em resina

4.7.1.2.1. Embutimento dos corpos de prova

Algumas amostras foram embutidas em resina para que se pudesse realizar a medição da espessura de revestimento residual na superfície do substrato, após a ruptura, uma vez que esta não ocorre necessariamente na interface.

Para a preparação das amostras, foi feita inicialmente a limpeza das mesmas, afim de se retirar partículas que possam ter migrado durante o processo de extração do material. Esta limpeza foi realizada em equipamento de vibração ultrassom, com as amostras imersas em benzina por 30 segundos. Em seguida, as amostras foram secas a vácuo e colocadas dentro de formas emborrachadas com diâmetro de 25,4mm. A amostra deve ser posicionada de forma que a face a ser analisada esteja direcionada para a seção transversal do prisma. A resina, já catalisada, foi então vertida e foi aplicado um vácuo de 100 militorr (1 atm = 750 militorr) para que a resina penetre mais profundamente no material. Esta penetração não prejudica as análises do MEV porque a mesma é formada principalmente por carbono e este não é lido pelo equipamento. A resina utilizada foi do tipo poliéster insaturada, obtida a partir da condensação de diácidos carboxílicos e glicóis em solução de monômero estireno. A resina, segundo o fabricante, possui densidade entre 1,10 g/cm³ e 1,15 g/cm³, é insolúvel em água, pH ácido fraco e não é explosiva. A amostra foi então retirada da câmara de vácuo e deixada secar em condições ambientais. Após a secagem, a amostra foi retirada do molde, recebeu lixamento superficial para regularização, com lixa d'água 150 µm, foi identificada com etiqueta específica e então recolocada no molde para novamente receber aplicação de resina. Desta forma, a identificação se torna permanente e se evitam possíveis trocas ou perdas de identificação. Após a secagem completa, a amostra foi então afixada na policorte para que sua face seja exposta para as análises. Foi utilizada serra de precisão Isomet 1000 da Buehler com disco de corte diamantado, diâmetro 152mm, espessura 0,5mm, baixa concentração, série LC da Buehler. A velocidade de corte foi de 975/rpm e a pressão exercida foi apenas o peso do material e do braço do equipamento. O corte foi lubrificado com água. Uma vez a face exposta, a mesma recebe lixamento para regularização em duas etapas (lixas d'água 65µm e 20µm). Posteriormente foi polida em politriz Minimet 1000, em três etapas com três granulometrias de pasta de diamante (sequência de 9µm, 3µm, 1µm, aproximadamente 10 minutos em cada etapa). E, finalmente, a face polida recebeu filme condutor com a finalidade de tornar a amostra condutora, melhorando a imagem e facilitando a dissipação de calor durante o ensaio. Esta metalização foi realizada em

câmara de vácuo a 100 militorr (1atm = 750 militorr), corrente de 10 miliamperes (mA) e com posterior formação de um filme de ouro por 360 segundos, pelo método sputter. Após a metalização, foi colada uma fita impregnada de carbono para fixar a amostra e fazer o contato elétrico com o equipamento. Após a amostra ficar preparada, ela ficou acondicionada em estojo que impediu a danificação da face de análise. Este processo está representado pela Figura 4.15.

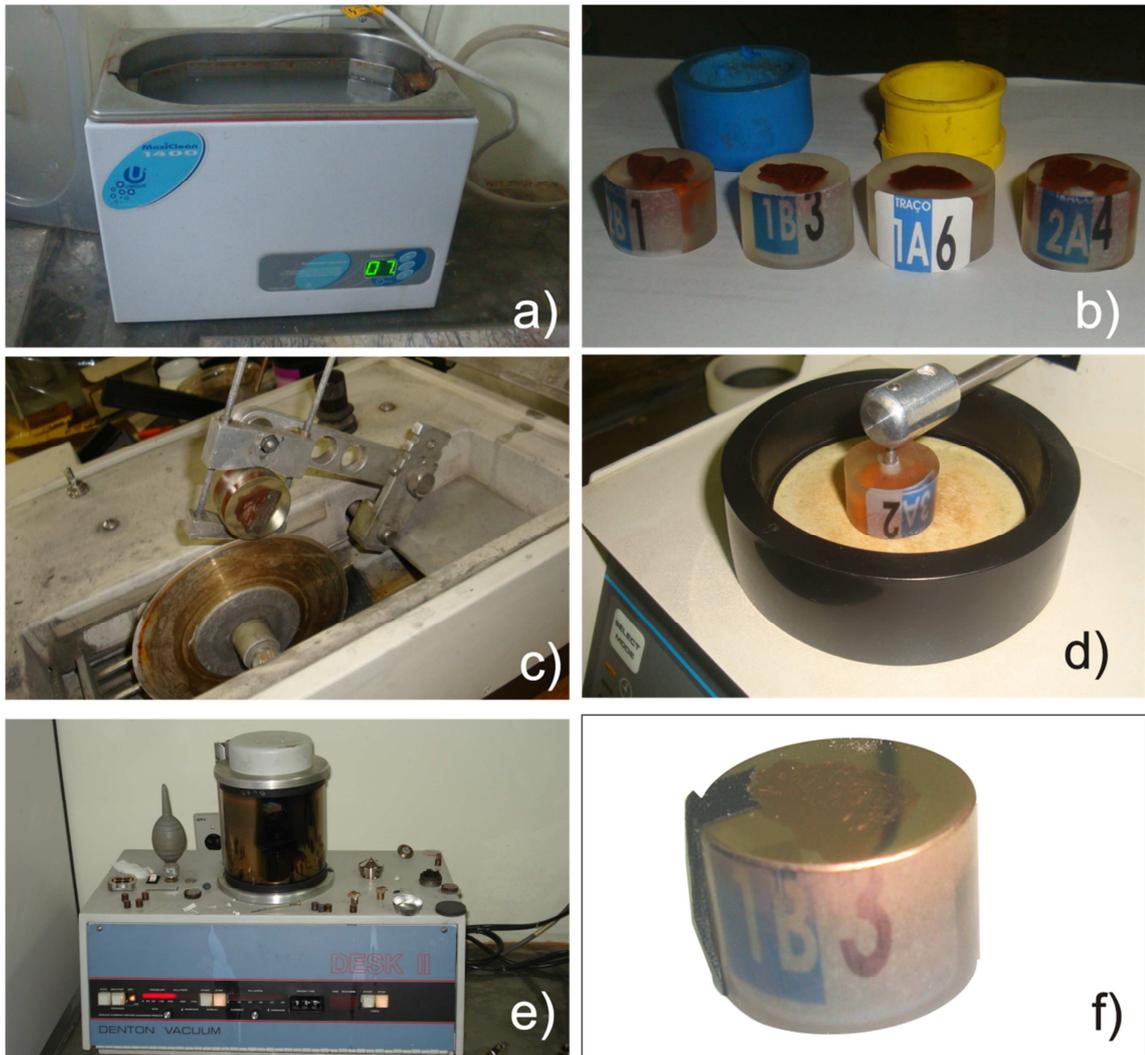


Figura 4.15 - Processo de embutimento: a) limpeza do material; b) embutimento em resina; c) corte para exposição da superfície; d) polimento da superfície; e) metalização da superfície de análise; f) corpo de prova pronto para análise.

4.7.1.2.2. Realização das análises

Foram realizadas imagens da secção perpendicular da amostra, conforme Figura 4.16.



Figura 4.16 – Superfície plana observada no MEV para medição de espessura. Diâmetro = 25,4mm

4.7.2. Avaliações Químicas

4.7.2.1. Preparação dos corpos de prova

4.7.2.1.1. Preparação dos corpos de prova em estado natural

Para realizar as análises químicas em estado natural, os corpos de prova, após extraídos, foram previamente identificados para evitar possíveis trocas e recobertos com parafina, conforme demonstrado na Figura 4.17. Esta camada de parafina tem o objetivo de isolar o corpo de prova do ambiente, uma vez que o contato com CO_2 pode alterar propriedades como o pH. Outro objetivo é isolar o corpo de prova da resina de embutimento, uma vez que a resina possui pH levemente ácido e poderia também alterar propriedades do mesmo.

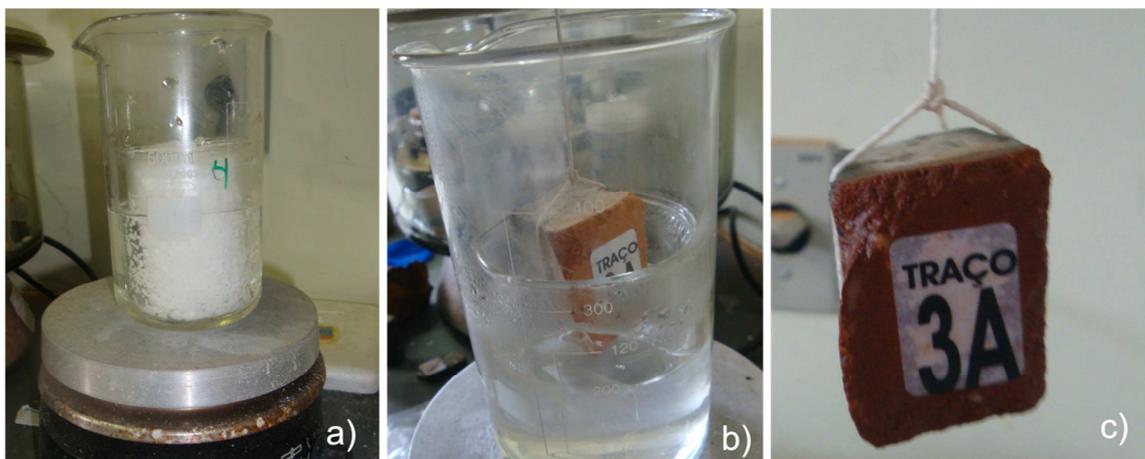


Figura 4.17 - Processo de aplicação da parafina. a) derretimento da parafina; b) imersão da amostra recém-extraída; c) amostra com cobertura de parafina.

A última razão para utilização da parafina é evitar que a resina de poliéster penetre profundamente na amostra e a impregne, impedindo a interação com reagente e consequentemente, inutilizando o corpo de prova, como ocorrido na Figura 4.18.



Figura 4.18 - Corpo de prova inutilizado devido à grande penetração de resina em seu interior.

A amostra foi então embutida em um cilindro de resina cilíndrico com diâmetro de 35 mm e comprimento de 75 mm. Para o embutimento da amostra, foi utilizada resina do tipo poliéster insaturada, com densidade entre 1,10 a 1,15 g/cm³.

A amostra foi posicionada de forma que a face a ser analisada estivesse direcionada para a seção transversal do cilindro. A resina, já catalisada, foi então vertida e deixada secar à temperatura e pressão ambientes. Após a secagem da resina, os prismas foram perfurados longitudinalmente, em número igual à numeração da amostra, sobre a resina, com broca de 3 mm, para que, após cortados, fossem identificados com facilidade. Esta prática evita a troca de amostras. A amostra é então fatiada em corpos de prova com 4 mm a 5 mm de espessura (Figura 4.19).

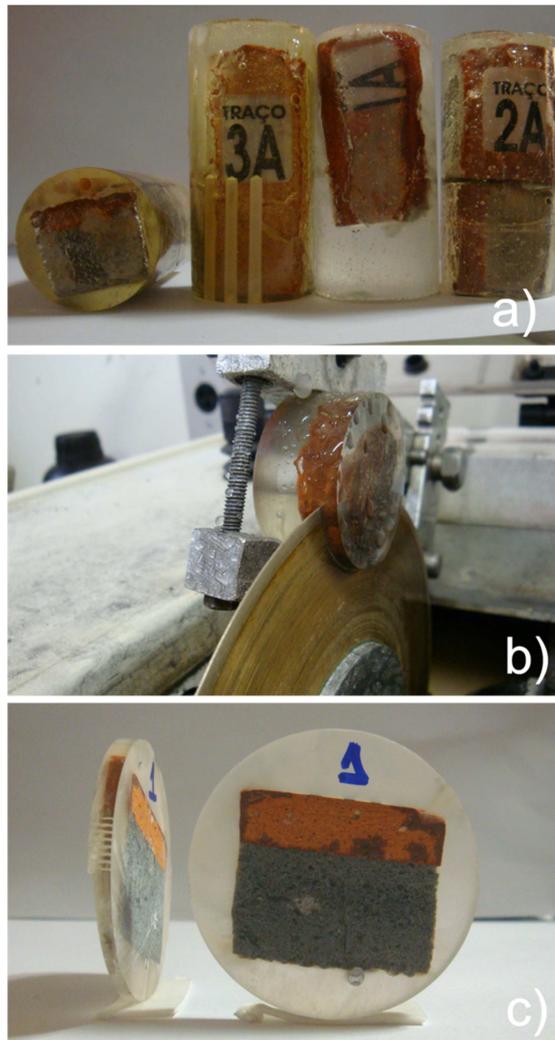


Figura 4.19 - Processo de preparação de corpos de prova para análise com reagentes colorimétricos em estado natural. a) amostra embutida em cilindro de resina; b) corte do corpo de prova; c) corpo de prova pronto para análise.

Para se realizar os cortes, foi necessário realizar adaptações em mesa de corte TT 200EM da Norton, originalmente desenvolvida para o corte de azulejos e pedras. Este equipamento utiliza disco diamantado de diâmetro de 200 mm e espessura de 3 mm. A mesa de corte possui 40 mm de profundidade de corte e opera a 2950 rpm, movida por motor elétrico de 800 W. Para fixação dos corpos de prova para corte, foi adaptado um mandril (Figura 4.20).

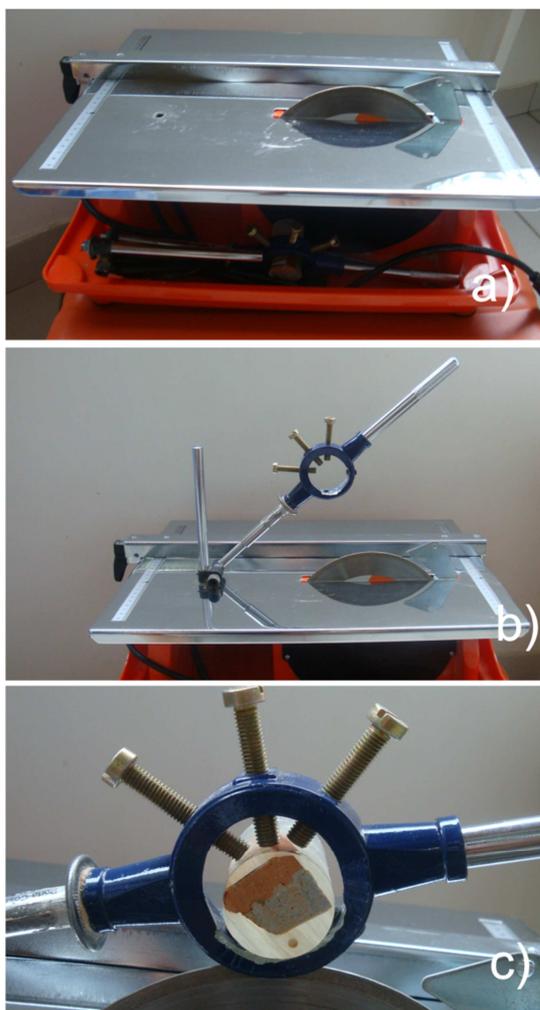


Figura 4.20 - Equipamento adaptado para corte dos corpos de prova. a) mesa de corte para azulejos e pedras; b) mecanismo adaptado à mesa de corte; c) corpo de prova fixado ao suporte para corte.

As necessidades de adaptação advêm da pequena produtividade das serras de precisão e à fragilidade dos discos utilizados. Como os corpos de prova utilizados nesta pesquisa não têm necessidade de planicidade e acabamentos perfeitos, a mesa de corte desenvolvida possui produtividade de corte muito superior.

O embutimento tem como objetivo proteger e preservar a amostra e permitir cortes delgados, de face lisa. As pequenas dimensões e a superfície lisa e regular facilitam a aplicação dos reagentes, melhoram a visualização das alterações de cor, aumentam o aproveitamento das amostras extraídas e melhoram a posterior guarda.

4.7.2.1.2. Preparação de amostras para análise em pó

As amostras utilizadas para as análises químicas por fluorescência de raios-X, por absorção atômica e com reagentes em solução foram extraídas da interface entre a

argamassa e o bloco cerâmico, após a separação de ambos, com o uso de uma pequena talhadeira.

Para fazer a extração, foi necessário colar as amostras, com cola à base de resina epóxi, em barra de alumínio de seção quadrada de 9 mm x 9 mm e comprimento de 50 mm (Figura 4.21).

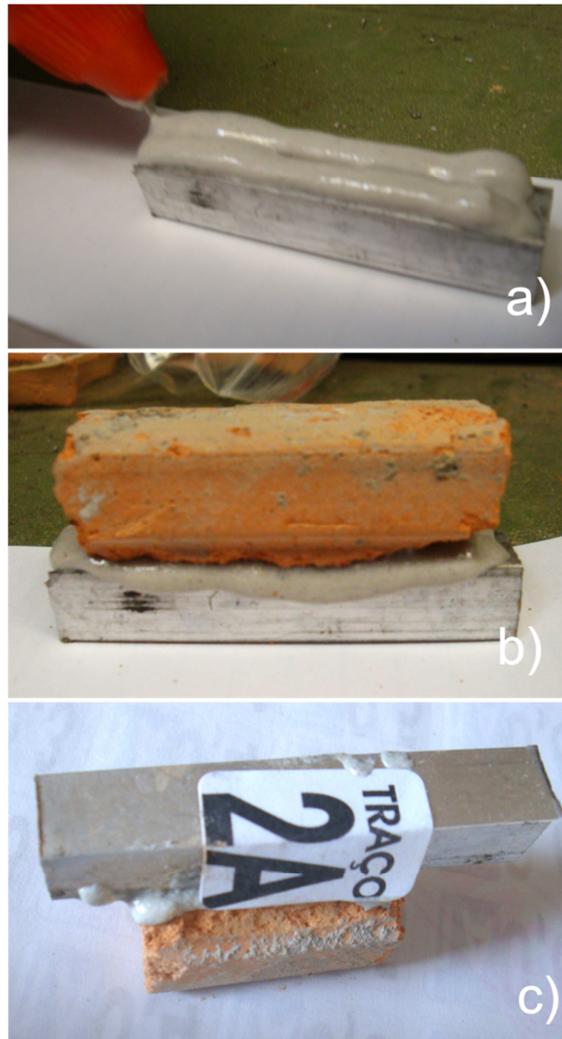


Figura 4.21 - Preparação de amostra para fixação no torno mecânico. a) aplicação de resina epóxi; b) colocação da amostra; c) amostra colada e identificada.

A amostra foi então fixada em minitorno mecânico MR-34 produzido pela Manrod, com precisão de décimos de milímetro e velocidade variável. Foi utilizada como ferramenta de corte uma fresa topo Vicortes de 13 mm de aço rápido, específica para corte de metais. Esta ferramenta foi escolhida, apesar de ter durabilidade reduzida em função do contato com material cerâmico, porque possui grande dureza, corte plano, e proporciona facilidade para identificar algum possível contaminante proveniente do

processo de corte. A fixação da amostra deve ser realizada de modo que a face para corte fique perpendicular ao eixo da ferramenta de corte, tanto na horizontal, quanto na vertical. Neste caso foi utilizado um esquadro para o posicionamento. Este cuidado ajuda a garantir a profundidade e uniformidade de corte desejada.

O processo de extração inicia-se com a aproximação da ferramenta da amostra até que se estabeleça o contato. A partir deste momento, são realizados avanços de $200\ \mu\text{m}$, até que se atinja $1,0\text{mm}$ de extração. Para cada profundidade, é realizado o avanço perpendicular para que a ferramenta de corte percorra toda a face disponível para extração. O material é colhido por recipientes de papel côncavos descartáveis. Após a extração, o material é imediatamente acondicionado em tubos Ependorf, previamente identificados e o papel é descartado para evitar contaminação entre camadas. As camadas extraídas para análise estão demonstradas na Figura 4.22. O processo de extração está demonstrado na Figura 4.23.



Figura 4.22 - Diagrama de extração do material para análise.

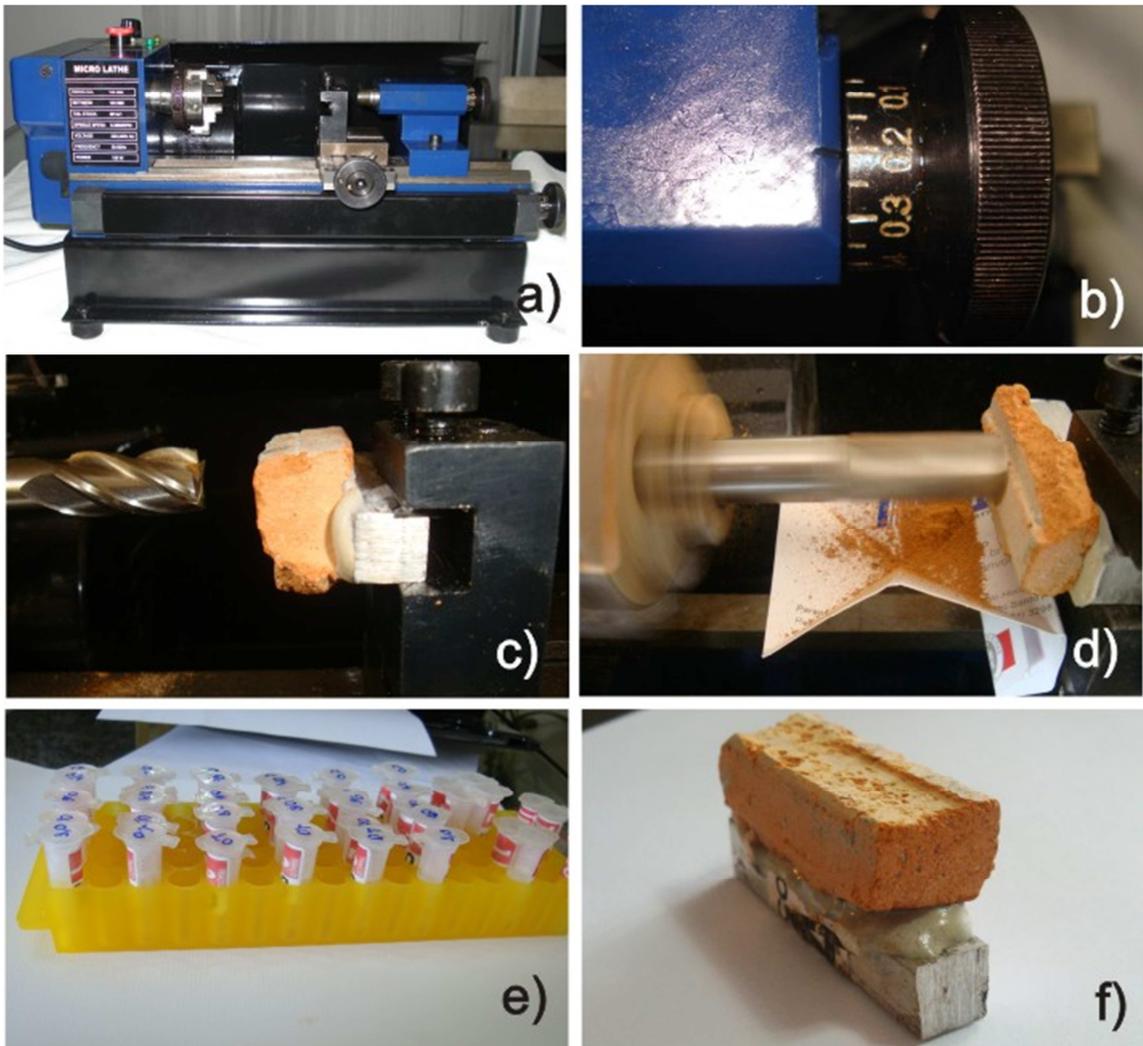


Figura 4.23 - Processo de extração de material para análises em pó. a) torno mecânico utilizado para extração; b) escala de avanço de 0,1mm; c) ferramenta e amostra afixados no equipamento; d) extração do material; e) material embalado e identificado; f) amostra após a extração do material.

4.7.2.2. Espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX)

Cada camada extraída, referente a uma espessura específica, foi colocada no porta-amostra e em seguida prensada com ácido bórico. Em seguida, foi introduzida no espectrômetro de fluorescência de raios-X, marca Philips, modelo PW-2400, com tubo de anodo de ródio, para realização das análises, conforme Figura 4.25.

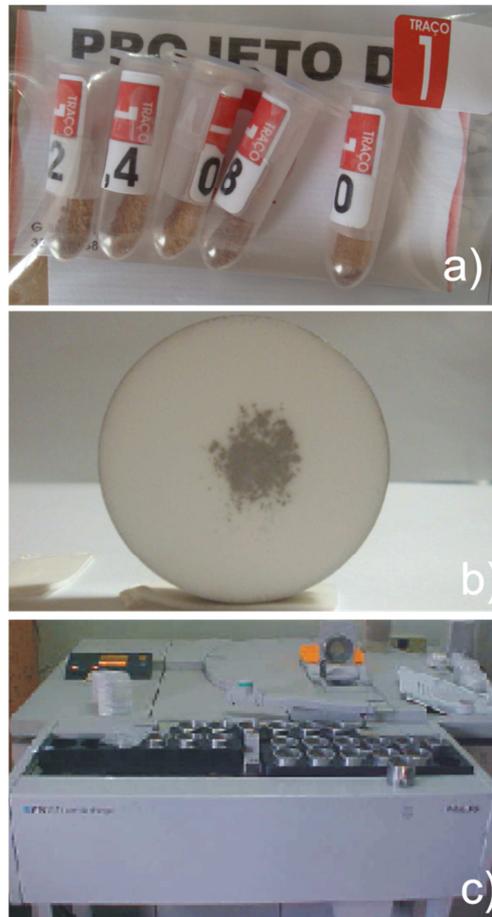


Figura 4.24 - Processo de análise por FRX. a) amostras enviadas para a análise; b) amostra prensada pronta para realização do ensaio; c) equipamento utilizado para as análises.

Para o método semiquantitativo, o elemento base escolhido para identificar a penetração da pasta de aglomerante nos poros do substrato foi o cálcio. Este elemento está presente em grande quantidade nos produtos de hidratação do cimento e carbonatação 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 dos produtos de hidratação do cimento no tijolo é a base do mecanismo de aderência de uma argamassa à base. Neste caso, os resultados são apresentados por uma relação entre o cálcio e outros constituintes principais do sistema argamassa/bloco cerâmico (silício, alumínio, ferro, titânio e potássio), afim de diminuir a imprecisão das medidas realizadas. Desta forma, caso ocorram erros de medida do aparelho na determinação do teor de cálcio, também ocorrerão na determinação do outro elemento, anulando, ou pelo menos minimizando o erro, uma vez que o resultado é apresentado como uma razão (quociente). A avaliação através de medidas

relativas ao invés de medidas absolutas minimiza os efeitos da imprecisão do equipamento, caso existam.

4.7.2.3. Espectrometria de absorção atômica

Um extrator adequado deve extrair diferentes concentrações dos elementos pesquisados no bloco cerâmico e nas argamassas a fim de se conseguir diferenciar a concentração deste na profundidade de penetração analisada. Para definição do meio extrator mais adequado para a aplicação dos métodos colorimétricos de análise química propostos, foram extraídas 3 diferentes soluções:

- a) Extração em água: 5 mg das amostras em pó em 2,5 mL de água;
- b) Extração com HNO₃: 2,5 mg das amostras em pó em 2,5 mL de HNO₃ 5% v/v;
- c) Extração com HCl: 2,5 mg das amostras em pó em 2,5 mL de HCl 5% v/v.

Em todos os casos, a mistura foi agitada e deixada em repouso por 2 horas. Depois deste período as amostras foram centrifugadas e o sobrenadante foi analisado por espectrometria de absorção atômica empregando-se um espectrômetro de absorção atômica com forno de grafite da Perkin Elmer, modelo Analyst 400, seguindo o programa de aquecimento da Tabela 4.5. Antes das análises os tubos de grafite foram tratados com zircônio como modificador permanente. A função do modificador é aumentar o tempo de vida útil dos tubos, minimizando assim os custos das análises. O cálcio foi determinado em um espectrômetro de absorção atômica com chama da Varian, modelo AA240FS.

Tabela 4.5 Temperatura usada para determinação de alumínio por GFAAS

Etapa	Temperatura (°C)	Rampa (s)	Permanência (s)	Fluxo de Ar (mL min ⁻¹)
Secagem	90	5	60	250
Pirólise	1500	10	30	250
Atomização	2500	0	5	0 (leitura)
Limpeza	2800	1	5	250
Resfriamento	20	1	10	250

Diante dos resultados apresentados na Tabela 4.6, verificou-se que o HCl não deve ser usado, pois a diferença nas concentrações obtidas foi muito pequena. Já a água e o HNO₃ apresentaram eficiências de extração bem diferentes, entretanto de forma inversa. A água extraiu maior quantidade de alumínio das argamassas do que do bloco cerâmico, já para o ácido nítrico obteve-se o contrário. Considerando-se que

pretende-se comparar esses resultados com os obtidos por métodos colorimétricos e que muitas reações colorimétricas são influenciadas pelo pH da solução, optou-se por utilizar a água como meio extrator para avaliar a concentração de alumínio nos estudos futuros.

Tabela 4.6 - Concentrações de alumínio ($\mu\text{g.g}^{-1}$) obtidas após extração do bloco cerâmico e das 3 argamassas avaliadas em diferentes meios

Amostra	Meio extrator		
	H ₂ O	HNO ₃ 5% v/v	HCl 5% v/v
Bloco cerâmico	16,98	358,43	254,72
Argamassa 1	85,41	202,37	212,97
Argamassa 2	68,28	237,95	232,92
Argamassa 3	107,72	207,34	208,33

4.7.2.4. Análise de pH

A determinação do pH da face do bloco cerâmico objetivou identificar a profundidade de penetração dos produtos de hidratação da argamassa no interior do substrato. Isto se deve ao fato do pH dos compostos de cálcio ser em torno de 12,0 enquanto o do bloco cerâmico gira em torno de 8,0. Desta forma, ao penetrar no substrato, a pasta de aglomerante altera o pH do mesmo. Apesar de o pH ser facilmente identificável, é também muito sensível a alterações, em função da interação da amostra com o ambiente.

Para determinar o pH, optou-se por utilizar vários métodos, afim de determinar qual o mais preciso e qual o mais prático para compor uma metodologia de avaliação. Os métodos escolhidos foram: através de equipamento de medição de pH (pHmetro), reagentes colorimétricos e fitas medidoras de pH. Avaliou-se também medições em corpos de prova no estado natural e em solução preparada com material em pó extraído do bloco, conforme descrito item 4.7.2.1.2. Estas mesmas amostras foram analisadas através de espectrometria de fluorescência de raios-X e espectrometria de absorção atômica, para que possa ser feita correlação dos resultados.

4.7.2.4.1. Em meio líquido

Para medição do pH em meio líquido foi preparada solução, utilizando as amostras extraídas de cada camada do substrato, conforme descrito item 4.7.2.1.2.. Para isto, pesou-se cerca de 5 mg de cada amostra e adicionou-se 2,5 mL de água deionizada. Agitou-se e deixou-se em repouso (frasco fechado) por 1h. Transferiu-se o sobrenadante para outro frasco.

4.7.2.4.1.1. Medição com pHmetro

A solução preparada conforme o item 4.7.2.4.1 teve seu pH medido através de pHmetro calibrado modelo MB-10, fabricante Marte (Figura 4.25). O equipamento trabalha na faixa de pH de 0 a 14, com resolução máxima de 0,01 unidades de pH e precisão relativa de 0,01%.

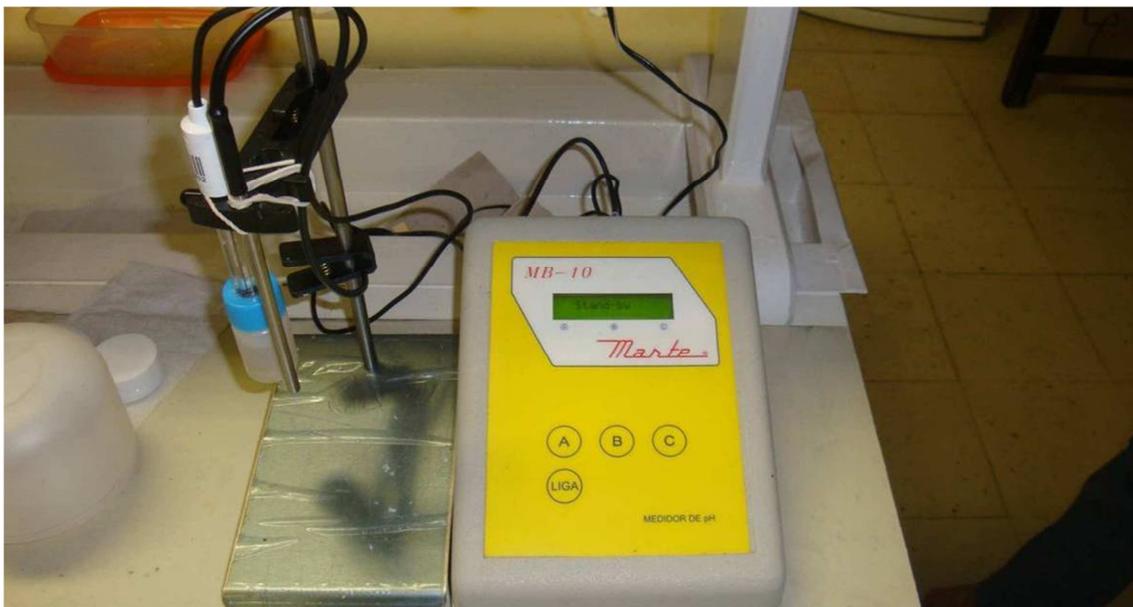


Figura 4.25 - PHmetro.

4.7.2.4.1.2. Medição com reagentes colorimétricos

O método para determinação de pH através de reagentes colorimétricos apresenta maior eficiência quando aplicado em solução, do que quando aplicado em estado natural (Item 4.7.2.4.2). Entretanto, exige grande esforço e tempo para a preparação das amostras.

Para avaliação do pH em solução foi preparado um indicador universal de pH com faixa entre 1,0 a 12,0. Esta ampla faixa foi escolhida para abranger todas as possibilidades de pH.

Para elaboração do reagente, pesou-se em um béquer 0,0500 g de azul de bromotimol, 0,0120 g de vermelho de metila e 0,1000 g de fenolftaleína. Acrescentou-se 80,0 mL de etanol anidro e solubilizou-se os reagentes. Acrescentou-se então, gota a gota, uma solução de hidróxido de sódio 0,05 mol.L⁻¹ até se obter uma solução com coloração verde. Transferiu-se quantitativamente para um balão de 100,0 mL e completou-se o volume com etanol.

Com a utilização do pHmetro obteve-se a escala de cor para esse indicador para valores de pH variando de 1,0 a 12,0 (Figura 4.25)

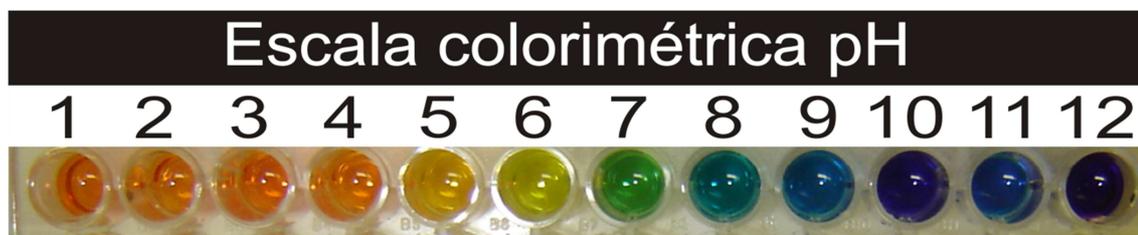


Figura 4.26 - Escala de cor do indicador universal de pH utilizado.

Para realização dos ensaios foram pipetados 100 μ L da solução e transferidos para a placa de teste. Adicionou-se 25 μ L da solução do indicador universal e esperou-se por cerca de 1 min antes de realizar as fotos. Verificou-se que as cores formadas são estáveis por mais de 1h.

4.7.2.4.2. Medição estado natural

As avaliações colorimétricas de pH em estado natural foram realizadas através da aplicação (aspersão ou imersão) de reagentes nas amostras em seu estado natural.



Figura 4.27 - Superfície de aplicação do reagente de pH.

Foram formulados quatro reagentes para análise de forma a cobrir a faixa de pH que se espera encontrar na interface, ou seja, entre 8,0 e 12,00. Também buscou-se reagentes com tonalidades que pudessem contrastar com a cor da argamassa e do bloco cerâmico (Figura 4.28).

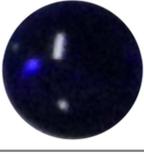
Reagente 1	pH=5	pH=6	pH=7	pH=8	pH=9	Formulação Solução semialcóolica de: Y-Y-BIS(6-BRMO-5-HIDROX Y CARVA-E RYL)-Y-HIDROXI-O-TOLUENE SULFONIC-ACID Y-SULTONE-SMS-Lote: RU-SQL-071218 LBY-43581.V.05-05
						
Reagente 2	pH=5	pH=6	pH=7	pH=8	pH=9	Formulação Solução semialcóolica de: Y-Y-BIS(P-HIDROXY PHENYC) – TOLUENE SULFONIC ACID Y-SULTONE-SMS- Lote:RU-SQL:071218/LBY-81108-10-08
						
Reagente 3	pH<9,5		pH>=9		Formulação 1 grama de fenolftaleína em álcool etílico de 70%	
						
Reagente 4	pH<10,5		pH>=10,5		Formulação 1 grama de timolftaleína em álcool etílico de 70	
						

Figura 4.28 – Reagentes formulados para análise de pH em estado natural.

4.7.2.4.3. Medição com fita teste

Para realização das análises definitivas do estudo foram utilizadas fitas teste de pH do fabricante Merck (pH Indicator Strips - 1.09535.0001), com amplitude de pH de 0 a 14 (Figura 4.29). O teste escolhido é produzido com fitas plásticas, apresenta resistência à luz, pode ser deixado indefinidamente na solução, sem contaminá-la, e possibilita facilidade de leitura devido ao seu contraste.

Para realizar o ensaio, basta introduzir a tira na solução por 5 segundos, agitando levemente, retirar o excesso de solução, e comparar com a escala de cor do fabricante. O tempo para leitura é um limitador do método. A leitura deve ser realizada em, no máximo, 30 segundos. Apesar da simplicidade do ensaio, a preparação da solução depende tempo considerável.



Figura 4.29 – Teste de pH em tiras.

4.7.2.5. Análise de enxofre

A medição da penetração do enxofre se justifica pelo fato de ser um importante constituinte do principal produto responsável pela aderência da argamassa ao substrato, a etringita. Além disso, não é tão sensível à variação como é o pH. Foram testados três métodos de análise: colorimétrico em solução, colorimétrico em estado natural e em tiras. Os resultados foram confrontados com os resultados de espectrometria de fluorescência de raios-X.

Para análise de sulfato por tiras foi utilizado *Sulfate Test Merckoquant* da Merck (1.10019.0001). Neste método, os íons de sulfato reagem com um complexo de thorinbário, liberando um complexo amarelo no processo. A concentração de sulfato é medida semiquantitativamente por comparação visual com escala de cor. A escala da medição é: <200, >400, ≥800, ≥1200, ≥1600 mg/l SO_4^{2-} . A eficácia de medição e escala de cor do método foi previamente testada (Figura 4.30). O método consiste em preparar a solução e colocar a fita em contato com a mesma, aguardando alguns segundos para leitura, comparando-a à escala de cor fornecida pelo fabricante. A leitura é visual.



Figura 4.30 – Teste para análise de SO_4^{2-} em tiras.

Para análise de sulfato em solução e em estado natural foi utilizado o *Sulfate Test Aquaquant* da Merck (1.14411.0001). Neste método, os íons de sulfato reagem com iodato de bário, liberando íons de iodato no processo. Os taninos presentes oxidam um composto marrom-vermelho. A eficácia de medição e escala de cor do método foi previamente testada (Figura 4.31). A concentração de sulfato é medida semiquantitativamente por comparação visual com cartela de cor. A escala de medição é: 25, 50, 80, 110, 140, 200, 300 mg/l SO_4^{2-} .



Figura 4.31 – Teste para análise de SO_4 em solução.

4.7.2.6. Análise de alumínio

A medição da penetração do alumínio se justifica, da mesma forma que do enxofre, pelo fato de ser um importante constituinte do principal produto responsável pela aderência da argamassa ao substrato, a etringita. Além disto, não é tão sensível à variação como é o pH. Foram testados três métodos de análise: colorimétrico em solução, colorimétrico em estado natural e em tiras. Os resultados foram confrontados com os resultados de espectrometria de fluorescência de raios-X.

Para análise de alumínio por tiras foi utilizado o *Aluminium Test Merckoquant* da Merck (1.10015.0001). Neste método, os íons de alumínio são transformados em aluminato, o qual reage com ácido tricarbóxico aurin para formar um complexo vermelho. A eficácia de medição e escala de cor do método foi previamente testada (Figura 4.32). O método consiste em preparar a solução e colocar a fita em contato com a mesma, aguardando alguns segundos para leitura. A concentração de alumínio é medida semiquantitativamente por comparação visual da área de reação com a escala de cor. A escala de medição é: 10, 25, 50, 100 e 250 mg/l Al.



Padrões de Al						
Concentração (mg/L)	0	10	25	50	100	250
Resultado						

Figura 4.32 - Teste para análise de Al em tiras.

Para análise de alumínio em solução e em estado natural foi utilizado o *Aluminium Test Aquaquant* da Merck (1.14413.0001). Neste método, íons de alumínio reagem com cromazuol S para formar um composto azul. A concentração de alumínio é medida semiquantitativamente por comparação visual com cartela de cor. A escala de medição é: 0.07, 0.12, 0.20, 0.35, 0.50, 0.65, 0.80 mg/l Al.



Padrões de Al

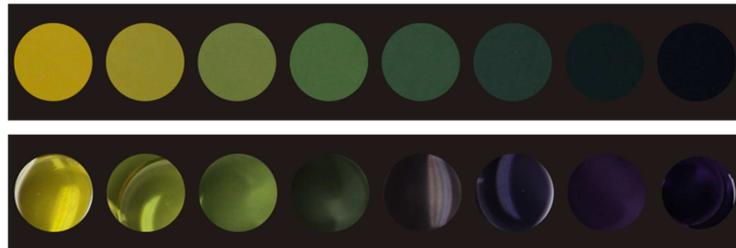


Figura 4.33 – Teste para análise de Al em solução.

Apesar de ter sido observada a variação de cor entre as soluções, estas não correspondem exatamente à tabela de cor fornecida pelo fabricante.

4.7.2.7. Análise de cálcio

A medição da penetração do cálcio se justifica pelo fato de ser um elemento constituinte de quase todos os produtos de hidratação dos cimentos. É também o elemento mais abundante encontrado no substrato proveniente da argamassa. Entretanto, possui a limitação de não permitir identificar quais elementos penetraram, uma vez que as principais fases contêm cálcio em sua formação: etringita, CSH e portlandita. Foram testados três métodos de análise: colorimétrico em solução, colorimétrico em estado natural e em tiras. Os resultados foram confrontados com os resultados de espectrometria de fluorescência de raios-X.

Para análise de cálcio em solução e em estado natural foi utilizado o *Calcium Test Aquamerck* da Merck (Figura 4.34). Neste método, os íons de cálcio reagem com um indicador para formar um complexo vermelho-violeta. A escala de medição é: 10, 15, 20, 25, 40, 60, 100 mg/l Ca.



Padrões de Ca

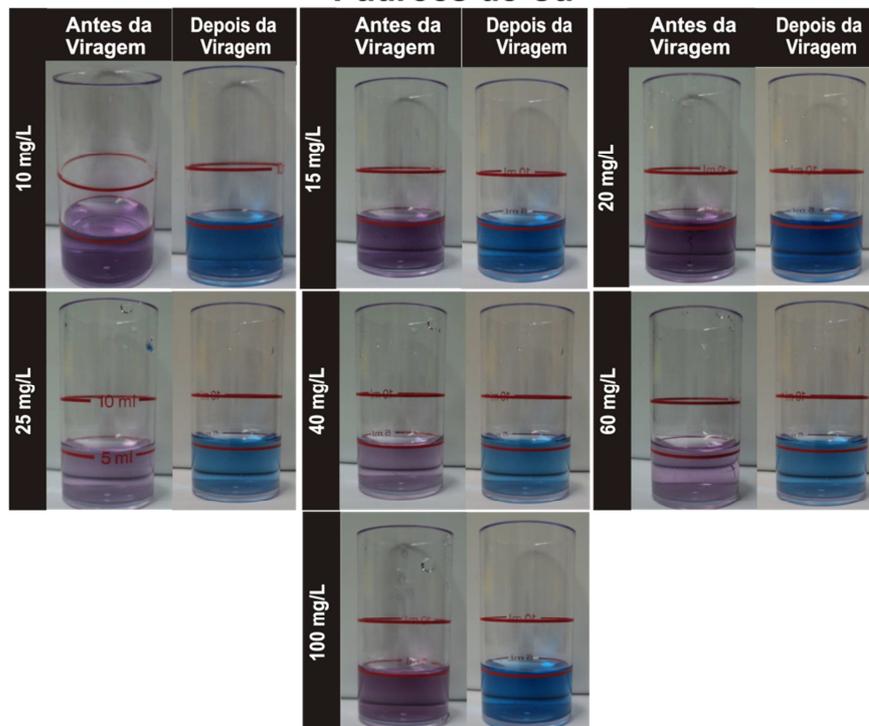


Figura 4.34 – Teste para análise de Ca em solução.

Para análise de cálcio em tiras será utilizado o *Quantofix Calcium* da Mancherey-Nagel (Figura 4.35). O método consiste em preparar a solução e colocar a fita em contato com a mesma, aguardando alguns segundos para leitura. A concentração de Ca é medida semiquantitativamente por comparação visual com cartela de cor. A escala de medição é: 0, 10, 25, 50, 100 mg/L Ca.



Padrões de Ca					
Concentração (mg/L)	0	10	25	50	100
Resultado					

Figura 4.35 – Teste para análise de Ca em tiras.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

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

5.1.1. Consistência (flow table)

A seguir apresentam-se os resultados obtidos nos testes realizados para obtenção do índice de consistência padrão das argamassas utilizadas no momento de aplicação das mesmas. Este ensaio foi realizado seguindo as diretrizes da NBR 13276 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo mistura e determinação de índice de consistência.

Tabela 5.1 - Índice de consistência padrão segundo NBR 13276 (2002)

Tipo de argamassa	Índice de consistência (mm)
Traço 1 - 1:1:6	293
Traço 2 - 1:0:6	270
Traço 3 - argamassa industrializada	255

A consistência está diretamente relacionada à facilidade de aplicação, adensamento da argamassa e extensão de aderência entre a argamassa e o bloco cerâmico, como pode ser observado na compacidade e porosidade das argamassas na Figura 5.1. O traço 1 apresentou maior índice de consistência do que o traço 2, devido principalmente à adição de cal na sua composição. O traço 3, apesar de apresentar o menor índice de consistência, adquiriu boa extensão de aderência em função da plasticidade adquirida pela incorporação de ar.

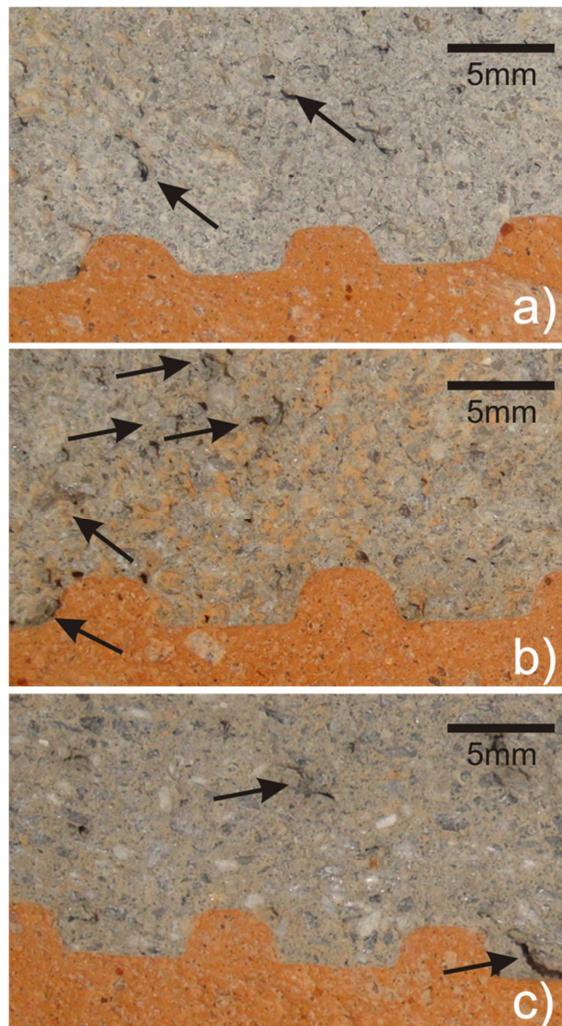


Figura 5.1 - a) traço 1:1:6 (cimento:cal:areia); b) traço 1:0:6 (cimento:cal:areia); c) argamassa industrializada.

5.1.2. Retenção de água

Os resultados obtidos no ensaio de retenção de água confirmam a influência da cal neste comportamento das argamassas. A argamassa produzida com cal apresentou retenção de água superior à argamassa composta somente com cimento e areia. Esta característica se deve à capacidade da cal de reter uma película de água firmemente aderida ao redor de seus finos grãos. Todos os ensaios atenderam ao requisito mínimo da norma BS 4551:2005 que define como valor mínimo 80%.

O maior resultado de retenção de água foi da argamassa industrializada, provavelmente devido à introdução de aditivos químicos retentores de água de base celulósica.

Tabela 5.2 - Retenção de águas segundo BSI 4551 (Mortars, screeds and plaster. Londres 1981)

Tipo de argamassa	Retenção de água (%)
Traço 1 - 1:1:6	90,4
Traço 2 - 1:0:6	84,8
Traço 3 - argamassa industrializada	94,6

5.1.3. Massa específica

Tabela 5.3 - Massa específica segundo NBR 13278 (1995)

Tipo de argamassa	Massa específica (g/cm³)
Traço 1 - 1:1:6	2,33
Traço 2 - 1:0:6	2,43
Traço 3 - argamassa industrializada	2,10

A variação da massa específica é coerente com as variações de resistência mecânica à compressão, ou seja, as argamassas com maior massa específica possuem maior resistência à compressão, conforme dados apresentados na Tabela 5.3.

A argamassa industrializada apresentou massa específica superior à definida pela fabricante, que foi de 1,9 g/cm³.

Segundo a NBR 13281:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos, todas as argamassas se classificaram com D6, ou seja, densidade de massa superiores a 2000 kg/m³.

5.1.4. Ar incorporado

Tabela 5.4 - Teor de ar incorporado segundo NBR 13278 (1995)

Tipo de argamassa	Ar incorporado (%)
Traço 1 - 1:1:6	8,0
Traço 2 - 1:0:6	9,0
Traço 3 - argamassa industrializada	10,7

As variações nos valores obtidos de ar incorporado não confirmaram a influência da cal hidratada na melhoria desta propriedade. Provavelmente o teor de ar incorporado pode ter sido influenciado pelo tempo e energia de mistura. Com relação à argamassa industrializada, a maior quantidade de ar incorporado pode ser relacionada à introdução de aditivos incorporadores de ar. Observa-se ainda que os valores de teor de ar incorporado encontrados estão coerentes com os valores de massa específica apresentados na Tabela 5.4.

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

5.2.1. Resistência à compressão

Tabela 5.5 - Resistência à compressão segundo NBR 13279 (1995)

Tipo de argamassa	Média da resistência à compressão em 6 CPs aos 28 dias (MPa)
Traço 1 - 1:1:6	4,2
Traço 2 - 1:0:6	5,5
Traço 3 - argamassa industrializada	3,2

Os resultados estão condizentes com a lógica de que o traço que contém adição de cal apresenta menores valores de resistência à compressão. A argamassa industrializada não atingiu a resistência a compressão definida pelo fabricante: $\geq 4,0$ MPa aos 28 dias. Os resultados são apresentados na Tabela 5.5.

Segundo a NBR 13281:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos, os traços 1 e 2 classificaram-se como P4 e o traço 3 como P3, contrariando sua especificação como P4.

5.2.2. Resistência à tração na flexão

Tabela 5.6 - Resistência à tração na flexão

Tipo de argamassa	Tração na flexão Média de 3 medições - (MPa)
Traço 1 - 1:1:6	1,9
Traço 2 - 1:0:6	3,0
Traço 3 - argamassa industrializada	1,5

Os resultados de resistência à tração na flexão acompanham a tendência observada, e esperada, da resistência à tração, ou seja, com a introdução da cal na argamassa, a resistência diminui. Os resultados são apresentados na Tabela 5.6.

Os resultados se mantêm coerentes e proporcionais aos resultados de resistência à compressão.

Segundo a NBR 13281:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos, os traços 1 e 3 classificaram-se como R3 e o traço 2 como R4.

5.2.3. Módulo de elasticidade estático

Tabela 5.7 - Módulo de elasticidade estático

Tipo de argamassa	Módulo de elasticidade estático – média de 3 medições - (GPa)
Traço 1 - 1:1:6	14,6
Traço 2 - 1:0:6	20,0
Traço 3 - Argamassa Industrializada	9,3

Os resultados (Tabela 5.7) demonstram a importância da cal na redução do módulo de elasticidade. A adição da cal reduziu significativamente os valores de módulo de elasticidade estático aferidos. Isto significa que a argamassa do traço 1, em relação ao traço 2, terá maior capacidade de se deformar sem que ocorra a ruptura. A argamassa industrializada apresentou o menor valor, demonstrando coerência com os resultados de resistência a compressão, ar incorporado e tração na flexão.

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

5.3.1. Resistência de aderência à tração segundo a NBR 13528 (1995)

Tabela 5.8 - Resistência de aderência

Tipo de argamassa	Ensaio de aderência realizados com idade de 28 dias (MPa)	
	Média (12 ensaios)	Desvio padrão
Traço 1 - 1:1:6	0,44	0,13
Traço 2 - 1:0:6	0,48	0,18
Traço 3 – argamassa Industrializada	0,27	0,07

Os resultados apresentados (Tabela 5.8) confirmam as expectativas de maior resistência de aderência para a argamassa que possui o maior percentual de cimento em relação aos agregados, entretanto, ambos os traços rodados em obra atendem com folga aos requisitos definidos pela norma ABNT NBR 13749/1996 que é de 0,30 para rebocos externos e 0,20 para rebocos internos. A argamassa industrializada ficou 0,03MPa abaixo da recomendação para rebocos externos, entretanto, cabe ressaltar que apesar de apresentar menor resistência mecânica, a argamassa industrializada

apresentou desempenho superior em importantes propriedades para a vida útil de um revestimento externo, como por exemplo, no módulo de elasticidade.

Segundo a NBR 13281:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos, todos os traços classificaram-se A3. Os resultados completos dos ensaios são apresentados nos ANEXOS I a VI.

5.3.2. Tipo de ruptura

Após o rompimento das amostras analisou-se as superfícies de rompimento, afim de identificar o tipo de falha ocorrido. Fazendo-se uma análise por falha predominante, onde considera-se a falha predominante quando um tipo de falha é responsável por mais de 50% da ruptura ocorrida, classificando-a em três tipos: falha de aderência (quando a falha ocorre na interface entre a argamassa e o bloco cerâmico), falha de substrato (quando o rompimento ocorre no interior do bloco cerâmico) e falha coesão da argamassa (quando o rompimento ocorre no interior da argamassas). As Figuras 5.2 a 5.4 apresentam os resultados obtidos.

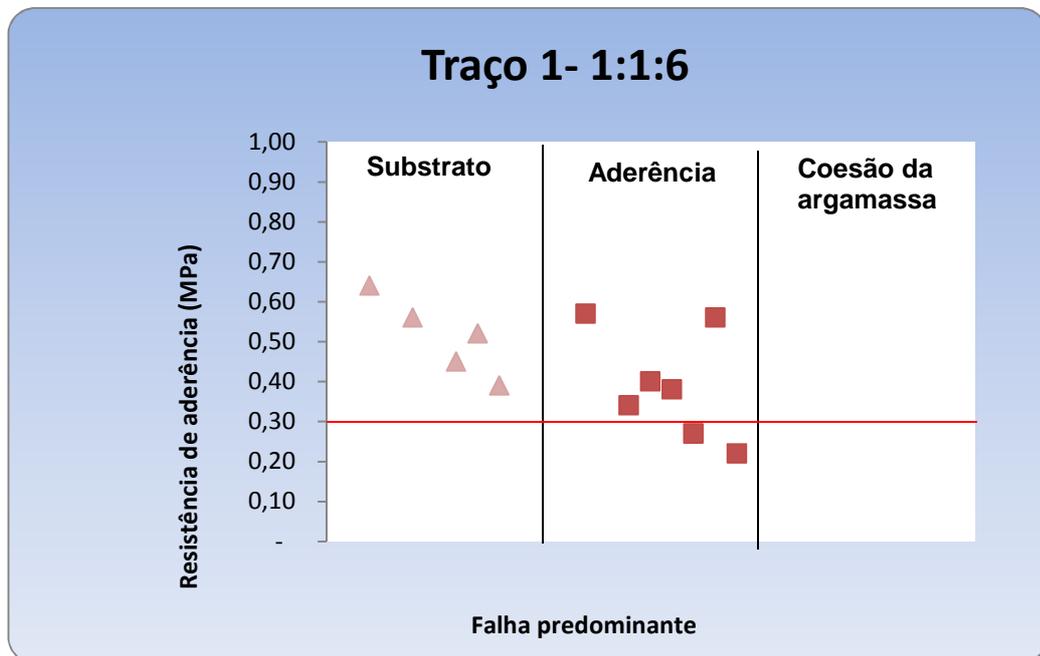


Figura 5.2 - Resistência de aderência do traço 1.

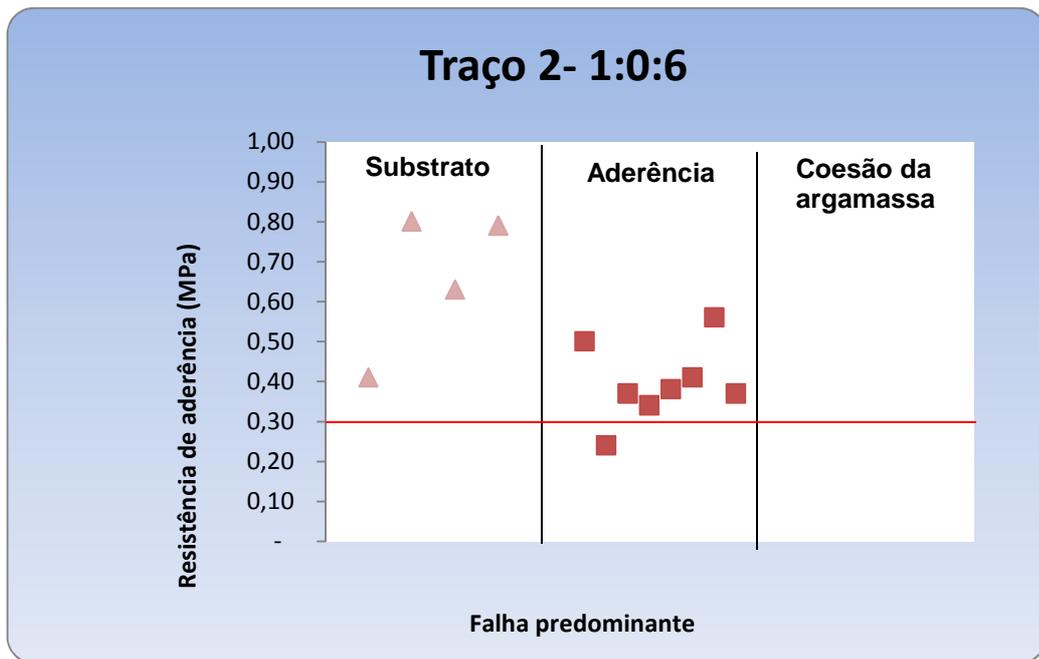


Figura 5.3 - Resistência de aderência do traço 2.

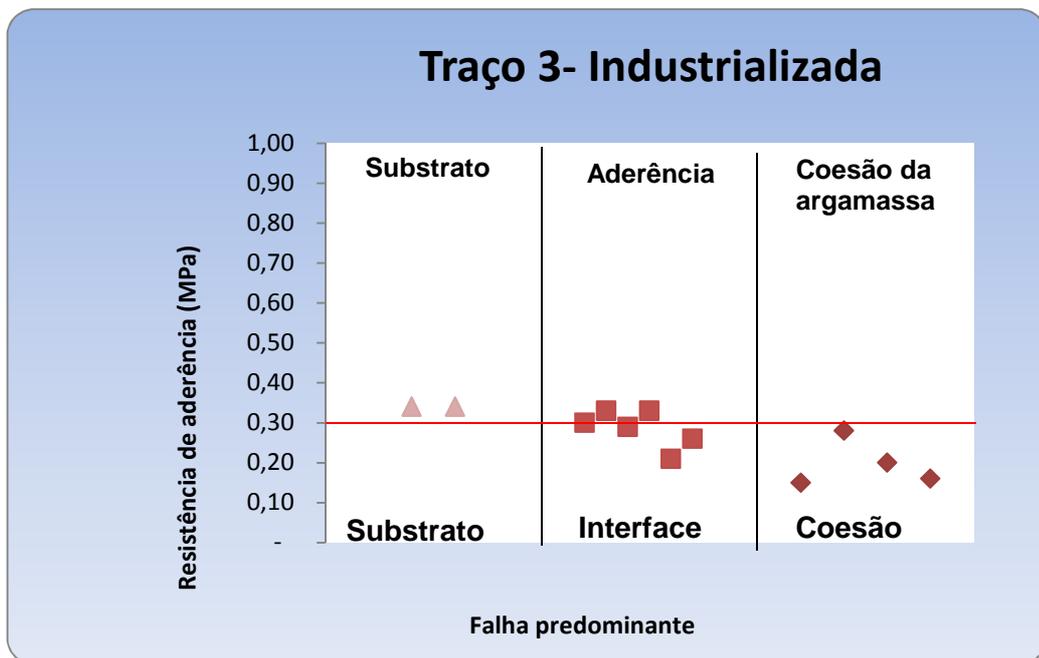


Figura 5.4 - Resistência de aderência do traço 3.

Pode-se observar que em todos os três casos os maiores resultados de resistência de aderência são obtidos quando o rompimento ocorre no interior do bloco cerâmico, ou seja, a resistência da argamassa e da zona de transição superam a resistência do bloco cerâmico, seguido do rompimento na interface, onde a resistência da argamassa

e do bloco cerâmico superam a resistência de aderência entre ambos. Os menores valores de resistência de aderência ocorrem quando a falha predominante é de coesão da argamassa, sinalizando que sua resistência é inferior à resistência do bloco cerâmico e até mesmo inferior à resistência de aderência obtida na interface.

5.4. Combinação dos resultados de caracterização da argamassa

Tabela 5.9 - Combinação dos resultados dos ensaios de caracterização das argamassas

Tipo de argamassa	ICP (mm)	RA (%)	ME (g/cm³)	TAI (%)	RC (MPa)	MED (GPa)	RT (MPa)	ADE (MPa)
Tipo 1 – 1:1:6	293	90,4	2,33	8,0	4,2	14,6	1,9	0,44
Tipo 2 – 1:0:6	270	84,8	2,43	9,0	5,5	20,0	3,0	0,48
Tipo 3 – Argamassa Industrializada	255	94,6	2,10	10,7	3,2	9,3	1,5	0,27

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 aderência

De uma forma geral, os resultados dos ensaios de caracterização da argamassa, nos estados fresco e endurecido, confirmam as expectativas.

Para argamassas com consistências similares, a introdução da cal hidratada aumentou a retenção de água e reduziu a resistência à compressão e à tração. As argamassas com maiores massas específicas apresentaram maiores resistências mecânicas. A exceção coube ao teor de ar incorporado que foi reduzido com a introdução da cal, provavelmente influenciado pela energia e tempo de mistura da argamassa.

A introdução da cal contribuiu para redução do módulo de deformação, configurando uma argamassa com maior capacidade de absorver tensões e conseqüentemente maior vida útil.

Apesar do baixo valor de resistência mecânica da argamassa industrializada (resistência à compressão e à tração), sua baixa resistência de aderência e seu baixo módulo de elasticidade conferem a ela boas propriedades de durabilidade.

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

propriedades no estado fresco facilitam as condições de aplicação, contribuindo para um melhor desempenho no estado endurecido. Sendo assim, a argamassa ideal deve possuir ambas.

5.5. Resultado e discussões das análises de caracterização microestrutural

5.5.1. Microscópio eletrônico de varredura (MEV) e microanalisador EDS

O rompimento entre a argamassa e o substrato pode ocorrer na superfície do substrato (por adesão) ou, principalmente, no interior da argamassa em uma região próxima ao substrato (por coesão).

Na Figura 5.5, o rompimento ocorreu na interface argamassa/bloco cerâmico. Não há vestígios de fases derivadas da argamassa, mas apenas um pouco de contaminação, confirmada pelos baixos teores de cálcio e pela presença de enxofre identificados na microanálise EDS (Tabela 5.10).

Na superfície do bloco cerâmico, notam-se escamas, resultantes da laminação da massa de argila plástica, durante a extrusão (marombagem).

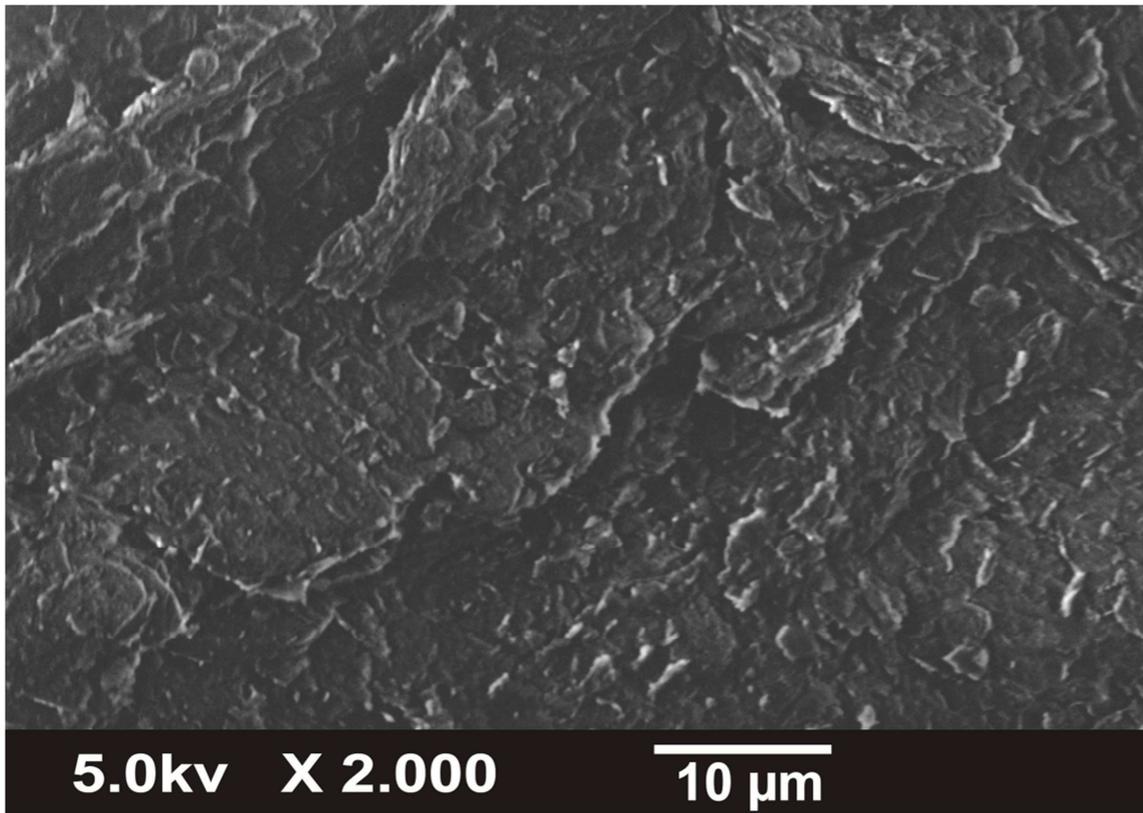


Figura 5.5 – Fotomicrografia da superfície do bloco cerâmico. MEV -imagem obtida com elétrons retroespalhados (IER).

Tabela 5.10 – Microanálise EDS da Figura 5.5 – Fotomicrografia da superfície do bloco cerâmico.

Microanálise EDS (%)					
Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O	CaO	Fe_2O_3
31,89	46,13	2,42	1,33	1,72	17,85

A Figura 5.6 apresenta a fotomicrografia da interface argamassa/substrato de perfil, para o traço 1, após o rompimento da argamassa. Pode-se observar o rompimento por coesão da argamassa a uma distância aproximada de 50µm da superfície do bloco cerâmico.

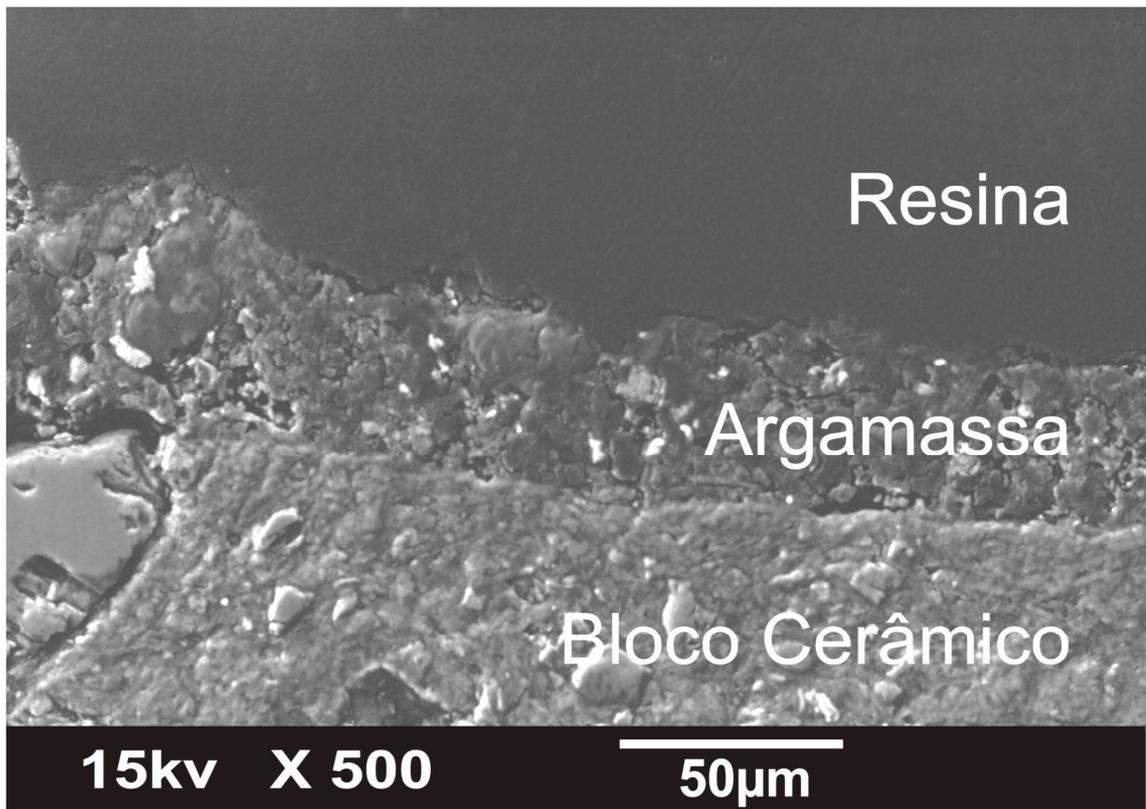


Figura 5.6 - Fotomicrografia da interface – argamassa tipo 1- 1:1:6; vista de perfil do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. MEV -imagem obtida com elétrons retroespalhados (IER).

No rompimento por coesão, observa-se, no traço 1, uma predominância de cristais de etringita na interface (Figura 5.7). Estes cristais apresentam morfologia característica de fitas euédricas, formadas por coalescência de bastões estreitos e longos. Pode-se observar nesta imagem o mecanismo de ancoragem mecânica proporcionada pelos cristais de etringita, com sua penetração no interior nas fissuras do substrato. As áreas mais claras na imagem significam falhas na camada de metalização.

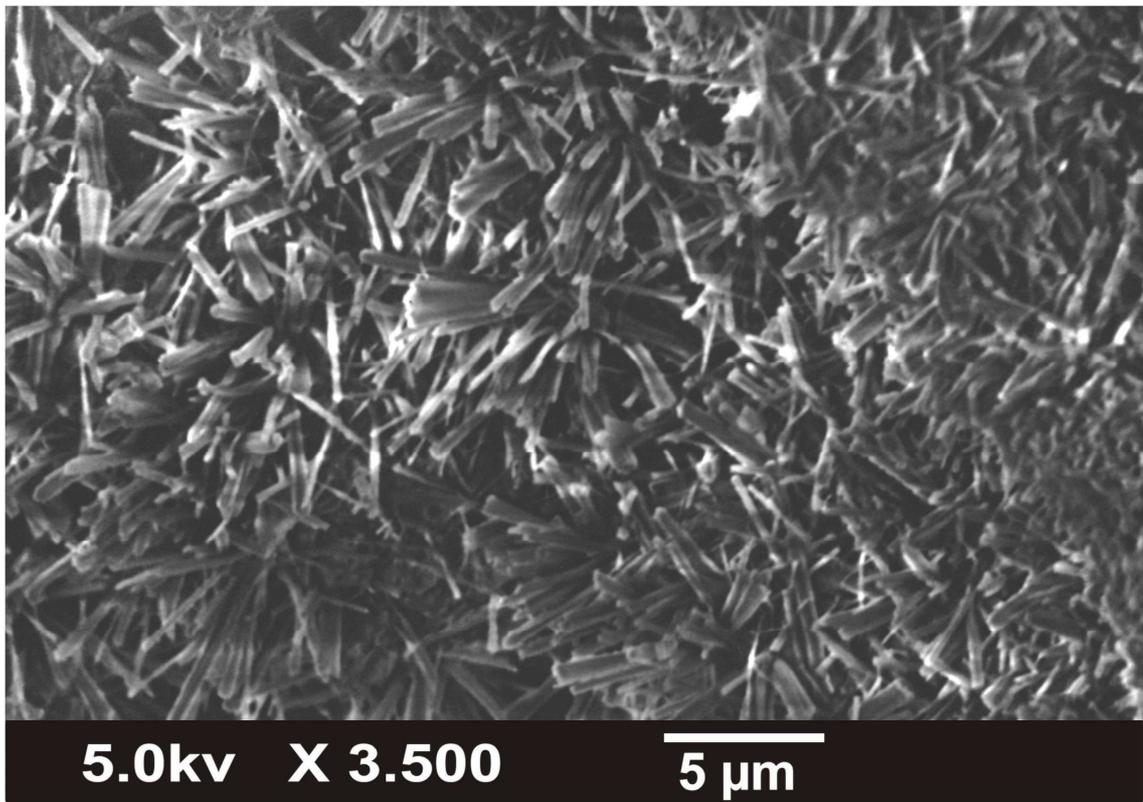


Figura 5.7 - Fotomicrografia do bloco cerâmico – argamassa tipo 1- 1:1:6; vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. MEV -imagem obtida com elétrons secundários (IES).

A Figura 5.8 apresenta a ampliação da Figura 5.7, com aumento para 7500X, onde é possível observar finos cristais de etringita unidos formando feixes mais espessos.

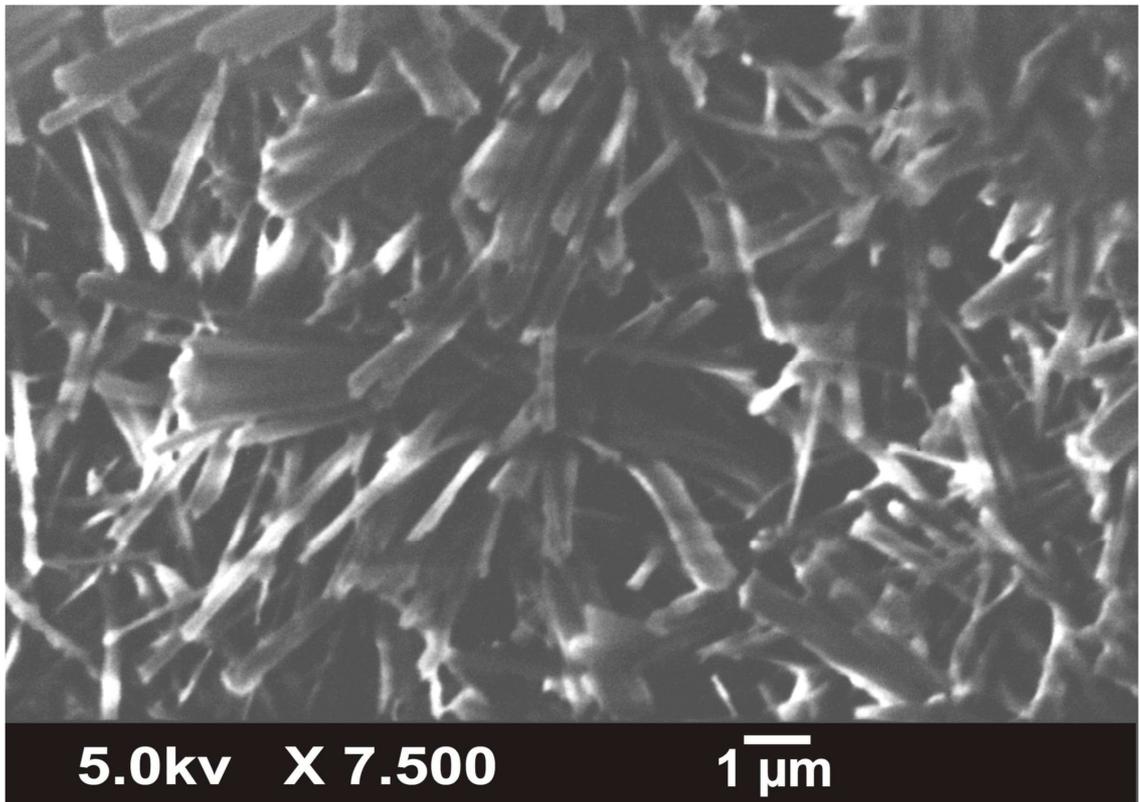


Figura 5.8 - Fotomicrografia do bloco cerâmico – argamassa tipo 1- 1:1:6; vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. MEV -imagem obtida com elétrons secundários (IES). Detalhe da fotomicrografia 5.7, com aumento de 7500X.

A microanálise EDS, da fotomicrografia da Figura 5.8 apresenta elevados teores de cálcio, alumínio e enxofre que, associados à morfologia característica, confirmam se tratar de cristais de etringita. O excesso de CaO observado na microanálise pode, provavelmente, ser causado pela presença de portlandita, situada abaixo dos cristais de etringita atingida pelo feixe de elétrons (Tabela 5.11).

Tabela 5.11 – Microanálise EDS da Figura 5.8

Microanálise EDS (%)				
Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO
7,22	3,15	20,04	0,73	68,86

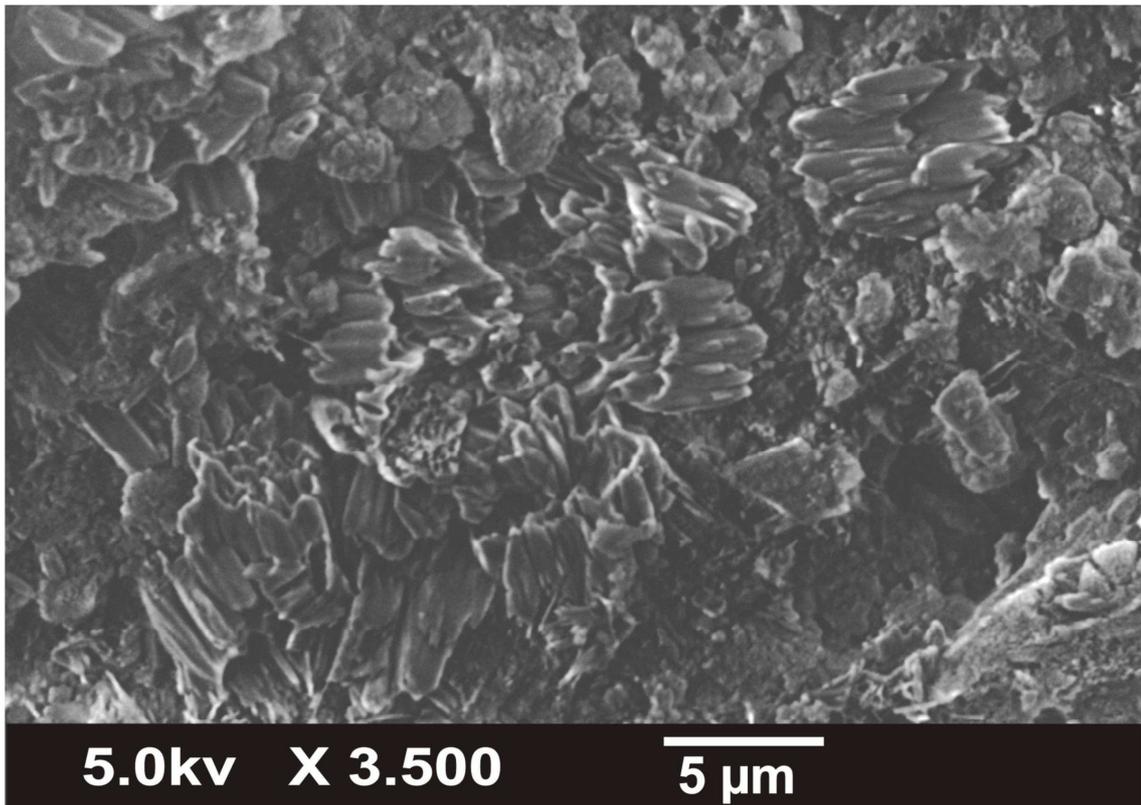


Figura 5.9 - Fotomicrografia do bloco cerâmico – argamassa tipo 1- 1:1:6; vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. MEV -imagem obtida com elétrons secundários (IES).

Apesar da predominância da etringita, outras fases também podem ser observadas na interface de rompimento argamassa/bloco cerâmico, para o traço 1. Na Figura 5.9, observa-se portlandita com morfologia em lamelas subédricas curvas, um pouco alongadas, formando agregados em forma de barril (oco) com as bases abertas. Observam-se ainda placas de portlandita sem esta organização, como no canto inferior esquerdo; e também, películas anédricas, possivelmente de CSH, na borda superior. Em poucas áreas pode-se notar a superfície do bloco sem recobrimento.

Na Figura 5.10, podem-se observar as fases apresentadas na Figura 5.9 com aumento de 7500X. A microanálise EDS realizada (Tabela 5.12) indica que o ponto 1 trata-se de CSH e o ponto 2 trata-se de portlandita, ambas com influência do bloco cerâmico logo abaixo.

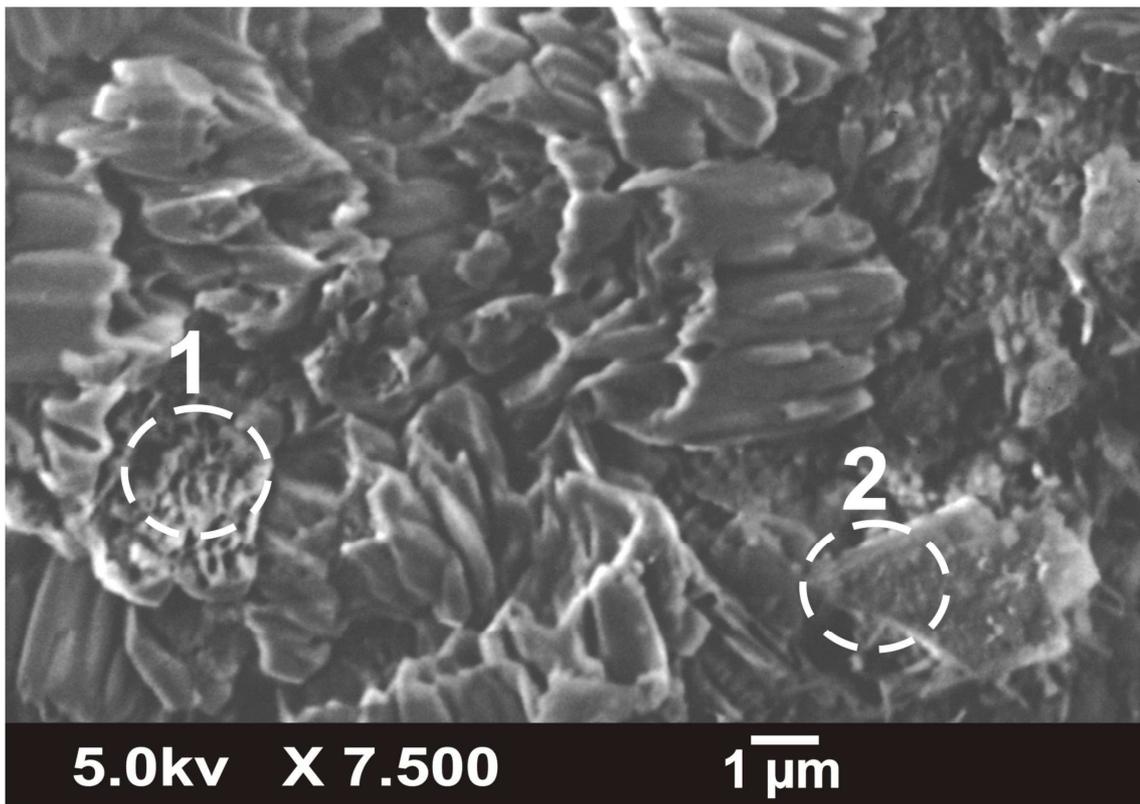


Figura 5.10 - Fotomicrografia do bloco cerâmico – argamassa tipo 1- 1:1:6; vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. MEV -imagem obtida com elétrons secundários (IES). Detalhe da fotomicrografia 5.9, com aumento de 7500X

Tabela 5.12 – Microanálise EDS da Figura 5.10

Microanálise EDS (%)								
Nº	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
1	0,47	0,55	22,54	39,30	7,77	5,20	18,53	5,65
2	0,46	0,49	16,78	21,87	6,25	1,41	50,81	1,94

Na Figura 5.11, argamassa tipo 1, a morfologia observada, aliada aos altos teores de cálcio da microanálise EDS (Tabela 5.13), sugerem se tratar de cristais de portlandita. Há alguns pequenos grupos de lamelas orientados verticalmente, lembrando proto-barris. Próximo ao canto inferior direito, há um destes grupos, maior um pouco, de perímetro quadrado. Na parte direita central, há placas alongadas, empilhadas umas sobre as outras.

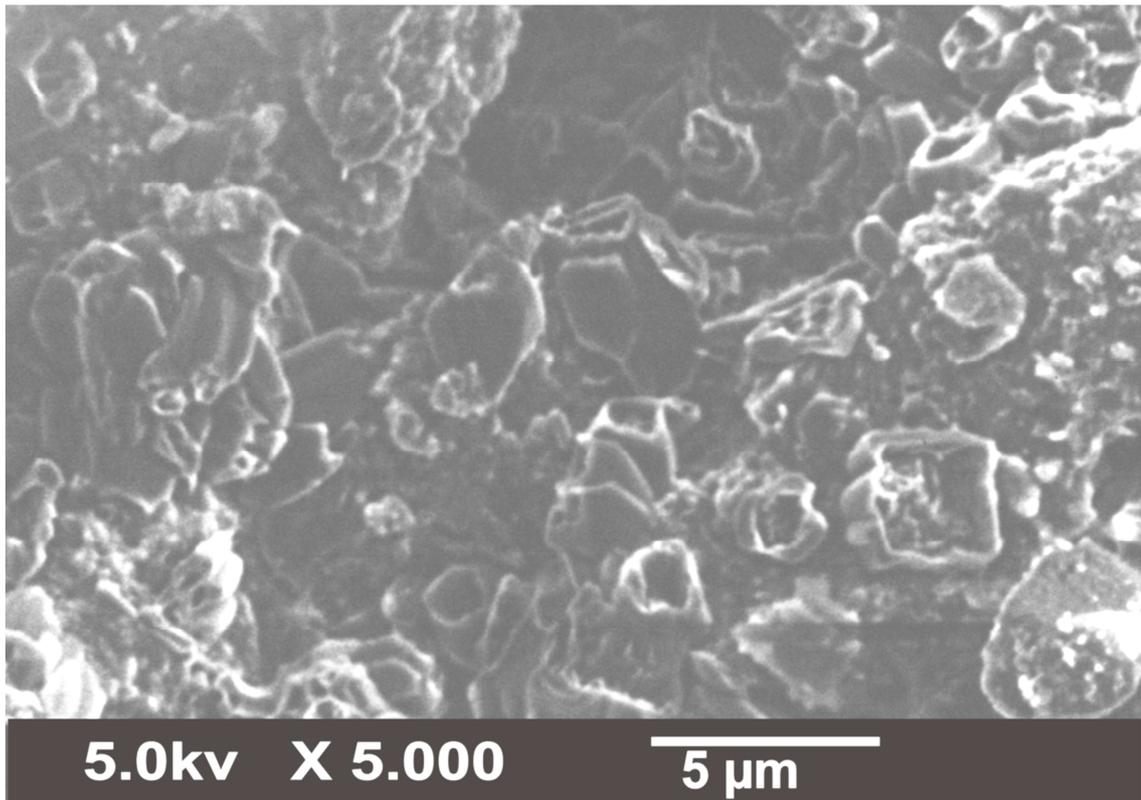


Figura 5.11 - Fotomicrografia do bloco cerâmico – argamassa tipo 1- 1:1:6; vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. MEV -imagem obtida com elétrons secundários (IES).

Tabela 5.13 –Microanálise EDS da Figura 5.11

Microanálise EDS (%)						
MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
0,30	4,47	8,65	0,92	1,92	80,68	3,06

A Figura 5.12, argamassa tipo 1, observa-se que a portlandita está presente com seu hábito usual nestas amostras, em lamelas alongadas, ou melhor, ripas euédricas a subédricas. Algumas poucas têm forma de prismas ocos. Nesta área, as ripas estão geralmente não associadas; contudo, próximo ao canto direito inferior, há uma estrutura de proto-barril.

As microanálises (Tabela 5.14) confirmam que o ponto 1 trata-se de possível portlandita ou calcita e que o ponto 2 trata-se do bloco cerâmico, ou seja, área onde houve rompimento por adesão.

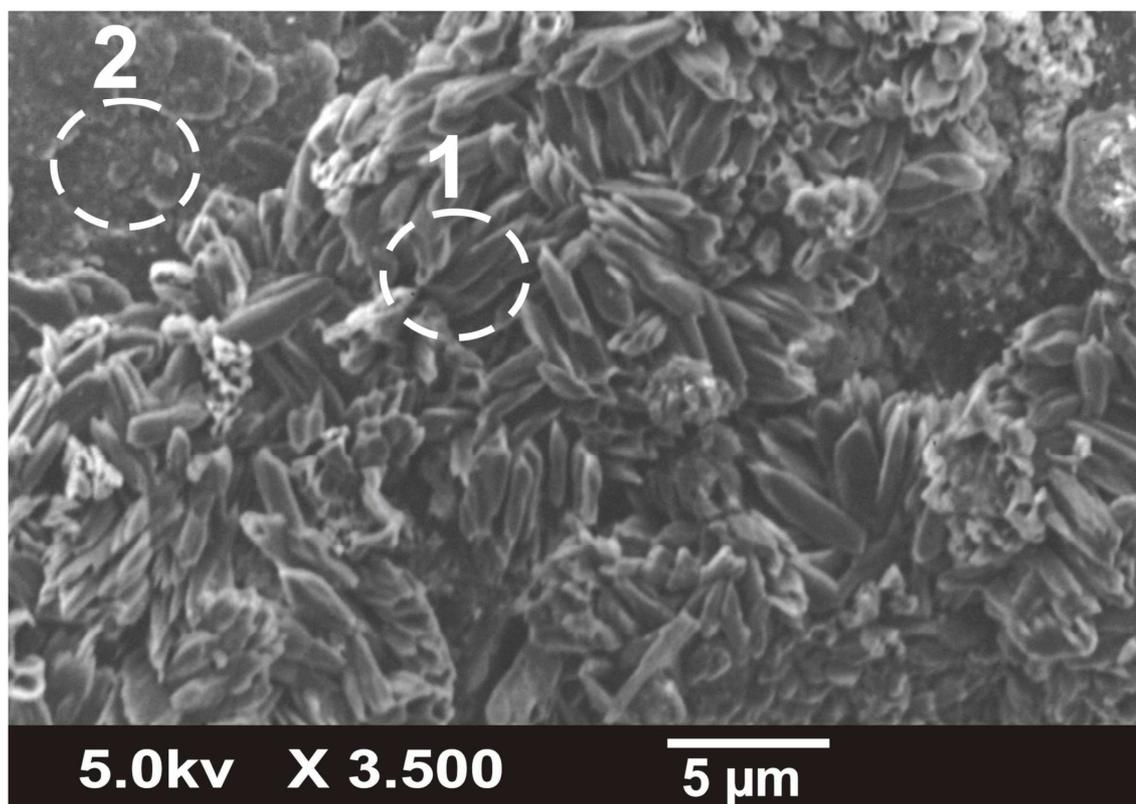


Figura 5.12 - Fotomicrografia do bloco cerâmico – argamassa tipo 1- 1:1:6; vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. MEV -imagem obtida com elétrons secundários (IES).

Tabela 5.14 – Microanálise EDS da Figura 5.12

Microanálise EDS (%)							
Nº	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
1	-	1,22	2,23	3,26	0,61	91,66	1,03
2	0,48	35,77	50,73	-	4,12	0,83	8,06

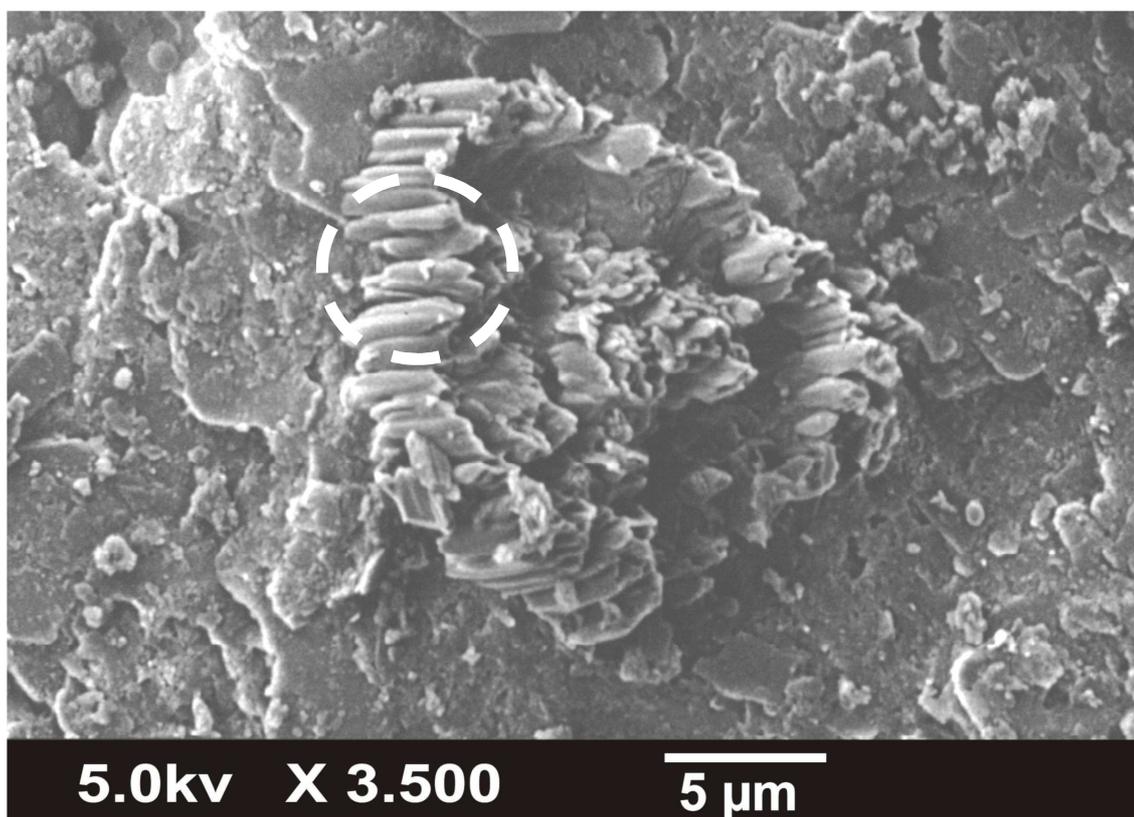


Figura 5.13 - Fotomicrografia do bloco cerâmico – argamassa tipo 1- 1:1:6; vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. MEV -imagem obtida com elétrons secundários (IES).

Tabela 5.15 – Microanálise EDS da figura 5.19

Microanálise EDS (%)					
Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O	CaO	Fe_2O_3
13,62	19,27	-	2,27	61,11	3,73

Na Figura 5.13 pode-se observar grupo de ripas e prismas ocas de portlandita, organizados em barril, vistos de cima, um pouco lateral, ao eixo do barril. A estrutura lembra mais uma paliçada (Forte Apache). No restante da fotomicrografia, aparece a superfície do bloco cerâmico, onde notam-se escamas, resultantes da laminação da massa de argila plástica, durante a extrusão (marombagem).

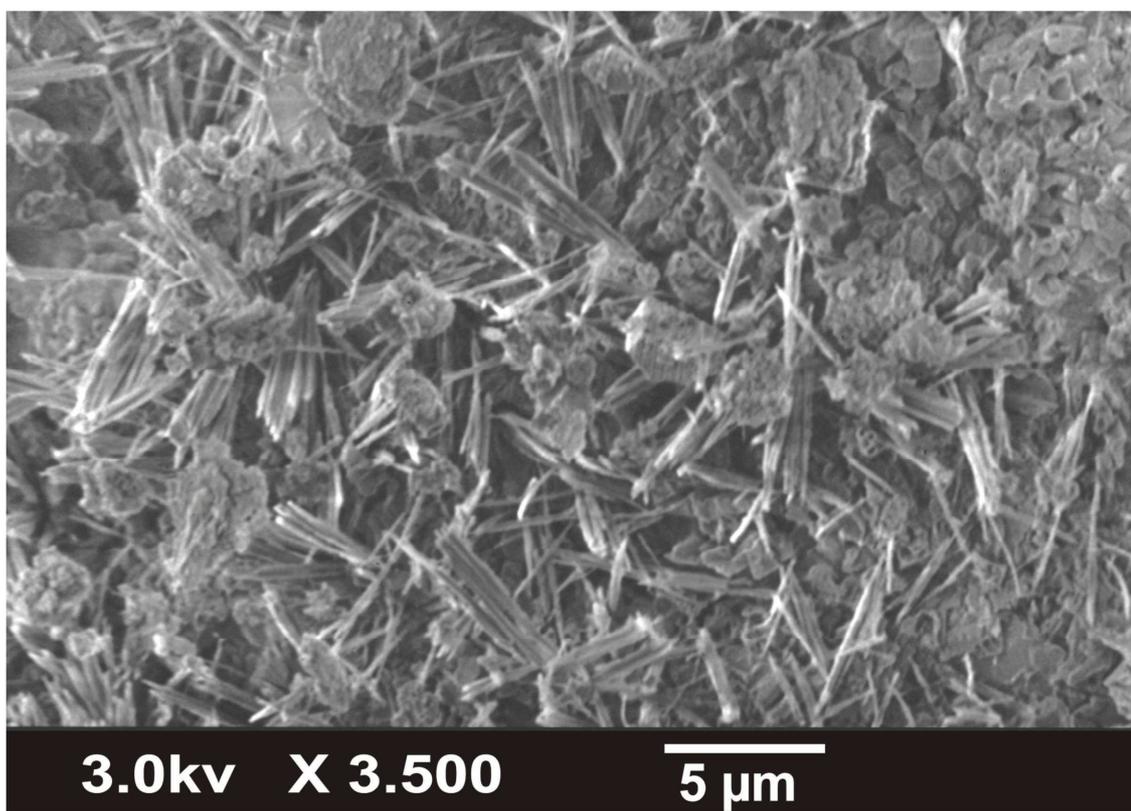


Figura 5.14 - Fotomicrografia do bloco cerâmico – argamassa tipo 2- 1:0:6; vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. MEV -imagem obtida com elétrons secundários (IES).

A morfologia de fibras e fitas observada nas Figura 5.14 e 5.15, argamassa tipo 2, sugere tratar-se de cristais de etringita. Em alguns pontos, os cristais de etringita se misturam a outra fase, com morfologia de placas subédricas, provavelmente portlandita, talvez carbonatada.

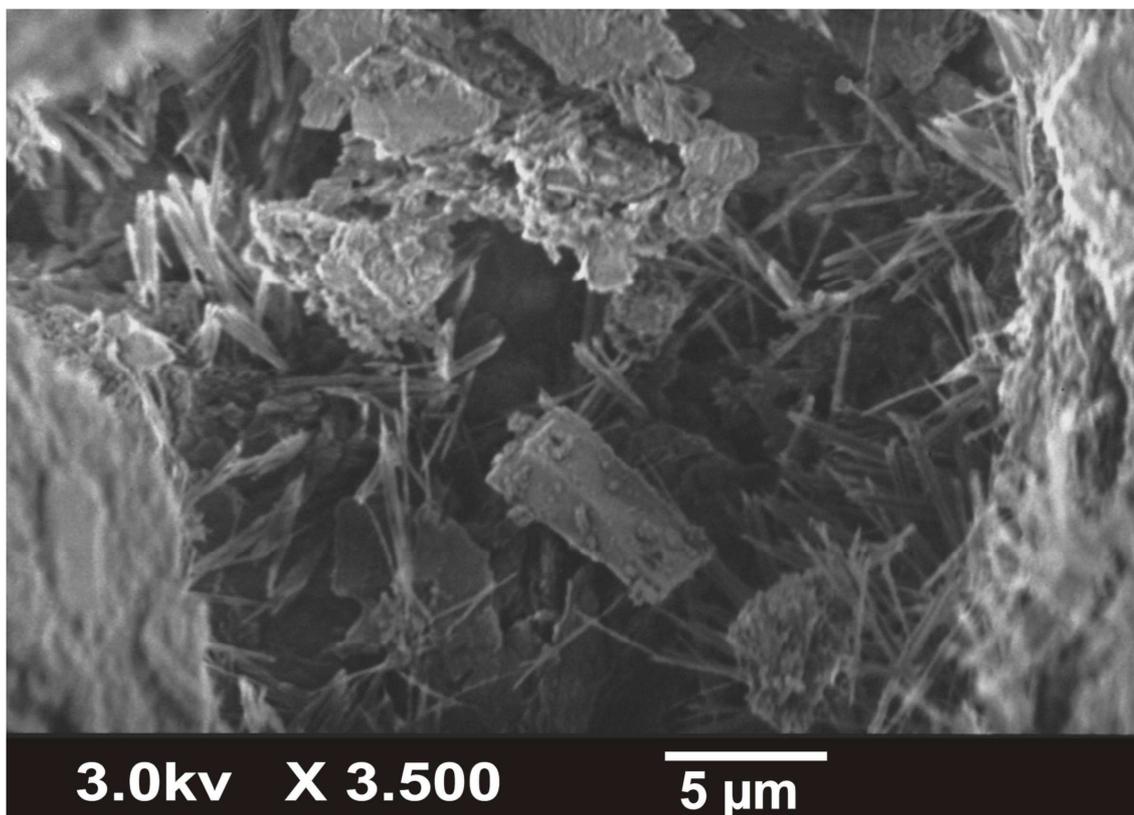


Figura 5.15 - Fotomicrografia do bloco cerâmico – argamassa tipo 2- 1:0:6; vista de topo do bloco cerâmico, após a retirada da argamassa. MEV -imagem obtida com elétrons secundários (IES).

5.6. Análises mineralógicas e químicas

Para análise química das amostras analisadas, objeto deste estudo, foram utilizados os métodos de difração de raios-X, fluorescência de raios-X, análise pH em diversos métodos e análises químicas com reagentes colorimétricos e em fita.

5.6.1. Difração de raios-X (DRX)

A difração de raios-X da argamassa 1 - (1:1:6) apresentou grande quantidade de quartzo. A principal fase proveniente dos aglomerantes foi a calcita. Foram identificadas baixas concentrações de portlandita e traços de caulinita, provavelmente proveniente de argila presente na areia utilizada (Figura 5.16).

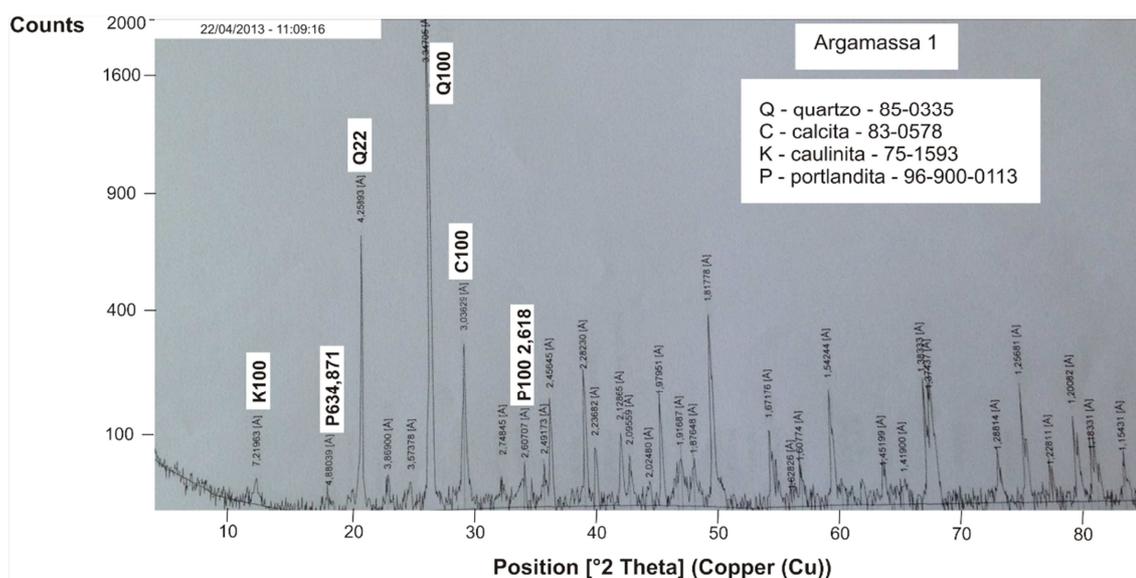


Figura 5.16 – Difração de raios X da argamassa 1 (1:1:6).

A difração de raios-X da argamassa 2 - (1:0:6) apresentou maior quantidade de quartzo do que no traço 1 e menor quantidade de calcita. Isto se deve ao menor proporcionamento de aglomerantes no traço utilizado. Foram identificados baixo teor de caulinita e apenas traços de portlandita (Figura 5.17).

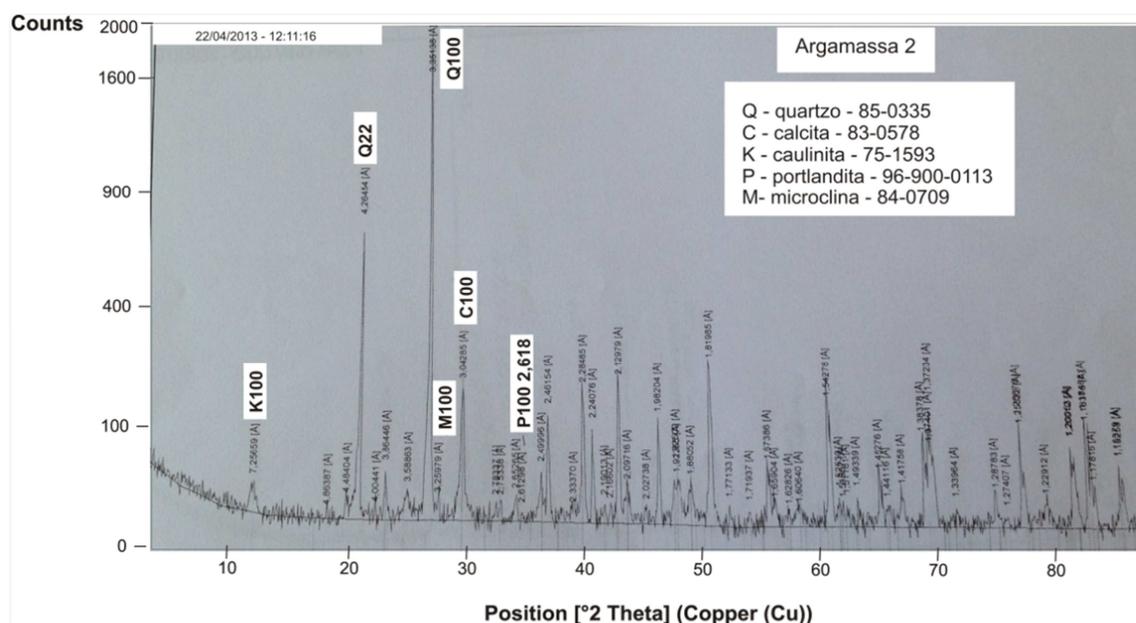


Figura 5.17 – Difração de raios X da argamassa 2 (1:0:6).

Na difração de raios-X da argamassa 3 – industrializada, a fase mais abundante identificada foi a calcita. Este resultado pode ser explicado pelo fato do método não

distinguir se este mineral é proveniente dos produtos de hidratação dos aglomerantes ou da areia calcária utilizada. Foram identificadas baixas concentrações de quartzo e traços de caulinita. Não foi identificada a presença de portlandita, entretanto foram identificados vestígios de fase anidra, traços de C_3S , provavelmente proveniente de falhas na hidratação do aglomerante. Cabe ressaltar que as raiais de C_3S podem-se sobrepor às raiais de portlandita (Figura 5.18).

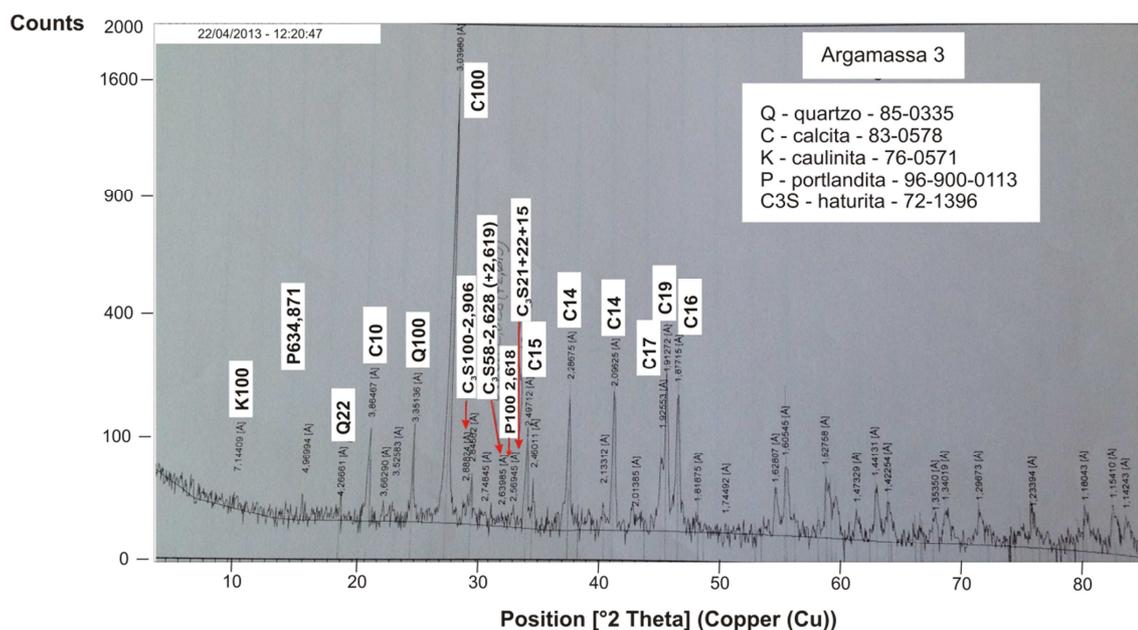


Figura 5.18 – Difração de raios-X da argamassa 3 – industrializada.

Os resultados da difração de raios-X são coerentes com as diferenças de composição das argamassas utilizadas e confirmam os resultados da microscopia eletrônica de varredura.

5.6.2. Fluorescência de raios-X

5.6.2.1. Método semiquantitativo no bloco cerâmico

A seguir apresentam-se os resultados obtidos nas análises realizadas com fluorescência de raios-X, pelo método semiquantitativo, de material extraído da interface do bloco cerâmico, conforme apresentado na Figura 4.22. Os resultados são apresentados primeiramente pelo tipo de argamassa (Figuras 5-16 a Figura 5.21) e depois pelo elemento analisado (Figura 5.22 a Figura 5.26). O elemento Fe foi retirado da análise uma vez que o método utilizado para extração das amostras, através de fresa metálica, poderia contaminá-la e comprometer os resultados.

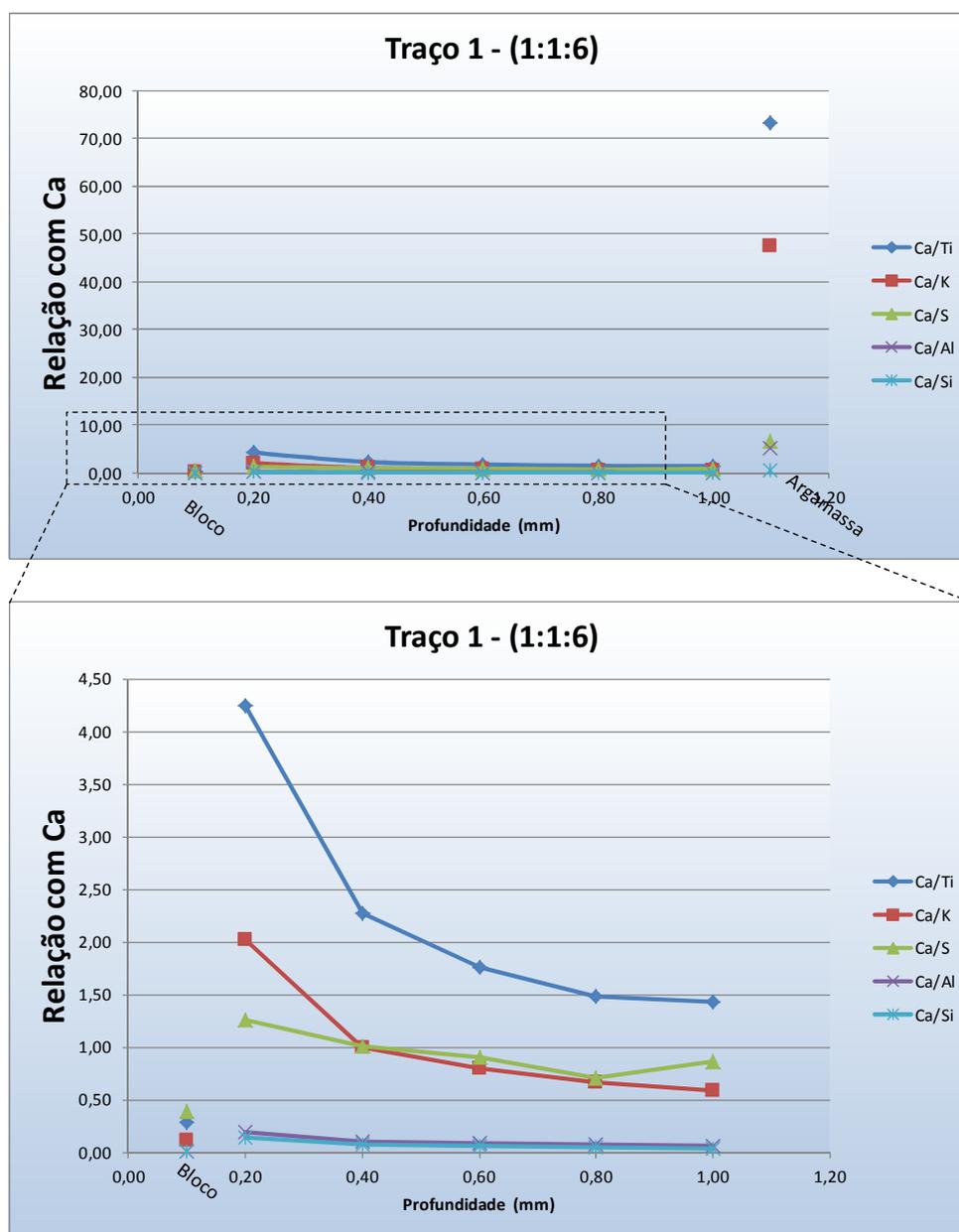
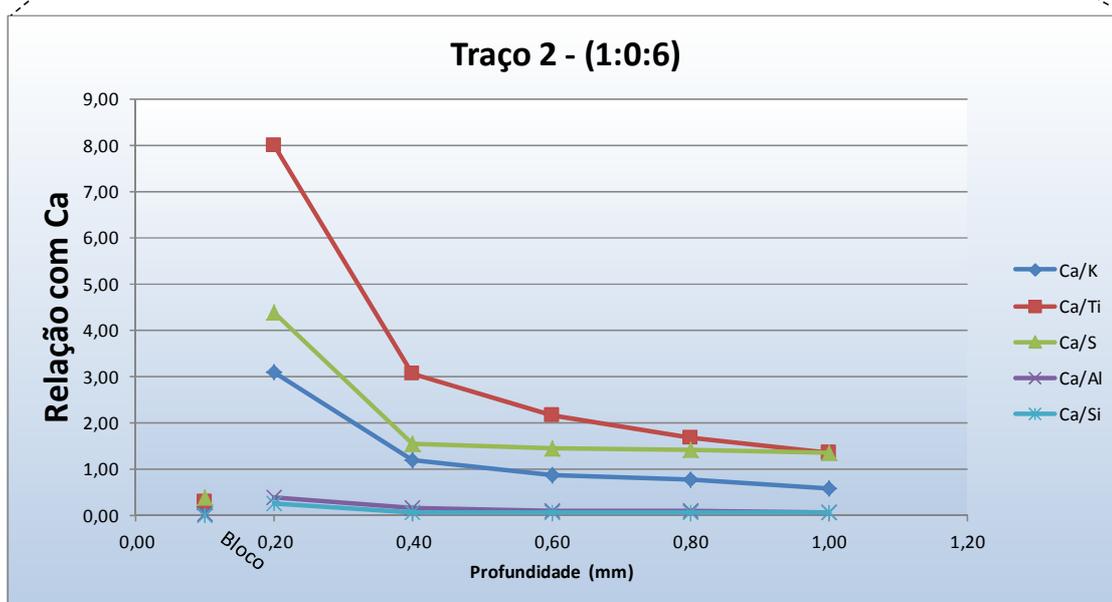
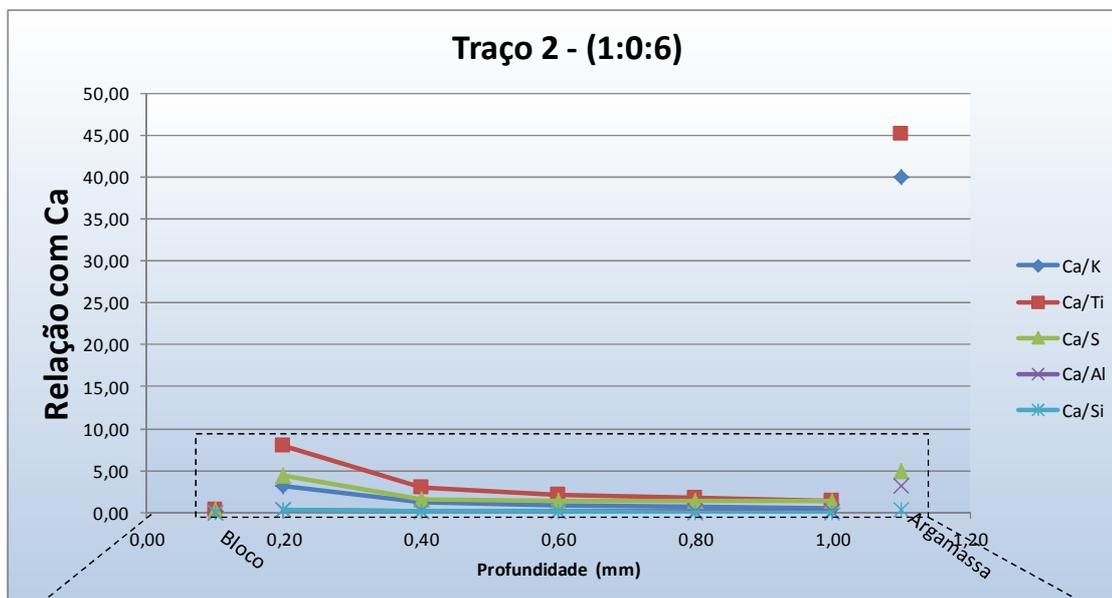
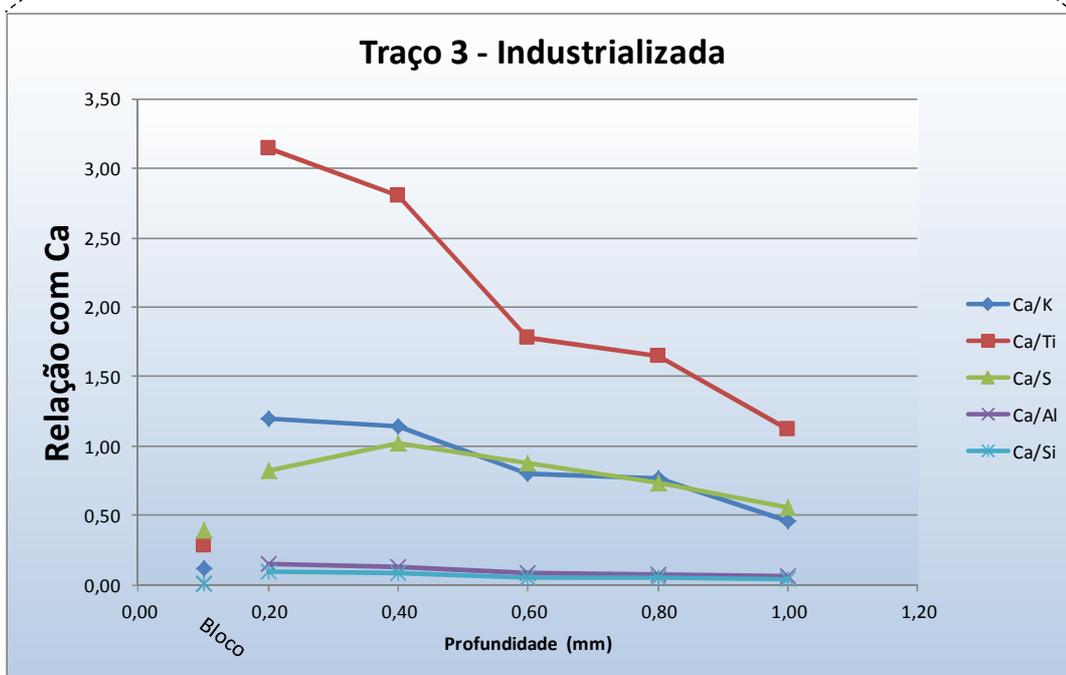
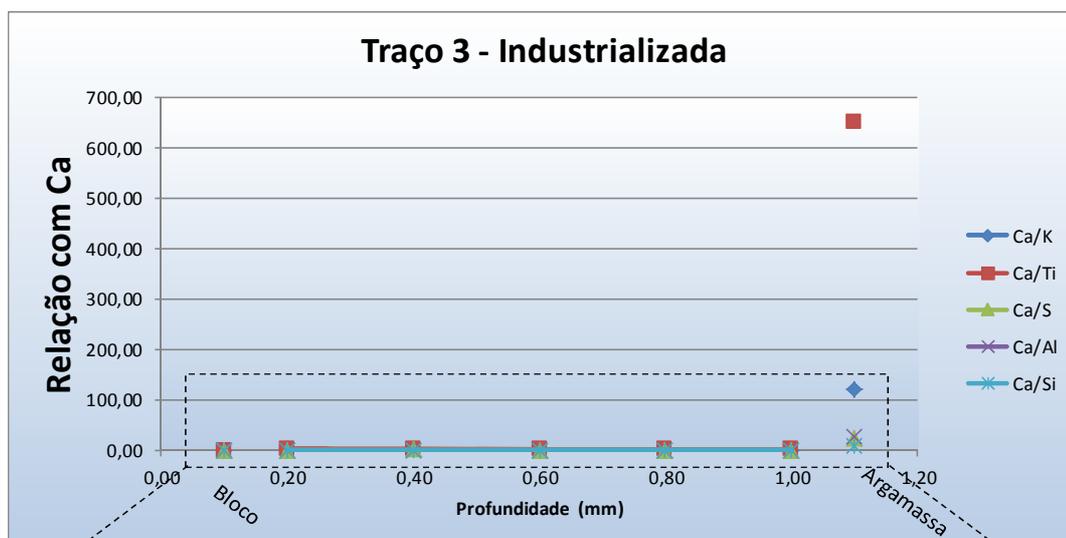


Figura 5.19 - Fluorescência de raios-X semiquantitativa do bloco – argamassa 1 (1:1:6).



Relação	Profundidade (mm)						
	Bloco	0,2	0,4	0,6	0,8	1	Argamassa
Ca/K	0,12	3,09	1,20	0,86	0,77	0,57	39,96
Ca/Ti	0,29	7,98	3,05	2,16	1,68	1,34	45,17
Ca/S	0,39	4,38	1,54	1,43	1,42	1,34	5,00
Ca/Al	0,01	0,37	0,15	0,09	0,08	0,06	3,18
Ca/Si	0,01	0,26	0,06	0,07	0,06	0,05	0,25

Figura 5.20 Fluorescência de raios-X semiquantitativa do bloco – argamassa 2 (1:0:6).



Relação	Profundidade (mm)						
	Bloco	0,2	0,4	0,6	0,8	1	Argamassa
Ca/K	0,12	1,20	1,14	0,80	0,77	0,46	119,71
Ca/Ti	0,29	3,14	2,80	1,78	1,65	1,13	649,86
Ca/S	0,39	0,82	1,02	0,88	0,74	0,55	23,82
Ca/Al	0,01	0,15	0,13	0,08	0,07	0,06	25,85
Ca/Si	0,01	0,09	0,09	0,06	0,05	0,04	8,49

Figura 5.21 Fluorescência de raios-X semiquantitativa do bloco – argamassa 3 (industrializada).

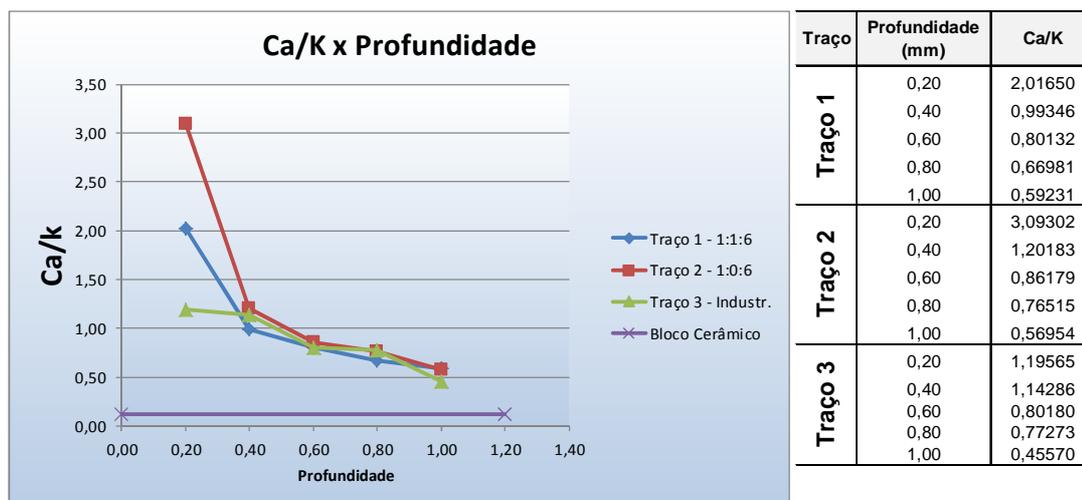


Figura 5.22 – Fluorescência de raios-X semiquantitativa do bloco cerâmico para K.

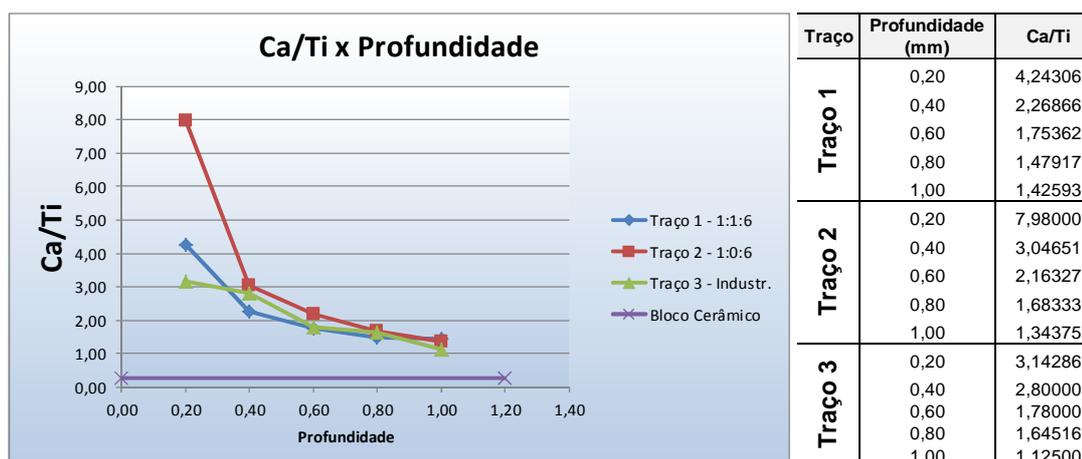


Figura 5.23– Fluorescência de raios-X semiquantitativa do bloco cerâmico para Ti.

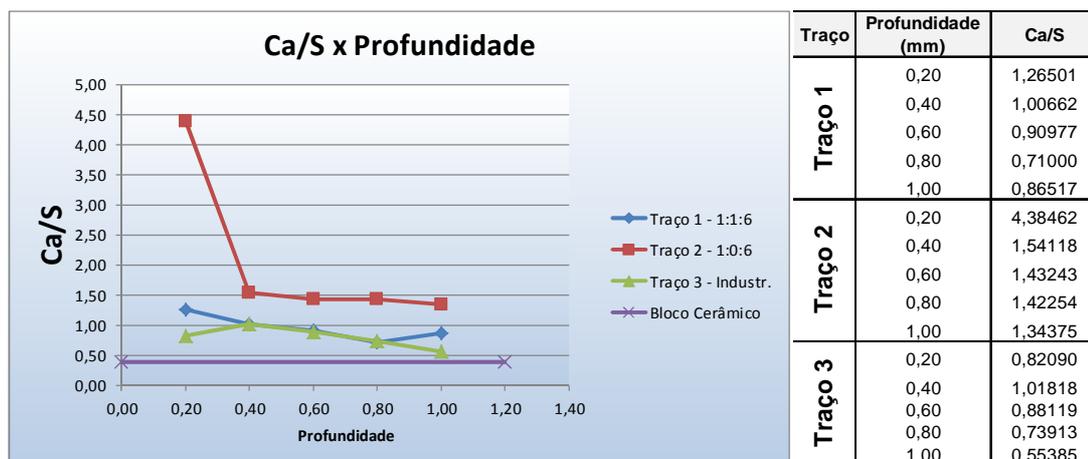


Figura 5.24– Fluorescência de raios-X semiquantitativa do bloco cerâmico para S.

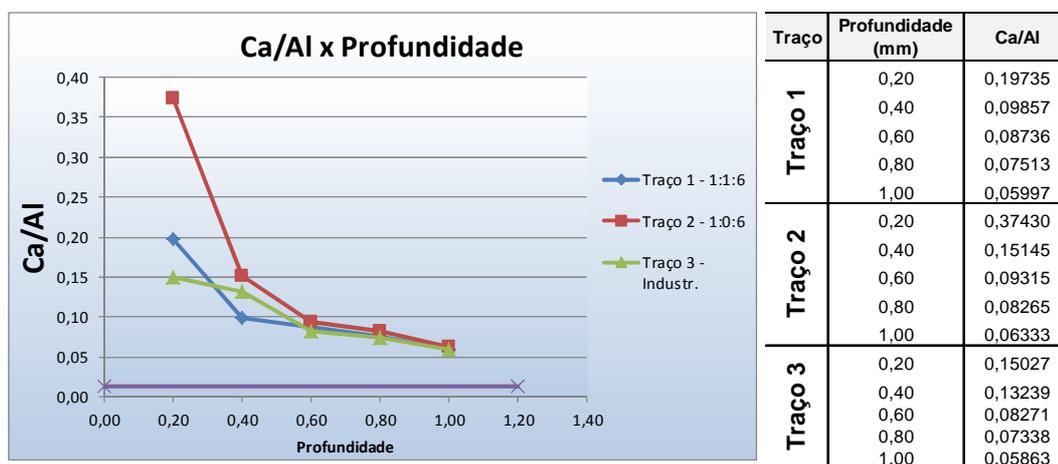


Figura 5.25 – Fluorescência de raios-X semiquantitativa do bloco cerâmico para Al.

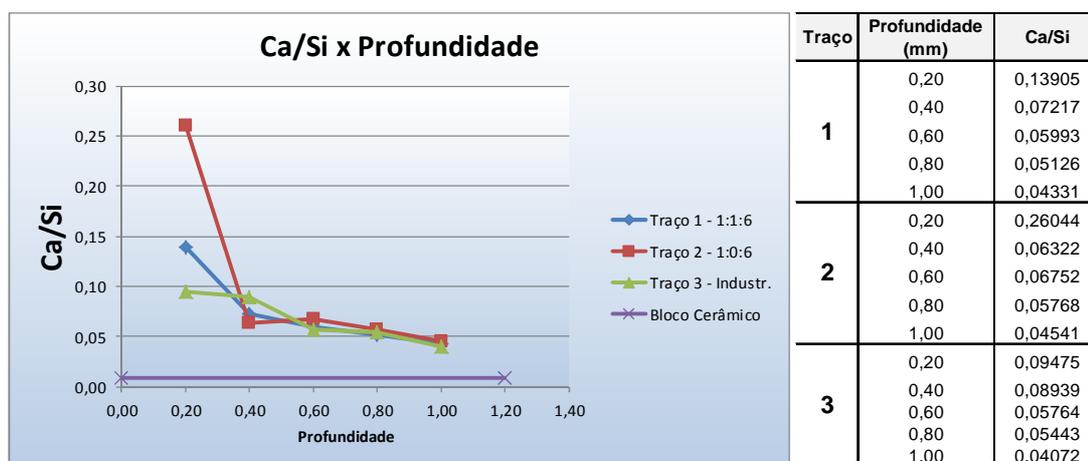


Figura 5.26 – Fluorescência de raios-X semiquantitativa do bloco cerâmico para Si.

Por meio dos resultados de FRX semiquantitativa pode-se observar a existência de uma região, próxima à interface, com composição química muito diferente da composição original do bloco cerâmico (Figura 5.19 a 5.26). Esta diferença na composição química comprova que houve a penetração de produtos de hidratação dos aglomerantes da argamassa no interior do substrato. Nas profundidades analisadas, até 1000 μm , foram identificados como produtos provenientes da penetração da pasta o cálcio, o alumínio, e o enxofre. Este fato pode ser explicado pela sucção pelo substrato dos íons de sulfato e alumínio, provenientes do cimento e dos íons de cálcio da cal. Uma vez no interior dos poros, estes íons se precipitam na forma de hidratos.

Em todos os traços, a primeira camada (200 μm) apresenta a maior presença dos elementos cálcio e alumínio. Esta primeira camada é mais suscetível a falhas e contaminações pelo método de extração utilizado, em função das imperfeições da superfície trabalhada. Entretanto, é também a principal camada que apresenta precipitações de cristais de etringita, principal responsável pela aderência da argamassa ao substrato.

A presença dos elementos provenientes da argamassa nos poros do substrato decai na medida em que a profundidade aumenta, entretanto, em taxas cada vez menores, até o ponto em que tendem a estabilizar.

Apesar da argamassa 3 – industrializada utilizar areia calcária e as argamassas 1 e 2 utilizarem areia quartzosa, não houveram grandes diferenças nos perfis de penetração no substrato.

5.6.2.2. Método quantitativo no bloco cerâmico e na argamassa

A seguir apresentam-se os resultados obtidos nas análises de fluorescência de raios-X, pelo método quantitativo, de material extraído da interface do bloco cerâmico e da argamassa, conforme apresentado na Figura 4.22. Os resultados são apresentados primeiramente pelo tipo de argamassa (Figura 5.27 a Figura 5.29) e depois pelo elemento analisado (Figura 5.30 a Figura 5.36). O elemento Fe foi retirado da análise, uma vez que o método utilizado para extração das amostras, através de fresa metálica, poderia contaminá-la e comprometer os resultados.

Profundidade (mm)	Trço 1 - Argamassa 1:1:6 (%)							
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	
Bloco	22,27	63,83	0,70	0,99	0,42	2,05	0,00	
-1,00	5,32	87,35	2,67	1,22	0,26	2,97	0,22	
-0,80	9,61	83,98	1,35	1,38	0,35	3,15	0,18	
-0,60	15,84	78,49	0,73	1,57	0,20	3,17	0,01	
-0,40	18,54	75,03	1,12	2,07	0,15	3,09	0,01	
-0,20	20,39	71,46	1,10	4,15	0,22	2,66	0,01	
Interface								
0,20	5,65	77,29	0,12	15,24	0,12	0,11	0,01	
0,40	10,33	74,67	0,17	13,36	0,11	0,43	0,01	
0,60	9,30	75,01	0,17	13,97	0,11	0,25	0,01	
0,80	9,64	73,96	0,16	14,36	0,15	0,14	0,02	
1,00	7,30	76,46	0,19	14,10	0,11	0,18	0,01	
1,20	8,44	74,43	0,14	14,15	0,69	0,11	0,01	
1,40	7,35	75,78	0,18	14,19	0,20	0,16	0,01	
1,60	8,08	74,03	0,22	14,67	0,11	0,23	0,01	
1,80	5,90	75,00	0,21	15,47	0,27	0,11	0,01	
2,00	14,48	57,55	0,15	24,89	0,10	0,44	0,01	
Argamassa	2,53	79,27	0,25	15,67	0,14	0,22	0,30	

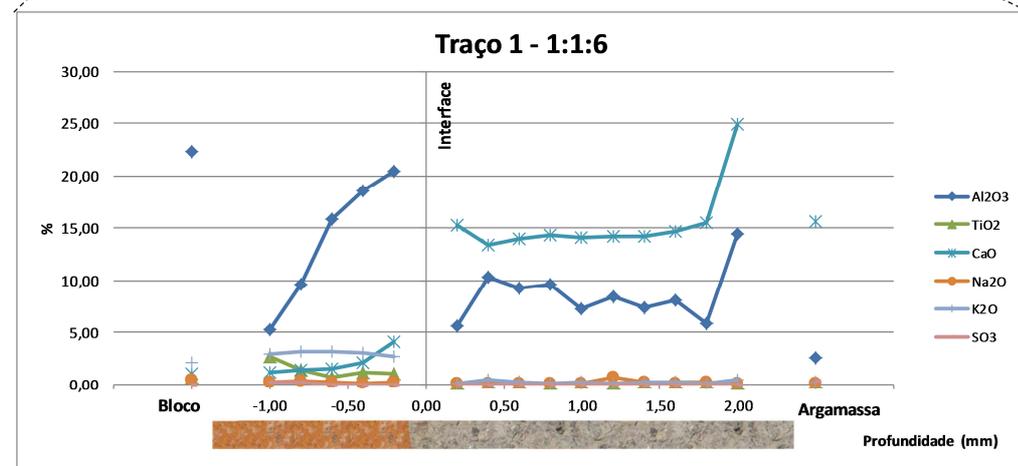
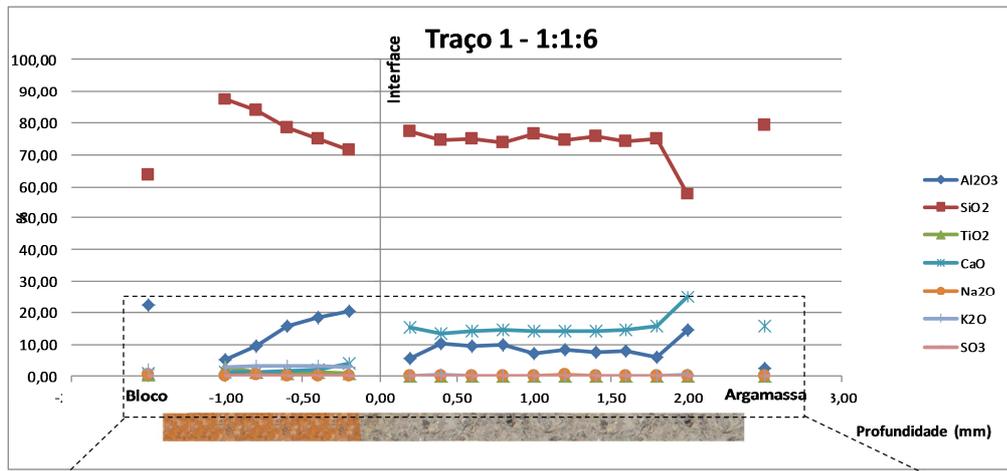


Figura 5.27 – Fluorescência de raios-X quantitativa do bloco cerâmico e argamassa - Traço 1 (1:1:6).

Profundidade (mm)	(%)						
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
Bloco	22,27	63,83	0,70	0,99	0,42	2,05	0,00
-1,00	9,20	84,17	0,98	1,64	0,28	3,52	0,04
-0,80	16,52	77,35	0,95	1,77	0,17	3,21	0,02
-0,60	11,82	80,29	1,79	2,51	0,23	3,00	0,18
-0,40	7,01	84,31	1,72	3,30	0,39	3,07	0,21
-0,20	17,35	69,40	1,14	9,04	0,29	2,76	0,02
Interface							
0,20	6,04	82,60	0,19	10,39	0,11	0,27	0,01
0,40	5,95	82,86	0,17	10,12	0,11	0,32	0,01
0,60	6,91	81,58	0,17	9,96	0,11	0,59	0,02
0,80	6,49	81,57	0,12	10,20	0,48	0,29	0,01
1,00	0,00	87,04	0,26	10,44	0,50	0,37	0,01
1,20	5,12	83,21	0,16	9,93	0,18	0,39	0,01
1,40	4,48	83,14	0,19	9,88	1,08	0,33	0,05
1,60	5,27	81,91	0,17	10,59	0,28	0,56	0,01
1,80	0,57	85,84	0,22	10,98	0,46	0,18	0,01
2,00	3,77	82,17	0,21	11,43	0,65	0,19	0,01
Argamassa	2,48	84,15	0,26	10,72	0,23	0,28	0,27

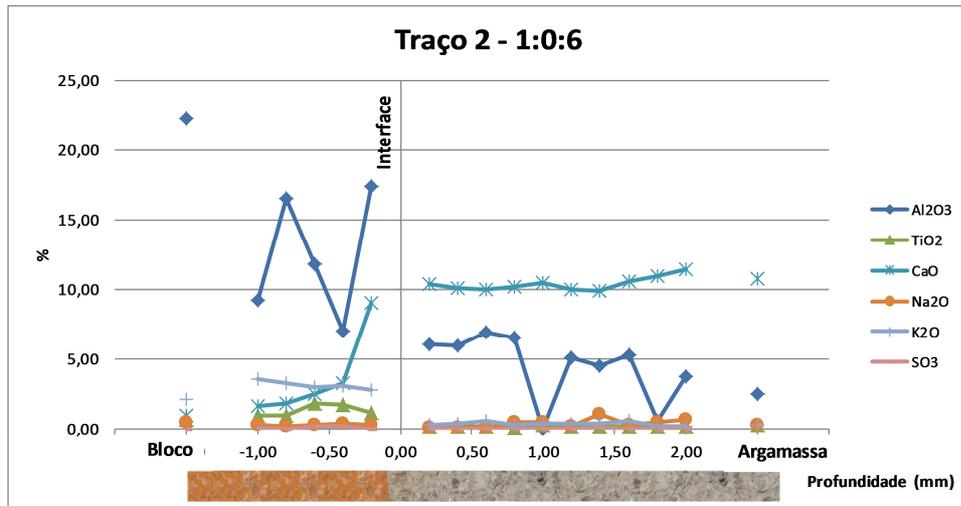
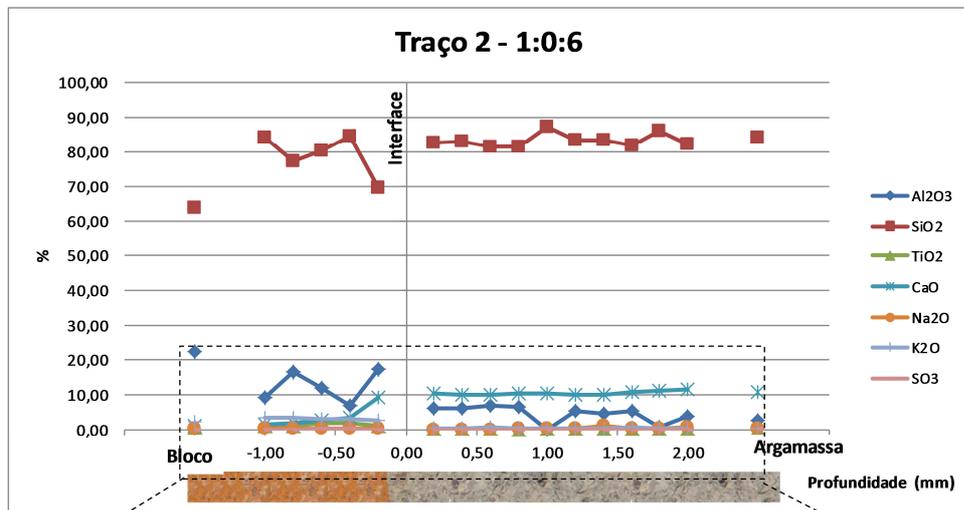


Figura 5.28 – Fluorescência de raios-X quantitativa do bloco cerâmico - Traço 2 (1:0:6).

Profundidade (mm)	(%)						
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
Bloco	22,27	63,83	0,70	0,99	0,42	2,05	0,00
-1,00	9,73	83,69	1,18	1,43	0,33	3,27	0,19
-0,80	10,83	82,78	0,96	1,60	0,20	3,44	0,01
-0,60	17,51	76,67	0,73	1,39	0,31	3,19	0,01
-0,40	9,58	81,76	1,17	3,28	0,25	3,22	0,74
-0,20	15,12	78,26	0,76	2,40	0,17	3,10	0,01
Interface							
0,20	34,44	11,69	0,09	52,90	0,10	0,76	0,01
0,40	33,44	13,23	0,20	50,92	1,23	0,97	0,01
0,60	35,02	11,77	0,23	52,17	0,12	0,67	0,01
0,80	35,24	12,25	0,11	51,47	0,28	0,62	0,01
1,00	33,73	11,79	0,10	53,49	0,16	0,70	0,02
1,20	33,22	11,37	0,17	53,40	1,18	0,64	0,01
1,40	31,07	12,03	0,13	54,04	2,01	0,70	0,01
1,60	32,67	11,73	0,13	54,65	0,10	0,69	0,01
1,80	35,34	11,44	0,04	52,40	0,10	0,66	0,01
2,00	30,98	13,41	0,12	54,66	0,10	0,71	0,01
Argamassa	2,49	14,86	0,17	77,87	0,16	0,30	0,61

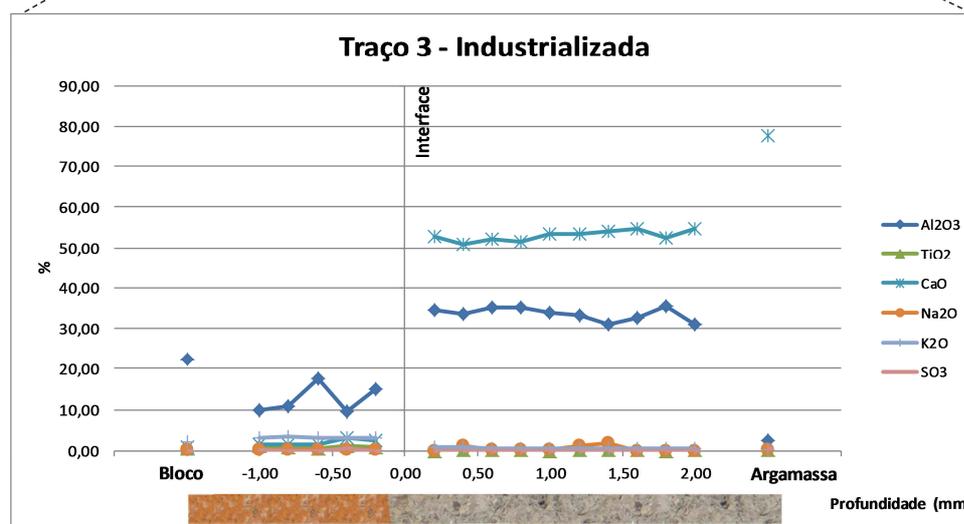
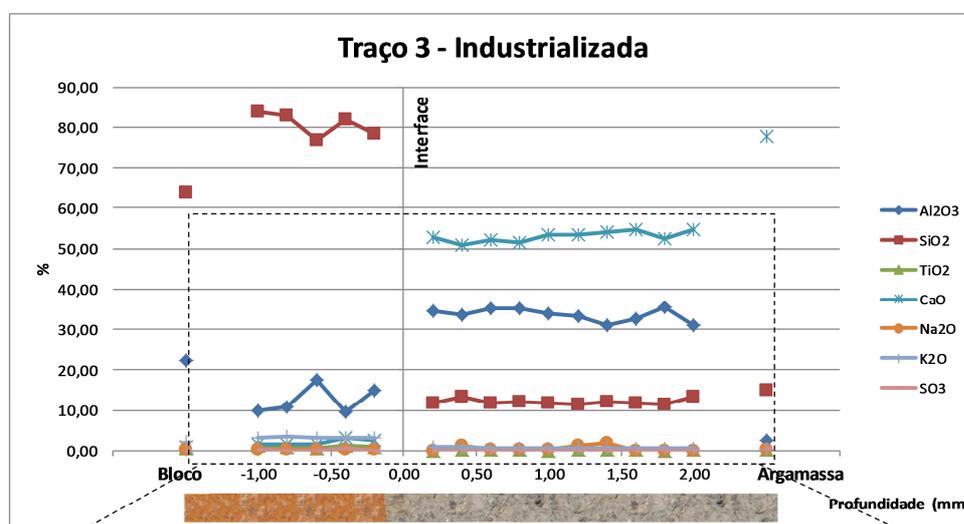


Figura 5.29 – Fluorescência de raios-X quantitativa do bloco cerâmico - Traço 3 – Industrializada.

	Profundidade (mm)	Al ₂ O ₃ (%)		
		Traço 1 1:1:6	Traço 2 1:0:6	Traço 3 Indust.
Al ₂ O ₃	Bloco	22,27	22,27	22,27
	-1,00	5,32	9,20	9,73
	-0,80	9,61	16,52	10,83
	-0,60	15,84	11,82	17,51
	-0,40	18,54	7,01	9,58
	-0,20	20,39	17,35	15,12
	Interface			
	0,20	5,65	6,04	34,44
	0,40	10,33	5,95	33,44
	0,60	9,30	6,91	35,02
	0,80	9,64	6,49	35,24
	1,00	7,30	0,00	33,73
	1,20	8,44	5,12	33,22
	1,40	7,35	4,48	31,07
1,60	8,08	5,27	32,67	
1,80	5,90	0,57	35,34	
2,00	14,48	3,77	30,98	
Argamassa	2,53	2,48	2,49	

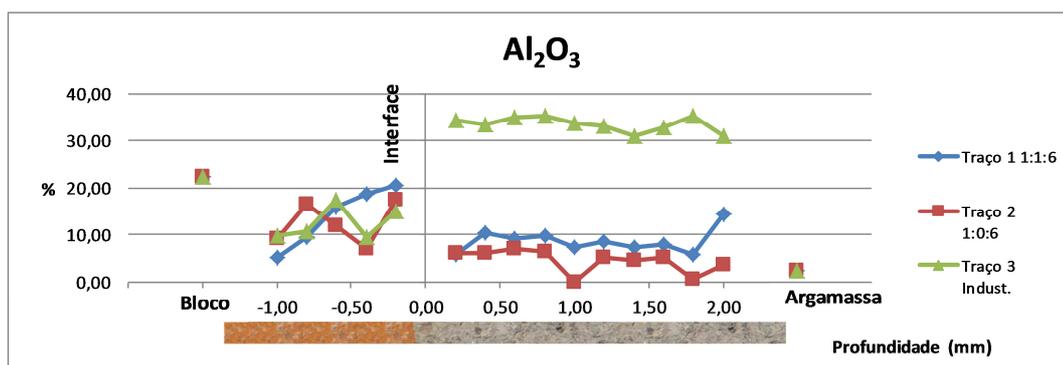


Figura 5.30 – Fluorescência de raios-X quantitativa do bloco cerâmico e argamassa para Al₂O₃.

	Profundidade (mm)	SiO ₂ (%)		
		Traço 1 1:1:6	Traço 2 1:0:6	Traço 3 Indust.
SiO ₂	Bloco	63,83	63,83	63,83
	-1,00	87,35	84,17	83,69
	-0,80	83,98	77,35	82,78
	-0,60	78,49	80,29	76,67
	-0,40	75,03	84,31	81,76
	-0,20	71,46	69,40	78,26
	Interface			
	0,20	77,29	82,60	11,69
	0,40	74,67	82,86	13,23
	0,60	75,01	81,58	11,77
	0,80	73,96	81,57	12,25
	1,00	76,46	87,04	11,79
	1,20	74,43	83,21	11,37
	1,40	75,78	83,14	12,03
	1,60	74,03	81,91	11,73
	1,80	75,00	85,84	11,44
	2,00	57,55	82,17	13,41
Argamassa	79,27	84,15	14,86	

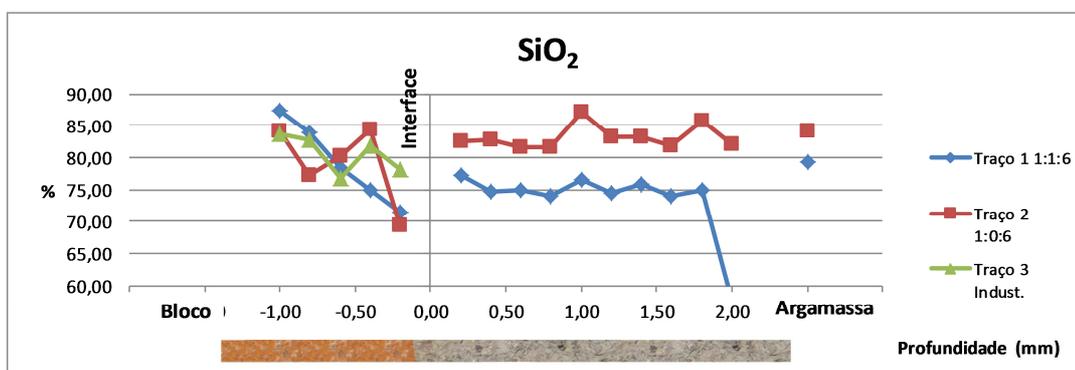


Figura 5.31 – Fluorescência de raios-X quantitativa do bloco cerâmico para SiO₂.

	Profundidade (mm)	TiO ₂ (%)		
		Traço 1 1:1:6	Traço 2 1:0:6	Traço 3 Indust.
TiO ₂	Bloco	0,70	0,70	0,70
	-1,00	2,67	0,98	1,18
	-0,80	1,35	0,95	0,96
	-0,60	0,73	1,79	0,73
	-0,40	1,12	1,72	1,17
	-0,20	1,10	1,14	0,76
	Interface			
	0,20	0,12	0,19	0,09
	0,40	0,17	0,17	0,20
	0,60	0,17	0,17	0,23
	0,80	0,16	0,12	0,11
	1,00	0,19	0,26	0,10
	1,20	0,14	0,16	0,17
	1,40	0,18	0,19	0,13
	1,60	0,22	0,17	0,13
	1,80	0,21	0,22	0,04
	2,00	0,15	0,21	0,12
Argamassa	0,25	0,26	0,17	

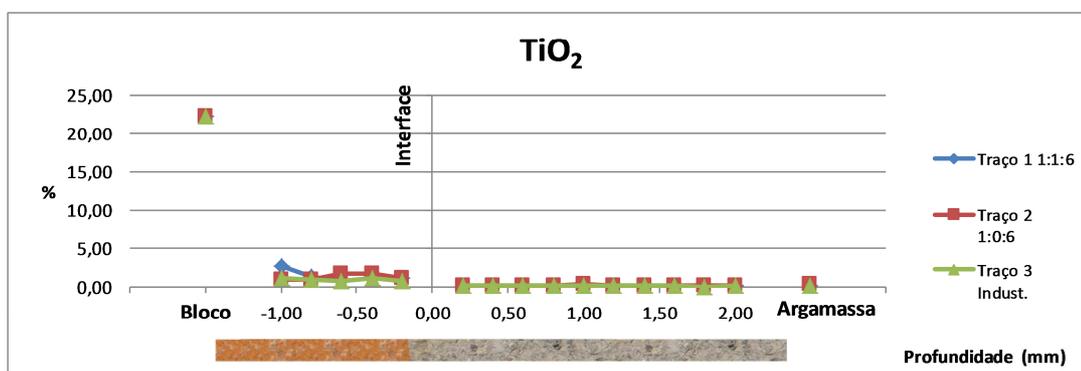


Figura 5.32 – Fluorescência de raios-X quantitativa do bloco cerâmico para TiO₂.

	Profundidade (mm)	(%)		
		Traço 1 1:1:6	Traço 2 1:0:6	Traço 3 Indust.
CaO	Bloco	0,99	0,99	0,99
	-1,00	1,22	1,64	1,43
	-0,80	1,38	1,77	1,60
	-0,60	1,57	2,51	1,39
	-0,40	2,07	3,30	3,28
	-0,20	4,15	9,04	2,40
	0,00			
	0,20	15,24	10,39	52,90
	0,40	13,36	10,12	50,92
	0,60	13,97	9,96	52,17
	0,80	14,36	10,20	51,47
	1,00	14,10	10,44	53,49
	1,20	14,15	9,93	53,40
	1,40	14,19	9,88	54,04
	1,60	14,67	10,59	54,65
	1,80	15,47	10,98	52,40
	2,00	24,89	11,43	54,66
	Argamassa	15,67	10,72	77,87

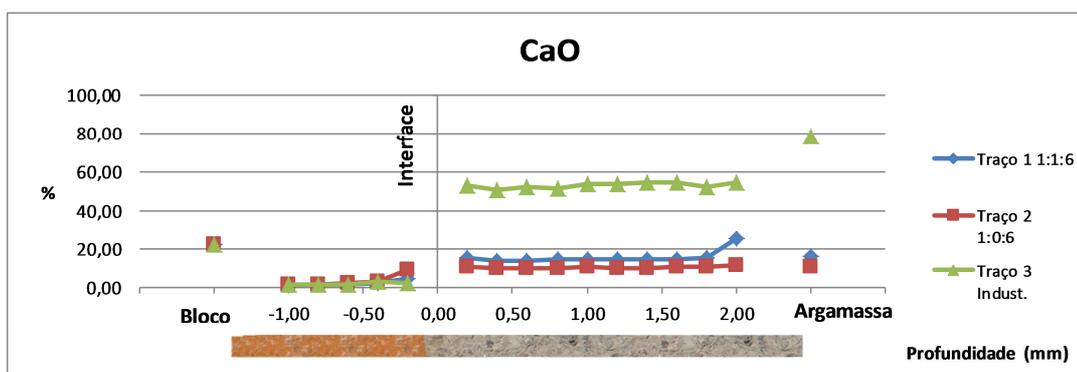


Figura 5.33 – Fluorescência de raios-X quantitativa do bloco cerâmico para CaO.

	Profundidade (mm)	K ₂ O (%)		
		Traço 1 1:1:6	Traço 2 1:0:6	Traço 3 Indust.
K ₂ O	Bloco	2,05	2,05	2,05
	-1,00	2,97	3,52	3,27
	-0,80	3,15	3,21	3,44
	-0,60	3,17	3,00	3,19
	-0,40	3,09	3,07	3,22
	-0,20	2,66	2,76	3,10
	Interface			
	0,20	0,11	0,27	0,76
	0,40	0,43	0,32	0,97
	0,60	0,25	0,59	0,67
	0,80	0,14	0,29	0,62
	1,00	0,18	0,37	0,70
	1,20	0,11	0,39	0,64
	1,40	0,16	0,33	0,70
	1,60	0,23	0,56	0,69
1,80	0,11	0,18	0,66	
2,00	0,44	0,19	0,71	
Argamassa	0,22	0,28	0,30	

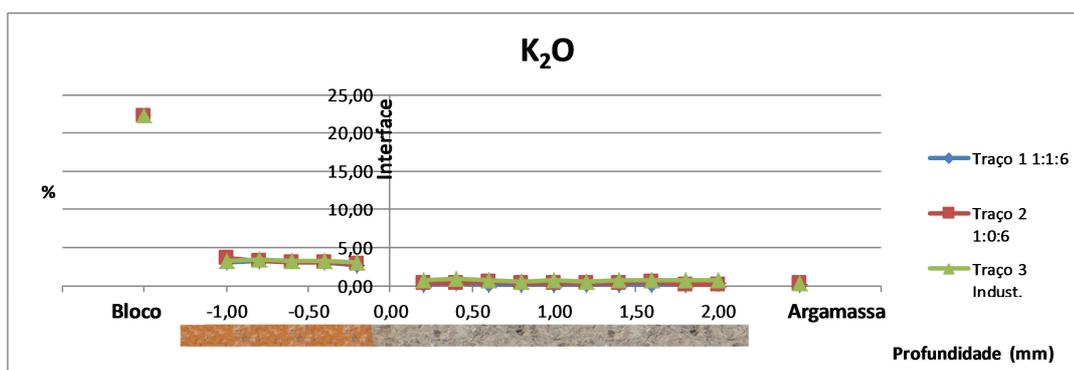


Figura 5.34 – Fluorescência de raios-X quantitativa do bloco cerâmico para K₂O.

	Profundidade (mm)	SO ₃ (%)		
		Traço 1 1:1:6	Traço 2 1:0:6	Traço 3 Indust.
SO ₃	Bloco	0,00	0,00	0,00
	-1,00	0,22	0,04	0,19
	-0,80	0,18	0,02	0,01
	-0,60	0,01	0,18	0,01
	-0,40	0,01	0,21	0,74
	-0,20	0,01	0,02	0,01
	Interface			
	0,20	0,01	0,01	0,01
	0,40	0,01	0,01	0,01
	0,60	0,01	0,02	0,01
	0,80	0,02	0,01	0,01
	1,00	0,01	0,01	0,02
	1,20	0,01	0,01	0,01
	1,40	0,01	0,05	0,01
	1,60	0,01	0,01	0,01
	1,80	0,01	0,01	0,01
	2,00	0,01	0,01	0,01
Argamassa	0,30	0,27	0,61	

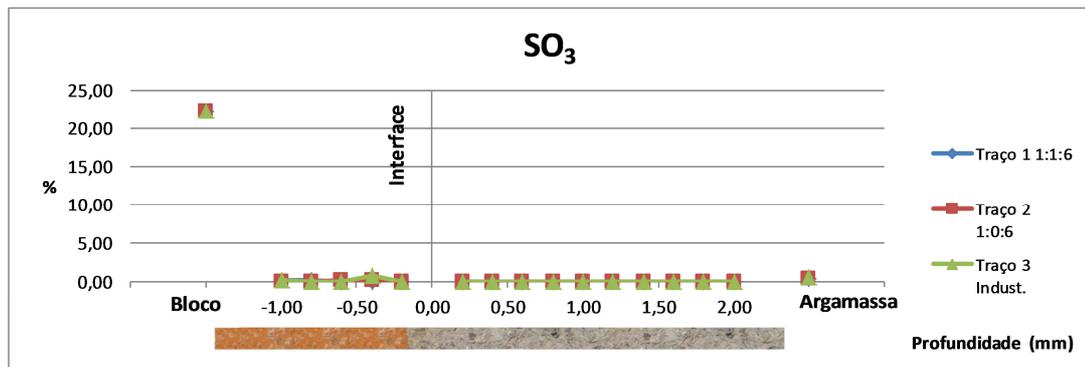


Figura 5.35 – Fluorescência de raios-X quantitativa do bloco cerâmico para SO₃.

	Profundidade (mm)	(%)		
		Traço 1 1:1:6	Traço 2 1:0:6	Traço 3 Indust.
Na ₂ O	Bloco	0,42	0,42	0,42
	-1,00	0,26	0,28	0,33
	-0,80	0,35	0,17	0,20
	-0,60	0,20	0,23	0,31
	-0,40	0,15	0,39	0,25
	-0,20	0,22	0,29	0,17
	Interface			
	0,20	0,12	0,11	0,10
	0,40	0,11	0,11	1,23
	0,60	0,11	0,11	0,12
	0,80	0,15	0,48	0,28
	1,00	0,11	0,50	0,16
	1,20	0,69	0,18	1,18
	1,40	0,20	1,08	2,01
	1,60	0,11	0,28	0,10
	1,80	0,27	0,46	0,10
	2,00	0,10	0,65	0,10
Argamassa	0,14	0,23	0,16	

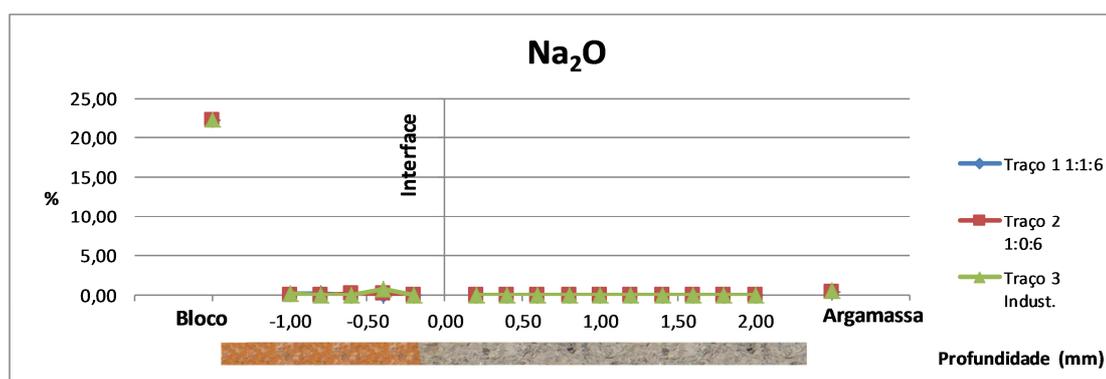


Figura 5.36 - Fluorescência de raios-X quantitativa do bloco cerâmico para Na₂O.

Através dos resultados de FRX quantitativa do bloco cerâmico e da argamassa junto à interface pode-se observar a existência de uma região com composição química muito diferente, confirmando os resultados obtidos pelo método semiquantitativo. Esta diferença na composição química comprova que houve a penetração de produtos de hidratação dos aglomerantes da argamassa no interior do substrato. Nas profundidades analisadas, até 1000µm, foram identificados como produtos provenientes da penetração da pasta o cálcio, o alumínio e o enxofre, produtos estes associados à formação de etringita, portlandita e CSH. As maiores quantidades foram encontradas na primeira camada (200µm) e decaem na medida em que a profundidade aumenta, entretanto, em taxas cada vez menores, até o ponto em que tendem a estabilizar. Este fato pode ser explicado pela sucção pelo substrato dos íons de sulfato e alumínio, provenientes do cimento e do hidróxido de cálcio da cal.

O Al é o elemento presente em maior quantidade nas primeiras camadas analisadas; ele está presente tanto na composição do bloco cerâmico quanto na composição das argamassas. Pode-se observar sua penetração no substrato através da variação das concentrações deste elemento na medida em que a profundidade de análise aumenta e sua concentração diminui. Este elemento está diretamente associado à formação dos cristais de etringita que, por sua vez, é o principal responsável pela resistência de aderência de uma argamassa. As fotomicrografias desta região confirmam a predominância destes cristais.

A grande quantidade de Al identificado no traço 3 (industrializada) comparada com as quantidades identificadas nos traços 1 e 2 sugere a utilização pelo fabricante, em sua composição, de resíduos, provavelmente areia de fundição. Entretanto, apesar da grande concentração de Al em sua composição, não foi observada qualquer alteração no perfil de penetração deste elemento no interior do substrato. Isto comprova a hipótese de que se trata de Al presente na areia utilizada que, por possuir granulometria maior que os poros do substrato, não penetra no mesmo.

O traço 1 é o que apresenta maior quantidade e proporção de penetração do Al nas primeiras camadas do bloco. Entretanto, sua quantidade decai mais intensamente do que nos demais traços, de forma que, nas últimas camadas analisadas, a quantidade de Al do traço 2 é quase o dobro do traço 1. O traço 3, apesar de ser o que apresentou a menor quantidade nas camadas iniciais, foi o que obteve maiores concentrações nas camadas mais profundas.

O segundo elemento mais abundante encontrado nas camadas analisadas é o Ca, Este elemento está presente na composição dos principais produtos de hidratação dos aglomerantes utilizados nas argamassas objeto deste estudo (etringita, portlandita, CSH).

No caso do elemento Ca, os resultados de resistência de aderência apresentam relação direta com a quantidade de material que penetrou no substrato, principalmente na primeira camada analisada (200 μ m), ou seja, o traço de maior resistência de aderência, traço 2, é também o que apresenta maior concentração deste elemento em todas as profundidades analisadas, e assim consecutivamente.

A presença predominante dos elementos Ca e Al, confirma a maior participação dos produtos de hidratação do cimento, principalmente a etringita, na resistência de aderência entre a argamassa e o bloco cerâmico.

O Si identificado nas camadas de substrato analisadas é proveniente dos materiais que compõem o bloco cerâmico e dos componentes da argamassa. As análises mais profundas apresentam quantidades de Si cada vez maiores tendendo à estabilidade. Isto ocorre porque na medida em que se aprofunda no substrato menor é a quantidade de material que penetra da argamassa.

Em todos os perfis analisados, as concentrações dos elementos Si e Al apresentaram variações inversas, ou seja, todas as vezes que a concentração de Si aumentava, reduzia a quantidade de Al em proporções semelhantes.

O elemento S foi identificado em quantidades bem menores que os elementos anteriormente citados apesar de ter sido identificado em todas as camadas analisadas. Ao contrário do comportamento dos demais elementos, a quantidade do elemento S difere no perfil de penetração para cada traço. Nos traços 2 e 3, houve uma predominância de maiores quantidades na profundidade de até 400 μ m, enquanto que no traço 1, com adição de cal, observou-se maiores concentrações nas profundidades entre 800 μ m e 1000 μ m. Como a presença destes elementos está associada à formação de cristais de etringita, este comportamento sugere que a introdução da cal promove uma maior penetração destes cristais.

Os resultados da análise de FRX na argamassa a até 2000 μ m da interface indica também a existência de uma região com composição química diferente. Esta diferença na composição química sugere que a migração dos produtos de hidratação dos aglomerantes presentes na argamassa para o interior do substrato cria uma zona de influência do bloco sobre argamassa. Nos traços 1 e 3, os resultados apresentam um ponto de inflexão a partir da profundidade aproximada de 1800 μ m onde as quantidades de Ca e Al iniciam uma ascensão significativa, com a proporcional redução da quantidade de Si. O traço 2 não apresentou esta tendência de ascensão na profundidade analisada, indicando que, neste traço, esta zona de influência pode possuir uma dimensão maior.

Esta zona de influência tende a aumentar em função do aumento da absorção de água do substrato e tende a diminuir em função do aumento da retenção de água da argamassa. Por se tratar de uma interface, estas duas propriedades devem ser compatíveis de forma a se atingir o melhor resultado de penetração e, conseqüentemente, aderência, sem se comprometer a hidratação da argamassa e, portanto, conseqüentemente suas propriedades mecânicas e de durabilidade.

Apesar da argamassa do traço 1 (1:1:6) possuir maior quantidade de Ca do que a argamassa do traço 2 (1:0:6), a quantidade absorvida pelo respectivo substrato foi menor no primeiro, quase a metade. Pode-se inferir que a calcita e o hidróxido de cálcio, ambos presentes na cal hidratada, são menos solvatáveis do que os compostos do cimento, ou seja, quando a calcita e hidróxido de cálcio solvatam a maior parte do processo de sucção exercida pelo substrato já ocorreu, carreando prioritariamente os íons de Ca e Al e S liberados pelo C₃A e gipsita.

O substrato relacionado à argamassa do traço 2 (1:0:6) foi o que apresentou as maiores penetrações de todos os elementos analisados, inclusive do Ca, apesar de não ser o traço que contém a maior quantidade deste elemento. A argamassa que contém a maior quantidade deste elemento é o traço 1 (1:1:6), que possui a maior porcentagem de aglomerante. Desta forma, infere-se que a quantidade de Ca absorvida pelo substrato está relacionada à quantidade de cimento e não à quantidade total de aglomerante.

Outro ponto observado é que a quantidade de material que penetrou no substrato apresenta relação inversa aos resultados de retenção de água das respectivas argamassas, ou seja, na medida em que a retenção de água da argamassa reduz, aumenta a quantidade de material que é absorvido pelo substrato e, conseqüentemente, a quantidade de material cedido pela argamassa e a extensão da zona de influência que se forma na mesma.

Na análise da argamassa do traço 3 (industrializada), diferentemente dos traços 1(1:1:6) e 2(1:0:6), observou-se uma composição praticamente homogênea por todo o perfil analisado, sugerindo que argamassa (industrializada) sofre menor impacto da sucção exercida pelo substrato. Este comportamento pode ser explicado pela maior

retenção de água que impede a perda de líquido e conseqüentemente de produtos de hidratação para o substrato. Sendo o principal mecanismo de aderência a penetração destes produtos, pode-se supor que o excesso desta propriedade pode prejudicar a resistência de aderência entre o substrato e a argamassa. A retenção de água deve ser tal que retenha água suficiente para adequada hidratação do cimento, mas que também permita que os produtos de hidratação gerados migrem para o interior do substrato.

A argamassa com o traço 3 apresentou reduzida quantidade de sílica e elevada quantidade de cálcio em relação aos demais traços, sugerindo que a maior parte dos agregados utilizados em sua composição é de agregados artificiais (areia calcárea). Entretanto, esta grande quantidade de Ca não tem nenhum efeito na quantidade de Ca que penetrou no substrato, uma vez que os tamanhos dos grãos de areia são maiores que os poros do bloco cerâmico. O traço 2 apresenta maior quantidade de cálcio do que o traço 1, em função da maior quantidade de aglomerante utilizado na produção deste último.

5.6.3. Espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado – ICP (chama)

Avaliou-se com estas análises a possibilidade de aplicação de métodos comerciais utilizados para análise de efluentes na identificação dos principais elementos característicos dos produtos de hidratação do cimentos, ou seja, Ca, Al e S. Para isto, as soluções preparadas foram avaliadas, em relação à quantidade de elementos solubilizados, de forma a verificar se a quantidade solubilizada se enquadrava dentro das faixas de atuação dos testes escolhidos.

Tabela 5.16- Resultados das análises de espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado – ICP

Método	Unidade	TRAÇO 1 - (1:1:6)						
		Arg. 1	0,2mm	0,4mm	0,6mm	0,8mm	1,0mm	Tijolo
Alumínio Total	mg Al/L	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.11	<0.05	0.90
Calcio Total	mg Ca/L	13.3	10.2	6.63	5.39	4.50	2.85	<0.5
Ferro Total	mg Fe/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.27
Magnésio Total	mg Mg/L	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Potássio Total	mg K/L	0.81	2.18	1.53	1.33	1.32	1.53	0.54
Titanio Total	mg Ti/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1

Método	Unidade	TRAÇO 2 - (1:0:6)						
		Arg. 2	0,2mm	0,4mm	0,6mm	0,8mm	1,0mm	Tijolo
Alumínio Total	mg Al/L	<0.05	<0.05	0.13	<0.05	<0.05	<0.05	0.90
Calcio Total	mg Ca/L	12.1	7.06	5.14	4.83	4.06	3.00	<0.5
Ferro Total	mg Fe/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.27
Magnésio Total	mg Mg/L	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Potássio Total	mg K/L	0.95	2.90	2.12	2.10	1.83	2.03	0.54
Titanio Total	mg Ti/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1

Método	Unidade	TRAÇO 3 - Industrializada						
		Arg. 3	0,2mm	0,4mm	0,6mm	0,8mm	1,0mm	Tijolo
Alumínio Total	mg Al/L	<0.05	<0.05	0.11	<0.05	0.12	0.17	0.90
Calcio Total	mg Ca/L	16.2	8.18	6.83	5.52	3.65	2.94	<0.5
Ferro Total	mg Fe/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.27
Magnésio Total	mg Mg/L	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Potássio Total	mg K/L	0.49	1.07	1.14	1.16	1.02	1.07	0.54
Titanio Total	mg Ti/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1

Pela análise realizada através do método de espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado – ICP (Tabela 5.16), somente os elementos Ca e S se solubilizaram em quantidade suficientes permitir a utilização dos métodos comerciais. Entretanto, para isto foi necessário extrair novamente as soluções, de forma a adequar a quantidade de elemento solubilizado à faixa de detecção dos testes comerciais utilizados.

5.6.4. pH

5.6.4.1. Análise realizada com pHmetro

Profundidade (mm)	Ensaio de pH Argamassa-interface-bloco cerâmico		
	Traço 1 1:1:6	Traço 2 1:0:6	Traço 3 Industrializada
Argamassa	11,23	11,13	10,65
2,00	10,34	9,41	9,86
1,80	10,33	9,68	9,77
1,60	10,36	9,71	9,84
1,40	10,35	9,31	9,28
1,20	10,39	10,22	9,79
1,00	10,38	10,18	9,62
0,80	10,33	10,16	9,12
0,60	10,27	9,96	9,66
0,40	10,26	10,19	9,36
0,20	10,28	10,11	9,58
Interface			
-0,20	9,65	9,84	8,94
-0,40	9,49	9,27	9,25
-0,60	9,41	9,19	8,94
-0,80	9,32	9,18	8,98
-1,00	9,05	9,12	8,37
Bloco Cerâmico	8,32	8,32	8,32

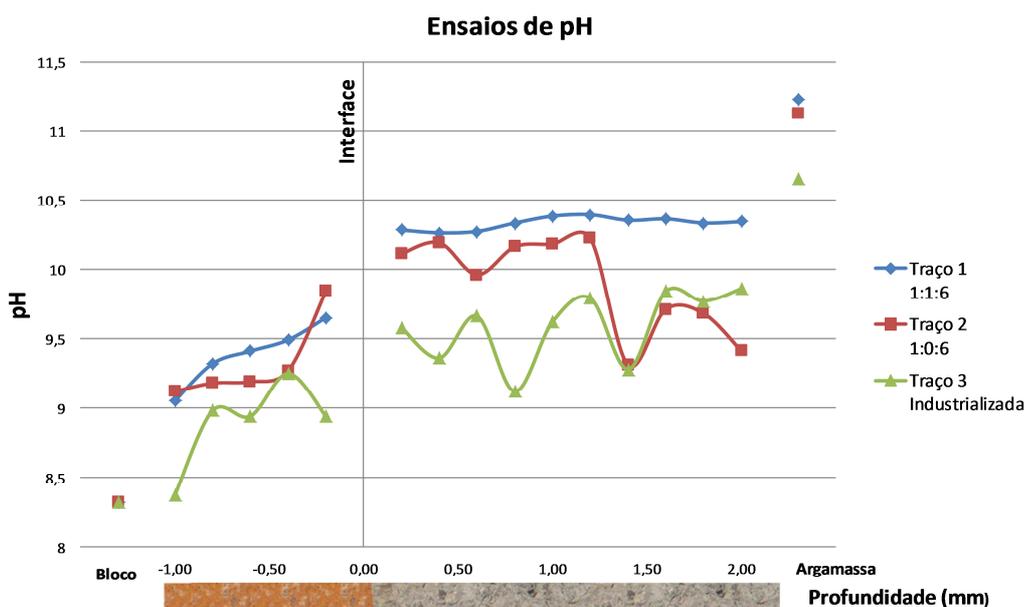


Figura 5.37 - Resultados de medição de pH através de pHmetro.

Ao se avaliar a variação de pH na superfície do bloco cerâmico, cerca de 1000µm junto à interface, com a utilização de pHmetro (Figura 5.37), verifica-se que a penetração dos produtos de hidratação dos aglomerantes da argamassa no interior do substrato altera seu pH. Na medida em que a profundidade aumenta, os valores de

pH se reduzem, aproximando-se do pH original do substrato (8,32), indicando que, quanto maior a profundidade, menor a quantidade de material que penetra.

Ao avaliar a variação de pH na superfície da argamassa, cerca de 2000µm junto à interface com o bloco cerâmico, verifica-se que a fuga dos produtos de hidratação dos aglomerantes da argamassa para o interior do substrato reduz o pH desta, criando uma zona de influência deste mecanismo. A variação de pH ocorre porque os elementos que migram de uma região para a outra possuem alto valor de pH e provocam alteração desta propriedade ao se locomoverem.

O pH das argamassas varia em função da quantidade de aglomerante na composição do traço, ou seja, o traço 1 (1:1:6), com adição de cal, possui o maior valor de pH, seguido pelo traço 2 (1:0:6) e pelo traço 3 – industrializada. Entretanto, ao analisar-se a variação do pH nos respectivos substratos, o pH mais elevado passa a ser o do substrato em contato com o traço 2, seguido pelo traço 1 e pelo traço 3.

As variações de pH observadas no substrato estão relacionadas à quantidade do elemento Ca absorvido pelo mesmo, ou seja, os substratos que absorveram mais Ca tiveram seu pH mais aumentado. Desta forma, entende-se que o traço 2 perdeu mais material para o substrato do que o traço 1, apesar deste possuir mais aglomerante em sua composição. Este resultado é confirmado pelas análises de FRX realizadas.

É possível verificar a existência de uma relação direta dos valores de pH na primeira camada (0,2 mm) com a resistência de aderência, ou seja, os maiores valores de aderência apresentam os maiores resultados de pH nesta camada.

5.6.4.2. Análises de pH em solução

As análises de pH utilizando reagentes colorimétricos em solução comprovam que os mesmos são sensíveis o suficiente para identificar as pequenas variações de pH que ocorrem na interface entre bloco cerâmico e a argamassa. O reagente utilizado identificou a variação de pH ocorrida no substrato junto à interface e foi capaz de demonstrar as diferenças de penetração existentes entre as 3 argamassas (Figura 5.12). Os resultados deste ensaio acompanham as medições realizadas com o pHmetro. A escala de 1 a 12 se mostrou adequada pois cobre todas as possibilidades (Figura 5.38).

Traço 1		Traço 2		Traço 3	
A		Argamassa	A		Argamassa
B		0,2 mm	B		0,2 mm
C		0,4 mm	C		0,4 mm
D		0,6 mm	D		0,6 mm
E		0,8 mm	E		0,8 mm
F		1,0 mm	F		1,0 mm
G		Tijolo	G		Tijolo

Figura 5.38 - Resultado dos ensaios de pH em solução com indicador universal formulado.

5.6.4.3.Fita de pH

A análise da variação de pH do substrato junto à interface realizada através de tiras colorimétricas também se mostrou um método eficaz (Figura 5.39). Entretanto, apesar de terem-se mostrado sensíveis e eficazes para a identificação das variações de pH, os métodos de medição através de solução apresentam grande complexidade na extração das camadas e podem ocasionar a contaminação da amostra.

O pH também possui o limitador de ser uma propriedade muito vulnerável a alterações, ou seja, a simples exposição do material ao ar, pode ocasionar sua variação pela carbonatação. Esta sensibilidade pode diminuir muito a confiabilidade deste método.

Resultados de pH em fita			
Traço 1	Traço 2	Traço 3	Bloco
			

Figura 5.39 - Ensaio de medição de pH em fitas.

5.6.4.4. pH com amostra em estado natural

Uma resposta à limitação ocasionada pela dificuldade de extração das amostras é a identificação da variação de pH na própria amostra em estado natural. Foram realizados experimentos exploratórios com dois métodos: imersão e aspersão.

No método por imersão, as amostras foram mergulhadas no reagente por 30 segundos, posteriormente expostas ao ar e fotografadas. Este método não se mostrou eficaz, pois o excesso de reagente e reação contaminam toda a amostra e impedem a correta leitura.

O método por aspersão, no caso da argamassa, se mostrou eficaz, e capaz de imprimir na superfície da amostra uma variação colorimétrica que indica variações de pH (Figura 5.40 a Figura 5.44). Entretanto, este método não se mostrou eficaz sobre a superfície do bloco cerâmico.

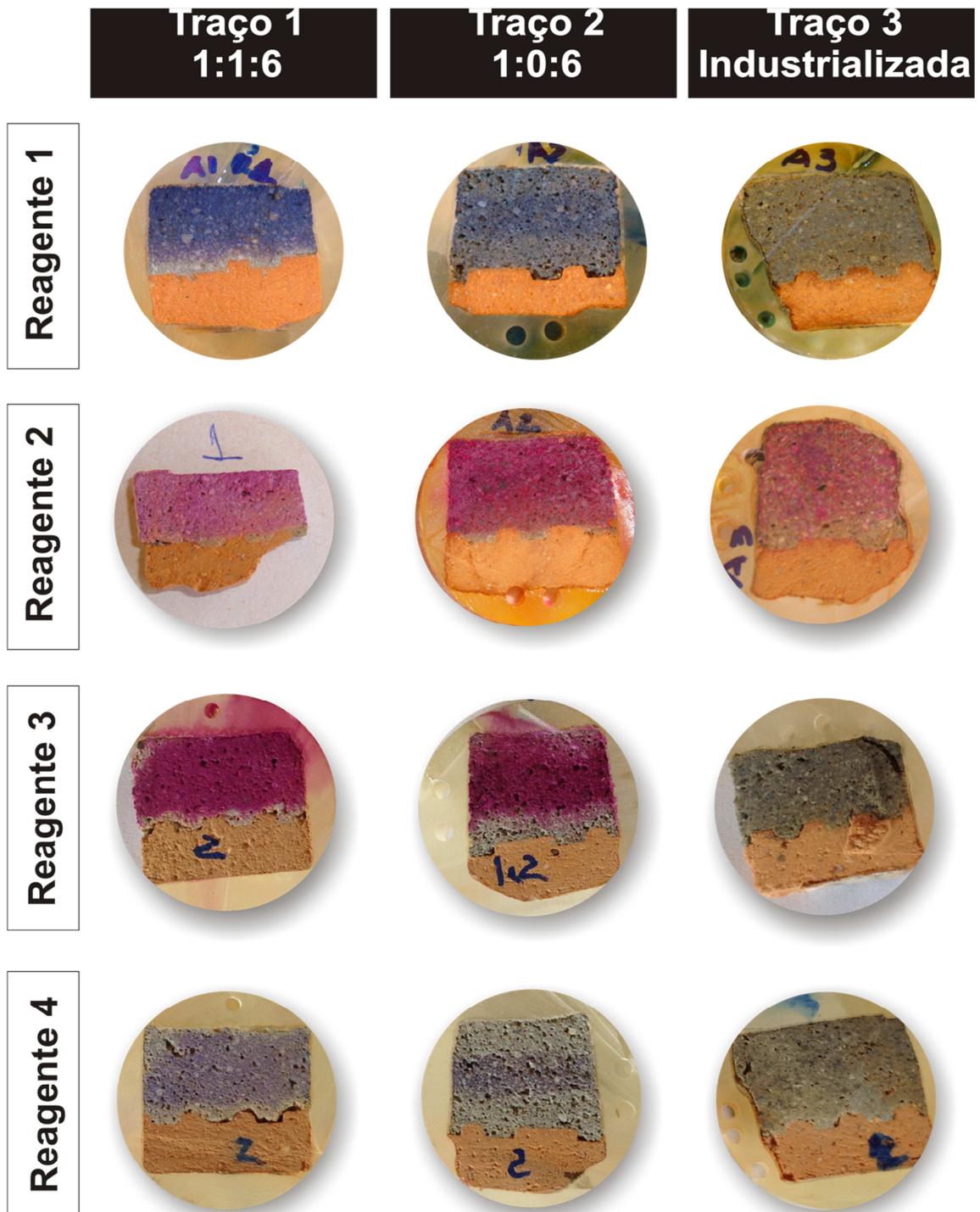


Figura 5.40 - Ensaio com reagentes colorimétricos de pH em amostras em estado natural.

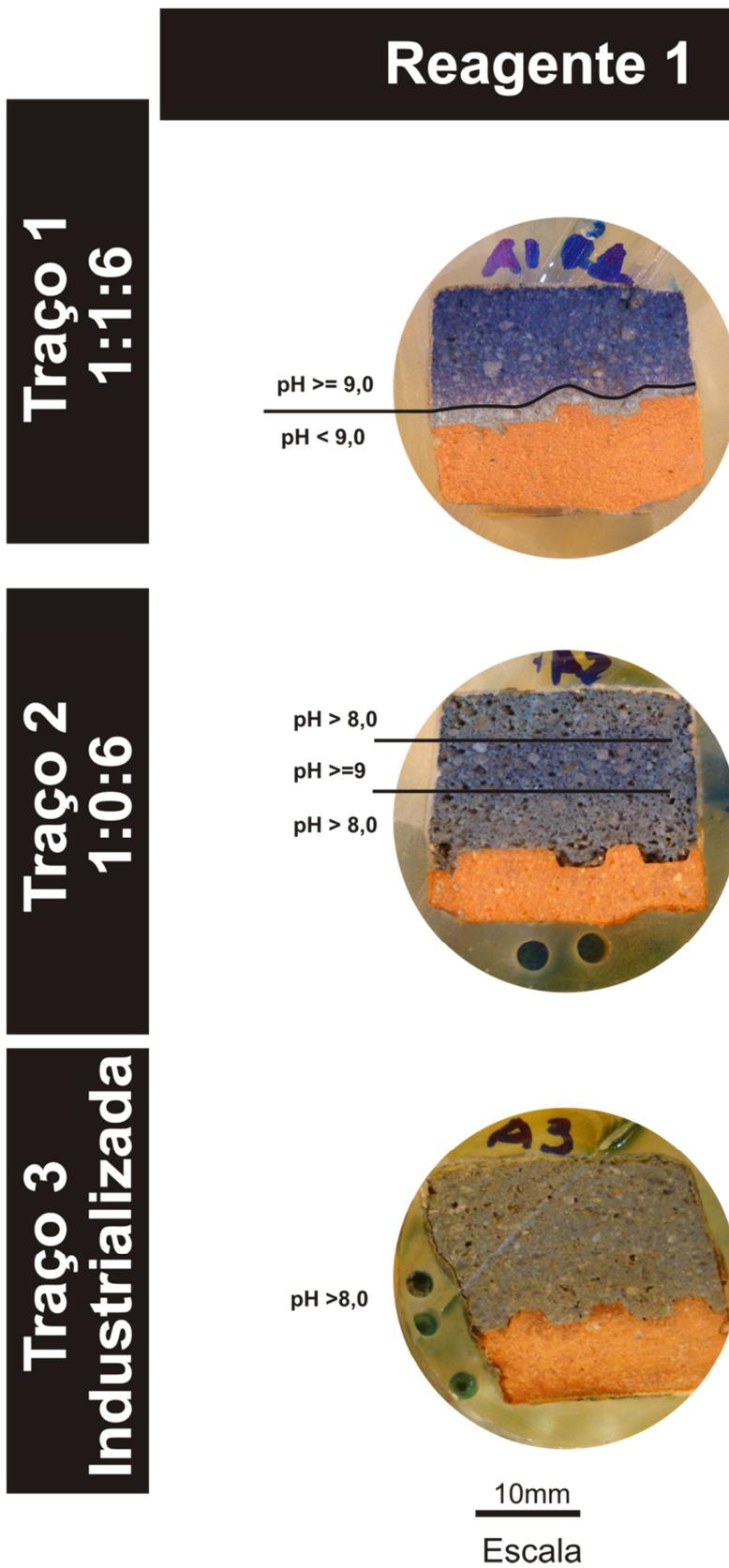


Figura 5.41 - Ensaio com o reagente 1 em amostras em estado natural.

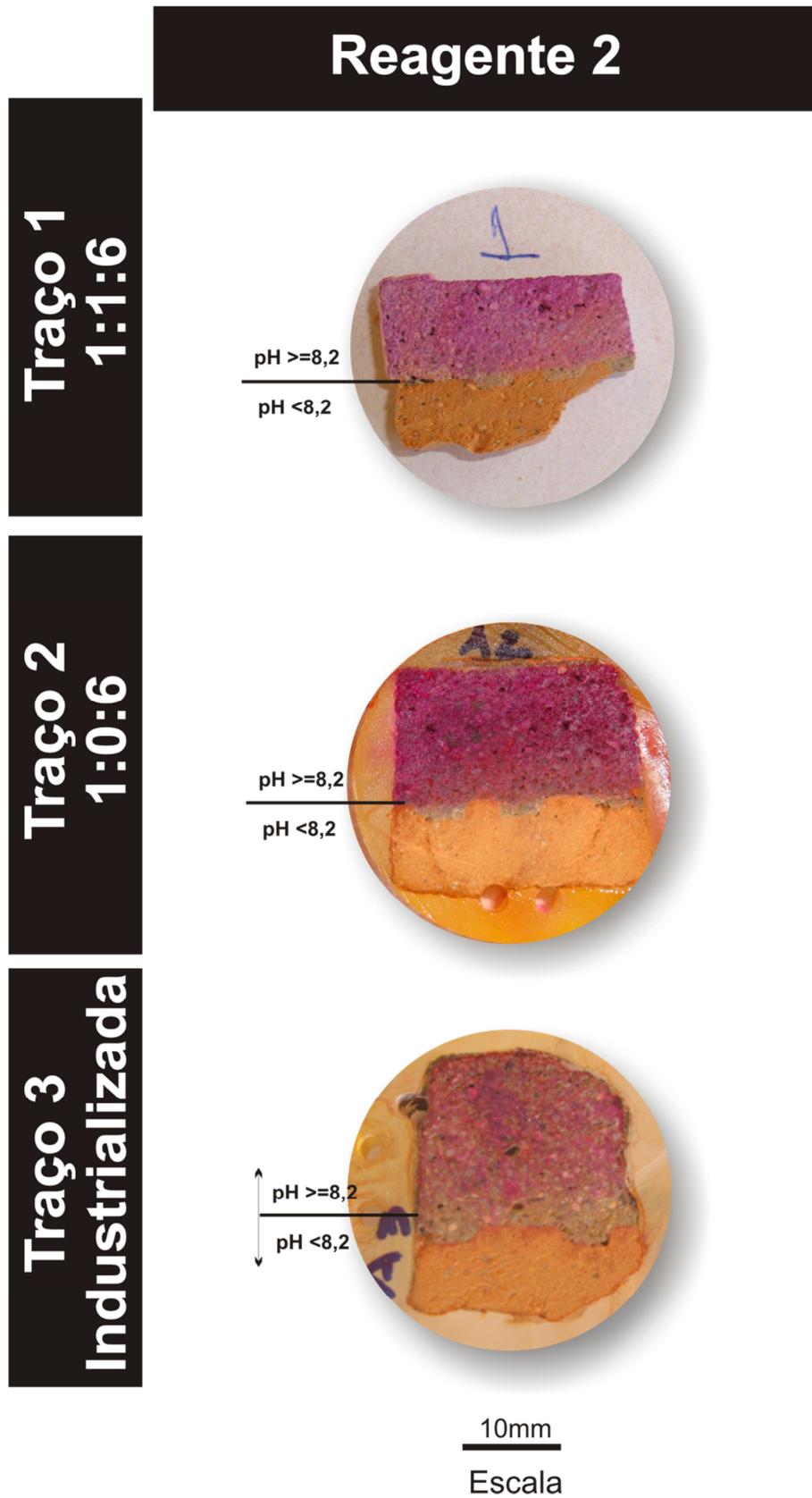


Figura 5.42 Ensaio com o reagente 2 em amostras em estado natural.

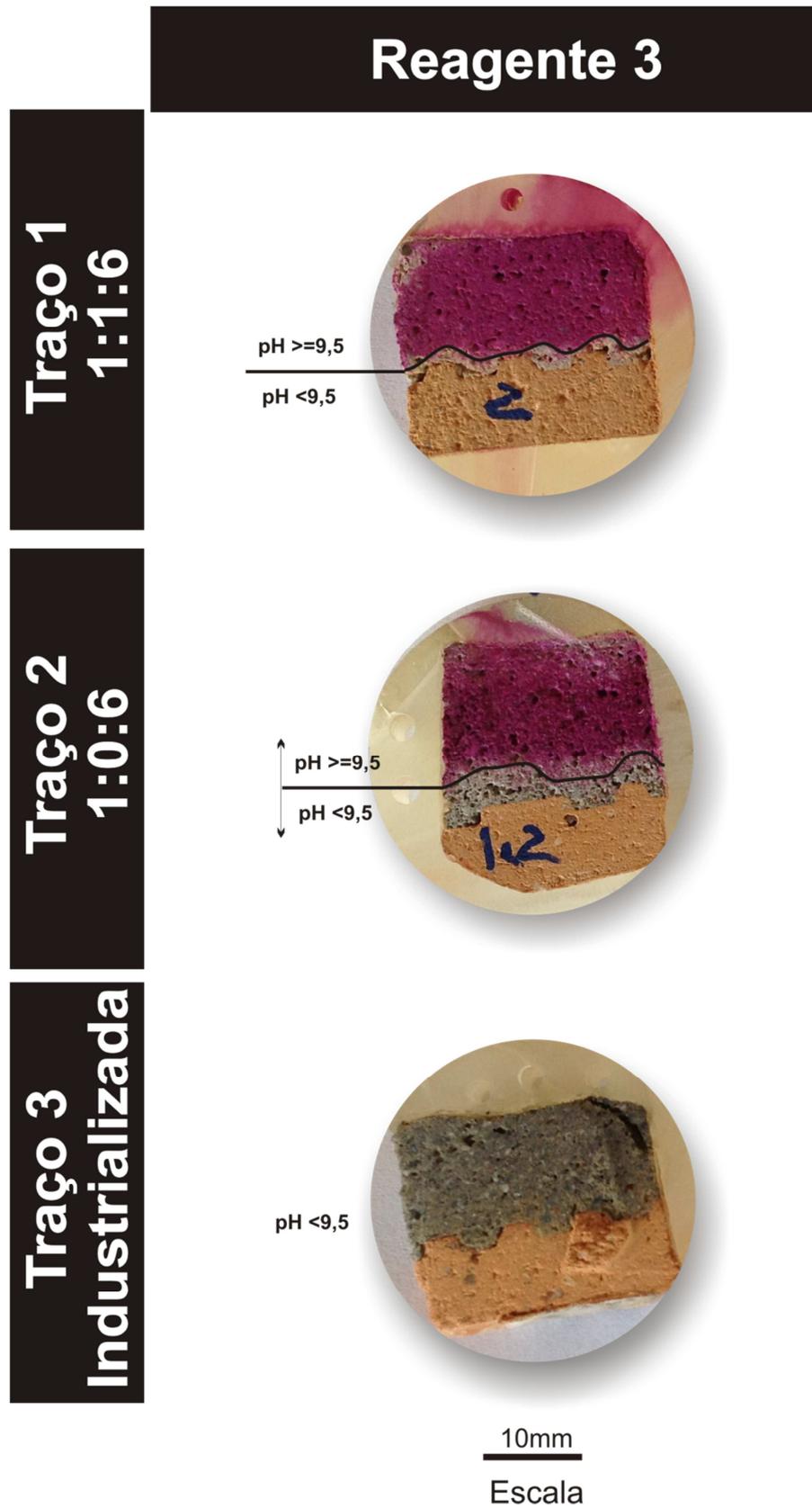


Figura 5.43 - Ensaio com o reagente 3 (fenolftaleína) em amostras em estado natural.

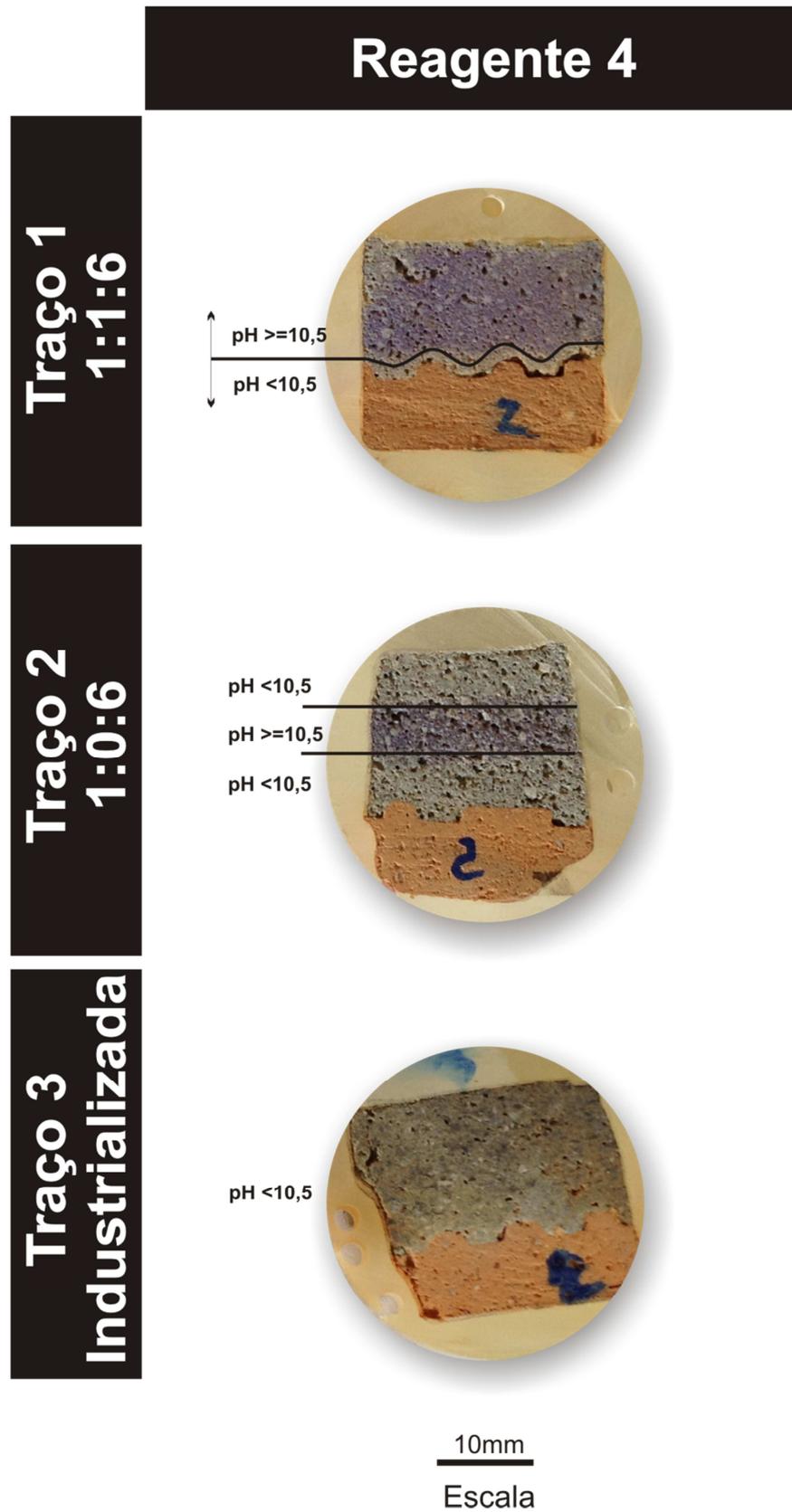


Figura 5.44 - Ensaio com o reagente 4 (timolftaleína) em amostras em estado natural.

O ensaio com reagente colorimétrico de pH, pelo método de aspersão sobre amostras de argamassa, confirmou em todos os casos a existência de uma zona de influência do substrato sobre a argamassa (Figura 5.40). Esta área de menor pH é confirmada também nos ensaios de pHmetro. A redução de pH desta região é explicada pela migração dos ions de Ca (pH=12) para o interior do substrato em função da sucção exercidas pelos poros deste. A redução deste elemento nesta região é confirmada pelas análises de FRX realizadas. Observa-se então que o mecanismo de aderência entre a argamassa e substrato provoca tanto uma modificação da composição tanto do substrato quanto da argamassa, criando uma zona de influência bem definida.

Uma segunda hipótese para a ocorrência da zona de influência é a migração do material do bloco cerâmico para a argamassa. Este fato se daria em função da inversão dos poros ativos, ou seja, durante o processo de hidratação do cimento, quando o diâmetro dos poros da argamassa se tornam menores que o diâmetro dos poros do substrato, o fluxo de sucção se inverte e a água passa a migrar do substrato para a argamassa, levando consigo materiais do bloco. Neste caso, a diferença entre as zonas de influência poderia ocorrer em função da diferença de porosidade entre as argamassas.

Observa-se, no traço 1(1:1:6), que a zona de influência é bem definida e nítida com menor pH que o restante da argamassa. Esta área bem delimitada pode ter sido causada pela maior retenção de água desta argamassa, o que restringe a perda de material para o substrato a apenas as camadas iniciais. Também contribui o maior valor de pH no restante da argamassa em função da maior quantidade de aglomerante e introdução da cal. Esta redução foi causada pela migração dos produtos de hidratação do cimento para o interior do substrato.

Na argamassa 2, a zona de transição é maior e sua delimitação menos nítida indicando que a argamassa perdeu material para o substrato em uma região mais ampla, porém com menor intensidade, informação comprovada pelos dados de FRX. Este comportamento pode ser explicado pela menor retenção de água desta argamassa, que permitiu que o substrato retirasse mais material, entretanto, a profundidades maiores, pois a argamassa ofereceu menor resistência.

A argamassa industrializada apresenta uma zona de influência bem ampla e discreta, sugerindo que houve menor perda de material para o substrato. Este comportamento pode ser explicado pela maior retenção de água deste traço, devido aos aditivos utilizados. Esta propriedade proporciona maior uniformidade e homogeneidade pela espessura da argamassa. Este comportamento foi confirmado pelos resultados da FRX. Entretanto, esta propriedade pode impactar a resistência de aderência, uma vez que é justamente a migração de produtos de hidratação dos aglomerantes para o interior do bloco o principal mecanismo de aderência. Cabe salientar que esta argamassa possui os menores resultados de resistência de aderência e o menor pH, em função de menor quantidade de cimento.

O perfil de penetração demonstrado pelo reagente 2, qualitativamente, assemelha-se ao perfil de rompimento dos corpos de prova no ensaio de aderência, ou seja, as argamassas 1 e 2, que romperam predominantemente na interface com o substrato, apresentaram zonas de influência bem próximas à interface e bem definidas. Já a argamassa 3, que predominantemente rompeu por coesão da argamassa, apresentou zona de influência no interior da argamassa, com contornos mal definidos. Este comportamento pode sugerir que o plano de ruptura esteja localizado predominantemente próximo ou dentro da área de influência.

Os reagentes 1 e 4 também identificaram a redução de pH por carbonatação na superfície da argamassa do traço 2. Isto não foi observado no traço 1 porque o mesmo possui um pH maior, o que fez com que, mesmo reduzido, seu pH ultratassasse os valores de viragem dos reagentes utilizados.

A argamassa do traço 3 somente provocou reação nos reagentes 1 e 2, indicando que, para argamassas com pH mais baixo, os reagentes não foram eficazes. No caso do reagente 1, a cor de viragem apresentou pouco contraste com a cor da argamassa e ficou pouco visível na fotografia.

Os reagentes 1 e 2, que possuem valores de viragem nas cores verde e amarela, não se mostraram eficazes nestas faixas, provavelmente em função da cor da argamassa não permitir a visualização da reação.

Cabe salientar que, em todos os métodos colorimétricos apresentados, as medições devem ser realizadas rapidamente, pois as cores possuem fixação por tempo limitado.

Apesar de não ser o objetivo deste ensaios, observa-se nas amostras das Figura 5.42 a 5.46 que o traço 2 apresenta maior porosidade e falhas na superfície de aderência. Esta característica é explicada pela menor plasticidade e conseqüente menor trabalhabilidade.

5.6.5. Enxofre

5.6.5.1. Enxofre em fita

Como pode ser observado na Figura 5.45, todas as amostras apresentaram o mesmo resultado para SO_4^{2-} , tornando-o ineficaz para este estudo.

Resultados de SO_4^{2-}							
Profundidade (mm)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	Arg.	Bloco
Resultado Traço 1							
Resultado Traço 2							
Resultado Traço 3							

Figura 5.45 – Resultado do ensaio de S em fita.

5.6.5.2. Enxofre em solução

Os resultados de aplicação dos reagentes colorimétricos para S nas amostras em estado natural foram ineficazes, não apresentando variações de tonalidade que permitam identificar a concentração deste elemento.

5.6.5.3. Enxofre em estado natural

Os resultados de aplicação dos reagentes colorimétricos para S nas amostras em estado natural foram ineficazes, não apresentando variações de tonalidade que permitam identificar a concentração deste elemento.

5.6.6. Alumínio

5.6.6.1. Alumínio em fita

Como pode ser observado na Figura 5.46, todas as amostras apresentaram o mesmo resultado para Al, tornando-o ineficaz para nosso estudo.

Resultados de Al							
Profundidade (mm)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	Arg.	Bloco
Resultado Traço 1							
Resultado Traço 2							
Resultado Traço 3							

Figura 5.46- Resultado do ensaio de Al em fita.

5.6.6.2. Alumínio em solução

Os resultados de aplicação dos reagentes colorimétricos para Al em solução foram inconclusivos, não apresentando variações de tonalidade que permitam identificar a concentração deste elemento.

5.6.6.3. Alumínio em estado natural

Os resultados de aplicação dos reagentes colorimétricos para Al nas amostras em estado natural foram inconclusivos, não apresentando variações de tonalidade que permitam identificar a concentração deste elemento.

5.6.7. Cálcio

5.6.7.1. Cálcio em fita

Como pode ser observado na Figura 5.47, todas as amostras apresentaram o mesmo resultado para Ca, tornando-o ineficaz para nosso estudo.

Resultados de Ca							
Profundidade (mm)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	Arg.	Bloco
Resultado Traço 1							
Resultado Traço 2							
Resultado Traço 3							

Figura 5.47 - Resultado do ensaio de Ca em fita.

5.6.7.2. Cálcio em solução

Os resultados de aplicação dos reagentes colorimétricos para Ca em solução foram inconclusivos, não apresentando variações de tonalidade que permitam identificar a concentração deste elemento.

Nenhum dos métodos de análise utilizados (em solução, em estado natural e em fita) se mostrou eficaz para a identificação dos elementos químicos analisados (Ca, Al e S). Isto se deve à dificuldade de solubilização destes elementos no processo de preparação da solução e à pequena concentração dos mesmos, inferior aos limites de detecção dos métodos comerciais utilizados.

6. CONCLUSÕES

As fotomicrografias realizadas no MEV-EDS confirmam a predominância de cristais euédricos de etringita na região da interface, caracterizados por sua morfologia típica, de fibras e fitas, e pela presença dos elementos químicos correspondentes.

Através dos resultados de FRX quantitativa do bloco cerâmico junto à interface pode-se confirmar a existência de uma região com composição química muito diferente, provocada pela absorção de Ca, S e Al, pelo substrato. As maiores quantidades foram encontradas na primeira camada (200 μ m) e decaem na medida em que a profundidade aumenta, entretanto, em taxas cada vez menores, até o ponto em que tendem a estabilizar-se.

Os resultados da análise de FRX na argamassa a até 2000 μ m da interface indicam a existência de uma região com composição química diferente. Esta diferença na composição química sugere que a migração dos produtos de hidratação dos aglomerantes presentes na argamassa para o interior do substrato cria uma zona de influência do bloco sobre argamassa.

Esta zona de influência tende a diminuir em função do aumento da retenção de água da argamassa. Por se tratar de uma interface, estas duas propriedades devem ser compatíveis, de forma a se atingir o melhor resultado de penetração e, conseqüentemente, aderência, sem se comprometer a hidratação da argamassa e, portanto, conseqüentemente suas propriedades mecânicas e de durabilidade.

A quantidade de material que penetrou no substrato apresenta relação inversa aos resultados de retenção de água das respectivas argamassas, ou seja, na medida em que a retenção de água da argamassa reduz-se, aumenta a quantidade de material que é absorvido pelo substrato.

Existe uma relação entre a quantidade de cálcio que penetra no substrato e a resistência de aderência apresentada, principalmente na primeira camada analisada (200 μ m), ou seja, as argamassas que apresentaram maiores resultados de resistência da aderência, também apresentaram maiores penetrações deste elemento. O

aglomerante responsável por fornecer o cálcio que é absorvido pelo substrato é o cimento. Sendo assim, apesar da cal hidratada contribuir indiscutivelmente para melhorar as propriedades de trabalhabilidade, retenção de água, módulo de deformação, propriedades estas que indiretamente podem contribuir para uma melhora na resistência de aderência, ela pouco contribui diretamente para melhora destes resultados.

Avaliou-se a variação de pH na superfície do bloco cerâmico: a cerca de 1000 μ m junto à interface constatou-se que a penetração dos produtos de hidratação dos aglomerantes da argamassa no interior do substrato altera seu pH. Na medida em que a profundidade aumenta, os valores de pH se reduzem, aproximando-se do pH original do substrato, indicando que, quanto maior a profundidade, menor a quantidade de material que penetra.

Ao avaliar a variação de pH na superfície da argamassa, a cerca de 2000 μ m junto à interface com o bloco cerâmico, verifica-se que a fuga dos produtos de hidratação dos aglomerantes da argamassa para o interior do substrato reduz o pH desta, confirmando a existência de uma zona de influência, fruto deste mecanismo. A variação de pH ocorre porque os elementos que migram de uma região para a outra possuem alto valor de pH e provocam alteração desta propriedade ao se locomoverem.

As variações de pH observadas no substrato estão relacionadas à quantidade do elemento Ca absorvido pelo mesmo, ou seja, os substratos que absorveram mais Ca tiveram seu pH mais aumentado. O pH das argamassas tem relação direta com a quantidade de aglomerante na composição do traço. É possível verificar a existência de uma relação direta dos valores de pH na primeira camada (0,2 mm) com a resistência de aderência, ou seja, os maiores valores de aderência apresentam os maiores resultados de pH nesta camada.

As análises de pH utilizando reagentes colorimétricos em solução comprovam que os mesmos são sensíveis o suficiente para identificar as pequenas variações de pH que ocorrem na interface entre bloco cerâmico e a argamassa.

Os métodos químicos colorimétricos para identificação da profundidade e da quantidade de penetração dos produtos de hidratação do cimento no interior do substrato não apresentaram resultados satisfatórios.

Os métodos químicos colorimétricos para identificação de variações na composição química da argamassa junto à interface com o bloco se mostraram eficazes em todos os métodos testados (solução, fita e em amostra naturais). Entretanto, pela facilidade de aplicação, o método de aplicação direta na amostra natural é o que se apresenta mais promissor e pode-se transformar em uma nova metodologia para se investigar a resistência de aderência dos revestimentos argamassados.

Todos os métodos de ensaios colorimétricos e de fita para identificação dos elementos Ca, S e Al não apresentaram resultados satisfatórios. Isto se deve à dificuldade de solubilização destes elementos no processo de preparação da solução e à pequena concentração dos mesmos, inferior aos limites de detecção dos métodos comerciais utilizados.

Desta forma, confirmou-se a hipótese proposta no início deste trabalho de que existem variações químicas na interface argamassa/bloco cerâmico que explicam a aderência entre estes materiais e é possível fazer a identificação dessas regiões por meio de análises químicas colorimétricas. Estas variações são provenientes da penetração dos produtos de hidratação da pasta aglomerante no interior dos poros do substrato.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a variação da zona de influência do bloco sobre a argamassa, em relação à porosidade do substrato e à retenção de água da argamassa, correlacionando-as com a aderência;
- Avaliar o perfil de rompimento dos ensaios de aderência em relação ao perfil da zona de influência da argamassa.
- Avaliar a quantidade de material proveniente da argamassa que penetrou no bloco cerâmico e sua influência na resistência de aderência.
- Avaliar a variação do perfil de penetração da argamassa no bloco cerâmico em função da variação na quantidade de aglomerante do traço.

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

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, GAMBALÉ, E.A., SANTOS, S. B., Modelos de predição do módulo de elasticidade do concreto. **CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, 48º, 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 Commentary.** 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.

BOMBLED, J.P.; KALVENES, O. **Comportment rhéologique des pâtes, mortiers 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

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, 2010.

CALISTER, JR., W.D. **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.

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

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

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. Isaia, São Paulo. 2007

COSTA, M.R.M. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), 2006. 148p. (Tese, Doutorado em Engenharia).

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

DIAMOND, S. **The microstructure of cement paste in concrete**. In: International congress on the Chemistry of Cement, 8th, Proceedings. Rio de Janeiro, Sept. 22-27, 1986. v1, p.122-147

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

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

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

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

ISBERNER, A.W. **Masonry mortars – A progress report**. Skokie, Portland Cement Association, 1964. (report PCA.R&D.Ser.1086)

JOHN, V.M. **On the sustainability of concrete**. *Industry and Environment*, Paris, v. 26, n. 2-3, p. 62-63, 2003

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, 2001.

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.

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, 2001. 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.

DAL MOLIN, 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 mörtel/stein**. **Zement-Kalk-Gips**, n.1, 1983.

PAREK, S.N.; OHAMA, Y.; DEMURA,K. **Evaluation method for adhesion rest results of bonded mortars to concrete substratesby square optimization method**. **ACI MaterialsJournal**. V92, n.4, p.355-360, july-aug. 1995.

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.

POLITO, G., **Avaliação quantitativa e qualitativa da introdução de cal hidratada nas argamassas e sua influência no desempenho e na morfologia**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2008. 182p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil).

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)

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).

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, Shangai. **Proceedings ...**Shangai: Tongji University, 1997. p59-68.

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.

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.

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.

TAYLOR, H.F.W. **Ettringite in cement paste and concrete**. In: International Rilem conference, 1996. Proceedings: Concrete: from material to structure. Rilem. P. 55-76.

VOSS, W.C. **Permeability of brick masonry walls: an hypothesis**. American Society for testing Materials, Proceedings, Philadelphia, 1933, v33, part 2, p.670-691

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.

ANEXO I – Planilha de resultados de resistência de aderência
Determinação da resistência de aderência à tração

Traço utilizado	Nº	Dosado em volume	1 : 1 : 6	
Tipo de argamassa	Rodada no canteiro			
Data de execução do revestimento	23/04/2009	Idade da argamassa	28 dias	
Tipo da base	Bloco cerâmico 30x20x10 sem chapisco		Espessura teórica	20 mm
Data da colagem	20/04/ 2009	Data do arrancamento	21/04/ 2009	
Observações				

Corpo de prova	Tensão (MPa)	Substrato	Formas de ruptura (%)				Espessura (mm)	Observações
			a	b	c	d		
1	0,57		85	-	-	15	20	Junta de assentamento
2	0,34		55	-	-	45	20	
3	0,64		40	-	-	60	20	
4	0,38		70	-	-	30	20	
5	0,56		30	-	-	70	20	
6	0,56		90	-	-	10	20	

Corpo de prova	Tensão (MPa)	Substrato	Formas de ruptura (%)				Espessura (mm)	Observações
			a	b	c	d		
7	0,45		20	-	-	80	20	
8	0,40		100	-	-	-	20	Junta de assentamento
9	0,27		85	-	-	15	20	
10	0,39		30	-	-	70	20	Junta de assentamento
11	0,22		95	-	-	5	20	Junta de assentamento
12	0,52		-	-	-	100	20	
a) ruptura na interface argamassa/substrato			c) ruptura do substrato					
b) ruptura da argamassa de revestimento			d) ruptura na interface revestimento/cola					

Média de 12 ensaios (duas séries)	0,44	Referência normativa - NBR 13749	
Desvio padrão	0,13	Reboco interno (MPa)	Reboco externo (MPa)
		0,20	0,30

Determinação da resistência de aderência à tração

Traço utilizado	Nº2	Dosado em volume	1 : 0 : 6
Tipo de argamassa	Rodada no canteiro		
Data de execução do revestimento	23/04/2009	Idade da argamassa	28 dias
Tipo da base	Bloco cerâmico 30x20x10 sem chapisco	Espessura teórica	20 mm
Data da colagem	20/04/2009	Data do arrancamento	21/04/2009
Observações			

Corpo de prova	Tensão (MPa)	Substrato	Formas de ruptura (%)				Espessura (mm)	Observações
			a	b	c	d		
1	0,50		100	-	-	-	20	
2	0,41		40	-	-	60	20	
3	0,80		10	-	-	90	20	
4	0,37		60	-	-	40	20	
5	0,63		10	-	-	90	20	
6	0,38		85	-	-	15	20	

Corpo de prova	Tensão (MPa)	Substrato	Formas de ruptura (%)				Espessura (mm)	Observações
			a	b	c	d		
7	0,56		85	-	-	15	20	
8	0,24		60	20	20	20	20	
9	0,79		15	-	-	85	20	
10	0,34		100	-	-	-	20	
11	0,41		75	-	-	25	20	Junta de assentamento
12	0,37		80	-	-	20	20	Junta de assentamento
a) ruptura na interface argamassa/substrato			c) ruptura do substrato					
b) ruptura da argamassa de revestimento			d) ruptura na interface revestimento/cola					

Média de 12 ensaios (duas séries)	0,48	Referência normativa - NBR 13749	
Desvio padrão	0,18	Reboco interno (MPa)	Reboco externo (MPa)
		0,20	0,30

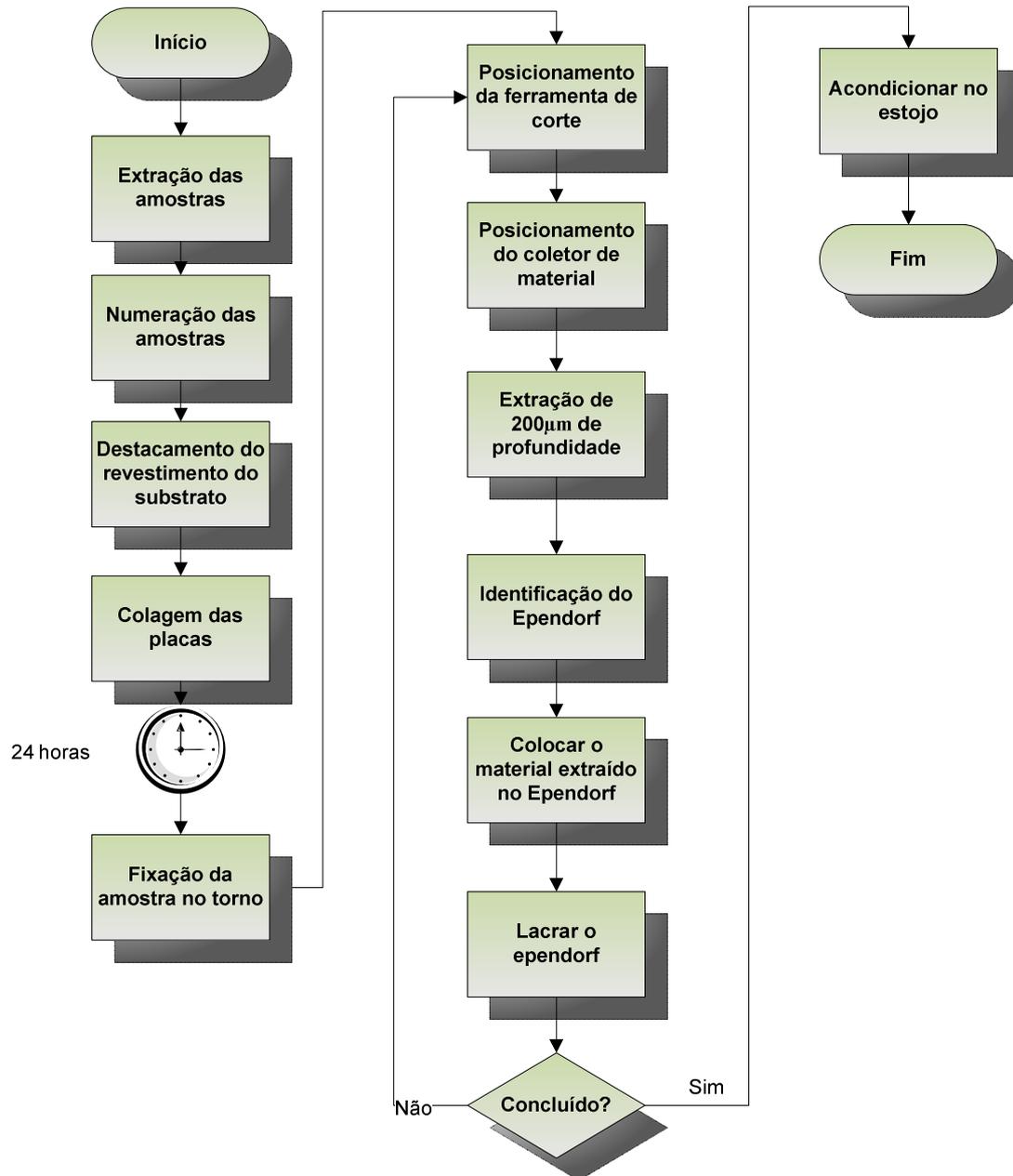
Determinação da resistência de aderência à tração

Traço utilizado	Nº3	Dosado em volume	-
Tipo de argamassa	Industrializada ensacada		
Data de execução do revestimento	23/04/2009	Idade da argamassa	28 dias
Tipo da base	Bloco cerâmico 30x20x10 sem chapisco	Espessura teórica	20 mm
Data da colagem	20/04/2009	Data do arrancamento	21/04/2009
Observações	Foram observadas deficiências na aplicação da argamassa (durante o corte para colagem das placas ocorreu perda de vários cps). Foi também observada fissuras e descontinuidades entre camadas da massa.		

Corpo de prova	Tensão (MPa)	Substrato	Formas de ruptura (%)				Espessura (mm)	Observações
			a	b	c	d		
1	0,15		-	100	-	-	20	
2	0,30		100	-	-	-	20	
3	0,33		100	-	-	-	20	Junta de assentamento
4	0,29		100	-	-	-	20	
5	0,33		100	-	-	-	20	
6	0,21		100	-	-	-	20	

Corpo de prova	Tensão (MPa)	Substrato	Formas de ruptura (%)				Espessura (mm)	Observações
			a	b	c	d		
7	0,28		-	100	-	-	20	
8	0,20		-	100	-	-	20	
9	0,34		5	0	95	-	20	
10	0,26		80	80	20	-	20	
11	0,16		-	-	-	-	20	
12	0,34		15	15	85	-	20	
a) ruptura na interface argamassa/substrato			c) ruptura do substrato					
b) ruptura da argamassa de revestimento			d) ruptura na interface revestimento/cola					

Média de 12 ensaios (duas séries)	0,27	Referência normativa - NBR 13749	
Desvio padrão	0,07	Reboco interno (MPa)	Reboco externo (MPa)
		0,20	0,30

ANEXO II - Processo: Extração de amostra para FRX**1. Fluxograma**

2. Descrição do Processo

Atividade	Descrição	Recursos necessários
Extração das amostras	As amostras foram extraídas com o auxílio de serra circular. O tamanho da amostra deve ser o suficiente para se obter a quantidade mínima necessárias aos ensaios de FRX e reagente químico.	Serra circular
Numeração das amostras	Após a extração as amostras devem ser imediatamente identificadas para evitar a mistura.	Etiquetas Sacos plásticos
Destacamento da argamassa	Deve ser destacada o revestimento argamassa do substrato.	
Colagem da placa	A placa de fixação da amostra no torno deve ser colada no verso da amostra com a utilização de cola epoxy. Deve-se esperar no mínimo 24 horas da colagem para iniciar a usinagem da amostra.	Cola epoxi SikaDur 32 Barras quadradas de alumínio – 10mm x 10mm x 50mm
Fixação da amostra no torno	Posicionar com a utilização de esquadro na vertical e na horizontal.	Esquadro
Posicionamento da ferramenta de corte	A ferramenta de corte deve ser posicionada na superfície e sua folga retirada.	
Posicionamento do coletor de material	Posicionar recipiente para coletar material oriundo da usinagem. recipiente auto colante, papel e descartável.	Recipiente de papel descartável
Extração de 1mm de profundidade	Ligar o torno e proceder avanços de 200µm. Percorre a superfície para aumentar a quantidade de material extraído.	Mini-Torno Ferramenta de corte.
Identificação do	Colar etiqueta correspondente à amostra	Tubo Ependorf

Atividade	Descrição	Recursos necessários
Ependorf	e à profundidade extraída.	Etiqueta adesiva
Colocar material extraído no Ependorf	O funil deve ser lavado e seco após cada utilização para evitar a contaminação do material subsequente.	Funil
Lacrar Ependorf	Lacrar o Ependorf com auxílio de fita adesiva.	Fita durex
Acondicionar no estojo	Os tubos devem ser acondicionado sem estojo próprio.	Estojo de Ependorf

3. Recomendações de segurança

Durante o processo de colagem das placas utilizar luvas de PVC para evitar o contato com as mãos

Durante o processo de extração de material utilizar óculos de proteção para evitar projeção de material nos olhos.

4. Observações do processo

a) É muito importante o posicionamento da amostra no trono. Deve ser verificado o esquadro com a ferramenta verticalmente e horizontalmente. Este cuidado ajuda a garantir a espessura e profundidade de corte desejada.

A velocidade mais baixa possibilita o melhor aproveitamento do pó residual.

b) O avanço transversal deve ser mais lento para se conseguir um pó mais fino, evitando que sejam retirados pedaços da amostra, ou até mesmo a quebra da mesma.

c) Apesar da broca não ser de material apropriado (Fresa Topo HP – 13mm - aço rápido) para o corte de material cerâmico, a grande dureza proporcionou boa durabilidade à ferramenta.

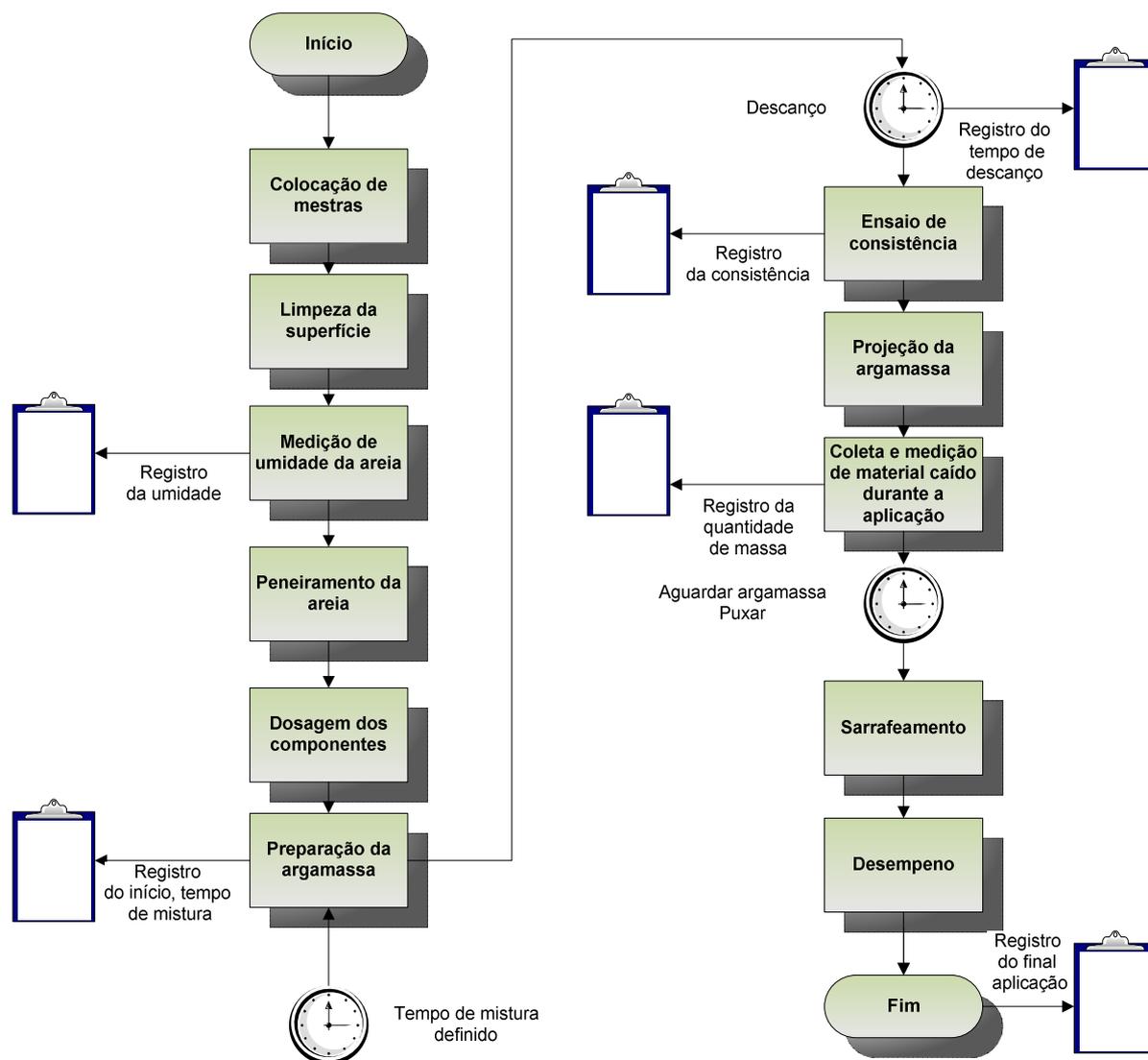
d) A utilização da fresa de topo foi necessária para se controlar a profundidade de corte. Este controle não é possível com as brocas comuns de ponta cônica. O material de fabricação da fresa (aço rápido) possibilita a fácil identificação de algum contaminante proveniente do processo de extração da amostra.

e) O diâmetro escolhido para a broca é proporcional às áreas disponíveis na superfície do bloco para extração.

- f) O cuidado no processo de colagem também é importante. Rebarbas de epoxy dificultam a fixação da amostra no torno e atrasam o processo. Às vezes é necessário o desbaste do epoxy.
- g) É muito importante o posicionamento da barra de alumínio no momento da colagem. é neste momento que se escolhe a área que será desbastada e se garante o posicionamento perpendicular à ferramenta de corte.
- h) Foi muito difícil a obtenção de superfícies para extração do material, principalmente nos traços 1 e 2 (maior resistência mecânica). Na maioria das vezes, o destacamento trazia consigo a camada superficial do bloco cerâmico. Os pontos do bloco mais propícios para se conseguir boas áreas superficiais são nas suas bordas, onde sua espessura é maior.
- i) Devido às pequenas superfícies extraídas, foi muito difícil conseguir quantidade significativa do material para a realização das análises. Foram necessários várias amostras.

ANEXO III - Processo: Execução da argamassa

5. Fluxograma



6. Descrição do Processo

Atividade	Descrição	Recursos necessários
Colocação de mestras	Colocação de mestras em tijolo cerâmico, afim de servir de guia para a aplicação e garantir a espessura média de 20mm.	Régua de alumínio Cacos de tijolo cerâmico Trena

Atividade	Descrição	Recursos necessários
Limpeza da superfície	Executar a limpeza da superfície para retirada de material pulverulento e contaminantes.	Vassoura de piaçava
Medição da umidade da areia	Medir a umidade da areia através do método SPEED afim de corrigir a quantidade de água do traço.	Equipamento SPEED, Balança
Peneiramento da areia	Peneirar areia para retirada de material com granulometria excessiva.	Peneira arroz
Dosagem dos componentes	Dosar a quantidade de material, em volume, sem adensamento. Fazer pesagem para conferência de quantidade.	Balde graduado Balança
Preparação da argamassa	Fazer a mistura do material mecanizada, adicionando os materiais na seguinte sequência: Areia, Cal, Cimento, Água. Registrar o início e o tempo de mistura.	Betoneira 120 litros
Descanso	Deixar argamassa descansar afim de aguardar os aditivos da cal e da argamassa pronta agirem.	
Ensaio de Consistência	Realizar o ensaio de consistência de acordo com as NBR 7215 e NBR 13276/95 buscando valores de 255 ± 10 .	Flowtable Trena
Projeção da argamassa	Fazer a projeção manualmente com o auxílio de colher de pedreiro.	Caixote de massa Colher de pedreiro
Coleta e medição do material caído durante a aplicação	Fazer a coleta do material depositado no chão após a projeção de todo o material na parede.	Colher de pedreiro Balde graduado
Sarrafeamento	Sarrafeiar a massa para acabamento final.	Régua de alumínio

Atividade	Descrição	Recursos necessários
Desempeno	Executar acabamento final com desempenadeira.	Desempenadeira de madeira

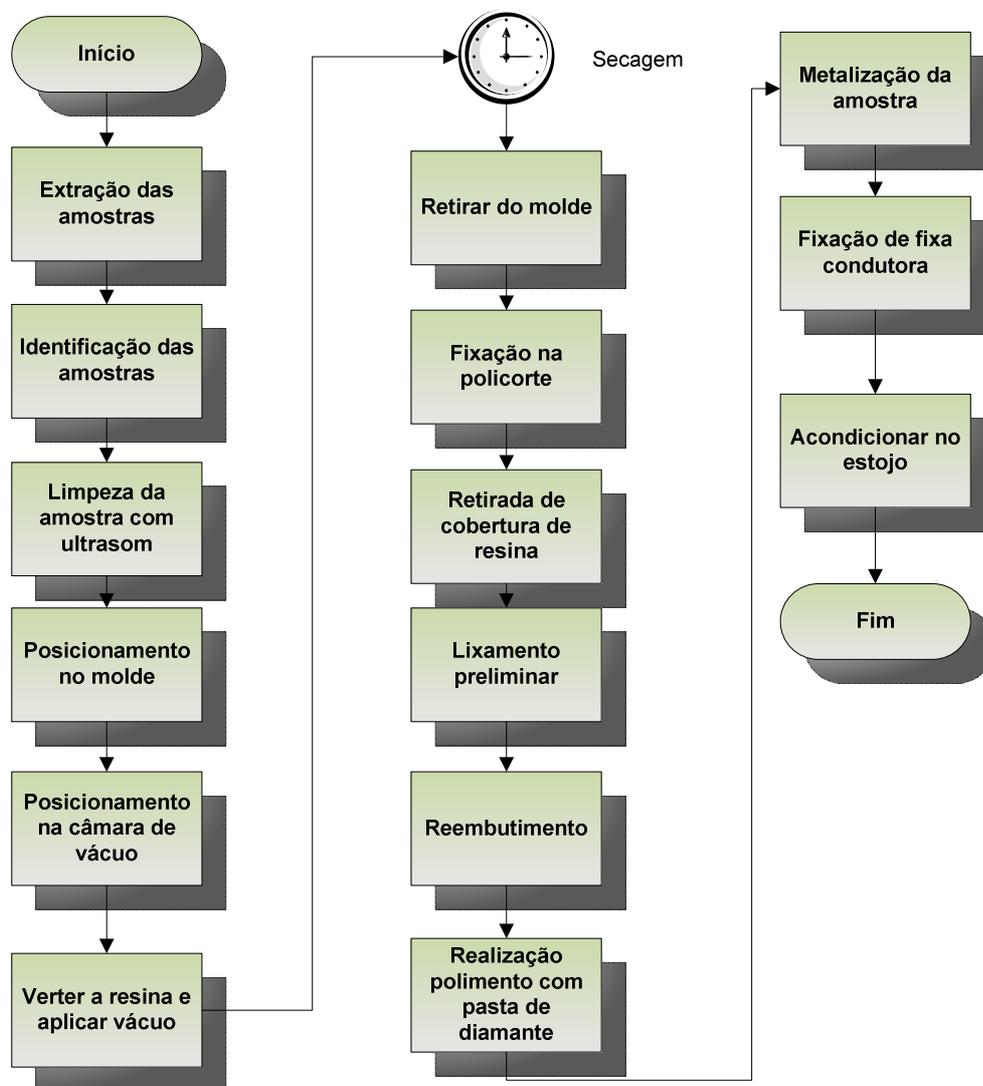
7. Recomendações de segurança

Durante o processo de preparação da argamassa deve-se evitar o contato do cimento Portland e da cal hidratada com a pele e com os olhos. Para isto deve-se utilizar luvas de PVC e óculos de proteção.

8. Observações do processo

ANEXO IV - Processo: Preparação de amostra (embutimento) para realização de ensaio no MEV – EDS

1. Fluxograma



2. Descrição do Processo

Atividade	Descrição	Recursos necessários
Extração da amostra	As amostras são retiradas com a utilização de serra circular e disco diamantado. As dimensões devem permitir sua introdução no molde para embutimento em resina. As dimensões	Serra circular Disco diamantado

Atividade	Descrição	Recursos necessários
	máximas são definidas pelo porta amostra do MEV.	
Identificação das amostras	As amostras são identificadas assim que extraídas da parede, a fim de se evitar a troca de amostras. A etiqueta identificação será embutida junto com a amostra.	etiquetas
Limpeza da amostra em ultrasom	Para eliminar contaminantes levados pelo processo de corte da amostra e mesma deverá passar por 30 segundos imersos em benzina no agitador de ultrasom.	Agitador ultrasom benzina
Posicionamento no molde	A amostra deve ser posicionada de forma que a face a ser analisada este direcionada para a seção transversal do prima.	molde
Posicionamento na câmara de vácuo		Câmara de vácuo
Verter a resina e aplicar o vácuo	A resina catalizada será vertida no molde e será aplicado um vácuo de 100 militorr. A aplicação do vácuo tem a finalidade de forçar a resina a penetrar nos poros da amostra. Esta penetração não prejudica as análises do MEV porque a mesma é formada por carbono e este não é lido pelo equipamento.	Câmara de vácuo epoxy
Retirar dos moldes	Retirar os prismas dos moldes plásticos.	
Fixação na policorte	As amostras serão afixadas na policorte com auxílio de suporte específico.	Suporte específico

Atividade	Descrição	Recursos necessários
		Ferramental necessário Policorte Disco diamantado Ø15,2cm, espessura 0,5mm –aço revestido em latão
Retirada da cobertura de resina	O primeiro corte objetiva retirar a camada superficial de resina. Sua espessura será a necessária para tal finalidade.	Policorte Disco diamantado Ø15,2cm, espessura 0,5mm –aço revestido em latão
Lixamento preliminar	Objetiva regularizar a superfície.	Lixa água 100 Mesa de lixamento
Reembutimento	Nesta etapa, coloca-se a etiqueta de edificação para formar identificação permanente.	Molde Resina poliéster cristal
Lixamento preliminar	Objetiva regularizar a superfície.	Lixa água 240 Lixa água 600 Mesa de lixamento
Realização do polimento com pasta de diamante	3 etapas com três granulometria de pasta de diamante. Sequência de 9µm, 3µm, 1µm. Aproximadamente 10 minutos em cada etapa.	Mesa de lixamento Pasta de diamante 9 µm, 3 µm, 1 µm. Óleo lubrificante
Metalização da	A metalização busca transformar a	Equipamento de

Atividade	Descrição	Recursos necessários
amostra	superfície da amostra em condutora de energia elétrica. Neste caso a metalização foi realizada com ouro. Tempo: 360 segundos Corrente: 10 miliamperes (mA) Vácuo: 100 millitor	metalização.
Fixação da fita condutora	Fita de carbono tem a finalidade de fazer o contato condutor com o equipamento MEV.	Fita impregnada de carbono
Acondicionamento em estojo	As amostras serão acondicionadas em estojos para impedir que sejam danificadas. Neste caso a mostra não poderá ser embalada para não danificar a metalização.	Estojo plástico

3. Recomendações de segurança

Durante o processo de embutimento em resina cristal utilizar luvas de PVC para evitar o contato com as mãos, óculos de segurança e máscara de carbono ativado para vapores orgânicos. O processo deve ser executado em ambiente ventilado ou sob exaustão mecânica.

Durante o processo de extração de material utilizar óculos de proteção para evitar projeção de material nos olhos.

O corte na policorte deve ser realizado utilizando dispositivo protetor contra projeção de materiais.

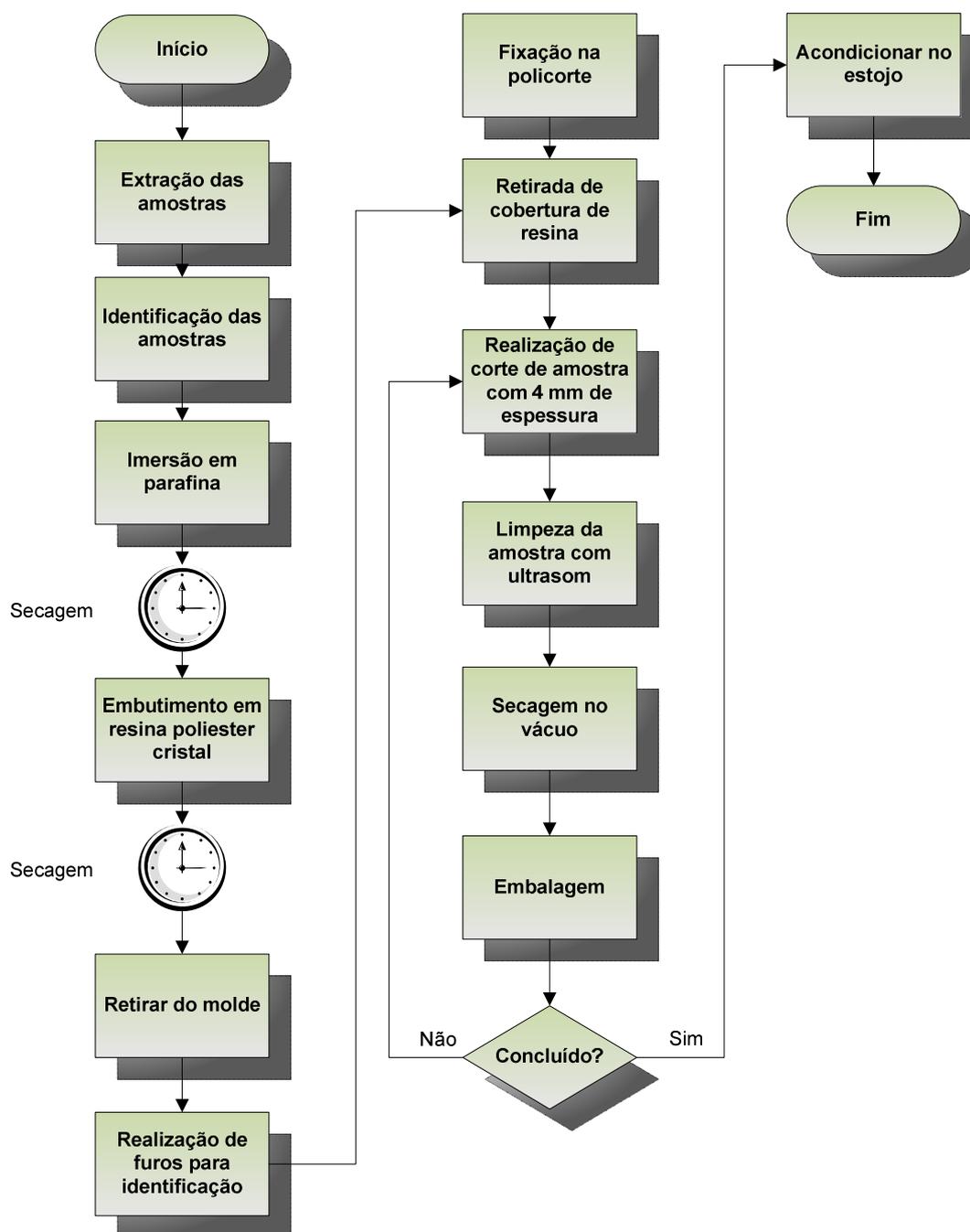
4. Observações do processo

a) A marcação da parede para realização do corte no tamanho necessário foi realizado com carimbos de borracha confeccionados nas dimensões necessárias.

- b) O corte na policorte é iniciado com a menor velocidade (100rpm) até que crie um sulco que estabilize o disco, depois disto a velocidade é elevada para velocidade máxima do equipamento (975rpm).
- c) O corte das amostras na policorte é lento, podendo despende mais de uma hora cada.
- d) A retirada dos prismas dos moldes deve ser realizada com cuidado para que não se danifique o mesmo. A utilização de martelo não é indicada.
- e) A metalização com carbono não foi conseguida. O motivo não foi identificado.

ANEXO V - Processo: Preparação de amostra para realização de ensaio com reagentes em estado natural

1. Fluxograma



2. Descrição do Processo

Atividade	Descrição	Recursos necessários
Extração da amostra	As amostras são retiradas com a utilização de serra circular e disco diamantado. As dimensões devem permitir sua introdução no molde para embutimento em resina. As dimensões máximas são: 60mm de comprimento e seção transversal retangular com lado máximo de 30mm.	Serra circular Disco diamantado
Identificação das amostras	As amostras são identificadas assim que extraídas da parede, a fim de se evitar a troca de amostras. A etiqueta identificação será embutida junto com a amostra.	etiquetas
Imersão em parafina	As amostras são imersão em parafina a fim de criar isolamento ao ar mantendo suas propriedades intactas e impedir a penetração da resina poliéster no processo de embutimento.	Ebulidor Recipiente Parafina granulada
Embutimento em resina de poliéster cristal	As amostras são embutidas em resina poliéster formando cilindro com diâmetro de 35mm e comprimento de 70mm. As dimensões foram definidas em função das dimensões do equipamento de corte (policorte).	Recipientes Resina poliester cristal
Retirar dos moldes	Retirar os prismas dos moldes plásticos.	
Realização de furos de identificação	Para diminuir a possibilidade de troca de amostra os prismas receberão furos longitudinais (\varnothing 3mm) correspondente à	Torno Broca aço rápido 3mm

Atividade	Descrição	Recursos necessários
	sua numeração. Ex: traço 2 – 2 furos.	
Fixação na policorte	As amostras serão afixadas na policorte com auxílio de suporte específico.	Suporte específico Ferramental necessário Policorte Disco diamantado Ø15,2cm, espessura 0,5mm –aço revestido em latão
Retirada da cobertura de resina	O primeiro corte objetiva retirar a camada superficial de resina. Sua espessura será a necessária para tal finalidade.	Policorte Disco diamantado Ø15,2cm, espessura 0,5mm –aço revestido em latão
Realização do corte de amostra com 4 mm	Realização de cortes com 4mm de espessura, até que se finalize o corte completo do prisma.	Policorte Disco diamantado Ø15,2cm, espessura 0,5mm –aço revestido em latão
Limpeza da amostra em ultrassom	Para eliminar contaminantes levados pelo processo de corte da amostra e mesma deverá passar por 30 segundos imersos em benzina no agitador de ultrassom.	Agitador ultrassom benzina
Secagem à vácuo	Para garantir secagem rápida e completa a amostra será submetida a vácuo de 100 millitorr.	Câmara de vácuo

Atividade	Descrição	Recursos necessários
Embalagem	A amostra será embalada em envelope plástico identificado.	Envelopes plásticos
Acondicionamento em estojo	As amostras serão acondicionadas em estojos para impedir que sejam danificadas.	Estojo plástico

3. Recomendações de segurança

Durante o processo de embutimento em resina cristal utilizar luvas de PVC para evitar o contato com as mãos, óculos de segurança. O processo deve ser executado em ambiente ventilado ou sob exaustão mecânica.

Durante o processo de extração de material utilizar óculos de proteção para evitar projeção de material nos olhos.

No processo de imersão em parafina deve tomar cuidado para evitar choques elétricos e queimaduras.

O corte na policorte deve ser realizado utilizando dispositivo protetor contra projeção de materiais.

4. Observações do processo

a) A marcação da parede para realização do corte no tamanho necessário foi realizado com carimbos de borracha confeccionados nas dimensões necessárias.

b) Ao se extrair as amostras da parede, por várias vezes sua seção transversal ultrapassa a dimensão máxima, devido à espessura do revestimento de argamassa. Neste caso foi extraída parte da espessura de argamassa com a utilização da serra mármore. Este procedimento não trás qualquer prejuízo ao estudo, uma vez que, o foco do estudo está na interface, que permanece inalterada.

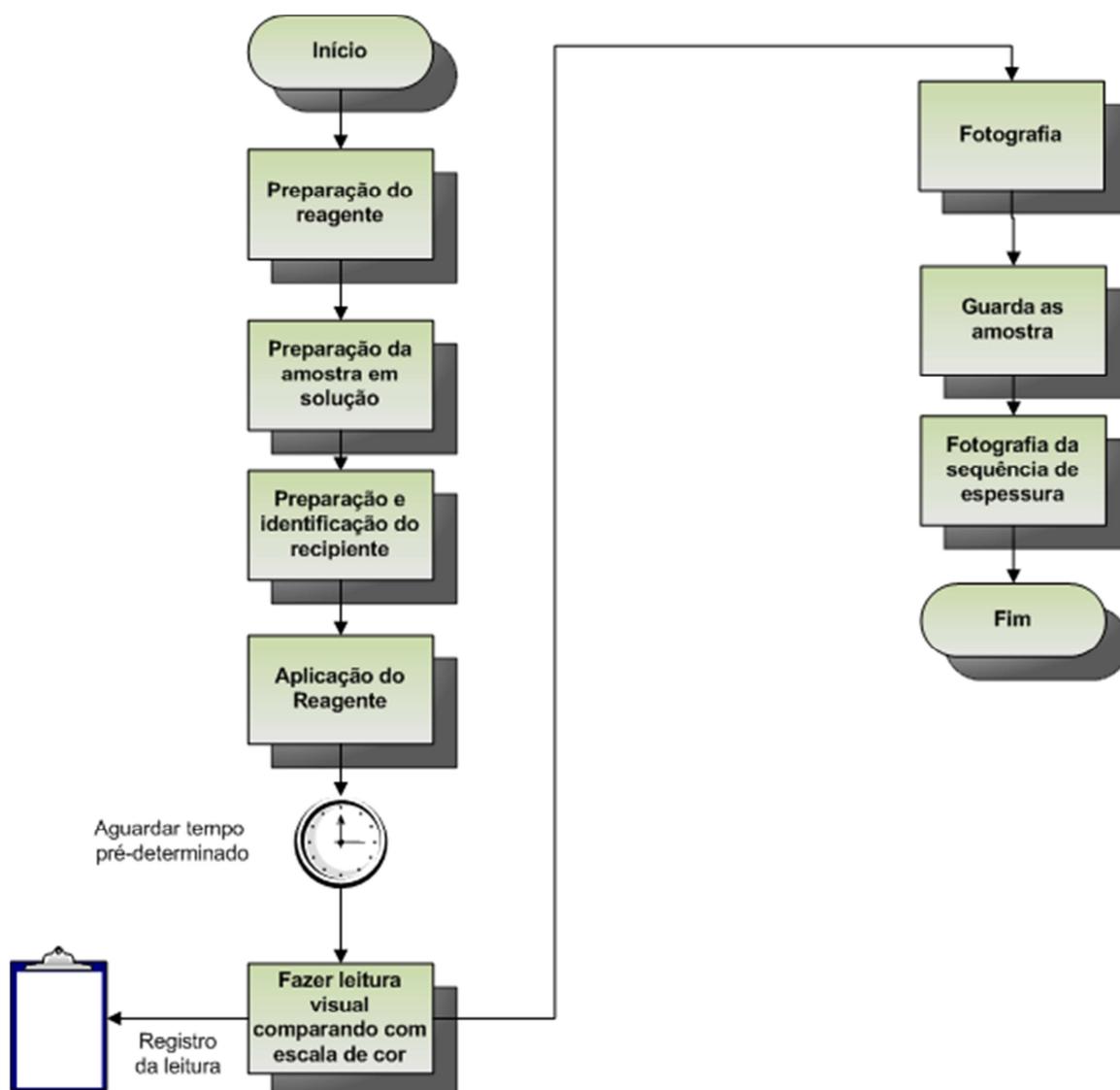
c) A espessura das amostras não devem ser inferiores a 3mm pois isto as torna frágeis e instáveis mecanicamente.

d) A imersão em parafina é rápida, bastando apenas alguns segundos. Posteriormente são penduradas para secagem final.

- e) O corte na policorte é iniciado com a menor velocidade (100rpm) até que crie um sulco que estabilize o disco, depois disto a velocidade é elevada para velocidade máxima do equipamento (975 rpm).
- f) O corte das amostras na policorte é lento, podendo despende mais de uma hora cada.
- g) A retirada dos prismas dos moldes deve ser realizada com cuidado para que não se danifique o mesmo. A utilização de martelo não é indicada.
- h) No traço 3 (menor resistência mecânica) é difícil a retirada da amostra sem danificá-la. A tendência é que haja a separação entre a argamassa e o bloco durante o processo.

ANEXO VI - Processo: Ensaio colorimétrico em solução

1. Fluxograma



2. Descrição do Processo

Atividade	Descrição	Recursos necessários
Preparação do reagente	Preparação do reagente conforme formulação indicada.	Reagente Formulação Recipiente
Preparação da solução	Preparação da solução conforme diluição indicada.	Recipiente Diluição Recipiente

Atividade	Descrição	Recursos necessários
Preparação e Identificação do recipiente		Etiqueta Tubo de ensaio com tampa
Aplicação do reagente	Aplicação do reagente na proporção indicada e fazer a homogeneização da solução. Aguardar X minutos para realizar a mistura.	Proporção de mistura
Fazer leitura visual comparando com escala de cor		Escala de cor
Fotografia	Fazer registro fotográfico individual e do conjunto de amostras.	Máquina digital
Guarda de amostra	Guardar amostra devidamente identificada.	Porta tubos
Fotografia da seqüência	Fazer registro fotográfico de todas as amostras de uma seqüência. Uma boa solução é utilizar para a realização do ensaio em microplaca de poliestireno.	Máquina digital

3. Recomendações de segurança

Durante o processo de preparação do reagente, preparação da solução e aplicação do reagente utilizar luvas de PVC para evitar o contato com as mãos e óculos de proteção para evitar contato com os olhos.