

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DA INTERFACE ARGAMASSA MISTA / BLOCO CERÂMICO

Giulliano Polito – Mestre, DEMC/EE.UFGM – Rua Cambuquira 1100/302, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 30710-550, giulliano.polito@gmail.com.

Antônio Neves de Carvalho Junior – Professor Doutor Adjunto, DEMC/EE.UFGM

Paulo Roberto Gomes Brandão – Professor Doutor Titular e Emérito, DEMIN/EE.UFGM

RESUMO

Este trabalho objetiva caracterizar a interface entre argamassa mista e blocos cerâmicos em alvenarias, concentrando-se na análise microestrutural. Para isto, foi utilizada a técnica de microscopia eletrônica de varredura com microanalisador EDS (MEV-EDS), a fim de identificar os principais produtos de hidratação presentes na interface. A análise por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) foi utilizada para verificar a profundidade de penetração dos produtos de hidratação. Os resultados demonstraram que a principal fase responsável pela resistência de aderência entre a argamassa e o bloco cerâmico é a etringita, através do intertravamento dos cristais no interior dos poros do substrato. Foram visualizados cristais de etringita formados no interior dos poros do substrato a uma profundidade de até 500µm, penetração esta, confirmada pelas variações nas concentrações de elementos químicos, em função da profundidade, através da técnica de FRX. Foram verificadas variações na morfologia da etringita quando da introdução da cal hidratada no traço.

Palavra-Chave: argamassa, interface, microestrutura, bloco cerâmico

ABSTRACT

This work aims the characterization of the interface between the coat of mortar and the ceramic block (brick) masonry, focusing on the analysis of the microstructure. The study was carried out by scanning electron microscopy with EDS microanalyzer (SEM-EDS), in order to identify the main hydration products present at the interface. Also, X-ray fluorescence spectrometry (XRF) was used to verify the depth of penetration of the hydration products. The results showed evidence that the main phase responsible for the bond strength between the plaster and the ceramic block is etringite. The bond occurs by the interlocking of etringite crystals and their penetration within the pores of the substrate, which were observed inside these pores until a depth of 500µm. This penetration was confirmed by the variations in the concentrations of related chemical elements, depending on depth, by the XRF technique. Different morphologies of the etringite have been observed, resulting from insertion of the hydrated lime.

Keywords: mortar, interface, microstructure, ceramic block

INTRODUÇÃO

A aderência ao substrato é uma das principais propriedades que as argamassas devem garantir durante sua vida útil. O desempenho das argamassas quanto a esta propriedade está diretamente relacionado à microestrutura da interface revestimento/substrato. Para que possamos atuar preventiva e corretivamente, é imprescindível o completo entendimento dos mecanismos envolvidos, passando pela caracterização microestrutural de seus constituintes e pela interação destes com as interfaces, além da sua distribuição pela argamassa. Este trabalho objetiva caracterizar a microestrutura da interface argamassa/substrato.

MICROESTRUTURA DA INTERFACE ARGAMASSA/BLOCO CERÂMICO

A zona de transição é a região de contato entre a pasta e o substrato. Essa é região atípica e, também como acontece ao concreto, se apresenta como o elo mais frágil do sistema.

A microestrutura da pasta de cimento merece atenção especial na zona de transição. As características da microestrutura da pasta nesta região dependem de vários fatores ⁽¹⁾. Parece ainda não existir um consenso sobre as características microestruturais da zona de contato e quais realmente são os produtos responsáveis pela aderência. CHASE (1984) e LAWRENCE & CAO (1987 e 1988), Citados por CARASEK (1996), defendem a existência de uma grande concentração de cálcio na interface, caracterizando que a ligação é proveniente dos hidróxidos ou silicatos de cálcio; outros, no entanto afirmam existir uma maior concentração de etringita nesta região.

A definição mais aceita afirma que, ao se analisar a argamassa, à medida que se aproxima do substrato, maior será a concentração de etringita e menor a concentração de portlandita. Este comportamento é explicado pelo fato de que ao se misturar água ao cimento, a gipsita é a primeira a se solubilizar e liberar íons sulfato e em seguida os aluminatos. Estes íons são então sugados pelo substrato poroso e levados à interface, onde ocorre a precipitação na forma etringita. Desta maneira, os cristais de portlandita não podem se desenvolver na região da interface em quantidades significativas ⁽²⁾.

A aderência entre a pasta e o substrato é proveniente do entrelaçamento mecânico da etringita nos poros do tijolo, uma vez que ela é principal produto de hidratação do cimento cristalizado na interface ⁽²⁾.

Estando os poros do substrato já preenchidos com etringita, o C-S-H só pode se desenvolver a uma pequena distância da interface. Os produtos da hidratação dos aglomerantes da pasta podem ser encontrados a profundidades entre 100 e 1600 μm . Os principais elementos encontrados são Ca, S, Al e Fe ⁽³⁾. A Microestrutura da interface é apresentada na Figura 1.

A sucção por parte do substrato retira água da pasta, causando uma variação do grau de hidratação da argamassa, sendo que a menor hidratação se dá próxima à interface, gerando uma região de menor resistência. Este efeito de sucção pode também influenciar na morfologia dos produtos de hidratação da interface, tendo em vista as morfologias atípicas encontradas nesta região.

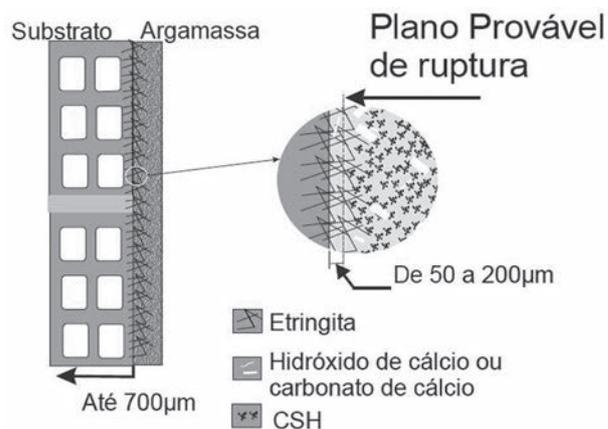


Figura 1 – Representação esquemática do mecanismo de aderência entre argamassa e bloco cerâmico (CARASEK et al. 2001).

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados 10 painéis de reboco, com as dimensões 1,5m x 1,0m, sendo 2 para cada traço (Tabela 1) sobre alvenaria de tijolos cerâmicos, executada há mais de 28 dias, limpa e seca. Foram feitos 6 ensaios de arrancamento e extraídas 4 amostras para realização de análises no microscópio eletrônico de varredura (MEV/EDS) em cada painel.

Tabela 1 – Traços Cimento:Cal:Areia utilizados

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

As amostras foram extraídas destacadas afim de analisar a interface e identificar a penetração dos produtos de hidratação no tijolo. Paralelo à análise morfológica através do MEV, foi realizada a análise química, utilizando-se microanalisador EDS. As amostras que foram utilizadas para análise da fluorescência de raios-X foram extraídas por lixamento manual da superfície do tijolo cerâmico após o destacamento da argamassa (Figura 2). A profundidade de extração foi medida com utilização de um paquímetro.

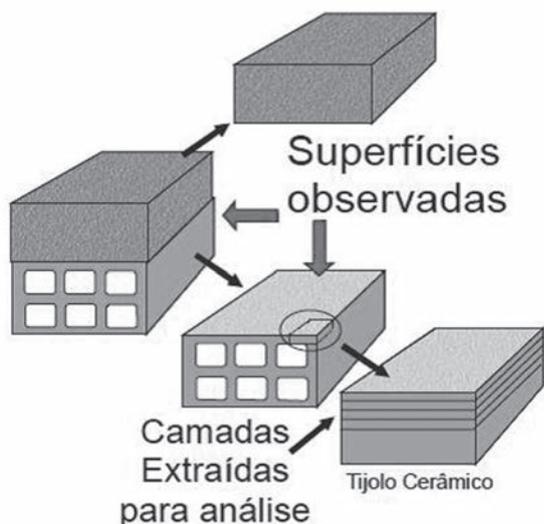


Figura 2 – Plano observado no MEV e Diagrama de extração do material para análise FRX

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

RESULTADO E DISCUSSÕES

CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA

Os resultados obtidos pela argamassa no estado plástico e no estado endurecido são apresentados na Tabela 2. Estes resultados ajudam na correlação do desempenho das argamassas com sua microestrutura.

Tabela 2 – Análise dos resultados obtidos pelas argamassas

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

Legenda:

ICP – Índice de consistência padrão

RA – Retenção de água

ME – Massa específica

TAI – Teor de ar incorporado

RC – Resistência à compressão

MED – Módulo de elasticidade dinâmico

RT – Resistência à tração

PA – Permeabilidade à água

ARR – Ensaio arrancamento

RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS ANÁLISES DE CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Ao se destacar a argamassa do tijolo para efetuar a análise, observou-se que em todas elas, uma fina camada de argamassa permaneceu aderida, visível a olho nu (Figura 3). Observou-se, também, que na medida em que se aumentou o teor de cal na argamassa, a camada se tornou maior e mais uniforme. Este fato se deve à maior plasticidade conferida pela cal à argamassa. A forma como a ruptura ocorreu demonstra que a tensão exercida excedeu a capacidade de coesão próxima à interface, confirmando a existência de uma região de menor resistência neste local.

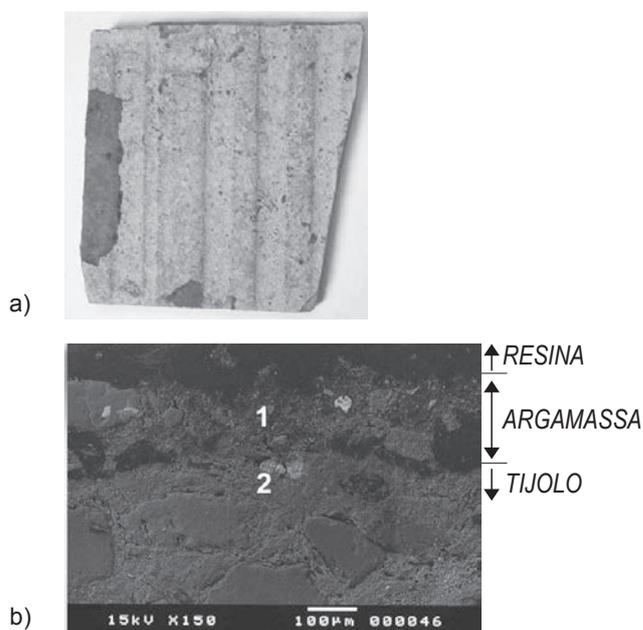


FIGURA 3 – a) Interface do tijolo após de destacamento da argamassa; b) Fotomicrografia da interface argamassa/tijolo do traço 4 – 1:2:10. Imagem de elétrons retroespalhados (IER).

Para medir a espessura desta camada aderida foi necessário o embutimento da amostra em resina poliéster cristal e posterior polimento. Foram feitas fotomicrografias com imagens obtidas por elétrons retroespalhados (Figura 4) e microanálise EDS (Tabela 3). A espessura da camada foi medida através da escala de barra da própria figura. Foram encontrados valores de cerca de 200 μm . Isto também confirma as afirmações de que o rompimento não ocorre propriamente na interface, e sim em uma região muito próxima a ela, por falta de coesão. Fica bem claro também que, apesar de macroscopicamente a argamassa e o tijolo serem completamente diferentes, visualmente, ao nível microscópico, a diferença não é tão nítida assim.

Tabela 3 – Microanálise EDS da Figura 3 b)

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

Na fotomicrografia da interface apresentada na Figura 4, apresentam-se cristais típicos de etringita (morfologia característica com fitas euédricas formadas por coalescência de bastões estreitos (0,05 μm) e longos (4-5 μm)) saindo de dentro dos poros do tijolo⁽⁴⁾. Os cristais se formam perpendicularmente à superfície e as fitas típicas se agrupam em feixes radiais. Em todo o estudo da interface é nítido o predomínio da presença da etringita em relação às outras fases nesta região.

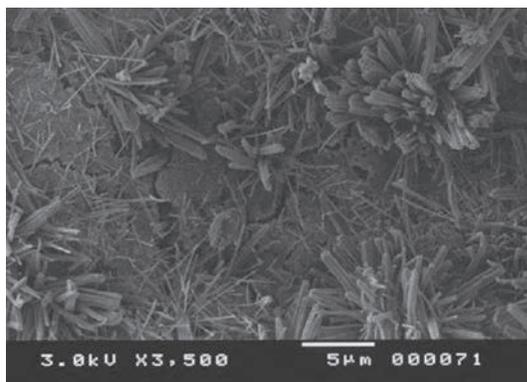


Figura 4 – Fotomicrografia da interface tijolo/argamassa do traço 2 – 1:1:6. IER.

Microtrincas da superfície do tijolo aparecem ao fundo e também ajudam na ancoragem da argamassa. Isto demonstra a afirmação de que a fase responsável pela ancoragem mecânica da argamassa ao substrato é a etringita. Pode-se supor que, para que haja esta ancoragem, é preciso que os cristais em

formação tenham acesso direto ao substrato, ou seja, que não existam contaminações que prejudiquem este contato.

As fotomicrografias da Figura 5 foram realizadas na interface do tijolo com traço 1 – 1:0:6, de perfil, sem o destacamento entre eles. Foi utilizada imagem de elétrons retroespalhados.

A fotomicrografia 5A apresenta uma vista ampliada da região analisada. É nítida a pequena extensão de aderência existente. Grandes vazios se formaram, principalmente nas regiões em curva, o que faz supor que as estrias na superfície do tijolo, que tem como finalidade aumentar a aderência pelo aumento da superfície, podem neste caso provocar sua diminuição.

As fotomicrografias 5B, C, e E apresentam cristais com morfologia típica de de etringita, formados no interior de poros do substrato. Entretanto, não foi possível a confirmação através da análise química semi-quantitativa realizada pela microsonda, devido ao ângulo de formação dos cristais e ao ângulo de incidência dos feixes gerados pelo EDS. Os cristais se formaram mais intensamente em regiões próximas à superfície, como no caso da fotomicrografia E, a cerca de 100 μm . Mas também foram encontrados cristais em profundidades maiores, como no caso das fotomicrografias B e C, a cerca de 500 μm .

A etringita parece ser o único cristal a se formar no interior do substrato. Isto talvez possa ocorrer pelo fato da etringita ser a primeira fase a cristalizar-se no interior dos poros, não deixando espaço para os outros cristais se formarem. Estes cristais se formaram devido à penetração do cimento no interior dos poros do tijolo, entretanto, esta penetração não se dá de forma uniforme nem em termos de profundidade nem em extensão. Existem áreas com grande penetração e outras sem nenhuma. Esta diferença pode ser causada pela extensão de aderência, técnica de aplicação e principalmente pela porosidade aberta do tijolo.

A fotomicrografia 5D apresenta cristais de etringita, na superfície do tijolo, com 30 μm de comprimento e 0,5 μm de espessura, com direção preferencial de crescimento dos cristais perpendicular à superfície do substrato, podendo indicar que a proximidade do substrato interfere na morfologia dos cristais. Esta interferência pode ser causada pela absorção do bloco que cria um fluxo de água, íons e grãos de cimento. Pode ser observado o agulhamento do substrato pelos cristais de etringita. A nítida preponderância dos cristais de etringita pode ser explicada pelo fato de os íons sulfato e alumínio serem os primeiros a solubilizar-se, sendo também os primeiros a serem absorvidos pelo substrato poroso, preenchendo todos os espaços vazios⁽³⁾.

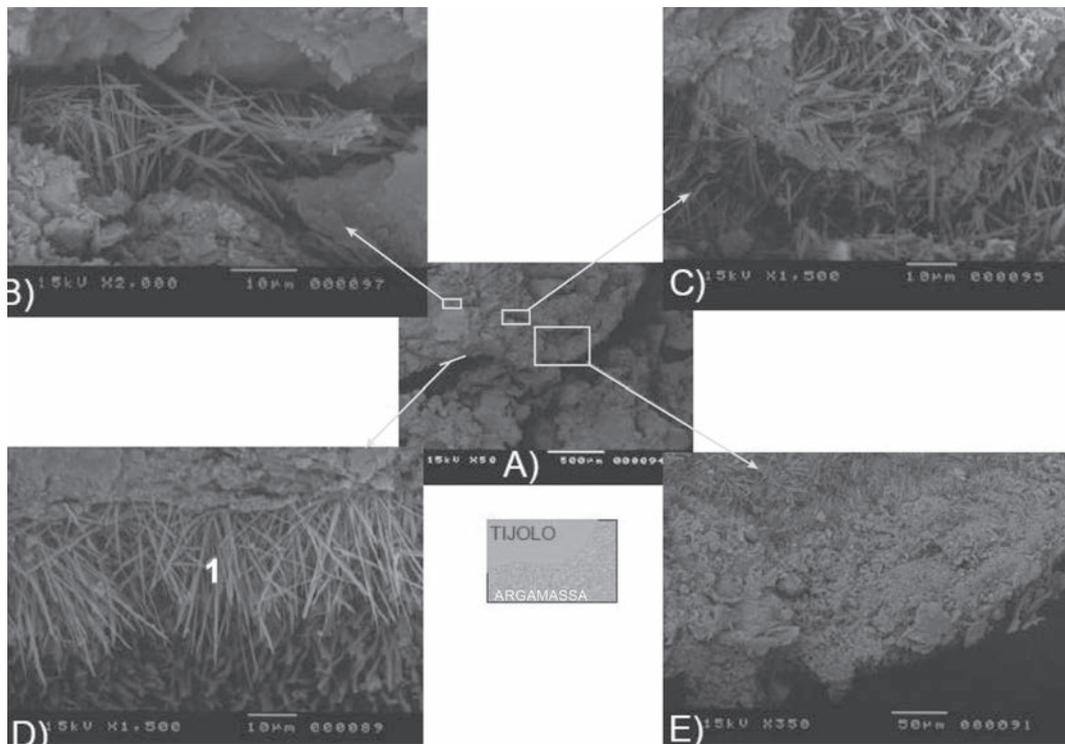


Figura 5 – Fotomicrografias do perfil do bloco cerâmico aderido à argamassa tipo 1 - 1:0:6. IER.

Tabela 4 – Microanálise EDS da FIGURA 5D

PONTO	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	SO ₃ (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Σ (%)	Interpretação
1	15,5	8,3	28,9	45,1	2,1	100,0	Etringita

Ficaram muito nítidas durante o estudo as diferenças de morfologia entre os cristais formados na interface e os cristais típicos formados no interior da argamassa. Na interface, os cristais são maiores e mais bem formados, sendo sua direção preferencial de crescimento perpendicular ao substrato. Nesta região a fase preponderante é a etringita. Já no interior da argamassa, os cristais são menores e na maioria das vezes estão misturados com outras fases.

Nas análises feitas, pode ser percebida uma diferença na morfologia dos cristais de etringita precipitados nos diversos traços utilizados (FIGURA 6). A etringita formada no traço 1 – 1:0:6, fotomicrografia 6A, possui a morfologia que mais se assemelha à morfologia descrita pela literatura^{(4),(2)}. A etringita apresenta bastões estreitos (aproximadamente 0,3µm), relativamente longos (aproximadamente 20µm), com lados paralelos e sem ramificações. Também não foi observada a formação de feixes de agulhas. As etringitas formadas nos traços onde houve a adição de cal, ou seja, traços 2, 3 e 4, possuem uma morfologia diferenciada. Neste caso as agulhas

possuem um comprimento aproximado bem menor (traço 2 = 5µm; traço 3 = 6,5µm; traço 4 = 4,5µm), de um total de 5 amostras analisadas. As agulhas (fitas) se agrupam em feixes formando uma espessura aproximada bem maior (traço 2 = 2µm; traço 3 = 1µm; traço 4 = 1,25µm). Os lados também não são sempre paralelos e as agulhas terminam em pontas. Apesar das diferentes morfologias, as microanálises EDS (TABELA 5) apresentam resultados similares e confirmam a composição de etringitas, com altos teores de enxofre e alumínio. Os elevados teores de SiO₂ (32%) encontrados no ponto 2 sugerem que talvez a microsonda esteja pegando o fundo (bloco cerâmico) além dos cristais de etringita.

Apesar das diferenças morfológicas, em nenhum caso a ruptura ocorreu exatamente na interface, ou seja, na região onde existe a preponderância de etringitas, e sim em uma região logo acima (cerca de 100µm). Esta diferença morfológica pode ser causada pela introdução da cal hidratada na argamassa, e pode estar relacionada com a diminuição da resistência mecânica da argamassa. Cristais menores e mais grossos possuem menor capacidade de agulhamento e intertravamento. A redução de resistência mecânica da argamassa impacta na resistência de aderência do sistema de revestimento como um todo, devido ao fato do rompimento ocorrer por falta de coesão da argamassa.

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

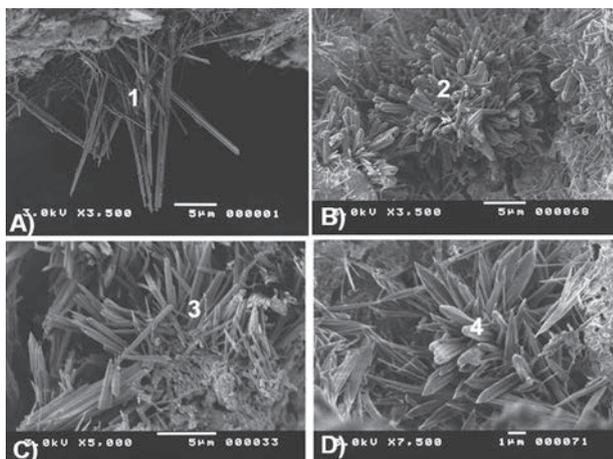


FIGURA 6 – Fotomicrografias dos cristais de etringita nos traços 1, 2, 3, 4. IES.

TABELA 5 – Microanálise EDS da FIGURA 60

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

CONCLUSÃO

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

O fato dos substratos estarem completamente limpos e secos propiciou boa penetração dos produtos de hidratação do cimento. A profundidade e quantidade de penetração do cálcio parece estar relacionada à quantidade de aglomerantes utilizada em cada traço e não foi possível observar nenhuma relação direta com a resistência de aderência. Talvez possa

existir correlação entre a profundidade de penetração do enxofre e a resistência de aderência, uma vez que o enxofre é um dos componentes da etringita.

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

A variação da cal influenciou na extensão de aderência e no adensamento da argamassa, afetando desta maneira os valores de resistência e a forma de ruptura. Na preparação das amostras foi observado que após a ruptura da argamassa, uma fina camada permanece aderida ao tijolo, visível a olho nu, denotando que a ruptura ocorreu pela falta de coesão da argamassa próxima à interface, afastada cerca de 50µm. Este comportamento deixa a entender que o rompimento não ocorreu na faixa rica em etringitas, e sim no interior da camada de argamassa, bem próxima a superfície de contato.

Observou-se uma modificação na morfologia dos cristais de etringita quando da adição de cal hidratada à argamassa. Os cristais se tornaram mais curtos e mais largos. Esta mudança morfológica podem impactar na capacidade de agulhamento e inter-travamento dos cristais e pode também estar ligada à variações no comportamento mecânico das argamassas. O assunto merece ser melhor estudado em pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS

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.

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., 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.

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).