

UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU

Mestrado em Engenharia Civil - Ciência dos materiais aplicada à construção civil

BRUNA BULZICO

**AVALIAÇÃO DA MODIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À  
TRAÇÃO EM FUNÇÃO DO TRATAMENTO SUPERFICIAL DO TARDOS DE  
PLACAS CERÂMICAS COM MODIFICADORES DE SUPERFÍCIES A BASE  
DE SILANO E DE SILICONATO**

São Paulo

2019

UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU

Mestrado em Engenharia Civil - Ciência dos materiais aplicada à construção civil

BRUNA BULZICO

**AVALIAÇÃO DA MODIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À  
TRAÇÃO EM FUNÇÃO DO TRATAMENTO SUPERFICIAL DO TARDOZ DE  
PLACAS CERÂMICAS COM MODIFICADORES DE SUPERFÍCIES A BASE  
DE SILANO E DE SILICONATO**

Dissertação apresentada ao programa de mestrado em Engenharia Civil - Ciência dos materiais aplicada à construção civil, da Universidade São Judas Tadeu, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Área de concentração:**

Engenharia civil

**Especialidade:**

Ciência dos materiais aplicada à construção civil

**Orientador:**

Maurício Marques Resende

São Paulo

2019



## UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU

Mestrado em Engenharia Civil - Ciência dos materiais aplicada à construção civil

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 27 de setembro de 2019.

Assinatura do autor: \_\_\_\_\_

Assinatura do orientador: \_\_\_\_\_

## FICHA CATALOGRÁFICA

Bulzico, Bruna.

Avaliação da modificação da resistência de aderência à tração em função do tratamento superficial do tardo de placas cerâmicas com modificadores de superfícies a base de silano e de siliconato/ B. Bulzico. – Versão corrigida – São Paulo, 2019, 86 p.

Dissertação (Mestrado) - Universidade São Judas Tadeu

Mestrado em Engenharia Civil - Ciência dos materiais aplicada à construção civil.

A Deus por me capacitar para  
realizar os meus sonhos...

Aos meus pais, Sandra e Rogério,  
pelo apoio e amor incondicional...

Ao meu marido, Hermano, pelo  
carinho, pela força e por me  
acompanhar por toda esta caminhada...

À Bianca, fiel companheira de horas  
de estudo...

## AGRADECIMENTOS

---

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa.

A Deus por me capacitar e proporcionar condições para que eu possa buscar meus objetivos.

Aos meus pais, Sandra e Rogério, que sempre me incentivaram. Obrigada por toda preocupação, amor, carinho e apoio.

Ao meu marido, Hermano, que esteve ao meu lado durante toda essa jornada. Muito obrigada por me incentivar, pelo companheirismo, pelo carinho, compreensão e amor.

Ao professor e orientador Maurício Marques Resende pelo apoio e ajuda ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

Ao professor Flávio Maranhão por me apresentar o curso do mestrado, pelo apoio e orientação.

Aos professores da Universidade São Judas Tadeu, pela atenção e pelo empenho em fazer com que cada disciplina apresentada, pudesse contribuir com as nossas pesquisas.

Aos profissionais dos laboratórios da Universidade, pelo apoio ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas Renan Andrade e Jonathan, pela ajuda no desenvolvimento dos ensaios.

À ARC Engenharia e Construções e toda sua equipe, que tem sido uma grande escola para mim, desde 2012.

Aos Engenheiros César e Chynthia e equipe da Concreteste, pelo grande apoio e realização dos ensaios de resistência de aderência à tração.

Aos autores citados ao longo da revisão bibliográfica, pela contribuição à pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico na construção civil.

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino”.

Leonardo da Vinci

## RESUMO

---

Atualmente, os revestimentos cerâmicos de piso ou paredes têm sido compostos, em sua grande maioria, por placas cerâmicas de grandes dimensões e de baixa absorção de água (porcelanato), que vêm exigindo uma maior necessidade de resistência de aderência entre a placa cerâmica e a argamassa colante. Alguns pesquisadores defendem que a aderência é obtida principalmente pelo intertravamento mecânico, enquanto outros pesquisadores afirmam que a colaboração do intertravamento mecânico na aderência é pequeno, sendo obtida principalmente pelo aumento da superfície de contato da matriz cimentícia-substrato. Para propiciar este aumento da superfície de contato, algumas pesquisas indicam a utilização de modificadores de superfície no tardo das placas cerâmicas. Desta forma, esta pesquisa teve por objetivo avaliar a influência do tratamento superficial do tardo com silano e siliconato na resistência de aderência à tração de 3 tipos de argamassas colantes em placas cerâmicas de 3 classes de absorção de água, avaliando a alteração do ângulo de contato proporcionado pelo tratamento superficial no tardo das placas cerâmicas, a avaliação da interface argamassa/placas cerâmica por microscopia óptica e a resistência de aderência à tração e entre argamassa colante e placas cerâmicas. A pesquisa demonstrou que fatores como o teor de polímeros da argamassa, absorção e rugosidade do tardo se mostraram mais influentes para a resistência de aderência à tração do que a utilização dos tratamentos superficiais mencionados.

**Palavras-chave:** argamassa colante, revestimento cerâmico, resistência de aderência, tratamento superficial.

## ABSTRACT

---

Nowadays, floor or wall ceramic tiles have been mostly composed of large, low-water-absorbent ceramic tiles, which have required a greater need for bond strength between the ceramic tile and the adhesive mortar. Some researchers argue that adhesion is obtained mainly by mechanical interlocking, while other researchers claim that the collaboration of mechanical interlocking on adhesion is small, being obtained mainly by increasing the contact surface of the cementitious-substrate matrix. To propitiate this increase of the contact surface, some research indicates the use of surface modifiers in the back of the ceramic tile. Thus, this research aimed to evaluate the influence of the surface treatment of silane and silicate on the tensile bond strength of three types of adhesive mortars in ceramic tiles of 3 water absorption classes, evaluating the change in contact angle provided by the treatment in the back of the ceramic tile, the evaluation of the adhesive mortar/ceramic tile interface by optical microscopy and the tensile bond strength and between adhesive mortar and ceramic tiles. Research has shown that factors such as adhesive mortar polymers content, absorption and back of the ceramic tile roughness were more influential for tensile bond strength than the use of the mentioned surface treatments.

**Keywords:** adhesive mortars, ceramic tile coating, bond strength, superficial treatment

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1- Requisitos para argamassa colante - Adaptada da ABNT NBR 14081-1 (ABNT, 2012). .....	19
Tabela 2 – Recomendações de utilização de Argamassa Colante (Adaptada da ABNT NBR 14081-1 - ABNT, 2012). .....	19
Tabela 3 – Grupo de absorção de água de placa cerâmica - adaptado da ABNT NBR 13818 (ABNT, 1997). .....	21
Tabela 4 - Modificadores de superfície e respectivas diluições. ....	38
Tabela 5 – Absorção de água dos porcelanatos utilizados na avaliação exploratória, conforme ABNT NBR 13.818 (ABNT, 1997). .....	39
Tabela 6- Resultado da Caracterização das Argamassas Colantes. ....	39
Tabela 7 - Tipo de modificador de superfície, modo de aplicação e tempo de cura.....	40
Tabela 8 - Médias dos ângulos de contato aparente .....	41
Tabela 9 - Valores médios da resistência de aderência à tração para cada tipo de argamassa colante, e placas cerâmicas, considerando os tratamentos superficiais aplicados.....	42
Tabela 10 – Absorção de água e da porosidade aparente das placas cerâmicas utilizadas, conforme ABNT NBR 13.818 (ABNT, 1997). .....	45
Tabela 11 – Parâmetros superficiais das placas cerâmicas utilizadas.....	46
Tabela 12 - Propriedades dos Modificadores de Superfície (Wacker, 2019). .....	48
Tabela 13 – Traço das argamassas colantes.....	48
Tabela 14- Resultado da Caracterização das Argamassas Colantes. ....	49
Tabela 15 - Determinação de ensaio de resistência à compressão do CPII F 40. ....	49
Tabela 16 – Aditivo PVAc - VINNAPAS 5044N (dados extraído do site da Wacker). .....	51
Tabela 17 - Espectrometria de raios X do Aditivo PVAc - VINNAPAS 5044N. ....	52
Tabela 18 - Espectrometria de raios X da Tylose MH 60004 P6 .....	53
Tabela 19 - Espectrometria de raios X do aditivo acelerador de resistência - Formiato de Cálcio .....	54
Tabela 20 – (a) Especificação do Formiato de Cálcio – Aditex; (b) Nomenclatura da Tylose MH 60004 P6. ....	54
Tabela 21 – Valores médios do ângulo de contato para cada tipo de placa cerâmica com e sem tratamento superficial. ....	60
Tabela 22 - Análise de variância do efeito do tratamento superficial do tardo do porcelanato, no valor do ângulo de contato.....	61
Tabela 23 – Análise de variância do efeito do tratamento superficial do tardo da placa cerâmica semi-porosa, BIIb, no valor do ângulo de contato. ....	61
Tabela 24 – Análise de variância do efeito do tratamento superficial do tardo da placa cerâmica porosa, BIII, no valor do ângulo de contato.....	61
Tabela 25 - Valores médios da resistência de aderência à tração para cada tipo argamassa colante e de placa cerâmica com e sem tratamento superficial .....	68

Tabela 26 - Análise de variância e teste F para verificação da influência do tipo de argamassa colante na resistência de aderência à tração para o mesmo tipo de placa cerâmica e de modificador de superfície.....	69
Tabela 27 - Análise de variância e teste F para verificação da influência do tipo de modificador de superfície na resistência de aderência à tração para o mesmo tipo de placa cerâmica e de argamassa colante.....	70
Tabela 28 - Variação percentual entre os valores de resistência de aderência à tração em função do tratamento superficial e argamassa colante .....	71
Tabela 29 – Absorção de água - adaptado da ABNT NBR 13818 (ABNT, 1997).....	74
Tabela 30 - Resistência à abrasão superficial para as placas esmaltadas - adaptado da ABNT NBR 13818 (ABNT, 1997). .....	75
Tabela 31 – Resistência ao manchamento (classe de limpabilidade) - adaptado da ABNT NBR 13818 (ABNT, 1997). .....	75
Tabela 32 – Resistência ao ataque químico - adaptado da ABNT NBR 13818 (ABNT, 1997). .....	75
Tabela 33 – Recomendações de utilização de Argamassa Colante (Adaptada da ABNT NBR 14081-1 - ABNT, 2012).....	76
Tabela 34 – Técnica e desempenadeira para assentamento de placas cerâmicas .....	77

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1 – Partes constituintes do sistema de revestimento cerâmico aderido (JUNGINGER, 2013). .....	17
Figura 2 – Ilustração do ensaio de flexibilidade da EN 12002 (Adaptado de Junginger, 2003). .....	20
Figura 3 – Representação esquemática dos mecanismos de aderência argamassa-substrato (COSTA, 2014). .....	27
Figura 4- Representação esquemática do mecanismo de aderência entre argamassas de cimento e blocos cerâmicos, (CARASEK <i>et al.</i> 2001). .....	28
Figura 5 - Imagens em microscopia eletrônica de varredura (MEV) da interface entre os pisos antigos e argamassas colantes, com aumento de 540 vezes (PEREIRA <i>et al.</i> 2013). .....	30
Figura 6 - Tensão superficial de um líquido, adaptado de (LEE, 2013). .....	31
Figura 7 - Ângulo de contato de equilíbrio entre um líquido e uma superfície sólida, adaptado de (FERREIRA, 2013). .....	31
Figura 8 - Condições de molhamento previstas pela equação de Young-Dupré (COSTA, 2014). .....	32
Figura 9 - Representação gráfica do modelo de Wenzel, no qual o líquido preenche as cavidades do substrato, (WATSON <i>et al.</i> 2011). .....	33
Figura 10 - Representação gráfica do modelo de Cassie e Baxter, no qual o líquido não preenche os poros do substrato, (WATSON <i>et al.</i> 2011). .....	34
Figura 11 - Modificadores de superfície verificados na avaliação preliminar. ....	37
Figura 12 - Gráfico: Resistências de aderência à tração, em função do tipo de placa cerâmica, tratamento e argamassa colante .....	42
Figura 13 - Modificadores de superfície, placas cerâmicas e argamassas avaliados na avaliação final. ....	44
Figura 14 - Equipamento de análise da superfície do tarso das placas cerâmicas. ....	46
Figura 15 - Superfície do tarso do porcelanato. ....	46
Figura 16 - Superfície do tarso da placa cerâmica semi-porosa – BIIb. ....	47
Figura 17 - Superfície do tarso da placa cerâmica porosa – BIII. ....	47
Figura 18 - Caracterização dos materiais utilizados na formulação das argamassas. ....	49
Figura 19 - Curva de Hidratação de determinação do tempo de pega do CII F 40. ....	50
Figura 20 - Curva granulométrica Areia AJ. ....	51
Figura 21 - Espectrometria de raios X do Aditivo PVAc - VINNAPAS 5044N. ....	52
Figura 22 - Espectrometria de raios X do aditivo retentor de água (Tylose MH 60004 P6). ....	53
Figura 23 - Espectrometria de raios X do aditivo acelerador de resistência - Formiato de Cálcio. ....	53
Figura 24 - Modificadores de superfície, placas cerâmicas e argamassas verificadas na avaliação final. ....	55
Figura 25 - Equipamento de análise de forma de gota, Goniômetro Krüss, modelo DSA100: momento do carregamento da seringa com água deionizada .....	55

Figura 26 - Corpo de prova posicionado sob a agulha. Na lateral esquerda observa-se a câmara e na lateral direita a fonte de luz para obtenção das imagens. ....	56
Figura 27 - Software DSA1: cálculo do ângulo de contato. Na imagem, observa-se à esquerda a janela com as imagens obtidas pela câmara, à direita a imagem com os resultados de ângulo de contato calculados pelo software e abaixo a janela de controle da seringa, na qual se realiza o carregamento e também a deposição de gotas à amostra.....	56
Figura 28 - Gabarito em madeira para fixação da espessura de aplicação das argamassas. .	57
Figura 29 - a) Realização das medidas e cortes para colagem das pastilhas. b) Placas cerâmicas com pastilhas devidamente coladas para o ensaio de resistência de aderência à tração. ....	58
Figura 30 - a) dinamômetro de pressão da marca PosiTest, modelo AT-M Manual. b) Display de leitura dos resultados.....	59
Figura 31 - Equipamento Axio Lab 1 da Zeiss. ....	59
Figura 32 - Imagens obtidas durante o ensaio de goniometria.....	62
Figura 33 - Micrografias dos sistemas compostos pela placa cerâmica: Porcelanato (BIa). 64	
Figura 34 - Micrografias dos sistemas compostos pela placa cerâmica: Semi porosa (BIIB). ....	65
Figura 35 - Micrografias dos sistemas compostos pela placa cerâmica: Porosa (BIII). ....	66
Figura 36 – Gráfico: resistências de aderência à tração, em função do tipo de placa cerâmica, tratamento e argamassa colante. ....	68
Figura 37 – Imprimação da camada de regularização .....	78
Figura 38 – Abertura dos cordões de argamassa colante .....	78
Figura 39 – Aplicação da argamassa no tardo da placa cerâmica.....	78
Figura 40 – Colocação da placa cerâmica fora da posição e assentamento.....	79
Figura 41 – Arraste da placa para a posição final e aplicação de golpes de martelo de borracha.....	79
Figura 42 – Verificação do amassamento dos cordões e do preenchimento do tardo da placa cerâmica.....	79

## SUMÁRIO

---

AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO.....	v
ABSTRACT .....	vi
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
1. INTRODUÇÃO .....	13
1.1. Objetivo.....	15
2. SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO.....	17
2.1. Camada de regularização.....	17
2.2. Camada de fixação .....	18
2.3. Placas cerâmicas.....	21
2.3.1. Absorção de Água .....	21
2.3.2. Expansão por umidade .....	21
2.3.3. Gretamento .....	23
3. MECANISMOS DE ADERÊNCIA.....	25
3.1. Aderência Mecânica.....	26
3.2. Extensão de Aderência.....	29
3.3. Molhagem de Superfícies.....	30
3.4. Aderência Química.....	35
4. ANÁLISE EXPLORATÓRIA .....	37
4.1. Materiais.....	38
4.2. Métodos.....	39
4.2.1. Ângulo de contato aparente.....	39
4.2.2. Resistência de aderência à tração .....	40
4.3. Análise e discussão dos resultados.....	41
5. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	44
5.1. Materiais.....	45
5.1.1. Placas cerâmicas.....	45
5.1.2. Modificadores de superfície .....	47
5.1.3. Argamassas colantes .....	48
5.2. Métodos.....	54
5.2.1. Ângulo de contato aparente;.....	55
5.2.2. Resistência de aderência à tração (NBR 14081-4/2012);.....	56
5.2.3. Microscopia óptica .....	59
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	60

6.1.	Ângulo de Contato .....	60
6.2.	Microscopia óptica .....	63
6.3.	Resistência de Aderência à Tração.....	67
7.	RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS .....	73
7.1.	Fabricação .....	73
7.2.	Execução .....	73
7.2.1.	Normas técnicas de assentamento de placas cerâmicas .....	74
7.2.2.	Escolha da placa cerâmica.....	74
7.2.3.	Escolha da argamassa colante: .....	75
7.2.4.	Limpeza da base e das placas: .....	76
7.2.5.	Verificação das condições da camada de regularização (emboço ou contrapiso) 76	
7.2.6.	Preparo da argamassa colante: .....	77
7.2.7.	Assentamento das placas cerâmicas: .....	77
8.	CONCLUSÕES.....	80
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

## 1. INTRODUÇÃO

---

O Brasil é um país de ampla tradição na fabricação e utilização de placas cerâmicas para revestimentos, hoje o país é um dos principais protagonistas no mercado mundial de revestimentos cerâmicos. De acordo com dados da ANFACER (2019), no ano de 2016, foram produzidos 792 milhões de metros quadrados de revestimentos cerâmicos na indústria nacional. As vendas totais atingiram 800,3 milhões de metros quadrados, dos quais 706 milhões de metros quadrados foram vendidos no mercado interno e 94,3 milhões de metros quadrados exportados.

As aplicações do material vão desde ambientes internos residenciais, comerciais e industriais, a fachadas de edifícios. A disseminação do seu uso pode ser explicada por uma série de características. Medeiros e Sabbatini (1999) destacam a maior durabilidade, a valorização estética, a facilidade de limpeza, a possibilidade de composição harmônica, a maior resistência à penetração de água, o conforto térmico e acústico da fachada e a valorização econômica do empreendimento, como as principais vantagens do uso de revestimentos cerâmicos em fachadas.

Apesar das vantagens mencionadas, pode-se observar uma série de manifestações patológicas nos sistemas de revestimentos cerâmicos aderidos em fachadas. Dentre as principais, Bauer *et al.* (2012) destacam o descolamento das placas cerâmicas; falhas de rejunte entre as peças permitindo o acesso de água da chuva internamente; fissuração no revestimento; eflorescência ocasionando manchas formadas pela deposição de sais oriundos da alvenaria ou do próprio revestimento; falhas de vedação causadas pela danificação de juntas por onde ocorre penetração de água de chuva.

Considerando as manifestações patológicas apontadas acima, a maior preocupação se dá ao deslocamento cerâmico, que além de ser mais frequente do que os demais, Bauer *et al.* (2012), Galletto e Andrello (2013), Mansur *et al.* (2006)) ressaltam que esta manifestação patológica coloca em risco a segurança de moradores e transeuntes, representando riscos de morte e à integridade física. Os aspectos estéticos também geram preocupação, uma vez que implicam na sensação de insegurança do usuário e na desvalorização do imóvel.

Galletto e Andrello (2013) relacionam o problema do deslocamento cerâmico ao descuido da mão de obra no preparo da argamassa colante, utilização após excedido o

tempo em aberto, pressão inadequada no assentamento das placas cerâmicas, infiltração de água, contaminação do tardo e inexistência ou deterioração das juntas de dilatação.

Mansur *et al.* (2006) analisaram uma coletânea de dados obtidos em 44 avaliações de manifestações patológicas em revestimentos cerâmicos de fachada, em edifícios localizados em cidades brasileiras de Belo Horizonte, Fortaleza, Brasília, São Paulo e Recife, durante o período de 1998 a 2003. Os resultados mostraram que o destacamento de cerâmicas ocorreu em 95% dos edifícios e indicaram que em 81% dos casos foi observado que o destacamento das placas ocorreu na interface placa cerâmica/argamassa colante. Este resultado pode ser explicado pelo fato de que esta interface é a região do sistema de revestimento mais solicitada por esforços de cisalhamento, onde são considerados efeitos térmicos e de expansão higroscópica das placas cerâmicas, conforme identificado por Abreu *et al.* (2004) e Saraiva *et al.* (2001).

Wu (1982) define a resistência de aderência como a capacidade de dois materiais se manterem unidos por contato interfacial, por meio da transferência das forças mecânicas ou deformações pela interface. Desta forma, a aderência não é uma propriedade intrínseca da argamassa, pois ela depende também das características da base, em que os mecanismos que promovem esta aderência podem ser divididos basicamente por mecanismos termodinâmicos, ligação química e intertravamento mecânico. Apesar de haver diversas pesquisas sobre o tema, há divergências de opiniões entre autores em relação à parcela de contribuição e influência destes mecanismos ao desempenho dos sistemas placas cerâmicas/ matrizes cimentícias.

Para Carasek *et al.* (2001), a aderência da argamassa endurecida à placa cerâmica é um fenômeno essencialmente mecânico, que ocorre basicamente devido à penetração da pasta de aglomerante ou da própria argamassa nos poros ou entre as rugosidades da base. No estudo conduzido por Carvalho Jr (2005), em que foi avaliada a penetração da pasta de cimento a blocos cerâmicos e sua correlação aos ensaios de resistência de aderência à tração, observou-se que de maneira geral, os melhores resultados puderam ser associados com a maior concentração relativa do cálcio nos primeiros 500µm de profundidade a partir da interface argamassa/base.

Em contrapartida, para Costa (2014) a aderência é de natureza predominantemente química, resultante das forças de atração moleculares entre as fases. Estas ligações podem ser de ordem primária: iônicas, covalentes, metálicas e/ou secundárias, que são as forças intermoleculares, conhecidas também como forças de Van Der Waals. A

autora aponta que a aderência depende de parâmetros mais complexos que a simples absorção do substrato, e conseqüentemente ancoragem mecânica pela penetração de partículas nos poros, relacionando o aumento aderência ao acréscimo de contato matriz-substrato.

Mansur (2007) e Costa (2014) analisaram sistemas compostos por substratos cerâmicos e modificadores de superfície do substrato, introduzidas por organossilanos. As autoras constataram que este tipo de tratamento promoveu a melhoria da aderência na interface, pela possibilidade de interações hidrofóbicas e covalentes somando se às interações já existentes de Van der Waals e ligações de hidrogênio. Mansur (2007) também avaliou que a introdução de polímeros na argamassa colante alterou as propriedades reológicas da argamassa implicando em modificação da microestrutura interfacial, quando comparada com a argamassa de referência. Na formação da interface, para as argamassas aditivadas com polímeros, além de interações de Van der Waals, Mansur (2007) observou também interações através de ligações de hidrogênio.

Assim, verifica-se a importância do estudo da interface placa cerâmica/argamassa colante, uma vez que está diretamente ligada ao desempenho da resistência de aderência de sistemas compostos por substratos cerâmicos e matrizes cimentícias. Neste contexto, este estudo visa analisar a contribuição dos mecanismos de aderência química e mecânica, à resistência de aderência à tração entre placas cerâmicas e argamassas colantes, por meio da análise da influência do tipo de tratamento superficial, da absorção de água da placa cerâmica, do tipo de argamassa colante e da rugosidade superficial da placa cerâmica.

### **1.1. Objetivo**

---

O objetivo geral deste estudo é avaliar a influência da aplicação de tratamento superficial à base de silano e de siliconato no tardo de placas cerâmicas na resistência de aderência à tração da interface placa cerâmica/argamassa colante.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar a influência dos tipos de argamassa colante, bem como a modificação destas em relação ao teor de ligantes e aditivos, na resistência de aderência à tração, quando aplicadas em placas cerâmicas de diferentes classes de absorção e tratamentos superficiais.

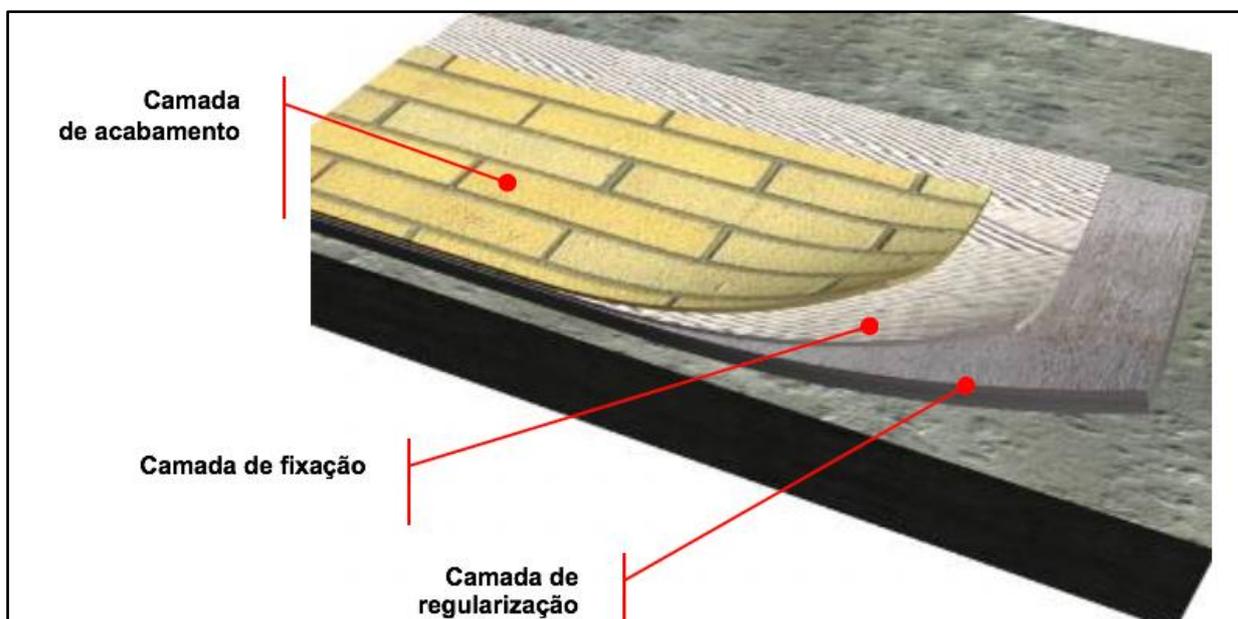
- Avaliar a influência da classe de absorção, porosidade e rugosidade da placa cerâmica, à resistência de aderência à tração na interface placa cerâmica/argamassa colante.

## 2. SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO

---

Segundo Medeiros (1999), revestimento cerâmico de edifícios, é um conjunto de camadas que se sobrepõem formando uma unidade. Estas camadas, incluindo o emboço, são aderidas à alvenaria ou estrutura, base do edifício, onde a última camada é composta por placas cerâmicas assentadas e rejuntadas com material adesivo (argamassa colante). Assim, nota-se que o revestimento cerâmico é composto por três camadas (regularização, fixação e de acabamento) aderidas a uma base (Figura 1). Segundo Ribeiro (2006), por estas camadas serem constituídas por diferentes materiais, possuem também diferentes comportamentos frente às várias ações às quais estarão sujeitas ao longo de sua vida útil, deformando-se mais ou menos em função de suas propriedades e das condições de restrição de seus movimentos. Desta forma, torna-se importante descrever, mesmo que de forma sucinta, as características das camadas que compõem o revestimento cerâmico.

**Figura 1 – Partes constituintes do sistema de revestimento cerâmico aderido (JUNGINGER, 2013).**



### 2.1. Camada de regularização

---

É a camada de argamassa que recobre toda a parte de vedação horizontal ou vertical, desempenhando um papel importante no revestimento cerâmico. Para Medeiros (1999),

esta camada contribui para a regularização e dissipação das tensões da base ao revestimento cerâmico.

## **2.2. Camada de fixação**

---

É a camada responsável por unir e manter fixas as placas cerâmicas à camada de regularização, resistindo às tensões de tração e cisalhamento que ocorrem em ambas as interfaces: camada de regularização-camada de fixação e camada de fixação-placa cerâmica a que todo conjunto está submetido; além disso, deve apresentar capacidade de absorver deformações (Matsusato, 2007).

Portanto, para desempenhar estas funções, a camada de fixação deve apresentar resistência de aderência em ambas as interfaces, camada regularização e placa cerâmica, de modo a resistir às solicitações e aos esforços. Entre os materiais empregados para esta finalidade, encontram-se as argamassas tradicionais de cimento e areia, as argamassas colantes industrializadas e os adesivos propriamente ditos.

Em função da necessidade de pequena espessura desta camada, da necessidade de aderência, de flexibilidade, de maior produtividade e de custo competitivo, a técnica mais empregada na fixação de placas cerâmicas é a utilização de argamassa colante industrializada. As argamassas colantes podem ser definidas segundo a ABNT NBR 14081-1 (ABNT, 2012) como sendo “*produto industrial, no estado seco, composto de cimento Portland, agregados minerais e aditivos químicos que, quando misturado com água, forma uma massa viscosa, plástica e aderente, empregada no assentamento de placas cerâmicas para revestimento*”. Ainda conforme a ABNT NBR 14081-1 (ABNT, 2012), as argamassas colantes, em função da resistência de aderência e do tempo em aberto, podem ser classificadas em ACI, ACII e ACIII (Tabela 1), sendo que a especificação de cada um destes tipos de argamassa ocorre em função do local de aplicação do revestimento e das tensões a que este está submetido (Tabela 2).

**Tabela 1- Requisitos para argamassa colante - Adaptada da ABNT NBR 14081-1 (ABNT, 2012).**

Requisito	Método de Ensaio	Unidade	Critério			
			ACI	ACII	ACIII	
Tempo em aberto	NBR 14081-3	Min	≥ 15	≥ 20	≥ 20	
Resistência de aderência à tração aos 28 dias, em função do tipo de cura	Normal	NBR 14081-4	MPa	≥ 0,5	≥ 0,5	≥ 1,0
	Submersa			≥ 0,5	≥ 0,5	≥ 1,0
	Estufa			-	≥ 0,5	≥ 1,0

**Tabela 2 – Recomendações de utilização de Argamassa Colante (Adaptada da ABNT NBR 14081-1 - ABNT, 2012).**

Tipo	Descrição
ACI	Características de resistência para atender às solicitações mecânicas e termo-higrométricas, típicas de revestimentos internos, exceto: saunas, churrasqueiras, estufas e outros revestimentos especiais.
ACII	Características de resistência que permitem absorver os esforços existentes em revestimentos de pisos e paredes externas decorrentes de ciclos de flutuação térmica e higrométrica, da ação de chuva e/ou vento, da ação de cargas como as decorrentes do movimento de pedestres em áreas públicas e de máquinas e equipamentos leves sobre rodízios não metálicos.
ACIII	Resiste a altas tensões de cisalhamento nas interfaces substrato/adesivo e placa/adesivo, juntamente com uma aderência superior entre as interfaces quando comparada com AC I e AC II; especialmente indicada para uso em saunas, piscinas, estufas e ambientes similares.
Tipo E	Argamassa colante industrializada dos tipos I, II e III, com tempo em aberto estendido.

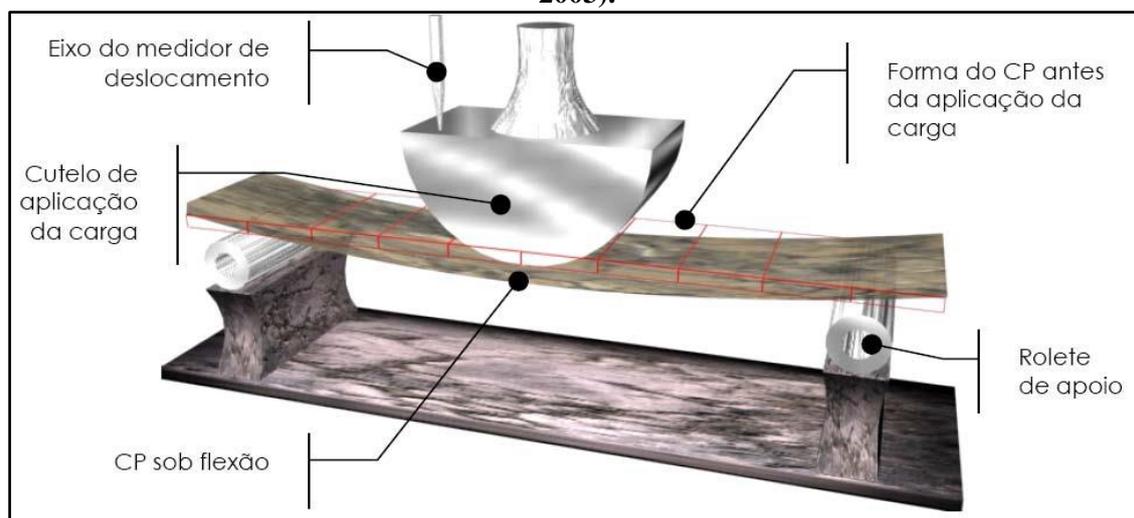
Entretanto, esta classificação não abrange a capacidade de absorver deformações da argamassa colante, ou seja, a sua deformação transversal (flexibilidade). Além da resistência de aderência, Urban e Takamura (2005), ressaltam que é de fundamental importância que as argamassas colantes tenham suficiente deformabilidade e um certo grau de plasticidade.

Somente desta forma podem ser garantidas a durabilidade e a funcionalidade do sistema de revestimento cerâmico ao longo do tempo. Para Matsusato (2006), a importância da capacidade de deformação de argamassas de fixação, de rejuntas e dos materiais utilizados nas juntas de movimentação/controlado reside na dissipação das tensões originadas no substrato, evitando que estas se propaguem até as camadas exteriores do revestimento cerâmico de fachadas. Estes mesmos motivos são apontados por McLarem *apud* Campante (2001) para propor o incremento ao uso de materiais poliméricos flexíveis como argamassas colantes modificadas com látex, em fachadas externas.

Em vista disto, a norma ISO 13007-1 (ISO, 2010), especifica dois tipos de argamassa colante: a argamassa colante S1 e a S2. A argamassa colante S1 é considerada como deformável (flexível), com capacidade de suportar um deslocamento mínimo de 2,5mm e máximo de 5mm. A argamassa S2 é considerada como altamente deformável (flexível), uma vez que é capaz de suportar deslocamentos superiores a 5mm. Valores inferiores a 2,5mm não possuem classificação segundo este quesito.

Esta classificação é obtida por meio da realização do ensaio especificado pela ISO 13007-2 (ISO, 2015) ou pela norma europeia EN 12002 (EN, 2008). Este ensaio baseia-se na aplicação de uma carga central em uma película de argamassa colante dimensões iguais a (280x45x3)mm biapoiada, conforme apresentado na Figura 2.

**Figura 2 – Ilustração do ensaio de flexibilidade da EN 12002 (Adaptado de Junginger, 2003).**



Portanto, a seleção da argamassa colante em função das exigências de desempenho deve ser feita sob o ponto de vista técnico, levando-se em conta as características da base, da placa cerâmica e das condições de utilização (Akizawa, Medeiros e Sabbatini, 1997). Para Medeiros (1999), o meio ambiente e as condições de exposição às quais os revestimentos cerâmicos estão submetidos são fatores que sempre devem ser considerados para seleção do material de assentamento ou fixação. Este autor afirma ainda que os aspectos funcionais dos revestimentos determinam também a escolha do material de fixação e o emprego deste de forma incompatível com as condições de uso podem trazer problemas de durabilidade e altos custos de manutenção e recuperação.

### 2.3. Placas cerâmicas

As placas cerâmicas são componentes cujas dimensões (comprimento e largura) predominam sobre uma terceira (espessura), produzidas a partir de argilas e/ou outras matérias primas inorgânicas, conformadas através de extrusão (tipo A) ou prensagem (tipo B), sinterizadas por meio de processo térmico, e utilizadas como componente principal da camada mais externa de revestimentos cerâmicos (Medeiros, 1999). As placas cerâmicas apresentam diversas características físicas, químicas e mecânicas. Para a utilização em revestimento de fachada, deve-se analisar, principalmente, as seguintes propriedades: a absorção de água, a expansão por umidade, a resistência ao gretamento, a dilatação térmica e a resistência ao manchamento.

#### 2.3.1. Absorção de Água

A absorção de água é a quantidade de água que uma placa cerâmica pode absorver. Portanto, é uma propriedade que está diretamente relacionada à porosidade do material. A ABNT NBR 13818 (ABNT, 1997) agrupa as placas cerâmicas em diversos tipos de classes de absorção de água, conforme apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3 – Grupo de absorção de água de placa cerâmica - adaptado da ABNT NBR 13818 (ABNT, 1997).**

Denominação	Grupo	Absorção de Água (%)
Porcelanato	Ia	$0 < \text{Abs} \leq 0,5$
Grês	Ib	$0,5 < \text{Abs} \leq 3,0$
Semi-Grês	IIa	$3,0 < \text{Abs} \leq 6,0$
Semi-Poroso	IIb	$6,0 < \text{Abs} \leq 10,0$
Poroso	III	$\text{Abs} > 10,0$

#### 2.3.2. Expansão por umidade

A expansão por umidade (EPU) é uma propriedade apresentada por materiais cerâmicos. A EPU é o termo geralmente utilizado para designar o aumento das dimensões dos materiais cerâmicos ocasionado pela adsorção de água, notadamente em tijolos, telhas e revestimentos cerâmicos. Logo após a queima e durante o seu resfriamento os materiais cerâmicos adsorvem vapor de água da atmosfera. Esse se difunde pelo corpo cerâmico e adsorve nas superfícies dos

poros dentro da peça, provocando uma expansão irreversível (Menezes *et al.* 2006). O processo de aumento dimensional dos materiais cerâmicos inicia-se durante o resfriamento do material no próprio forno de queima e continua ao longo da sua estocagem e utilização, variando com as características físicas e de processamento dos materiais (matérias-primas, ciclo e temperatura de queima).

Para Fiorito (1994), a ordem de grandeza desta expansão é de 0,3 a 0,7 mm/m, podendo apresentar valores bem maiores ou até bem menores. Para este autor, parte desta expansão, no máximo 10%, ocorre antes da instalação das placas cerâmicas, mas esta magnitude varia muito com o tempo. A expansão remanescente, portanto, ocorrerá com o revestimento já aderido. Assim, o aumento das dimensões das placas cerâmicas, qualquer que seja seu valor, implica em compressão gradativa e indesejável no revestimento, pois a argamassa de fixação e o substrato tendem a impedir a expansão, originando tensões no revestimento. Desta forma, nota-se a importância da definição de um valor de EPU máxima, para que o projetista possa calcular as tensões provenientes desta expansão e, conseqüentemente, dimensionar e especificar as dimensões das juntas de assentamento, a resistência mecânica e o módulo de elasticidade do rejunte e da argamassa colante necessário para absorver estas tensões, evitando problemas de acúmulo de tensões.

O método especificado pela ABNT NBR 13818 (ABNT, 1997) para placas de revestimento cerâmico no Brasil é pelo método da fervura. A ABNT NBR 13818 (ABNT, 1997), determina o valor da EPU da placa cerâmica secando em uma estufa a 110°C os corpos de prova durante 24 horas, posterior requeima em mufla à 550°C durante 2 horas, posterior determinação do comprimento ( $L_0$ ), posterior colocação dos corpos de prova em água fervendo por 24 horas e posterior determinação do comprimento do corpo de prova ( $L_1$ ). A EPU será obtida por meio da diferença entre as medidas de comprimento do corpo de prova após a fervura ( $L_1$ ) e o comprimento após a requeima ( $L_0$ ) dividido pelo comprimento após a requeima ( $L_0$ ).

Segundo Bowman (2002), existem placas que não causam problemas quando em serviço mesmo tendo EPU superior a 0,6mm/m e é por esse motivo que algumas normas sugerem valores inferiores a esse e não o impõe como valor taxativo. Para a EPU determinada conforme descrito no parágrafo anterior, a

norma brasileira de placas cerâmicas, a ABNT NBR 13818 (ABNT, 1997), e a ISO 10545: Part 10 (ISO, 2014), embora não citem limites máximos para a EPU, enfatizam que “A maioria das placas esmaltadas e não esmaltadas tem expansão por umidade desprezível e que não contribui para problemas no revestimento quando estão corretamente fixadas. Com práticas de fixação não satisfatórias ou em certas condições climáticas, expansão por umidade em excesso ( $> 0,6\text{mm/m}$ ) pode contribuir para problemas”. A norma de especificação americana ANSI A 137 (ANSI, 2017), a norma britânica BS 5385-2 (BSI, 2015) não fazem qualquer referência sobre a EPU, enquanto que as normas espanholas especificam apenas para alguns grupos de absorção e para cerâmicas não esmaltadas o valor máximo de  $0,6\text{ mm/m}$ .

Goldberg (2010) ressalta que, embora a EPU possa realmente contribuir para o surgimento de falhas devidas à movimentação diferencial, existem outros fatores envolvidos e que têm influência muito mais acentuada. Bowman (1997) cita que, dos mais de 100 casos de deslocamento de azulejos estudados, apenas 10% deles apresentaram EPU significativa.

Em resumo, a EPU é uma propriedade das placas cerâmicas, assim como a dilatação térmica, absorção de água etc. Então, de posse destes dados, cabe ao projetista do revestimento transformá-los em informações adequadas para a produção de um revestimento de longa vida útil.

### 2.3.3. Gretamento

É uma característica exigível nas placas cerâmicas esmaltadas. O fenômeno de gretamento se produz no esmalte. Uma propriedade essencial do esmalte é conferir ao revestimento cerâmico uma total impermeabilidade superficial. Qualquer transgressão desta característica deverá ser considerada como um defeito, a menos que declare como objetivo estético um efeito craquele em imitação a cerâmica antiga.

O fenômeno do gretamento é consequência do desacordo dilatométrico entre a massa e o esmalte que o reveste, ou entre os vários esmaltes que compõem uma decoração superficial. O esmalte é um líquido com uma viscosidade elevada a temperatura ambiente, que está aderido através de uma interface altamente vítrea, a um corpo cerâmico - suporte - em que fases amorfas, vítreas e

cristalinas estão presentes. Assim, ambos, corpo e substrato, por sua composição e estrutura, podem ou não ter coeficientes de dilatação térmica linear compatível. No caso em que são diferentes, na fase de resfriamento, o esmalte interagindo com o suporte entrará em tensão ou compressão, dependendo do caso. O coeficiente de dilatação térmica do esmalte deve ser menor do que o coeficiente da massa, submetendo então o esmalte a uma compressão já durante a fase de resfriamento no forno. Se ocorrer tensão no esmalte a temperatura ambiente ocorrerá gretamento (Medeiros, 1999).

O gretamento pode ser subdividido em gretamento imediato e gretamento retardado. O gretamento imediato surge quando o vidro a temperatura ambiente é tracionado pelo suporte. O gretamento retardado ocorre quando a dilatação sofrida pelo suporte devido à umidade absorvida (expansão por umidade) e/ou retração do cimento, transforma o esforço de compressão a que estava inicialmente submetido o vidro em um esforço de tração (Campante, 2001).

A norma ABNT NBR 13818:1997 Anexo F normaliza o método de ensaio para a resistência ao gretamento, submetendo os corpos de prova a elevada pressão em autoclave e examinando a superfície esmaltada antes e depois, através da aplicação de uma solução de azul de metileno diluído a 1%. O gretamento pode se apresentar de diferentes formas. A maioria das vezes apresenta-se na forma de pequenas fissuras visíveis com azul de metileno. Outras vezes permanece oculto na interface suporte esmalte sem chegar à superfície.

A manifestação do defeito pode ocorrer imediatamente após a saída do forno ou produzirem-se vários anos depois de instalado o produto. Em algumas situações, o gretamento superficial se produz como consequência da tensão que atua sobre a peça devido ao assentamento. Este tipo de patologia não é frequente, mas já ocorreu em revestimentos que suportaram perfeitamente o ensaio. O fabricante deve declarar os casos dos produtos que tem efeitos decorativos com tendência ao gretamento ou aqueles em que o gretamento é um efeito produzido intencionalmente.

### 3. MECANISMOS DE ADERÊNCIA

---

A ABNT NBR 13528 (ABNT, 2010) define aderência como a capacidade do revestimento de resistir às tensões normais e tangenciais atuantes na interface com o substrato. A mesma norma cita que a aderência não é uma propriedade da argamassa, mas a interação entre as camadas constituintes do sistema de revestimento. Sendo assim, a aderência se define como a propriedade que possibilita ao revestimento, por meio da interface argamassa-substrato, absorver e resistir a esforços normais e tangenciais. Em outras palavras, representa a capacidade do revestimento em manter-se estável, com ausência de fissuração e fixo ao substrato. É praticamente definida pela conjunção de três propriedades intrínsecas da interface argamassa-substrato: as resistências de aderência à tração, ao cisalhamento e a extensão do contato entre a argamassa e o substrato poroso (Carasek, 1996).

Ao se analisar o mecanismo de aderência entre as superfícies das argamassas e dos substratos porosos, é importante observar que este mecanismo se desenvolve em duas etapas distintas, consecutivas e intrinsecamente correlacionadas. A primeira é a adesão inicial que ocorre no estado fresco, no momento em que a argamassa no estado plástico entra em contato com o substrato poroso. A segunda, que se processa ao longo do intervalo de tempo em que se desenvolvem as reações de hidratação das partículas dos aglomerantes, ou seja, com o endurecimento da argamassa, é definida como aderência propriamente dita (Selmo, 2007).

Bauer (2005) descreve que as tentativas de explicação da aderência entre materiais distintos passam pelo entendimento do que acontece na superfície de cada um, bem como na interface surgida com a união das mesmas. E aponta que qualquer processo de aderência é um fenômeno complexo, e pode ser formado principalmente pela interação entre os seguintes mecanismos:

- **Intertravamento mecânico:** a penetração do adesivo nas irregularidades do substrato é a principal força atuante na aderência, tendo a rugosidade da base aderente como um fator preponderante para a majoração da aderência. Esta teoria tem uma escala de ação microscópica.
- **Difusão de moléculas:** controla o transporte de massa entre sólidos e líquidos e representa um movimento de átomos, íons, ou moléculas como resultado

da diferença de concentração existente. Em uma interface podem ocorrer vários tipos de processos difusivos; a resistência de aderência também será dependente da natureza das ligações interatômicas resultantes desse processo físico-químico, Hull & Clyne (1996) *apud* Bauer (2005). Esta teoria tem uma escala de ação molecular.

- Teoria eletrônica: a aderência ocorre pela transferência de elétrons entre a argamassa e o substrato formando uma camada dupla de carga elétrica na interface. Trata-se de uma teoria de ação macroscópica.
- Adsorção de partículas: onde as mesmas podem aderir devido às forças interatômicas e intermoleculares que são estabelecidas nas superfícies dos adesivos e substratos após a molhagem do substrato pela a argamassa. Esta teoria, de escala de ação molecular, engloba os conceitos de reologia, molhamento e energia de superfície.

### **3.1. Aderência Mecânica**

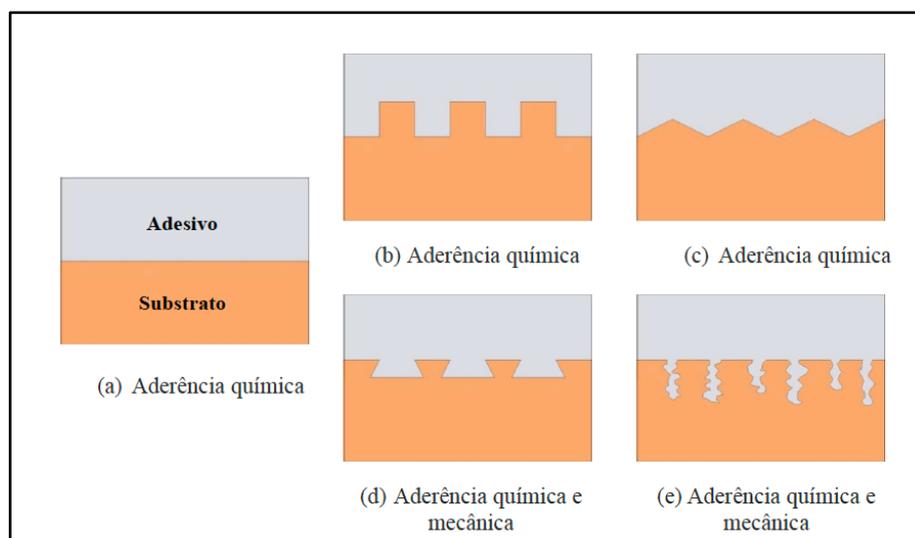
---

De acordo com Antunes (2005), as resistências mecânicas são o resultado conjunto de penetração nos poros, das ligações de superfície e da resistência mecânica da própria argamassa. Assim, a formação da aderência é um mecanismo complexo que envolve a estrutura física da superfície do substrato, da capacidade de molhamento do produto aplicado sobre o substrato, do transporte de massa (sólidos e líquidos) na argamassa e na sua interface com o substrato que, juntamente com a hidratação do cimento, influenciam na cinética do endurecimento.

A estrutura física do substrato, conforme Recum *et al.* (1996) é definida por sua topografia que é dividida entre rugosidade e textura. A rugosidade inclui os picos e vales, enquanto a textura é qualquer configuração da morfologia da superfície com dimensões e distribuições definidas. A Figura 3 apresenta um esquema comparativo da aderência argamassa/substrato de uma superfície lisa e de superfícies com diferentes rugosidades e texturas. Por esta figura, nota-se que o modelo de intertravamento mecânico não pode ser considerado universal porque, segundo Costa (2014), não considera os fatores que ocorrem em nível molecular na interface argamassa/substrato, que deve explicar a aderência essencialmente química na superfície perfeitamente lisa. Nos demais casos, o aumento da aderência será também em função ao acréscimo da

área de contato interfacial. Desta forma, nota-se que a topografia da superfície do substrato pode influenciar no contato argamassa/substrato.

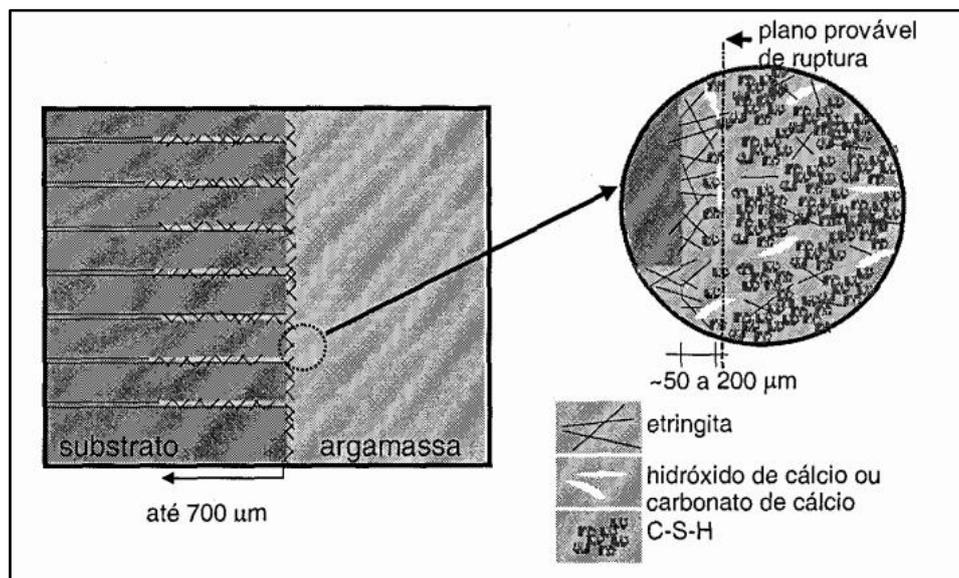
**Figura 3 – Representação esquemática dos mecanismos de aderência argamassa-substrato (COSTA, 2014).**



Para os casos de aderência de argamassas cimentícias e superfícies rugosas, Carasek *et al.* (2001) descrevem como sendo um processo no qual parte da água de amassamento da argamassa, contendo os componentes de hidratação dos aglomerantes em dissolução ou no estado coloidal, penetra pelos poros e cavidades da superfície absorvente do substrato/cerâmica. No interior destes poros ocorrem fenômenos de precipitação dos produtos de hidratação dos aglomerantes e após o tempo de cura, os precipitados intracapilares exercem ação de ancoragem da argamassa à base/cerâmica.

Carasek *et al.* (2001) confirmaram que o componente de hidratação do cimento que aparece em maior concentração nos poros é a etringita (trissulfoaluminato de cálcio hidratado). Este componente se forma durante a hidratação do cimento, na qual a gipsita em contato com a água solubiliza-se e libera íons sulfato e cálcio. Devido ao efeito de sucção ou absorção capilar causado pela base porosa, tais íons em solução são transportados para regiões mais internas do substrato formando no interior dos poros a etringita. Com menos espaço para precipitação, outros produtos de hidratação do cimento, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), são encontrados em menor quantidade. A Figura 4 exemplifica a formação da etringita na interface de ligação das fases.

**Figura 4- Representação esquemática do mecanismo de aderência entre argamassas de cimento e blocos cerâmicos, (CARASEK *et al.* 2001).**



A interação da argamassa/substrato é descrita por Carasek *et al.* (2001) pela teoria dos poros ativos, conforme modelo proposto por Détriché (1985) e Dupin *et al.* (1988). Este modelo considera o fluxo de água entre a argamassa e o substrato como a interação de dois sistemas de poros. O sistema de poros do substrato é modelado através de um conjunto de tubos cilíndricos paralelos independentes, abertos, perpendiculares à superfície da argamassa, de raios constantes ao longo do tempo e inicialmente vazio, Carasek *et al.* (2001). A argamassa fresca também é encarada como um sistema de poros, onde o raio de seus tubos vai diminuindo, à medida que progride a hidratação dos aglomerantes da argamassa. Este modelo indica que, enquanto os raios médios dos capilares da argamassa são superiores aos dos capilares do substrato, o movimento da água se efetua no sentido da argamassa para o substrato. Esta sucção é acompanhada de um aperto mecânico das partículas sólidas da argamassa pela ação da depressão dos capilares, que se traduz por uma retração quase imediata da camada de argamassa e uma aceleração da cristalização dos produtos hidratados consecutivos ao crescimento da hidratação em íons dissolvidos, Carasek *et al.* (2001).

O resultado desse mecanismo é uma diminuição do raio médio dos capilares da argamassa, até se tornar igual ao dos capilares do substrato. Quando o raio médio dos capilares da argamassa torna-se inferior ao dos capilares da base, o sentido do movimento da água é invertido, Carasek *et al.* (2001). O movimento de água e outros

líquidos nos sólidos porosos dependem do tamanho efetivo, configuração e distribuição da rede de poros, além das propriedades dos líquidos, tais como, a tensão superficial e a viscosidade. A movimentação de água argamassa-substrato se processa logo que a argamassa é colocada em contato com o substrato poroso, cujos capilares estão inicialmente vazios, Bauer (2005).

### 3.2. Extensão de Aderência

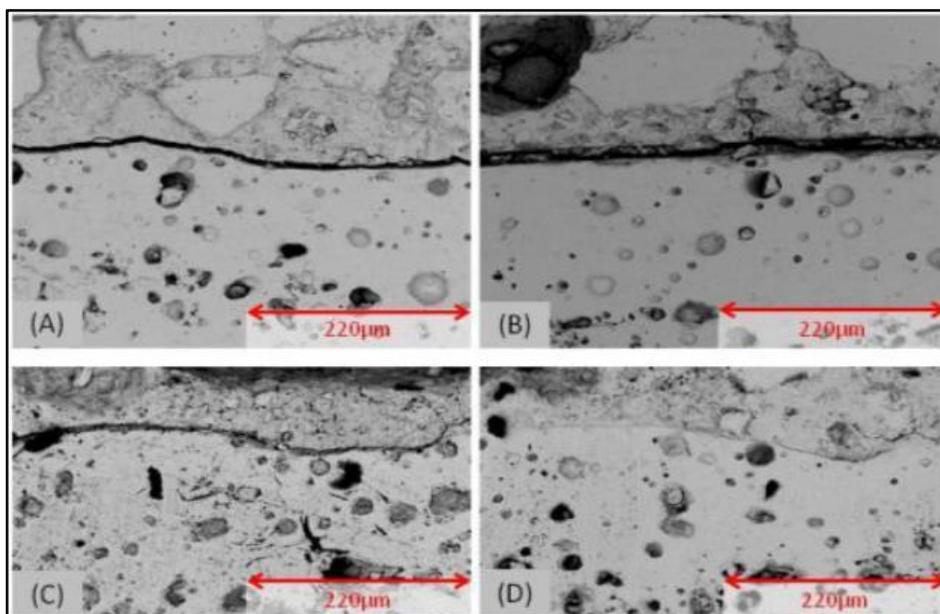
Costa (2014) afirma que o contato entre superfícies determina a intensidade das ligações na interface, na medida em que a distância aumenta, a intensidade das ligações cai rapidamente. Porém, por menor que seja a separação, esta força é reduzida significativamente, de tal forma que qualquer defeito interfacial reduz significativamente a aderência. Para que diminua a quantidade de defeitos entre a argamassa e o substrato é necessário que se tenha uma extensão de aderência adequada.

Para que se obtenha uma extensão de aderência adequada entre a argamassa e o substrato, é necessário que exista certa uniformidade de contato, a qual é conseguida através de uma boa molhagem do substrato pela argamassa e da escassez de falhas, além da utilização de uma argamassa com boa trabalhabilidade, potencializando o efeito de molhagem e consequentemente a aderência, Gonçalves (2004).

Em seu estudo sobre mecanismos de aderência entre argamassa colante e substrato não poroso Pereira *et al.* (2013), confirmam por meio experimental, que há uma relação direta entre a resistência de aderência e a extensão de contato entre argamassa-substrato. Neste estudo, observou-se que para os substratos não porosos, o contato físico na interface com a argamassa colante é governado pelas irregularidades do substrato e características reológicas da argamassa, e mantido pelas características de adesividade da argamassa.

A Figura 5, apresenta imagens obtidas no mesmo ensaio citado no parágrafo anterior, a argamassa D é a que tem maior resistência de aderência de 1,1 MPa, e também é a que possui o melhor contato com o substrato. Por outro lado, a argamassa B é a que possui a menor aderência, 0,6 MPa, e a pior extensão de contato. As argamassas A e C, apresentaram respectivamente resistência de aderência de 0,7 e 0,9 MPa.

**Figura 5 -** Imagens em microscopia eletrônica de varredura (MEV) da interface entre os pisos antigos e argamassas colantes, com aumento de 540 vezes (PEREIRA et al. 2013).



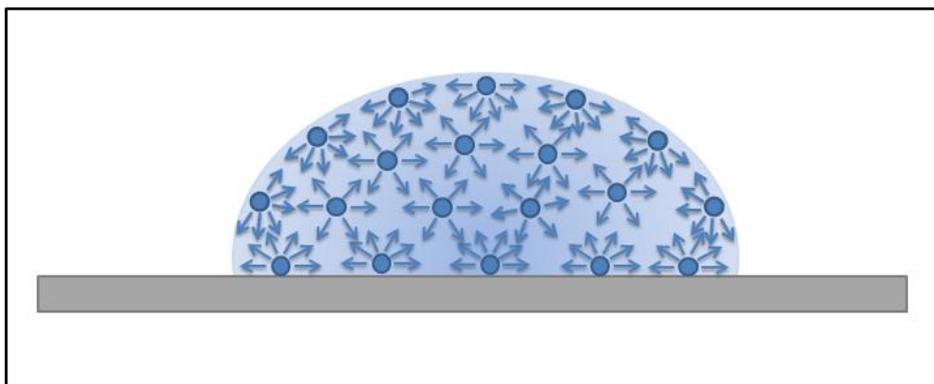
### 3.3. Molhagem de Superfícies

Conforme visto no item anterior, para obter uma extensão de aderência adequada deve-se ter uma boa molhagem do substrato pela argamassa, obtendo um bom contato molecular. Conforme Costa (2014), o processo de molhamento envolve o equilíbrio entre as fases quando estas são colocadas em contato e a cinética entre as tensões interfaciais para a criação de uma nova área interfacial.

Quando uma gota de líquido é colocada sobre uma superfície sólida plana, ela poderá espalhar-se completamente sobre toda a superfície, ou, mais provavelmente, ela permanecerá como uma gota, com certo ângulo de contato com a superfície sólida, Shaw (1975).

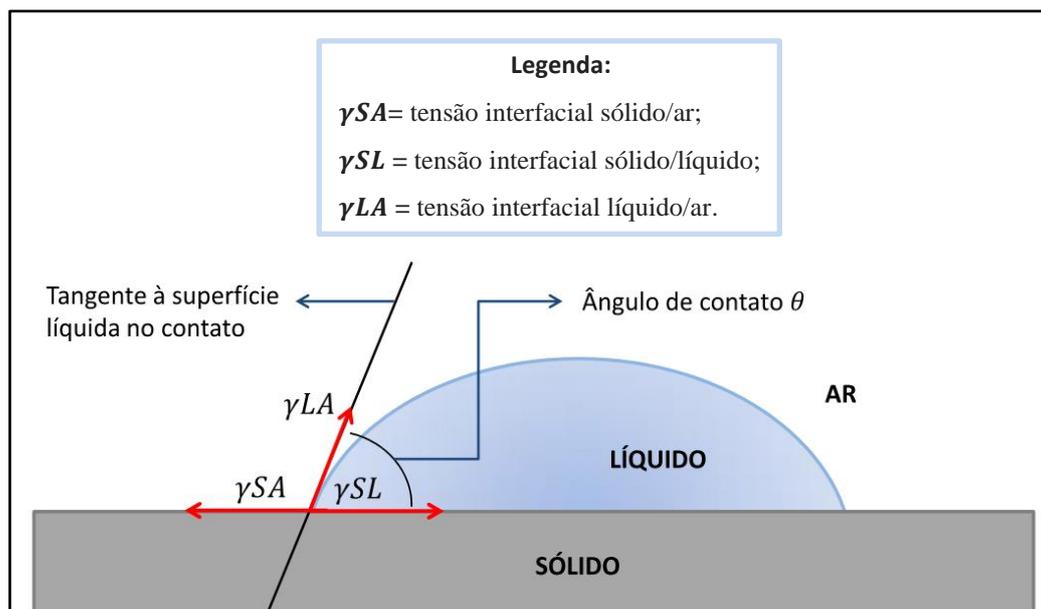
A forma de uma gota é determinada pela tensão superficial do líquido e a relação como a tensão superficial do substrato. Considerando um líquido puro, cada molécula é puxada com igual força em todas as direções pelas moléculas vizinhas, resultando numa força igual a zero. No entanto, as moléculas expostas à superfície não têm moléculas vizinhas em todas as direções para proporcionar esse equilíbrio de forças. Assim, essas moléculas são puxadas para o interior pelas moléculas internas, Figura 6, originando a criação de uma pressão interna. Como resultado, o líquido contrai a sua área de superfície para manter a menor energia livre de superfície, Lee (2013). Essa força intermolecular para contrair a superfície é chamada de tensão superficial (Figura 6).

**Figura 6 - Tensão superficial de um líquido, adaptado de (LEE, 2013).**



Conforme Lee (2013), o ângulo de contato é determinado por uma combinação de tensão superficial e forças externas, na qual o ângulo de contato é característico de um determinado sistema sólido-líquido em um ambiente específico (Figura 7).

**Figura 7 - Ângulo de contato de equilíbrio entre um líquido e uma superfície sólida, adaptado de (FERREIRA, 2013).**



Supondo que as diversas forças superficiais possam ser representadas por tensões superficiais, atuando na direção das superfícies, pode-se equacionar os componentes horizontais dessas tensões pela equação de Young-Dupré, equação 1, na qual o molhamento da superfície pode ser estimado pela relação entre o ângulo de contato e as tensões superficiais das fases sólida, líquida e vapor, Shaw (1975):

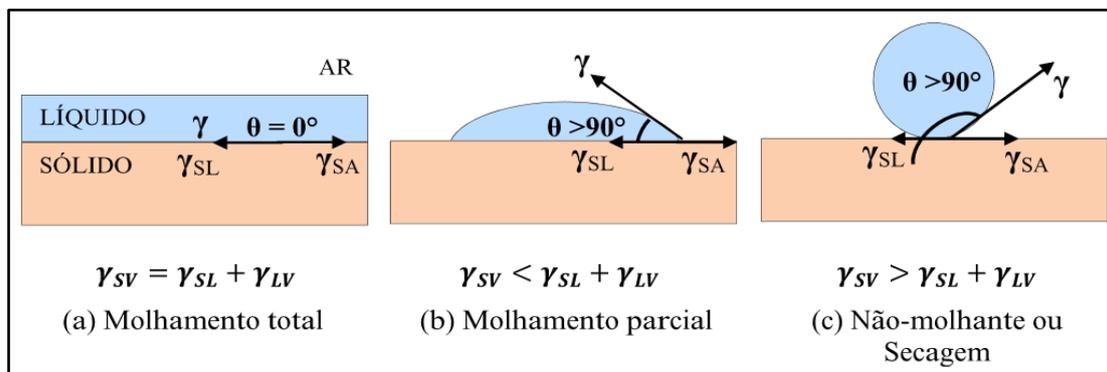
Equação 1:

$$\gamma_{SA} = \gamma_{SL} + \gamma_{LA} \cos\theta$$

Em que  $\gamma_{SA}$  é a tensão interfacial sólido/ar;  $\gamma_{SL}$  é a tensão interfacial sólido/líquido e  $\gamma_{LA}$  é a tensão interfacial líquido/ar. O ângulo de contato pode ser obtido experimentalmente por goniômetro, Costa (2014).

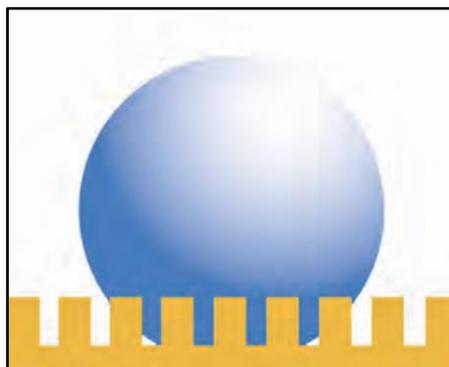
- Se o ângulo  $\theta = 0^\circ$ , o líquido molha completamente o sólido e a superfície é denominada super-hidrofílica - Figura 8(a);
- Se o ângulo  $\theta < 90^\circ$ , o líquido molha parcialmente o sólido e a superfície é denominada hidrofílica - Figura 8 (b);
- Se o ângulo aumenta, sendo  $90^\circ < \theta < 120^\circ$ , a energia da superfície diminui e o líquido não molha o sólido, a superfície é denominada hidrofóbica - Figura 8 (c).

**Figura 8 - Condições de molhamento previstas pela equação de Young-Dupré (COSTA, 2014).**



O molhamento de superfícies rugosas pode ser descrito pelo modelo de Wenzel, proposto em 1936, no qual é suposto que quando uma gota de líquido é colocada sobre uma superfície rugosa, o líquido irá preencher os espaços abertos, como mostrado na Figura 9. Este modelo prevê que a rugosidade da superfície reforça as propriedades de molhabilidade dos sólidos, seja a superfície hidrofílica ou hidrofóbica, Watson *et al.* (2011).

**Figura 9 - Representação gráfica do modelo de Wenzel, no qual o líquido preenche as cavidades do substrato, (WATSON *et al.* 2011).**



A rugosidade aumenta a área de contato sólido-líquido, portanto aumenta a energia interfacial do sistema num fator de rugosidade ( $r$ ), sendo assim o ângulo de contato aparente, pelo modelo de Wenzel pode ser representado pela equação 2, Costa (2016):

Equação 2:

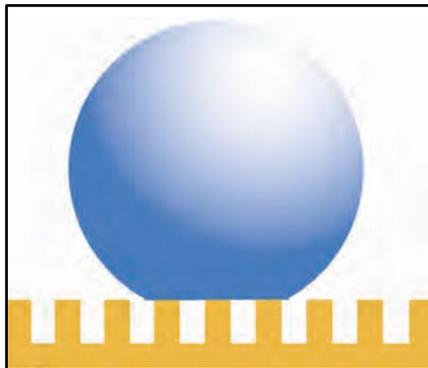
$$\cos\theta_w = r w \cos\theta$$

Na qual,  $\theta$  é o ângulo de contato real em uma superfície plana (conforme equação 1) e  $\theta_w$  é ângulo de contato aparente, conforme modelo de Wenzel.

- Quando o parâmetro é igual a 1, o Modelo de Wenzel equivale ao Modelo de Young, ou seja, descreve o ângulo de contato entre uma gota de um líquido e uma superfície lisa.
- Quando uma superfície é hidrofílica ( $\theta < 90^\circ$ ), temos que  $\cos\theta_w > \cos\theta$  implicando em um ângulo de contato aparente menor que o ângulo de contato real.
- Para uma superfície hidrofóbica ( $\theta > 90^\circ$ ), vale a relação  $\cos\theta_w < \cos\theta$ , ou seja, o ângulo aparente é menor que o ângulo real.

Cassie e Baxter (1944) *apud* Watson *et al.* (2011), estenderam suas pesquisas sobre molhamento a superfícies porosas e consideraram as microestruturas como sendo superfícies heterogêneas, compostas de sólido e ar. Neste modelo, é considerado que os poros permanecem cheios de ar com a gotícula sobre a superfície, como mostrado na Figura 10.

**Figura 10 - Representação gráfica do modelo de Cassie e Baxter, no qual o líquido não preenche os poros do substrato, (WATSON *et al.* 2011).**



Neste modelo, a gota não molha toda a extensão de contato de uma superfície rugosa, assim, parte da interface sólido-líquido é composta por uma interface líquido-ar. Desta forma, os autores consideraram que a energia gasta para formar uma unidade de área geométrica da interface, é dada pela equação 3, Costa (2014):

Equação 3:

$$Ed = f1(\gamma_{SL} - \gamma_{SA}) + f2\gamma_{LA}$$

Em que:

- $Ed$  = Energia gasta para formar uma unidade de área geométrica da interface;
- $f1$  = área total da interface sólido-líquido;
- $f2$  = área da interface líquido ar.

Combinando a equação 3, com a Equação de Young-Dupré (Equação 1), tem-se que o ângulo de contato aparente ( $\theta_d$ ) é igual a:

Equação 4:

$$\cos\theta_d = f1 \cos\theta_A - f2$$

Desta forma, Costa (2014) afirma que o aumento da interface líquido-ar é a principal causa dos defeitos interfaciais da fase sólida após a consolidação do líquido, o que conseqüentemente causa redução da aderência.

### 3.4. Aderência Química

---

Além do efeito do travamento mecânico, a aderência do sistema argamassa/substrato, conforme Bauer (2005) é também resultante das forças de atração entre as fases, bem como pela adsorção química de moléculas da argamassa na superfície do substrato. Costa (2014) afirma que as forças intermoleculares, forças de Van der Waals, são as principais responsáveis pela aderência da maioria dos materiais multifásicos. Almeida (2005) afirma que a formação de ligações intermoleculares, Van der Waals, será maior quanto maior a área específica dos materiais aderidos.

Com o objetivo de melhorar as características desta interface e, conseqüentemente, a aderência entre argamassa-substrato, são adicionados polímeros às argamassas cimentícias. Estas adições são responsáveis pela densificação da argamassa, com a formação de C-S-H mais denso, reduzindo a quantidade de poros e hidróxido de cálcio, os quais contribuem para a baixa resistência das argamassas e concretos (Almeida, 2005).

Devido à retenção de água que a adição polimérica proporciona a sucção da nata de cimento para a cerâmica ocorre de forma mais lenta e contínua, gerando uma maior extensão de contato físico. A incorporação dos polímeros também reduz a retração e o módulo de elasticidade das argamassas, favorecendo a estabilização da interface (Silva, 2001).

Em se tratando de materiais com baixa porosidade, a sucção da nata de cimento para o interior dos poros é muito baixa, havendo o acúmulo de água na interface e a formação de uma película com elevada relação água/cimento. Como os polímeros estão dissolvidos ou dispersos na fase aquosa, pode ser verificada a formação de filme polimérico na interface, favorecendo assim a ligação entre os materiais através de forças intermoleculares decorrentes de ligações de van der Waals e ligações de hidrogênio (Mansur, 2007).

Além da aditivação das argamassas, a melhoria da aderência argamassa/substrato também pode ocorrer pela modificação da superfície do substrato. Esta modificação da superfície ocorre pela aplicação de um produto químico no substrato de tal forma a modificar a energia superficial de contato.

De acordo com Gelest (2014), pode-se obter a melhoria da ligação entre materiais orgânicos e inorgânicos através da utilização de silanos (organosilanos), que são

denominados agentes de ligação, agentes de ligação multifuncionais ou ainda, agentes de acoplamento.

Segundo Costa (2014) o silano é um dos produtos mais utilizados para o tratamento superficial de substratos cerâmicos, uma vez que promove a formação de ligações covalentes na interface substrato-matriz. A superfície hidrofílica dos minerais, como a dos porcelanatos, é incompatível com a característica hidrofóbica das cadeias carbônicas dos polímeros e de alguns grupos funcionais. A incorporação dos silanos nestes materiais favorece a dispersão do polímero e a compatibilidade na medida em que torna a superfície organo-reativa.

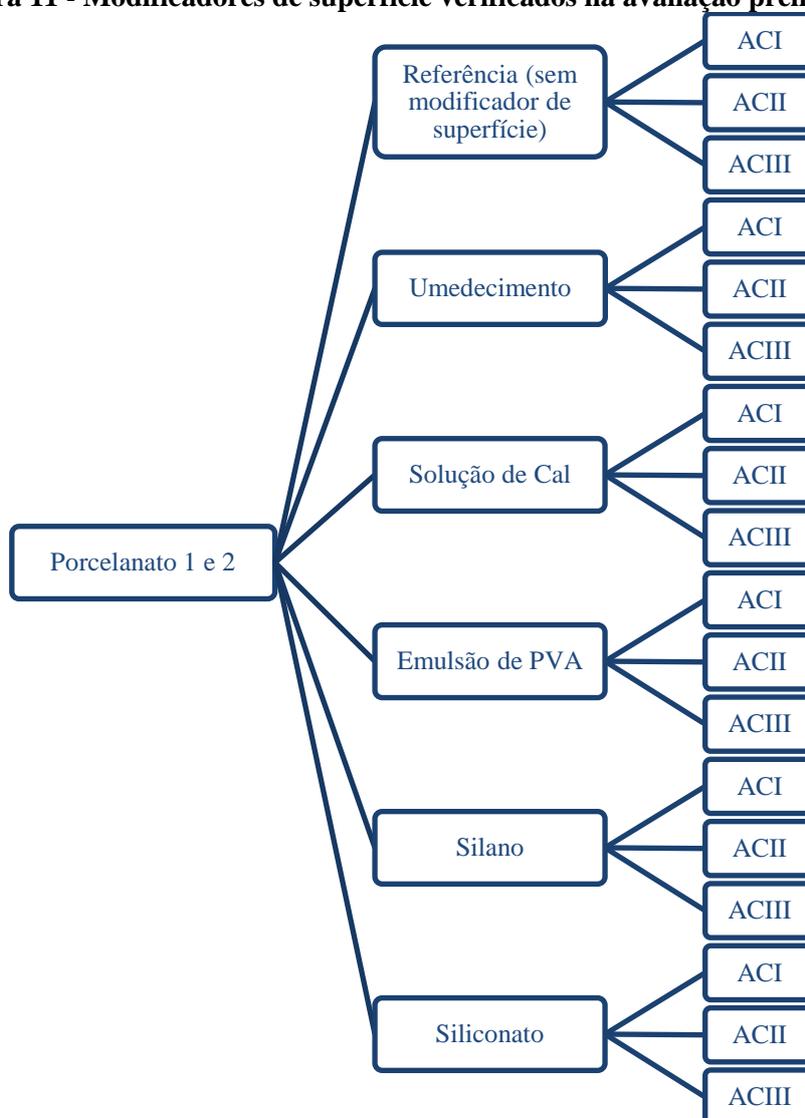
Mansur *et al.* (2008) constatou que aplicação de silanos com grupos funcionais distintos, com exceção do vinil, no tardo de azulejos aumenta a aderência entre argamassa/substrato, alterando, inclusive a forma de ruptura da interface para o interior da argamassa.

Além dos silanos, pode-se encontrar no mercado da construção civil os hidrofugantes a base de silicotato ou metil-siliconatos. De acordo com Maranhão (2009), estes produtos são provenientes da adição de metal alcalino à uma solução de metil-silano, com o objetivo de aumentar a estabilidade, solubilidade e baratear o seu custo final.

#### 4. ANÁLISE EXPLORATÓRIA

Primeiramente, para selecionar os tipos de modificadores de superfície a ser utilizado na parte experimental da pesquisa foi realizada uma avaliação exploratória de diferentes técnicas de preparo de superfície em substrato cerâmico. Para isto, foram utilizados dois porcelanatos (placa cerâmica de baixa absorção de água) de diferentes fabricantes e três tipos de argamassa colantes industrializadas para cada modificador de superfície (Figura 11).

**Figura 11 - Modificadores de superfície verificados na avaliação preliminar.**



Os modificadores de superfície foram escolhidos em função da revisão bibliográfica realizada (principalmente o silano, emulsão de PVA e a solução de cal), bem como a prática corrente utilizada pela mão-de-obra nas obras (umedecimento do substrato). Após a determinação das técnicas de modificação de superfície, foi selecionado o porcelanato como substrato cerâmico por apresentar menor porosidade e teoricamente ser o substrato mais crítico a se obter a resistência de aderência. Por fim, foram selecionados 3 tipos de argamassas colantes do mesmo fabricante para serem aplicadas sobre o tardo dos porcelanatos.

#### 4.1. Materiais

Foram selecionadas duas placas cerâmicas, identificadas como Porcelanato 1 e Porcelanato 2, ambas de classe de absorção BIa - 0 a 0,5%, porém de fabricantes diferentes. Os modificadores de superfície utilizados para os tratamentos superficiais e correspondentes diluições foram descritos na Tabela 4.

**Tabela 4 - Modificadores de superfície e respectivas diluições.**

Tipo de material	Proporção da diluição
Água	Não se aplica
Solução de cal: (Água: cal CHI)	1:100 (em massa)
Modificador de superfície 1: Octililtrióxido de silano (Silano)	Não se aplica
Modificador de superfície 2: Metil Siliconato de Potássio (Siliconato)	1:5 (em massa)
Emulsão polímero sintético: (Água: PVA)	1:2 (em volume)

Quanto às argamassas colantes, foram selecionados três tipos, sendo estas industrializadas, classificadas como ACI, ACII e ACIII, vale ressaltar que para cada tipo, a quantidade utilizada correspondia ao mesmo lote de fabricação.

Para a caracterização dos porcelanatos foi realizado o ensaio de absorção de água, enquanto para a caracterização das argamassas colantes foram realizados os ensaios de resistência de aderência cura normal, submersa e em estufa. A Tabela 5 apresenta os resultados de absorção de água dos porcelanatos, enquanto a Tabela 6 apresenta os resultados de resistência de aderência das argamassas colantes.

**Tabela 5 – Absorção de água dos porcelanatos utilizados na avaliação exploratória, conforme ABNT NBR 13.818 (ABNT, 1997).**

Porcelanato	Absorção de Água (%)	Porosidade (%)
1	0,03	0,08
2	0,08	0,20

**Tabela 6- Resultado da Caracterização das Argamassas Colantes.**

Requisito	Método de Ensaio	Unidade	Resultado (MPa)		
			ACI	ACII	ACIII
Tempo em aberto	NBR 14081-3	min	15	20	20
Resistência de aderência à tração aos 28 dias, em função do tipo de cura	Normal	MPa	0,67	1,07	0,76
	Submersa		0,39	0,84	1,10
	Estufa		-	0,39	0,25

## 4.2. Métodos

Para a análise da interface, foram propostos os ensaios de ângulo de contato aparente e resistência de aderência à tração. Para isso, aplicou os modificadores de superfície no tardo dos porcelanatos, tanto nos corpos de prova de dimensões de (5x5)cm quanto nas placas inteiras. Após o período de cura dos modificadores de superfície, determinou-se o ângulo de contato dos corpos de prova de dimensões iguais a (5x5)cm, por meio do goniômetro, enquanto nas placas inteiras, aplicou as argamassas colantes (ACI, ACII e ACIII). Após 28 dias da aplicação das argamassas colantes, realizou-se o ensaio de resistência de aderência à tração.

### 4.2.1. Ângulo de contato aparente

A determinação do ângulo de contato foi realizada através do equipamento de análise de forma de gota, Goniômetro, da marca Krüss, modelo DSA100.

Utilizou-se água deionizada em gotas de volume igual a 0,006 ml, depositadas pelo aparelho sobre o verso dos porcelanatos. Foi analisado um corpo de prova por tratamento com modificador de superfície, com aproximadamente oito leituras distribuídas aleatoriamente em cada tardo dos corpos de prova de porcelanato.

O monitoramento se deu no instante do contato da gota com a superfície, onde foram realizadas as medições de ângulo de contato. Os dados foram obtidos automaticamente pelo software do equipamento (DSA1).

#### 4.2.2. Resistencia de aderência à tração

As placas cerâmicas foram preparadas em seis condições diferentes, sendo que anteriormente aos tratamentos da superfície, foram submetidas à secagem em estufa a 50°C, por 24h, para remoção de eventual umidade, e à limpeza para remoção de partículas soltas.

Os tipos de modificadores de superfície e os procedimentos adotados para cada caso foram descritos na Tabela 7:

**Tabela 7 - Tipo de modificador de superfície, modo de aplicação e tempo de cura.**

<b>Modificador de superfície</b>	<b>Diluição em água</b>	<b>Modo de aplicação ao substrato</b>	<b>Tempo de cura necessário para a aplicação da argamassa colante</b>
<b>Nulo: Ø</b>	<b>Não se aplica</b>	<b>Não se aplica</b>	<b>Não se aplica</b>
<b>Água</b>	<b>Não se aplica</b>	<b>Aspersão</b>	<b>Superfície seca saturada (suficiente para ocorrer a absorção da água, sem apresentar uma película na superfície do substrato). Avaliação visual.</b>
<b>Solução de cal: (água: cal CHI)</b>	<b>1:100 (em massa)</b>	<b>Aspersão</b>	<b>Aplicação da argamassa com o substrato umedecido com a solução</b>
<b>Modificador de superfície 1: Octililtriétoxissilano</b>	<b>Não se aplica</b>	<b>Aspersão</b>	<b>7 dias</b>
<b>Modificador de superfície 2: Metil Siliconato de Potássio</b>	<b>1:5 (em massa)</b>	<b>Aspersão</b>	<b>7 dias</b>
<b>Emulsão polímero sintético: (água : PVA)</b>	<b>1:2 (em volume)</b>	<b>Aspersão</b>	<b>Aplicação da argamassa com o substrato umedecido com a solução</b>

As placas foram pesadas antes e após a realização da aplicação dos modificadores de superfície, visando manter um padrão de consumo dos materiais.

Depois de realizados os tratamentos e tempo de cura descritos, foi aplicada a argamassa sobre as placas tratadas, com o auxílio de um gabarito confeccionado em madeira para garantir a espessura de 0,5cm. Para espalhar e dar acabamento superficial à argamassa utilizou-se uma desempenadeira lisa.

Na sequência, foi realizada a cura dos corpos de prova em câmara úmida por 26 dias com o objetivo de controlar as condições de umidade e temperatura neste período, mantendo esta condição fixa para todos os corpos de prova.

Após os 26 dias, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e mantidos em estufa a 50° por 24h para eliminar a umidade superficial.

Depois de retirados da estufa e atingirem temperatura ambiente, foram realizados cortes na argamassa endurecida com auxílio de uma serra-copo de diâmetro aproximado a 50mm. A profundidade dos cortes foi até o contato com o verso do porcelanato.

Na sequência, foi efetuada a colagem dos dispositivos metálicos com adesivo bi componente à base de resina epóxi. A cura do adesivo para a realização do ensaio de resistência de aderência à tração foi de 24 horas.

Para a realização do ensaio de resistência de aderência à tração foi utilizado o dinamômetro de pressão da marca Dynatest. A metodologia utilizada foi adaptada da ABNT NBR 14081-4 (ABNT, 2012) – “Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 4 – Determinação da resistência de aderência à tração”.

#### 4.3. Análise e discussão dos resultados

A Tabela 8 apresenta as médias dos ângulos de contato aparente obtidos no ensaio de goniometria.

**Tabela 8 - Médias dos ângulos de contato aparente**

Modificador de superfície	Ângulos de contato	
	Porcelanato 1	Porcelanato 2
<b>Silano</b>	<b>105,9 (± 10,36)</b>	<b>95,6 (± 8,1)</b>
<b>Água</b>	<b>60 (± 17,0)</b>	<b>64,8 (± 6,8)</b>
<b>Solução de Cal</b>	<b>12 (± 0,53)</b>	<b>10,8 (± 4,12)</b>
<b>Nulo</b>	<b>86,3 (± 17,8)</b>	<b>75,2 (± 7,8)</b>
<b>Siliconato</b>	<b>88,7 (± 4,7)</b>	<b>97,9 (± 6,8)</b>
<b>Emulsão PVA</b>	<b>14,6 (± 5,69)</b>	<b>8,8 (± 2,78)</b>

Pelos resultados apresentados na Tabela 8, observa-se que o silano e o siliconato apresentaram o maior ângulo de contato dentre os tratamentos avaliados. Desta forma, estes dois modificadores de superfície foram os que apresentaram maior comportamento hidrofóbico, no qual há a repelência da água, para os dois tipos de porcelanato.

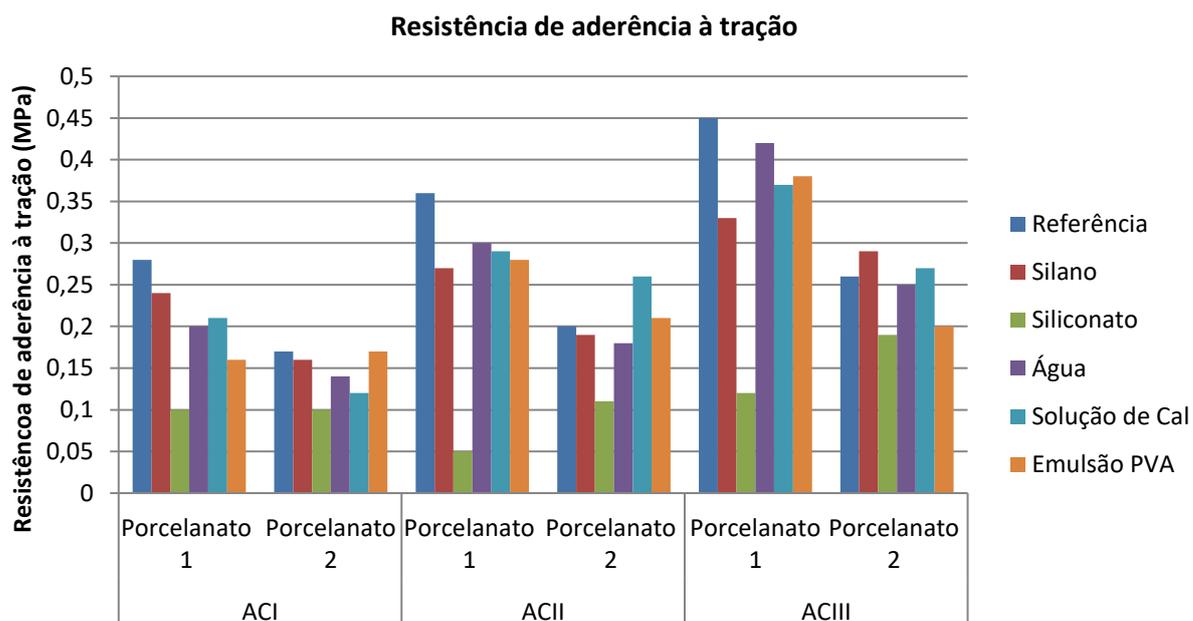
Os tratamentos a base de água, solução de cal e emulsão de PVA, diminuíram a tensão superficial dos substratos, aumentando a sua molhabilidade. Sendo que, para os dois últimos tratamentos mencionados, a leitura dos ângulos de contato se tornou bastante difícil devido ao rápido espalhamento da gota de água deionizada sobre a superfície.

A Tabela 9 e a Figura 12 apresentam os resultados médios da resistência de aderência à tração obtidos para cada tipo de argamassa colante aplicada em cada um dos porcelanatos com diferentes tratamentos superficiais.

**Tabela 9 - Valores médios da resistência de aderência à tração para cada tipo de argamassa colante, e placas cerâmicas, considerando os tratamentos superficiais aplicados**

Argamassas	Placas cerâmicas	Resultados: Resistência de Aderência à Tração (MPa)					
		Referência	Silano	Siliconato	Água	Solução de Cal	Emulsão PVA
ACI	Porcelanato 1	0,28 ± 0,05	0,24 ± 0,03	0,10 ± 0,08	0,20 ± 0,03	0,21 ± 0,06	0,16 ± 0,04
	Porcelanato 2	0,17 ± 0,04	0,16 ± 0,04	0,10 ± 0,05	0,14 ± 0,03	0,12 ± 0,03	0,17 ± 0,04
ACII	Porcelanato 1	0,36 ± 0,05	0,27 ± 0,04	0,05 ± 0,05	0,30 ± 0,07	0,29 ± 0,08	0,28 ± 0,06
	Porcelanato 2	0,20 ± 0,03	0,19 ± 0,03	0,11 ± 0,04	0,18 ± 0,03	0,26 ± 0,06	0,21 ± 0,04
ACIII	Porcelanato 1	0,45 ± 0,06	0,33 ± 0,06	0,12 ± 0,08	0,42 ± 0,08	0,37 ± 0,10	0,38 ± 0,08
	Porcelanato 2	0,26 ± 0,04	0,29 ± 0,06	0,19 ± 0,06	0,25 ± 0,04	0,27 ± 0,06	0,20 ± 0,04

**Figura 12 - Gráfico: Resistências de aderência à tração, em função do tipo de placa cerâmica, tratamento e argamassa colante**



Analisando os resultados apresentados pela Tabela 9, nota-se que os maiores resultados de resistência de aderência média foram obtidos para os corpos de prova referência (sem tratamento), havendo muita variação entre os demais tratamentos. Os corpos de prova tratados com siliconato apresentaram maior perda de resistência de aderência à tração.

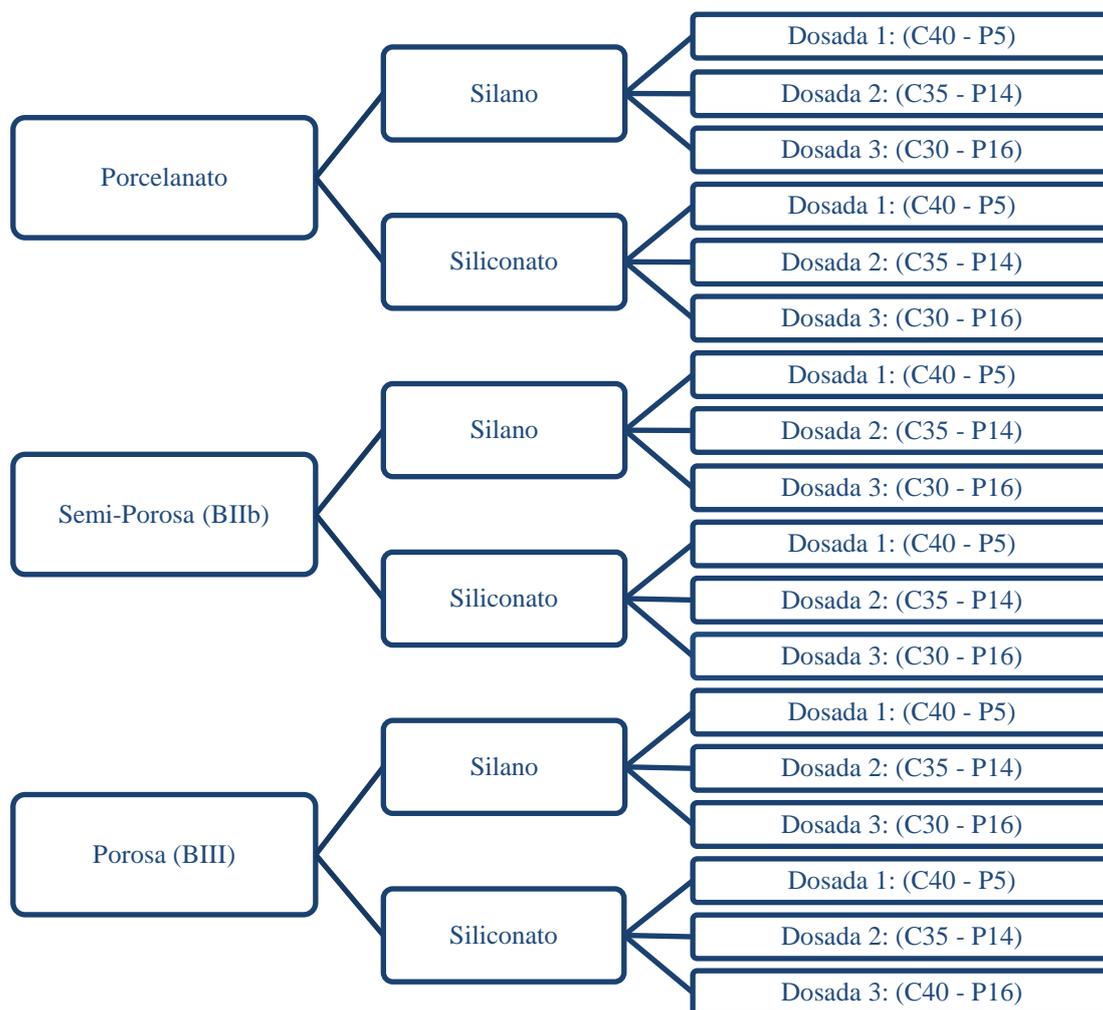
A partir destes resultados decidiu selecionar os modificadores de superfícies a base silano e siliconato para continuação da parte experimental da pesquisa, uma vez que o silano e o siliconato foram os que apresentaram, respectivamente, o melhor e o pior desempenho em relação aos demais tratamentos. Além disto, considerou que somente estes modificadores de superfície poderiam ser aplicados previamente pelo fabricante da placa cerâmica.

Além da seleção dos modificadores de superfície, verificou-se a necessidade de avaliar o comportamento destes modificadores de superfície em placas cerâmicas com diferentes porosidades, absorção de água e rugosidade superficial. Desta optou-se por manter um dos porcelanatos e acrescentar duas placas cerâmicas de diferentes classes de absorção, a fim de avaliar o comportamento dos tratamentos frente à porosidade, absorção e rugosidade das placas. Por fim, com relação as argamassas colantes industrializadas foram substituídas por argamassas colantes dosadas em laboratório, de forma a ter conhecimento sobre o teor de polímero e a influência de sua variação nos resultados finais.

## 5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental teve sequência a partir da análise exploratória, na qual foram definidos os materiais a serem utilizados. A Figura 13 apresenta as variáveis avaliadas nesta nova etapa.

**Figura 13 - Modificadores de superfície, placas cerâmicas e argamassas avaliados na avaliação final.**



## 5.1. Materiais

### 5.1.1. Placas cerâmicas

A Tabela 10 apresenta a absorção de água, a porosidade aparente, os parâmetros da topografia da superfície do tardo das placas cerâmicas utilizadas nesta etapa.

**Tabela 10 – Absorção de água e da porosidade aparente das placas cerâmicas utilizadas, conforme ABNT NBR 13.818 (ABNT, 1997).**

Placa Cerâmica	Absorção de Água (%)	Porosidade Aparente (%)
Porcelanato	0,03	0,08
Semi-Porosa - BIIb	5,37*	11,64
Porosa - BIII	11,39	21,17
*A ABNT NBR13818/97 classifica como BIIb as placas cerâmicas com absorção de água entre 6% e 10%. Apesar do resultado de absorção de água apresentado ser inferior a 6%, considerará esta placa com BIIb, uma vez que é comercializada com esta classe de absorção de água		

Além da absorção de água e da porosidade aparente, também realizou a análise da topografia da superfície do tardo das placas cerâmicas utilizando a técnica de interferometria a laser por meio de um perfilômetro óptico, marca Bucker, modelo NP-Flex (Figura 14). Esta técnica baseada na aplicação de um feixe de laser permite a construção da superfície tridimensional. A partir dos dados obtidos por meio desta técnica, a Tabela 11 apresenta três parâmetros: a ordenada dos picos, a área superficial real e o fator de rugosidade.

O parâmetro especificado como a ordenada dos picos ( $S_q$ ) é o desvio padrão da distribuição das alturas de picos e vales da superfície, enquanto o fator de rugosidade ( $r$ ) equivale à razão entre a área da superfície real ( $A_r$ ) e a área da superfície projetada no plano. Quanto maior a ordenada dos picos ( $S_q$ ) e o fator de rugosidade ( $r$ ), melhor a contribuição da base à de resistência de aderência, uma vez que estes dois parâmetros indicam a área de contato interfacial que pode ser preenchida pela a argamassa, favorecendo a extensão de aderência.

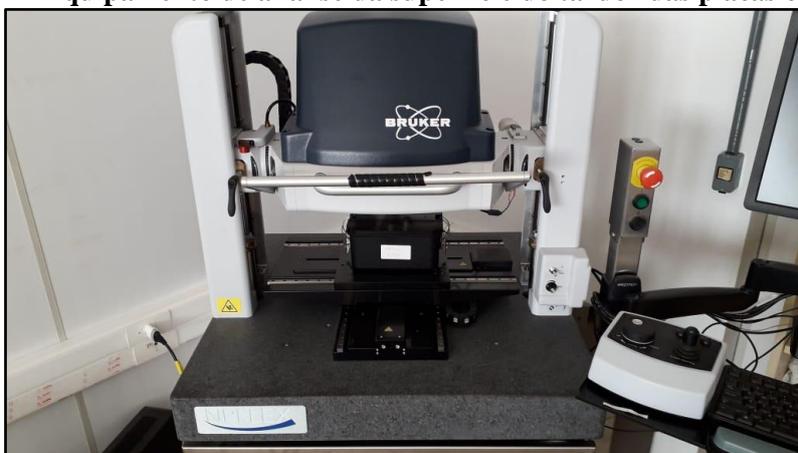
A Figura 15 apresenta a topografia da superfície do porcelanato, enquanto a Figura 16 apresenta a topografia da superfície da placa cerâmica semi-porosa e a Figura 17 apresenta a topografia da superfície da placa cerâmica porosa. Estas fotos foram obtidas

por meio do perfilômetro, utilizando lente de zoom de 5x e resolução de 2 micras, nos 3 eixos em uma região de (4,5x4,5) mm.

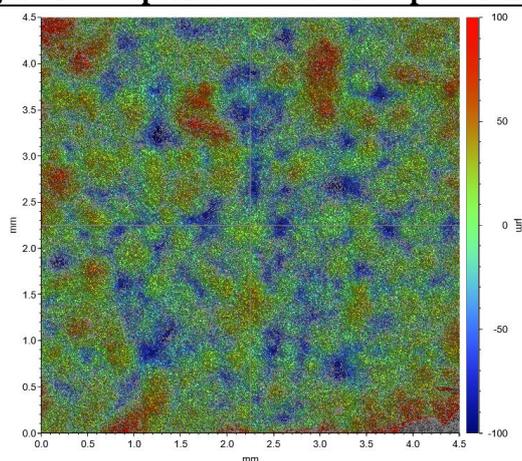
**Tabela 11 – Parâmetros superficiais das placas cerâmicas utilizadas**

Placa Cerâmica	Ordenada Média dos Picos – Sq (nm)	Área Superficial Real ( $\mu\text{m}^2$ )	Fator de Rugosidade (r)
Porcelanato	30 147	29 219 869	2,1
Semi-Porosa - BIIIb	13 575	31 884 552	1,6
Porosa - BIII	26 859	34 708 931	1,8

**Figura 14 - Equipamento de análise da superfície do tardo das placas cerâmicas.**



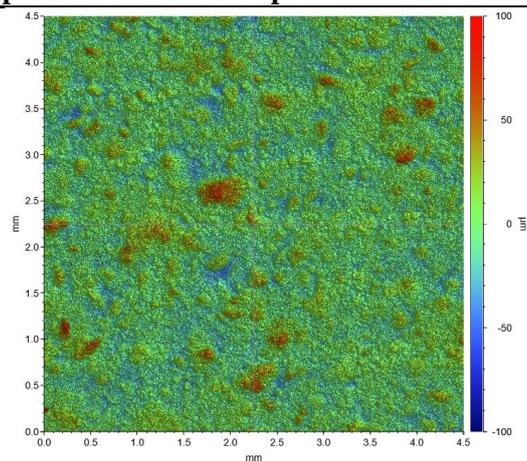
**Figura 15 - Superfície do tardo do porcelanato.**



---

**Figura 16 - Superfície do tardo da placa cerâmica semi-porosa – BIIb.**

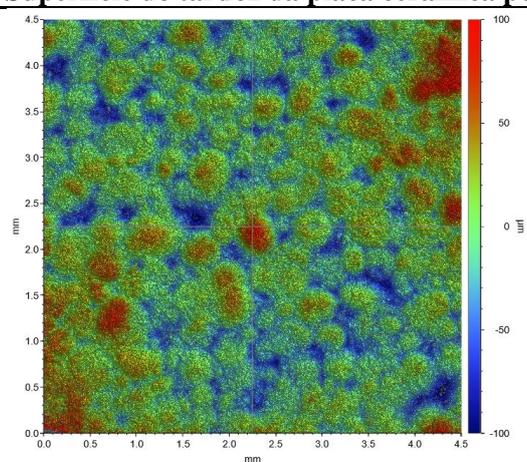
---



---

**Figura 17 - Superfície do tardo da placa cerâmica porosa – BIII.**

---



### 5.1.2. Modificadores de superfície

Um dos modificadores de superfície selecionados é a base de octiltriectosilano, da marca Wacker, identificado comercialmente como SILRES BS1701 e ao longo do texto como Silano. O outro modificador de superfície é a base de silicone, também da marca Wacker, identificado comercialmente como SILRES BS16 e ao longo do texto como Siliconato.

A Tabela 12 apresenta as principais características dos produtos, as informações foram apresentadas das fichas técnicas dos produtos, disponíveis no site do fabricante.

**Tabela 12 - Propriedades dos Modificadores de Superfície (Wacker, 2019).**

<b>Propriedades</b>	<b>Modificador 1 (Silano)</b>	<b>Modificador 2 (Siliconato)</b>
<b>Composto Principal</b>	<b>Trietoxi (2,4,4-trimetilpentilo) silano</b>	<b>Siliconato Metil Potássio</b>
<b>Teor de Silano</b>	<b>Aprox. 99%</b>	<b>-</b>
<b>Teor de Sólidos</b>	<b>-</b>	<b>55%</b>
<b>Massa Molecular</b>	<b>Aprox. 276g/mol</b>	<b>-</b>
<b>Densidade a 20°C e a 1013hPa</b>	<b>0,88 g/cm<sup>3</sup></b>	<b>1,4 g/cm<sup>3</sup></b>
<b>Viscosidade a 25°C</b>	<b>1,9 mPa.s</b>	<b>-</b>

### 5.1.3. Argamassas colantes

Sabendo-se que as propriedades das argamassas são modificadas pela utilização de aditivos e adições em sua composição, optou-se por dosar as argamassas colantes em laboratório, visando o conhecimento e domínio sobre os teores e variáveis. A Tabela 13 apresenta os traços das argamassas colantes e a Tabela 14 apresenta os resultados de resistência de aderência das argamassas colantes utilizadas nesta fase do estudo.

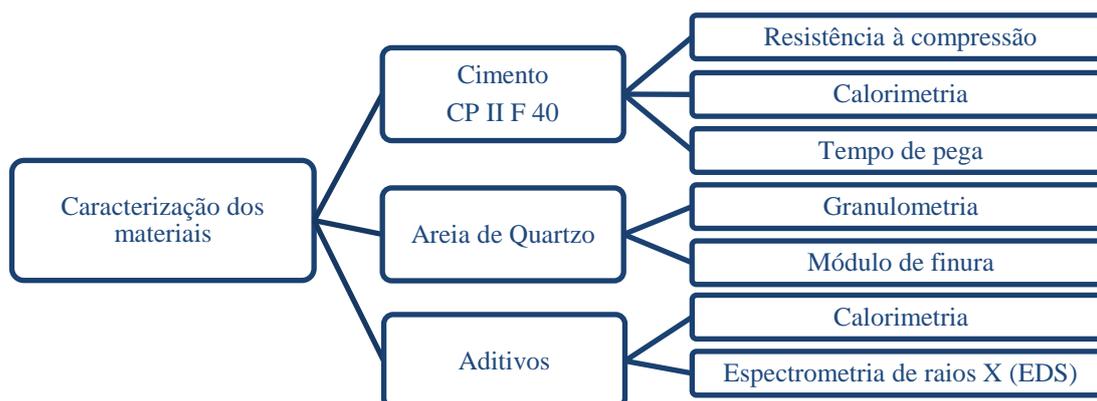
**Tabela 13 – Traço das argamassas colantes.**

<b>Materiais</b>	<b>Dosada 1 (C40 - P5)</b>	<b>Dosada 2 (C35 - P14)</b>	<b>Dosada 3 (C30 - P16)</b>
<b>Cimento CP II F 40</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Areia de Quartzo</b>	<b>1,475</b>	<b>1,699</b>	<b>2,152</b>
<b>Éter celulósico Tylose MH 60004 P6 – Retentor de água</b>	<b>0,5%</b>	<b>0,5%</b>	<b>0,5%</b>
<b>Formiato de cálcio - Acelerador de resistência e de cura.</b>	<b>1,0%</b>	<b>1,0%</b>	<b>1,0%</b>
<b>Pó redispersível PVAc VINNAPAS 5044N – Promotor de flexibilidade, trabalhabilidade e aderência</b>	<b>5,0%</b>	<b>14,3%</b>	<b>16,7%</b>
<b>Relação Água/Argamassa</b>	<b>0,22</b>	<b>0,22</b>	<b>0,22</b>
<b>Relação Cimento/Argamassa</b>	<b>40%</b>	<b>35%</b>	<b>30%</b>
<b>Relação Polímero/Cimento</b>	<b>5%</b>	<b>14,3%</b>	<b>16,7%</b>

**Tabela 14- Resultado da Caracterização das Argamassas Colantes.**

Requisito		Método de Ensaio	Unidade	Resultado (MPa)		
				Dosada 1 (C40 - P5)	Dosada 2 (C35 - P14)	Dosada 3 (C30 - P16)
Resistência de aderência à tração aos 28 dias, em função do tipo de cura	Normal	NBR 14081-4	MPa	1,97	1,22	0,94
	Submersa			1,21	0,80	0,69
	Estufa			1,07	1,48	1,39
Flexibilidade		ISO 13007	Mm	1,0	2,1	1,5

Os materiais utilizados na formulação das argamassas foram caracterizados de acordo com o esquema apresentado no fluxograma da Figura 18:

**Figura 18 - Caracterização dos materiais utilizados na formulação das argamassas.**

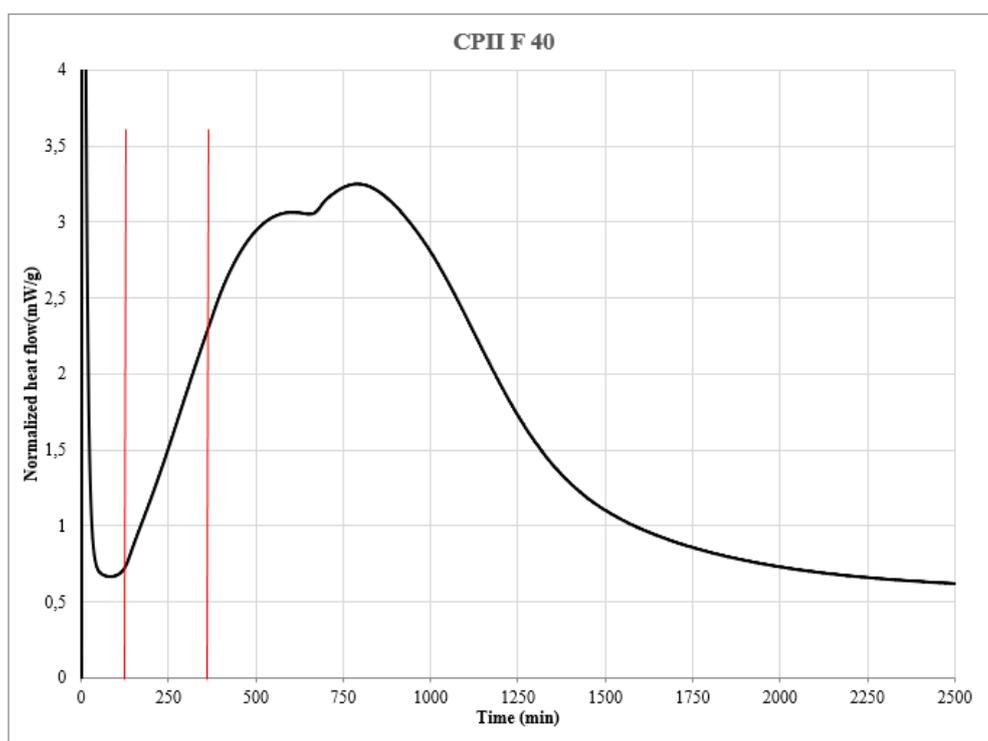
O ligante utilizado foi o Cimento Portland CP II F 40 (Cimento Portland Composto com filler calcário), conforme a ABNT NBR 16697:2018 (ABNT, 2018). A Figura 20 apresenta as imagens obtidas através da microscopia eletrônica de Varredura de uma amostra do cimento utilizado para a elaboração da argamassa colante. Os resultados mecânicos são apresentados na Tabela 15.

**Tabela 15 - Determinação de ensaio de resistência à compressão do CII F 40.**

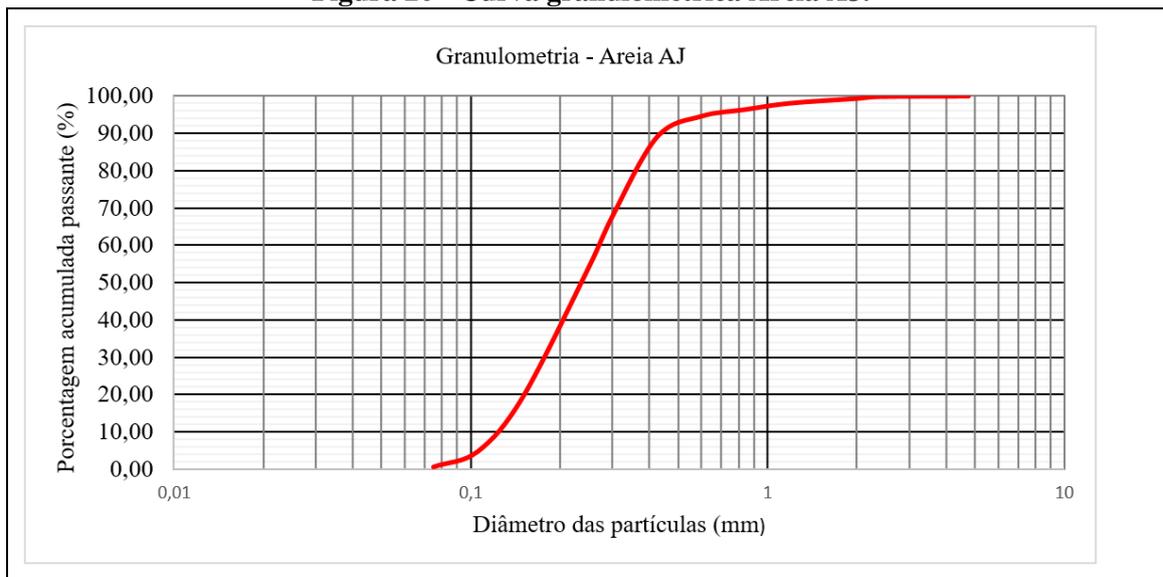
Amostra	Idade de ruptura	Resistência média à compressão	Desvio Padrão
1	3 dias	22,2 MPa	2,0
2	7 dias	30,7 MPa	1,0
3	28 dias	42,5 MPa	1,1

Para determinar o tempo de pega do cimento Portland CP II F 40 foi realizado o ensaio de calorimetria. Para isso, foi produzida uma amostra do cimento CP II F 40 com água deionizada que foi acomodada no calorímetro. A partir da curva obtida no ensaio, foi estipulado o início de pega como o tempo logo após o período de indução e o fim de pega como o tempo referente a 70% do pico de calor obtido após o início de pega, 83 e 360 minutos respectivamente conforme Figura 19.

**Figura 19 - Curva de Hidratação de determinação do tempo de pega do CII F 40.**



Como agregado miúdo, foi utilizado a areia à base de quartzo, com diâmetro máximo característico de 0,84 mm e módulo de finura 1,36, de acordo com a ABNT NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003) abrangendo uma faixa granulométrica caracterizada como fina, conforme Figura 20.

**Figura 20 - Curva granulométrica Areia AJ.**

Quanto aos aditivos, foram utilizados três tipos:

- Éter celulósico: Tylose MH 60004 P6 – Retentor de água.
- Formiato de cálcio - Acelerador de resistência e de cura.
- Pó redispersível PVAc - VINNAPAS 5044N – Características de resistência de aderência tração, trabalhabilidade e flexibilidade.

A tabela 16 apresenta os dados do aditivo PVAc utilizado, fornecidos pelo fabricante.

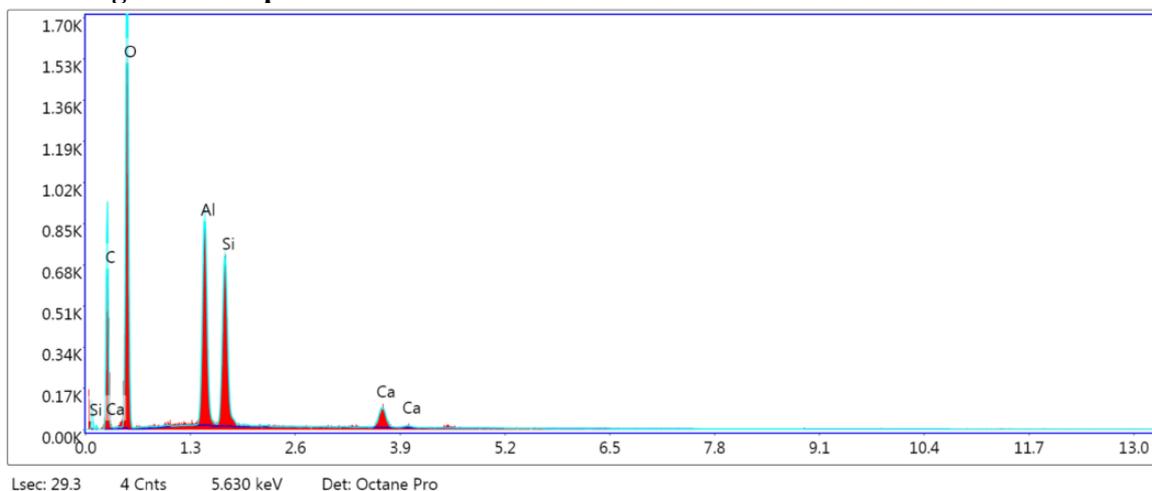
**Tabela 16 – Aditivo PVAc - VINNAPAS 5044N (dados extraído do site da Wacker).**

Dados de Especificação	Método de Inspeção	Valor
Conteúdo Sólido	DIN EN ISO 3251	min. 98%
Conteúdo de cinzas (1000°C)	Método específico	máx. 12%
Densidade Bruta	DIN EN ISO 60	400-550 Kg/m <sup>3</sup>
Tamanho das partículas	DIN EN ISO 4610	máx. 4% menor que 400 µm
Aparência	Visual	pó branco
Protetor coloidal/ emulsificador de proteção	-	álcool polivinílico
Temperatura mínima de formação de filme	DIN ISO 2115	0°C

Para uma melhor caracterização do aditivo PVAc, também foi realizado o ensaio de microscopia eletrônica de varredura e espectrometria de raios X nas amostras para

melhor compreender o formato dos grãos dos aditivos. A Figura 21 e a Tabela 17 apresentam a caracterização obtida por meio do ED.

**Figura 21 - Espectrometria de raios X do Aditivo PVAc - VINNAPAS 5044N.**



**Tabela 17 - Espectrometria de raios X do Aditivo PVAc - VINNAPAS 5044N.**

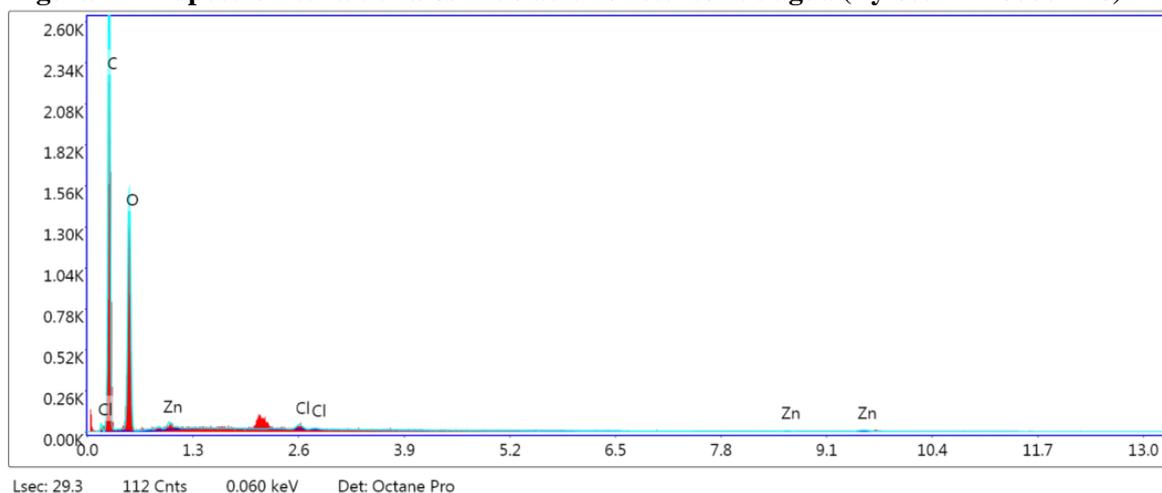
Elemento	Peso (%)	Atômico (%)	Net Int.	Erro (%)	Kratio	Z	A	F
C K	33,35	42,62	98,36	10,49	0,0994	1,0450	0,2853	1,0000
O K	50,96	48,89	280,34	9,87	0,1187	0,9994	0,2331	1,0000
AlK	7,80	4,44	210,08	5,68	0,0481	0,8879	0,6919	1,0044
SiK	6,29	3,44	178,49	5,69	0,0419	0,9073	0,7321	1,0028
CaK	1,61	0,62	31,13	10,83	0,0141	0,8557	0,9990	1,0237

Para os demais aditivos que compõe os traços das argamassas colantes deste estudo, retentor de água (Tylose MH 60004 P6) e acelerador de resistência (Formiato de Cálcio), também foram realizados os ensaios de espectrometria de raios X (

Figura 22 e Tabela 18 e Figura 23 e

Tabela 19). Além disso, foram obtidas junto ao fabricante as informações técnicas sobre os respectivos aditivos (Tabela 20).

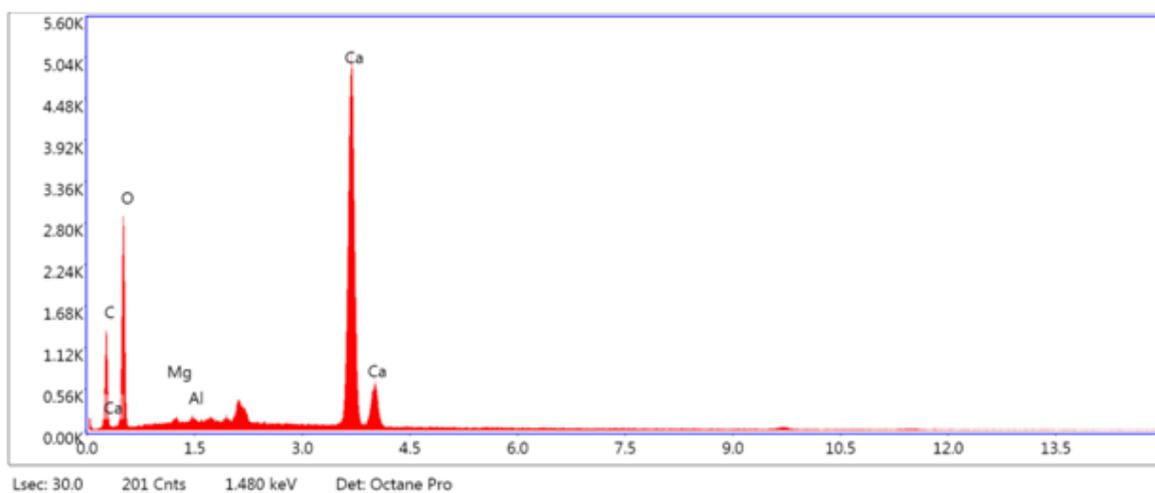
**Figura 22 - Espectrometria de raios X do aditivo retentor de água (Tylose MH 60004 P6).**



**Tabela 18 - Espectrometria de raios X da Tylose MH 60004 P6**

Elemento	Peso (%)	Atômico (%)	Net Int.	Erro (%)	Kratio	Z	A	F
C K	53,45	60,86	359,80	6,34	0,3110	1,0226	0,5693	1,0000
O K	45,45	38,85	228,66	10,68	0,0826	0,9771	0,1861	1,0000
ZnL	0,78	0,16	5,43	24,45	0,0037	0,7413	0,6354	0,9990
ClK	0,31	0,12	9,96	23,15	0,0026	0,8248	0,9949	1,0174

**Figura 23 - Espectrometria de raios X do aditivo acelerador de resistência - Formiato de Cálcio.**



**Tabela 19 - Espectrometria de raios X do aditivo acelerador de resistência - Formiato de Cálcio**

Elemento	Peso (%)	Atômico (%)	Net Int.	Erro (%)	Kratio	Z	A	F
<b>C K</b>	12,66	20,12	163,30	8,14	0,0613	1,0836	0,4472	1,0000
<b>O K</b>	53,01	63,25	504,83	10,42	0,0793	1,0384	0,1441	1,0000
<b>MgK</b>	0,63	0,50	31,15	14,18	0,0027	0,9608	0,4381	1,0023
<b>AlK</b>	0,38	0,27	24,68	12,81	0,0021	0,8254	0,5885	1,0042
<b>CaK</b>	33,31	15,87	1804,37	1,78	0,3025	0,8939	1,0118	1,0044

**Tabela 20 – (a) Especificação do Formiato de Cálcio – Aditex; (b) Nomenclatura da Tylose MH 60004 P6.**

Composição	Parâmetros	Sigla	Significado
Teor de Cálcio	≥ 98%	M	Metil
Teor de Cálcio total	≥ 30%	H	Hidróxido etil
Teor de umidade	≤ 0,5%	60004	Nível de viscosidade
pH (solução 10% em água)	6,5 - 8,0	P6	Consistência que aumenta a modificação

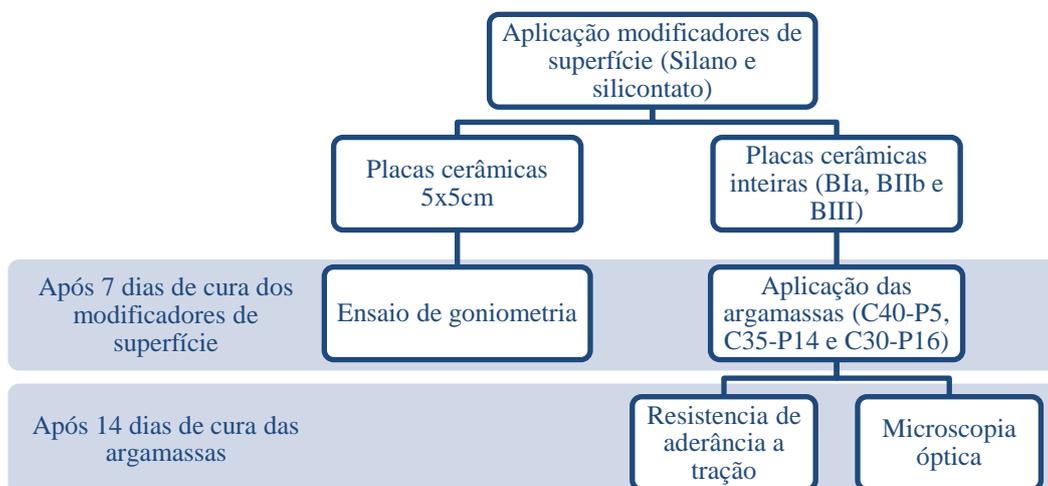
(a)

(b)

## 5.2. Métodos

Para a análise da interface, foram propostos os ensaios de ângulo de contato aparente, resistência de aderência à tração e microscopia óptica. Para isso, aplicou-se os modificadores de superfície (silano e siliconato) ao tardo de corpos de prova de dimensões de (5x5) cm e ao tardo de placas inteiras de cada substrato (porcelanato BIa, cerâmicas BIIb e BIII). Após o período de cura dos modificadores de superfície, determinou-se o ângulo de contato dos corpos de prova de dimensões iguais a (5x5)cm, por meio do goniômetro, enquanto nas placas inteiras, foram aplicadas as argamassas colantes (C40-P5, C35-P14 e C30-P16). Após 14 dias da aplicação das argamassas colantes, realizou-se o ensaio de resistência de aderência à tração e de microscopia óptica. A Figura 24 apresenta de forma esquemática a metodologia aplicada.

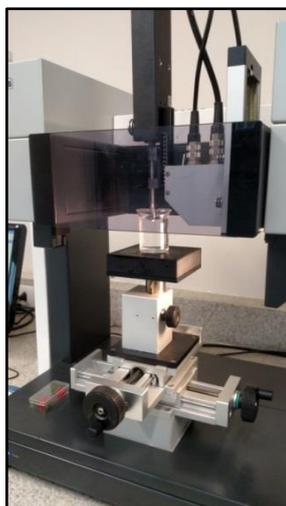
**Figura 24 - Modificadores de superfície, placas cerâmicas e argamassas verificadas na avaliação final.**



### 5.2.1. Ângulo de contato aparente;

A determinação do ângulo de contato foi realizada através do equipamento de análise de forma de gota, Goniômetro, da marca Krüss, modelo DSA100. Utilizou-se água deionizada em gotas de volume igual a 0,005 ml, depositadas pelo aparelho sobre os substratos (Figura 25). As gotas foram distribuídas aleatoriamente pelos corpos de prova (Figura 26) e o monitoramento se deu no instante do contato da gota com a superfície, onde foram realizadas as medições de ângulo de contato. Os dados foram obtidos automaticamente pelo software do equipamento (DSA1), conforme Figura 27.

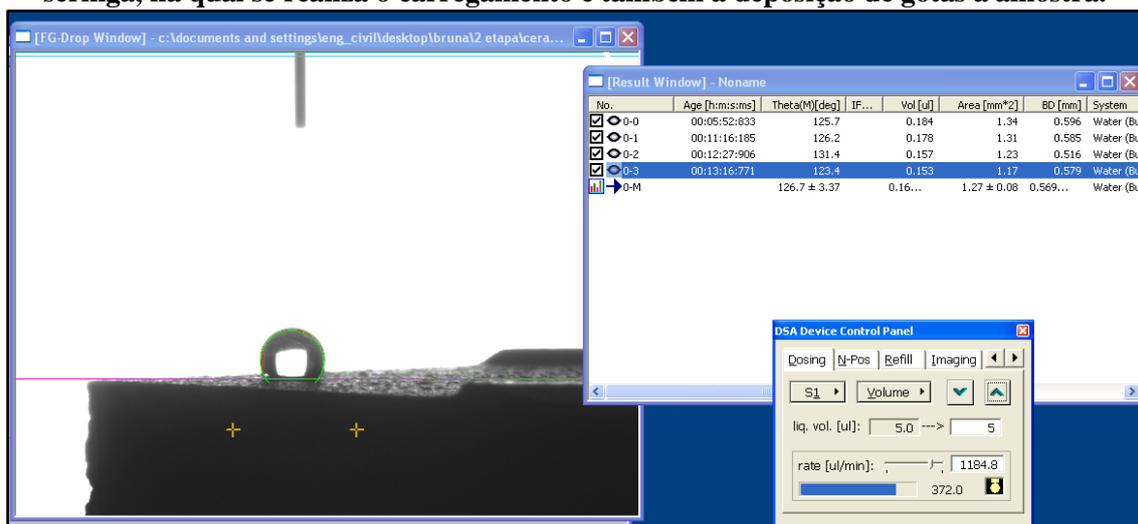
**Figura 25 - Equipamento de análise de forma de gota, Goniômetro Krüss, modelo DSA100: momento do carregamento da seringa com água deionizada**



**Figura 26 - Corpo de prova posicionado sob a agulha. Na lateral esquerda observa-se a câmera e na lateral direita a fonte de luz para obtenção das imagens.**



**Figura 27 - Software DSA1: cálculo do ângulo de contato. Na imagem, observa-se à esquerda a janela com as imagens obtidas pela câmera, à direita a imagem com os resultados de ângulo de contato calculados pelo software e abaixo a janela de controle da seringa, na qual se realiza o carregamento e também a deposição de gotas à amostra.**



### 5.2.2. Resistencia de aderência à tração (NBR 14081-4/2012);

As placas cerâmicas foram preparadas em duas condições diferentes (modificador de superfícies a base de silano e siliconato), sendo que anteriormente aos tratamentos da superfície, foram submetidas à secagem em estufa a 100°C, por 24h, para remoção de eventual umidade. Antes da aplicação dos tratamentos foi realizada limpeza com escova de aço e pano seco para remoção de partículas soltas e material pulverulento.

Realizou-se a pesagem das placas antes e após a realização da aplicação dos modificadores de superfície, visando manter um padrão de consumo dos materiais. Determinou-se o tempo de cura de 7 dias para os modificadores de superfície, realizada em temperatura e umidade ambiente. Após o tempo de cura descrito, foram aplicadas as argamassas colantes (C40-P5, C35-P14 e C30-P16), sobre as placas tratadas. Também aplicou-se as argamassas colantes sobre placas sem tratamento, apresentadas anteriormente como placas referência, as quais também foram submetidas à secagem em estufa antes da aplicação das argamassas.

As argamassas colantes foram misturadas conforme a ABNT NBR 14082 (ABNT, 2004) e dosadas conforme traços apresentados na tabela 8. Cada componente foi pesado individualmente e cada traço completo foi transferido para sacos plásticos, onde foi realizada a mistura dos aglomerantes e agregado. O material seco foi transferido para outro recipiente no qual já havia sido depositada a quantidade de água adequada. A mistura foi realizada mecanicamente, a aplicação às placas cerâmicas se deu após o tempo de maturação, de 15 minutos.

Com o auxílio de um gabarito confeccionado em madeira, aplicou-se as argamassas sobre as placas cerâmicas. Foi fixada a espessura de 0,5cm e para garantir padronização à aplicação, foi utilizado um gabarito confeccionado em madeira (Figura 28). Para espalhar e dar acabamento superficial à argamassa utilizou-se uma desempenadeira lisa.

**Figura 28 - Gabarito em madeira para fixação da espessura de aplicação das argamassas.**



Na sequência, foi realizada a cura dos corpos de prova em câmara úmida por 7 dias com o objetivo de controlar as condições de umidade e temperatura neste período,

mantendo esta condição fixa para todos os corpos de prova. A partir do 8º dia, os corpos de prova foram mantidos à temperatura e umidade ambiente. Após 12 dias da aplicação da argamassa colante, realizou-se cortes na argamassa endurecida com auxílio de uma serra-copo de diâmetro aproximado a 50 mm. A profundidade dos cortes foi até o contato com o substrato (Figura 29-a). Na sequência, foi efetuada a colagem das pastilhas com adesivo bi componente à base de resina epóxi (Figura 29-b). A cura do adesivo para a realização do ensaio de resistência de aderência à tração foi de 24 horas.

**Figura 29 - a) Realização das medidas e cortes para colagem das pastilhas. b) Placas cerâmicas com pastilhas devidamente coladas para o ensaio de resistência de aderência à tração.**



O ensaio de resistência de aderência à tração foi realizado 14 dias após a aplicação das argamassas, com o auxílio de um dinamômetro de pressão da marca PosiTest, modelo AT-M Manual (Figura 30-a). As resistências de aderência à tração foram lidas no próprio equipamento (Figura 30-b), e corrigidas em função dos diâmetros reais dos corpos de prova (o equipamento efetua o cálculo de resistência de aderência à tração em MPa e considera diâmetro de 50mm para todos os corpos de prova).

**Figura 30 - a) dinamômetro de pressão da marca PosiTest, modelo AT-M Manual. b) Display de leitura dos resultados.**



### 5.2.3. Microscopia óptica

Para realização da microscopia ótica da interface argamassa-placa cerâmica, foram realizados cortes transversais aos corpos de prova, com o auxílio de uma serra de bancada com disco diamantado. Previamente às análises as amostras foram limpas para retirada de qualquer material pulverulento que pudesse interferir nas leituras

A interface argamassa-placa cerâmica foi avaliada qualitativamente utilizando-se o sistema de microscopia ótica. O equipamento utilizado foi o Axio Lab 1 da Zeiss, (Figura 31). As imagens das seções transversais da interface foram obtidas com ampliações variáveis, de 32 a 50x, para a obtenção do foco mais adequado.

**Figura 31 - Equipamento Axio Lab 1 da Zeiss.**



## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

---

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios realizados e posteriormente a discussão destes resultados, tentando correlacioná-los com as características dos materiais utilizados.

Primeiramente, apresenta os resultados do ângulo de contato do tardo das placas cerâmicas com e sem a presença dos modificadores de superfície. Posteriormente, são apresentados os resultados de resistência de aderência à tração e as imagens das interfaces de ruptura obtidas por meio da microscopia óptica de cada argamassa para cada tipo de placa cerâmica com e sem tratamento superficial.

### 6.1. Ângulo de Contato

---

Os dados foram obtidos automaticamente pelo software do equipamento. A Tabela 21 apresenta os resultados médios e o desvio padrão para os ângulos de contato dos três diferentes tipos de placas cerâmicas com e sem modificador de superfície.

Considerando a hipótese nula ( $H_0$ ) como sendo a aquela que considera que não existe diferença entre a tensão superficial das placas em função do tratamento superficial e realizando análise estatística ANOVA, pode-se concluir que o tipo de tratamento, independentemente do tipo de placa cerâmica interfere significativamente no valor do ângulo de contato, como mostram as Tabelas 22 a 24.

**Tabela 21 – Valores médios do ângulo de contato para cada tipo de placa cerâmica com e sem tratamento superficial.**

Tipo de tratamento	Porcelanato (°)	Semi-Porosa (°)	Porosa (°)
Silano	105,9	121,3 ± 3,7	115,3 ± 5,6
Siliconato	88,7	130,2 ± 3,0	119,5 ± 1,8
Referência	86,3	125,7 ± 4,4	127,3 ± 3,6

**Tabela 22 - Análise de variância do efeito do tratamento superficial do tardo do porcelanato, no valor do ângulo de contato.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3729,5514	2	1864,7757	11,71657	8,7E-05	3,214480
Dentro dos grupos	6843,755	43	159,1571	6843,755	H0 rejeitada pois p<0,05 F>Fcrit	
Total	10573,31	45	10573,31	45		

**Tabela 23 – Análise de variância do efeito do tratamento superficial do tardo da placa cerâmica semi-porosa, BIIb, no valor do ângulo de contato.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	385,3271	2	192,6635	13,81607	6,1E-05	3,327654
Dentro dos grupos	404,4017	29	13,94489		H0 rejeitada pois p<0,05 F>Fcrit	
Total	789,7288	31				

**Tabela 24 – Análise de variância do efeito do tratamento superficial do tardo da placa cerâmica porosa, BIII, no valor do ângulo de contato.**

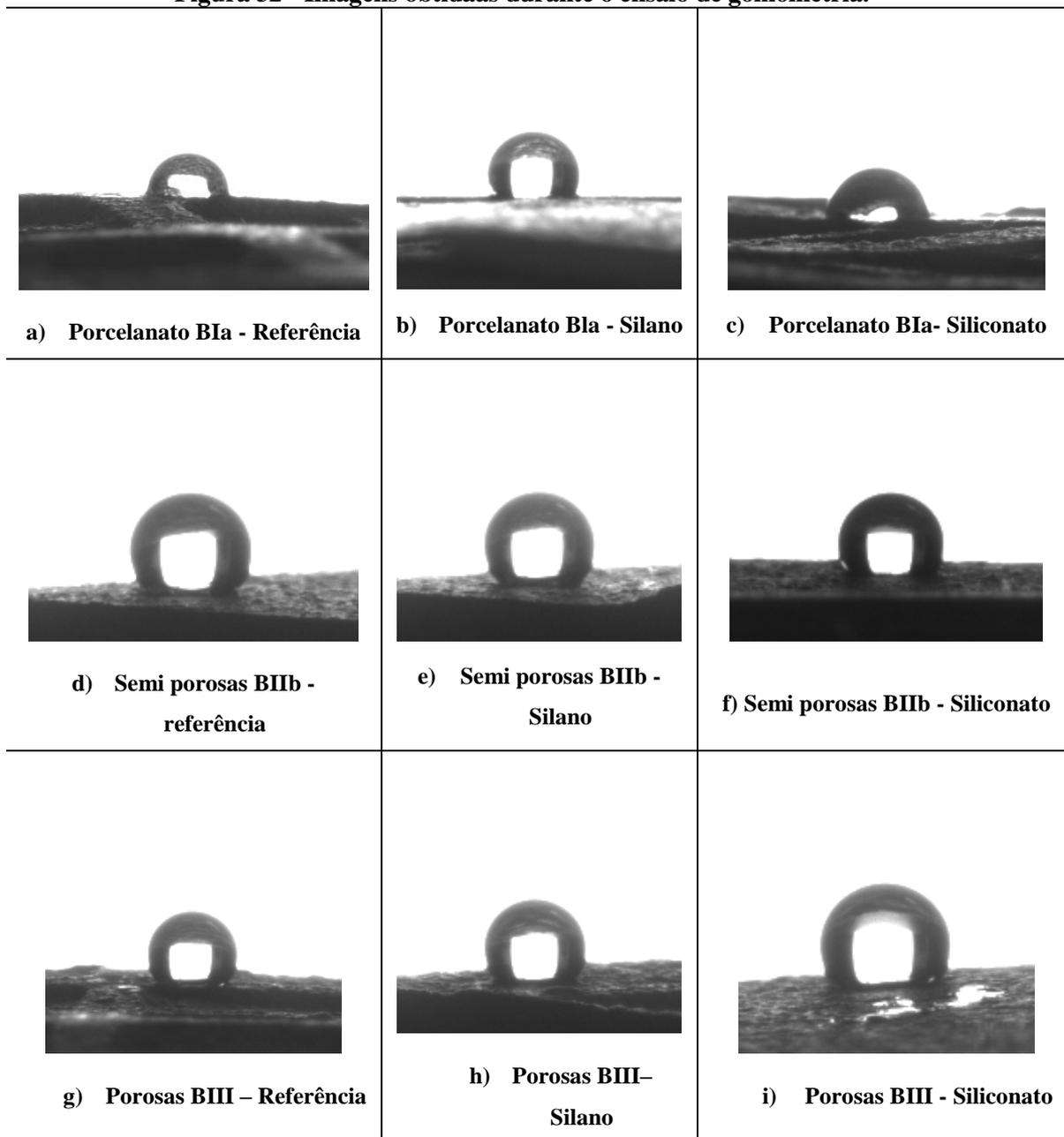
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	876,375	2	438,1875	26,39362	2,03E-07	3,304817
Dentro dos grupos	514,6627	31	16,60202		H0 rejeitada pois p<0,05 F>Fcrit	
Total	1391,038	33				

Para os porcelanatos, o ângulo de contato da placa de referência mostrou-se inferior a 90°, o que significa conforme visto na revisão bibliográfica, que há molhamento parcial do substrato. Após a aplicação do modificador de superfície, foi possível verificar o aumento do ângulo de contato e consequente redução da energia da superfície, tornando-a hidrofóbica. Ressalta-se que o modificador de superfície a base de silano apresentou o maior ângulo de contato, 105,9°, para este tipo de substrato (Figura 32 a, b, c).

As placas cerâmicas semi-porosas apresentaram ângulo de contato médio de 125,7° para as amostras de referência, apresentando comportamento hidrofóbico antes mesmo da aplicação dos modificadores de superfície. O tratamento a base de silano aumentou essa característica, subindo a média do ângulo de contato em 4,5°. Considerando o tratamento a base de siliconato, houve aumento na energia da superfície, reduzindo o ângulo de contato em 5,9°, ainda assim, o comportamento da superfície manteve-se caracterizado como hidrofóbico (Figura 32 d, e, f).

As cerâmicas porosas apresentaram o maior ângulo de contato para as amostras referência, da ordem de  $127,2^\circ$ , após a aplicação dos modificadores de superfície foi observada a redução do ângulo de contato, para ambos os tipos de tratamento (Figura 32 g, h, i).

**Figura 32 - Imagens obtidas durante o ensaio de goniometria.**



Observou-se o menor ângulo de contato para a placa de maior fator de rugosidade, sem tratamento, BIa (porcelanato). Este comportamento pode ser explicado devido ao fato de a gota tender a acomodar-se na superfície, preenchendo os espaços abertos. O

modelo de Wenzel, conforme apresentado na revisão bibliográfica, explica o molhamento de superfícies rugosas prevendo que a rugosidade da superfície reforça as propriedades de molhabilidade dos sólidos, seja a superfície hidrofílica ou hidrofóbica. Conforme esperado, após a aplicação do silano, aumentou-se o ângulo de contato das mesmas, conseqüentemente a hidrofobicidade.

Para as placas com o fator de rugosidade mais baixo, BIII (porosas), houve o efeito contrário, o comportamento inicial apresentou ângulo de contato maior do que após o tratamento com os modificadores de superfície. O comportamento pode ser explicado pelo modelo de Cassie e Baxter, conforme apresentado anteriormente, no qual os poros permanecem cheios de ar com a gotícula sobre a superfície, de forma que a gota não preenche os poros do substrato.

## **6.2. Microscopia óptica**

---

Na sequência as Figuras 33, 34 e 35 apresentam as imagens obtidas por microscopia óptica das placas cerâmicas com e sem modificadores de superfície, e com os diferentes tipos de argamassa colante. Nas legendas de cada foto (que representa um tipo de sistema) são apresentadas as informações quanto ao tipo de tratamento aplicado, tipo de argamassa, resistência de aderência à tração (identificada como: RAT) e tipo de ruptura predominante (identificada como: ruptura).

Pela Figura 33 pode-se notar que no porcelanato a forma de ruptura não alterou em função do tipo de modificador de superfície, porém observa-se, independentemente do tipo da argamassa, que o siliconato proporciona uma região de vazio na interface, prejudicando a aderência em relação a placa sem tratamento e tratada com silano. Já a interface da placa tratada com silano apresenta bem semelhante da interface da placa sem tratamento, proporcionando em algumas situações maior resistência de aderência à tração.

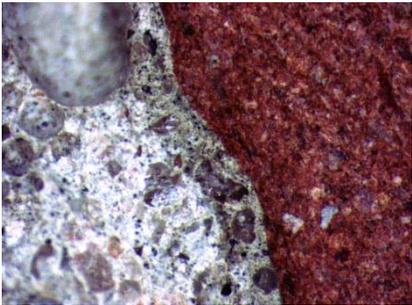
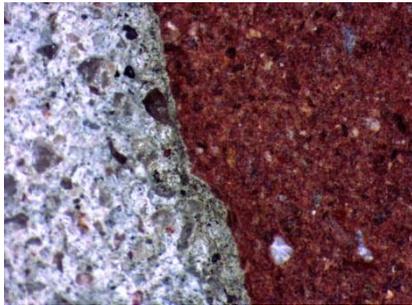
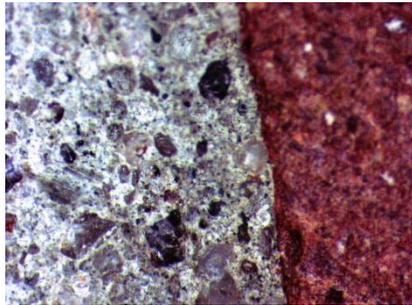
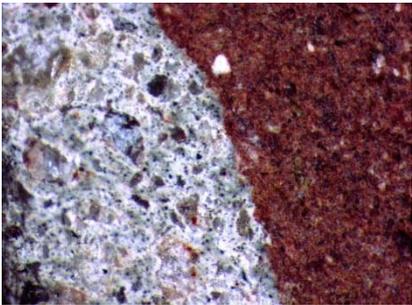
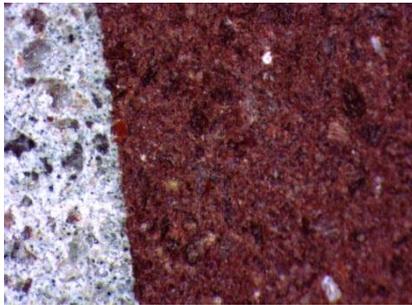
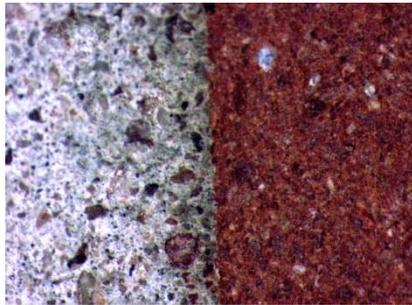
**Figura 33 - Micrografias dos sistemas compostos pela placa cerâmica: Porcelanato (B1a).**

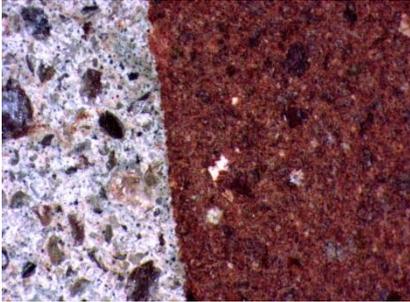
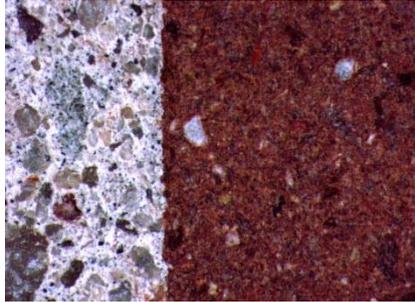
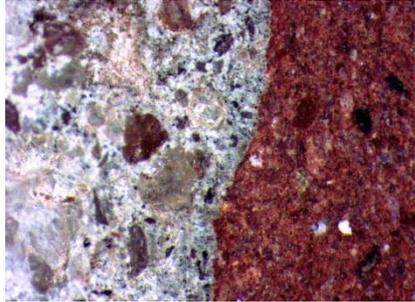
<p>a) Modificador: referência Argamassa: dosada 1 (C40-P5) Micrografia: ampliação 32x RAT: 0,60 MPa Ruptura: 100% interface argamassa – cerâmica</p>	<p>b) Modificador: silano Argamassa: dosada 1 (C40-P5) Micrografia: ampliação 32x RAT: 0,48 MPa Ruptura: 100% interface argamassa – cerâmica</p>	<p>c) Modificador: siliconato Argamassa: dosada 1 (C40-P5) Micrografia: ampliação 40x RAT: 0,07 MPa Ruptura: 100% interface argamassa – cerâmica</p>
<p>d) Modificador: referência Argamassa: dosada 2 (C35-P14) Micrografia: ampliação 32x RAT: 0,68 MPa Ruptura: 60% interface argamassa – cerâmica; 40% na argamassa</p>	<p>e) Modificador: silano Argamassa: dosada 2 (C35-P14) Micrografia: ampliação 40x RAT: 0,91 MPa Ruptura: 50% interface argamassa – cerâmica; 50% na argamassa</p>	<p>f) Modificador: siliconato Argamassa: dosada 2 (C35-P14) Micrografia: ampliação 40x RAT: 0,23 MPa Ruptura: 100% interface argamassa – cerâmica</p>
<p>g) Modificador: referência Argamassa: dosada 3 (C30-P16) Micrografia: ampliação 32x RAT: 1,08 MPa Ruptura: 100% na argamassa</p>	<p>h) Modificador: silano Argamassa: dosada 3 (C30-P16) Micrografia: ampliação 40x RAT: 1,19 MPa Ruptura: 100% interface argamassa – cerâmica</p>	<p>i) Modificador: siliconato Argamassa: dosada 3 (C30-P16) Micrografia: ampliação 32x RAT: 0,33 MPa Ruptura: 100% interface argamassa – cerâmica</p>

Pela Figura 34 observa-se que as placas cerâmicas semi-porosas possuem superfície com menor micro-rugosidades em relação ao porcelanato, apresentando ora uma superfície lisa ou com rugosidades de grandes dimensões, não favorecendo a aderência

promovida pela área superficial. Nota-se também que na interface da placa cerâmica modificada com siliconato um maior escurecimento da argamassa e da placa cerâmica nesta região em relação à placa cerâmica sem modificador e modificada com silano. Este maior escurecimento deve ser em função da maior formação de compostos hidratados da argamassa, promovendo uma maior resistência da argamassa e de aderência à tração.

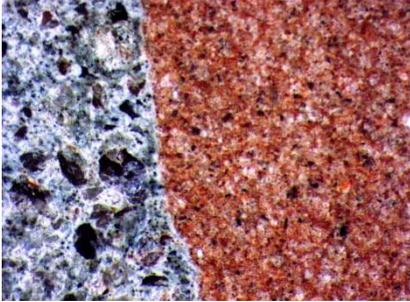
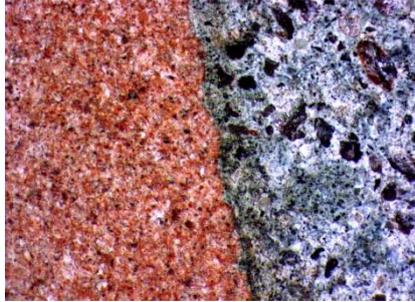
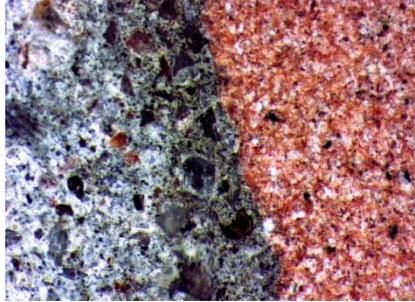
**Figura 34 - Micrografias dos sistemas compostos pela placa cerâmica: Semi porosa (BIIB).**

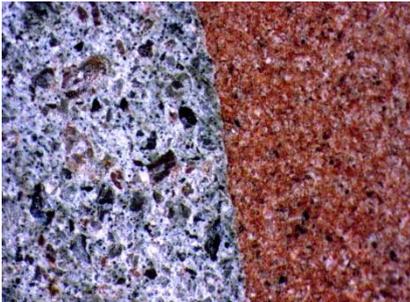
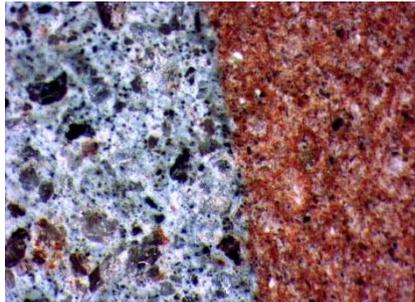
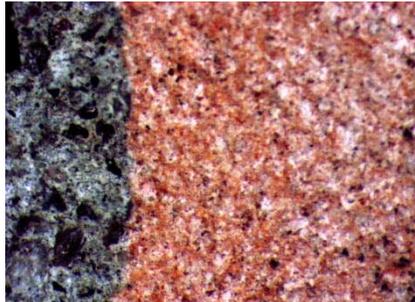
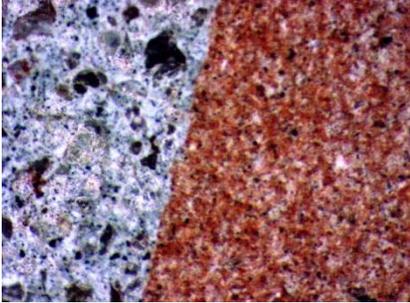
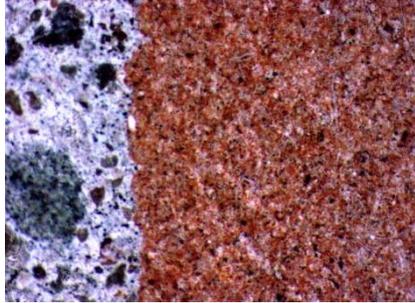
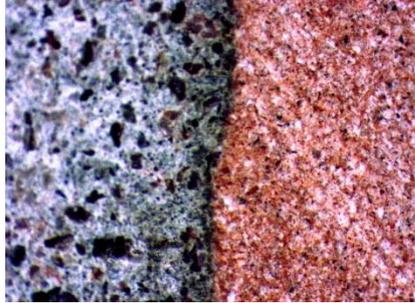
		
<p>a) Modificador: referência Argamassa: dosada 1 (C40-P5) Micrografia: ampliação 40x RAT: 0,61 MPa Ruptura: 50% interface argamassa – cerâmica; 50% na argamassa</p>	<p>b) Modificador: silano Argamassa: dosada 1 (C40-P5) Micrografia: ampliação 32x RAT: 0,38 MPa Ruptura: 50% interface argamassa – cerâmica; 50% na argamassa</p>	<p>c) Modificador: siliconato Argamassa: dosada 1 (C40-P5) Micrografia: ampliação 40x RAT: 0,49 MPa Ruptura: 100% interface argamassa – cerâmica</p>
		
<p>d) Modificador: referência Argamassa: dosada 2 (C35-P14) Micrografia: ampliação 40x RAT: 0,92 MPa Ruptura: 50% interface argamassa – cerâmica; 50% na argamassa</p>	<p>e) Modificador: silano Argamassa: dosada 2 (C35-P14) Micrografia: ampliação 32x RAT: 0,82 MPa Ruptura: 50% interface argamassa – cerâmica; 50% na argamassa</p>	<p>f) Modificador: siliconato Argamassa: dosada 2 (C35-P14) Micrografia: ampliação 40x RAT: 0,94 MPa Ruptura: 50% interface argamassa – cerâmica; 50% na argamassa</p>

		
<p>g) Modificador: referência Argamassa: dosada 3 (C30-P16) Micrografia: ampliação 32x RAT: 0,98 MPa Ruptura: 50% interface argamassa – cerâmica; 50% na argamassa</p>	<p>h) Modificador: silano Argamassa: dosada 3 (C30-P16) Micrografia: ampliação 32x RAT: 0,80 MPa Ruptura: 100% interface argamassa – cerâmica</p>	<p>i) Modificador: siliconato Argamassa: dosada 3 (C30-P16) Micrografia: ampliação 40x RAT: 1,00 MPa Ruptura: 100% na argamassa</p>

A Figura 35 evidencia um escurecimento da argamassa e da placa cerâmica na interface da placa cerâmica porosa tratada com siliconato em relação à placa cerâmica sem modificador e modificada com silano maior do que aquele apresentado no caso das placas cerâmicas semi-porosas modificadas com siliconato.

**Figura 35 - Micrografias dos sistemas compostos pela placa cerâmica: Porosa (BIII).**

		
<p>a) Modificador: referência Argamassa: dosada 1 (C40-P5) Micrografia: ampliação 40x RAT: 0,55 MPa Ruptura: 100% interface argamassa – cerâmica</p>	<p>b) Modificador: silano Argamassa: dosada 1 (C40-P5) Micrografia: ampliação 32x RAT: 0,29 MPa Ruptura: 100% interface argamassa – cerâmica</p>	<p>c) Modificador: siliconato Argamassa: dosada 1 (C40-P5) Micrografia: ampliação 40x RAT: 0,66 MPa Ruptura: 100% interface argamassa – cerâmica</p>

		
<p>d) Modificador: referência Argamassa: dosada 2 (C35-P14) Micrografia: ampliação 32x RAT: 0,84 MPa Ruptura: 50% na cerâmica; 50% na argamassa</p>	<p>e) Modificador: silano Argamassa: dosada 2 (C35-P14) Micrografia: ampliação 50x RAT: 0,53 MPa Ruptura: 100% interface argamassa – cerâmica</p>	<p>f) Modificador: siliconato Argamassa: dosada 2 (C35-P14) Micrografia ampliação 40x RAT: 0,80 MPa Ruptura: 80% interface argamassa – cerâmica; 20% na argamassa</p>
		
<p>g) Modificador: referência Argamassa: dosada 3 (C30-P16) Micrografia: ampliação 32x RAT: 1,31 MPa Ruptura: 50% na cerâmica; 50% na cola</p>	<p>h) Modificador: silano Argamassa: dosada 3 (C30-P16) Micrografia: ampliação 32x RAT: 0,67 MPa Ruptura: 100% interface argamassa – cerâmica</p>	<p>i) Modificador: siliconato Argamassa: dosada 3 (C30-P16) Micrografia: ampliação 32x RAT: 1,08 MPa Ruptura: 80% interface argamassa – cerâmica; 20% na argamassa</p>

### 6.3. Resistência de Aderência à Tração

Conforme exposto na revisão bibliográfica, a aderência é uma propriedade que depende de um conjunto de fatores para ocorrer, desta forma há divergências entre opiniões de diversos autores quanto aos mecanismos que influenciam ao desempenho desta. Os resultados apresentados a seguir visam corroborar com as pesquisas existentes.

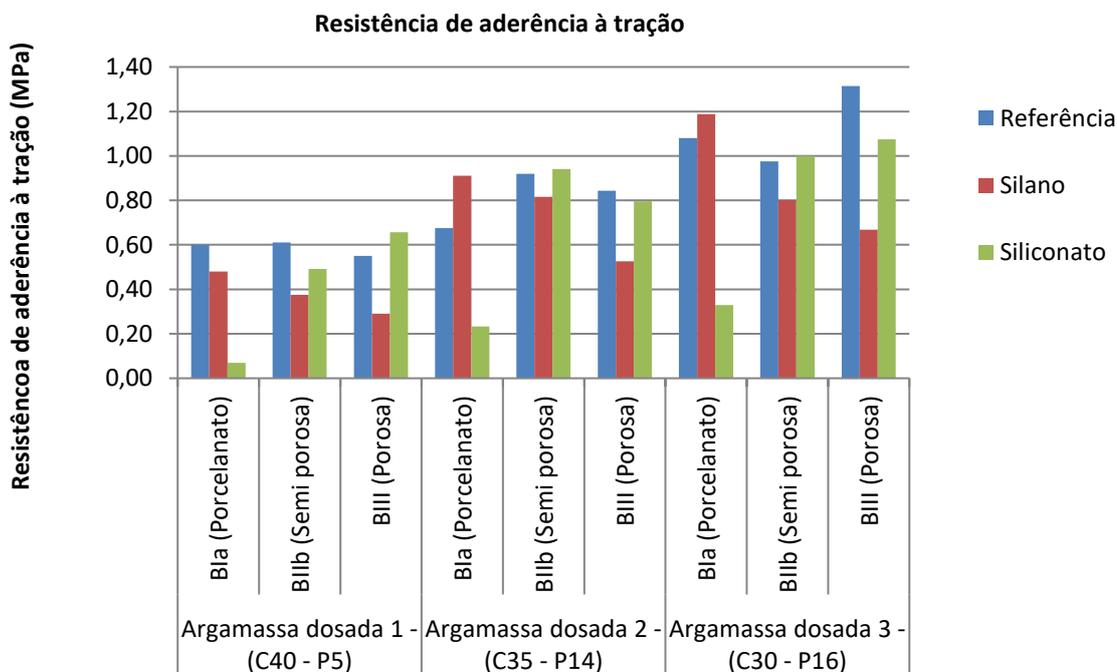
De modo geral, como se pode observar na Tabela 25, os ensaios mostraram que a aderência não depende apenas da absorção do substrato para garantir resultados satisfatórios aos sistemas compostos por matrizes cimentícias e placas cerâmicas. Os resultados evidenciam que a rugosidade superficial da placa pode exercer uma importância até superior à absorção de água da placa cerâmica. Além disto, pode-se observar que o tipo de tratamento e a composição química da argamassa colante também alteraram significativamente os resultados de resistência de aderência à tração.

**Tabela 25 - Valores médios da resistência de aderência à tração para cada tipo argamassa colante e de placa cerâmica com e sem tratamento superficial**

Argamassas	Placas cerâmicas	Resultados: Resistência de Aderência à Tração (MPa)		
		Referência	Silano	Siliconato
Argamassa dosada 1 - (C40 – P5)	Bla (Porcelanato)	0,60 ± 0,11	0,48 ± 0,05	0,07 ± 0,03
	BIIb (Semi porosa)	0,61 ± 0,17	0,38 ± 0,08	0,49 ± 0,06
	BIII (Porosa)	0,55 ± 0,30	0,29 ± 0,07	0,66 ± 0,16
Argamassa dosada 2 - (C35 – P14)	Bla (Porcelanato)	0,68 ± 0,20	0,91 ± 0,12	0,23 ± 0,10
	BIIb (Semi porosa)	0,92 ± 0,21	0,82 ± 0,15	0,94 ± 0,21
	BIII (Porosa)	0,84 ± 0,14	0,53 ± 0,10	0,80 ± 0,09
Argamassa dosada 3 - (C30 – P16)	Bla (Porcelanato)	1,08 ± 0,24	1,19 ± 0,16	0,33 ± 0,18
	BIIb (Semi porosa)	0,98 ± 0,27	0,80 ± 0,13	1,00 ± 0,12
	BIII (Porosa)	1,31 ± 0,34	0,67 ± 0,04	1,08 ± 0,24

A Figura 36 apresenta o gráfico dos resultados obtidos para as resistências de aderência à tração em função do tipo de placa cerâmica, tratamento e argamassa colante.

**Figura 36 – Gráfico: resistências de aderência à tração, em função do tipo de placa cerâmica, tratamento e argamassa colante.**



Considerando a hipótese nula ( $H_0$ ) como sendo a aquela que considera que não existe diferença entre a resistência de aderência em função da argamassa para o mesmo tipo de tratamento superficial e placa cerâmica, e realizando análise estatística ANOVA, pode-se concluir, com 95% de confiança (valor-P inferior a 0,05 e  $F > F_{crítico}$ ), que o tipo de argamassa interferiu no valor resistência de aderência à tração (Tabela 26). Em relação aos modificadores de superfície das placas cerâmicas, foi realizada a análise de variância estatística ANOVA, na qual foi considerada a hipótese nula ( $H_0$ ) como sendo a inexistência de diferença entre a resistência de aderência em função do tratamento superficial para mesma argamassa e placa cerâmica. Pelos resultados obtidos por esta análise estatística, considera-se que houve, com 95% de confiança (valor-P inferior a 0,05 e  $F > F_{crítico}$ ), influência do tratamento superficial na resistência de aderência à tração, exceto para a placa semi-porosa quando utilizada a argamassa colante 2 (C35-P14) (Tabela 27).

**Tabela 26 - Análise de variância e teste F para verificação da influência do tipo de argamassa colante na resistência de aderência à tração para o mesmo tipo de placa cerâmica e de modificador de superfície**

<b>Tipo de Placa</b>	<b>Tratamento</b>	<b>F</b>	<b>Fcrítico</b>	<b>Valor - P</b>
<b>Porcelanato BIa</b>	<b>Referência</b>	<b>12,04</b>	<b>3,30</b>	<b>0,000135</b>
	<b>Silano</b>	<b>94,49</b>	<b>3,30</b>	<b>6,44E-14</b>
	<b>Siliconato</b>	<b>9,77</b>	<b>3,30</b>	<b>0,00512</b>
<b>Semi-Porosa BIIb</b>	<b>Referência</b>	<b>14,70</b>	<b>3,20</b>	<b>1,2E-05</b>
	<b>Silano</b>	<b>100,48</b>	<b>3,16</b>	<b>2,1E-19</b>
	<b>Siliconato</b>	<b>37,51</b>	<b>3,23</b>	<b>8,2E-10</b>
<b>Porosa BIII</b>	<b>Referência</b>	<b>31,20</b>	<b>3,24</b>	<b>9,7E-09</b>
	<b>Silano</b>	<b>95,71</b>	<b>3,25</b>	<b>2,4E-15</b>
	<b>Siliconato</b>	<b>23,36</b>	<b>3,25</b>	<b>2,7E-07</b>

**Tabela 27 - Análise de variância e teste F para verificação da influência do tipo de modificador de superfície na resistência de aderência à tração para o mesmo tipo de placa cerâmica e de argamassa colante**

Tipo de placa	Argamassa	F	Fcrítico	Valor – P
Porcelanato BIa	C40 – P5	162,74	3,35	8,6E-16
	C35 – P14	77,76	3,28	3,2E-13
	C30 – P16	73,73	3,28	6,7E-13
Semi-Porosa BIIB	C40 – P5	25,97	3,18	1,5E-08
	C35 – P14	2,69	3,16	0,08
	C30 – P16	3,36	3,28	0,047
Porosa BIII	C40 – P5	18,31	3,27	3,6E-06
	C35 – P14	36,87	3,21	3,9E-10
	C30 – P16	34,11	3,28	9,3E-09

Conforme pode ser observado na Tabela 28, verificou-se que as argamassas dosadas com maiores teores poliméricos e menores concentrações de cimento, apresentaram resultados mais satisfatórios na resistência de aderência à tração. Este comportamento se repetiu para os três tipos de placas cerâmicas e modificadores de superfície. Este resultado vai ao encontro com outras pesquisas que obtiveram resultados similares: Gonçalves (2004); Pereira et al; (2013); Costa (2014). Entretanto, com relação ao tratamento superficial da superfície, os resultados obtidos contrariam os resultados obtidos por Costa (2014) que afirma que as bases modificadas com silano possuem maior resistência de aderência em relação à sem tratamento.

De acordo com Ohama (1998), a modificação de argamassas com polímeros reduz a retração por secagem, o módulo de elasticidade e aumenta a retenção de água, o que leva à redução de fissuras e defeitos na interface. Para Almeida (2005), este tipo de adição reduz a quantidade de poros da zona de transição, através da densificação da pasta na interface, aumentando assim a superfície de contato argamassa-substrato e consequentemente as interações que desencadeiam a formação de ligações intermoleculares (ligações de Van der Waals).

Para os porcelanatos, classe de absorção BIa e fator de rugosidade  $Fr = 2,1$ , a resistências de aderência a tração média para os corpos de prova tratados com o modificador de superfície a base de silano e aplicada a argamassa (C30-P16), com maior concentração polimérica, foi somente 10% superior a resistência de aderência à tração dos corpos de provas referência. Em função do coeficiente de variação deste

ensaio ser em torno de 20%, pode-se considerar como resultados similares. Em contrapartida, para esta mesma placa cerâmica, a utilização do siliconato prejudicou em muito a resistência de aderência à tração chegando a valores de perda de resistência de aderência à tração de 69% em relação à placa referência (Tabela 28).

Analisando as placas cerâmicas semi-porosas, classe de absorção BIIb e fator de rugosidade  $Fr=1,6$ , a maior resistência de aderência à tração na placa cerâmica com a argamassa colante (C40-P5), maior teor de cimento e menor teor de polímero, ocorreu com a referência. Já com a argamassa colante (C35-P14), as resistências de aderência à tração podem ser consideradas, estatisticamente, iguais, ou seja, o modificador não influenciou na resistência de aderência à tração. Por fim com a argamassa colante (C30-P16), menor teor de cimento e maior teor de polímero, a resistência de aderência média para a placa com siliconato é 2% superior à resistência de aderência da placa referência. Em função do coeficiente de variação deste ensaio ser em torno de 20%, pode-se considerar como resultados similares. A utilização do silano como tratamento superficial nesta placa prejudicou a resistência de aderência à tração em 11% a 38% dependendo da argamassa colante (Tabela 28), sendo a maior perda quando se utiliza a argamassa com maior teor de cimento e menor teor de polímero (C40-P5).

**Tabela 28 - Variação percentual entre os valores de resistência de aderência à tração em função do tratamento superficial e argamassa colante**

Argamassas	Placas cerâmicas	Variação da Resistência de Aderência à tração (%)		
		Silano x	Siliconato x	Silano x
		Referência		Siliconato
Argamassa dosada 1 - (C40-P5)	Bla (Porcelanato)	-20%	-88%	85%
	BIIb (Semi porosa)	-38%	-20%	-29%
	BIII (Porosa)	-47%	20%	-128%
Argamassa dosada 2 - (C35-P14)	Bla (Porcelanato)	34%	-66%	75%
	BIIb (Semi porosa)	-11%	2%	-15%
	BIII (Porosa)	-37%	-5%	-51%
Argamassa dosada 3 - (C30-P16)	Bla (Porcelanato)	10%	-69%	72%
	BIIb (Semi porosa)	-18%	2%	-25%
	BIII (Porosa)	-49%	-18%	-61%

Considerando as placas cerâmicas porosas, classe de absorção BIII e fator de rugosidade  $Fr=1,8$ , a resistência de aderência à tração atingiu maior resultado na placa cerâmica sem tratamento superficial, exceto quando se utilizou a argamassa colante com menor teor de polímero (C40-P5). Para este caso, a maior resistência de aderência ocorreu para a placa cerâmica com siliconato.

Analisando os resultados obtidos e as principais características dos modificadores de superfícies e das placas cerâmicas, pode-se explicar cada caso isoladamente. Os porcelanatos tratados com silano e argamassa (C30-P16), apresentaram maior resistência de aderência em relação aos substratos referência e tratados com siliconato. Isso pode estar relacionado primeiramente ao tamanho das partículas do silano, por serem muito pequenas não alteraram a rugosidade do tardo da placa, apenas a absorção, permitindo o intertravamento da argamassa endurecida às reentrâncias da cerâmica. Conforme Maranhão (2009), o silano caracteriza-se por ser transparente, por não formar filme, por possuir baixa viscosidade e por ter o menor tamanho de molécula entre os derivados de silicone. Granato (2002) afirma ainda, que este material possui elevada penetração nos poros do substrato e boa efetividade em aplicação sobre materiais inertes, como as cerâmicas. Costa (2014) afirma que a incorporação dos silanos nos porcelanatos favorece a dispersão do polímero e a compatibilidade na medida em que torna a superfície organo-reativa.

As placas identificadas como semi porosas, apresentaram média absorção de água (5,37%) e também o menor fator de rugosidade ( $Fr=1,6$ ). Para este caso o tratamento a base de siliconato apresentou o melhor desempenho, este resultado pode estar relacionado ao fato de que os siliconatos possuem menor poder de repelência e penetração aos poros, desta forma não impediu totalmente a absorção da argamassa pelos poros. Ao contrário do ocorrido com os silanos, que impediram a absorção, e com a baixa rugosidade do substrato prejudicaram a aderência.

Quanto às placas porosas, os resultados mais satisfatórios foram os relacionados as placas sem tratamento (referência) e a argamassa dosada com maior teor de polímeros (C30-P16), confirmando a teoria do intertravamento mecânico pela absorção e precipitação dos componentes de hidratação do cimento, bem como da adesão química. Em contrapartida, os tratamentos modificadores de superfícies ao reduzir a absorção de água, reduziram também a aderência.

## 7. RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS

---

A seguir apresentam-se recomendações técnicas embasadas nas conclusões da presente pesquisa. As recomendações visam melhorar as características das placas cerâmicas a partir de sua fabricação, e ressaltar aspectos importantes a serem observados em sua utilização.

### 7.1. Fabricação

---

A presente pesquisa mostrou que para um mesmo tipo de argamassa, foi possível obter maiores resultados de resistência de aderência a tração em placa cerâmicas com menor taxa de absorção e maior fator de rugosidade, em relação a placas cerâmicas com maior taxa de absorção e menor fator de rugosidade. Mostrando desta forma a importância da rugosidade do tardo da placa cerâmica para a extensão de aderência e consequentemente, a manutenção da aderência.

Por esse motivo, recomenda-se que o fabricante além da absorção de água, preocupe-se com a rugosidade superficial do tardo da placa cerâmica, por meio da muratura do tardo. Sugere-se que esta rugosidade seja planejada e criada nos moldes que farão a prensagem da massa para posterior tratamento térmico (secagem e queima).

### 7.2. Execução

---

É importante salientar que toda obra deve possuir um projeto ou um procedimento de execução de revestimento cerâmico, elaborado por um profissional habilitado, e executado por equipe técnica qualificada sob orientação de engenheiro ou arquiteto, em conformidade com as normas técnicas vigentes.

As recomendações apresentadas a seguir serão realizadas, considerando-se que o projeto e execução da base foram realizados sob as condições mencionadas no parágrafo anterior.

### 7.2.1. Normas técnicas de assentamento de placas cerâmicas

As normas técnicas que embasam a execução do revestimento em placas cerâmicas são:

- NBR 13753 (ABNT, 1996) – Revestimento de piso interno ou externo com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante – Procedimento;
- NBR 13754 (ABNT, 1996) – Revestimento de paredes internas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante – Procedimento;
- NBR 13755 (ABNT, 2017) – Revestimento de paredes externas e fachadas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante – Procedimento.

### 7.2.2. Escolha da placa cerâmica

Uma das principais etapas da execução do revestimento cerâmico é a especificação das placas cerâmicas em função de suas propriedades e das solicitações a que estarão submetidas durante a sua vida útil. Visando nortear esta especificação são apresentadas as Tabelas 29 a 32 que apresentam uma indicação de uso da placa cerâmica em função das propriedades de absorção de água, de resistência à abrasão superficial para as placas esmaltadas, de resistência ao manchamento (classe de limpabilidade) e de resistência ao ataque químico.

**Tabela 29 – Absorção de água - adaptado da ABNT NBR 13818 (ABNT, 1997).**

Absorção de água (%)	Grupo de absorção	Denominação do produto	Indicação de uso
$Abs \leq 0,5$	Ia	Porcelanato	Pisos, paredes internas e externas e fachadas
$0,5 < abs \leq 3$	Ib	Grés	Pisos, paredes internas e externas e fachadas
$3 < abs \leq 6$	IIa	Semi-grés	Pisos e paredes internas e externas
$6 < abs \leq 10$	IIb	Semi-poroso	Paredes internas
$Abs > 10$	III	Poroso	Paredes internas

**Tabela 30 - Resistência à abrasão superficial para as placas esmaltadas - adaptado da ABNT NBR 13818 (ABNT, 1997).**

Placa cerâmica esmaltada	Porcelanato esmaltado	Indicação de uso
PEI	Classe de uso	
0	1	Paredes
1	2	Pisos de banheiros e quartos residenciais
2	3	Pisos de dependências residenciais sem comunicação ao exterior
3	4	Pisos de todas as dependências residenciais
4	5	Pisos de todas as dependências residenciais e ambiente comerciais de tráfego médio
5	6	Pisos de todas as dependências residenciais e ambiente comerciais de tráfego intenso

**Tabela 31 – Resistência ao manchamento (classe de limpabilidade) - adaptado da ABNT NBR 13818 (ABNT, 1997).**

Classe de limpabilidade	Facilidade de remoção da mancha	Indicação de uso
5	Máxima facilidade de remoção da mancha	Pisos de todas as dependências residenciais e ambiente comerciais de tráfego intenso
4	Mancha removível com produto de limpeza fraco	Pisos de todas as dependências residenciais
3	Mancha removível com produto de limpeza forte	Paredes
2	Mancha removível com ácido clorídrico, hidróxido de potássio e tricloroetileno	Sem indicação
1	Impossibilidade de remoção da mancha	Sem indicação

**Tabela 32 – Resistência ao ataque químico - adaptado da ABNT NBR 13818 (ABNT, 1997).**

Agente químico		Alta (a)	Média (b)	Baixa (c)
Ácidos	Alta concentração (H)	HA	HB	HC
Álcalis	Baixa concentração (L)	LA	LB	LC
Produtos domésticos e de piscinas		A	B	C
Indicação de Uso		Pisos de todas as dependências residenciais e ambiente comerciais de tráfego intenso	Paredes e Pisos de todas as dependências residenciais	Sem Indicação

### 7.2.3. Escolha da argamassa colante:

Assim como demonstrado na pesquisa, a adição polimérica influencia diretamente na resistência de aderência à tração, portanto recomenda-se que a escolha da argamassa deve ser realizada de forma criteriosa, através do estudo dos componentes informados

pelo fabricante e também a indicação de sua aplicação, conforme recomendações preconizadas pela ABNT NBR 14081-1 (ABNT, 2012). A Tabela 33 apresenta os tipos de argamassas colantes e respectivas recomendações de uso.

**Tabela 33 – Recomendações de utilização de Argamassa Colante (Adaptada da ABNT NBR 14081-1 - ABNT, 2012).**

<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
<b>ACI</b>	Características de resistência para atender às solicitações mecânicas e termo-higrométricas, típicas de revestimentos internos, exceto: saunas, churrasqueiras, estufas e outros revestimentos especiais.
<b>ACII</b>	Características de resistência que permitem absorver os esforços existentes em revestimentos de pisos e paredes externas decorrentes de ciclos de flutuação térmica e higrométrica, da ação de chuva e/ou vento, da ação de cargas como as decorrentes do movimento de pedestres em áreas públicas e de máquinas e equipamentos leves sobre rodízios não metálicos.
<b>ACIII</b>	Resiste a altas tensões de cisalhamento nas interfaces substrato/adesivo e placa/adesivo, juntamente com uma aderência superior entre as interfaces quando comparada com AC I e AC II; especialmente indicada para uso em saunas, piscinas, estufas e ambientes similares.
<b>Tipo E</b>	Argamassa colante industrializada dos tipos I, II e III, com tempo em aberto estendido.

#### **7.2.4. Limpeza da base e das placas:**

Como visto na revisão bibliográfica e resultados, a extensão de contato entre argamassa colante–emboço e argamassa colante-placa cerâmica, são de extrema importância para a resistência de aderência do sistema. Portanto, considera-se necessária a limpeza do emboço ou contrapiso por meio de hidro jateamento, antes do assentamento do revestimento cerâmico, visando remover materiais pulverulentos ou qualquer outro tipo de contaminação que possa prejudicar a aderência. No momento do assentamento das placas cerâmicas, esta base deve estar seca ou saturado superfície seca.

A mesma preocupação em relação à limpeza se estende às placas cerâmicas, que não devem apresentar em seu tardo qualquer tipo de material pulverulento ou contaminantes que venham a influenciar negativamente na extensão de contato. Conforme os resultados obtidos na pesquisa, não se recomenda a utilização de tratamentos superficiais.

#### **7.2.5. Verificação das condições da camada de regularização (emboço ou contrapiso)**

Antes do início do assentamento do revestimento cerâmico, deve-se verificar as condições da base, considerando:

- **Planicidade:** a base destinada para aplicação de revestimento, tanto de paredes quanto de pisos nivelados, deve ter desvios máximos de 3 milímetros, para concavidades ou convexidades;
- **Resistência Superficial:** a superfície de aplicação do revestimento deve apresentar resistência superficial suficiente para suportar as tensões provenientes do revestimento cerâmico.
- **Resistência de Aderência:** para aplicação de revestimento cerâmico em paredes internas e externas, o emboço deve apresentar resistência de aderência à tração igual ou superior a 0,3MPa.

#### 7.2.6. Preparo da argamassa colante:

A mistura da argamassa colante deve ser realizada mecanicamente, através de haste helicoidal acionada com furadeira de baixa rotação (300 rpm) ou com misturador apropriado. A mistura deve ser feita em um balde plástico, colocando, primeiramente, a água na quantidade indicada pelo fabricante da argamassa e, sob a agitação do misturador, acrescentar o pó. Proceder a agitação até obter uma argamassa sem grumos e pastosa. Deve ser respeitado o tempo de maturação indicado pelo fabricante, após o tempo de maturação deve ser misturada novamente antes do uso.

#### 7.2.7. Assentamento das placas cerâmicas:

As normas técnicas de revestimentos cerâmicos determinam, de acordo com a área da placa cerâmica, se esta deve ser assentada utilizando-se a técnica da dupla camada ou camada única, bem como a altura e largura da desempenadeira, conforme apresentado na Tabela 34.

**Tabela 34 – Técnica e desempenadeira para assentamento de placas cerâmicas**

Placas cerâmicas (cm <sup>2</sup> )	Largura mínima dos dentes da desempenadeira (mm)	Altura aproximada do cordão de argamassa (mm)	Aplicação da argamassa
Pastilhas	6	4	Seguir recomendações do fabricante
Até 400 cm <sup>2</sup>	8	6	Camada única (aplicada sobre o emboço)
Entre 400 e 900 cm <sup>2</sup>	8	6	Dupla camada (tardoz da placa e emboço)
Acima de 900cm <sup>2</sup>	Condições especiais (as exigências de aplicação devem ser definidas em comum acordo com o fabricante das placas cerâmicas e argamassa colante).		

Após a mistura da argamassa colante, deve-se proceder o assentamento das placas cerâmicas. A seguir apresenta a sequência de assentamento que deve ser realizada para o assentamento das placas cerâmicas:

- a) Estender a argamassa colante com o lado liso da desempenadeira sobre a base, formando uma camada uniforme de cerca de 3mm a 5mm de espessura, dependendo das dimensões dos dentes da desempenadeira (Figura 37).



**Figura 37 – Imprimação da camada de regularização**

- b) Formar os cordões de argamassa colante, passando o lado denteado da desempenadeira em ângulo de 60°, com uma quantidade adicional de argamassa (Figura 38).



**Figura 38 – Abertura dos cordões de argamassa colante**

- c) Espalhar, no caso de placas cerâmicas com área superficial maior do que 400 cm<sup>2</sup> ou com reentrâncias no tardoiz maior do que 1mm, a argamassa colante sobre o tardoiz da placa cerâmica (Figura 39).



**Figura 39 – Aplicação da argamassa no tardoiz da placa cerâmica**

- d) Aplicar a placa cerâmica sobre os cordões de argamassa colante ligeiramente fora de posição. Pressionar e arrastar a placa cerâmica para a posição final (Figura 40).



**Figura 40 – Colocação da placa cerâmica fora da posição e assentamento**

- e) Na posição final, aplicar golpes de martelo de borracha sobre a placa cerâmica até que a argamassa colante saia pelas bordas da placa cerâmica (Figura 41).



**Figura 41 – Arraste da placa para a posição final e aplicação de golpes de martelo de borracha**

- f) Verificar ao longo de toda a execução o amassamento dos cordões e o preenchimento adequado do verso das placas, retirando algumas placas de forma aleatória. A cada verificação, pelo menos três placas devem ser observadas (Figura 42).



**Figura 42 – Verificação do amassamento dos cordões e do preenchimento do tardo da placa cerâmica**

## 8. CONCLUSÕES

---

Esta pesquisa mostrou a influência do teor de polímeros na argamassa colante no desempenho dos sistemas argamassa colante-placa cerâmica, mostrando este ser mais eficaz na resistência de aderência à tração do que a realização de tratamentos com modificador de superfícies a base de silano e siliconato.

As argamassas dosadas com maiores teores de polímero apresentaram maiores resistências de aderência à tração, independentemente das condições da superfície das placas cerâmicas. Analisando as imagens de microscopia verificou-se que as interfaces das argamassas com maiores teores poliméricos apresentaram menos defeitos e aspecto mais denso. Desta forma observa-se a importância das interações químicas e extensão de contato para a aderência.

Em relação ao tardo de da placa cerâmica, a aplicação dos modificadores de superfícies não proporcionou, de forma geral, aumento na resistência de aderência à tração, independente da classe de absorção d'água da placa cerâmica e da rugosidade superficial do tardo. Os melhores resultados de resistência de aderência à tração foram obtidos nas placas cerâmica sem tratamento e com superfícies com maior fator de rugosidade.

Além disso, esta pesquisa demonstrou que a análise do fator de rugosidade superficial do tardo de da placa cerâmica é tão ou mais importante que a absorção de água da placa cerâmica para se obter uma melhor resistência de aderência à tração dos revestimentos. Concluindo que o intertravamento mecânico está diretamente ligado à extensão de aderência, uma vez que quanto maior o fator de rugosidade superficial, maior a área de contato argamassa colante-placa cerâmica.

Por fim, nota-se a importância do desenvolvimento de pesquisas em relação ao fator de rugosidade do tardo de das placas cerâmicas (porcelanatos) de forma a contribuir na aderência do revestimento cerâmico constituído por placas de grandes dimensões e baixa absorção d'água. Além disto, demonstrou-se que a resistência de aderência à tração do revestimento está mais associada ao teor de polímero da argamassa do que com o teor de cimento.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ABREU, M et al. Modeling the behavior of Ceramic Tile Coverings. In: VIII World Congress on Ceramica Tile Quality – Qualicer, Castellón, Espanha, 2004.

AKIAMA, Solange Y.; MEDEIROS, Jonas S.; SABBATINI, Fernando H. Flexibilidade de argamassas adesivas. Anais do II Simpósio de Brasileiro de Tecnologia das Argamassas (II SBTA). Salvador: EPUSP/ANTAC, p.233-245, 1997.

ALMEIDA, A. E. F de Souza. Estudo da influência das adições de sílica ativa e copolímero estireno acrílico nas propriedades de argamassas para o assentamento de porcelanato. Tese (doutorado) apresentada à Interunidades Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

ALMEIDA, A. E. F. S. Estudo da influência das adições de sílica ativa e copolímero estireno acrílico nas propriedades de argamassas para o assentamento de porcelanato. São Carlos, 2005. Interunidades Ciência e engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo.

ALMEIDA, A. E. F. S.; SICHIERI, E. P. Propriedades microestruturais das argamassas de cimento Portland com adições minerais e poliméricas utilizadas na fixação de porcelanato. São Carlos, 2006. *Cerâmica* 52 (2006) 174-179.

ANFACER, <https://www.anfacer.org.br/brasil>, acessado em abril de 2019.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS (ANSI). Specifications for Ceramic Tiles – ANSI A 137.1. EUA. 2017.

ANTUNES, R. P. Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa. Tese (Doutorado) apresentada à Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios – NBR 13818. Rio de Janeiro, 1997c.

\_\_\_\_\_. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração – NBR 13528. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 1: Requisitos – NBR 14081-1. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 2: Execução do substrato-padrão e aplicação da argamassa para ensaios – NBR 14081-2. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. Cimento Portland – Requisitos – NBR 16697:2018. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. Revestimento de piso interno ou externo com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante – Procedimento - NBR 13753. Rio de Janeiro, 1996;

\_\_\_\_\_. Revestimento de paredes internas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante – Procedimento - NBR 13754. Rio de Janeiro, 1996;

\_\_\_\_\_. Revestimentos cerâmicos de fachadas e paredes externas com utilização de argamassa colante – Projeto, execução, inspeção e aceitação – Procedimento - NBR 13755. Rio de Janeiro, 2017

\_\_\_\_\_. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação – NBR 13749. Rio de Janeiro, 2013.

AUSTRALIAN STANDARDS (AS). Ceramic tiles – guide to the installation of ceramic tiles – AS 3958-1. Austrália. 2007.

BAUER, E. Revestimentos de argamassa – características e peculiaridades. Brasília: LEM-UnB; Sinduscon, 2005. 92p.

BAUER,E; KRAUS, E.; SILVA, M.N.B. Patologia e deterioração das fachadas de edifícios em Brasília – estudo da quantificação de danos. In: 4º Congresso de patologia y rehabilitación de edificios – PATORREB, Santiago de Compostela, Espanha, 2012.

BOWMAN, R. The need for stablishing a moisture expansion convention for the analysis of tiling system failures. Australia: CSIRO, 1997.

\_\_\_\_\_. The importance of kinetics of moisture expansion. Australia: CSIRO, 1997.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). Wall and floor tiling: part 2. Design and installation of ceramic and mosaic wall tiling in normal conditions – Code of practice – BS 5385 Part 2. London, 2015.

CAMPANTE, Edmilson F. Metodologia de diagnóstico, recuperação e prevenção de manifestações patológicas em revestimentos cerâmicos de fachada. Tese (doutorado) apresentada à Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo. 2001.

CARASEK, H. Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substrato porosos: Avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação. Tese (doutorado) apresentada à Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo. 1996.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; CINCOTTO, M. A.; DJANIKIAN, J. G. “Microestrutura da interface argamassa/tijolo cerâmico”, In: II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Salvador, Abril de 1997.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L.M. Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 4, Brasília, 23 a 25 de maio de 2001. Anais. Brasília, PECC/ANTAC, 2001. p.43-67.

CARASEK, H.; DJANIKIAN, J. G. Aderência de argamassa à base de cimento Portland a unidades de alvenaria. São Paulo, 1997. Boletim técnico (BT/PCC /179) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CARVALHO JÚNIOR, A. N. “Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico”, Tese de D. Sc., Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2005.

COSTA, E. B .C. “Análise de parâmetros influentes na aderência de matrizes cimentícias”, Tese de D. Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2014.

EUROPEAN STANDARD. Adhesives for tiles - Determination of transverse deformation for cementitious adhesives and grouts. EN 12002. London. 2008.

FIORITO, A.J.S.I. Manual de argamassas e revestimentos: Estudos e procedimentos de execução. São Paulo. 1994.

GALLETTO, A.; ANDRELLO, J.M. Patologia em fachadas com revestimentos cerâmicos. In: IX Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras, João Pessoa, PB, Brasil, 2013.

GELEST, Inc. Silane Coupling Agents - Connecting Across Boundaries. (3rd Edition). Barry Arkles with selected updates by Annalese Maddox, Mani Singh, Joel Zazyczny, and Janis Matisons, 2014 - Morrisville, PA. Disponível em: <https://www.gelest.com/wp-content/uploads/Goods-PDF-brochures-couplingagents.pdf>

GOLDBERG, R.P. Direct adhered ceramic tile, stone and thin brick facades. Technical Design Manual. USA: Laticrete International, 2010.

GONÇALVES, S. R. de Castro. Variabilidade e fatores de dispersão da resistência de aderência nos revestimentos em argamassa – estudo de caso. Dissertação de mestrado, apresentada à Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Distrito Federal, 2004.

GRANATO, J. E. Patologia das Construções. Apostila. São Paulo, 2002.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION (ISO). Ceramic tiles – ISO 10545 - Part 10: Determination of moisture expansion. BSI. 2014.

\_\_\_\_\_. Ceramic tiles -- Grouts and adhesives – ISO 13007 - Part 1: Terms, definitions and specifications for adhesives.. 2010.

\_\_\_\_\_. Ceramic tiles -- Grouts and adhesives - ISO 13007 - Part 2: Test methods for adhesives. 2015.

JUNGINGER, M. Rejuntamento de revestimentos cerâmicos: influência das juntas de assentamento na estabilidade de painéis. Dissertação (mestrado) apresentada à Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo, 2003.

LEE, R.; YUAN, Y. Contact Angle and Wetting Properties. Springer Series in Surface Sciences 51, DOI 10.1007/978-3-642-34243-1\_1. Department of Chemistry, University of Houston, 2013.

MANSUR, A. A. P. “Mecanismos Físico Químicos de Aderência na Interface Argamassa Modificada com Polímeros/Cerâmica de Revestimento”, Tese de D. Sc., Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2007.

MANSUR, A. A. P.; NASCIMENTO, O. L. do N.; VASCONCELOS, W. L.; MANSUR, H. S. “Chemical Functionalization of Ceramic Tile Surfaces by Silane Coupling Agents: Polymer Modified Mortar Adhesion Mechanism Implications”. Materials Research, v. 11, n. 3, pp. 293-302, Jul-Sept. 2008.

MARANHÃO, F. L. Método para redução de mancha nas vedações externas de edifícios. Tese (doutorado) apresentada à Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo, 2009.

MATSUSATO, M. Estudo do comportamento de argamassas colantes com aditivação de látex acrílico. Dissertação (mestrado) apresentada à Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo, 2007.

MEDEIROS, J. S.;SABATTINI, F. H. “Tecnologia de Revestimentos Cerâmicos de Fachadas de Edifícios”, In: Boletim Técnico, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1999.

MEDEIROS, Jonas S. Tecnologia e projeto de revestimento cerâmico de fachada de edifícios. 1999. 457p. Tese (doutorado) apresentada à Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo. 1999.

MENEZES, R.R., SEGADAES, A.M., FERREIRA, H.S. et al. Análise da expansão por umidade e absorção de água de pisos cerâmicos comerciais em relação à composição química e à quantidade estimada de fase vítrea. *Cerâmica*, Apr/june. 2003, vol. 49, n° 310, p.72-81. São Paulo, 2003.

OHAMA, Y. Polymer-based Admixtures. *Cement and Concrete Composites*, v. 20, p. 189-212, 1998.

PEREIRA, E.; SILVA, I. J.; COSTA, M. do R. de M. M. da. Avaliação dos mecanismos de aderência entre argamassa colante e substrato não poroso. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 139-149, abr./jun. 2013.

RECUM, A. F. V.; SHANNON, C. E.; CANNON, C. E. Surface Roughness, Porosity and Texture as Modifiers of Cellular Adhesion. *Tissue Engineering* 2, 241 – 253 (1996).

SARAIVA, A. G. et al. Análise das Tensões entre Argamassa Colante e Placas Cerâmicas Submetidas a Esforços de Natureza Térmica. In: IV Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Brasília, 2001.

SELMO, S. M. S.; MORENO JUNIOR, R. Aderência de argamassas de reparo de estruturas de concreto. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*. São Paulo, 2007.

SHAW, D. J. Introdução à química dos colóides e de superfícies; tradução: Juergen Heinrich Maar. São Paulo, Edgard Blücher, Editora da Universidade de São Paulo, 1975.

URBAN, Dieter; TAKAMURA Koichi. Polymer Dispersions and Their Industrial Applications. USA: WILEY-VCH. 408p. 2005.

WACKER, Wacker Chemie AG, SILRES® BS 16, Disponível em: <https://www.wacker.com/cms/en/products/product/product.jsp?product=10081>.

WACKER, Wacker Chemie AG, SILRES® BS 1701, Disponível em: <https://www.wacker.com/cms/en/products/product/product.jsp?product=10082>.

WATSON, J. A.; HU, H.M.; CRIBB, B. W.; WATSON, G. S.; Anti-Wetting on Insect Cuticle – Structuring to Minimise Adhesion and Weight, On Biomimetics, Dr. Lilyana Pramatarova (Ed.), InTech, 2011.

WU, S. Polymer interface and adhesion, 1 ed. New York, M. Dekker, 1982.