

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
CONSTRUÇÃO CIVIL - PPGECC

**EDUARDO PEREIRA**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DE  
ARGAMASSAS COLANTES NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA  
DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS APLICADOS NO  
ASSENTAMENTO DE PISO SOBRE PISO**

**CURITIBA**

**2012**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
CONSTRUÇÃO CIVIL - PPGECC

**EDUARDO PEREIRA**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DE  
ARGAMASSAS COLANTES NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA  
DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS APLICADOS NO  
ASSENTAMENTO DE PISO SOBRE PISO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós  
Graduação em Engenharia da Construção  
Civil da Universidade Federal do Paraná  
para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia de Construção Civil com Área de  
Concentração em Materiais e Estruturas.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Marianne do Rocio  
de Mello Maron da Costa.

Co-orientador: Dr. Isac José da Silva.

**CURITIBA**

**2012**

# **TERMO DE APROVAÇÃO**

EDUARDO PEREIRA

## **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS COLANTES NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS APLICADOS NO ASSENTAMENTO DE PISO SOBRE PISO**

Dissertação aprovada como requisito para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil - PPGECC, Área de concentração em Materiais e Estruturas, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná - UFPR, pela seguinte banca examinadora:

### **BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa  
Universidade Federal do Paraná  
(Orientadora)

---

Dr. Isac José da Silva  
Votorantim Cimentos  
(Co-orientador)

---

Prof. Dr. Leonardo Fagundes Rosembach Miranda  
Universidade Federal do Paraná  
(Examinador)

---

Prof. Dr. José Alberto Cerri  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(Examinador)

Curitiba, 16 de fevereiro de 2012

Pereira, Eduardo

Estudo da influência das propriedades de argamassas colantes na resistência de aderência de revestimentos cerâmicos aplicados no assentamento de piso sobre piso / Eduardo Pereira – Curitiba, 2012.

174 f.: il., tab., grafs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil.

Orientadora: Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa

Coorientador: Isac José da Silva

1. Argamassa - Adesivos. 2. Revestimentos – Cerâmica..  
I Costa, Marianne do Rocio de Mello Maron da. II. Silva, Isac José da.  
III. Título.

CDD: 691.5

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais Valdir Rodrigues Pereira e Lucia Aparecida Pereira pelo apoio em todas as etapas deste trabalho, pela compreensão de que a minha ausência era necessária e que apesar disto mantiveram-se presentes em todos os momentos.

Ao Gabriel Ferreira Barcelos, pelo companheirismo e atenção dedicados durante todo o período de execução do trabalho.

Um agradecimento especial à professora Marienne do Rocio de Mello Maron da Costa que orientou este trabalho de maneira muito presente.

Ao Isac José da Silva pela coorientação e tempo dedicado a este trabalho.

Aos meus amigos de UFPR pela amizade e atenção: Vanessa Vogt, Liamara Paglia Sestrem, Luis Fernando Moreira, Carlos Gustavo M. Nastari, Francielle Rocha, Alessandra França, Alécio Júnior Mattana, Marcelo H. F. de Medeiros.

Aos alunos de iniciação científica que ajudaram em todas as fases de execução deste trabalho: Silvano Ferrari e Lucas Peres de Souza.

Aos técnicos do laboratório de argamassas colantes da Votorantim Cimentos: Leidimara Aparecida Martins, José Rossa Júnior, Márcio José Jacob Alves dos Santos, Wagner Jefferson dos Santos, Marco Antônio Fuliotti.

Ao laboratório de microscopia eletrônica da UFPR e ao Prof. Ney Pereira Mattoso Filho, pelo auxílio na preparação das amostras e aquisição de imagens em microscopia. Ao Laboratório de análise de minerais e rochas – LAMIR/ UFPR pelo auxílio em ensaios de DRX e FRX e por fim, a Prof. Maria Alba Cincotto - USP pela ajuda com os ensaios de calorimetria em seus laboratórios.

A Votorantim Cimentos pelo financiamento desta pesquisa, além de liberação de uso de seus laboratórios e campo de testes.

*"As pessoas têm medo de mudar, de pensar que as coisas podem mudar. O mundo não é feito somente de coisas ruins! Mas é difícil pra quem se acostumou com as coisas como elas são. Mesmo que sejam ruins elas não mudam ... Quando isso acontece todo mundo sai perdendo"... "Certo ou errado, o caminho que escolheu é seu... aparentemente pensarás que tomou a decisão errada... Mas Não, pode ter certeza que tirará valiosas lições para seguir o caminho" (A corrente do bem e Alice nos pais das maravilhas).*

## RESUMO

Um sistema de revestimento cerâmico usual é o resultado do assentamento de uma placa cerâmica sobre um substrato formando um conjunto de camadas aderido e contínuo. Este trabalho aborda a resistência de aderência de revestimentos assentados através da técnica de piso sobre piso, que consiste no assentamento de uma nova camada cerâmica, utilizando-se argamassa colante especial para esta aplicação, em sobreposição a um sistema de revestimento cerâmico já existente. A durabilidade do revestimento como solução na construção civil dependem da eficiência da fixação das peças cerâmicas. A pesquisa e o entendimento do mecanismo de aderência entre a argamassa colante e os substratos são de grande importância, pois grande parte das manifestações patológicas observadas nas obras é devido a falhas nesta propriedade. Dentro deste contexto, este trabalho investigou quais as principais propriedades e características das argamassas colantes que influenciam na aderência entre os componentes do sistema de revestimento cerâmico aplicado no assentamento de piso sobre piso. Para o estudo, o planejamento experimental foi dividido em duas fases. A primeira consistiu na moldagem de piso sobre piso em laboratório, seguindo procedimentos similares aos recomendados pela NBR 14084 (ABNT, 2004) e no assentamento de piso sobre piso em uma área externa na cidade de Curitiba. A segunda fase de trabalho foi planejada de forma a caracterizar a composição e propriedades das argamassas colantes nos estados anidro, fresco e endurecido. Com os valores de resistência de aderência obtidos para as argamassas colantes usadas no assentamento de piso sobre piso somadas a caracterização das argamassas colantes, pôde-se inferir sobre quais características das argamassas colantes estão exercendo maior influência sobre o sistema de revestimento formado a partir desta técnica. Verificou-se que a proporção dos constituintes da argamassa é significativamente influente nos resultados de resistência de aderência. Destaca-se a distribuição granulométrica das argamassas, tipo e teor de cimento e características morfológicas do agregado. No estado fresco a quantidade de água e o teor de ar incorporado nas misturas influencia o comportamento das argamassas, quanto a trabalhabilidade das misturas. Pode-se verificar através das imagens em MEV a influência do estado fresco sobre a extensão de aderência das argamassas sobre os pisos cerâmicos. Verificou-se também uma concentração de diversos compostos hidratados nesta região, com destaque para a presença de C-S-H. Atribui-se a este composto a resistência de aderência nesta região.

## ABSTRACT

An usual ceramic tile system is the result of application of a ceramic tile on a substrate, forming a set of adhered and continuous layers. This paper investigates the adhesion strength of ceramic tiles coatings applied using the technique of "tile on the tile". This technique consists in the settlement of a new ceramic layer, using special adhesive mortar for this application, superimposed on a existing system ceramic tile. The durability of ceramic tiles coatings in building construction depend on the efficiency of the fixing of ceramic tiles. Within this context, this study investigated what are the main properties and characteristics of the adhesive mortar that influence the adhesion between the components of the ceramic coating system applied in the settlement of "floor on the floor". Understanding the mechanism of adhesion between the adhesive mortar and substrates are of great importance, because most of the pathological manifestations observed in the site is due to failures in this property. For the study, the experimental design was divided into two step. The first step was the molding of "floor on the floor" in the laboratory, following procedures similar to those recommended by the NBR 14084 (ABNT, 2004) and the application of "floor on the floor" in an outdoor area in Curitiba - Brazil. The second step of work was to characterize the composition and properties of the adhesive mortar in the anhydrous, fresh and hardened state. With the values of adhesion strength and the results of characterization of mortars adhesive, can be discussed about which characteristics of the mortars adhesive influence performance "floor on the floor" ceramic tile system. It was found that the proportion of the constituents of the adhesive mortar issignificantly influential on the results of adhesion strength. There is the size distribution of mortars, type cement and morphological characteristics of the sand. The amount of water and entrained air in the mixture influence the behavior of fresh mortars. The behavior of fresh mortar influences the widely adherence of the interface between the ceramic tile and the adhesive mortar. This can be verified by images in scanning electron microscopy (SEM). There was also a concentration of several hydrated compounds in this region, especially the presence of C-S-H. Attributed to adhesion strength in this compound.

# SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE TABELAS .....	xiii
LISTA DE ABREVIACÕES .....	xiv
1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivo .....	20
1.2 Justificativas .....	20
2 ARGAMASSAS COLANTES.....	24
2.1 Comportamento reológico das argamassas colantes .....	25
2.2 Adesão inicial .....	32
2.3 Tempo em aberto .....	33
2.4 Retenção de água.....	34
2.5 Resistência de aderência.....	36
2.5.2 Influência de agentes externos na resistência de aderência .....	42
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1 Planejamento experimental.....	46
3.2 Variáveis de estudo.....	48
3.3 Estudo da resistência de aderência no assentamento de piso sobre piso .....	49
3.3.1 Piso sobre piso assentado em laboratório .....	50
3.3.2 Piso sobre piso assentado em área externa .....	55
3.4 Caracterização das argamassas colantes industrializadas.....	58
3.4.1 Caracterização da composição das argamassas colantes .....	59
3.4.2 Ensaios de caracterização no estado fresco .....	69
3.4.3 Análise de imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por dispersão de energia de raios-X (EDS).....	74
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	80

4.1	Caracterização da composição das argamassas colantes .....	80
4.1.1	Proporção dos constituintes da argamassa colante .....	80
4.1.2	Caracterização do cimento utilizado nas argamassas colantes .....	83
4.1.3	Caracterização das areias utilizadas nas argamassas colantes .....	86
4.1.4	Análise granulométrica da argamassa colante .....	87
4.1.5	Análise morfológica das areias das argamassas colantes .....	92
4.2	Caracterização das argamassas no estado fresco .....	94
4.2.1	Densidade de massa fresca e teor de ar incorporado .....	94
4.2.2	Squeeze Flow .....	96
4.2.3	Retenção de água .....	102
4.2.4	Tempo em aberto .....	105
4.3	Análise de imagens por microscopia .....	107
4.4	Resistência de aderência de revestimentos do tipo piso sobre piso.....	117
4.4.1	Resistência de aderência em laboratório.....	118
4.4.2	Resistência de aderência de revestimentos do tipo piso sobre piso assentados em ambiente externo.....	122
4.4.3	Comparação entre os valores de resistência de aderência (laboratório versus campo) .....	129
5	CONCLUSÕES .....	135
5.1	Sugestões para trabalhos futuros .....	137
	REFERÊNCIAS .....	138
	ANEXOS .....	146
	Anexo I – Tipos de ruptura possíveis no sistema de revestimento cerâmico do tipo piso sobre piso submetido ao ensaio de resistência de aderência .....	147
	Anexo II – Curvas TG/DTG das argamassas colantes .....	149
	Anexo III – Imagens das areias das argamassas colantes obtidas em microscópio óptico .....	152

Anexo IV – Análise de variância (ANOVA) – Tempo em aberto .....	155
Anexo V – Planilha de ensaio de resistência de aderência - laboratório.....	157
Anexo VI – Análise de variância (ANOVA) – Resistência de aderência em laboratório .....	166
Anexo VII – Planilha de ensaios de resistência de aderência – área externa .....	168
Anexo VIII – Análise de variância (ANOVA) – Resistência de aderência em assentamento em ambiente externo .....	173

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Venda de revestimentos cerâmicos no mercado brasileiro (ANFACER, 2011). .....	15
Figura 2: Sistema de revestimento cerâmico assentado de piso sobre piso. ....	16
Figura 3: Assentamento de piso sobre piso: (a) Formação dos cordões; (b) Execução de dupla colagem; (c) Amassamento dos cordões e; (d) limpeza das juntas. ....	17
Figura 4: Etapas da resistência de aderência. ....	18
Figura 5: Fatores que exercem influência na resistência de aderência de argamassas colantes (adaptado de Carasek, 2007). ....	19
Figura 6: Movimento financeiro, em milhões de reais, da indústria de argamassas (SINAPROCIM, 2011). ....	21
Figura 7: Representação da microestrutura da argamassa colante (adaptado de COSTA, 2006). ....	25
Figura 8: Comportamento da tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento (HUNTER, 2001; BAUER, 2005). ....	27
Figura 9: Ilustração esquemática de duas argamassas distintas com comportamento de fluidos de Bingham (BANFILL, 2005, CARDOSO, 2009). ....	28
Figura 10: (a) Máquina universal de ensaios EMIC utilizada no ensaio Squeeze Flow; (b) Configuração do molde partido com diâmetro de 50,8 mm e (c) Configuração do molde restritivo e punção com diâmetro de 101 mm (KUDO et al.; 2011). ....	30
Figura 11: Perfil típico de carga versus deslocamento de um ensaio de Squeeze Flow realizado com deslocamento controlado (CARDOSO, 2009). ....	31
Figura 12: Funil de Büchner modificado. ....	36
Figura 13: Representação esquemática do mecanismo de aderência entre argamassa e substrato cerâmico (adaptado de CARASEK, 1996). ....	38
Figura 14: Ações solicitantes sobre os pisos devido a variações térmicas (Baseado em FIORITO, 2009; ANTUNES, 2010; WETZEL <i>et al.</i> , 2012). ....	43
Figura 15: Mecanismo de falha de aderência causado por ciclos de molhagem e secagem (adaptado de HERWEGH; WETZEL <i>et al.</i> , 2010) ....	44
Figura 16: Fases do planejamento experimental. ....	47
Figura 17: Variáveis de análise. ....	49
Figura 18: Esquema da adaptação do ensaio de resistência de aderência em laboratório. .....	50
Figura 19: Moldagem dos pisos de referência. ....	51
Figura 20: Moldagem das pastilhas cerâmicas para ensaio de resistência de aderência. ....	51
Figura 21: Cura em ambiente externo. ....	53
Figura 22: Ensaio de resistência de aderência em laboratório. (a) Equipamento e (b) Detalhes das dez pastilhas de metal já coladas sobre as placas cerâmicas para o ensaio. ....	53

Figura 23: Planilha de ensaio de resistência de aderência em laboratório. ....	54
Figura 24: Área de testes antes do assentamento dos pisos.....	56
Figura 25: (a) Mistura da argamassa colante; (b) Misturador mecânico.....	56
Figura 26: Etapa do assentamento de piso sobre piso. ....	57
Figura 27: Ensaio de resistência de aderência: (a) Corte das placas; (b) Colagem das pastilhas; (c) Posicionamento do equipamento de arrancamento e; (d) Detalhe do piso após o ensaio.....	58
Figura 28: Técnicas empregadas para caracterização da composição das argamassas colantes e suas principais funções. ....	59
Figura 29: Análise química das argamassas colantes: (a) Pesagem da amostra e (b) Do solvente; (c) Homogeneização e dissolução da amostra; (d) Filtragem e (e) Secagem do filtrado; (f) Calcinação. ....	60
Figura 30: Equipamento Philips, modelo Magix Pro, utilizado para execução do ensaio de fluorescência de raios-X. ....	61
Figura 31: Arranjo básico de um difratograma de raios- X (GEMELLI, 2001). ....	62
Figura 32: Difratômetro de raios-X, marca Philips, modelo X' Pert. ....	62
Figura 33: Representação esquemática da curva de calor de hidratação e critérios para interpretação dos resultados (Lyra, 2010). ....	65
Figura 34: Microscópio com câmera acoplada (LAMIR, 2012). ....	67
Figura 35: Avaliação visual do grau de esfericidade e de arredondamento de materiais naturais para utilização como agregado (NBR 7389-1 (2009) baseada em Power (1953)). ....	68
Figura 36: (a) imagens das areias obtidas em microscópio óptico; (b) binarização das imagens em AutoCad. ....	69
Figura 37: Ensaio do tempo em aberto.....	70
Figura 38: (A) Detalhes das espessuras das camadas de argamassa colante; (B) Pratos com argamassa colante para ensaio de retenção de água. ....	72
Figura 39: Ensaio de Squeeze Flow em argamassa colante: (a) execução do ensaio; (b) patamar de compressão e (c) patamar de tração durante o ensaio.....	73
Figura 40: Amostras de piso sobre piso retiradas do campo de testes. ....	75
Figura 41: Obtenção de amostras para microscopia utilizando-se uma serra policorte de precisão.....	76
Figura 42: Resina polimérica utilizada para o embutimento.....	76
Figura 43: Embutimento das amostras: (a) Posicionamento da amostra no molde; (b) Embutimento com a resina e; (c) Retirada da amostra do molde.....	77
Figura 44: Preparação das amostras para microscopia: lixamento e polimento.....	78
Figura 45: Preparação das amostras para microscopia: (a) Equipamento utilizado para recobrimento das amostras com ouro; (b) Amostras após o recobrimento. ....	78
Figura 46: Ensaio de Microscopia: (a) Microscópio eletrônico de varredura – MEV de bancada; (b) Porta amostras para o MEV.....	79

Figura 47: Ensaio de Microscopia: (a) Microscópio eletrônico de varredura – MEV associado ao EDS; (b) Porta amostras com as amostras. ....	79
Figura 48: Teor de resíduo insolúvel das argamassas. ....	80
Figura 49: Proporção de materiais que compõem as argamassas.....	82
Figura 50: Fração retida e passante na peneira de abertura de 90 $\mu\text{m}$ (#170) das argamassas colantes.....	83
Figura 51: Curvas de calor liberado na hidratação das pastas de argamassas colantes...84	
Figura 52: Difratoogramas das areias presentes nas argamassas colantes. ....	87
Figura 53: Curvas granulométricas completas das argamassas colantes.....	88
Figura 54: Curvas granulométricas de argamassas colantes (fração passante na peneira 170) obtidas pelo granulômetro a laser. ....	88
Figura 55: Curvas granulométricas de argamassas colantes (fração retida na peneira 170) obtidas por peneiramento. ....	89
Figura 56: Porcentagens retidas em cada peneira.....	90
Figura 57: (a) correlação entre porcentagens retidas de argamassa na peneira 170 e densidade de massa anidra; (b) Correlação entre índice de vazios e densidade de massa nas argamassas anidras. ....	91
Figura 58: Morfologia das areias.....	92
Figura 59: Correlação entre densidade de massa da argamassa anidra e esfericidade das partículas. ....	94
Figura 60: (a) correlação entre densidade de massa anidra e fresca das argamassas colantes; (b) correlação entre teor de ar incorporado e densidade de massa anidra e fresca das argamassas colantes.....	95
Figura 61: Resultados de Squeeze Flow com taxa de cisalhamento de 0,1 mm/s.....	96
Figura 62: Resultados de Squeeze Flow com taxa de cisalhamento de 1,0 mm/s.....	97
Figura 63: (a) correlação entre o teor de ar incorporado nas argamassas após a mistura e as cargas de compressão no Squeeze Flow com taxa de cisalhamento de 0,1 e 1,0 mm/s; (b) correlação entre carga máxima no Squeeze Flow e esfericidade das partículas das argamassas. ....	97
Figura 65: Resultados de Squeeze Flow: carga versus deslocamento com taxa de cisalhamento de 0,1 mm/s. ....	98
Figura 66: Resultados de Squeeze Flow: carga versus deslocamento com taxa de cisalhamento de 1,0 mm/s. ....	99
Figura 67: Formas de ruptura observadas durante o Squeeze Flow: (a) argamassa seca e (b) argamassa fluida. ....	100
Figura 68: Fatores influentes na retenção de água de argamassas colantes: (a) porcentagem de material retido na peneira 170; (b) índice de vazios; (c) densidade de massa anidra e; (d) teor de ar incorporado no estado fresco.....	103
Figura 69: Curvas de retenção de água de argamassas com prato modificado. ....	104
Figura 70: Resultados de Squeeze Flow com velocidade de deslocamento de 1,0 mm/s para argamassas após 20 minutos de repouso. ....	106

Figura 71: Correlação entre as cargas máximas no Squeeze Flow aos 20 minutos e o teor de aditivos identificados na termogravimetria. ....	107
Figura 72: Imagens em microscopia eletrônica de varredura (MEV) do centro das argamassas colantes assentada externamente, com aumento de 540 vezes.....	107
Figura 73: Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos vazios na argamassa.....	109
Figura 74: MEV do vazio da argamassa C.....	109
Figura 75: Espectro de energia obtido pelo MEV-EDS para a argamassa C.....	110
Figura 76: MEV do vazio da argamassa A.....	110
Figura 77: Espectro de energia obtido pelo MEV-EDS para a argamassa A.....	111
Figura 78: Imagens em microscopia eletrônica de varredura (MEV) da interface entre os pisos novos e argamassas colantes assentadas externamente, com aumento de 540 vezes. ....	112
Figura 79: Imagens em microscopia eletrônica de varredura (MEV) da interface entre os pisos antigos e argamassas colantes assentadas externamente, com aumento de 540 vezes. ....	113
Figura 80: Imagens interface argamassa colante B/piso antigo. ....	114
Figura 81: (a) Fratura nas amostras de piso sobre piso na interface com o piso antigo; (b) superfície da argamassa na interface com o piso antigo.....	115
Figura 82: Fases hidratadas formadas nos poros das argamassas na região próxima a interface com o piso antigo.....	115
Figura 83: Hipótese da resistência de aderência em revestimentos de piso sobre piso em comparação ao modelo proposto por Carasek (1996) para revestimentos porosos. ....	117
Figura 84: Valores de resistência de aderência para os diferentes tipos de cura.....	119
Figura 85: Correlação entre propriedades das argamassas e a resistência de aderência de argamassas colantes assentadas sobre um piso de referência: (a) índice de vazios; (b) esfericidade; (c) porcentagem de material passante na peneira 170; (d) densidade de massa anidra; (e) retenção de água e; (f) tempo em aberto. ....	122
Figura 86: Dados de precipitação de chuva na cidade de Curitiba (SIMEPAR, 2011): Detalhe dos dias de execução dos ensaios de resistência de aderência em ambiente externo. ....	123
Figura 87: Evolução da resistência de aderência para as diferentes argamassas ao longo de 12 meses. ....	124
Figura 88: Correlação entre propriedades das argamassas colantes e a resistência de aderência de revestimentos cerâmicos assentados em ambiente externo: (a) porcentagem de material passante na peneira 170 ; (b) densidade de massa anidra; (c) índice de vazios; (d) teor de ar incorporado; (e) retenção de água e; (f) tempo em aberto. ....	125
Figura 89: Correlação entre os componentes das argamassas colantes e a resistência de aderência aos 6 e 12 meses: (a) cimento; (b) agregados; (c) Adição de fíler e; (d) aditivos. ....	126

Figura 90: Temperaturas máximas e mínimas (°C/dias) na cidade de Curitiba durante o período de monitoramento (SIMEPAR, 2011).....	128
Figura 91: Variações de temperatura (°C /dias) na cidade de Curitiba durante o período de monitoramento (SIMEPAR, 2011).....	128
Figura 92: Curvas de comparação dos valores de resistência de aderência obtidos em campo aos 28 dias versus resistência de aderência obtida nos pisos de referência para as diferentes curas.....	129
Figura 93: Correlação entre os valores de resistência de aderência obtidos em laboratório sobre o piso de referência e em ambiente externo aos 28 dias. ....	130
Figura 94: Correlação entre os valores de resistência de aderência aos 28 dias e as cargas máximas obtidas pelo Squeeze Flow com taxa de cisalhamento de 1,0 mm/s e 0 minutos de maturação. ....	132
Figura 95: Argamassa A: Curvas TG e DTG. ....	150
Figura 96: Argamassa B: Curvas TG e DTG. ....	150
Figura 97: Argamassa C: Curvas TG e DTG. ....	151
Figura 98: Argamassa D: Curvas TG e DTG. ....	151

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Requisitos mínimos para as argamassas colantes.....	24
Tabela 2: Relação de Laboratório onde foram executados os ensaios. ....	47
Tabela 3: Especificação conforme dados das embalagens das argamassas colantes. ....	52
Tabela 4: Resultados de controle do rejunte utilizado na pesquisa (LATICRETE, 2011). .....	57
Tabela 5: Relação entre perda de massa e temperatura no ensaio de Termogravimetria. .....	64
Tabela 6: Compostos identificados por termogravimetria das argamassas colantes (%). .....	81
Tabela 7: Proporção entre os materiais na composição das argamassas. ....	81
Tabela 8: Ensaio de Fluorescência de Raios-X das argamassas colantes. ....	84
Tabela 9: Ensaio de Fluorescência de Raios-X das areias. ....	86
Tabela 10: Massa específica e índice de vazios nas argamassas anidras. ....	91
Tabela 11: Resumo das características morfológicas das areias. ....	93
Tabela 12: Resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado nas argamassas. .....	95
Tabela 13: Retenção de água em argamassas colantes aos 15 minutos (%) .....	102
Tabela 14: Tempo em aberto segundo a NBR 14083 (ABNT, 2004). ....	105
Tabela 15: Ensaio de resistência de aderência para diferentes curas. ....	118
Tabela 16: Resistência de aderência de piso sobre piso – Área de testes.....	123
Tabela 17: Proposta de requisitos mínimos de resistência de aderência para as argamassas colantes aplicadas no assentamento de piso sobre piso.....	133

## **LISTA DE ABREVIACÕES**

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC: Argamassa Colante

ANFACER: Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmicas

ANOVA: Análise de Variância

CB NBR: Comissão Brasileira de Normatização

CP: Cimento Portland

CSH: Silicato de Calcio Hidratado

DRX: Difração de Raios-X

DTG: Derivada da Termogravimetria

EDS: Dispersão de Energia de Raios-X

FRX: Fluorescência de raios-X

ISO: International Organization for Standardization

MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura

MPa: Mega Pascal

NBR: Norma Brasileira

PBQP-H: Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat

SBTA: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas

SINAPROCIM: Sindicato Nacional das Indústrias dos Produtos de Cimento

TG: Termogravimetria

#: Peneira ou mash

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, acompanhando a evolução do mercado, a indústria de materiais cerâmicos, que durante muitos anos sobreviveu de forma artesanal, adotou a produção em massa de seus produtos, garantida pela indústria de equipamentos, e a introdução de técnicas de gestão, incluindo o controle de matérias-primas, dos processos e dos produtos fabricados (ANFACER, 2011).

O Brasil é hoje, em parte devido à industrialização do setor, um dos grandes produtores e também consumidores mundiais de revestimento cerâmico. O país é o segundo maior produtor e consumidor mundial de placas para revestimentos, quinto maior exportador mundial e segundo maior exportador para o mercado norte-americano, que é o maior importador do mundo (ANFACER, 2011). No ano de 2010, o país atingiu a marca de 699,5 milhões de m<sup>2</sup> de revestimentos cerâmicos vendidos somente no mercado interno brasileiro (Figura 1).

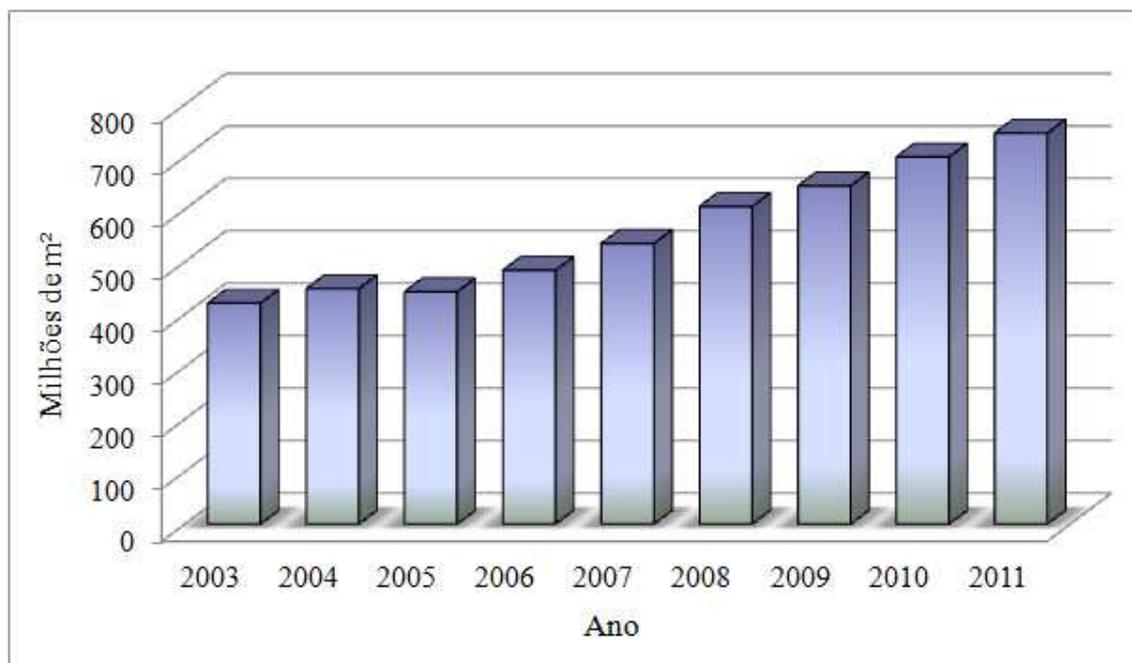


Figura 1: Venda de revestimentos cerâmicos no mercado brasileiro (ANFACER, 2011).

Na medida em que cresce a produção e a utilização da cerâmica no Brasil para revestir pisos e paredes, exige-se também dos fabricantes de argamassas colantes o desenvolvimento de formulações que atendam a esta demanda, por meio de produtos que satisfaçam os quesitos de desempenho exigidos para este material.

Um sistema de revestimento cerâmico usual é o resultado do assentamento de uma placa cerâmica sobre uma base ou substrato, com a utilização de argamassa colante, formando um conjunto de camadas aderido e contínuo. A técnica de aplicação de piso sobre piso consiste no assentamento de uma nova camada cerâmica, utilizando-se argamassa colante especial para este tipo de aplicação, em sobreposição a um sistema de revestimento cerâmico já existente. A Figura 2 apresenta um esquema da disposição de um sistema de revestimento piso sobre piso.

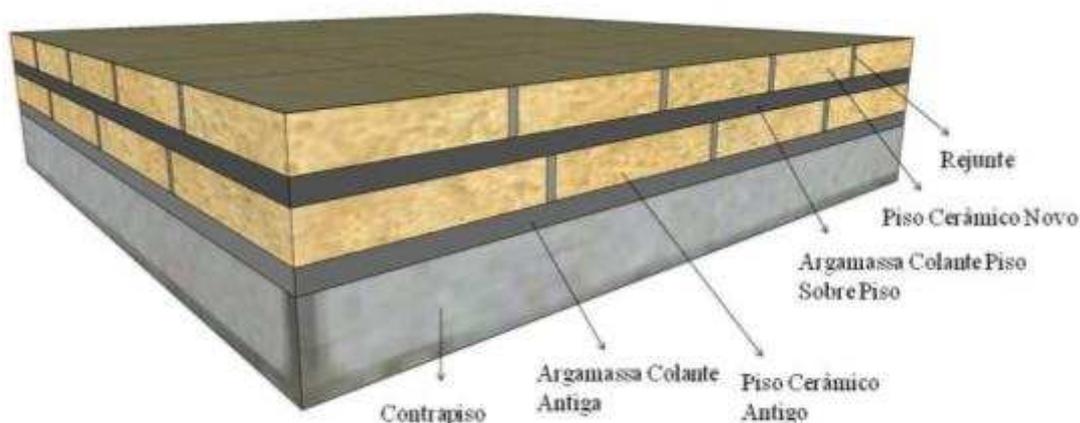


Figura 2: Sistema de revestimento cerâmico assentado de piso sobre piso.

A aplicação de uma nova camada de revestimento em sobreposição a um piso já existente apresenta a vantagem de não ser necessária a retirada do piso antigo para assentamento de um novo revestimento, evitando-se assim sujeira, barulho, resíduos e outros incômodos inerentes de uma reforma em que são utilizados os processos convencionais. Além da redução de entulhos, existe ainda a vantagem do menor tempo necessário para a liberação da área interditada, o que racionaliza o tempo necessário para execução dos serviços (EQUIPE DE OBRA, 2010).

Ao optar-se pelo assentamento de piso sobre piso, alguns cuidados devem ser tomados. O assentamento das novas placas deverá ser executado utilizando a técnica de dupla colagem, uma vez que a resistência de aderência neste tipo de aplicação pode ser prejudicada caso não se obtenha uma extensão de aderência satisfatória na interface formada pela argamassa colante e as peças cerâmicas. A superfície que receberá a placa deve ser regularizada e limpa, além de proceder-se a retirada de placas do piso antigo que estiverem soltas (EQUIPE DE OBRA, 2010).

Um cuidado pode ser tomado quanto ao posicionamento das placas novas em relação às antigas. Posicionar as placas novas sobre o rejuntamento das placas antigas contribui com o aumento da aderência do novo sistema de revestimento cerâmico formado. Outro ponto relevante que deve ser previsto no projeto diz respeito a alguns detalhes construtivos, como a presença de ralos e portas, uma vez que o assentamento destas novas camadas provocará o aumento do nível do piso antigo. E por último, o projeto estrutural do ambiente deve suportar a sobrecarga apresentada pela nova camada de revestimento.

Para aplicação da técnica, espalha-se a argamassa no estado fresco sobre a superfície a ser assentada e com uma desempenadeira dentada procede-se a formação dos cordões (Figura 3a). Como já foi citado, deve-se proceder a dupla colagem, que consiste em aplica argamassa não somente na base, mas também no tardo da placa cerâmica a ser colada (Figura 3b). Utiliza-se para o amassamento dos cordões um martelo de borracha (Figura 3c). O som da batida do martelo ajuda a identificar possíveis pontos sem presença de argamassa. Por fim retira-se o excesso de argamassa entre as juntas e nos cantos (Figura 3d) para posteriormente executar-se o rejuntamento dos pisos.



Figura 3: Assentamento de piso sobre piso: (a) Formação dos cordões; (b) Execução de dupla colagem; (c) Amassamento dos cordões e; (d) limpeza das juntas.

A durabilidade e a viabilidade do revestimento cerâmico como solução na construção civil dependem da fixação das peças cerâmicas. No entanto, não se deve esquecer que as condições ambientais, a especificação da cerâmica, a mão-de-obra de aplicação, as solicitações variáveis de uso e a qualidade do rejuntamento influem também na vida útil do revestimento cerâmico (THURLER; FERREIRA, 1995).

A resistência de aderência entre as diferentes camadas de um sistema de revestimento é umas das propriedades mais importantes do conjunto, quanto à qualidade e durabilidade (THURLER; FERREIRA, 1995). Tendo em vista os mecanismos de ligação, pode-se concluir que quanto melhor for o contato entre a argamassa colante e o substrato, maior será a aderência obtida.

O mecanismo de aderência de uma argamassa pode ser dividido em duas etapas diferentes, mas que estão intrinsecamente e inseparavelmente relacionadas, sendo estas a adesão inicial e a aderência. A adesão inicial se dá no momento em que a argamassa é aplicada e a aderência propriamente dita é a que se desenvolve ao longo do processo de hidratação dos aglomerantes da argamassa (MORENO JUNIOR e SELMO, 2007; STOLZ, 2011).



Figura 4: Etapas da resistência de aderência.

Segundo a NBR 13528 (ABNT, 2010) a aderência não é uma propriedade exclusiva da argamassa colante, mas sim, da interação entre as camadas constituintes do sistema de revestimento. Esta propriedade depende essencialmente da composição e reologia das argamassas, da natureza e características do substrato no qual a argamassa colante será aplicada, das condições de exposição e também dos procedimentos de assentamento do revestimento (CANDIA; FRANCO, 2000; CARASEK, 2007). A Figura 5 apresenta um esquema dos fatores que influenciam a resistência de aderência da interface argamassa colante/ placas cerâmica no assentamento de piso sobre piso.

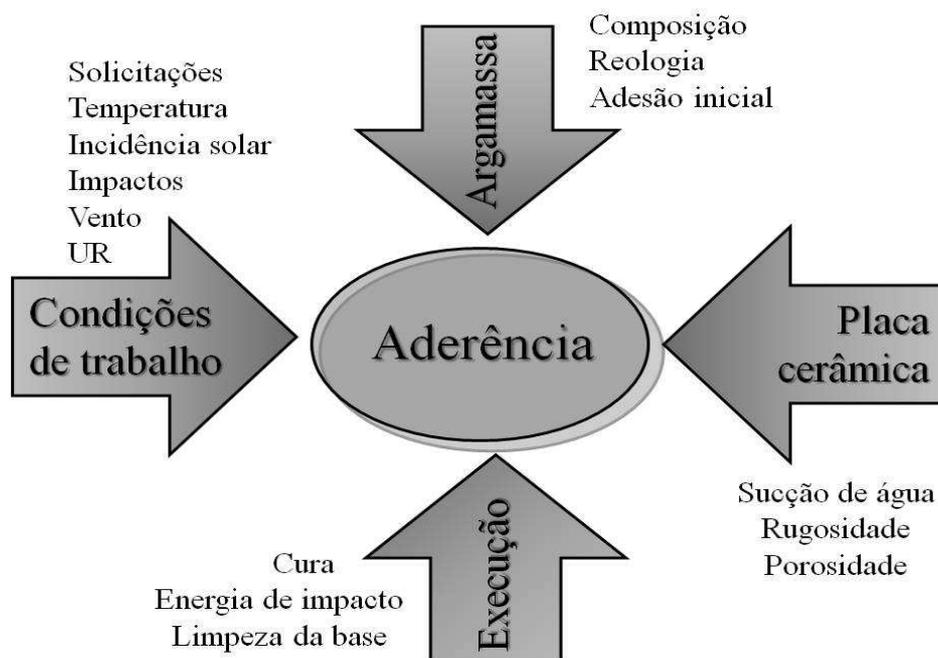


Figura 5: Fatores que exercem influência na resistência de aderência de argamassas colantes (adaptado de Carasek, 2007).

Segundo Silva (2003), o descolamento da placa cerâmica é, sem dúvida, a manifestação patológica mais importante que o revestimento cerâmico pode apresentar, preocupando muito mais pela segurança dos usuários, do que pelo aspecto estético comprometido. Descolamentos são presenciados nas mais diversas situações de uso da combinação de argamassa colante e substratos, principalmente em situações onde estes materiais ficam sujeitos às intempéries, como no caso de aplicações externas, ou locais com umidades excessivas, como é o caso de piscinas e banheiros (BAUER, 2005).

Apesar do desenvolvimento da indústria de cerâmica e dos procedimentos de colagem das peças, os problemas relacionados com o deslocamento de revestimento são ainda hoje uma manifestação patológica grave e frequente, registrada tanto nos primeiros anos de utilização, quer após longos períodos (SÁ, 2005). A durabilidade e consequente viabilidade do revestimento cerâmico como solução na construção civil dependem basicamente da fixação das peças cerâmicas ao substrato (THURLER; FERREIRA, 1995), o que torna a discussão e o estudo do tema imprescindível.

A pesquisa e o perfeito entendimento do mecanismo de aderência entre os diferentes materiais que constituem o sistema de revestimento cerâmico de piso sobre piso e os fatores intervenientes nesta ligação são importantes, pois grande parte das manifestações patológicas observadas é devida a falhas nessa aderência.

A técnica de assentamento de piso sobre piso é ainda recente e o conhecimento sobre as propriedades do conjunto assentado necessita investigações mais detalhadas. As informações disponíveis na literatura referem-se aos sistemas de revestimento cerâmico usuais, formado basicamente por substrato poroso/argamassa colante/revestimento, não levando em consideração a interação da argamassa colante sobre um substrato não poroso, como é o caso de superfícies esmaltadas. Além disto, poucos trabalhos abordam a evolução da resistência de aderência ao longo do tempo, sendo apenas apresentados dados de ensaios laboratoriais aos 28 dias.

## **1.1 Objetivo**

Este trabalho tem como objetivo investigar quais as principais propriedades e características das argamassas colantes que influenciam na aderência entre os componentes do sistema de revestimentos cerâmicos aplicados no assentamento de piso sobre piso.

## **1.2 Justificativas**

A indústria brasileira de produtos cerâmicos tem grande participação no PIB do país, representando cerca de 1,0% do total. Deste total aproximadamente 27% refere-se à produção de revestimentos cerâmicos destinados ao assentamento de pisos e azulejos (BUSTAMENTE; BRESSIANI, 2000). O considerável crescimento da indústria cerâmica levou a um crescimento proporcional do uso das argamassas colantes. Estima-se que o consumo médio seja de 3 milhões de toneladas/ano, valor calculado por meio de uma correlação entre consumo de argamassa colante por metro quadrado de revestimento executado.

Além da importância econômica do setor de revestimentos cerâmicos e de argamassas colantes, percebe-se também uma preocupação com a qualidade dos materiais utilizados na execução do revestimento cerâmico. Tal fato pode ser constatado pela inclusão das placas cerâmicas e da argamassa colante na cesta básica de materiais do Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat – PBQP-H, que objetiva combater a utilização de materiais em não-conformidade com as normas técnicas (SILVA, 2003).

Os dados fornecidos pelo Sindicato Nacional das Indústrias dos Produtos de Cimento – SINAPROCIM e expostos no gráfico da Figura 6 permitem visualizar como o crescimento do mercado de argamassas está se desenvolvendo.

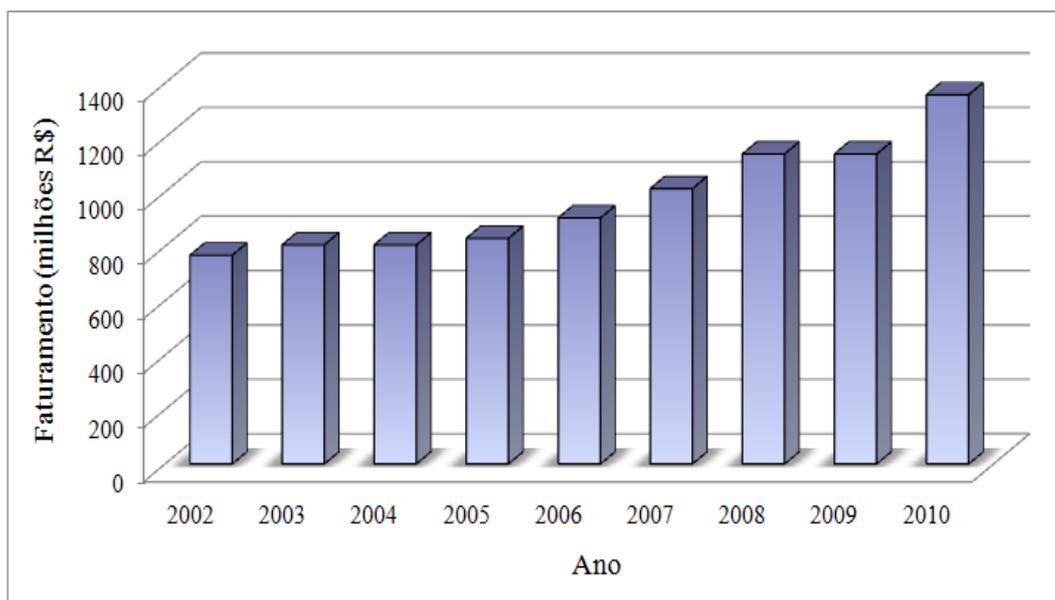


Figura 6: Movimento financeiro, em milhões de reais, da indústria de argamassas (SINAPROCIM, 2011).

O estudo das argamassas colantes difere do estudo de argamassas de revestimento, pois encontra uma problemática maior, entretanto, é observado maior número de trabalhos sobre argamassas de revestimentos (ALMEIDA, 2005). As diferenças encontram-se principalmente nos tipos de solicitações as quais as argamassas estarão submetidas e quanto às variações em suas formulações, uma vez que a carga de aditivos nas argamassas colantes é significativamente maior do que nas argamassas convencionais.

Os trabalhos científicos desenvolvidos no Brasil na área de argamassas colantes começaram a surgir a partir de 1995 com o I Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas (SBTA), realizado em Goiânia, porém somente em 1998 é que foram aprovados e publicados os primeiros projetos de norma para este tipo de argamassa. Até então, apenas a aderência era discutida nos estudos e ainda assim sem foco científico, sendo o estado endurecido abordado e o estado fresco delegado a um segundo plano (COSTA, 2006).

O estudo das propriedades das argamassas colantes no estado fresco tem sido muito discutido no meio científico principalmente devido à necessidade de métodos que

possibilitem a avaliação do seu real comportamento e ao mesmo tempo relacioná-lo com parâmetros usuais como trabalhabilidade, consistência, entre outros.

No contexto exposto, o estudo do comportamento reológico das argamassas colantes apresenta-se como uma alternativa viável para avaliação destas propriedades, pois seus resultados comprovadamente apresentam uma estreita relação com o comportamento real das misturas em obra. No caso de assentamento de revestimentos cerâmicos, a reologia irá definir a facilidade de assentamento das argamassas colantes, bem como a facilidade destas se conformarem à superfície do substrato, o que influenciará na resistência de aderência do sistema de revestimento.

Embora as argamassas colantes industrializadas tenham sua comercialização consolidada e em plena expansão, a pesquisa sobre suas propriedades ainda merece atenção especial. Pereira et al., (2005) afirmam que o conhecimento das propriedades dos substratos, argamassas e revestimentos, e principalmente a capacidade de bem avaliar a interação entre a argamassa colante e o substrato são preceitos básicos para se construir revestimentos eficientes e duráveis.

Sendo a técnica de colagem de placa sobre placa recente, estudos sobre a interação do sistema de revestimento cerâmico formado pela sobreposição de placas de revestimento se fazem necessários, pois ainda surgem dúvidas quanto ao desempenho do conjunto quando a argamassa colante é assentada sobre pisos antigos com diferentes características superficiais, principalmente em aplicações externas, onde o conjunto estará submetido as mais diversas intempéries, como chuva, ventos e insolação.

A quantidade de manifestações patológicas de descolamento de placas em pisos cerâmicos tem aumentado nos últimos anos (WETZEL et al., 2010). Pesquisadores do laboratório de ensaios de materiais da Universidade de Brasília verificaram que o descolamento e posterior deslocamento de revestimentos cerâmicos representam a manifestação com maior incidência na cidade de Brasília. Ao analisar prédios de até 10 anos, os pesquisadores verificaram que aproximadamente 80% das patologias presentes eram de descolamento ou deslocamento (BAUER; CASTRO, 2010). Em um estudo realizado na cidade de Porto Alegre por Costa (2005) apud Moura (2007) verificou-se que 67% das manifestações patológicas na cidade de Porto Alegre eram de fissuras e deslocamentos de cerâmicas.

Além da motivação científica do estudo, que é a busca de aprofundamento de conhecimentos sobre as características e propriedades de argamassas colantes e do sistema de revestimento cerâmico formado a partir da aplicação da técnica de piso sobre piso, a motivação tecnológica reside na necessidade de divulgação deste conhecimento para o meio técnico. A expansão do conhecimento sobre o assunto é ferramenta fundamental para que produtores e consumidores de argamassas colantes possam tomar decisões corretas para a resolução de problemas usuais, aperfeiçoarem formulações existentes buscando melhor desempenho a custos tão menores quanto possível, e desenvolver novas formulações que satisfaçam requisitos específicos.

Os resultados obtidos a partir desta pesquisa poderão auxiliar os fabricantes de argamassas colantes a verificar os fatores que mais influenciam suas formulações de tal modo a obter misturas mais eficientes para este tipo de aplicação e também possibilitará ao meio técnico um maior entendimento do comportamento deste tipo de sistema de revestimento cerâmico, facilitando-se assim a escolha por parte dos profissionais, da melhor técnica de assentamento das novas camadas de piso.

## 2 ARGAMASSAS COLANTES

Existem diferentes tipos de argamassas industrializadas, indicadas para as mais diversas aplicações, tais como contrapisos, revestimentos internos e externos, assentamento de cerâmicas e alvenaria, decoração e texturas, entre outros. De um modo geral, as argamassas são classificadas em apenas três grupos: argamassas básicas que são utilizadas para assentamento de blocos, revestimento de paredes e contrapiso; argamassas colantes, que são utilizadas para assentamento de revestimentos cerâmicos em pisos ou paredes, e; argamassas de rejuntamento.

A NBR 14081 (ANBT, 2004) classifica as argamassas colantes em três grupos: argamassas colantes industrializadas do tipo I (AC I), indicada para revestimentos internos, que possui menor teor de aditivos químicos; argamassa colante industrializada do tipo II (AC II), que possui características que permite absorver os esforços existentes em revestimentos de pisos e paredes internos e externos sujeitos a ciclos de variação termohigrométrica e a ação do vento, e; argamassa colante industrializada do tipo III (AC III), que apresenta resistência de aderência superior às anteriores.

Existe ainda uma subcategoria que pode ser adicionada para as argamassas colantes já citadas: argamassa colante industrializada do tipo E, em função da obtenção do tempo em aberto estendido. A Tabela 1, extraída da NBR 14081 (ANBT, 2004) apresenta os requisitos mínimos de desempenho para estas argamassas.

Tabela 1: Requisitos mínimos para as argamassas colantes.

Propriedade	Método de ensaio	Argamassas colantes industrializadas				
		Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo E	
Tempo em aberto, em minutos	NBR 14083	≥ 15	≥ 20	≥ 20	Argamassa tipo I, II e III com tempo em aberto estendido em no mínimo 10 min. do especificado nesta tabela	
Resistência de aderência à tração aos 28 dias (MPa)						
Sob cura normal	NBR 14084	≥ 0,5	≥ 0,5	≥ 1,0		
Sob cura submersa		≥ 0,5	≥ 0,5	≥ 1,0		
Sob cura em estufa		....	≥ 0,5	≥ 1,0		

Fonte: NBR 14081 (ABNT, 2004)

As normas técnicas disponíveis no Brasil não tratam especificamente a aplicação de piso sobre piso. Devido a uma necessidade de classificação das argamassas por parte dos fabricantes, as argamassas colantes do tipo piso sobre piso disponíveis no mercado encontram-se, dependendo do fabricante, com o desempenho compreendido entre as ACII e ACIII, conforme constatado em visitas ao comércio local de materiais de construção.

A seguir serão discutidas as principais propriedades referentes às argamassas colantes e que exercem influência na resistência de aderência dos revestimentos cerâmicos. Estas informações servirão de base para as análises dos resultados obtidos com a execução do programa experimental e embasarão as conclusões deste trabalho.

## 2.1 Comportamento reológico das argamassas colantes

As argamassas colantes são formadas pela composição de agregados, aglomerantes, aditivos, água e eventualmente adições. No estado fresco, assume-se que estas composições são suspensões concentradas de partículas sólidas (agregados) imersas em um líquido viscoso (pasta ou matriz), conforme representado na Figura 7.

A matriz assegura coesão ao sistema, além de lubrificação para o movimento dos agregados, permitindo assim, considerar que tais concentrações escoam como um fluido. Este efeito é devido principalmente à diminuição do contato entre os agregados (COSTA, 2006; PILEGGI, 2001).

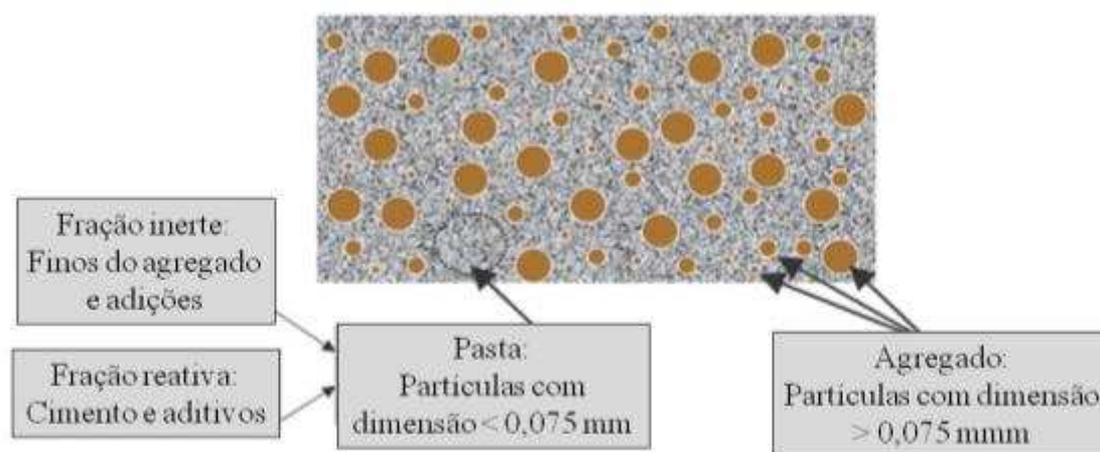


Figura 7: Representação da microestrutura da argamassa colante (adaptado de COSTA, 2006).

O adequado escoamento das misturas está relacionado com a quantidade de matriz nas argamassas e as suas características reológicas. Para um fluxo adequado, a quantidade de matriz deve ser suficiente para envolver os agregados.

Para um mesmo teor de água/materiais secos, pasta em excesso dificultará o fluxo da mistura enquanto que pasta insuficiente tornará a mistura pouco coesa e mais fluida, com baixa tensão de escoamento e inadequada à utilização (COSTA, 2006). Pode-se inferir que a fluidez está diretamente relacionada à facilidade de movimentação das partículas e, conseqüentemente, à redução dos fenômenos de atrito e a uma boa lubrificação do sistema (MENDES, 2008).

Para entender as propriedades reológicas do fluido, faz-se necessária a análise tanto dos fenômenos que ocorrem na matriz, como os que derivam dos agregados, para que se tenha uma visão global do seu comportamento reológico. Quando uma força de cisalhamento é aplicada ao material, um gradiente de velocidade é induzido neste fluido. A este fator de proporcionalidade entre a força e o gradiente da velocidade chama-se de viscosidade (BAUER, 2005; PILEGGI, 2001).

A viscosidade pode ser definida como a tendência do líquido em resistir ao escoamento como resultado da fricção interna provocada pela tensão de cisalhamento. Quanto menor a viscosidade de um fluido, menor será a tensão de cisalhamento necessária para submetê-lo a uma determinada taxa de cisalhamento constante (COSTA, 2006).

Em argamassas colantes, o comportamento esperado é aquele no qual a viscosidade permitirá que a argamassa colante preencha as reentrâncias da base de assentamento e ao mesmo tempo proporcione cordões bem formados que, ao entrarem em contato com a placa cerâmica, pela pressão comumente praticada na execução do revestimento, proporciona a melhor área de contato possível com o tardo da placa, contribuindo para a aderência da interface argamassa colante/placa cerâmica.

Além da viscosidade, alguns modelos que buscam descrever o comportamento reológico dos materiais incorporam um segundo fator, a tensão de escoamento ( $\tau_0$ ), que representa a tensão necessária a ser aplicada a um determinado material para iniciar seu escoamento (Figura 8). Um fluido que apresenta este tipo de comportamento é chamado de fluido de Bingham.

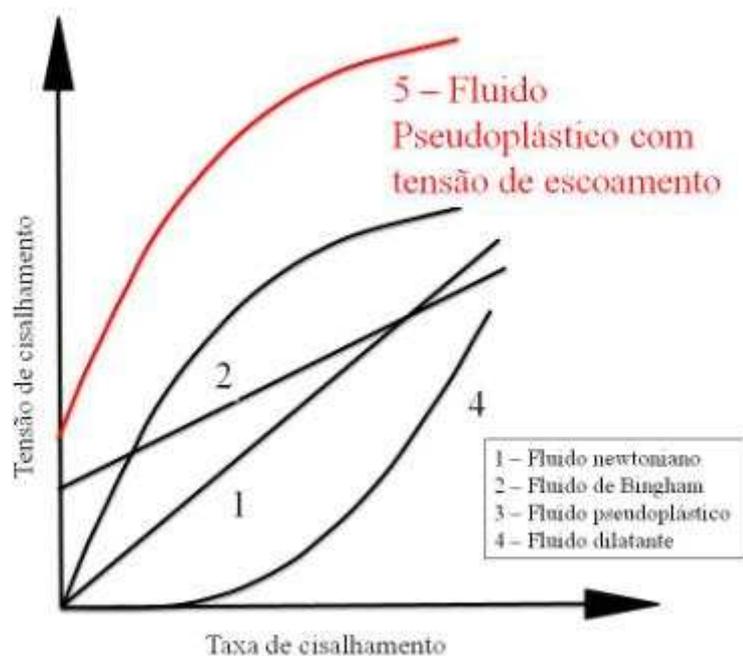


Figura 8: Comportamento da tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento (HUNTER, 2001; BAUER, 2005).

Uma simples observação visual nas argamassas colantes permite verificar a existência de uma tensão de escoamento, pois o material é capaz de suportar seu próprio peso o que induz a associar o comportamento das argamassas ao de um fluido de Bingham. Apesar disto, as argamassas colantes quando observadas em gráficos de torque versus rotação demonstram comportamento pseudoplástico, ou seja, a viscosidade da argamassa diminui com o aumento da taxa de cisalhamento. Baseado nisto pode-se concluir que as argamassas colantes apresentam um comportamento pseudoplástico com tensão de escoamento.

A reologia é definida como a ciência que estuda a deformação e escoamento da matéria. O estudo da reologia das argamassas colantes tem se mostrado como importante ferramenta para análise da viscosidade e tensão de escoamento das misturas. Sua aplicação proporciona classificar os materiais, analisar seus comportamentos frente a um campo de tensão, relacionar estes comportamentos com sua estrutura, bem como prever o desempenho destes em outros estágios de tensão, deformação, tempo e temperatura (TANNER, 1998). Tendo em vista que as argamassas são aplicadas no estado fluido, o seu desempenho reológico é fundamental para possibilitar a facilidade de sua aplicação e de assentamento dos revestimentos cerâmicos, evitando assim possíveis problemas de descolamento no estado endurecido.

Para definir o comportamento das argamassas no estado fresco frequentemente utilizam-se relações com sua consistência. Usualmente, os dados são obtidos através de ensaios como a mesa de espalhamento “Flow Table” e de penetração de uma esfera padrão “Dropping Ball” (BAUER, 2005). No entanto, mesmo estes ensaios sendo de fácil execução, apresentam limitações conceituais na caracterização das argamassas, principalmente no que diz respeito às argamassas colantes, e não representam adequadamente o comportamento do material.

Os referidos ensaios, chamados ensaios monoponto, são de baixo custo e de fácil execução, porém não consideram a natureza multifásica e reativa das argamassas. Considerando-se duas argamassas distintas como fluidos de Bingham, conforme ilustrado na Figura 9, observa-se que a primeira (A) apresenta tensão de escoamento maior e viscosidade plástica (inclinação da reta) menor do que o segundo material (B). Porém, após o início do fluxo, com taxas maiores de cisalhamento ocorre uma inversão de comportamento, sendo que a argamassa A flui mais facilmente.

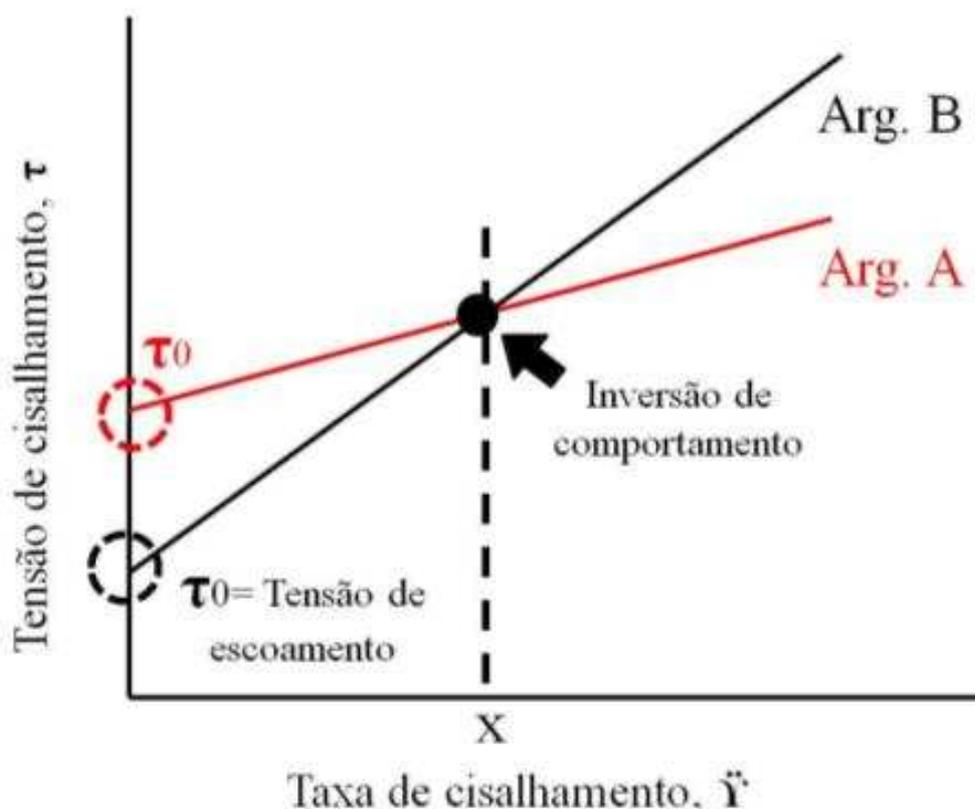


Figura 9: Ilustração esquemática de duas argamassas distintas com comportamento de fluidos de Bingham (BANFILL, 2005, CARDOSO, 2009).

Observando o gráfico, constata-se que a avaliação das argamassas por ensaios monoponto é muito limitada, podendo induzir a tomada de decisões equivocadas, especialmente se a avaliação for efetuada em taxa muito diferente da solicitação real a qual o material é submetido na prática.

Não é possível que o comportamento complexo de um material seja descrito por um único valor de medida, mas deve ser sim medido por um perfil reológico medido com precisão e, preferencialmente, simulando as solicitações práticas reais, visto que o comportamento pode variar em função das características da solicitação (CARDOSO, 2009).

Para definir o comportamento reológico de fluidos não newtonianos<sup>1</sup>, como é o caso das argamassas colantes, deve ser obtida a curva do comportamento reológico e os parâmetros reológicos fundamentais: a viscosidade e a tensão de escoamento. Tendo em vista a necessidade de um mesmo ensaio abordar os dois parâmetros citados, as técnicas de ensaio evoluíram para a reometria em equipamentos chamados reômetros, que consistem na aplicação de um cisalhamento no fluido através de duas superfícies.

Nos reômetros o torque aplicado ao fluido pode ser controlado para obter-se o cisalhamento resultante ou o cisalhamento é controlado e as forças são registradas, o que permite o controle do comportamento do material ao longo do tempo.

Outro método bastante difundido para caracterização reológica de argamassas é o Squeeze Flow (Figura 10) utilizado para avaliação de diversos materiais homogêneos, como os compósitos poliméricos. No ensaio, o escoamento do material decorre da aplicação de uma carga de compressão sobre a amostra no estado fresco, a qual ocasiona deslocamentos no seu interior devido aos esforços de cisalhamento radiais originados durante o fluxo (COSTA, 2006; COSTA; CINCOTTO; PILEGGI, 2007).

O ensaio Squeeze Flow, aplicado a argamassas convencionais de assentamento e revestimento, encontra-se normalizado pela NBR 15839 (ABNT, 2010) e descreve o método de ensaio para determinar o comportamento reológico de argamassas no estado fresco submetidos a solicitações.

---

<sup>1</sup> Fluidos de Bingham, pseudoplásticos e dilatantes são um tipo de fluidos não newtonianos.

Apesar da norma citada não ser específica para análise de argamassas colantes, a metodologia já é utilizada com sucesso por diversos pesquisadores (COSTA, 2006; KUDO et al.; 2011), fazendo-se pequenos ajustes nos aparatos de ensaio, como o diâmetro do prato e cortes no molde cilíndrico (Figura 10).

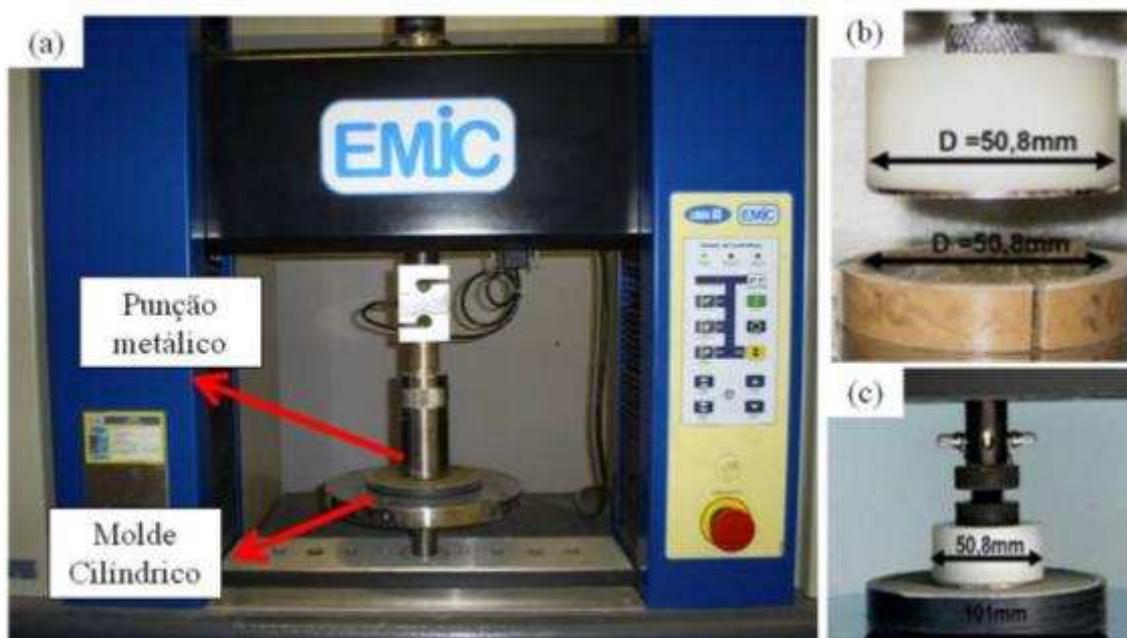


Figura 10: (a) Máquina universal de ensaios EMIC utilizada no ensaio Squeeze Flow; (b) Configuração do molde partido com diâmetro de 50,8 mm e (c) Configuração do molde restritivo e punção com diâmetro de 101 mm (KUDO et al.; 2011).

O ensaio permite o controle da magnitude das deformações e também das taxas de cisalhamento aplicada ao material, podendo ser realizado com controle de força ou deslocamento. O método permite a aplicação de patamares de relaxação e a determinação de parâmetros reológicos como viscosidade e tensão de escoamento, possibilitando a simulações dos esforços semelhantes àqueles sobre os quais estão sujeitas as argamassas colantes na prática (COSTA, 2006).

Os resultados deste ensaio podem ser demonstrados tanto por curvas de carga x tempo ou curvas carga x deslocamento. O perfil típico obtido de um ensaio de Squeeze Flow com controle por deslocamento expresso na forma de carga versus deslocamento apresenta três regiões bem definidas, conforme demonstrado na Figura 11 (COSTA, 2006; CARDOSO, 2009).

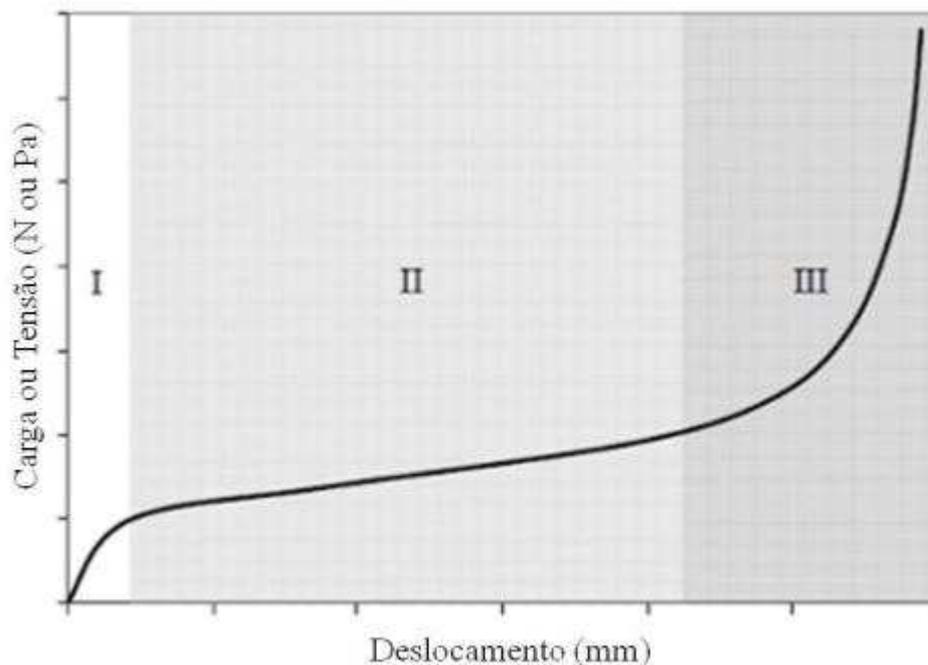


Figura 11: Perfil típico de carga versus deslocamento de um ensaio de Squeeze Flow realizado com deslocamento controlado (CARDOSO, 2009).

O estágio I do gráfico é relativo a pequenos deslocamentos. O material comporta-se como um sólido e demonstrando a deformação elástica do material, apresentando nesta região uma relação linear entre carga e deslocamento, relacionado provavelmente à tensão de escoamento do material. Argamassas que necessitam de um deslocamento maior para entrar na fase plástica, provavelmente apresentam tendência à fissuração, devido à recuperação elástica após a retirada do esforço (CARDOSO, 2009).

O estágio II refere-se a deslocamentos intermediários, onde a compressão excede as forças que mantinham o material sob comportamento elástico. Esta é a região adequada para análise do comportamento da argamassa colante durante a formação dos cordões, pois as deformações ocorrem sem incremento significativo da força de compressão, indicando a facilidade ou de manuseio da argamassa colante.

Durante o estágio III, ocorre um aumento exponencial da carga de compressão necessária para prosseguir a deformação do material. A aproximação das partículas ou de outros constituintes de um sistema submetido a grandes deformações gera forças restritivas ao fluxo devido à maior interação por embricamento ou entrelaçamento das unidades móveis, conseqüentemente, as forças de atrito são predominantes nessa situação (CARDOSO, 2009).

A análise de curvas carga versus deslocamento permite avaliar o comportamento reológico das argamassas colantes nos diferentes momentos de sua aplicação, partindo de uma condição estacionária até um alto nível de deformação, cisalhamento e restrição geométrica durante a sua aplicação.

## **2.2 Adesão inicial**

Adesão inicial das argamassas colantes é a capacidade que o material apresenta para ancorar na superfície da base através da penetração da pasta nos poros, reentrâncias e saliências, seguidos do endurecimento gradativo da pasta. A adesão é a soma das interações intermoleculares que ocorrem na interface entre superfícies de contato, cujo somatório é uma força de atração entre moléculas distintas. As forças que englobam o trabalho de adesão da argamassa colante são: força capilar, de Van der Waals e eletrostática (CARASEK, 1996; PÓVOAS, 2005).

Segundo Recena (2008) a adesão depende basicamente da coesão e da plasticidade da argamassa e ocorre pelo vácuo formado no processo de deformação que a argamassa experimenta quando aplicada sobre a superfície do substrato. As argamassas tendem por sua natureza ter uma coesão elevada, porém apesar desta característica os equipamentos utilizados para aplicação do material levam os mesmos a ter um bom contato com a superfície. Quando o assentador aplica a argamassa colante com a desempenadeira, este tende a melhorar a superfície de contato com o substrato.

Segundo Pretto (2007) faz-se necessário um estudo com base científica para se compreender a adesão e a relação desta com a rugosidade da superfície, assim é importante estudar aspectos relacionados ao ângulo de contato da argamassas com a superfície relacionando-o com o comportamento das tensões superficiais e da energia de superfície dos materiais.

As argamassas colantes devem apresentar trabalhabilidade e plasticidade adequadas para que o espalhamento na superfície tenha um ângulo de contato próximo de zero, com contato perfeito entre os constituintes da argamassa colante e a placa (ALMEIDA, 2005). Cobrimentos ineficientes das interfaces resultarão em descolamentos do revestimento no estado endurecido (COSTA, 2006).

A influência das características reológicas na tensão superficial e a influência desta na força de adesão podem ser explicadas pela teoria das ligações interfaciais entre o líquido (a pasta de argamassa colante) e um sólido (substrato). Para uma adequada adesão é imprescindível que o líquido cubra completamente a superfície do sólido, sem deixar vazios na interface (PAES, 2004).

Neste sentido, Moreno Junior; Selmo (2007) afirmam que quanto maior o valor de tensão superficial e da viscosidade de uma pasta aglomerante maior será sua capacidade de cobrir as superfícies, devido a redução no ângulo de contato com a base, aumento no contato físico e melhora na adesão e extensão de aderência entre a argamassa e o substrato.

### **2.3 Tempo em aberto**

Para a colagem de peças cerâmicas com argamassa colante, as argamassas são espalhadas com desempenadeira denteada na forma de cordões com até 6 mm. A aplicação de argamassas com cordões desta espessura é tecnicamente impossível sem o uso de um aditivo retentor de água, pois com a ausência deste, em poucos minutos a argamassa perde trabalhabilidade e seca completamente (PÓVOAS, 1999).

O uso de aditivos retentores de água propicia a produção de argamassas colantes, no entanto não conseguem impedir a perda de água das argamassas, seja por sucção das bases ou por evaporação para o ambiente, o que influenciará as características do material tanto no estado fresco quanto endurecido. Para avaliar esta peculiaridade foi introduzido o conceito de tempo em aberto para argamassas colantes.

O tempo em aberto é um dos principais requisitos de desempenho de argamassas colantes. Esta propriedade refere-se ao maior intervalo de tempo entre a aplicação da argamassa colante estendida em cordões sobre o substrato e o assentamento da placa cerâmica sobre estes cordões, de modo a obter-se uma resistência de aderência adequada.

Os valores estão definidos pela NBR 14081 (ANBT, 2004) e variam de acordo com a classificação da argamassa colante (ver Tabela 1).

A perda de resistência de aderência das placas assentadas depois de excedido o tempo em aberto é relacionada com a formação de uma película superficial que interfere na adesão inicial da argamassa colante. A formação de “película” na superfície da argamassa colante foi estudada por Póvoas (1999) que mostrou que a película, na verdade é resultado da dessecação superficial causada pela evaporação e sucção de água da argamassa.

A velocidade de formação dessa película e, conseqüentemente, o tempo em aberto, dependem, dentre outros fatores, da quantidade de água e da quantidade de polímeros adicionados à argamassa colante, além de condições ambientais como velocidade do vento, temperatura, umidade relativa do ar e radiação (PÓVOAS et al., 2005). Um tempo em aberto adequado permite ao assentador trabalhar em condições adversas de obra, incluindo alta temperatura, baixa umidade ou substrato muito porosos. Caso o tempo em aberto seja excedido, a argamassa colante deve ser descartada.

A NBR 14083 (ABNT, 2004) especifica o ensaio para determinação do tempo em aberto de argamassas colantes. Por esta metodologia, deve-se esperar 28 dias pela cura da argamassa para se obter um valor de resistência. O ensaio mostra-se eficiente, porém, sendo este ensaio utilizado para medir uma propriedade no estado fresco, o ideal seria que os resultados pudessem ser obtidos ainda no estado fresco, permitindo assim o ajuste da formulação assim que constatada a deficiência na argamassa.

Para aproveitamento da camada de argamassa colante ainda no estado fresco e para melhorar a resistência de aderência especificada, pode-se durante a aplicação das placas cerâmicas, fazer a ruptura da película formada sobre os cordões por meio de uma pequena movimentação das placas sobre os cordões. No momento do assentamento da placa cerâmica esta deve ser posicionada ligeiramente fora da posição e arrastada perpendicularmente sobre os cordões até a posição final.

## **2.4 Retenção de água**

Segundo Cincotto *et al.*, (1995), a retenção de água é a capacidade de que a argamassa tem, no estado fresco, de manter sua consistência, mesmo em situações propícias à perda de água.

Desta maneira a água tem grande importância no comportamento reológico das argamassas, pois influencia diretamente sua trabalhabilidade e viscosidade, tendo papel fundamental nas reações de hidratação do aglomerante e na resistência de aderência entre a argamassa colante e o substrato.

A água é responsável ainda pelo transporte de produtos da hidratação do cimento para os poros e cavidades do substrato, favorecendo a ancoragem mecânica entre os mesmos, tendo assim influência direta no estado endurecido da argamassa colante (GROOT, 1988; CARASEK *et al.*, 2001; COSTA, 2006).

A retenção de água é diretamente influenciada pela presença e tipo de aditivos em sua composição. Este comportamento pode ser explicado por um conjunto de fatores que podem atuar conjuntamente na mistura: em argamassas aditivadas ocorre um aumento da viscosidade da mistura; a água presente na mistura tem sua saída inibida pela formação do filme polimérico que produz um efeito selante sobre os poros da argamassa, influenciando diretamente na aderência dos revestimentos no estado endurecido (MANSUR, 2007; OHAMA, 1995).

Nas argamassas colantes a retenção é importante na medida em que a adesão ao revestimento cerâmico é prejudicada pela perda de água por sucção pelo substrato ou ainda pela formação de “película” no cordão da argamassa colante (PÓVOAS, 2005). Com a adesão ocorrendo de maneira inadequada, a resistência de aderência entre a argamassa colante e o revestimento será prejudicada, podendo tornar-se responsável pelo aparecimento de defeitos como o descolamento do revestimento.

A retenção de água em argamassas convencionais é avaliada pelo método proposto pela NBR 13277 (ABNT, 2005), e consiste em determinar a quantidade de água retirada de uma porção de argamassa contida em um funil de filtragem (funil de Büchner modificado), após uma sucção realizada por meio de uma bomba de vácuo a baixa pressão. A Figura 12 demonstra o equipamento utilizado para este ensaio. Neste trabalho utilizou-se este procedimento para avaliar a retenção de água das argamassas.

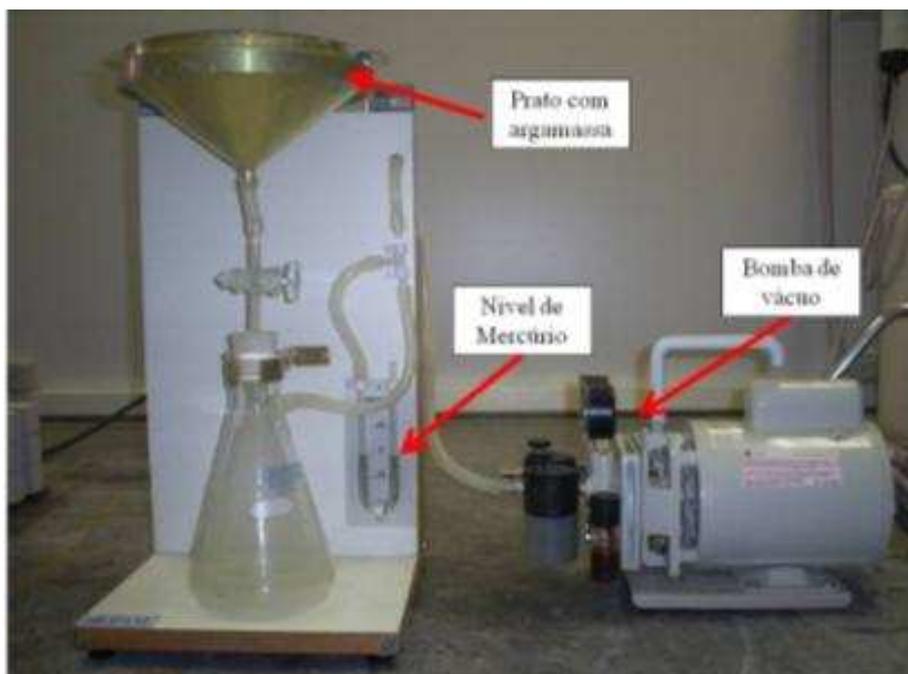


Figura 12: Funil de Büchner modificado.

Com a finalidade de obter uma situação mais próxima da real condição a que as argamassas colantes estão submetidas em obra, Ferrari *et al.*, (2011), executaram o ensaio com o funil de Büchner adotando uma modificação na espessura do prato onde a argamassa colante é posicionada durante a sucção. No método convencional o prato é de 20 mm de espessura e na adaptação proposta o prato é de 5 mm, representando assim de forma mais fiel a espessura dos cordões de argamassa colante aplicados em obra.

Os autores obtiveram resultados conflitantes com o já exposto no decorrer deste trabalho, em que uma argamassa com menor retenção de água produziu um maior tempo em aberto. Isto evidencia a necessidade de validar esse ensaio, bem como confirmar se é de fato essa a tendência e qual a interferência da experiência do profissional na execução do ensaio.

## 2.5 Resistência de aderência

Entende-se por aderência a ligação de natureza atômica ou molecular existente na interface entre um corpo sólido e outro qualquer (THURLER; FERREIRA, 1995). Esta ligação pode ser tanto física, obtida pelo engaste entre o substrato e o adesivo, quanto química, por meio de forças eletrostáticas de Van Der Waals.

A NBR 13528 (ABNT, 2010) define aderência como a propriedade do revestimento de resistir às tensões normais e tangenciais atuantes na interface com o substrato. A norma cita que a resistência de aderência não é uma propriedade exclusiva da argamassa colante, mas sim da interação entre as camadas do sistema de revestimento, sendo necessário, ao se tratar do assunto, especificar em que substrato a argamassa será assentada.

Didaticamente pode-se dizer que a de aderência deriva da conjunção de três características da interface argamassa/substrato: a resistência de aderência à tração, a resistência ao cisalhamento e a extensão de aderência, sendo esta a razão entre a área de contato efetivo e a área possível de ser unida (CARASEK, 1996).

Segundo Carasek (1996), a aderência entre um substrato poroso e a argamassa ocorre através de um fenômeno essencialmente mecânico. Este fenômeno é caracterizado basicamente pela transferência de água que ocorre entre a argamassa e o substrato, possibilitando a entrada da pasta de cimento nos poros do substrato que, ao hidratar, precipita hidróxidos e silicatos que promovem a ancoragem do revestimento.

A autora identificou através de microscopia eletrônica de varredura a morfologia e natureza dos produtos formados na interface de sistemas de revestimentos e afirmou ser o intertravamento de cristais de etringita nos poros do substrato o principal responsável pela resistência de aderência. Neste sentido pode-se afirmar que a porosidade do substrato terá grande influência na aderência de revestimentos cerâmicos ao substrato. A Figura 13 apresenta um esquema do mecanismo de aderência entre argamassas e substratos porosos, proposto por Carasek (1996).

Substratos com alta porosidade podem absorver grande quantidade de água e provocar uma hidratação inadequada do cimento da argamassa, ou seja, a quantidade de água restante na argamassa não seria suficiente para hidratar todo o cimento, formando regiões frágeis, com potencial de apresentar descolamento (BREA, 2006). Em situações contrárias, em um substrato pouco poroso, a baixa absorção não permite a entrada da pasta que promove a ancoragem, prejudicando a aderência entre os materiais.

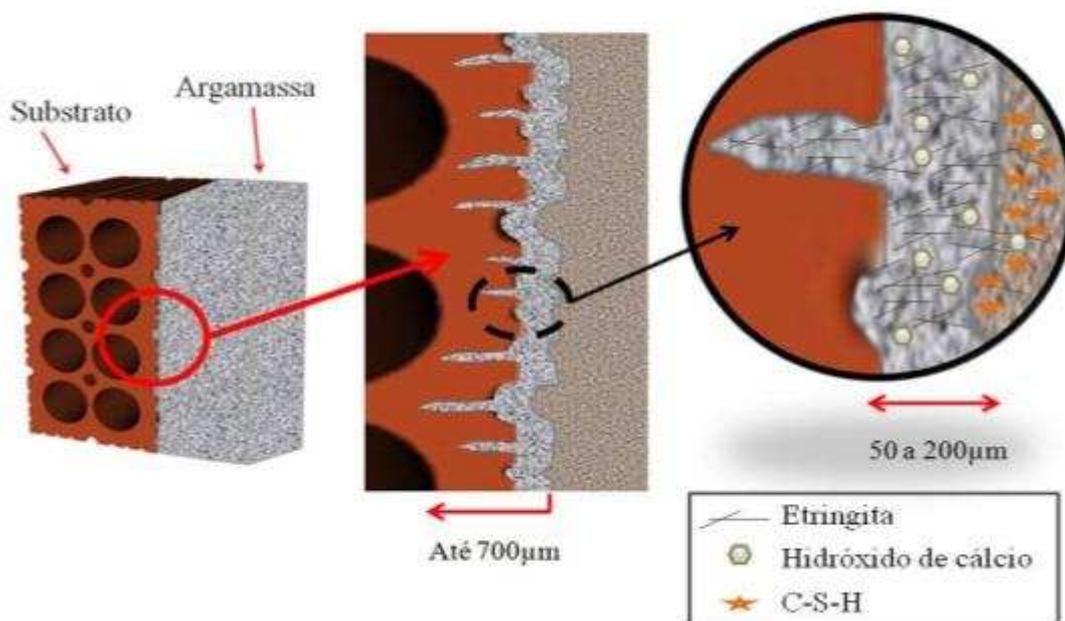


Figura 13: Representação esquemática do mecanismo de aderência entre argamassa e substrato cerâmico (adaptado de CARASEK, 1996).

No caso de substratos pouco porosos, no momento de aplicação da placa cerâmica sobre a argamassa colante é observado acúmulo de água na interface. Esse fenômeno pode ser comparado com o efeito parede encontrado na interface entre agregados e pasta de cimento. Assim, além de a baixa absorção de água do substrato restringir o mecanismo de aderência pode também colaborar com o aparecimento do efeito parede.

O acúmulo de água na interface placa/argamassa colante resulta numa região com alta relação água/cimento, e, portanto, com alta porosidade e menor resistência mecânica (ALMEIDA, 2005).

A fim de minimizar o efeito gerado por substratos pouco porosos, a solução segundo Veiga (2003) *apud* Nogami (2007), é alterar a superfície de contato, favorecendo o mecanismo de ancoragem através da rugosidade dos substratos, pois para revestimentos com pouca ou nenhuma absorção de água, a resistência de aderência está intimamente relacionada com a área de contato superficial entre os materiais aderidos (YOSOMIYA *et al.*, 1990 *apud* NOGAMI, 2007).

Segundo Mansur (2007) uma solução para minimizar o efeito do acúmulo de água gerado pela baixa absorção de alguns substratos é o uso de aditivos poliméricos. Estes aditivos após secagem formam um filme polimérico na interface argamassa/ placa cerâmicas que aumenta a aderência do sistema de revestimento.

Outra possibilidade de incremento na resistência de aderência dos sistemas de revestimento está diretamente relacionada com alterações na trabalhabilidade das argamassas, na energia de impacto (processo de execução), nas características e propriedades dos substratos, e no controle de fatores externos (CARASEK, 2007).

Além da aderência pelo fenômeno de ancoragem dos produtos de hidratação nos poros do substrato, Santos (2008) cita a influência de fenômenos químicos. Estes ocorrem em função da proximidade das moléculas do substrato e da argamassa colante, que se atraem pelas forças elétricas de Van Der Waals. O efeito desta atração é a adsorção das moléculas de água pelo substrato. As ligações de Van Der Walls são conduzidas por forças intermoleculares, entre moléculas eletricamente neutras. Essas forças são as responsáveis por muitos fenômenos físicos e químicos, como a adesão, o atrito e a viscosidade (GRILLO, 2010).

### *2.5.1.1 Influência dos componentes das argamassas na resistência de aderência*

Comercialmente as argamassas colantes disponíveis no mercado são compostas por um aglomerante, cargas minerais e aditivos modificadores. O aglomerante mais típico é o cimento Portland, usado em combinação com diferentes tipos de cargas minerais. O C-S-H é um dos maiores componentes da hidratação do cimento, e é o principal responsável por grande parte das propriedades da pasta de cimento endurecida. É geralmente mal cristalizado e mal definido (SANTOS, 2006).

Os inconvenientes referentes à especificação do tipo de cimento para produção de argamassas colantes estão relacionados à finura do material. Diferentes cimentos apresentam diferentes características físicas sendo, no entanto, a finura um dos parâmetros mais significativos (MANSUR *et al.*, 2009). Cimentos mais finos demandam mais água ou a utilização de aditivos para uma mesma trabalhabilidade.

As argamassas colantes podem tornar-se mais deformáveis e, portanto, flexíveis, através da diminuição da quantidade de cimento ou através da adição de polímeros especiais. A diminuição da quantidade de cimento, no entanto, leva a reduções significativas da capacidade de aderência. A adição de polímeros, por outro lado, além de aumentar a capacidade de deformação das argamassas, melhora sua aderência. (AKIAMA *et al.*, 1997).

A modificação das argamassas é resultante da hidratação do cimento Portland e da coalescência das partículas de polímero formando filmes contínuos ou membranas que se ligam aos géis hidratados do cimento e aos agregados, constituindo uma cadeia monolítica na qual a fase polímero interpenetra os compostos hidratados do cimento Portland. Esta fase polimérica é a responsável pela diminuição da permeabilidade e pelo aumento da aderência entre a pasta e o agregado (ALMEIDA; SICHIERI, 2006).

Os aditivos mais frequentes nas argamassas colantes são os éteres de celulose (HEC - Hidroxietil celulose e MHEC - Metil hidroxietil celulose) e os látex poliméricos (poli álcool vinílico - PVA). Cada um destes aditivos desempenha funções diferentes durante a evolução do estado fresco e endurecido da argamassa (JENNI *et al.*, 2005a).

O látex PVA consiste na dispersão de partículas esféricas de polímero orgânico em água, formando um fluido leitoso, geralmente branco, sendo as propriedades mais importantes para a adequada aplicação o teor de sólidos, viscosidade, tipo de estabilizador e temperatura mínima de formação de filme (ALMEIDA; SICHIERI, 2006). O látex melhora o comportamento reológico da argamassa fresca, mas, principalmente, proporcionam flexibilidade e resistência à tração para a argamassa endurecida (JENNI *et al.*, 2005b).

Os éteres de celulose são polímeros solúveis em água utilizados nos materiais à base de cimento com principal intuito de modificar algumas de suas propriedades no estado fresco. Adições de pequenas quantidades do polímero levam à elevação da retenção de água em argamassas e ao aumento de viscosidade, pela formação do hidrogel (SANTOS, 2006; SENNA, 2008). Quando a argamassa fresca contendo um éter de celulose entra em contato com superfícies porosas (como substrato e as peças cerâmicas, por exemplo), a água aprisionada pelo hidrogel é succionada pelo substrato em uma taxa menor que a água livre, deixando ainda água disponível para as reações de

hidratação do cimento (WAGNER, 1973). De um modo geral, os principais objetivos dos éteres de celulose são aumento da aderência, incorporação de ar e retenção de água para estabelecer propriedades de trabalhabilidade adequada (JENNI *et al.*, 2005a).

A existência simultânea de ligante e de polímeros provoca a interação de dois processos fundamentais: a formação de película de polímero e a hidratação do cimento (JENNI *et al.*, 2005b). Argamassas com adições de polímero apresentam boas propriedades no estado fresco. Este incremento é favorecido pela formação de filme ou membrana polimérica que restringe a perda de água por evaporação para o ambiente e por absorção pelo substrato, aumentando o tempo de hidratação do cimento (ALMEIDA; SICHIERI, 2006), o que influenciará diretamente na resistência de aderência dos sistemas de revestimentos cerâmicos.

Quanto ao tipo de agregado utilizado em argamassas colantes, Mansur (2007) cita que a areia usada nas dosagens de argamassas são predominantemente areias quartzosas com tamanho de grãos menores que 0,50 mm. Características como forma, textura e distribuição granulométrica exercem grande influência na trabalhabilidade e aderência de argamassas colantes. A forma e textura de materiais particulados são as maiores responsáveis por alterações no coeficiente de atrito. Lee e Seed (1967) *apud* Mendes (2008) ao medir o coeficiente de atrito de areias com morfologias diferentes demonstraram que partículas com forma mais arredondada possuem um coeficiente de atrito menor se comparado às aquelas com forma irregular.

Outra questão relacionada com a influência da distribuição granulométrica das partículas é o grau de empacotamento das partículas. A condição ideal seria aquela onde há um preenchimento gradual entre os vazios deixados pelas partículas, de forma que vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores.

Deve-se, no entanto tomar cuidado para que não haja um excesso de finos, pois estes poderão acarretar um elevado aumento na área superficial e, conseqüentemente, maior quantidade de água necessária para recobrir as partículas. Em um mesmo volume de argamassa não é indicado o aumento excessivo da área superficial do sistema e a adição de partículas maiores pode aumentar a fluidez do sistema (PILLEGI, 1996; COSTA, 2006). Areias com uma finura elevada aumentam o consumo de água da

mistura o que pode provocar uma retração acentuada nas argamassas, após a evaporação da água. Além disto, os finos da areia podem preencher os poros dos substratos ocupando espaços dos produtos de hidratação (MANSUR, 2007; ANTUNES, 2010).

Um aumento na proporção de areia, mantida a mesma quantidade de água na mistura, diminui a trabalhabilidade das argamassas, provocando uma diminuição em sua resistência de aderência. Verifica-se também que areias grossas provocam o comprometimento do envolvimento dos grãos pela pasta de cimento, o que compromete a extensão da aderência (ANTUNES, 2010). No entanto, deve-se ressaltar que a areia é imprescindível para formação do esqueleto indeformável da massa, reduzindo a retração nas argamassas.

### 2.5.2 Influência de agentes externos na resistência de aderência

No estado endurecido, a argamassa colante é submetida a diversos agentes de exposição que podem comprometer a durabilidade do revestimento cerâmico. No estado endurecido agem sobre o sistema os agentes ambientais: temperatura, umidade relativa e vento, sendo neste caso mais importante o microclima, do que propriamente o macroclima (SILVA, 2003).

De acordo com Santos (2008), a capacidade de absorver deformações é a propriedade que o revestimento apresenta quando exposto a pequenas tensões, devendo suportar as mesmas sem apresentar rupturas ou deformações que comprometam sua estrutura, aderência, estanqueidade e durabilidade. O revestimento só tem a responsabilidade de absorver as deformações de pequena amplitude que ocorrem em função da ação da umidade ou da temperatura e não as de grande amplitude, provenientes de outros fatores, como recalques estruturais (CARASEK, 2007).

A capacidade de absorver deformações, segundo Santos (2008), depende: do módulo de deformação da argamassa colante; da espessura das camadas - espessuras maiores contribuem; entretanto, deve-se tomar cuidado para não se ter espessuras excessivas que poderão comprometer a resistência de aderência e; das juntas de trabalho do revestimento - as juntas delimitam panos com dimensões menores, compatíveis com as deformações, contribuindo para a obtenção de um revestimento sem fissuras prejudiciais.

Os revestimentos e suas camadas suportes sofrem deformações térmicas diferentes devido aos seus coeficientes de dilatação. Estas variações térmicas geram tensões de tração no revestimento cerâmico. O surgimento da tração entre as camadas de materiais diferentes dá origem também a tensões de cisalhamento entre o tardo das peças e a argamassa colante resultando em empenamento da placa cerâmica (WETZEL *et al.*, 2012).

A maior diferença de módulo de elasticidade se dá entre as argamassas colantes e as placas cerâmicas, portanto esta interface pode ser considerada a mais crítica em um sistema de revestimento cerâmico.

Na medida em que há perda de resistência de aderência na interface argamassa colante/cerâmica devido à impossibilidade de se movimentarem livremente, é bastante frequente o descolamento das placas cerâmicas (FIORITO, 2009; ANTUNES, 2010; WETZEL *et al.*, 2012). Na Figura 14 apresenta-se um esquema das principais solicitações as quais o sistema pode estar submetido devido a variações de temperatura.

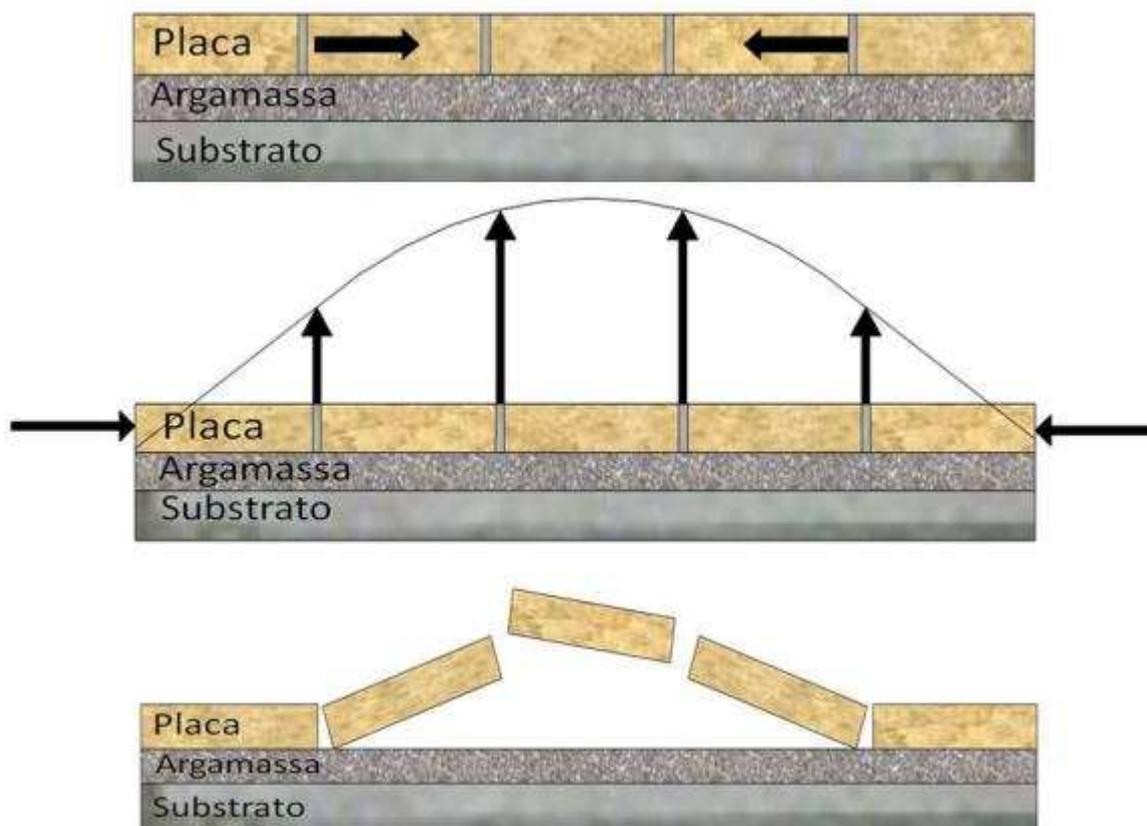


Figura 14: Ações solicitantes sobre os pisos devido a variações térmicas (Baseado em FIORITO, 2009; ANTUNES, 2010; WETZEL *et al.*, 2012).

Em sistemas de revestimento submetidos a ciclos de molhagem e secagem a argamassa colante é o ponto crítico. A secagem causa microfissuras na interface entre a argamassa colante e a cerâmica, principalmente nas regiões de rejuntamento, que quando exposto a um novo ciclo de molhagem tem a penetração de água facilitada (WETZEL *et al.*, 2010).

A cada ciclo de molhagem e secagem esse fenômeno se torna mais nocivo e a água penetra mais profundamente na interface placa- argamassa colante. A água penetra por capilaridade nas microfissuras, o que permite um aumento contínuo na perda de resistência de aderência da interface. A Figura 15 apresenta um esquema da influência dos ciclos de molhagem e secagem aos quais pisos externos podem estar submetidos.

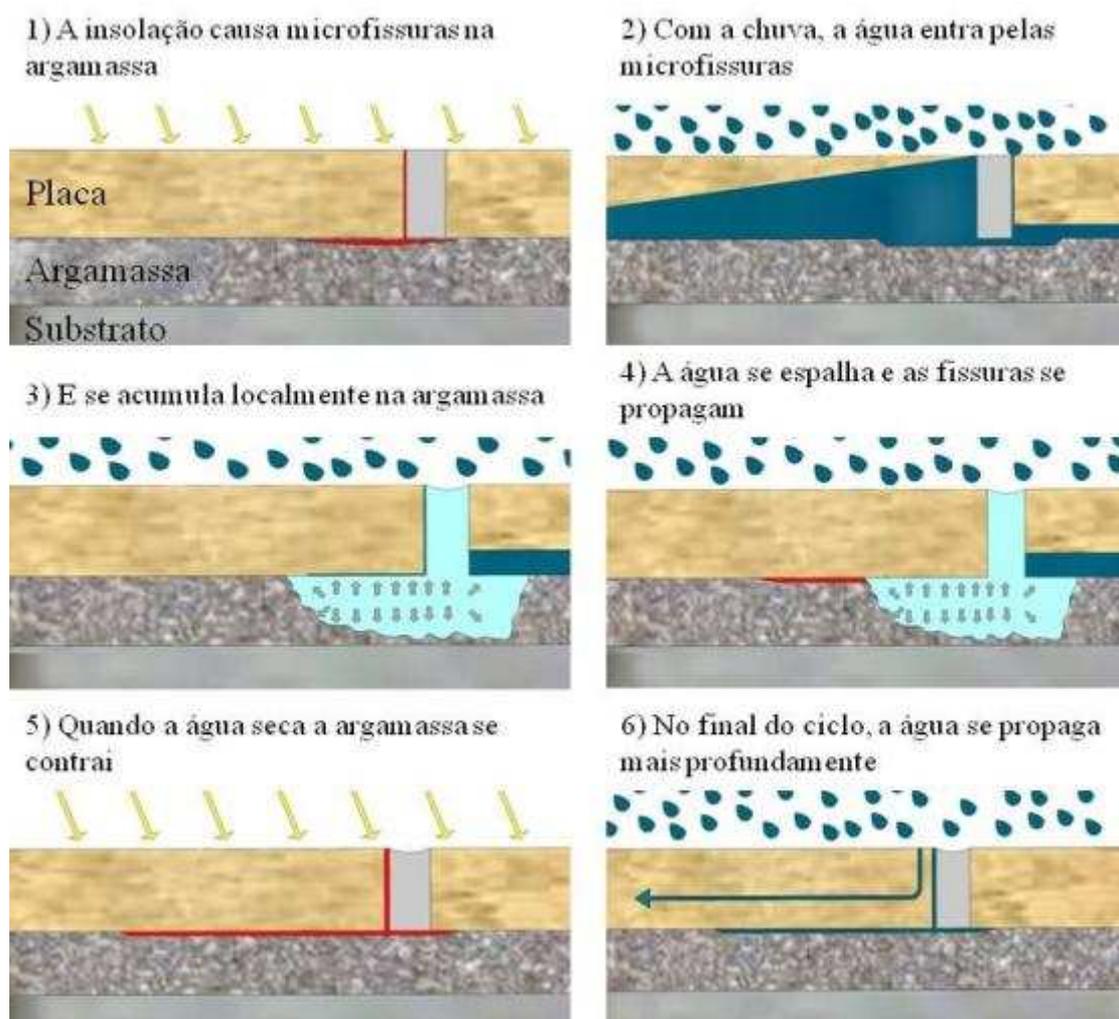


Figura 15: Mecanismo de falha de aderência causado por ciclos de molhagem e secagem (adaptado de HERWEGH; WETZEL *et al.*, 2010)

Outro fator que pode gerar tensões de tração no revestimento é a pressão de sucção do vento, embora seja menos importante (MEDEIROS, 1999). Embora não influencie de forma direta nos mecanismos de aderência, é importante citar também o transporte de água que ocorre em sentido contrário ao substrato: a evaporação. Segundo Bastos (2001) *apud* Nogami (2007), a argamassa colante no estado fresco perde vapor de água para o ambiente pelo desequilíbrio de umidade, sendo que a água migra do ambiente mais saturado para o menos saturado. A influência indireta da evaporação na resistência de aderência dos revestimentos ocorre em função de sua intensidade, se irá interferir ou não na quantidade de água necessária para as reações de hidratação.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Para alcançar os objetivos propostos no capítulo 1, desenvolveu-se um projeto experimental com a definição das variáveis de estudo e os métodos para testar e interpretar as suas respostas. O planejamento experimental, a descrição dos materiais e métodos e a forma de análise dos resultados estão apresentados neste capítulo.

#### **3.1 Planejamento experimental**

Para o estudo da aderência em sistemas de revestimento cerâmico de piso sobre piso o planejamento experimental foi dividido em duas fases de trabalho.

A primeira fase consistiu na moldagem de placas cerâmicas sobre um piso de referência em laboratório, adaptando procedimentos recomendados pela NBR 14084 (ABNT, 2004) e no assentamento de piso sobre piso em uma área externa da cidade de Curitiba. Nesta fase foram obtidos valores de resistência de aderência para cada argamassa colante estudada submetida às diferentes condições de exposição.

A segunda fase de trabalho foi planejada de forma a investigar a influência da composição e propriedades das argamassas colantes sobre a resistência de aderência entre os materiais que constituem o sistema de revestimento cerâmico de piso sobre piso. Para isto procedeu-se em laboratório ensaios de caracterização das argamassas colantes nos estados anidro, fresco e endurecido.

Com os valores de resistência de aderência obtidos para as argamassas colantes usadas no assentamento de piso sobre piso somadas a caracterização das argamassas colantes pode-se inferir sobre quais características e propriedades das argamassas colantes estão exercendo maior influência sobre o sistema de revestimento formado a partir desta técnica.

O fluxograma da Figura 16 apresenta um resumo das etapas de trabalho proposta nesta pesquisa.

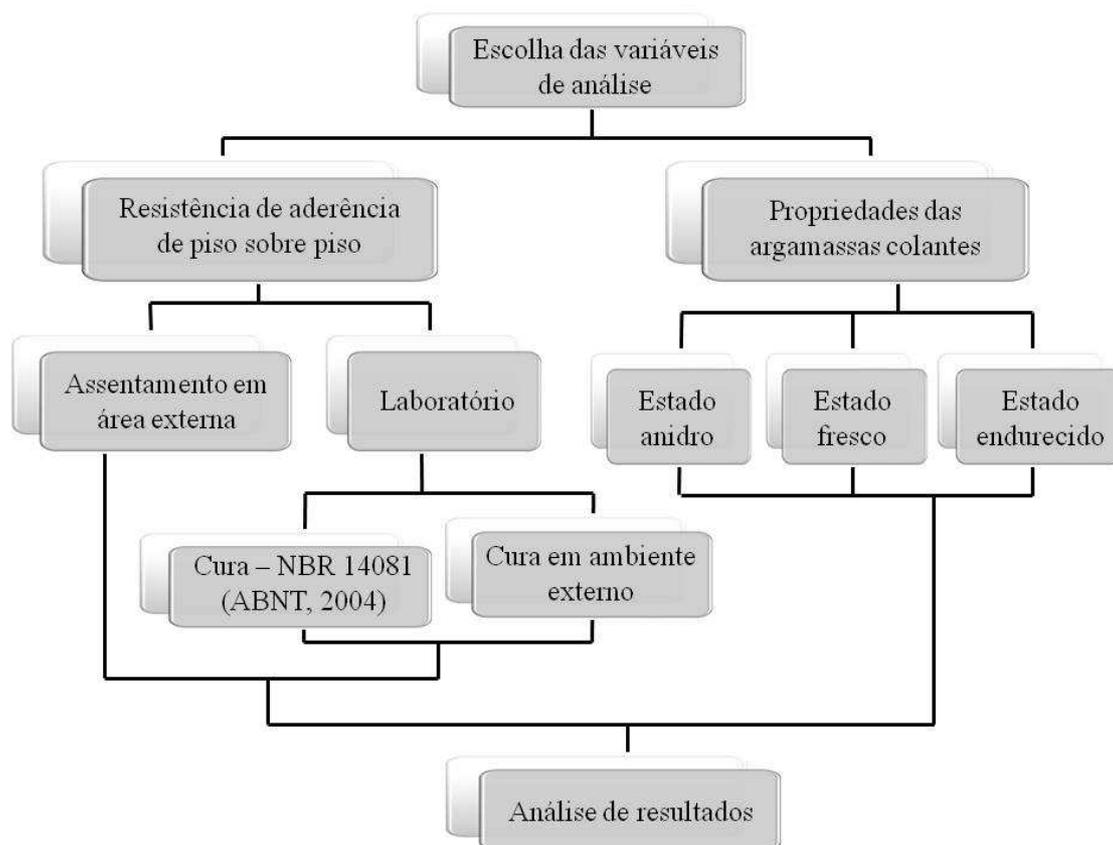


Figura 16: Fases do planejamento experimental.

Os ensaios executados foram realizados parte no laboratório de argamassas da UFPR e o restante em outros laboratórios parceiros. A Tabela 2 apresenta a listagem dos ensaios e os locais onde foram feitos os ensaios propostos no planejamento experimental.

Tabela 2: Relação de Laboratório onde foram executados os ensaios.

Laboratório	Ensaio
Laboratório de tecnologia de Argamassas - UFPR	Densidade de massa
	Teor de ar incorporado
	Retenção de água
	Squeeze Flow
	Preparação das amostras - MEV/EDS
Laboratório de Análises de minerais e rochas LAMIR - UFPR	Difração de raios-X (DRX)
	Fluorescência por espectrometria de raios-X (FRX)
	Imagens para análise Morfológica
Centro de Microscopia Eletrônica - UFPR	Microscopia de varredura (MEV)
	Espectrometria por dispersão de energia de raios-X (EDS)

Votorantim Cimentos	Resistência de aderência em laboratório
	Resistência de aderência no campo de testes
	Análise química – Resíduo Insolúvel
	Análise termogravimétrica – TG
	Fluorescência por espectrometria de raios-X (FRX)
	Tempo em aberto
	Análise granulométrica
Universidade de São Paulo - USP	Calorimetria de Condução

### 3.2 Variáveis de estudo

A principal variável analisada neste trabalho foi a influência da argamassa colante sobre a resistência de aderência de sistemas de revestimentos cerâmicos do tipo piso sobre piso. Para isto foram selecionadas quatro argamassas colantes industrializadas, todas do tipo ACIII, sendo cada uma de um diferente fabricante. Ressalta-se que para a aplicação de piso sobre piso não existem normatizações, sendo considerado em laboratório um desempenho mínimo para o assentamento externo, definidos pela NBR 14081 (ANBT, 2004) e para assentamento em campo os requisitos mínimos definidos pela NBR 13749 (ABNT, 1996).

O número de amostras analisadas foi definido pela limitação de espaço para o assentamento externo dos pisos. As argamassas colantes foram escolhidas em função de sua disponibilidade nas lojas de materiais de construção na região de Curitiba-PR e buscando-se o uso das principais marcas do mercado local.

Para a análise da influência das argamassas colantes sobre a resistência de aderência de piso sobre piso, as argamassas foram assentadas em duas condições diferentes. A primeira situação foi executar o assentamento em escala real, onde placas cerâmicas foram assentadas sobre um piso cerâmico em uma área externa da cidade de Curitiba. A evolução da resistência de aderência em campo foi monitorada durante um ano por meio de ensaios de arrancamento “in loco”. A segunda condição de assentamento foi realizada em laboratório, onde placas cerâmicas foram assentadas sobre pisos de referência, seguindo procedimentos similares aos recomendados pela NBR 14084 (ABNT, 2004) para o controle de qualidade de argamassas colantes industrializadas.

Os conjuntos piso de referência /argamassa colante utilizados para os ensaios em laboratório foram submetidos ainda a quatro diferentes condições de cura, sendo três condições as sugeridas por norma (cura em ambiente normal, cura em estufa e cura submersa) e uma cura em ambiente externo (o conjunto piso de referência/argamassa colante/ placa cerâmica foram colocados no mesmo local onde foi assentado o piso externo). O detalhamento de cada tipo de cura será apresentado no item 3.3.1. A Figura 17 apresenta um resumo das variáveis analisadas nesta pesquisa.

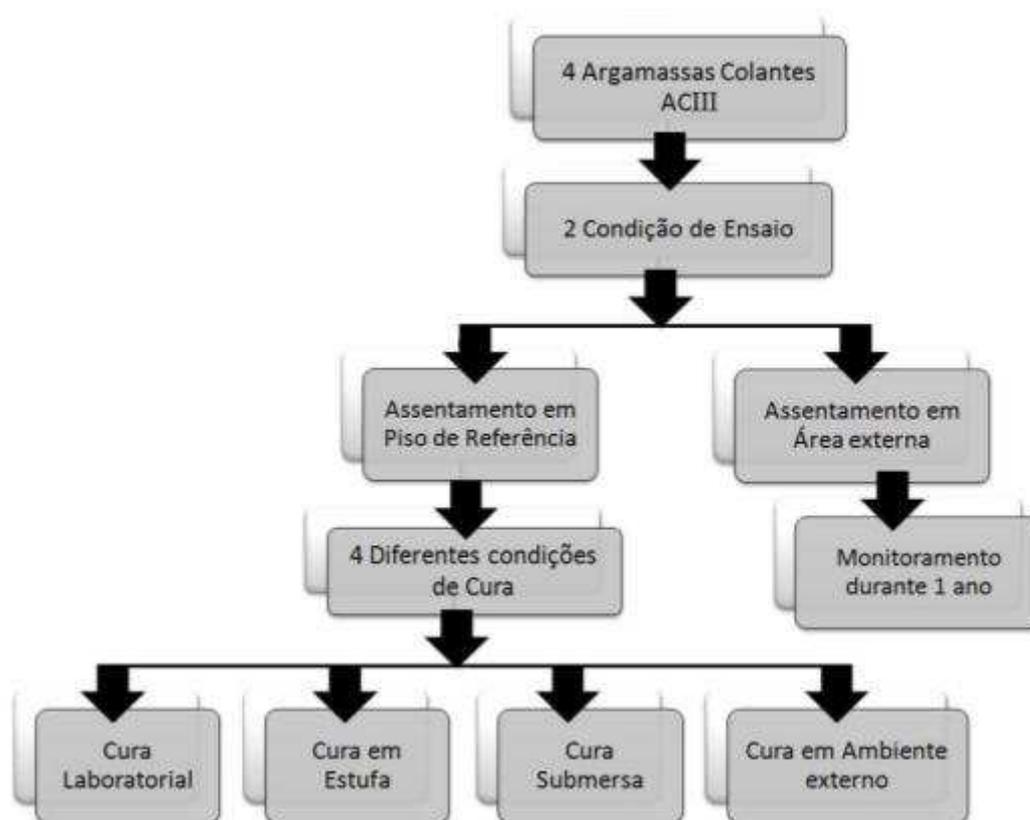


Figura 17: Variáveis de análise.

### 3.3 Estudo da resistência de aderência no assentamento de piso sobre piso

Para o estudo da resistência de aderência de revestimentos cerâmicos aplicados no assentamento de piso sobre piso procedeu-se em laboratório, a moldagem em piso de referência e em campo, a moldagem de pisos sobre pisos em uma área externa. Para ambos os casos foram utilizadas as quatro marcas de argamassas colantes selecionadas.

### 3.3.1 Piso sobre piso assentado em laboratório

Para o estudo da resistência de aderência de revestimentos assentados com argamassa colante sobre um revestimento já existente, procederam-se ensaios similares ao recomendado pela NBR 14084 (ABNT, 2004), ensaios de aderência em argamassa colante, com adaptações na superfície nas quais a argamassa colante foi assentada.

O ensaio proposto pela norma fixa uma metodologia para determinação da resistência de aderência, medida através de arrancamento por tração simples, de placas cerâmicas assentadas com argamassa colante sobre substratos padronizados. Neste trabalho, uma vez que se buscou verificar a resistência de aderência entre pisos sobre piso, e as superfícies onde, em obra, a argamassa colante é assentada, geralmente são pouco porosas, buscou-se simular esta condição assentando-se uma placa cerâmica sobre os substratos padrão de concreto, para somente então realizar a moldagem das placas cerâmicas com argamassa colante (Figura 18).

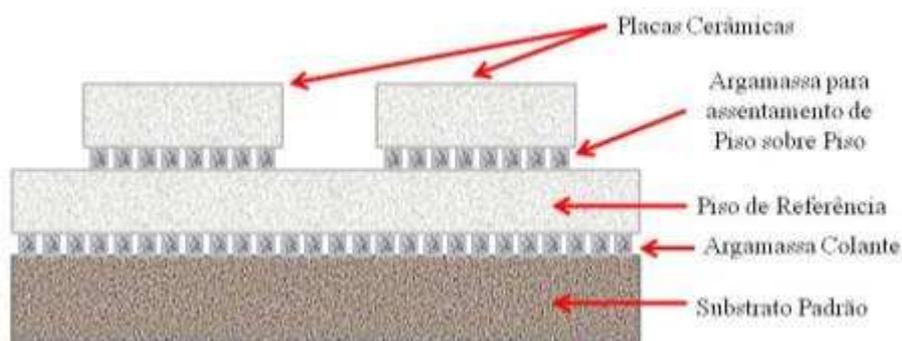


Figura 18: Esquema da adaptação do ensaio de resistência de aderência em laboratório.

Os pisos cerâmicos, aqui denominados “pisos de referência”, apresentam superfície esmaltada e livre de contaminantes, não tendo sido submetida, até o momento da moldagem, ao contato com produtos químicos.

As peças cerâmicas usadas tanto no piso de referência quanto para a confecção das placas cerâmicas para ensaios de resistência de aderência são do grupo BIIa, conforme NBR 13817 (ABNT, 1997), apresentam uma absorção de água de  $(4 \pm 1)\%$ . As placas utilizadas nos ensaios de resistência de aderência têm seção quadrada (50 x 50 mm). A Figura 19 demonstra as etapas de moldagem dos pisos de referência sobre o substrato padrão. Após a moldagem das placas cerâmicas sobre os substratos padrão, o conjunto foi deixado em ambiente de laboratório durante 28 dias.



Figura 19: Moldagem dos pisos de referência.

Após o assentamento dos pisos de referência realizou-se, seguindo os procedimentos recomendados pela NBR 14084 (ABNT, 2004), o assentamento de placas cerâmicas sobre os pisos de referência, utilizando-se as argamassas colantes selecionadas para esta pesquisa (Figura 20).



Figura 20: Moldagem das pastilhas cerâmicas para ensaio de resistência de aderência.

Os ensaios de resistência de aderência executados em laboratório consistem na moldagem de 10 placas cerâmicas sobre cada piso de referência, utilizando-se para isto as argamassas colantes que se deseja avaliar. As misturas das argamassas colantes foram executas conforme o recomendado pela NBR 14082 (ABNT, 2004).

Antes do início dos ensaios, a argamassa colante no estado anidro foi transferida para um saco plástico e agitada para dispersar o aglomerado. Do conteúdo homogêneo separou-se 2,5 kg de argamassa colante para cada mistura.

A água de amassamento foi adicionada na cuba da argamassadeira e o material seco despejado sobre o líquido, de modo contínuo, para então, proceder-se a misturar do conteúdo. O material permaneceu em maturação, coberto por pano úmido, durante o intervalo de tempo especificado por cada fabricante para, em seguida, proceder-se uma mistura por mais 15 s. Em todas as etapas a velocidade baixa foi usada na argamassadeira.

A quantidade de água e o tempo de maturação das argamassas foram respeitados conforme especificação dos fabricantes obtida na embalagem dos produtos. A Tabela 3 apresenta os dados utilizados para a mistura das argamassas colantes.

Tabela 3: Especificação conforme dados das embalagens das argamassas colantes.

Argamassa colante	Relação água/argamassa (%)	Tempo de maturação (min)
A	21	0
B	29	15
C	23	15
D	21,5	10

Após a moldagem das placas cerâmicas sobre os pisos de referência, os conjuntos foram submetidos à cura normal, submersa e em estufa, conforme recomendado pela NBR 14084 (ABNT, 2005) e ainda a uma cura em ambiente externo.

Na cura normal o conjunto ficou durante 28 dias em condições ambientais do laboratório (temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar de  $60 \pm 4\%$ , sem presença de vento). Na cura com imersão em água, as amostras foram submetidas durante sete dias às condições de laboratório e em seguida imersas em água a  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ , onde permaneceram durante o restante do período de cura. Por fim na cura em estufa o conjunto foi submetido, durante 14 dias, às condições ambientais de laboratório e em seguida levado a uma estufa e mantido em uma temperatura de  $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$  durante mais 14 dias para o término da cura.

A fim de se verificar o comportamento dos revestimentos ensaiados caso a cura fosse feita em campo, submetidas às condições de exposições típicas de uma aplicação externa, moldou-se juntamente com o restante das argamassas, placas adicionais para cura em ambiente externo. As placas para este ensaio ficaram 24 horas em laboratório e 27 dias em uma área de testes na cidade de Curitiba (Figura 21).



Figura 21: Cura em ambiente externo.

Após 28 dias de cura, pastilhas de metal foram coladas com resina epóxi no topo de cada placa cerâmica e procedeu-se a determinação da resistência de aderência à tração nas placas assentadas sobre o piso de referência. As pastilhas metálicas têm a mesma dimensão das placas cerâmicas (50 x 50 mm). A Figura 22 demonstra um dos conjuntos preparado para o ensaio de resistência de aderência.

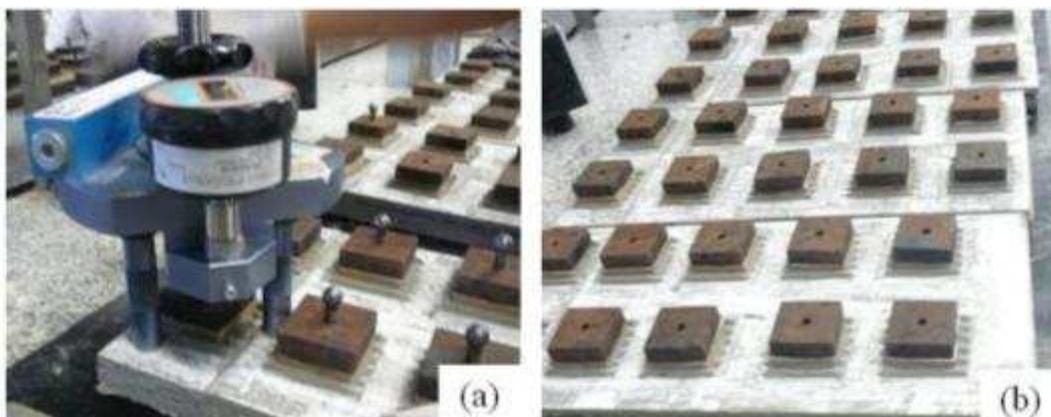


Figura 22: Ensaios de resistência de aderência em laboratório. (a) Equipamento e (b) Detalhes das dez pastilhas de metal já coladas sobre as placas cerâmicas para o ensaio.

Iniciaram-se os ensaios 1 hora após a colagem das pastilhas metálicas, devido ao tempo necessário para a cura da resina (cola). O equipamento utilizado para a execução dos ensaios de arrancamento é um modelo Dyna Z6, da marca Proceq, com manômetro digital integrado.

Após os ensaios de arrancamento, procedeu-se o tratamento dos dados adotando as recomendações da NBR14084 (ABNT, 2005). Calculou-se a média e o desvio padrão dos valores obtidos. Para médias iguais e superiores a 0,30 MPa, descartou-se todos os resultados que se distanciaram mais de 20% da média. Para média inferior a 0,30 MPa, descartou-se os resultados que se distanciaram da média mais que

0,06 MPa. Considerou-se válido o resultado encontrado quando, após eliminar os valores espúrios, pelo menos cinco valores se encontravam nos limites estipulados. A resistência de aderência é a média dos valores válidos após o tratamento inicial.

Pelos critérios adotados, caso algum dos conjuntos (piso referência/argamassa/placa cerâmica) assentados não obtivesse pelo menos cinco valores válidos, o ensaio deveria ser descartado e outro conjunto moldado. Em função disto todos os ensaios foram feitos em duplicata (repetidos), sendo moldados dois pisos de referência, cada um com dez pastilhas, para cada tipo de cura. A Figura 23 apresenta o modelo de planilha usado para organizar os dados de resistência de aderência referente à argamassa “A”. Os dados observados em vermelho são valores fora do limite definido e estes não foram considerados no cálculo da média final.

Resultados – Cura Normal		
Argamassa A	Data da moldagem:	04/10/2010
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	AN/ P – 70	1,26
	AN/ P – 60	1,46
	AN/ P – 60	1,55
	AN/ P – 50	1,67
	F	0,70
	AN/ P – 70	1,44
	AN/ P – 50	0,94
	AN/ P – 50	1,28
	AN/ P – 50	1,52
	AN/ P – 60	1,00
	Média inicial:	1,282
Desvio máx.:	1,538	
Desvio mín.:	1,025	
Média Final:	<b>1,4</b>	

Figura 23: Planilha de ensaio de resistência de aderência em laboratório.

Outra informação que consta na planilha da Figura 23 é referente ao tipo de ruptura que o sistema ensaiado sofreu. A NBR 14084 (ABNT, 2005) especifica seis tipos de ruptura possíveis, sendo estas: ruptura do substrato (S); na interface argamassa e substrato (S/A); na argamassa (A); interface argamassa e placa cerâmica (A/P); na placa cerâmica (P) e ainda; falha na colagem da pastilha (F).

Neste trabalho por tratar-se de uma situação de assentamento de piso sobre piso, as possibilidades de formas de ruptura são maiores e por isto será introduzido outras quatro nomenclaturas: Ruptura na interface placa e argamassa nova (P/AN); Ruptura na argamassa nova (AN); na interface argamassa nova e placa nova (AN/PN) e; ruptura na placa cerâmica nova (PN). O anexo I, apresenta um esquema detalhado com imagens das possíveis formas de ruptura.

No caso de ruptura nas interfaces, acrescenta-se na nomenclatura um número, que é referente à quantidade de argamassa, em porcentagem, que ficou no tardo da cerâmica arrancada no ensaio. Ao realizar o ensaio de resistência de aderência, analisando-se a parte do sistema que foi arrancada com o esforço do equipamento, verifica-se, por exemplo, que a ruptura ocorreu na interface entre a argamassa nova e a cerâmica nova (AN/ PN) e que aproximadamente 60% da parte de trás da placa encontra-se com argamassa colante aderida, diz-se então que a ruptura foi do tipo AN/PN – 60.

### 3.3.2 Piso sobre piso assentado em área externa

O comportamento de piso sobre piso assentados em área externas merece atenção especial, uma vez que neste tipo de aplicação, o revestimento estará sujeito a intemperismos, como sol, chuva, ventos, variações de umidade e temperatura. Para verificar o comportamento do sistema de revestimento em uma condição real, selecionou-se uma área de testes para assentamento de placas cerâmicas (Figura 24). A área situada na cidade de Curitiba – PR tem aproximadamente 20 m<sup>2</sup>. Pode-se observar pela imagem do local que o piso possui muretas em todas as suas extremidades, o que representa uma restrição a movimentação livre dos revestimentos, simulando-se assim a condição comum de obras.

Nesta etapa do trabalho, buscou-se em obras de reforma, pisos antigos que pudessem ser retirados sem danos para posteriormente serem reassentados na área de teste. Obteve-se um lote suficiente para cobrir a área com um mesmo tipo de placa cerâmica. Estas placas, tendo sido retiradas de uma construção já em uso, estiveram submetidas às diversas condições de exposições durante sua utilização na edificação, não sendo, no entanto, objetivo deste trabalho analisar o histórico destas placas.



Figura 24: Área de testes antes do assentamento dos pisos.

Para os ensaios em campo, as argamassas colantes foram misturadas mantendo-se os mesmos cuidados dos ensaios em laboratório, como homogeneização e tempo de maturação. Para a mistura, uma vez que o volume de argamassa é maior, utilizou-se um balde de metal e um misturador mecânico (Figura 25).



Figura 25: (a) Mistura da argamassa colante; (b) Misturador mecânico.

Como nos ensaios de laboratório, na área externa também foram usadas as quatro argamassas colantes selecionadas, sendo a área dividida em regiões distintas para cada argamassa colante. A Figura 26 apresenta as etapas do assentamento do piso sobre piso na área externa.



Figura 26: Etapa do assentamento de piso sobre piso.

Para o rejuntamento dos pisos externos, tanto para o antigo quanto para o novo, foi utilizado o rejunte Permacolor da fabricante Laticrete. A Tabela 4 apresenta um resumo das principais propriedades dos rejuntas, retiradas do catálogo técnico do produto e obtidas seguindo procedimentos de ensaios da ISO 13007: 2010 partes 3 e 4.

Tabela 4: Resultados de controle do rejunte utilizado na pesquisa (LATICRETE, 2011).

Propriedade	Resultado	Limites especificados pela ISO 13007: 2010
Relação água/ rejunte em pó	0,17	-
Resistência à compressão	31,0 MPa	> 15,0 MPa
Resistência à flexão	8,62 MPa	> 2,0 MPa
Retração (28 dias)	0,51 – 0,62 mm/m	< 3 mm/m
Absorção de água (28 dias)	0,54 – 0,70 g	< 2,0 g

Após 28 dias do assentamento do piso sobre piso executaram-se os primeiros ensaios de arrancamento, de maneira similar aos ensaios realizados em laboratório nos pisos de referência. Utilizou-se uma serra de corte com disco diamantado para cortar as placas cerâmicas nas dimensões das pastilhas metálicas de arrancamento (50 x 50 mm) até a profundidade do contrapiso. Após esta etapa procedeu-se a colagem das pastilhas metálicas sobre as placas cerâmicas com um adesivo bicomponente à base de resina epóxi da marca Araldite.

Após a cura da resina realizou-se os ensaios de resistência de aderência. Foram ensaiados dez pontos para cada argamassa colante estudada, adotando-se os mesmos critérios de análise usados nos ensaios com os pisos de referência. A Figura 27 demonstra a sequência de procedimento adotado na execução dos ensaios.



Figura 27: Ensaio de resistência de aderência: (a) Corte das placas; (b) Colagem das pastilhas; (c) Posicionamento do equipamento de arrancamento e; (d) Detalhe do piso após o ensaio.

O monitoramento da resistência de aderência foi feito ao longo de um ano, com leituras aos 28 dias, 3, 6, 9 e 12 meses, permitindo assim obter-se uma curva de comportamento da resistência de aderência dos pisos.

### 3.4 Caracterização das argamassas colantes industrializadas

Com a finalidade de entender o comportamento dos sistemas de revestimentos de pisos sobre piso e de posse dos valores de resistência de aderência, obtidos tanto em laboratório quanto em campo, selecionaram-se alguns ensaios de caracterização para as argamassas colantes, que ajudassem numa melhor compreensão dos fatores influentes neste mecanismo de ligação.

### 3.4.1 Caracterização da composição das argamassas colantes

As argamassas colantes selecionadas neste trabalho são industrializadas, não sendo suas formulações conhecidas. Possivelmente, cada tipo de argamassa colante possui tanto agregados quanto cimentos e aditivos de origem diferentes e em proporções variadas. Desta forma, uma explicação para desempenhos distintos entre as argamassas colantes quanto à resistência de aderência está relacionada principalmente a diferenças na composição de seus componentes. A caracterização das argamassas colantes poderá apontar quais compostos apresentam maiores influências nas propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido. A Figura 28 resume os ensaios adotados e suas principais aplicações.

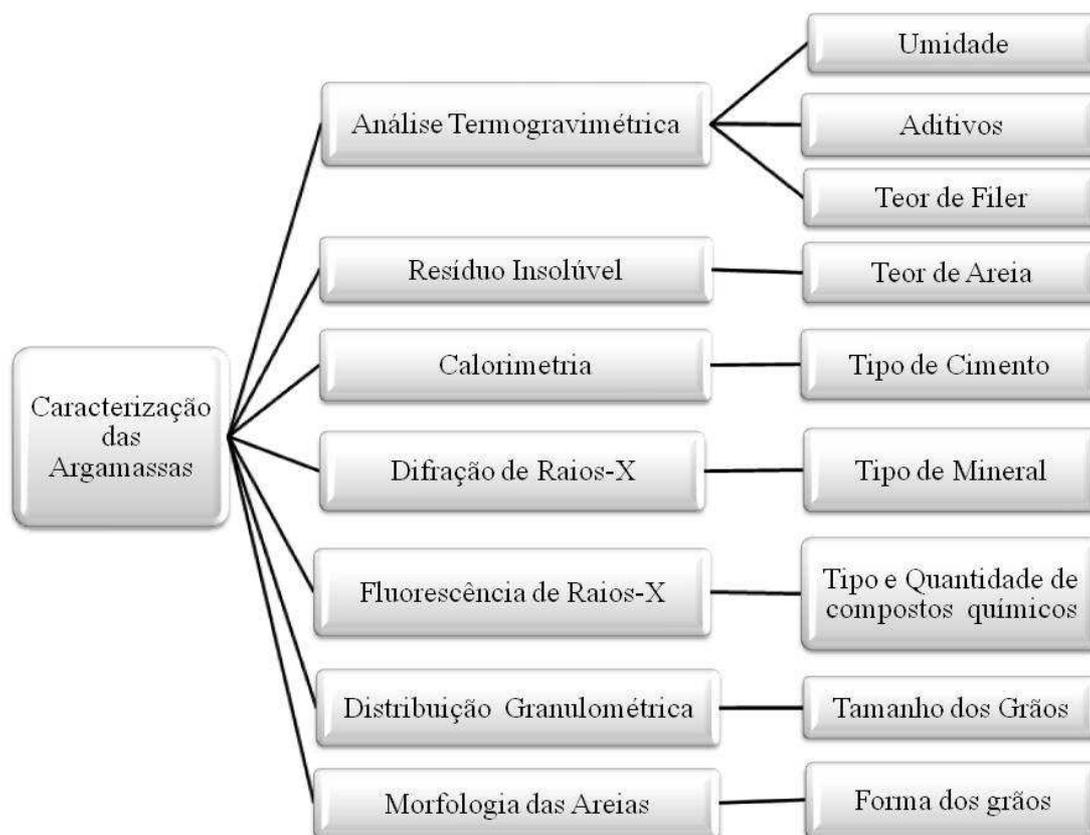


Figura 28: Técnicas empregadas para caracterização da composição das argamassas colantes e suas principais funções.

Para a execução desta etapa do experimento utilizou-se da parceria com os laboratórios da Votorantim Cimentos, Universidade de São Paulo - USP e do LAMIR – Laboratório de Análise de Minerais e Rochas da UFPR, por meio da realização de alguns ensaios de caracterização das argamassas colantes.

### 3.4.1.1 Resíduo insolúvel

Seguindo os procedimentos sugeridos por Quarcioni (1998) executou-se uma reconstituição aproximada do traço das argamassas colantes a fim de embasar as análises a respeito do comportamento dos sistemas de revestimento. Este é um ensaio de caracterização quantitativa. A argamassa colante, ao ser atacada com ácido clorídrico, dá origem a duas frações distintas: uma insolúvel e outra solúvel. Para argamassas de cimento Portland, a fração solúvel é composta pelos aglomerantes e aditivos e a fração insolúvel é constituída pelo agregado. A Figura 29 apresenta imagens que demonstram a sequência de execução do ensaio de resíduo insolúvel.

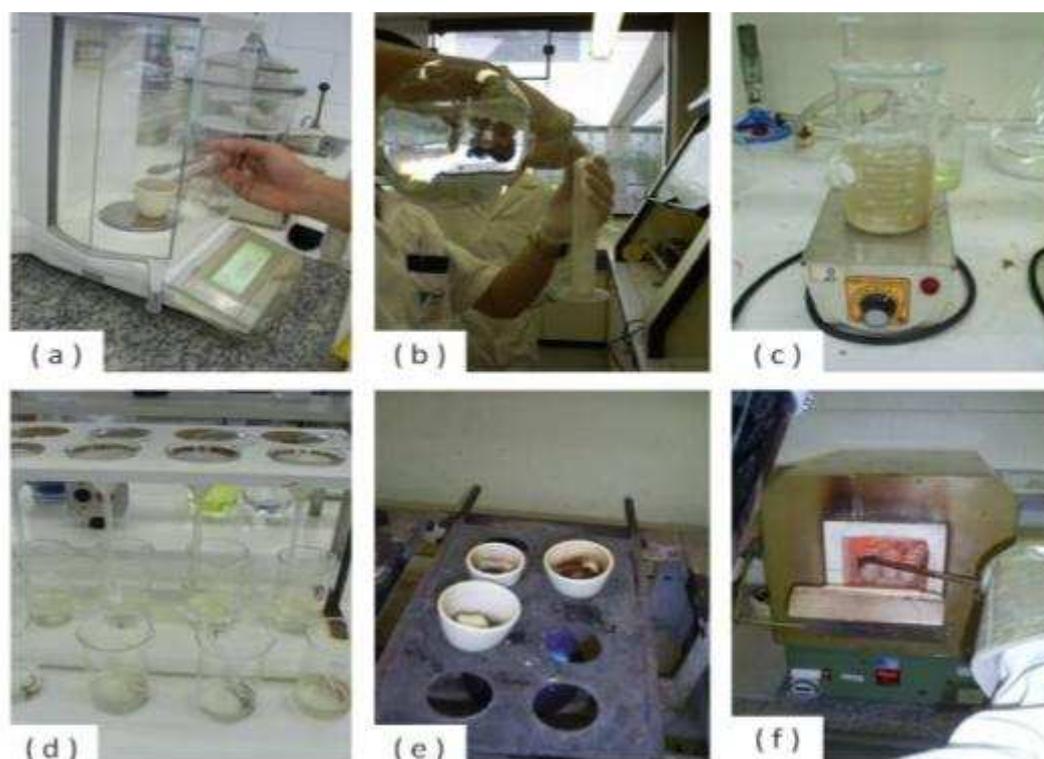


Figura 29: Análise química das argamassas colantes: (a) Pesagem da amostra e (b) Do solvente; (c) Homogeneização e dissolução da amostra; (d) Filtragem e (e) Secagem do filtrado; (f) Calcinação.

### 3.4.1.2 Espectrometria de fluorescência de raios-X – FRX

A FRX é uma técnica analítica que possibilita a determinação da composição química elementar de amostras sólidas. Esse ensaio analisa qualitativamente e quantitativamente a composição química das amostras. A técnica consiste na exposição da amostra a um feixe de radiação para a excitação e detecção da radiação fluorescente característica de cada elemento resultante da interação da radiação com o material da amostra.

Os elementos que compõem a amostra são excitados por uma fonte primária de radiação e passam a emitir uma radiação com comprimentos de onda característicos de cada elemento (raios-X fluorescentes). Por meio de um detector apropriado, pode-se medir estes comprimentos de onda, e conseqüentemente identificar os elementos por meio de uma curva de calibração ou padrões internos. Como a intensidade dos raios-X fluorescentes é proporcional a concentração a cada desses elementos, pode-se, portanto, quantificar estes elementos. Para execução da Fluorescência de raios-X, utilizou-se um equipamento da Philips modelo Magix Pro. A Figura 30 demonstra o equipamento utilizado para os ensaios de FRX.



Figura 30: Equipamento Philips, modelo Magix Pro, utilizado para execução do ensaio de fluorescência de raios-X.

As amostras foram analisadas por análise química quantitativa. Estas análises baseiam-se em modelagens matemáticas da resposta do equipamento para cada elemento analisado. Desta maneira, é possível avaliar a presença e quantificar “todos” os elementos presentes na amostra, isto é, aqueles mais pesados que o flúor e presentes acima de 0,1 % (LAMIR, 2011).

#### *3.4.1.3 Difração de raios- X - DRX*

A difratometria de raios-X corresponde a uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos e sua principal aplicação refere-se à identificação de fases minerais presentes nas amostras. O difratômetro é um instrumento para o estudo de materiais através da maneira que estes difratam raios-X de comprimento de onda conhecido. A Figura 31 demonstra o arranjo básico do instrumento.

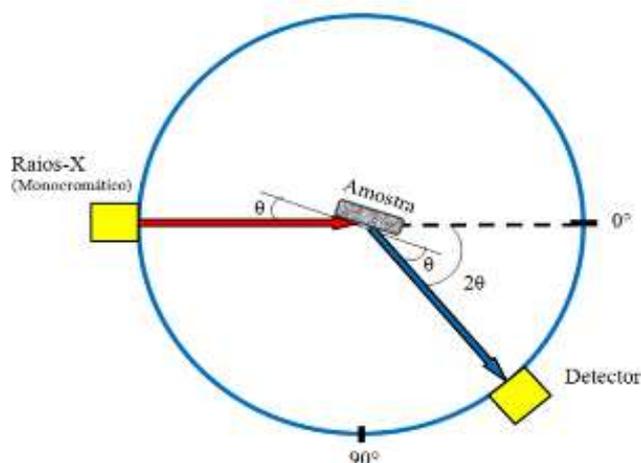


Figura 31: Arranjo básico de um difratograma de raios- X (GEMELLI, 2001).

Para a realização das medidas, feixes de raios-x são lançados na amostra, que dependendo do tipo de cristal de cada mineral difrata o raio a um determinado ângulo. Como cada mineral apresenta composição cristalográfica diferente, cada ângulo caracteriza um mineral presente na amostra. O resultado se apresenta em um gráfico que indica picos característicos de cada espécie química.

As amostras para análise por difração de raios-X foram preparadas sob a forma de pérolas para análise das areias (análise quantitativa). Neste trabalho utilizou-se um difratômetro de raios-X, modelo X' Pert da marca Philips. A Figura 32 apresenta o equipamento utilizado na pesquisa. Os parâmetros empregados para essa análise foram: tempo de varredura de 6 minutos e velocidade de contagem de 6 s por passo em ângulos  $2\theta$  entre 3 graus e 70 graus e com tempo de passo de 0,016 graus/segundo. Como fonte de raios-X foi utilizado o tubo cerâmico com ânodo de cobre.



Figura 32: Difratômetro de raios-X, marca Philips, modelo X' Pert.

#### 3.4.1.4 Análise termogravimétrica

Esse ensaio determina as variações de massa da amostra durante um aquecimento programado, indicando qualitativamente e quantitativamente a fração volátil resultante da decomposição de espécies químicas inorgânicas e orgânicas, além da umidade existente. Este método pode ser utilizado também para aferir sobre quanto de aditivo está sendo utilizado em determinada mistura (COSTA, 2006).

Com relação aos resultados fornecidos pelo ensaio, destacam-se as curvas de variação TG e DTG. A curva TG fornece a análise comparativa entre o percentual da massa inicial presente na amostra e a mudança de temperatura, possibilitando o reconhecimento das faixas térmicas em que ocorrem as perdas de massa mais significativas.

Além do gráfico TG, obtém-se também sua respectiva curva derivada (DTG), a qual traz a visualização da taxa de variação instantânea da massa da amostra ao longo do tempo em função da temperatura. O estudo da curva DTG é importante quando se deseja estudar a cinética das reações. Vale acrescentar às utilidades da DTG a melhor resolução e a facilidade de comparação a outras medidas. A estequiometria, contudo, é mais legível na representação original (TG).

Para a obtenção de curvas TG/DTG, pequenas partes das argamassas foram selecionadas até obter aproximadamente 10 mg da amostra. A amostra foi colocada no porta amostra para execução do ensaio. O equipamento utilizado foi um SDT Q600 com termobalança analítica. O SDT Q600 permite a medição simultânea do fluxo de calor, temperatura de transição e as mudanças de massa do material em faixas de temperatura que variam da temperatura ambiente até 1500 °C.

De acordo com Costa (2006), emprega-se a análise termogravimétrica em argamassas com o objetivo de quantificar a fração volátil do produto (umidade, água de hidratação ocorrida no armazenamento, anidrido carbônico do fíler calcário e aditivos orgânicos). Identificam-se as espécies químicas presentes nas argamassas por meio da comparação das faixas de temperatura em que ocorrem as reações. É possível identificar nas curvas relativas às argamassas estudadas as seguintes reações endotérmicas, relacionadas aos picos de perda de massa que ocorreram durante os ensaios:

Tabela 5: Relação entre perda de massa e temperatura no ensaio de Termogravimetria.

Determinação	Constituintes
Abaixo de 100 °C	Perda de umidade
Aproximadamente em 120 °C	Transformação da gipsita em hemidrato
Entre 200 e 500 °C	Perda devido à volatilização dos aditivos
De 500 a 800 °C	Liberação do CO <sub>2</sub> proveniente da dolomita ou do calcário

Sendo assim é possível proceder da seguinte maneira, partindo das curvas TG e DTG, para calcular as porcentagens aproximadas dos elementos identificados nos ensaios, conforme se verifica nas equações apresentadas na sequência:

$$\% \text{ de umidade} = \% \text{ de perda de massa abaixo de } 100 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Equação 1}$$

$$\% \text{ de gipsita} = \left( \frac{M_{\text{gipsita}}}{M_{1,5 H_2O}} \right) \times \% \text{ de perda de massa a } 120 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Equação 2}$$

$$\% \text{ de aditivos} = \% \text{ de perda de massa entre } 200 \text{ e } 500 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Equação 3}$$

$$\% \text{ de carbonatos} = \% \left( \frac{M_{CaCO_3}}{M_{CO_2}} \right) \times \% \text{ de perda de massa entre } 500 \text{ e } 800 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Equação 4}$$

Em que M é a massa molecular do composto em questão.

Os cimentos comerciais fabricados no Brasil permitem adições de filer em proporções que variam com o tipo de cimento, sendo o máximo permitido de até 10% em cimentos do tipo CPII. É possível que o teor de filer identificado pela termogravimetria seja proveniente da própria composição de cimento e não de adição a argamassa, sendo necessária uma correção nos valores encontrados. Para isto calculou-se o teor de CO<sub>2</sub> proveniente do cimento e descontou-se do valor de filer identificado nesta etapa utilizando-se a Equação 5.

$$\% CO_2 = \text{Perda ao fogo} - \text{Umidade} - \% \text{ aditivos} \quad \text{Equação 5}$$

### 3.4.1.5 Calorimetria de condução

A calorimetria consiste na determinação do fluxo de calor liberado durante o processo de hidratação do cimento, indicando a partir da taxa de evolução do calor e do calor total liberado, a reatividade do cimento. Esta técnica pode ser muito útil na determinação do tipo de cimento que foi empregado na argamassa colante, pois seus resultados apresentam a cinética de hidratação do cimento, permitindo assim comparação com o comportamento já conhecido dos cimentos comerciais.

Para este estudo foi utilizado o equipamento calorímetro de condução Thermometric, com sistema de aquisição de dados informatizado e com monitoramento da evolução do calor durante 48 horas.

O resultado é expresso em um gráfico em termos de fluxo de calor de liberação de calor ao longo do tempo, curvas de fluxo de calor (W/kg) e o calor (J/kg) em função do tempo. A Figura 33 apresenta um esquema das curvas de hidratação utilizadas para interpretação dos resultados de calorimetria.

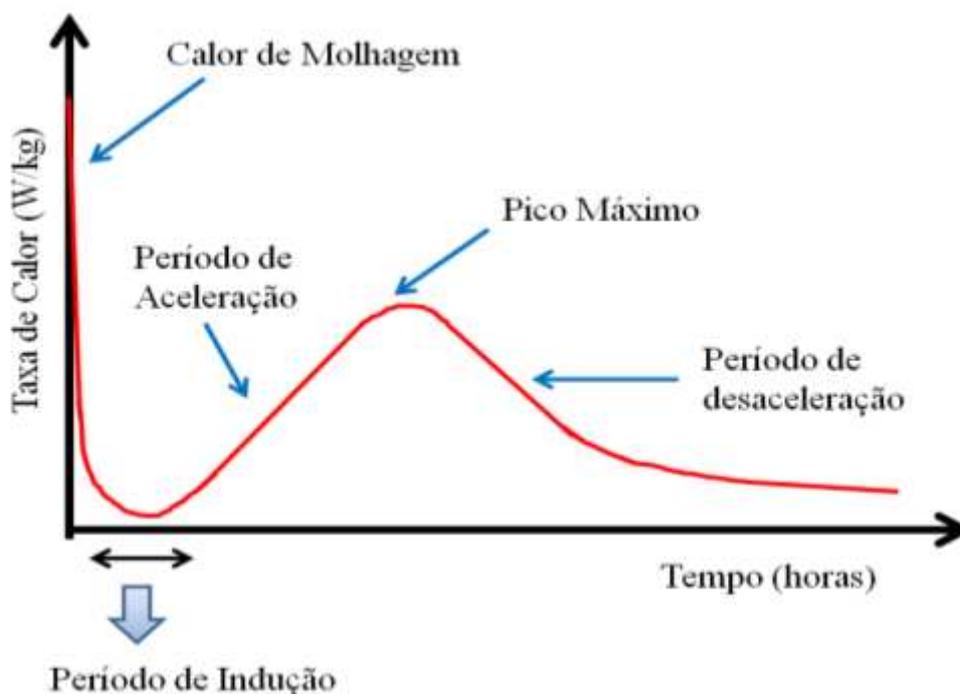


Figura 33: Representação esquemática da curva de calor de hidratação e critérios para interpretação dos resultados (Lyra, 2010).

Para execução das pastas utilizou-se uma relação água/materiais secos de 23% para todas as amostras. A preparação das pastas foi feita manualmente, com mistura de duração de 2 minutos.

#### 3.4.1.6 Densidade massa anidra e índice de vazios

A densidade de massa aparente refere-se à quantidade de material que preenche um recipiente com capacidade igual a uma determinada unidade de volume. O resultado é obtido pela diferença de massas do recipiente cheio e vazio, dividida por seu volume, o qual é expresso em  $\text{kg}/\text{dm}^3$ .

O ensaio de densidade no estado anidro de argamassas colantes é normalizado pela NBR 14086 (ABNT, 2004). A especificação recomenda para sua execução a utilização de um recipiente com volume de  $(400 \pm 1)$  mL. No ensaio a argamassa colante é homogeneizada e transferida para o recipiente padrão utilizando-se uma concha apoiada em sua borda. O volume deve ser suficiente para a utilização de uma amostra representativa do lote.

As principais variáveis de ensaio são o volume do recipiente e o adensamento da argamassa colante durante o ensaio, que depende da velocidade de queda da argamassa colante e da execução do rasamento. O adensamento vai depender da forma dos grãos de areia, da distribuição do diâmetro das partículas e da proporção aglomerante/agregado. Na prática, este valor é utilizado no proporcionamento da água de amassamento e na conversão de quantidades em massa para quantidades em volume. Este valor também é utilizado para calcular o teor de ar incorporado em argamassas convencionais no estado fresco, conforme demonstra a NBR 13278 (ABNT, 2005) e ainda para cálculo do índice de vazios na argamassa anidra. O índice de vazios é obtido pela Equação 6.

$$\text{Índice de Vazios} = 1 - \frac{\text{Densidade de massa anidra}}{\text{Massa Específica}} \quad \text{Equação 6}$$

#### 3.4.1.7 Análise granulométrica

O conhecimento da distribuição granulométrica das argamassas colantes é importante uma vez que o tamanho das partículas e a proporção em que se encontram distribuídas exercem influência no seu comportamento reológico, através de fenômenos como o imbricamento das partículas e facilidade de formação de cordões.

O detalhamento das dimensões das partículas (cimento e agregado) através da distribuição granulométrica foi definida pelo ensaio de peneiramento, utilizando-se as peneiras da série normal a partir da peneira de abertura de 1,00 mm (#18) até a peneira de abertura 0,090 mm (#170). Para o material passante na peneira 170, por tratar-se de um material muito fino, procedeu-se a análise por granulometria a laser.

Inicialmente obteve-se por quarteamento, uma amostra de 100 g da argamassa analisada. Posicionou-se as peneiras devidamente encaixadas umas sobre as outras, estando no topo a de maior abertura e despejou-se a amostra sobre a peneira superior.

O conjunto de peneiras foi submetido a agitação mecânica durante 10 minutos. Utilizou-se uma tampa sobre a peneira superior para evitar perda de materiais durante o peneiramento. Após o ensaio por peneiramento, as porções retidas em cada peneira foram pesadas e suas massas registradas. A sequência de aberturas das peneiras contemplou a série normal da ABNT.

Com 20 g de material passante na peneira de abertura 0,09 mm (#170) procedeu-se a análise granulométrica por difração a laser utilizando-se um granulômetro a laser marca MasterSizer 2000 com o mecanismo de dispersão a seco obtido pela unidade Scirocco 2000. A análise de distribuição de tamanho das partículas por difração a laser baseia-se no princípio de que, quanto menor o tamanho da partícula, maior o ângulo de difração de um feixe luminoso que atravessa uma população de partículas.

#### *3.4.1.8 Análise morfológica*

Para a análise morfológica três parâmetros foram levados em consideração: textura superficial, arredondamento e esfericidade. Em função das dimensões das partículas reduzidas nas areias, medidas morfométricas das areias são feitas sobre imagens das partículas em apenas duas dimensões, determinada por comparação visual (SUGUIO, 2003). As imagens dos grãos de areia foram obtidas em um microscópio óptico com câmera acoplada (Figura 34).



Figura 34: Microscópio com câmera acoplada (LAMIR, 2012).

A textura superficial descreve o aspecto morfológico da superfície dos grãos, numa escala de detalhes tal que não exerce influência na forma. Para fins de descrição, segundo a NBR 7389-1 (ABNT, 2009), existem três tipos básicos de textura superficial: polida, fosca e rugosa.

O arredondamento das partículas é avaliado pela presença de arestas vivas nos grãos (SUGGUIO, 2003) e segundo a NBR 7389-1 (ABNT, 2009) podem ser classificados em anguloso, subanguloso, subarredondado e arredondado. Esta norma ainda especifica a classificação dos grãos quanto à esfericidade, sendo denominadas como alta e baixa. A referida norma apresenta imagens de grãos para execução desta classificação, baseado em Power (1953). A Figura 35 apresenta o esquema de avaliação visual dos graus de esfericidade e arredondamento segundo a NBR 7389-1 (ABNT, 2009) baseado em Power (1953). A Figura 35 é uma reprodução da imagem da norma.



Figura 35: Avaliação visual do grau de esfericidade e de arredondamento de materiais naturais para utilização como agregado (NBR 7389-1 (2009) baseada em Power (1953)).

Quanto à esfericidade, esta propriedade pode ainda ser obtida por medidas de volume e perímetro das partículas. A NBR 7389-1 (ABNT, 2009) faz recomendações quanto a amostragem por faixas de peneiras para esta análise. Neste trabalho, uma vez que as areias analisadas estavam contidas entre as peneiras 30 e 170 (abertura de 0,6 mm e 0,090 mm, respectivamente) optou-se por não fazer a análise por frações retidas em cada peneira, sendo a análise feita no material total retido na peneira 170.

Seguindo procedimentos propostos por Gonçalves (2007), procedeu-se a análise de imagens das areias na fração retida na peneira 170. Para cada argamassa foi selecionada uma porção de 100g do material retido na peneira 170. Este material foi homogeneizado em saco plástico e então quarteado. Com o material obtido procedeu-se a aquisição de imagens em microscópio óptico (Figura 36). Foram medidos, aproximadamente, 300 grãos por amostra.

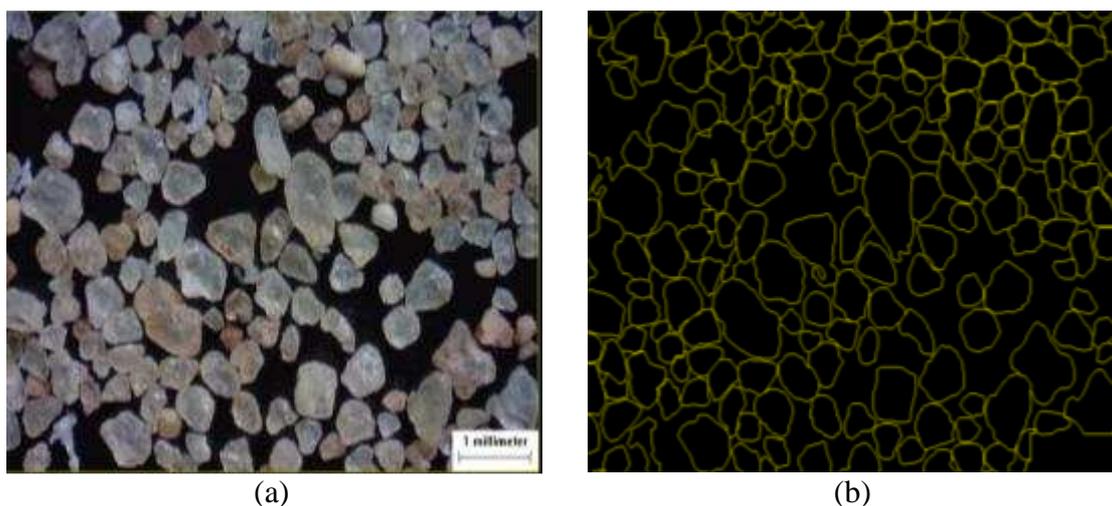


Figura 36: (a) imagens das areias obtidas em microscópio óptico; (b) binarização das imagens em AutoCad.

Para o cálculo da esfericidade das partículas através de imagens é necessário a binarização das imagens. De posse das imagens das areias, estas foram binarizadas utilizando o software AutoCAD (Figura 36b). Os grãos foram contornados e suas medidas registradas. A esfericidade foi então calculada através da Equação 7, proposta por Gonçalves et. al (2007). Por este índice, quanto mais próxima de uma esfera forem as partículas mais perto de 1 será o índice.

$$Esfericidade = \frac{4\pi \times \text{área projetada da partícula}}{\text{perímetro das partículas}^2} \quad \text{Equação 7}$$

### 3.4.2 Ensaio de caracterização no estado fresco

Argamassas colantes são assentadas no estado fresco, sendo, portanto, essencial o entendimento dos fenômenos e comportamento do material neste estado para interpretar os resultados obtidos no estado endurecido.

É neste momento também onde se observa o comportamento reológico das argamassas colantes, sendo para tal o ensaio de Squeeze Flow uma ferramenta interessante para comparar diferentes misturas.

### 3.4.2.1 Tempo em aberto

O tempo em aberto refere-se ao maior intervalo de tempo entre a aplicação da argamassa colante estendida em cordões sobre o substrato e o assentamento da placa cerâmica sobre estes cordões, de modo a obter uma resistência de aderência adequada. A NBR 14083 (ABNT, 2004) especifica um método para determinar o tempo em aberto para argamassas colantes destinadas ao assentamento de placas cerâmicas em pisos e paredes.

Para execução do ensaio, procedeu-se a imprimação do substrato padrão de concreto. Então se estendeu cordões de argamassa colantes na direção longitudinal sobre o substrato padrão. Transcorrido o tempo de 20 minutos, conforme o especificado na NBR 14081 (ABNT, 2004) para o tempo em aberto do produto ensaiado, posicionou-se 10 pastilhas cerâmicas (50 x 50 mm) sobre os cordões, conforme Figura 37.



Figura 37: Ensaio do tempo em aberto.

Posicionou-se, centralizadamente, sobre as pastilhas cerâmicas, uma massa padrão durante 30 s. Após a retirada das massas padrão, retiraram-se os cordões excedentes, deixando aproximadamente 1,0 cm de cordão ao redor das placas cerâmicas. Os conjuntos foram mantidos durante 28 dias nas condições de laboratório e então procedeu-se o ensaio de arrancamento por tração.

Para médias iguais e superiores a 0,30 MPa, descarta-se todos os resultados que se distanciarem mais de 20% da média. Para média inferior a 0,30 MPa, descarta-se os resultados que se distanciarem da média mais que 0,06 MPa. Com os resultados remanescentes, calcula-se a média final arredondada a primeira decimal.

O valor obtido deve ser comparado com 0,5 MPa. Se o valor obtido for igual ou superior a 0,5 MPa, o tempo em aberto da argamassa colante industrializada ensaiada é maior ou igual ao tempo para o qual o ensaio foi realizado. Se o valor obtido for inferior a 0,5 MPa, o tempo em aberto é inferior ao tempo ensaiado

#### *3.4.2.2 Densidade de massa fresca e teor de ar incorporado*

Para a obtenção da densidade de massa no estado fresco utiliza-se o mesmo recipiente do ensaio de densidade de massa no estado anidro. Introduziram-se porções de argamassa no recipiente cilíndrico, formando três camadas de alturas aproximadamente iguais. Em cada camada, aplicou-se 20 golpes ao longo do perímetro da argamassa utilizando-se uma espátula.

Após a execução do golpeamento da última camada, aplicou cinco golpes com o soquete ao redor da parede externa do recipiente para garantir o completo adensamento do material. Por fim procedeu-se o rasamento do recipiente com uma régua, em duas passadas ortogonais entre si, fazendo movimentos em toda a superfície da argamassa. A densidade de massa é a diferença entre as massas do recipiente cheio e vazio divididos pelo volume do recipiente.

O ar incorporado presente na mistura depende de muitos aspectos, como tipo de mistura, tipo de agregados, tipo de cimentos, utilização de cal e aditivos. O cálculo do teor de ar incorporado na mistura segue o recomendado pela NBR 13278 (ANBT, 2005) para determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Para obtenção do teor de ar incorporado é necessário ainda o cálculo da massa específica das argamassas, que foi obtida seguindo procedimentos da NBR NM 23 (ABNT, 2001).

#### *3.4.2.3 Retenção de água*

A retenção de água em argamassas convencionais é avaliada pelo método proposto pela NBR 13277 (ANBT, 2005), e consiste em determinar a quantidade de

água retirada de uma porção de argamassa contida em um funil de filtragem (funil de Büchner modificado), após uma sucção realizada por meio de uma bomba de vácuo a baixa pressão.

Com a finalidade de obter uma situação mais próximas da real condição a que as argamassas colantes estão submetidas em obra, e seguindo procedimentos sugeridos por Bittencourt Jr. e Maia (2010), neste trabalho o ensaio de retenção será ensaiado com o funil de Büchner, com o prato convencional de 20 mm e com uma modificação na espessura do prato onde a argamassa é posicionada durante a sucção.

No método convencional o prato é de 20 mm de espessura, espessura usada para avaliar argamassas de revestimento e na adaptação proposta o prato é de 5 mm de espessura, representando assim de forma mais fiel a espessura dos cordões de argamassa colantes aplicados em obra. A Figura 38 demonstra a diferença entre os pratos utilizados pelos dois métodos.



Figura 38: (A) Detalhes das espessuras das camadas de argamassa colante; (B) Pratos com argamassa colante para ensaio de retenção de água.

O procedimento de norma sugere que a leitura da quantidade de perda de água seja realizada após 15 minutos de sucção com a bomba de vácuo. Com a intenção de verificar o comportamento das argamassas durante um intervalo de tempo, neste trabalho sugere-se fazer leituras de perda de água em pontos entre 5 e 20 min, incluindo aos 15 min recomendado pela ABNT, a fim de obter-se uma curva de retenção de água para as argamassas estudadas.

### 3.4.2.4 Ensaio de Squeeze Flow

Este ensaio analisa o escoamento do material decorrente da aplicação de uma carga de compressão sobre a amostra no estado fresco, a qual ocasiona deslocamentos no seu interior devido aos esforços de cisalhamento radiais originados durante o fluxo. Questões sobre a aplicabilidade deste ensaio foram discutidas na revisão bibliográfica, sendo, no entanto importante ressaltar que os resultados desse ensaio evidenciam a consistência do material, mostrando a aplicabilidade no canteiro de obra, ou mesmo na comparação entre argamassas, como é o caso deste trabalho.

Nesta pesquisa serão utilizadas as configurações de molde restritivo, sugeridas por Kudo *et al.*, (2011), os quais sugerem que sejam utilizadas as mesmas configurações do ensaio Squeeze Flow normalizado pela NBR 15839 (ABNT, 2010) para argamassa básica, com modificações para adaptar-se às argamassas colantes. A velocidade de aplicação de carga utilizada, ou seja, a taxa de cisalhamento foi de 0,1 e 1,0 mm/s, também se utilizando das sugestões de Kudo *et al.*, (2011).

A força necessária para o ensaio foi exercida no material através de uma prensa universal de ensaios EMIC. O porta amostras é feito em PVC com diâmetro de 101 mm (4 polegadas), com altura de 10 mm e sem cortes laterais. A punção (placa superior) tem diâmetro de 50,8 mm (2 polegadas). A Figura 39a, apresenta a prensa executando o ensaio de Squeeze Flow. A Figura 39b e Figura 39c apresentam detalhes do ensaio, onde a primeira demonstra a compressão executada sobre o material enquanto a segunda exemplifica a tração sobre a argamassa colante.



Figura 39: Ensaio de Squeeze Flow em argamassa colante: (a) execução do ensaio; (b) patamar de compressão e (c) patamar de tração durante o ensaio.

### 3.4.3 Análise de imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por dispersão de energia de raios-X (EDS)

A principal função de qualquer microscópio é tornar visível ao olho humano o que for muito pequeno para tal. Sendo a aderência de sistemas de revestimentos de piso sobre piso resultados de ligações químicas e do contato da argamassa colante com a superfície sobre a qual ela será assentada, imagens em microscopia podem ser uma ferramenta interessante para analisar o contato entre a argamassa e as placas.

O limite máximo de resolução dos microscópios ópticos fica limitado a um aumento máximo de 2000 vezes, porque acima deste valor, detalhes menores são imperceptíveis. Um microscópio eletrônico de varredura (MEV) utiliza um feixe de elétrons no lugar de fótons utilizados em um microscópio óptico, o que permite solucionar o problema de resolução relacionado com a fonte de luz branca. O MEV é um aparelho que pode fornecer rapidamente informações sobre a morfologia de uma amostra sólida.

O MEV é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e análise de características microestruturais de objetos sólidos. A principal razão de sua utilidade é a alta resolução que pode ser obtida quando as amostras são observadas; valores da ordem de 2 a 5 nanômetros são geralmente utilizados (NAGATANI *et al.*, 1987). Outra característica importante é a aparência tridimensional da imagem das amostras, resultado direto da grande profundidade de campo. Permite, também, o exame em pequenos aumentos e com grande profundidade de foco, o que é extremamente útil, pois a imagem eletrônica complementa a informação dada pela imagem óptica.

Os resultados deste ensaio podem ser associados com as características reológicas das argamassas, uma vez que o comportamento ideal seria aquele onde a argamassa preenchesse completamente a interface com a placa sem deixar espaços vazios, o que interfere de maneira negativa sobre a resistência de aderência do conjunto. Para este trabalho foram realizadas imagens em microscopia eletrônica de varredura (MEV) para verificar a ligação entre a argamassa colante e as superfícies esmaltadas dos pisos antigos e a ligação das argamassas e o tardo das placas novas. As amostras analisadas foram retiradas dos pisos assentado no campo de teste, podendo-se assim colaborar na interpretação dos dados de resistência de aderência. Os ensaios de microscopia foram realizados no Centro de Microscopia da UFPR.

### 3.4.3.1 Preparação das amostras

As amostras foram retiradas do piso externo assentado no campo de testes. Retirou-se uma peça de aproximadamente 7,0 cm<sup>2</sup> com profundidade suficientemente grande que alcançasse o contrapiso. Utilizou-se para os cortes laterais uma maquina e após os cortes as peças foram retiradas com o auxílio de martelotes. A Figura 40 apresenta detalhes das peças retiradas do campo de testes.



Figura 40: Amostras de piso sobre piso retiradas do campo de testes.

Estas amostras foram levadas ao laboratório e com o auxílio de uma serra de precisão foram retiradas amostras com tamanho suficiente para a análise no microscópio. O porta-amostra do equipamento tem seção circular de aproximadamente 2,5 cm de diâmetro e altura máxima da amostra de 1,5 cm.

Com base nas medidas do porta-amostra, confeccionou-se amostras retiradas do piso com aproximadamente 2,0 cm<sup>2</sup>. A utilização da serra de precisão visou não danificar as amostras, uma vez que se buscou analisar as interfaces de aderência, sendo que qualquer esforço poderia alterar as reais condições de ligação das mesmas.

Utilizou-se o corte abrasivo, pois este oferece como resultado superfícies planas com baixa rugosidade, de modo rápido e seguro. O equipamento utilizado para o corte é conhecido como “cut-off”, ou policorte, com discos abrasivos refrigerados (evitando deformações devido ao aquecimento) a relativas baixas rotações. A Figura 41 demonstra esta etapa de trabalho.



Figura 41: Obtenção de amostras para microscopia utilizando-se uma serra policorte de precisão.

As amostras já no tamanho ideal para análise foram embutidas a frio em resina. O embutimento consiste em circundar a amostra com um material adequado, formando um corpo único. O embutimento é de grande importância para o ensaio, pois além de facilitar o manuseio de peças pequenas, evita que amostras com arestas rasguem a lixa ou o pano de polimento, bem como o abaulamento durante o polimento.

O embutimento a frio é feito usando-se uma resina sintética de polimerização rápida que consiste de duas substâncias formando um líquido viscoso quando misturadas. Neste trabalho utilizou-se a resina e o catalisador da marca Arotec. A reação de polimerização, a despeito do nome que é a operação de embutimento a frio tem, é exotérmica, atingindo temperaturas entre 50 e 120° C, dependendo do tipo de resina e do catalisador. O tempo de endurecimento é de aproximadamente 30 minutos.



Figura 42: Resina polimérica utilizada para o embutimento.

A mistura foi vertida dentro de um molde de PVC onde se encontrava a amostra de piso sobre piso. Aguardou-se o período de cura da resina e retirou-se o conjunto de dentro do molde para proceder-se então o lixamento do conjunto. A Figura 43 demonstra o procedimento de preparação das amostras e a resina utilizada para embutimento da amostra.

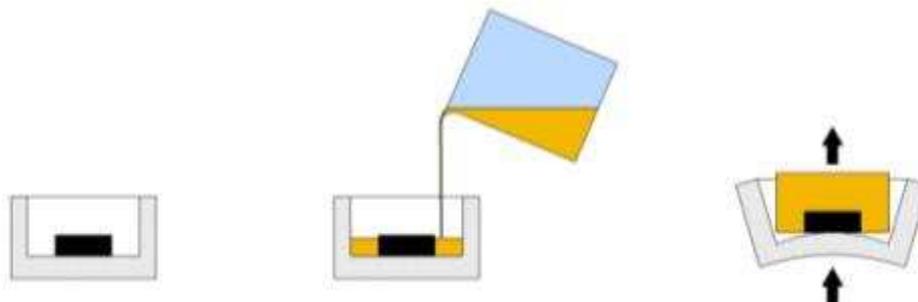


Figura 43: Embutimento das amostras: (a) Posicionamento da amostra no molde; (b) Embutimento com a resina e; (c) Retirada da amostra do molde.

Devido ao grau de perfeição requerida no acabamento de uma amostra, é essencial que cada etapa da preparação seja executada cautelosamente, e o lixamento é um dos processos mais demorados da preparação de amostras. Esta operação tem por objetivo eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície dando um acabamento a esta superfície, preparando-a para o polimento.

A técnica de lixamento manual consiste em se lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção ( $90^\circ$ ) em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior. A sequência de lixas adotadas para o trabalho foi lixas nº 220, 320, 400, 600, 800, 1000 e 1200. Quanto mais baixo o número, mais grossa será a lixa, ou seja, maior os grãos abrasivos.

Após o lixamento procedeu-se o polimento das amostras visando um acabamento superficial polido isento de marcas. Utilizou-se para este fim pasta de alumina como abrasivo. O pano de polimento utilizado foi veludo. Antes de realizar o polimento procedeu-se a limpeza na superfície da amostra, de modo a deixá-la isentam de traços abrasivos, solventes, poeiras e outros. A operação de limpeza foi feita por lavagem com água. A Figura 44 mostra o equipamento utilizado para o lixamento e para polimento das amostras.



Figura 44: Preparação das amostras para microscopia: lixamento e polimento.

As amostras polidas foram recobertas com ouro, buscando-se uma melhor condutibilidade das amostras, o que influenciará diretamente na qualidade das imagens obtidas pelo MEV. O recobrimento deve ser tão uniforme quanto possível na superfície da amostra, de forma que imagens possam ser adquiridas sem ajustes de contraste e brilho intermediários. A Figura 45a apresenta o equipamento utilizado para recobrimento da amostra e a Figura 45b mostra a amostra após a operação de recobrimento, já sendo possível ver a superfície recoberta por ouro.

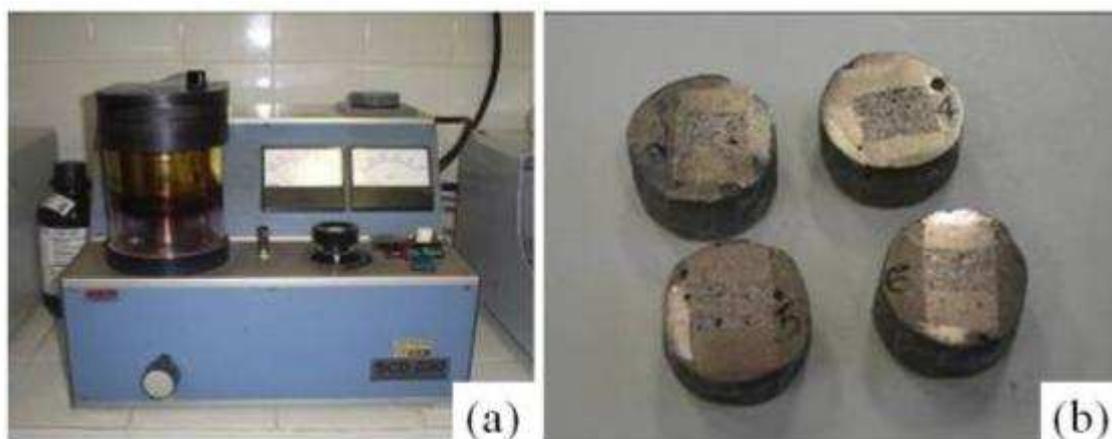


Figura 45: Preparação das amostras para microscopia: (a) Equipamento utilizado para recobrimento das amostras com ouro; (b) Amostras após o recobrimento.

### 3.4.3.2 Aquisição de imagens

Após a metalização da amostra, esta foi levada ao microscópio eletrônico de varredura – MEV para aquisição das imagens. Num primeiro momento utilizou-se o microscópio eletrônico de Bancada - Modelo FEI Phenom Tabletop Microscope para aquisição de imagens apenas. A Figura 46a apresenta o MEV e a Figura 46b um detalhe do porta-amostras do equipamento.

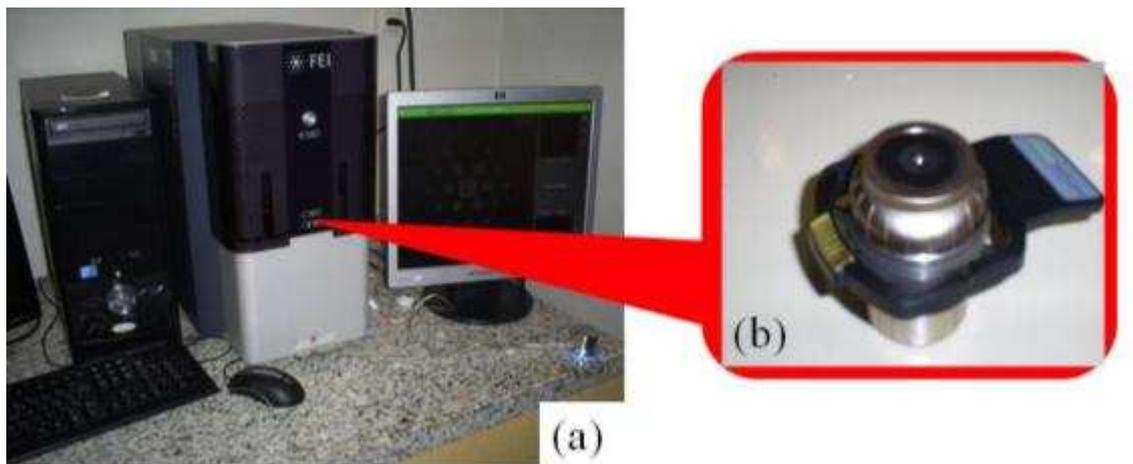


Figura 46: Ensaio de Microscopia: (a) Microscópio eletrônico de varredura – MEV de bancada; (b) Porta amostras para o MEV.

Numa segunda etapa pós análise das imagens no MEV de bancada, procedeu-se a análise das argamassas no MEV com EDS acoplado. Na configuração de um microscópio eletrônico podem-se acoplar um detector de raios-X (EDS), que permitem coletar fótons produzidos pelo feixe de elétrons primários. O resultado é um espectro de energia que permite identificar o elemento químico presente na amostra. A Figura 47a mostra o equipamento utilizado no ensaio e a Figura 47b o porta amostra com as amostras posicionadas para o ensaio.

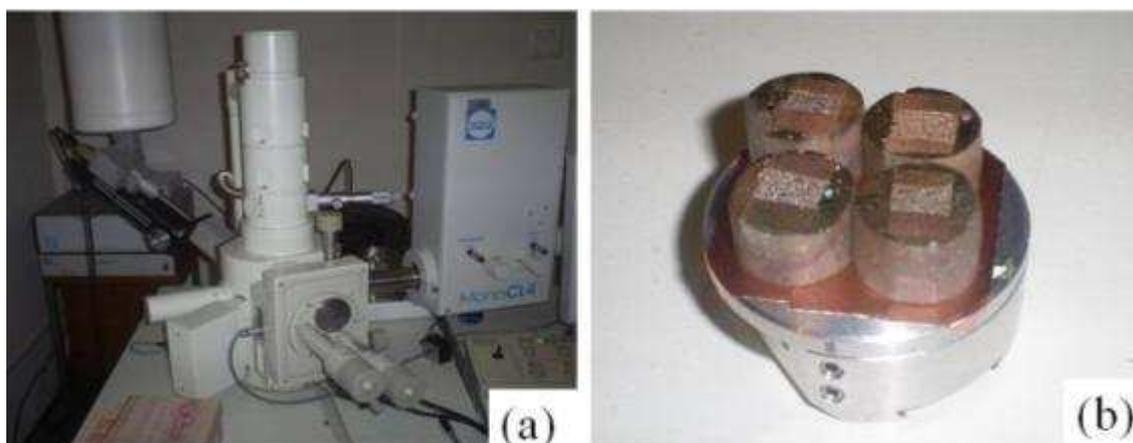


Figura 47: Ensaio de Microscopia: (a) Microscópio eletrônico de varredura – MEV associado ao EDS; (b) Porta amostras com as amostras.

Tanto a preparação das amostras quanto a aquisição de imagens foi realizada no centro de microscopia da UFPR, Campus Centro Politécnico.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo principal deste trabalho é avaliar os fatores influentes na resistência de aderência das argamassas colantes utilizadas para assentamento de piso sobre piso. Anteriormente foram detalhados os procedimentos de execução dos ensaios de resistência de aderência tanto nos pisos de referência quanto nos pisos assentados externamente e os ensaios de caracterização das argamassas. Neste item serão apresentados e discutidos os resultados e detalhes de tratamentos dos dados obtidos com a execução do planejamento experimental.

### 4.1 Caracterização da composição das argamassas colantes

#### 4.1.1 Proporção dos constituintes da argamassa colante

Para determinação da quantidade dos materiais presentes em cada composição inicialmente procedeu-se o ensaio de resíduo insolúvel das amostras. Os resultados estão apresentados na Figura 48.

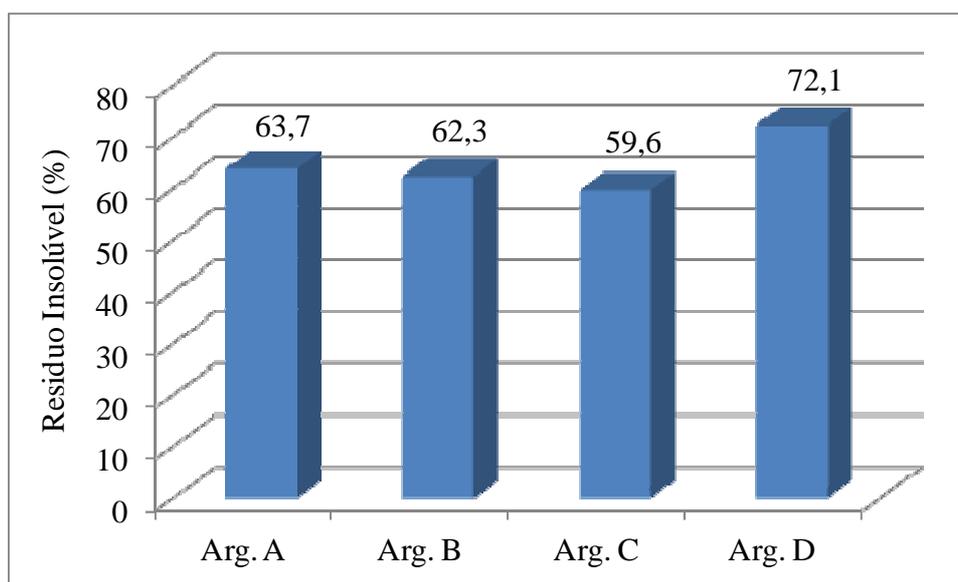


Figura 48: Teor de resíduo insolúvel das argamassas.

O resíduo insolúvel das argamassas é composto basicamente por areia e filer, enquanto a fração solúvel da amostra é composta por aditivos e cimento. Para a

determinação da proporção entre estes materiais na mistura utilizou-se o ensaio de termogravimetria.

Os principais produtos identificados normalmente por este ensaio, para argamassas, são umidade, água de hidratação ocorrida no armazenamento, anidrido carbônico do fíler calcário e aditivos orgânicos. A Tabela 6 apresenta um resumo dos resultados obtidos para as quatro argamassas investigadas. As curvas de TG/DTG completas das argamassas estão apresentadas no ANEXO II.

Tabela 6: Compostos identificados por termogravimetria das argamassas colantes (%).

Argamassa	% de Elementos			
	Até 100 °C	Aproximadamente em 120 °C	Entre 200 e 500 °C	De 500 a 800 °C
	Umidade	Hemidratos	Aditivos	Carbonatos
A	0,21	1,53	1,18	9,96
B	0,27	3,15	0,83	8,11
C	0,29	1,12	1,37	7,10
D	0,16	1,10	0,54	4,19

Sabendo-se que o carbonato identificado pela termogravimetria refere-se ao fíler presente na composição da argamassa e que este pode ser proveniente tanto da adição deste composto durante a dosagem da argamassa quanto proveniente da composição do próprio cimento utilizado, procedeu-se a correção dos valores encontrados conforme já detalhado em 3.4.1.4.

Com os valores de resíduo insolúvel e da porcentagem de fíler em cada composição foi possível calcular o percentual de agregado das argamassas. Da mesma forma, com os valores da fração solúvel das argamassas diminuído o valor de aditivos identificado pela termogravimetria foi possível obter a quantidade aproximada de cimento usada na formulação das argamassas. A Tabela 7 apresenta as prováveis proporções entre os constituintes das argamassas colantes estudadas.

Tabela 7: Proporção entre os materiais na composição das argamassas.

Argamassa	% de Elementos				
	Agregado Total	Cimento	Fíler do cimento *	Adição de fíler	Aditivo
Arg. A	53,8	42,3	7,2	2,8	1,2
Arg. B	52,9	46,3	9,4	0,0	0,8
Arg. C	48,9	49,7	10,7	0,0	1,4
Arg. D	67,7	31,7	4,4	0,0	0,5

\* A quantidade de fíler identificado nesta coluna já está contabilizada na coluna referente ao cimento, logo, somando-se agregado total, cimento, adição de fíler e aditivos resultará em 100%.

Para uma melhor visualização das proporções entre os constituintes da argamassa, utilizaram-se os dados da Tabela 7 para elaboração da Figura 49 que apresenta as possíveis proporções de cada material na composição das argamassas.

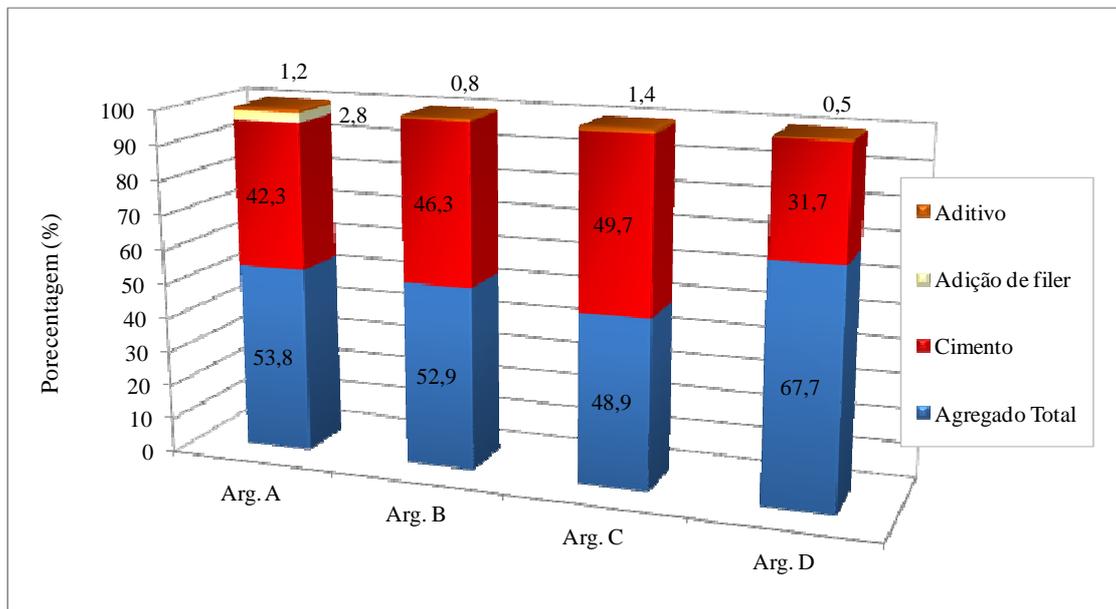


Figura 49: Proporção de materiais que compõem as argamassas.

Quanto aos valores obtidos, cabe ressaltar que o agregado identificado é composto por partículas finas e grossas (retidas e passantes na #170). O percentual de agregado com diâmetro inferior a 90  $\mu\text{m}$  somados ao cimento e ao filler irá compor a pasta da argamassa. O teor de finos irá determinar a quantidade de água necessária para obter-se trabalhabilidade adequada das misturas. A Figura 50 demonstra em um gráfico de barras as diferenças de porcentagens de material passante e retido na peneira 170.

Ao analisar as frações retidas e passantes na peneira 170 verifica-se que, em relação a esta característica, têm-se duas famílias distintas de argamassa, sendo uma composta pelas argamassas C e D, que possuem fração passante na #170 entre 23 e 25 % e uma segunda família composta pelas argamassas A e B com porcentagem passante na #170 entre 36 e 41%.

Verifica-se que a segunda família possui uma quantidade de finos significativamente superior a primeira. A proporção de finos em cada mistura, somadas aos diferentes teores de água especificados pelos fabricantes, irão exercer grande influência no comportamento reológico das argamassas.

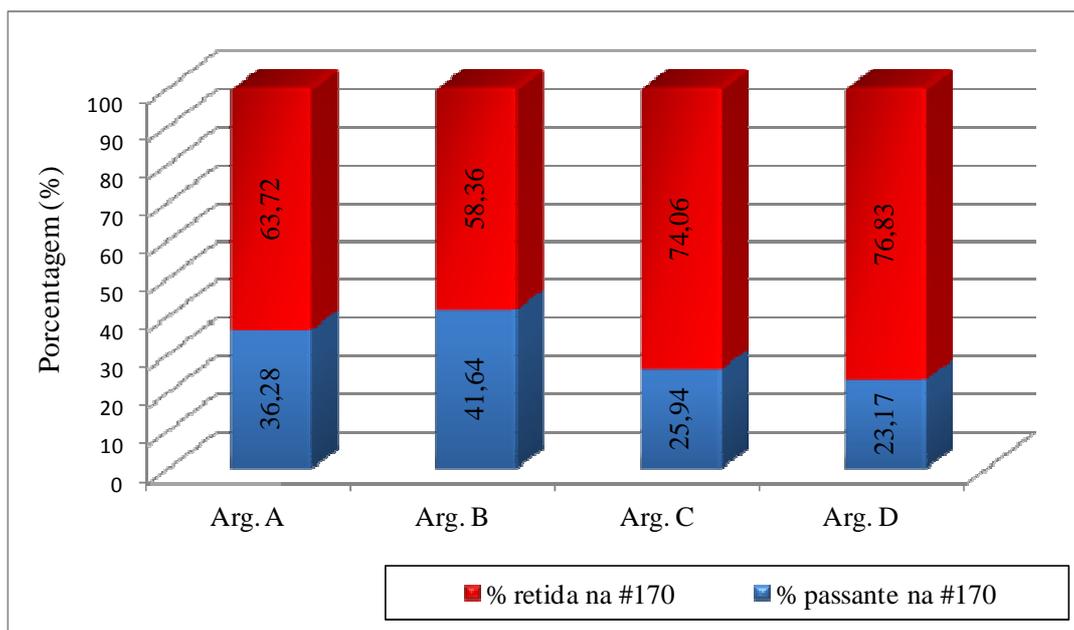


Figura 50: Fração retida e passante na peneira de abertura de 90  $\mu\text{m}$  (#170) das argamassas colantes.

Argamassa colante	Relação água/argamassa (%)	Teor de finos (%)
A	21,0	36,28
B	29,0	41,64
C	23,0	25,94
D	21,5	23,17

Os efeitos da proporção dos materiais sobre as propriedades no estado fresco das argamassas serão discutidas no item 4.2.

#### 4.1.2 Caracterização do cimento utilizado nas argamassas colantes

As pastas das argamassas colantes (fração passante na #170) foram submetidas ao ensaio de calorimetria e fluorescência de raios-X para identificar qual tipo de cimento foi utilizado pelos fabricantes na formulação das argamassas. A Figura 51 apresenta as curvas de calorimetria das pastas de cimento que compõem as argamassas colantes, obtidas pelo material passante na peneira 170. A Tabela 8 apresenta os resultados de análises semi quantitativas por fluorescência de raios-X para as argamassas colantes.

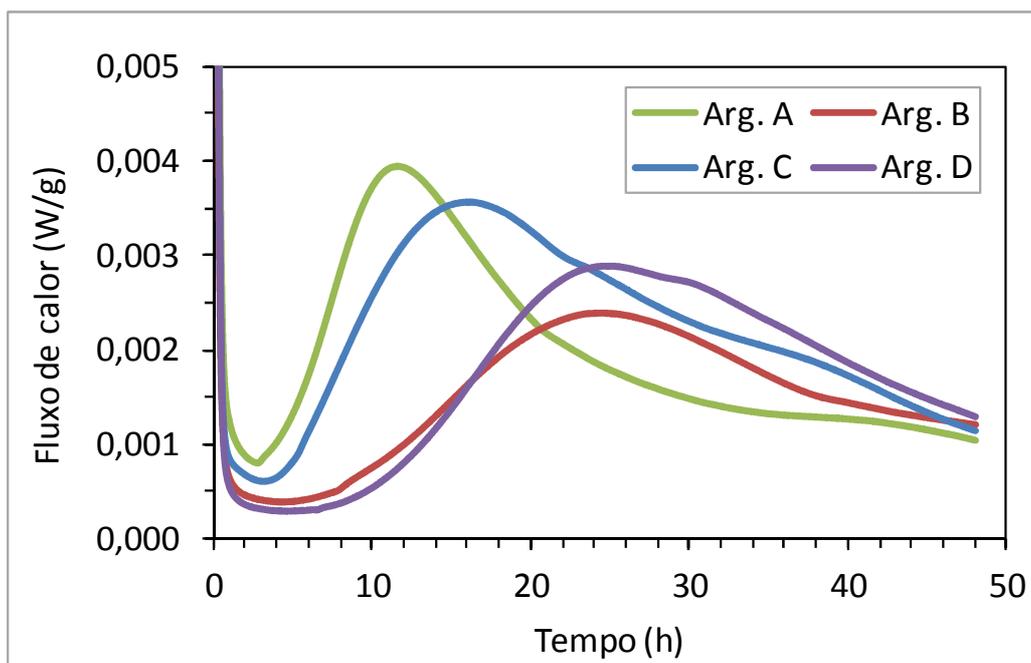


Figura 51: Curvas de calor liberado na hidratação das pastas de argamassas colantes.

Tabela 8: Ensaio de Fluorescência de Raios-X das argamassas colantes.

Origem		A	B	C	D
Perda ao Fogo TGA (%)		6,35	5,25	4,56	2,62
SiO <sub>2</sub> (%)	Dióxido de Silício (Sílica)	64,036	63,702	69,641	73,842
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Alumina	2,386	2,692	2,008	1,410
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Óxido de Ferro	0,624	0,865	0,855	1,458
CaO(%)	Óxido de Cálcio (Cal Virgem)	20,001	22,260	18,029	15,636
MgO(%)	Óxido de Magnésio (Magnésia)	4,031	2,342	2,771	3,149
Na <sub>2</sub> O(%)	Óxido de Sódio	0,181	0,159	0,092	0,000
K <sub>2</sub> O(%)	Óxido de Potássio	0,528	0,507	0,353	0,000
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Pentóxido de Fósforo	0,093	0,146	0,072	0,420
SO <sub>3</sub> (%)	Trióxido de Enxofre	1,566	1,868	1,471	1,103
TiO <sub>2</sub> (%)	Dióxido de Titânio	0,118	0,102	0,090	0,169
MN <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Óxido de Manganês III	0,000	0,008	0,008	0,008
Soma (%)		100	100	100	100

Observando as curvas de calorimetria e comparando-as com curvas de cimentos comerciais somadas a informações dos fabricantes das argamassas, pode-se inferir sobre quais os cimentos presentes em cada composição.

Observando-se os pontos de início de pega dos cimentos, pode-se afirmar que nas argamassas colantes nenhum dos cimentos é do tipo CPV-ARI, uma vez que todas as argamassas têm seu início de pega acima de 3 horas. Podemos descartar também a utilização de cimentos do tipo CPIII e CPIV, pois a utilização destes cimentos seria

inviável tanto pelos custos quanto pela sua disponibilidade no mercado. Segundo a SNIC (2011) a produção anual de cimentos do tipo CII é 461% maior do que de um cimento CIII e 575% maior do que de um cimento CIV, sendo ainda este último de produção sazonalizada, o que poderia comprometer a linha de produção da fábrica de argamassas.

Através de informações dos fabricantes das argamassas e baseado nos locais onde estas foram fabricadas sabe-se que os cimentos utilizados são todos do tipo CII. Resta agora distinguir se os cimentos são do tipo CII-F, CII-Z ou CII-E.

Pela baixa perda ao fogo observada na termogravimetria da argamassa D pode-se descartar o uso de cimento CII-F, uma vez que a presença de fíler tende a elevar a perda ao fogo destes cimentos. Devido ao teor de  $Al_2O_3$  e CaO menor na argamassa D em comparação as demais e ao elevado teor de  $SiO_2$  (ver Tabela 8) acredita-se que estes tenham em sua composição pozolanas, o que caracterizaria o uso de cimento CII-Z. Esta hipótese é reforçada quando analisamos o local de fabricação destas argamassas, região sul, e verificamos que os cimentos CII-Z são muito comuns nesta região.

As argamassas B e D parecem ter um mesmo tipo de cimento, o que pode ser observado pela forma dos gráficos de evolução de calor e pelos pontos de início de pega dos cimentos. Devido ao início de pegas ser posterior às outras duas argamassas, estas possivelmente contenham pozolanas, o que reforça a hipótese do uso de um CII-Z, além de ambas serem fabricadas na mesma região. As diferenças observadas entre as duas curvas de calorimetria devem ser provavelmente devido ao efeito diferente dos aditivos existentes sobre as formulações.

Quanto à argamassa A, verifica-se através das curvas de calorimetria que esta tem início de pega mais rápido em comparação as demais. Partindo-se do pressuposto de que todas as argamassas tenham quantidades similares de aditivos e sabendo-se que a argamassa A é da mesma região que as argamassas B e D, supõe-se que nesta argamassa seja utilizado o cimento CII-F. Esta argamassa também é a que tem a maior perda ao fogo identificada pela TG corroborando desta forma com esta hipótese da presença de fíler, uma vez que quanto maior o percentual de fíler maior a perda ao fogo apresentada pelas argamassas.

Por fim a argamassa C, segundo o fabricante, é composta por um cimento CII-E. Este é o cimento comum na região de fabricação da argamassa C, o que viabiliza sua utilização. Pelos dados de calorimetria e fluorescência não foi possível confirmar esta informação.

#### 4.1.3 Caracterização das areias utilizadas nas argamassas colantes

Por ataque ácido sobre a fração retida na peneira 170, foi feita a separação da fração insolúvel das argamassas (basicamente areia). Com a areia da argamassa procedeu-se o ensaios de Fluorescência de raios-X, que identifica as espécies químicas presente na mistura. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos com o ensaio de FRX das areias.

Tabela 9: Ensaio de Fluorescência de Raios-X das areias.

Origem	A	B	C	D
Perda ao Fogo TGA (%)	2,29	2,01	2,29	0,70
SiO <sub>2</sub> (%)	94,84	96,21	96,44	97,99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,45	0,32	0,20	0,31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,17	0,21	0,40	0,20
CaO(%)	1,31	1,01	0,45	0,43
MgO(%)	0,30	0,20	0,18	0,21
Na <sub>2</sub> O(%)	0,050	0,05	0,02	0,03
K <sub>2</sub> O(%)	0,27	0,14	0,03	0,22
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0,01	0,02	0,01	0,02
TiO <sub>2</sub> (%)	0,13	0,07	0,09	0,15
Soma (%)	100	100	100	100

As análises químicas apresentadas indicam uma similaridade entre as amostras. De um modo geral, verifica-se que as areias são compostas basicamente por dióxido de silício (sílica) indicando a predominância de areia quartzosa.

Para identificar as fases minerais presentes nas argamassas, sendo provenientes da areia, procederam-se o ensaio de difração de raios-X. A Figura 52 apresenta os difratogramas das amostras. Os principais picos identificados pelos difratogramas foram de quartzo, indicando a presença majoritária de areia quartzosa e confirmando-se as conclusões obtidas pela fluorescência de raios-X (Tabela 9).

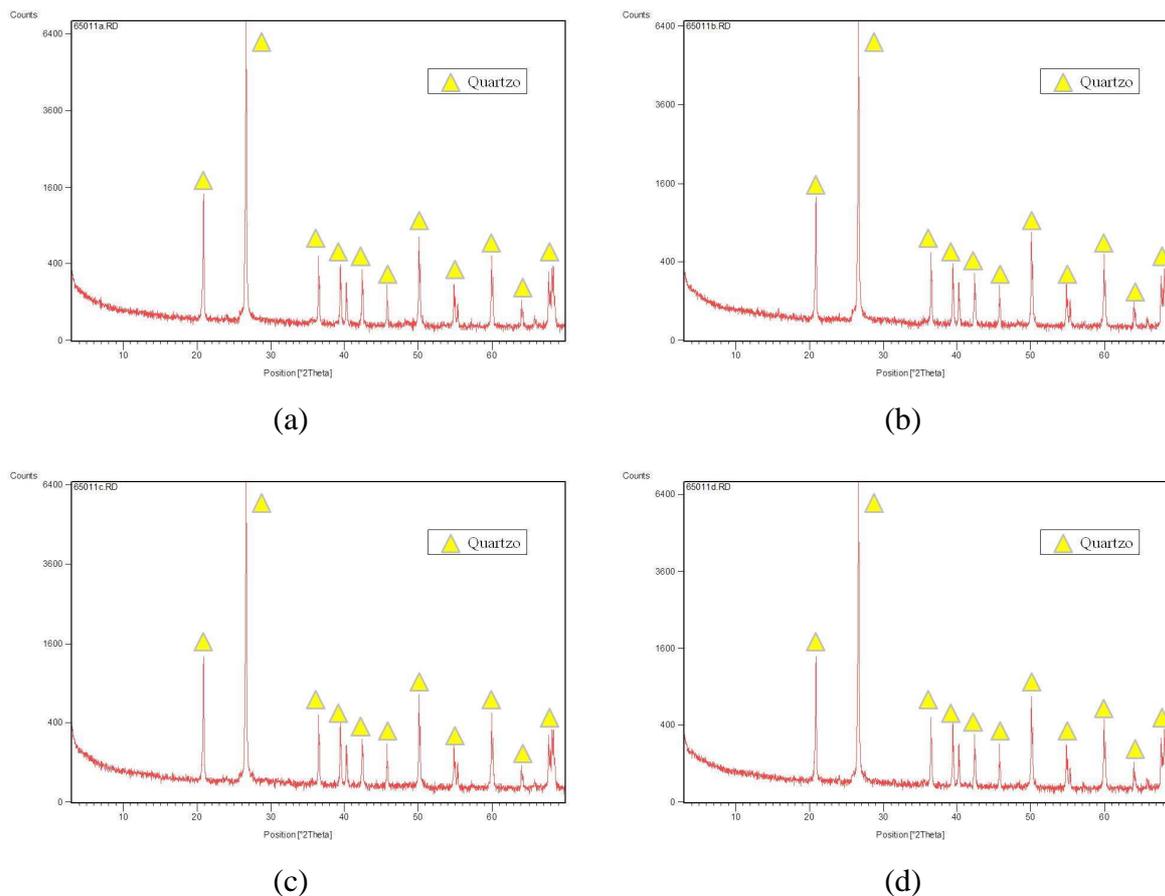


Figura 52: Difratomogramas das areias presentes nas argamassas colantes.

#### 4.1.4 Análise granulométrica da argamassa colante

Conforme verificado pelos ensaios de DRX as areias são quartzosas. O detalhamento das dimensões das partículas que compõem a argamassa colante (cimento, fíler e agregado) através da distribuição granulométrica foi definido pelo ensaio de peneiramento até a peneira de abertura 0,090 mm (#170) e para o material passante nessa peneira a verificação da distribuição granulométrica foi conduzida no granulômetro a laser.

A Figura 53 apresenta o gráfico da distribuição granulométrica completa das argamassas colantes adotadas nesta pesquisa.

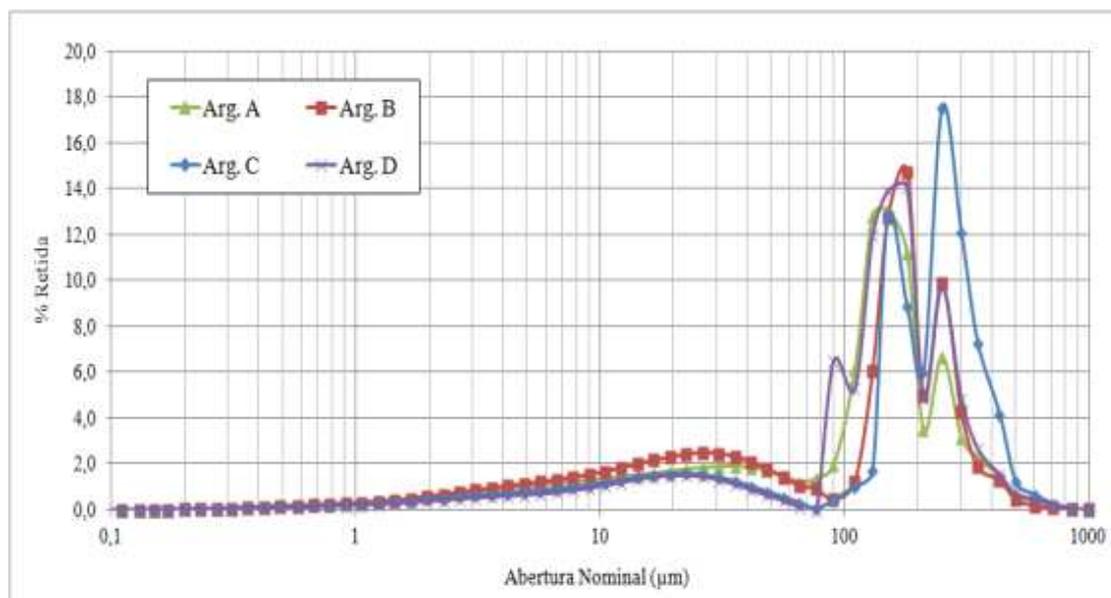


Figura 53: Curvas granulométricas completas das argamassas colantes.

Analisando-se as curvas granulométricas completas verifica-se que existem diferenças entre elas, principalmente com relação à argamassa C. Para uma visualização mais detalhada, a Figura 50 apresenta as curvas granulométricas das argamassas colantes (fração passante na peneira 170) obtidas pelo granulômetro a laser.

A fração fina da argamassa é composta tanto pela fração fina da areia quanto por cimento e fíler. Estes finos irão exercer influência no estado fresco da argamassa, tanto pelo teor de pasta quanto pela demanda de água para obter-se a trabalhabilidade da mistura.

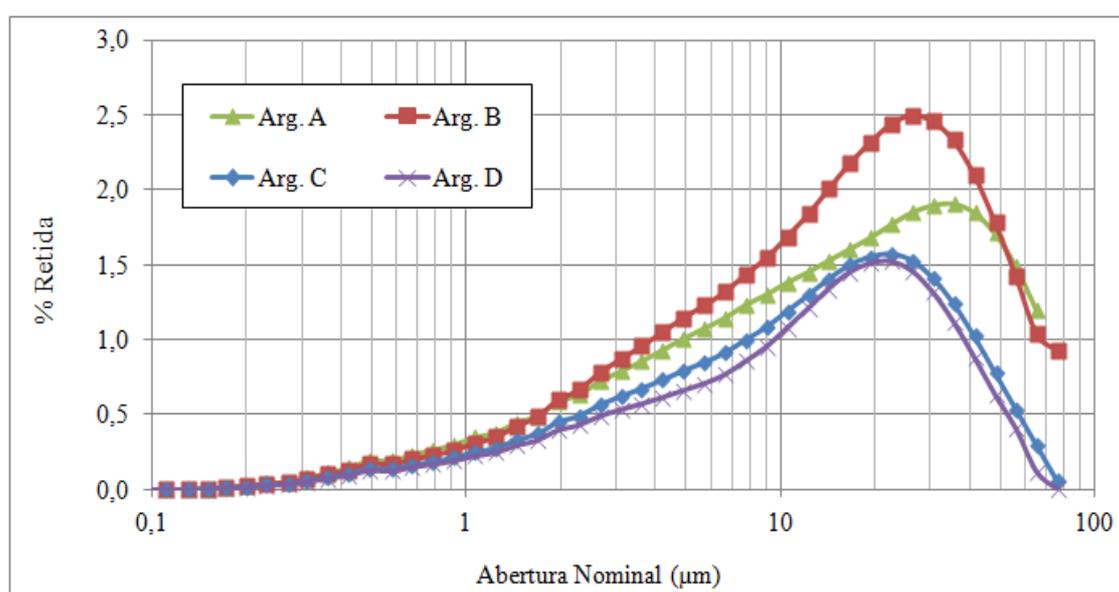


Figura 54: Curvas granulométricas de argamassas colantes (fração passante na peneira 170) obtidas pelo granulômetro a laser.

Uma suposição para as diferenças entre o perfil da curva da argamassa A é de que a mesma possa ter incorporado a suas formulações uma quantidade maior de fíler em substituição ao cimento, material nesta faixa granulométrica e que teoricamente contribuiria para a trabalhabilidade da argamassa além de diminuir custos, uma vez que ele pode ser usado como substituição ao cimento. Isto pode ser comprovado nos ensaios de termogravimetria, onde se verificou que a argamassa A possui uma quantidade de fíler de aproximadamente 3%. As demais argamassas também apresentam a presença de fíler, porém conforme verificado pelo ensaio de termogravimetria este teor é proveniente da composição do cimento utilizado nestas argamassas.

As partículas mais grossas da argamassa, formadas basicamente por areia, irão exercer influência nos fenômenos de escoamento da mesma, uma vez que o tamanho das partículas e a proporção em que se encontram distribuídas exercerão influência no comportamento reológico das argamassas colantes, através de fenômenos como o imbricamento das partículas e facilidade de formação de cordões. A fração graúda da argamassa colante é mostrada em detalhes na Figura 55.

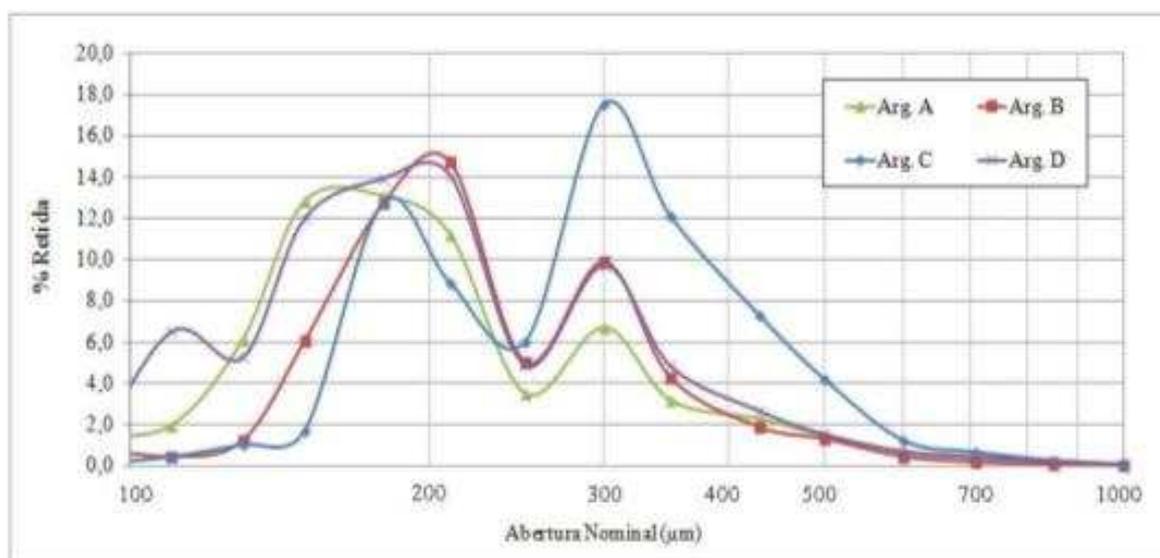


Figura 55: Curvas granulométricas de argamassas colantes (fração retida na peneira 170) obtidas por peneiramento.

Para análise mais detalhada da fração retida na peneira de abertura 90 µm, pode-se analisar as porcentagens retidas em cada peneira. A Figura 56 apresenta detalhes das porcentagens retidas nas peneiras 30, 50, 100 e 170.

Observando as porcentagens retidas em cada peneira verifica-se que as argamassas B e C têm uma pequena quantidade de material (3,16 e 7,74 % respectivamente) entre as peneiras 100 e 170, quando comparado as demais argamassas (21 e 24 %). Na fração graúda, as argamassas B e D são praticamente idênticas, apresentando diferenças significativas apenas a partir da fração passante na #100 (abertura de 150  $\mu\text{m}$ ). Em todas as argamassas a porcentagem de material retido na peneira de abertura 600  $\mu\text{m}$  (#30) não ultrapassa 1%.

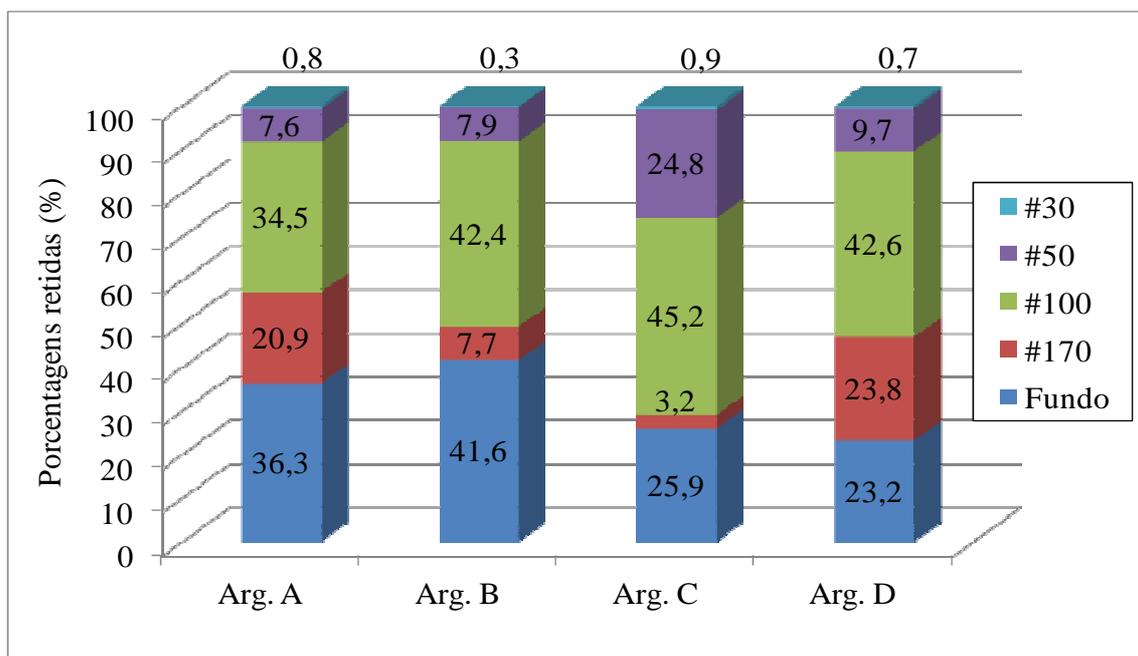


Figura 56: Porcentagens retidas em cada peneira.

De um modo geral, a argamassa C é a que mais se diferencia das demais quanto à distribuição entre as diferentes faixas de peneiras, tendo uma quantidade maior de material entre as peneiras 50 e 100 quando comparado as demais, tendência esta que se inverte entre as peneiras 100 e 170.

No estudo das frações retidas e passantes na peneira 170 (Figura 50 do item 4.1.1) constatou-se que as argamassas estavam divididas em duas classes agrupadas pela quantidade de material passante na #170. Ao observarem-se os valores de densidade de massa no estado anidro das argamassas, verifica-se a mesma tendência, sendo que estas características parecem estar correlacionadas, o que pode ser comprovado pelo gráfico da Figura 57a.

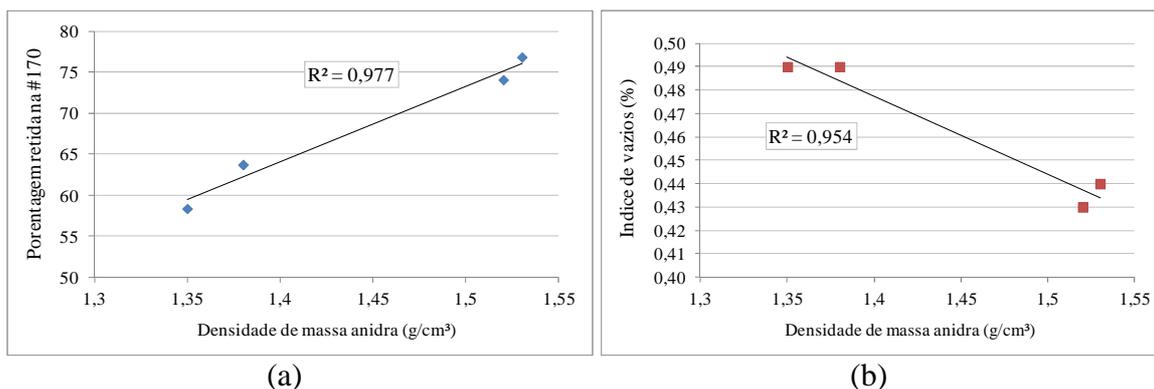


Figura 57: (a) correlação entre porcentagens retidas de argamassa na peneira 170 e densidade de massa anidra; (b) Correlação entre índice de vazios e densidade de massa nas argamassas anidras.

Pelo gráfico podemos verificar a correlação entre as porcentagens de argamassa retidas na peneira 170 e a densidade de massa ( $R^2 > 0,97$ ), demonstrando a influência da proporção entre material fino e grosso nas formulações. As argamassas A e B apresentaram os menores valores de densidade (1,35 e 1,38 g/cm<sup>3</sup>), enquanto as argamassas C e D valores mais altos (1,53 e 1,52 respectivamente).

Buscando-se avaliar o grau de empacotamento das partículas que compõem cada argamassa, procedeu-se o cálculo do índice de vazios das argamassas anidras. Para isto utilizou-se os resultados de densidade de massa e a de massa específica das argamassas colantes. Os resultados estão expostos na Tabela 10.

Tabela 10: Massa específica e índice de vazios nas argamassas anidras.

Argamassa	Densidade de massa anidra (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Índice de vazios (%)
A	1,38	2,72	0,49
B	1,35	2,65	0,49
C	1,52	2,67	0,43
D	1,53	2,75	0,44

De posse dos valores de densidade de massa anidra e índice de vazios é possível inferir sobre o empacotamento das partículas. O gráfico da Figura 57b demonstra a correlação entre o índice de vazios e a densidade de massa nas argamassas anidras. As argamassas A e B, que apresentaram as maiores porcentagens de material fino (36 e 41%) foram as que tiveram os maiores índices de vazios (49% em ambas) demonstrando um empacotamento menos eficiente por parte destas argamassas colantes.

Pelos resultados e pelos valores de correlação  $R^2$  obtidos é possível verificar que tanto o índice de vazios quanto a porcentagem de material fino nas misturas apresenta influencias significativas nos valores de densidade de massa das argamassas anidras.

#### 4.1.5 Análise morfológica das areias das argamassas colantes

A análise morfológica foi executada através de imagens obtidas em microscópio óptico. A textura superficial, arredondamento e esfericidade das partículas foram os fatores analisados. A Figura 58 apresenta um exemplo de imagens para cada uma das argamassas analisadas neste trabalho. No Anexo III está uma lista de imagens obtidas em diferentes escalas para as areias das argamassas em estudo.

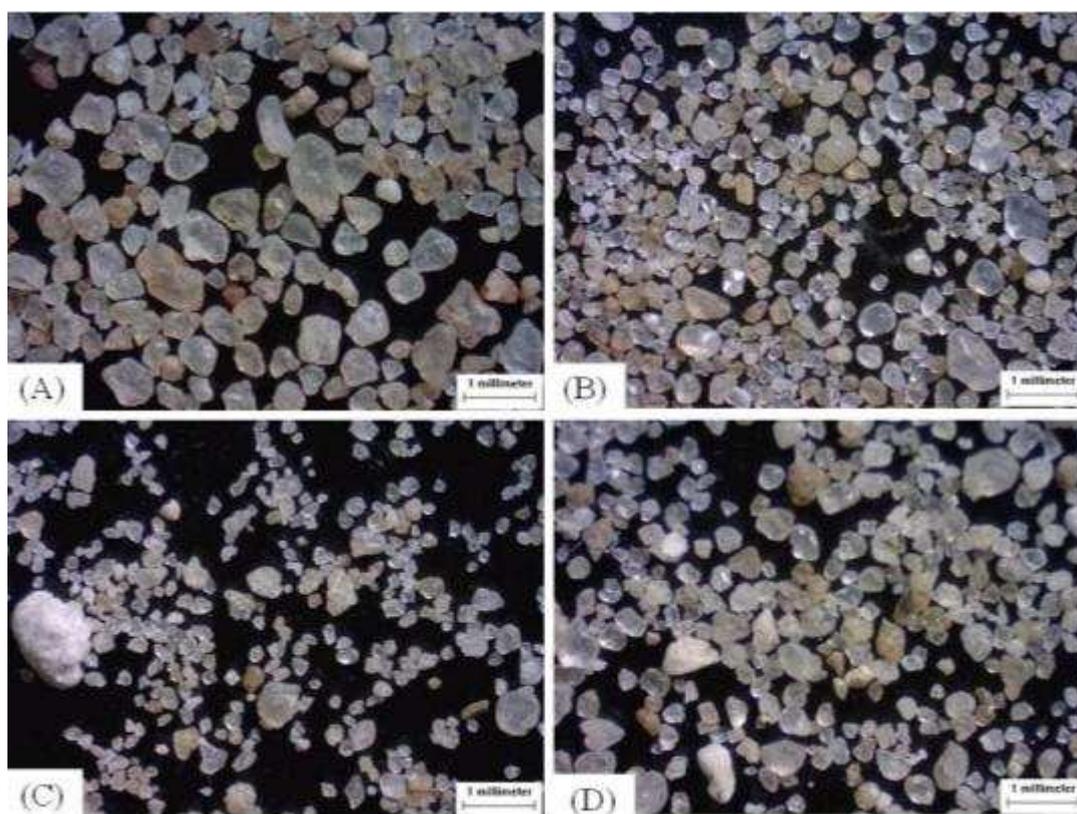


Figura 58: Morfologia das areias.

A análise morfológica pode ser feita visualmente. Através das imagens foi possível obter algumas conclusões sobre as areias que compõem as argamassas colantes estudadas. Além da análise visual procedeu-se o cálculo da esfericidade das partículas conforme já detalhado no item 3.4.1.8. A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos com a análise morfológica.

Tabela 11: Resumo das características morfológicas das areias.

Areia	Textura*	Arredondamento*	Esfericidade**
A	Rugoso	Anguloso	0,83
B	Liso	Arredondada	0,82
	Rugoso	Subanguloso	
C	Rugoso	Anguloso	0,89
D	Liso	Arredondada	0,84
	Rugoso	Subanguloso	

\* NBR 7389-1 (ABNT, 2009)

\*\* GONÇALVES (2007)

As areias das argamassas A e C são angulosas e possuem textura rugosa, e a argamassa B e D tem uma composição de materiais com textura lisa e rugosa, com partículas arredondadas e subangulosas. Areias com texturas rugosas tendem a demandar mais água para se obter uma mesma trabalhabilidade na produção de argamassas quando comparada a areias com textura lisa. Em contrapartida, segundo Bauer (2005), a rugosidade superficial do agregado tende a melhorar as propriedades de aderência deste com a pasta de cimento.

Quanto ao grau de esfericidade, a argamassa C possui a areia mais esférica, enquanto as argamassas A, B e D são compostas por partículas menos esféricas. Uma observação pode ser pertinente sobre esta análise é o fato de que as argamassas B e D parecem ter grãos com diferentes características morfológicas (mais e menos esféricas) na mesma areia, o que pode ter interferido na média calculada para a esfericidade.

A esfericidade das argamassas C e D somada as suas curvas granulométricas (frações passantes e retidas na #170) e índices de vazios das argamassas anidras podem ter influenciado nos valores de densidade de massa anidra destas argamassas, tornado-as mais compactas do que as argamassas A e B. O gráfico da Figura 59 demonstra a correlação entre a densidade de massa anidra das argamassas e a esfericidade das partículas retidas de areia retidas na peneira 170.

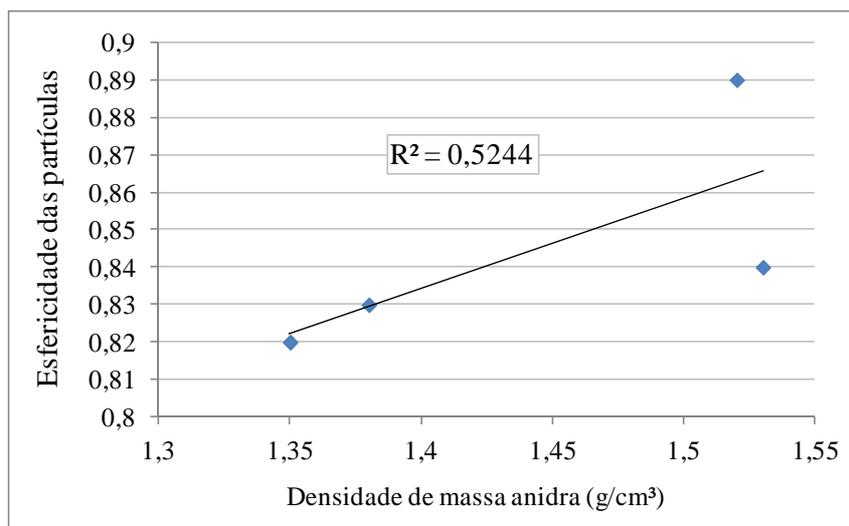


Figura 59: Correlação entre densidade de massa da argamassa anidra e esfericidade das partículas.

Conforme pode ser observado no gráfico da Figura 59, existe uma correlação entre a densidade de massa anidra das argamassas e a esfericidade das partículas ( $R^2 > 0,52$ ), porém esta é muito menor do que a correlação entre a densidade de massa e a porcentagem de material retido na peneira 170 ( $R^2 > 0,97$ ) e do que a correlação entre a densidade de massa e o teor de vazios na argamassa anidra ( $R^2 > 0,95$ ).

## 4.2 Caracterização das argamassas no estado fresco

Argamassas colantes são assentadas no estado fresco, sendo, portanto, essencial o entendimento dos fenômenos e comportamento do material neste estado para interpretar os resultados obtidos no estado endurecido. É neste momento também onde se observa o comportamento reológico das argamassas, sendo para tal o ensaio de Squeeze Flow uma ferramenta interessante para comparar diferentes misturas.

### 4.2.1 Densidade de massa fresca e teor de ar incorporado

No item 4.1.4 verificou-se que as densidades de massa das argamassas no estado anidro foram diferentes entre si, sendo as argamassas C e D as que tiveram as maiores densidades (1,52 e 1,53). Quando realizado este ensaio no estado fresco estas diferenças parecem terem se minimizado, conforme pode ser observado na Tabela 12 que apresenta ainda os resultados de massa específica das argamassas e o teor de ar incorporado nas misturas no estado fresco.

Tabela 12: Resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado nas argamassas.

Argamassa	Densidade de massa anidra (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade de massa fresca (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica da argamassa anidra (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de ar incorporado (%)
A	1,38	1,80	2,72	13,87
B	1,35	1,74	2,65	9,74
C	1,52	1,69	2,67	16,89
D	1,53	1,77	2,75	15,82

Pelos resultados observados, nas densidades de massa no estado fresco verifica-se uma aproximação entre os valores encontrados e uma correlação muito fraca entre os valores de densidade de massa anidra e fresca das argamassas colantes, conforme verificado no gráfico da Figura 60a.

Quanto ao teor de ar incorporado, verifica-se, ao contrário do que inicialmente se previa, uma correlação muito maior entre esta propriedade e a densidade de massa anidra do que entre o teor de ar incorporado e a densidade de massa fresca das argamassas (Figura 60b).

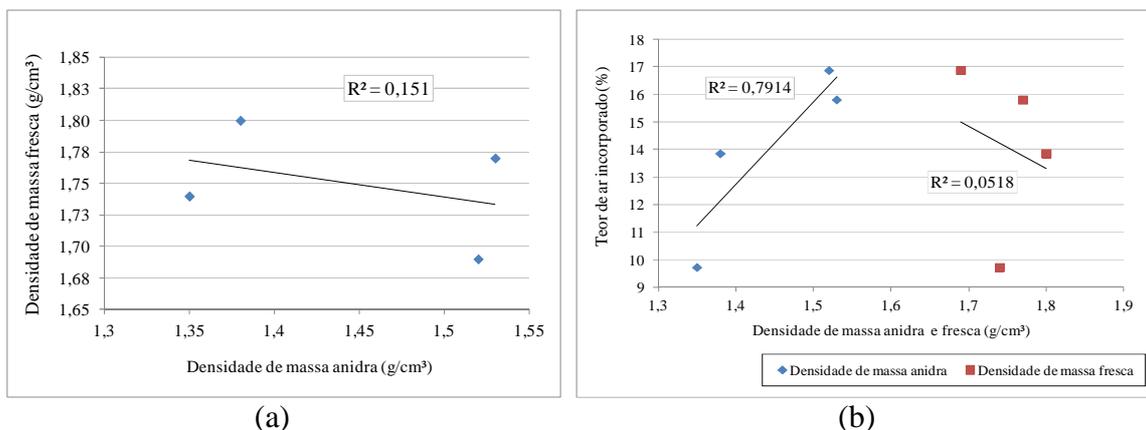


Figura 60: (a) correlação entre densidade de massa anidra e fresca das argamassas colantes; (b) correlação entre teor de ar incorporado e densidade de massa anidra e fresca das argamassas colantes.

Apesar das fracas correlações observadas entre as densidades fresca e anidra e teor de ar incorporado nas misturas frescas, recomenda-se um estudo mais aprofundado sobre o tema, uma vez que o número de amostras ensaiadas pode não ter sido suficiente para uma análise mais representativa das correlações entre estas propriedades.

A presença de ar incorporado nas argamassas é o resultado da utilização de aditivos que, devido a sua ação e natureza, produzem na matriz cimentícia microbolhas uniformemente dispersas na mistura no estado fresco. Na maioria das argamassas modificadas com polímeros, o teor de ar incorporado é maior quando comparadas com argamassas sem adição de polímeros (MANSUR *et al.*, 2009).

Pelos resultados pode-se deduzir que as argamassas C e D possivelmente possuem um teor maior de aditivos poliméricos em comparação as demais. Os resultados de termogravimetria evidenciam que a argamassa C possui em torno de 1,37 % de aditivos, constatado pela perda de massa na faixa de 200 e 500 °C, sendo possivelmente parte destes polímeros (ver Tabela 6). Na Argamassa D este fato não pode ser confirmado pelos resultados de TG.

#### 4.2.2 Squeeze Flow

Tendo-se em vista a influência do teor de ar incorporado no comportamento reológico das argamassas, pode-se lançar mão dos resultados de Squeeze Flow, Figura 61 e Figura 62, que demonstram um perfil desse comportamento. Os gráficos referem-se ao perfil reológico das argamassas colantes ensaiadas logo após a mistura, ou seja, tempo de maturação de 0 segundo.

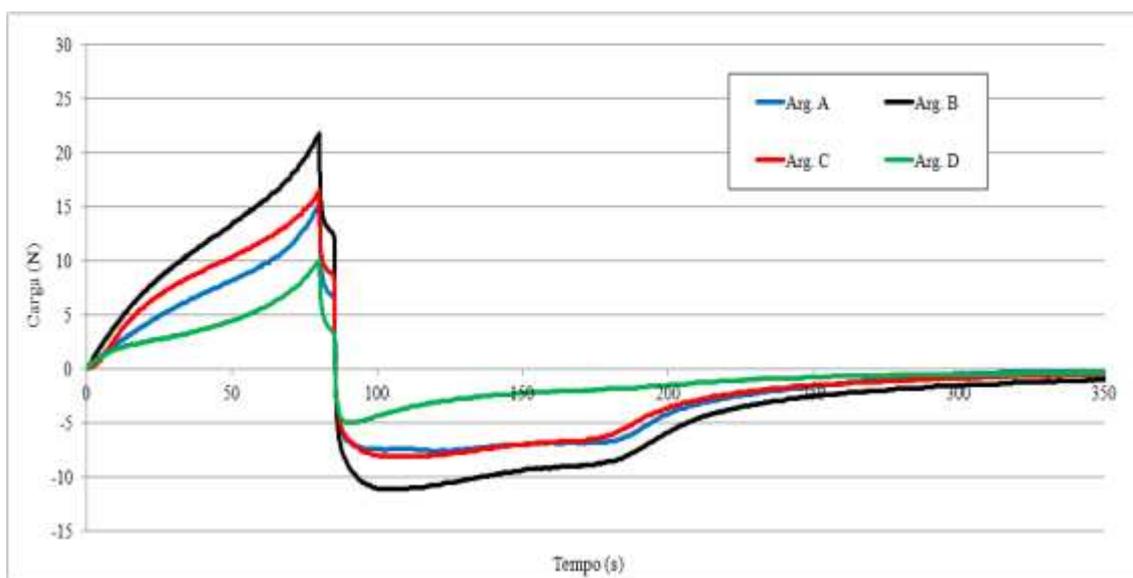


Figura 61: Resultados de Squeeze Flow com taxa de cisalhamento de 0,1 mm/s.

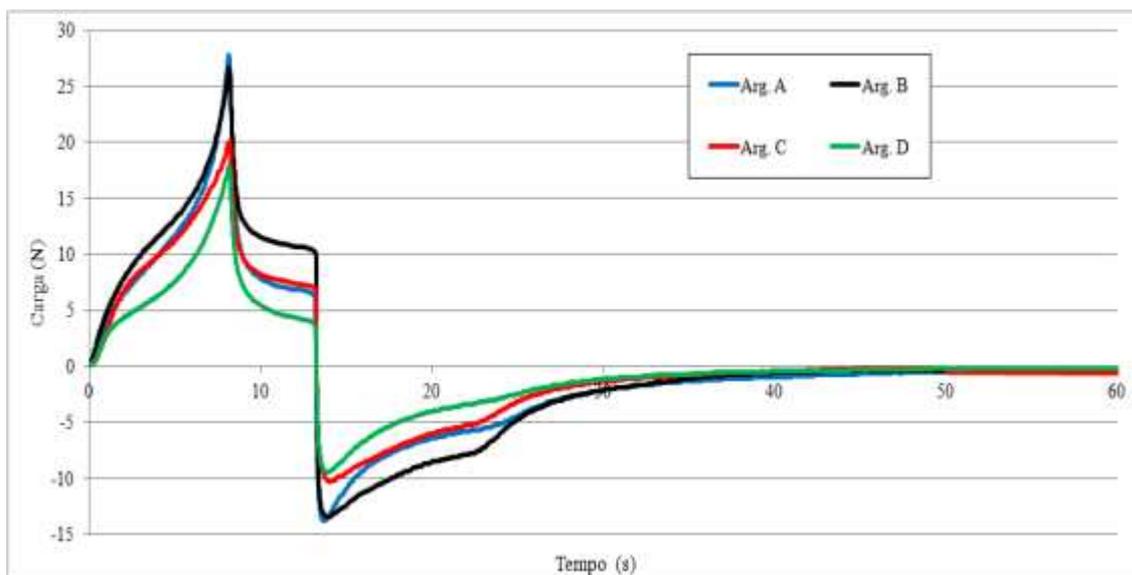


Figura 62: Resultados de Squeeze Flow com taxa de cisalhamento de 1,0 mm/s.

Ao analisar os perfis obtidos pelo Squeeze Flow, verificam-se diferenças entre as argamassas e entre as taxas de cisalhamento. Parece que a taxa de 1,0 mm/s demonstra melhor o efeito do ar incorporado nas misturas, conforme pode ser verificado no gráfico da Figura 63a.

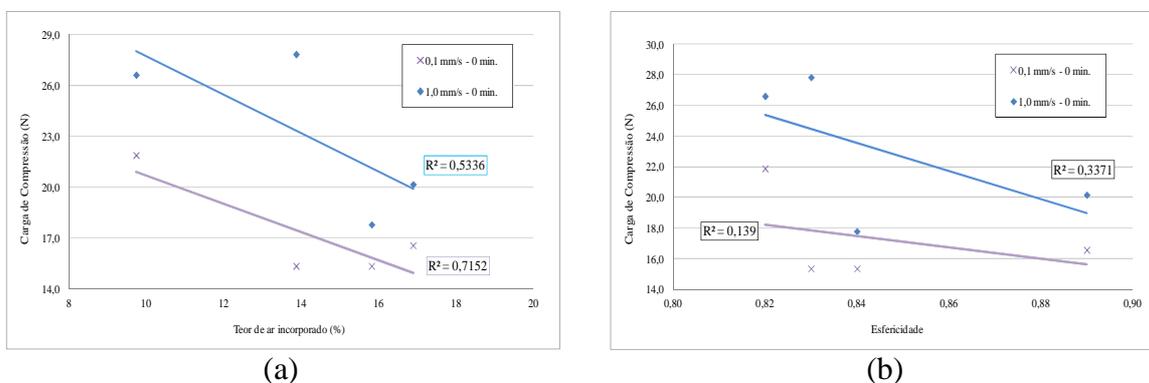


Figura 63: (a) correlação entre o teor de ar incorporado nas argamassas após a misutra e as cargas de compressão no Squeeze Flow com taxa de cisalhamento de 0,1 e 1,0 mm/s; (b) correlação entre carga máxima no Squeeze Flow e esfericidade das partículas das argamassas.

A presença de ar incorporado nas misturas permite a diminuição da quantidade de finos do agregado sem alteração na tendência de segregação e exsudação da argamassa, além de tornar a mistura mais trabalhável. O que se verifica através dos resultados é que quanto maior o teor de ar incorporado nas misturas menores são as cargas aplicadas sobre as argamassas para obter-se o mesmo deslocamento, o que demonstra que estas argamassas tendem a apresentar maior facilidade de aplicação pelo assentador.

Pode-se verificar que as argamassas C e D, com o menor teor de finos e com os maiores teores de ar incorporado, apresentam as menores cargas de compressão pelo Squeeze Flow, demonstrando o efeito positivo do teor de ar incorporado sobre a trabalhabilidade destas argamassas. Estas argamassas apresentam também areias com maior esfericidade (ver Tabela 11), o que pode facilitar o escoamento do material durante o ensaio de Squeeze Flow. O gráfico da Figura 63b apresenta a correlação entre as cargas máximas no Squeeze Flow e a esfericidade das partículas retidas na peneira 170 das argamassas.

Os dados obtidos no gráfico da Figura 63b demonstram que a correlação entre a esfericidade das partículas e as cargas máximas no Squeeze Flow para misturas com 0 minuto de maturação apresentam-se fracas, sendo um pouco maior quando a taxa de cisalhamento é de 1.0 mm/s. Com isto podemos inferir que a forma das partículas mais grossas da mistura tende a influenciar mais os resultados dos ensaios quando as taxas de cisalhamento são maiores, ou seja, com velocidade de aplicação de cargas maiores. Ainda assim estas correlações mostraram-se fracas para as misturas ensaiadas com o minuto de maturação.

Para associar os resultados do Squeeze Flow com a aplicação das placas cerâmicas por parte do assentador, plotou-se os gráficos da Figura 64 e Figura 65, que relacionam carga versus deslocamento.

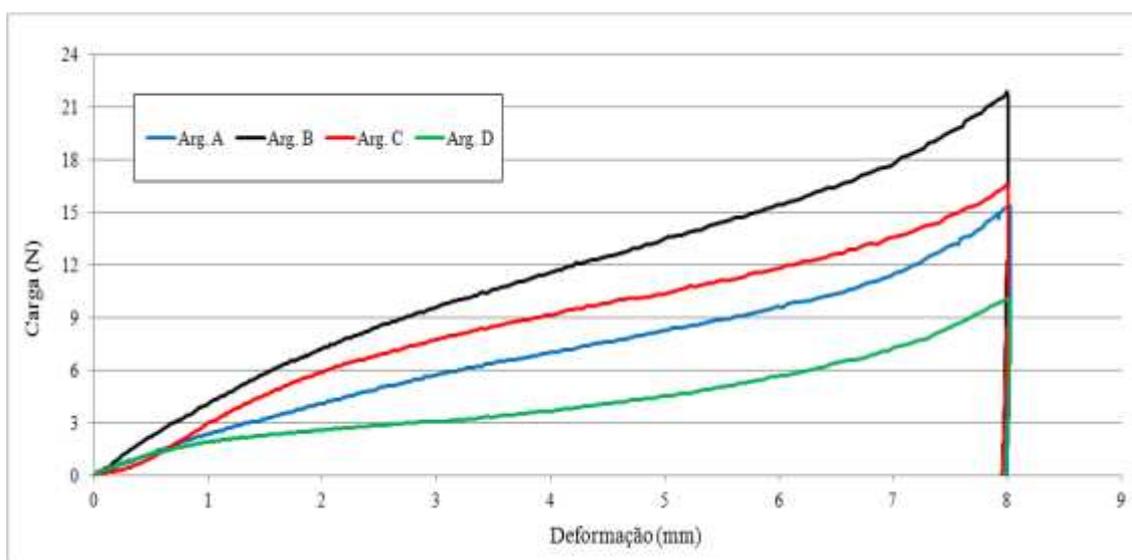


Figura 64: Resultados de Squeeze Flow: carga versus deslocamento com taxa de cisalhamento de 0,1 mm/s.

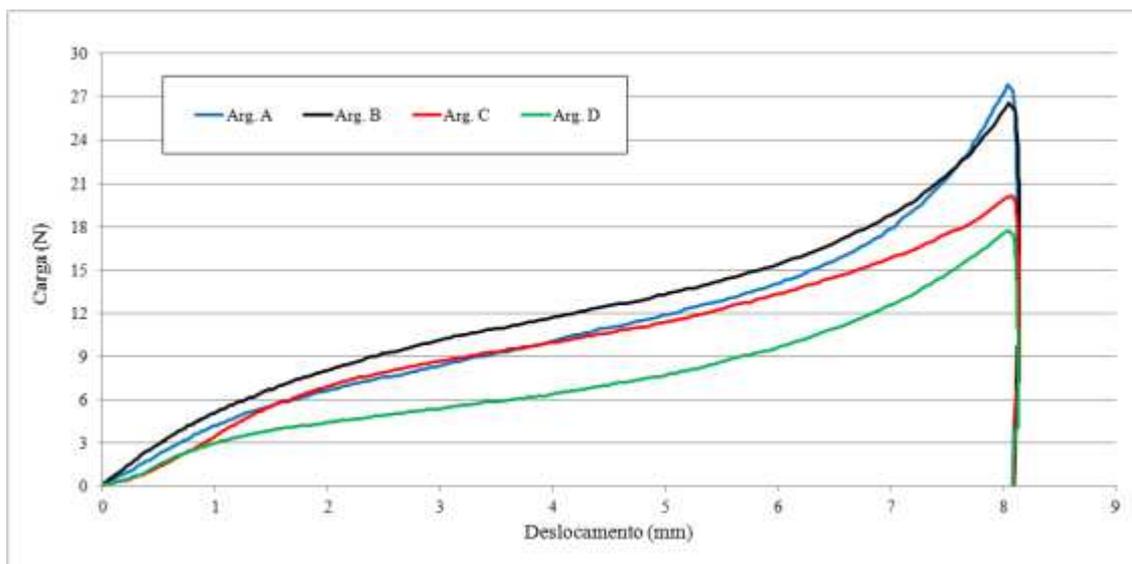


Figura 65: Resultados de Squeeze Flow: carga versus deslocamento com taxa de cisalhamento de 1,0 mm/s.

Para que o assentador tenha maior facilidade de aplicação, o comportamento que se espera da argamassa é a de menores cargas de compressão, pois isto representa maior facilidade de aplicação do material e influenciará o resultado de resistência de aderência. Verifica-se que a argamassa D sempre apresenta as menores cargas, o que provavelmente a torna mais aplicável pelo assentador.

As argamassas A e C apresentam mudança de comportamento dependendo da taxa de cisalhamento aplicada, sendo que a primeira tem suas cargas de compressão aumentadas significativamente com o aumento na taxa de cisalhamento enquanto a segunda tem suas cargas de compressão reduzidas com a mudança. Por fim, a argamassa B sempre apresenta as maiores cargas de compressão comparativamente às demais, independentemente das taxas de cisalhamento apresentadas. Isto pode ser atribuído principalmente ao baixo teor de ar incorporado nesta mistura, demonstrando a influência desta propriedade sobre a facilidade de assentamento das argamassas colantes, conforme se verificou na Figura 63a.

Durante a execução dos ensaios, dois comportamentos foram verificados e que indicam uma tendência para estas argamassas. A Figura 66 demonstra o fim de curso durante o ensaio de Squeeze Flow onde podem ser visualizadas diferentes formas de ruptura das argamassas, sendo que a primeira representa uma argamassa mais seca e a segunda uma argamassa mais fluida.

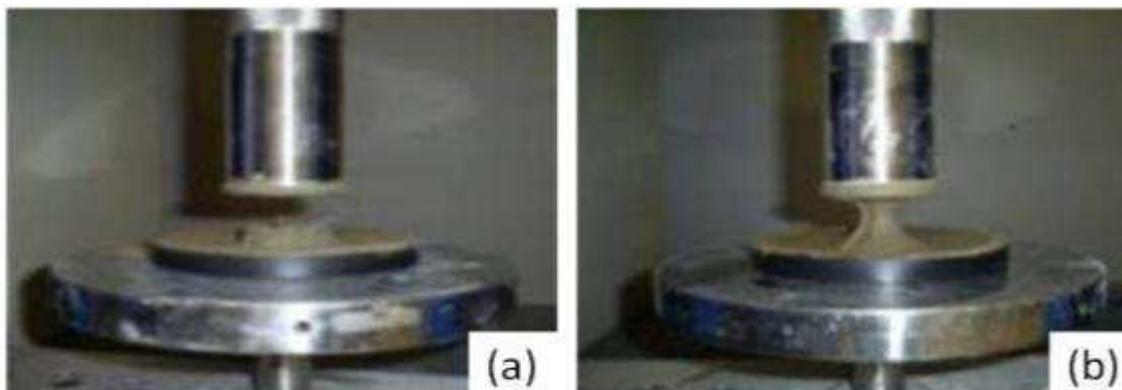


Figura 66: Formas de ruptura observadas durante o Squeeze Flow: (a) argamassa seca e (b) argamassa fluida.

As argamassas C e D apresentaram o comportamento observado em (b) para ambas as velocidades de ensaios e a argamassa B apresentou este comportamento com 0,1 mm/s. Este comportamento está ligado às tensões internas da argamassa. O perfil observado irá influenciar diretamente o comportamento da argamassa no estado endurecido, principalmente pela capacidade da argamassa no estado fresco se espalhar e preencher todo o tarso da placa assentada, o que irá determinar a extensão de aderência entre a argamassa colante e as placas cerâmicas no estado endurecido.

As argamassas C e D apresentam os menores teores de finos e supostamente deveriam ter o menor teor de pasta o que prejudicaria sua trabalhabilidade. Na prática o que se verificou foi o inverso. Estas argamassas foram as que se mostraram com a melhor coesão e plasticidade, medidos através do Squeeze e por análise visual. Estas argamassas também são as que apresentam o maior teor de ar incorporado nas misturas e a maior esfericidade nas partículas das areias.

Ao que parece, a quantidade de finos maior nas argamassas A e B prejudicou as propriedades destas argamassas no estado fresco, provavelmente por uma demanda de água superior as demais, além da maior dificuldade das partículas escoarem devido à menor esfericidade das areias da composição. Além disto, o teor de finos destas argamassas provavelmente tem efeito negativo sobre a incorporação de ar nas misturas frescas o que justificaria o comportamento observado. Uma possível decisão tomada pelo fabricante da argamassa B para contornar este efeito pode ter sido a especificação de uma maior quantidade de água para moldagem da argamassa (29%). Ao que parece esta opção não foi eficiente.

A argamassa A pode ter usado em sua formulação aditivos (1,2%) para melhorar a trabalhabilidade, sem um aumento do percentual de água quando comparado as argamassas C e D (23 e 21,5%, respectivamente), mantendo a quantidade de água baixa (21%). Cabe lembrar que, conforme verificado nos ensaios de distribuição granulométrica, esta argamassa apresenta um teor de finos elevado em sua formulação em comparação as demais argamassas, o que aumenta sua área específica e a demanda de água para envolver seus grãos. Esta argamassa demonstrou consistência seca depois de misturada, o que pode também ser observado pelas imagens do término de ensaio de Squeeze Flow (Figura 66).

Quanto ao perfil reológico apresentado no Squeeze Flow, as argamassas C e D apresentam três patamares bem definidos durante o ensaio, com 0,1 mm/s. Por outro lado, nas argamassas A e B os períodos plásticos e de enrijecimento se confundem, não sendo possível distingui-los.

Na argamassa A, além dos fatores já citados, as características dos agregados utilizados parecem ter influenciado o perfil de escoamento desta argamassa. A areia da argamassa A é composta de agregado rugoso, angular e de baixa esfericidade. Isto, somado ao teor de água insuficiente e ao teor de ar incorporado nas misturas, pode ter facilitado o embricamento da mistura durante o ensaio de Squeeze.

Na argamassa B quando aplicado deslocamento de 0,1 mm/s esta argamassa tem altas cargas de compressão. O fabricante desta argamassa recomenda 29% de água na mistura e isto pode ter influenciado nestas altas cargas de compressão, pois a água em excesso deixa a pasta muito fluida e ao aplicar-se a carga no Squeeze Flow o efeito do embricamento fica evidente. Mesmo com alta quantidade de água o perfil verificado no Squeeze Flow com velocidade de 1,0 mm/s para esta argamassa foi o apresentado na Figura 66a.

Quando se analisa o comportamento reológico das argamassas, este está associado com a quantidade de água e de aditivos na mistura para mantê-la trabalhável, além de afetar as propriedades no estado endurecido da mistura, uma vez que terá influência direta na hidratação do cimento e no fenômeno de aderência entre os componentes da argamassa com o substrato.

### 4.2.3 Retenção de água

O ensaio de retenção de água em argamassas colantes não é normalizado, porém existem estudos buscando adaptar o ensaio proposto pela NBR 13277<sup>2</sup> (ANBT, 2005) para caracterizar argamassas colantes, modificando a espessura do prato para 5,0 mm de espessura, diferente dos 20 mm da atual configuração (FERRARI et. Al, 2010). O ensaio de retenção de água com o funil de Büchner foi executado tanto com o prato de 20 mm quanto com o prato adaptado de 5,0 mm. A Tabela 13 demonstra a diferença entre os valores de retenção obtidos com as diferentes espessuras do prato aos 15 min.

Tabela 13: Retenção de água em argamassas colantes aos 15 minutos (%)

Argamassa	Prato normal (20 mm)	Prato modificado (5 mm)	Varição (%)
A	98,79	84,71	14,08
B	95,05	85,36	9,69
C	97,93	89,77	8,17
D	99,09	92,50	6,59

De posse dos valores de retenção de água aos 15 minutos fica evidente como a adaptação do prato mostra-se muito mais sensível a perda de água com o tempo, o que demonstra que a adaptação é uma ferramenta de controle de qualidade potencialmente adequada. Em alguns casos, como o da argamassa A, a variação alterando-se o método, chegou a aproximadamente 14%. Em uma situação real de obra, os cordões terão aproximadamente 5,0 mm, sendo assim, o prato modificado demonstra com mais confiabilidade a configuração das argamassas assentadas.

Os resultados de retenção de água aos 15 minutos pelo método adaptado mostram-se sensível a algumas características de formulação das argamassas colantes como porcentagem retida e passante na peneira 170, densidade de massa anidra, índice de vazios da argamassa anidra e teor de ar incorporado nas misturas no estado fresco. Os gráficos da Figura 67 demonstram a correlação destas propriedades com a retenção de água medida através do método adaptado a partir da NBR 13277 (ANBT, 2005).

<sup>2</sup> A NBR 13277 estabelece o método para determinar a retenção de água em argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos.

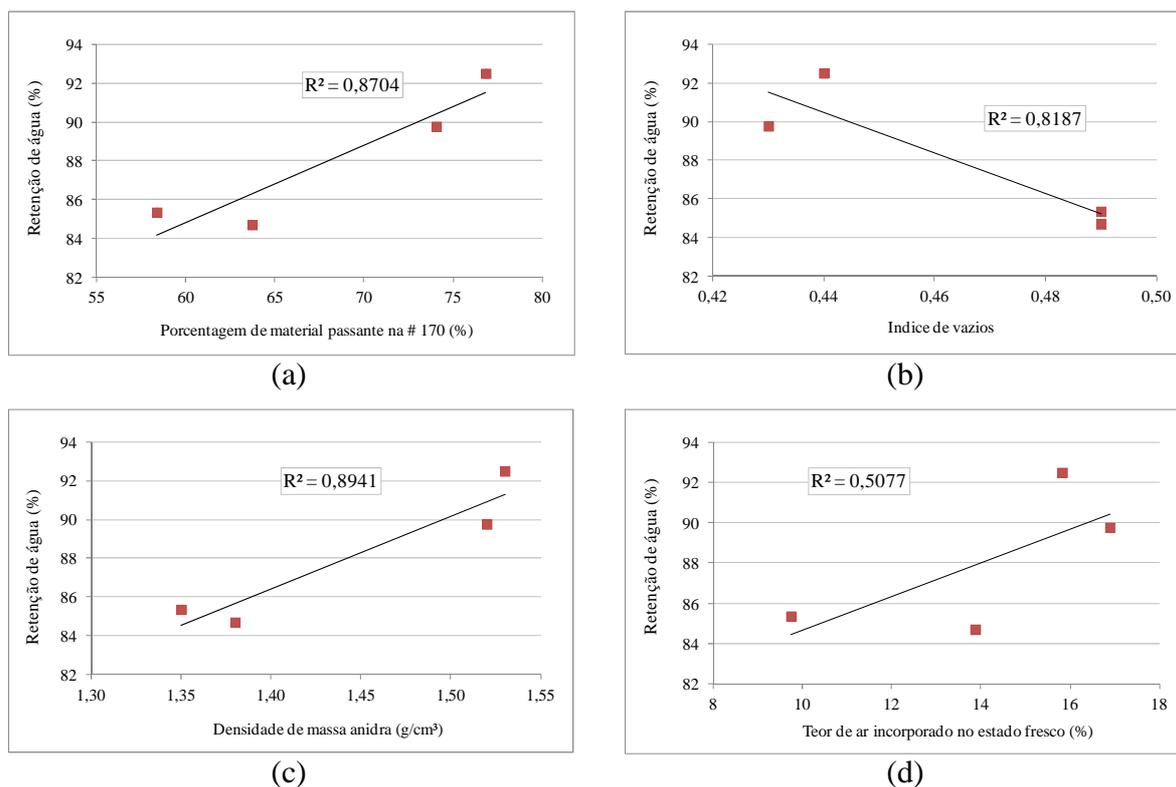


Figura 67: Fatores influêntes na retenção de água de argamassas colantes: (a) porcentagem de material retido na peneira 170; (b) índice de vazios; (c) densidade de massa anidra e; (d) teor de ar incorporado.

Conforme se verificou no gráfico da Figura 67 a porcentagem de material passante na peneira 170 (abertura de 0,09 mm) exerce grande influência na capacidade de retenção de água das argamassas colantes. Apesar da alta quantidade de finos usado na formulação da argamassa B, esta apresentou baixa capacidade de reter água, quando comparada as demais. Isso pode ser associado à elevada quantidade de água especificada pelo fabricante, que também foi a maior entre as argamassas estudadas. A água em excesso é utilizada para melhorar a trabalhabilidade da mistura e após a aplicação é facilmente perdida, caso um aditivo retentor de água não seja especificado adequadamente ou este não tenha tido tempo de reagir na mistura.

Os valores de perda de massa foram medidos aos 5, 8, 10, 12, 15, 17, 19 e 21 minutos. Optou-se por estes tempos de leitura e não somente pela leitura aos 15 minutos conforme recomendado pela NBR 13277 (ANBT, 2005), a fim de verificar-se o comportamento das argamassas, através de curvas de retenção de água, durante um determinado período. Tanto a relação água/ materiais secos quanto o tempo de maturação respeitaram as indicações dos fabricantes, conforme já expostos no item 3.2. A Figura 68 apresenta o comportamento das curvas de retenção das argamassas estudadas.

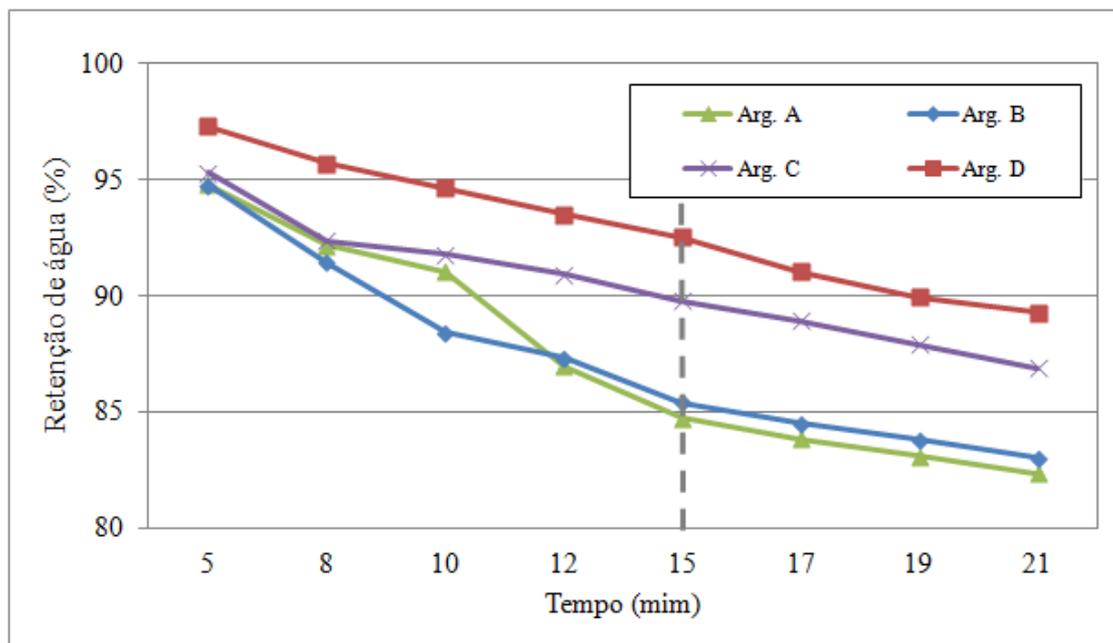


Figura 68: Curvas de retenção de água de argamassas com prato modificado.

A argamassa D apresentou a curva de retenção sempre em pontos superiores as demais, demonstrando que sua retenção de água sempre foi maior. Este efeito nem sempre é interessante, uma vez que a perda de água pela argamassa pode colaborar com a aderência da argamassa aos substratos, pois juntamente com a água absorvida pelos poros do substrato são carreados produtos cimentícios que irão proporcionar propriedades de aderência sobre o conjunto no estado endurecido. Provavelmente, a argamassa D tenha em sua composição um aditivo retentor, que melhora a retenção de água. Isto pode ter sido a opção do fabricante para compensar o menor teor de finos nesta formulação, conforme verificado no item 4.1.1.

O tempo de maturação igual a zero especificado pelo fabricante para a argamassa A claramente afetou a retenção de água da mistura. Este efeito pode ter sido provocado pelo fato de que o aditivo não teve tempo suficiente para sua dissolução, e assim, não conseguiu nesse intervalo agir modificando a viscosidade da fase aquosa de mistura a base de cimento. A argamassa C apresentou um comportamento intermediário em comparação com as outras argamassas estudadas. O tempo de maturação desta argamassa parece ter sido adequado.

#### 4.2.4 Tempo em aberto

Buscando-se associar o comportamento das argamassas no estado fresco com seu comportamento no estado endurecido, foi realizado também o ensaio de tempo em aberto para as argamassas colantes sobre substrato padrão, ensaio este normalizado pela NBR 14083 (ABNT, 2004). Este ensaio avalia a eficiência da argamassa em manter-se aplicável após um período de tempo. Os valores tempo em aberto mostraram uma tendência inversa dos resultados verificados pelos demais ensaios. A Tabela 14 apresenta os valores de tempo em aberto obtidos em laboratório.

Tabela 14: Tempo em aberto segundo a NBR 14083 (ABNT, 2004).

Arg. A	Arg. B	Arg. C	Arg. D
1,35	1,12	1,12	0,93
1,60	1,14	1,15	1,10
1,37	1,26	1,11	0,92
1,25	0,52	1,01	0,93
1,61	0,62	1,02	0,91
1,16	0,77	1,38	0,86
1,20	1,23	1,22	0,95
1,51	1,24	0,96	0,93
0,47	1,41	1,10	0,33
1,31	1,36	1,01	0,70
1,3	1,2	1,1	0,9

Como os valores são muito próximos, procedeu-se a aplicação de uma análise de variância (ANOVA) nos valores para confirmação destas diferenças. Após um tratamento preliminar para eliminação de valores espúrios (valores em vermelho), seguindo os mesmos critérios utilizados com os dados dos ensaios de resistência de aderência, calculou-se o resultado de tempo em aberto para cada argamassa. O resultado final é a média das leituras válidas após o tratamento preliminar. Pela ANOVA verificou-se que os valores são significativamente diferentes, validando assim as análises posteriores. A sequência de cálculos da análise de variância está detalhada no ANEXO IV.

A argamassa A foi a mistura que apresentou os maiores valores de tempo em aberto. Este resultado foi inesperado, pois ao observar os resultados obtidos anteriormente, esta argamassa sempre apresentou desempenho inferior as demais. O que

pode ter ocorrido é que após o período de repouso, o aditivo presente nesta mistura reagiu melhorando suas características.

Para confirmação da mudança de comportamento das argamassas após um período de maturação procedeu-se novamente sobre as misturas o ensaio de Squeeze Flow após 20 minutos de repouso das argamassas colantes. A Figura 69 apresenta os perfis reológicos das argamassas para execução do ensaio com taxa de cisalhamento de 1,0 mm/s.

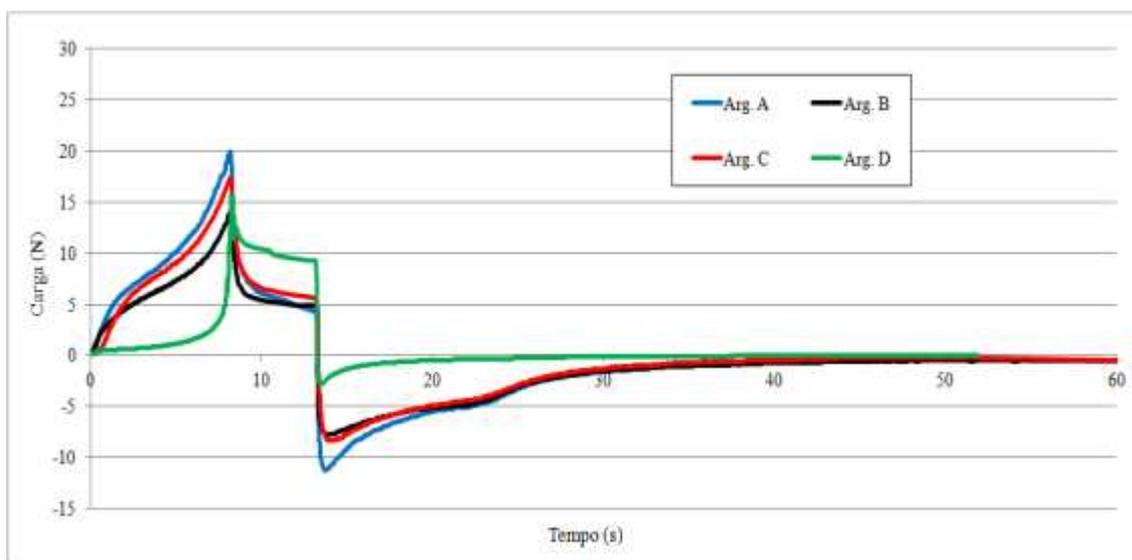


Figura 69: Resultados de Squeeze Flow com velocidade de deslocamento de 1,0 mm/s para argamassas após 20 minutos de repouso.

A argamassa D apresenta, aos 20 minutos, um perfil diferente ao observado ao zero minuto, com um período de relaxação diferenciado, o que pode justificar os tempos em aberto menores. Ao que parece, aos 20 minutos, esta argamassa começa a perder trabalhabilidade, o que pode prejudicar seu desempenho no estado endurecido.

Pelas curvas pode-se verificar também uma aproximação entre as curvas das argamassas, isto pode ser devido ao efeito do aditivo, que necessita de um tempo para dissolução o que pode já ter ocorrido aos 20 minutos. O efeito do aditivo sobre as argamassas após 20 minutos de maturação pode ser verificado no gráfico da Figura 70 que correlaciona as cargas máximas de compressão obtidas no Squeeze Flow com o teor de aditivos identificados pela termogravimetria.

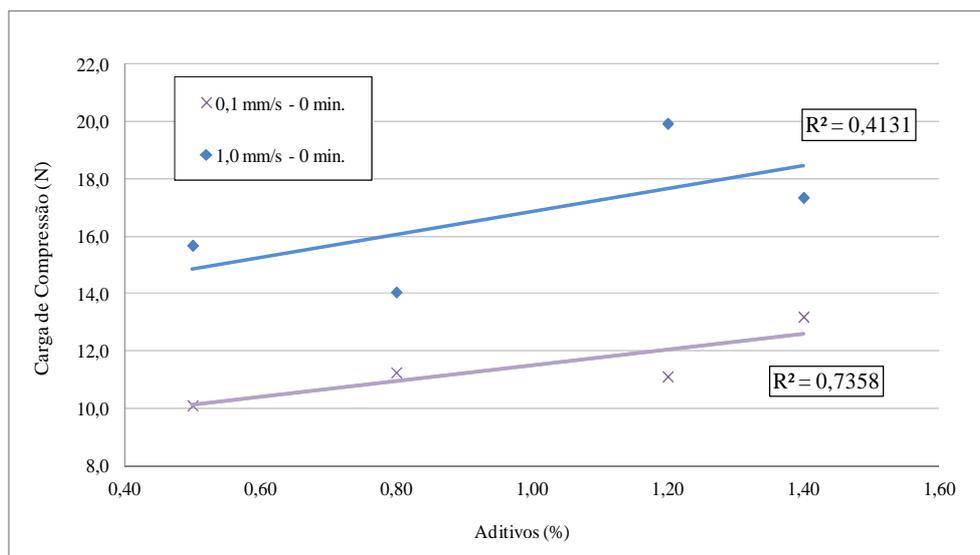


Figura 70: Correlação entre as cargas máximas no Squeeze Flow aos 20 minutos e o teor de aditivos identificados na termogravimetria.

### 4.3 Análise de imagens por microscopia

Conforme já foi descrito no detalhamento do experimento, foram retirados amostras do piso externo aos 6 meses de idade para verificar características das argamassas em uma situação real de uso. A Figura 71 apresenta as imagens da porção central das argamassas colante usadas para o assentamento externo dos pisos novos.

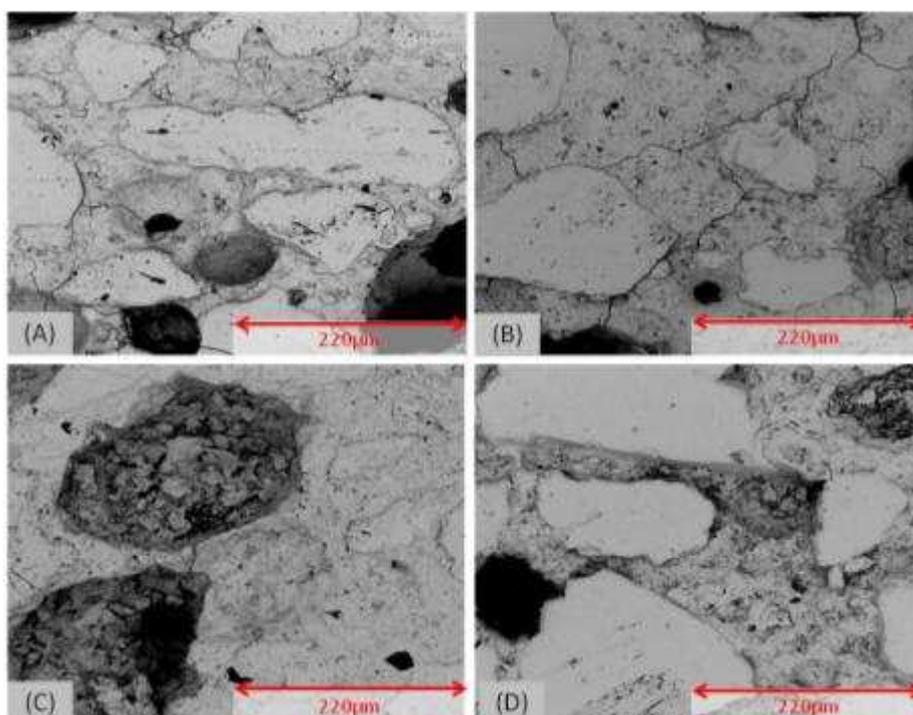


Figura 71: Imagens em microscopia eletrônica de varredura (MEV) do centro das argamassas colantes assentada externamente, com aumento de 540 vezes.

O efeito do ar incorporado nas misturas pode ser verificado quando se analisa as imagens em microscopia do centro das argamassas colantes assentadas externamente. Conforme já verificado, a argamassa C é a que apresenta o maior teor de ar incorporado no estado fresco, seguido pela argamassa D. Verifica-se que esse ar permaneceu dentro das misturas no estado endurecido, ficando este efeito mais pronunciado na argamassa C.

Por outro lado, as argamassas A e B, mesmo com vazios menores na massa endurecida, mostram-se mais frábil do que as demais. Isto pode ser constatado com análises nas imagens da Figura 71. A mistura está toda fissurada, com as fissuras se propagando entre os vazios e nas interfaces pasta/agregado. Pode-se relacionar este comportamento ao observado nos ensaios de Squeeze Flow, onde estas argamassas são as que apresentaram as maiores cargas de compressão, evidenciando sua maior rigidez. As argamassas A e B também são as que têm menor retenção de água, demonstrando a influência desta propriedade na rigidez das argamassas colantes no estado endurecido.

A propagação das fissuras na argamassa pode ser atribuída às variações climáticas as quais as placas foram submetidas durante sua vida ou ao processo de retirada das amostras, nas quais foi utilizado um serra de cortar cerâmicas. Possivelmente o caráter mais frábil destas argamassas as tornem mais suscetíveis ao processo de retirada das amostras.

A exposição à variações climáticas é uma situação inevitável para revestimentos de pisos assentamentos em ambiente externo, já o procedimento de retirada de amostras na prática representa o efeito gerado sobre o conjunto quando da movimentação de pessoas e carros sobre os revestimentos cerâmicos de piso. Pode-se concluir que as argamassas A e B estarão mais suscetíveis ao efeito da movimentação sobre as placas e as tensões diferenciais devido a variações de temperatura.

Quanto aos produtos formados nos vazios da porção central das argamassas, pode-se verificar que existem diferenças entre as elas. As argamassas A e B parecem ter as paredes dos seus poros bem compactas e formada por grãos mais finos. Isto pode ser resultado da maior quantidade de finos nestas argamassas. Nas argamassas C e D, os produtos formados são grãos maiores, sendo na argamassa C ainda possível ver uma tendência a compactação dos poros pelos produtos formados.

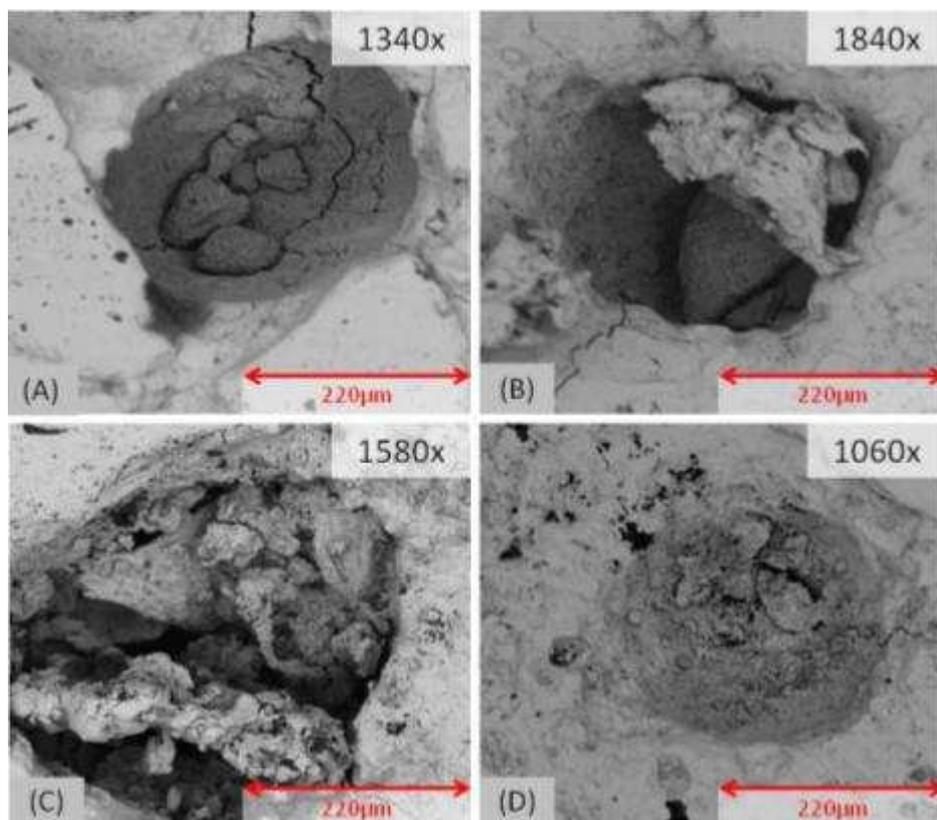


Figura 72: Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos vazios na argamassa.

Para verificar os tipos de compostos formados nos poros das argamassas colantes procedeu-se a aplicação de EDS associado ao MEV. Na Figura 73 apresenta-se a imagem obtida por MEV de um vazio da argamassa C.

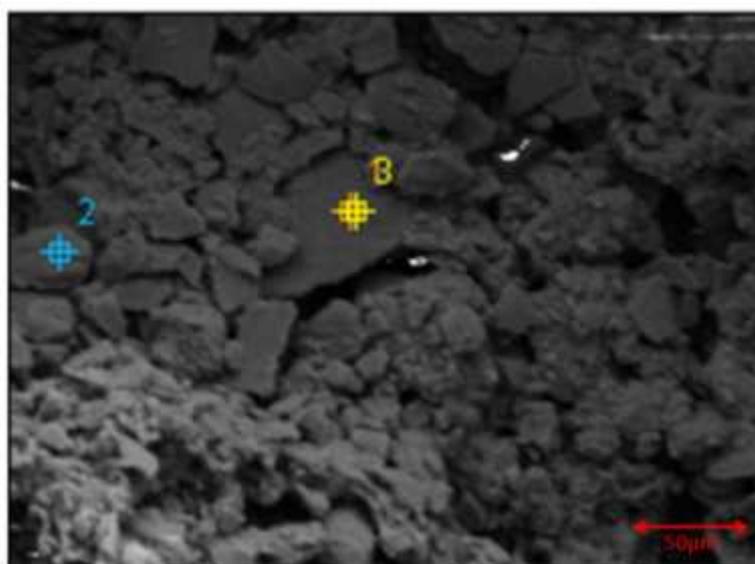


Figura 73: MEV do vazio da argamassa C.

Observa-se que na imagem está marcado o ponto “2”. Sobre este ponto foi aplicado o EDS e como resultado obtive-se o espectro de energia apresentado na Figura 74. Por estes resultados fica evidenciado a presença de produtos hidratados no interior destes poros, confirmando a tendência a compactação destes poros devido aos processos de hidratação que ocorrem ao longo da vida da argamassa.

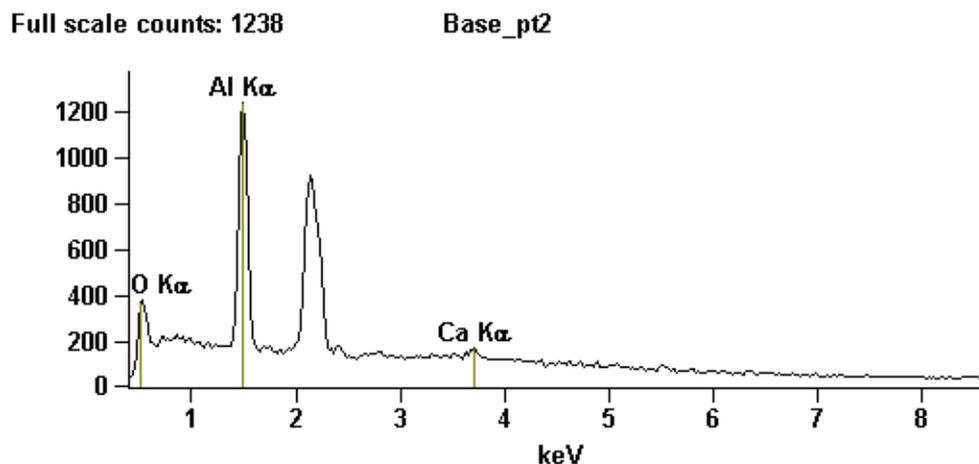


Figura 74: Espectro de energia obtido pelo MEV-EDS para a argamassa C.

Na argamassa A foram observados algumas estruturas presente no interior dos poros e que não parecem ser resultado de produtos de hidratação. A Figura 75 apresenta detalhes destes poros.

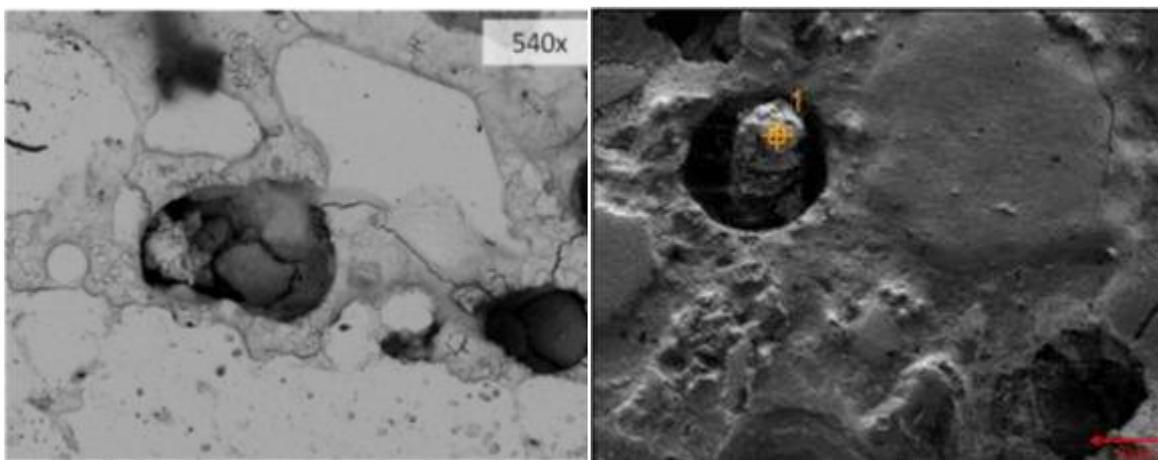


Figura 75: MEV do vazio da argamassa A.

Foi aplicado o EDS sobre estas estruturas para verificar sua composição e buscar associá-los com produtos gerados durante a hidratação da argamassa. A Figura 76 apresenta o espectro obtido por EDS destas estruturas observadas em MEV. Verifica-se um alto teor de cloro e cálcio sobre estes pontos.

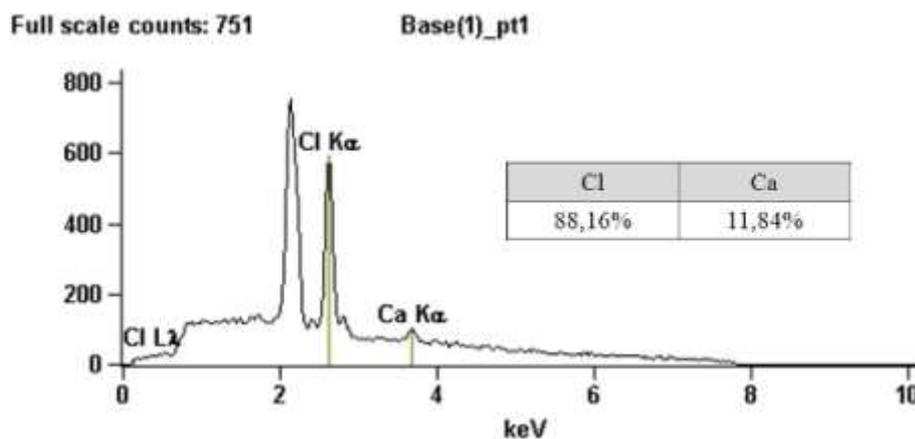


Figura 76: Espectro de energia obtido pelo MEV-EDS para a argamassa A.

Antigamente era muito comum o uso de aditivos plastificantes a base de cloretos em materiais cimentícios e devido a manifestações patológicas causadas, principalmente a concretos, por estes aditivos, sua utilização passou a ser evitada. O custo dos aditivos plastificantes a base de cloretos é inferior aos custos dos aditivos usualmente utilizados pelos fabricantes de argamassa colante. Isto pode ter motivado o fabricante da argamassa A ao uso deste tipo de produto.

O uso de aditivos plastificantes pode modificar o comportamento interno das argamassas colantes. O uso destes aditivos por parte do fabricante permite diminuir a quantidade do uso de outros aditivos modificadores de reologia e retentores de água, isto, porém terá efeitos negativos sobre a coesão das argamassas.

Além da forma que as argamassas estão arrançadas no centro das camadas é de suma importância a forma que a argamassa está ligada aos substratos. O perfil de escoamento das argamassas observado no ensaio de Squeeze Flow parece ter influenciado o comportamento das argamassas no estado endurecido, o que pode ser verificado pelas imagens das interfaces entre as argamassas e os pisos novos e antigos.

Ao analisar os perfis obtidos pelo Squeeze Flow, verifica-se que a curva referente à argamassa D se diferencia consideravelmente das demais, tanto com os valores de carga de compressão e adesão, sendo os menores entre as argamassas, quanto pelo formato das curvas. Para associar os resultados de Squeeze Flow com o comportamento real da argamassa utilizou-se imagens das interfaces piso antigo/argamassa colante e piso novo/argamassa colante, Figura 77. As imagens foram utilizadas também para verificar a eficiência da argamassa em cobrir as interfaces, garantindo uma extensão de aderência entre as camadas.

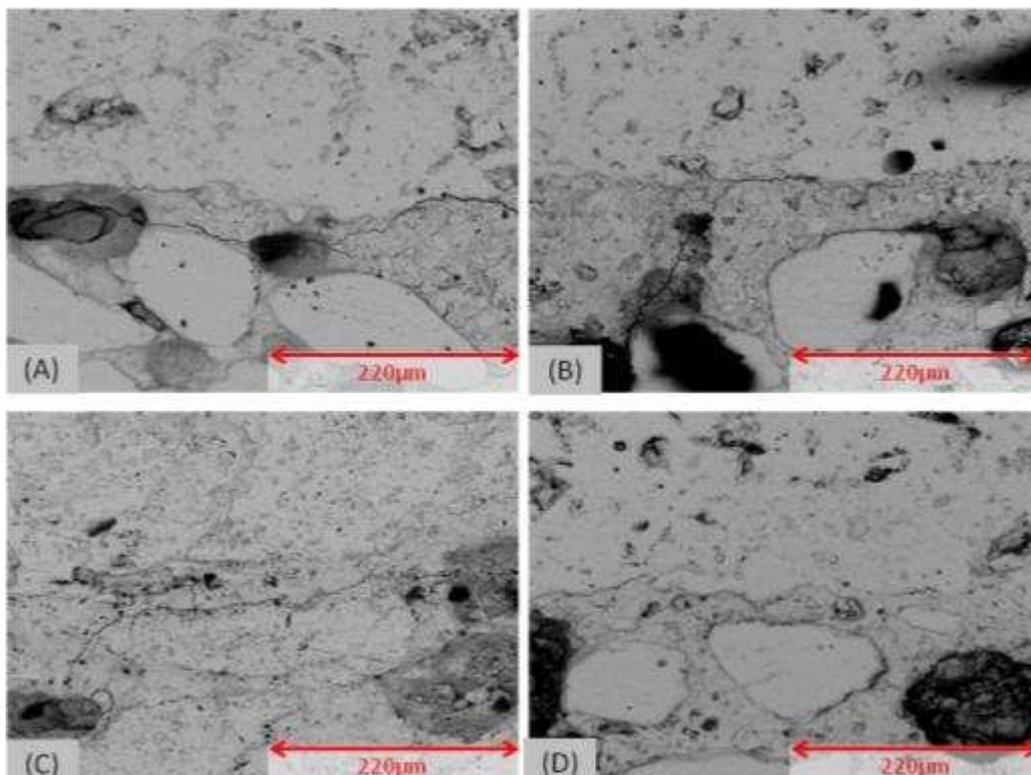


Figura 77: Imagens em microscopia eletrônica de varredura (MEV) da interface entre os pisos novos e argamassas colantes assentadas externamente, com aumento de 540 vezes.

Parece que ao tratar da interface com o piso novo, onde o tarso da placa que é poroso, a argamassa C, seguida da argamassa D, mostram-se mais eficiente na cobertura da interface, onde a interface entre a argamassa e o piso fica praticamente imperceptível com esta magnificação. Já para as argamassas A e B, como constatado anteriormente, estas se mostram frábil, com fissuras em sua estrutura, sendo que estas fissuras se propagam na interface com o piso.

Outro fator a observar é o fato de que nestas argamassas, as fissuras parecem acompanhar os vazios, interligando-os. Quando se observa os perfis pelo Squeeze para estas argamassas na velocidade de 1,0 mm/s, o comportamento similar entre estas parece ficar evidente, tanto pela similaridade das curvas quanto pelas cargas máximas obtidas para ambas.

Quando realizado os ensaios de resistência de aderência, já detalhado anteriormente, verifica-se que a maioria das rupturas ocorre na interface entre o piso antigo e a argamassa colante. Isto é de se esperar, pois além desta superfície do piso antigo ser impermeável, devido a presença do esmalte sobre a peça, esta ainda esteve durante sua vida exposta as mais diversas intempéries e tratamento, como chuva, sol,

produtos de limpeza entre outros. Logo, parece de maior interesse para este estudo a investigação da interface da argamassa com o piso antigo. A Figura 78 apresenta imagens desta interface para as argamassas estudadas.

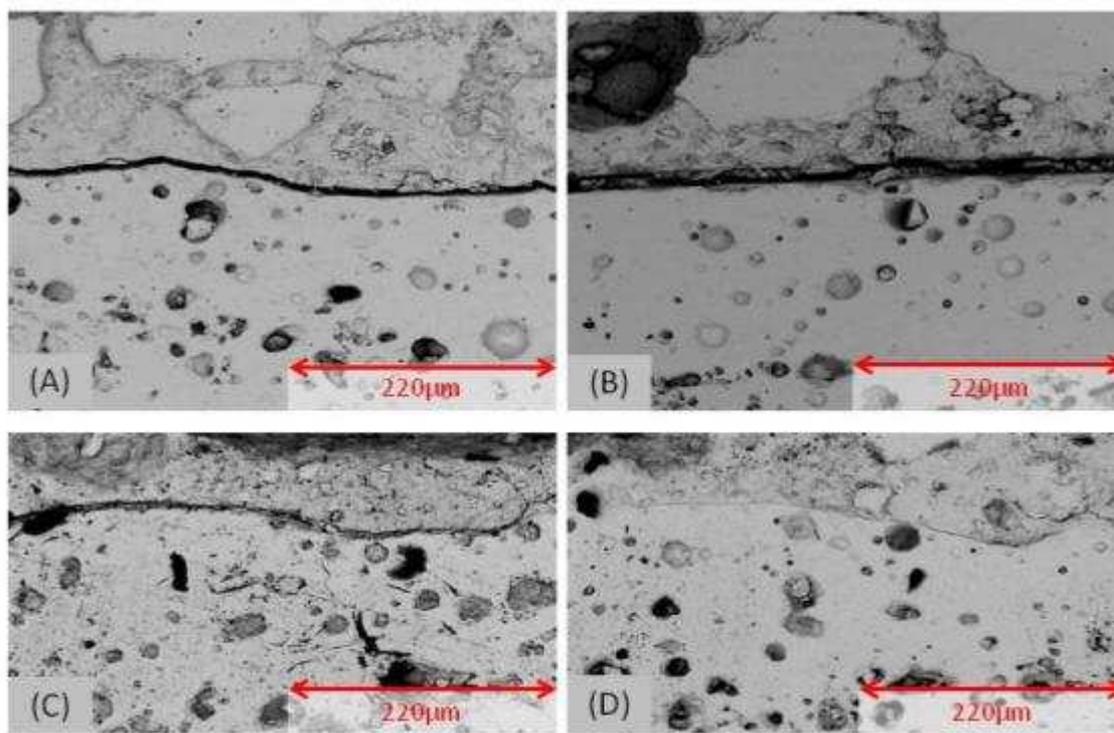


Figura 78: Imagens em microscopia eletrônica de varredura (MEV) da interface entre os pisos antigos e argamassas colantes assentadas externamente, com aumento de 540 vezes.

Todas as imagens estão com a mesma magnificação (540 vezes), logo permitem obter conclusões sobre esta interface somente com observações. Ao analisar o perfil do Squeeze Flow, a argamassa D é que apresentou as menores cargas tanto de compressão quanto de adesão. Isto certamente foi determinante na eficiência da ligação entre a argamassa colante D e o piso antigo, pois a extensão de aderência entre estes mostrou-se muito eficiente, isto sendo comprovado inclusive pelos resultados de resistência de aderência.

Quanto à argamassa C, que também apresenta comportamento similar ao da argamassa D, a interface observada pela microscopia não se mostra tão compacta quanto a argamassa D, porém ao observar-se mais atentamente a imagem, pode-se verificar que no interior da interface, já é possível observar que esta tende a ficar mais compacta. O vazio observado pela imagem pode ser resultado da preparação da amostra que carregou material desta região.

Em contrapartida, a argamassa A, que teve maiores cargas de compressão pelo Squeeze, claramente apresenta a pior extensão de aderência com o piso antigo, inclusive com maior abertura entre as faces. Pode-se concluir, quanto ao Squeeze Flow, que a velocidade de 1,0 mm/s mostra-se mais eficiente em caracterizar o comportamento da argamassa no estado endurecido e ao que parece, demonstra também, com maior eficiência, a aplicação da argamassa em obra, uma vez que o operário, leva um tempo relativamente curto para aplicação das peças.

Ao observar a região da interface da argamassa colante/piso antigo pode-se verificar uma lacuna bem definida entre os dois materiais. Pode-se verificar pela Figura 79 que nesta região os materiais encontram-se totalmente separado. Pode-se observar também a textura da argamassa na região de interface, mostrando-se homogênea nesta região.

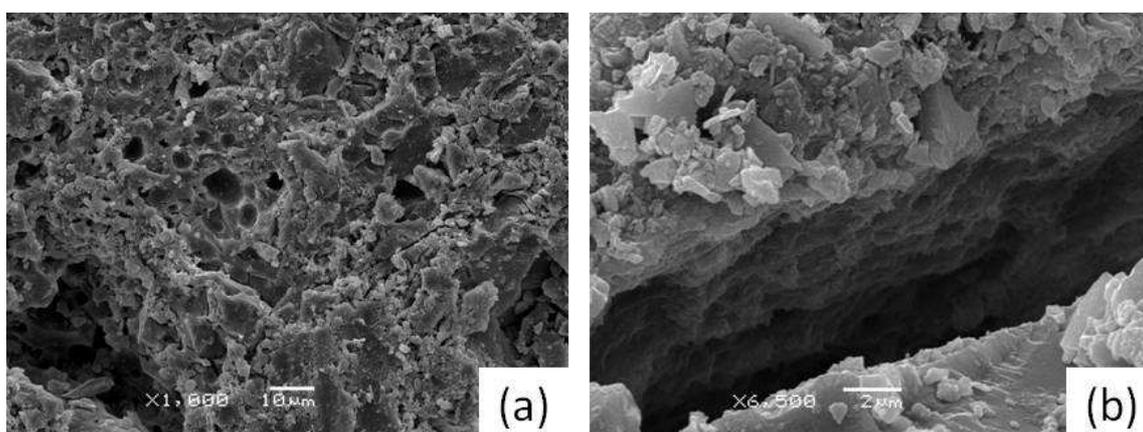


Figura 79: Imagens interface argamassa colante B/piso antigo.

A fim de investigar o comportamento de extensão de aderência das argamassas, as amostras foram fraturadas a fim de visualizar-se a superfície da argamassa colante que está em contato com o piso antigo, conforme verificado anteriormente. A Figura 80a demonstra a amostra de piso sobre piso moldada com a argamassa C após a ruptura na interface com o piso antigo. Estas amostras foram levadas ao microscópio eletrônico de varredura e sua superfície foi analisada. A Figura 80b apresenta um detalhe da superfície da argamassa C que estava em contato com o piso antigo. De um modo geral, todas as argamassas apresentaram esta configuração nesta região.

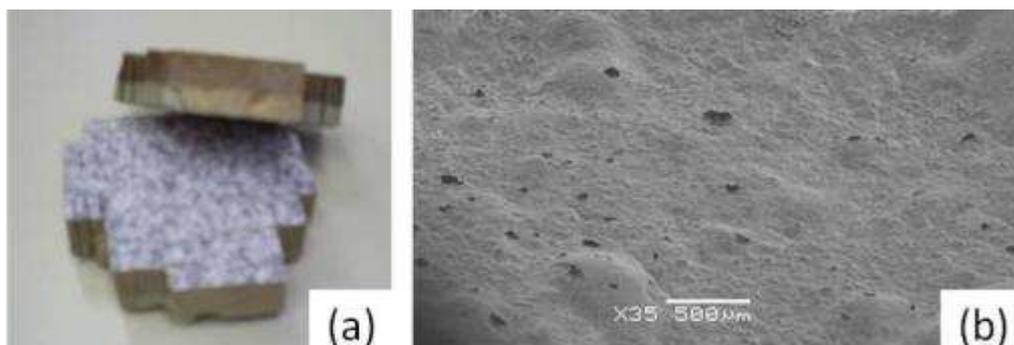


Figura 80: (a) Fratura nas amostras de piso sobre piso na interface com o piso antigo; (b) superfície da argamassa na interface com o piso antigo.

Pela imagem da região da interface é possível observar a textura lisa da região de contato da argamassa com o piso antigo. Este acabamento superficial pode ter sido resultado da textura lisa do esmalte do piso antigo que contribui para este acabamento. Nota-se também nas imagens a presença de poros distribuídos por toda a extensão da argamassa. Este pode ter sido resultado da tentativa do ar aprisionado sair da mistura após a sua moldagem. Para verificar os produtos formados nesta região procedeu-se a aquisição de imagens da região dentro dos poros observados. A Figura 81 mostra as fases hidratadas formadas nos poros das argamassas B e D.

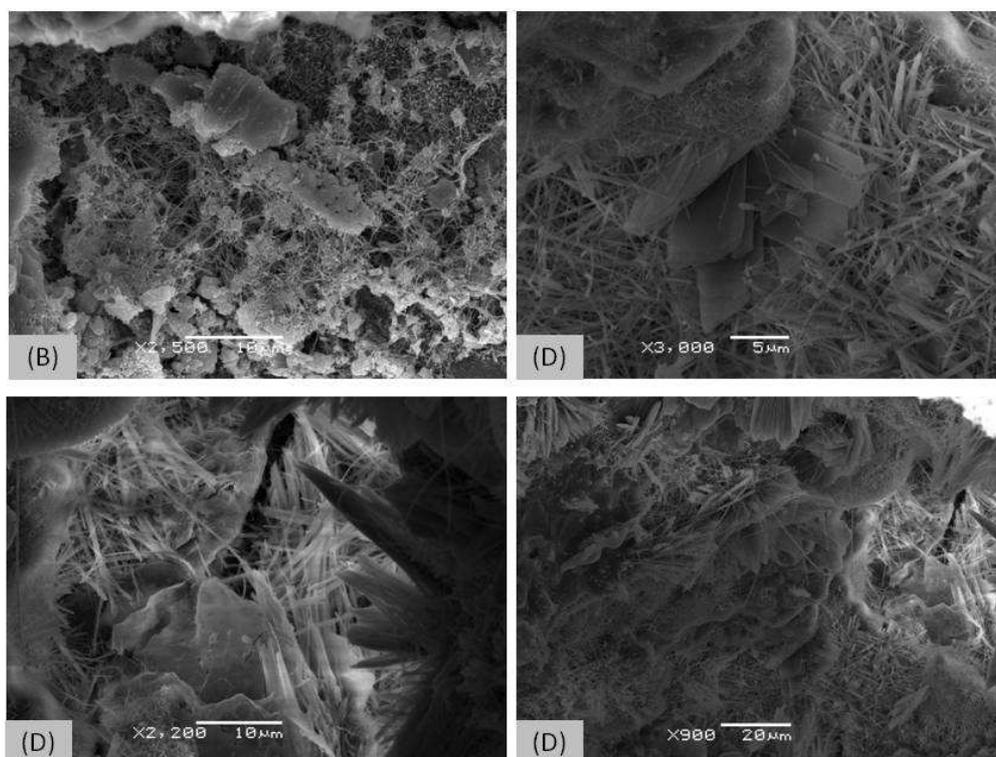


Figura 81: Fases hidratadas formadas nos poros das argamassas na região próxima a interface com o piso antigo.

É possível visualizar nas imagens a formação de uma grande quantidade de compostos hidratados nos poros próximos a interface da argamassa com o piso antigo. Pela forma dos compostos pode-se inferir sobre a presença de etringita, placas de hidróxido de cálcio (portlandita) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H). A variação da morfologia e concentração de cada um nos poros da base e na região da interface irá influenciar a aderência.

Ressalta-se que as conclusões obtidas e discutidas neste ponto não podem ser adotadas como conclusivas uma vez que a quantidade de pontos analisadas por microscopia são insuficiente para generalizar-se como um comportamento padrão para as argamassas colantes e a interface com o piso antigo, no entanto pode-se discutir sobre a aderência na região de interface piso antigo/ argamassa colante.

Baseado na aparência lisa da superfície da argamassa e na presença dos diversos compostos existentes na região de interface com as argamassas é possível concluir que a resistência de aderência entre as camadas do sistema de revestimento de piso sobre piso é responsabilidade muito maior da extensão de aderência entre a argamassa colante e o piso cerâmico do que pelo intertravamento dos compostos hidratados do cimento à peça cerâmica.

Ao contrário do relatado por Carasek (1996) em seu estudo utilizando substratos porosos, para a aplicação de piso sobre piso (substrato não poroso) não foi observado uma concentração grande de etringita nesta região. Isto já era esperado, pois ao analisar os dados de fluorescência de raios-X (Tabela 8) verifica-se a baixa quantidade de  $Al_2O_3$  que compõem o  $C_3A$  do cimento e que ao hidratar-se formará a etringita. Devido à presença de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) na região de interface e sendo este composto a principal fase que confere resistência aos compostos cimentícios, pode-se supor que para o assentamento de piso sobre piso a resistência de aderência é governada principalmente pela presença do composto C-S-H.

Com base nas informações apresentadas supõe-se que a resistência de aderência entre as camadas do sistema de revestimento de piso sobre piso é responsabilidade muito maior da extensão de aderência entre a argamassa colante e o piso cerâmico do que pelo intertravamento dos compostos hidratados do cimento à peça cerâmica. Sendo a peça cerâmica esmaltada e com porosidade aproximadamente nula

esta hipótese era esperada, sendo assim confirmada através dos experimentos. A Figura 82 apresenta um modelo simplificado da hipótese levantada neste trabalho do mecanismo de aderência de revestimentos de piso sobre piso em comparação ao modelo proposto por Carasek (1996).

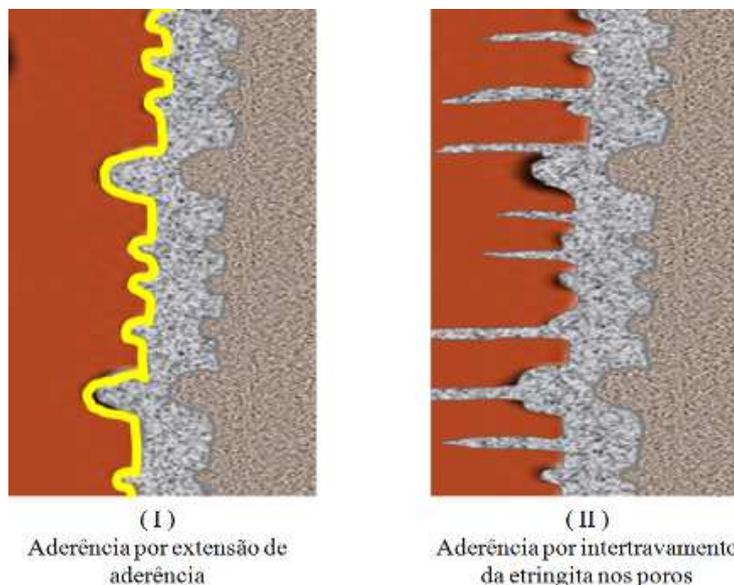


Figura 82: Hipótese da resistência de aderência em revestimentos de piso sobre piso em comparação ao modelo proposto por Carasek (1996) para revestimentos porosos.

#### 4.4 Resistência de aderência de revestimentos do tipo piso sobre piso

O assentamento de piso sobre piso especificamente não é contemplado por nenhuma norma brasileira. Para avaliação das argamassas colantes usadas no assentamento de piso sobre piso utiliza-se a NBR 14084 (ABNT, 2004) que define procedimentos para o ensaio de resistência de aderência em laboratório utilizando-se um substrato padrão poroso, o que não demonstra a real condição de utilização desta argamassa quando aplicada esta técnica, uma vez que esta norma refere-se a especificação de material e não a aplicação.

Para o assentamento em campo tem-se a NBR 13749 (ABNT, 1996) que apresenta limites mínimos de resistência de aderência para o uso de revestimentos cerâmicos em ambiente externos, porém esta também não trata especificamente da aplicação de piso sobre piso. Apesar do exposto estas normas serão utilizadas como um ponto de partida para as análises posteriores a respeito do desempenho dos revestimentos do tipo piso sobre piso.

#### 4.4.1 Resistência de aderência em laboratório

A NBR 14081 (ABNT, 2004) apresenta limites de resistência de aderência para argamassas colantes assentadas sobre substrato padrão de concreto e curadas sob as condições previstas nesta norma. Não existem normas no Brasil que especifiquem limites para argamassas colantes utilizadas para o assentamento de piso sobre piso. Devido a isto, neste item os valores obtidos nos ensaios em laboratório e executados sobre um piso de referência esmaltado serão discutidos utilizando-se os limites definido pela NBR 14081 a fim de ter-se um parâmetro de comparação.

Após os ensaios de resistência de aderência em laboratório, os dados foram tratados estatisticamente conforme já foi discutido no 3.3.1 e a resistência de aderência da argamassa foi considerada como sendo a média dos valores válidos após o tratamento inicial. Um resumo dos resultados obtidos pelos ensaios em laboratório está apresentado na Tabela 15. Os resultados completos dos ensaios de resistência de aderência em laboratório encontram-se no Anexo V.

Tabela 15: Ensaio de resistência de aderência para diferentes curas.

Argamassa	Resistência de Aderência (MPa)			
	Cura em Ambiente Laboratorial	Cura em Estufa	Cura Submersa	Cura em Ambiente Externo
A	1,8	1,2	0,5	1,1
B	1,5	1,2	0,5	1,1
C	1,3	1,1	0,8	1,2
D	1,5	1,2	0,9	1,4

Uma vez que os valores que constam na Tabela 15 parecem ser muito próximos, aplicou-se sobre estes dados, obtidos com a ruptura nos pisos de referência, uma análise de variância (ANOVA) para verificar se estas diferenças encontradas são significativas tanto entre as argamassas quanto entre as diferentes curas.

Os cálculos realizados encontram-se no Anexo V e nos permitem afirmar, com 95 % de confiabilidade, que os valores de resistência de aderência para as diferentes curas são diferentes entre si, bem como existem diferenças entre as argamassas, o que valida as análises sobre estas diferenças que serão realizadas posteriormente.

Para o caso de assentamento de piso sobre piso em áreas externas, a observação do comportamento dos conjuntos piso de referência/argamassa/placa cerâmica submetidos às diferentes curas é de particular interesse, uma vez que em condições ambientais os revestimentos estarão submetidos as mais diferentes solicitações.

Com os dados da Tabela 15 procedeu-se a construção do gráfico da Figura 83 que apresenta um comparativo entre os diferentes resultados de cura para as quatro argamassas colantes estudadas.

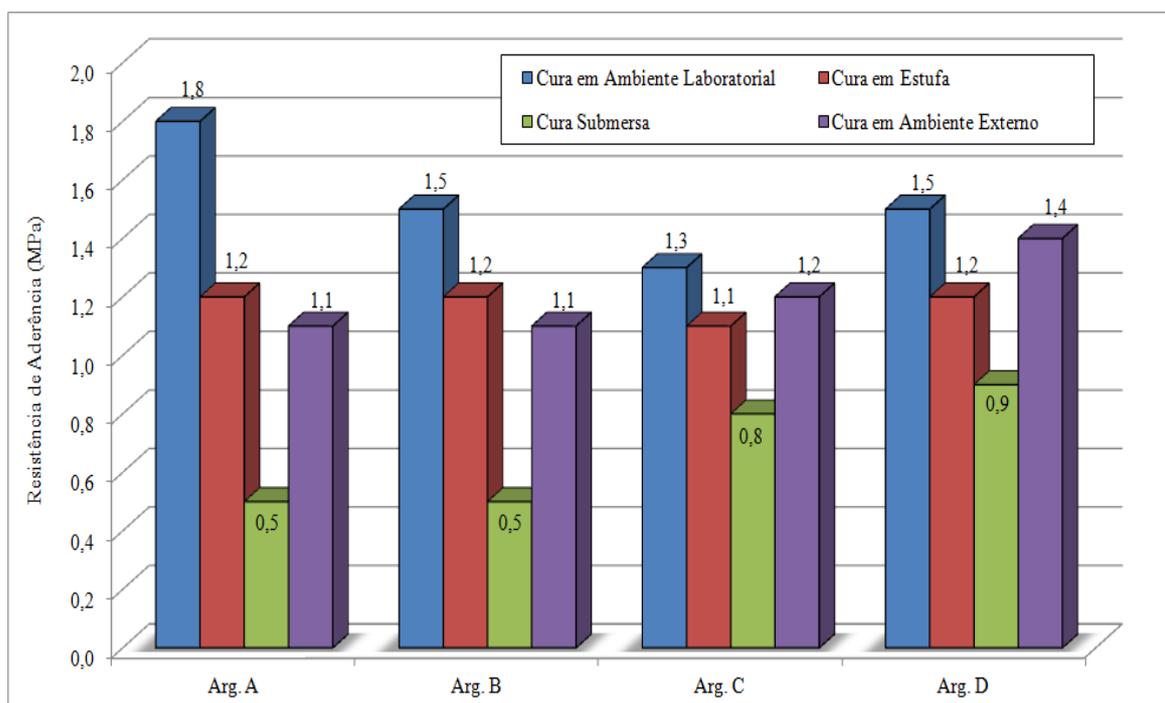


Figura 83: Valores de resistência de aderência para os diferentes tipos de cura.

Pode-se verificar que para os revestimentos assentados sobre o piso de referência em laboratório os revestimentos submetidos à cura normal sempre apresentam os maiores valores de resistência de aderência e os valores obtidos com a cura submersa, ao contrário, apresenta os menores valores.

A cura em ambiente laboratorial representa as condições ideais de exposição, temperatura e umidade controladas, o que justifica os valores superiores obtidos para este tipo de cura. Todas as argamassas apresentaram valores de resistência de aderência altos para este tipo de cura, comparativamente aos valores propostos pela NBR 14081. Comparativamente as demais argamassas, a argamassa C obteve os menores valores de resistência de aderência para este tipo de cura.

Por outro lado, em revestimentos externos, os pisos estarão constantemente submetidos à ação da chuva e de possíveis empoçamentos pontuais, assim a cura submersa tende a representar bem este tipo de condição. Sabe-se que os materiais cimentícios tendem a apresentar resistências menores quando em presença de umidade. Pode-se verificar que as argamassas C e D têm os melhores desempenhos neste tipo de cura, demonstrando que estas argamassas são menos suscetíveis a presença de água. Uma hipótese para este comportamento é a utilização por estas argamassas de uma porcentagem maior de aditivos como o PVA que são suscetíveis a água, porém isto não pode ser confirmado pelos resultados obtidos, uma vez que nenhum dos ensaios utilizados neste programa experimental tem sensibilidade para distinguir o tipo de aditivo usado na formulação das argamassas colantes.

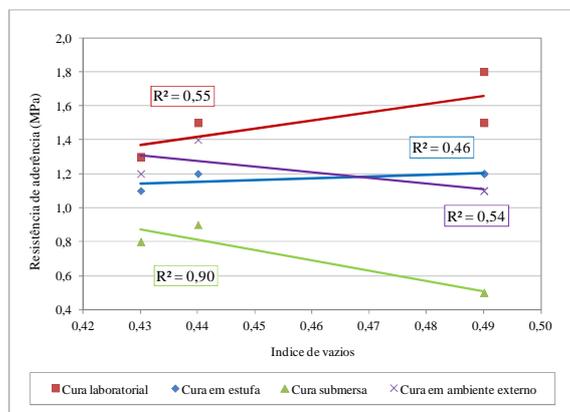
Devido às possíveis variações climáticas ocorridas durante um mesmo dia, a cura em estufa procura avaliar o efeito da temperatura sobre o conjunto piso de referência/argamassa/placa cerâmica e permite inferir sobre a suscetibilidade das argamassas colantes a esta condição. De um modo geral, pode-se dizer que todas as argamassas obtiveram desempenhos similares quando expostas as temperaturas do ensaio (70 °C durante 14 dias).

Por fim, optou-se por uma cura não prevista na normalização, onde o conjunto piso de referência/argamassa/placa cerâmica foi exposta na área de testes, onde paralelamente estavam sendo monitoradas as resistências de aderência dos pisos assentados externamente. Em uma situação real, o piso estará em contato direto com a água e submetido a ciclos de molhagem e secagem. Nestas condições, a argamassa D atingiu o maior valor de aderência (1,4 MPa), sendo que todas as argamassas obtiveram valores superiores a 1,0 MPa.

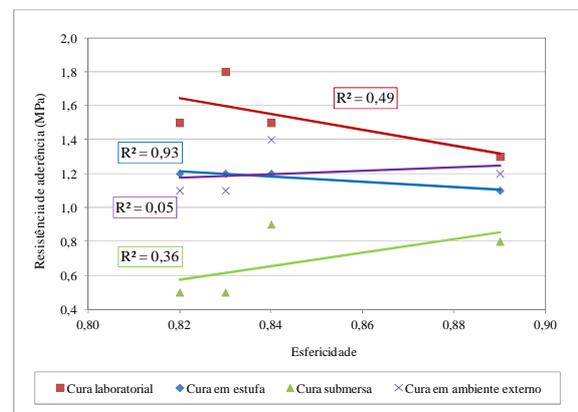
Quanto às diferenças entre as argamassas, pode-se verificar que as argamassas C e D apresentam um desempenho superior na cura submersa (0,8 e 0,9 MPa, respectivamente) quando comparada as argamassas A e B (0,5 MPa em ambas). Parece que estas argamassas apresentam uma suscetibilidade maior à água o que tende a torná-las, comparativamente, as mais inadequadas para assentamentos em condições onde estas estarão sujeitas a ação de água.

A fim de identificar quais as propriedades exerce maior influencia sobre a resistência de aderência das argamassas colantes, procedeu-se o cálculo da correlação de todas as propriedades avaliadas nesta pesquisa com a resistência de aderência obtida nas diversas formas de cura estudadas, sendo a partir destes valores identificadas as propriedades que apresentavam correlações mais fortes.

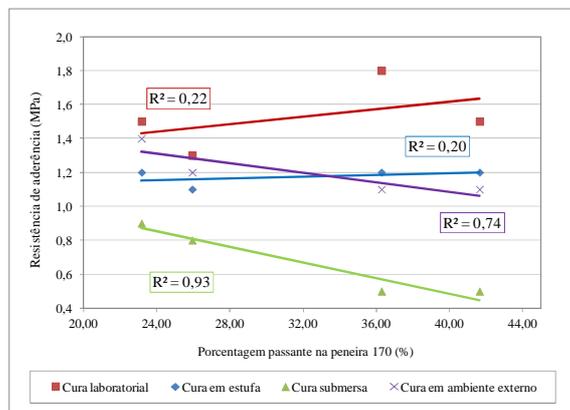
Os gráficos da Figura 84 demonstram a correlação entre estas propriedades e a resistência de aderência obtida por meio da moldagem de placas cerâmicas sobre um piso de referência e curadas em ambiente laboratorial, em estufa, submersa e em ambiente externo.



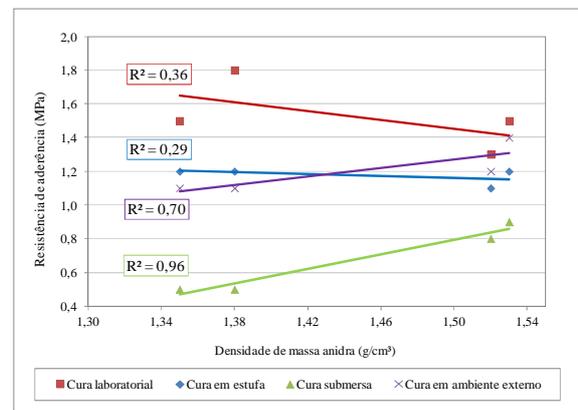
(a)



(b)



(c)



(d)

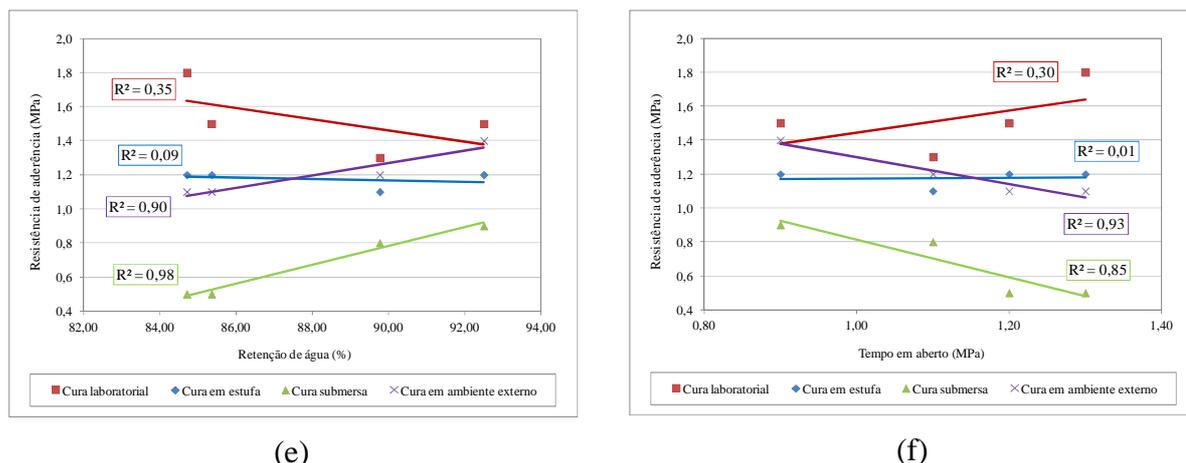


Figura 84: Correlação entre propriedades das argamassas e a resistência de aderência de argamassas colantes assentadas sobre um piso de referência: (a) índice de vazios; (b) esfericidade; (c) porcentagem de material passante na peneira 170; (d) densidade de massa anidra; (e) retenção de água e; (f) tempo em aberto.

Através das correlações obtidas é possível afirmar que as propriedades das argamassas que mais influem na resistência de aderência em laboratório e em estufa são o índice de vazios das argamassas no estado fresco ( $R^2 \cong 0,50$  para ambas as curas) e a esfericidade das partículas ( $R^2 = 0,55$  para laboratório e 0,93 para estufa).

Para a cura submersa e em ambiente externo outras propriedades das argamassas também apresentam altas correlações, sendo destaque a porcentagem de material passante na peneira 170 ( $R^2 = 0,93$  e 0,74), a densidade de massa anidra ( $R^2 = 0,96$  e 0,70), a retenção de água ( $R^2 = 0,98$  e 0,90) e o tempo em aberto das argamassas ( $R^2 = 0,85$  e 0,93).

O índice de vazios continua com altas correlações com estes outros dois tipos de cura ( $R^2 = 0,90$  e 0,54), porém a esfericidade demonstrou correlações muito fracas com as curas submersas e em ambiente externo ( $R^2 = 0,36$  e 0,05).

#### 4.4.2 Resistência de aderência de revestimentos do tipo piso sobre piso assentados em ambiente externo

A resistência de aderência de piso sobre piso foi monitorada ao longo do tempo (12 meses), buscando-se acompanhar o desenvolvimento da resistência de aderência das argamassas colantes assentadas em ambiente externo.

A Figura 85 apresenta dados de precipitação de chuva na cidade de Curitiba, obtidos junto ao SIMEPAR. Observe que nos períodos de ensaio sempre houve um período de estiagem anteriormente, garantindo-se assim que as argamassas estivessem o mais isenta de umidade possível, buscando-se minimizar assim a influência desta nos resultados de ensaio.

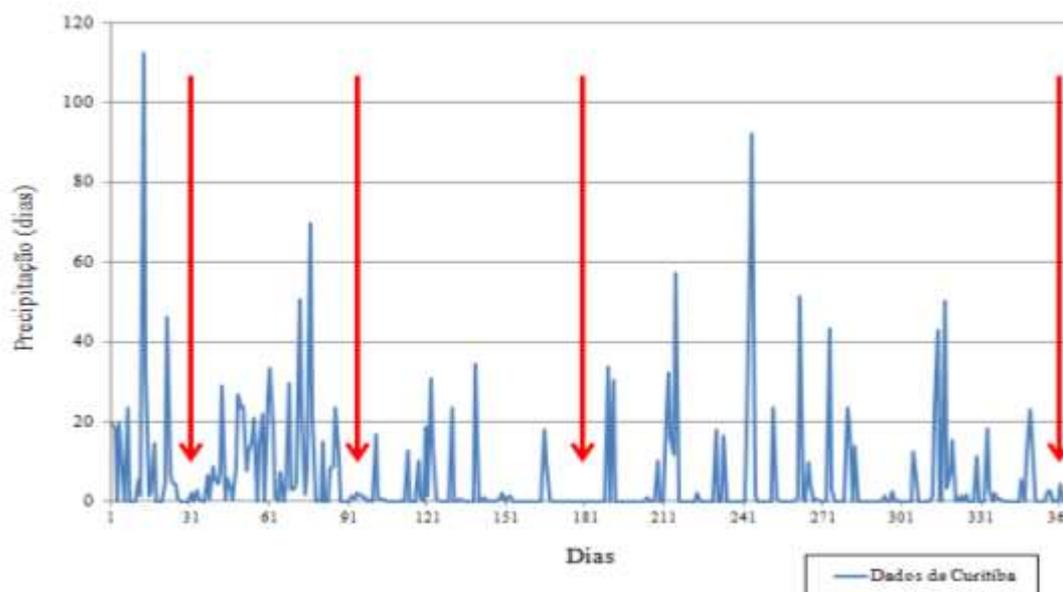


Figura 85: Dados de precipitação de chuva na cidade de Curitiba (SIMEPAR, 2011): Detalhe dos dias de execução dos ensaios de resistência de aderência em ambiente externo.

Foram realizadas leituras sobre os revestimentos com 28 dias, 3, 6 e 12 meses. As médias dos resultados obtidos após o tratamento preliminar estão apresentadas na Tabela 16. Os valores completos obtidos a partir dos ensaios encontram-se transcritos nas planilhas no ANEXO VII.

Tabela 16: Resistência de aderência de piso sobre piso – Área de testes.

Argamassa colante	Resistência de Aderência (MPa)			
	1 mês	3 meses	6 meses	12 meses
A	0,6	0,9	1,4	1,4
B	0,6	0,7	1,3	1,5
C	0,9	0,9	1,3	1,7
D	1,0	0,9	1,1	1,0

Estes dados foram tratados com análise de variância (ANOVA) e a análise permite afirmar que os valores encontrados são significativamente diferentes, tanto entre as argamassas quanto entre os dados referentes às variações ao longo do tempo. Os cálculos da ANOVA encontram-se no ANEXO VIII. Com os dados da Tabela 16 foi plotado o gráfico da Figura 86 onde é possível visualizar as diferenças de comportamento entre as argamassas ao longo de 12 meses.

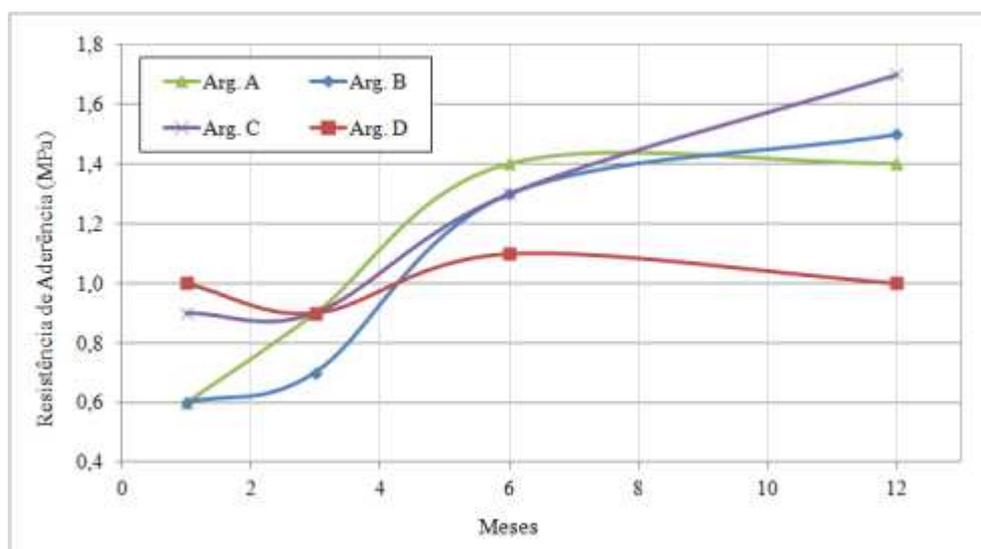


Figura 86: Evolução da resistência de aderência para as diferentes argamassas ao longo de 12 meses.

Ao analisar o gráfico de evolução da resistência de aderência dos pisos assentados em ambiente externo verifica-se que todas as argamassas apresentam ganho de resistência de aderência ao longo do período de monitoramento, sendo a única exceção a argamassa D que apresentou resultados constantes durante todas as leituras. Até o período acompanhado (12 meses) nenhuma das argamassas apresentou queda de resistência de aderência em relação à primeira leitura, aos 28 dias, como pode ser constatado pela Figura 86.

Os resultados de caracterização das argamassas no estado fresco parecem estar relacionados com a resistência de aderência das argamassas colantes aos 28 dias, porém o comportamento do sistema de revestimento se altera completamente após isto. As principais correlações encontradas com a resistência de aderência de revestimentos cerâmicos assentados em ambiente externo ao longo de um ano estão apresentadas na Figura 87.

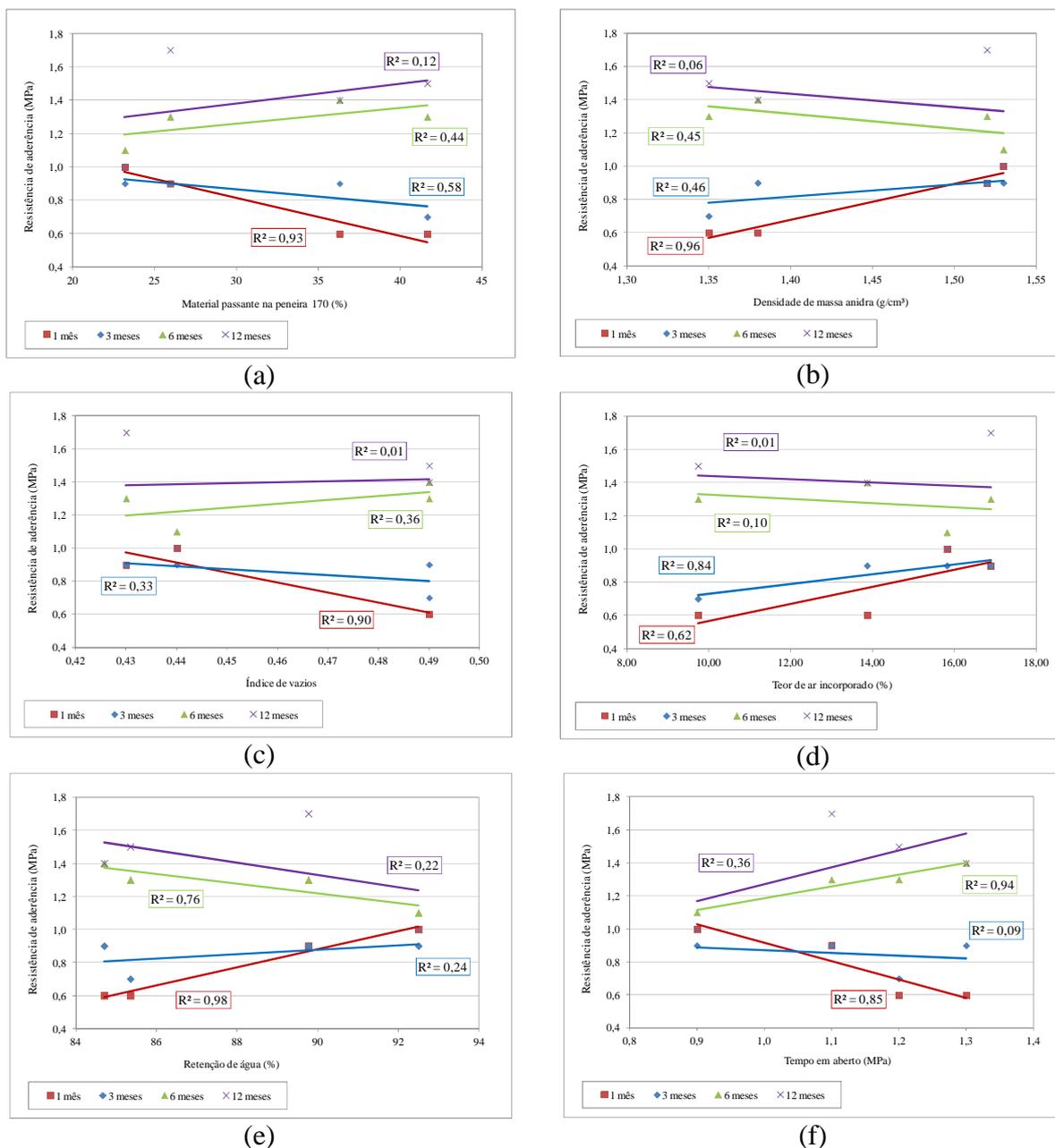


Figura 87: Correlação entre propriedades das argamassas colantes e a resistência de aderência de revestimentos cerâmicos assentados em ambiente externo: (a) porcentagem de material passando na peneira 170 ; (b) densidade de massa anidra; (c) índice de vazios; (d) teor de ar incorporado; (e) retenção de água e; (f) tempo em aberto.

Pelos resultados é possível verificar que aos 28 dias as principais propriedades relacionadas com a resistência de aderência são a porcentagem de material passando na peneira 170 ( $R^2 = 0,93$ ), a densidade de massa anidra ( $R^2 = 0,96$ ), o índice de vazios ( $R^2 = 0,90$ ), o teor de ar incorporado nas misturas ( $R^2 = 0,62$ ), a retenção de água ( $R^2 = 0,98$ ) e o tempo em aberto ( $R^2 = 0,85$ ). Já aos 3 meses somente a porcentagem de material passando na peneira 170 ( $R^2 = 0,58$ ) e o teor de ar incorporado ( $R^2 = 0,84$ ) nas misturas ainda mostram correlação forte.

Apesar do ganho de resistência constatado nos ensaios para as argamassas A, B e C, a forma como as resistências de aderência evoluíram foram diferentes. As argamassas B e C não apresentam incremento de resistência entre 28 dias e 3 meses. A partir de então apresentam ganho expressivo de resistência, chegando aos 12 meses com incrementos, em relação aos 28 dias, de 170% e 210% respectivamente. A argamassa A já no terceiro mês tem incremento elevado de resistência (175%), sendo que entre 6 e 12 meses estes valores se estabilizam. Observando a tendência das curvas pode-se inferir que a argamassa C parece ter potencial de aumentar ainda mais suas resistências.

Ao observar-se as correlações entre as propriedades das argamassas e a resistência de aderência das argamassas aos 6 e 12 meses podemos observar que as principais correlações com a resistência de aderência são as proporções entre os componentes da formulação da argamassa (areia, cimento, adição e aditivos), demonstrando que para longas idades está é uma característica muito influente no desempenho das argamassas colantes. A Figura 88 apresenta a correlação destas propriedades com a resistência de aderência aos 6 e 12 meses.

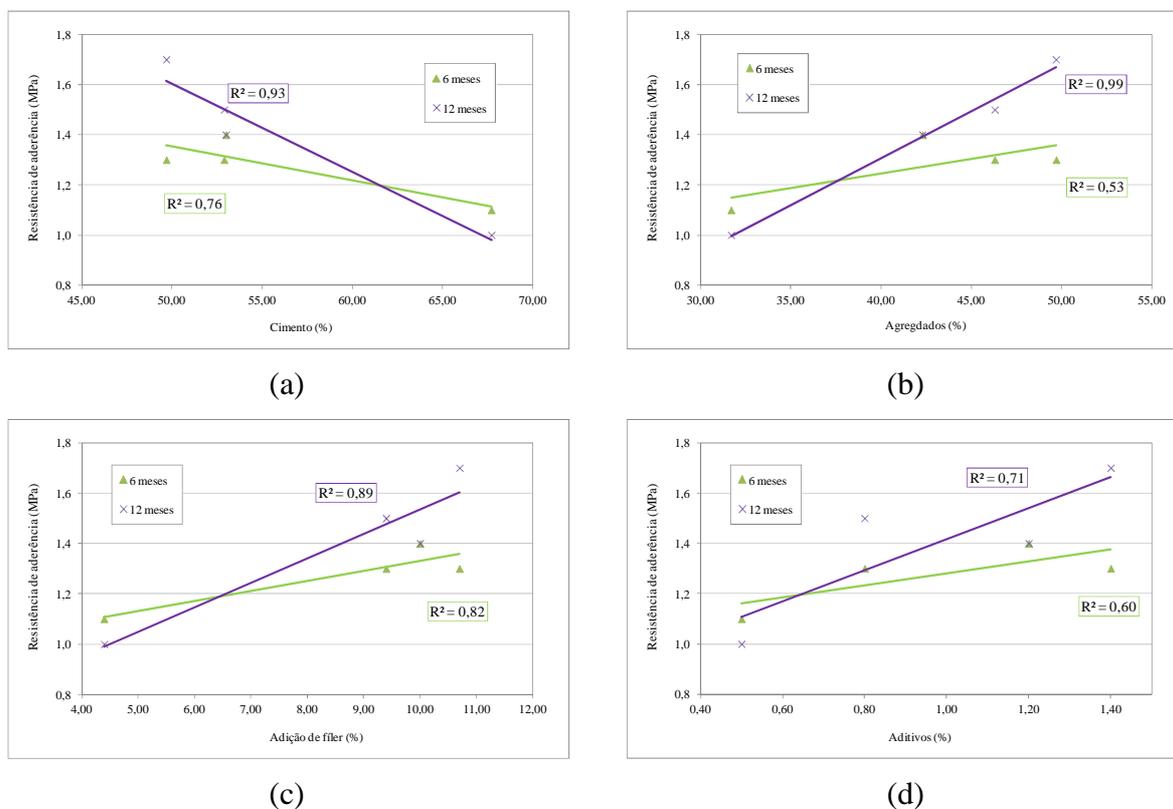


Figura 88: Correlação entre os componentes das argamassas colantes e a resistência de aderência aos 6 e 12 meses: (a) cimento; (b) agregados; (c) Adição de filer e; (d) aditivos.

A forma de evolução das resistências de aderência das argamassas colantes parece estar intimamente relacionada ao tipo e teor de cimento que compõe a mistura. Cimentos Pozolânicos e com escória tendem a apresentar aumento nas suas resistências com maiores idades, comportamento este observado nos resultados em campo.

A argamassa A composta por cimento CII – F possui fíler como adição e sendo este material inerte não contribui com aumento de resistência ao longo do tempo, logo o cimento tende a reagir potencialmente nas primeiras idades e se estabilizar a partir de então. A argamassa A apresenta este comportamento de evolução de resistência de aderência sendo então associado ao tipo de cimento utilizado.

A argamassa B, composta por cimento CII – Z, têm evolução de resistência de aderência lenta até os 28 dias e incremento contínuo a partir desta idade com estabilização após 6 meses. Este comportamento é coerente com o caráter pozolânico das adições presentes neste tipo de cimento que tende a reagir mais tardiamente.

Na argamassa D o teor de cimento foi decisivo, pois ao que parece, apesar da argamassa também ter cimento CII- Z em sua composição, o cimento reage inicialmente e não há evolução nestes valores. Possivelmente devido ao baixo teor de cimento, este reage no primeiro mês e as reações se estabilizam para idades superiores. As resistências nessa argamassa são prejudicadas, comparativamente as demais, pois o teor de aglutinante para promover a resistência de aderência parece ser insuficiente.

Por fim, a argamassa C, com escória de alto forno presente como adição ao cimento CII – E, devido as características desta adição, tem uma reatividade inicial lenta o que é modificado ao longo de sua vida. Na argamassa C, as reações até os 3 meses mostram-se lentas, comportamento este que se altera a partir desta idade, apresentando uma tendência de crescimento ainda após o período de um ano de monitoramento.

As argamassas estarão submetidas durante sua vida a variações significativas de temperatura, o que ao longo de sua vida poderão contribuir negativamente para as resistências de aderência das argamassas colantes assentadas nos pisos externos. A Figura 89 apresenta o gráfico com as variações de temperatura (máximas e mínimas) durante o período desta pesquisa e a Figura 90 apresenta as variações de temperatura neste período.

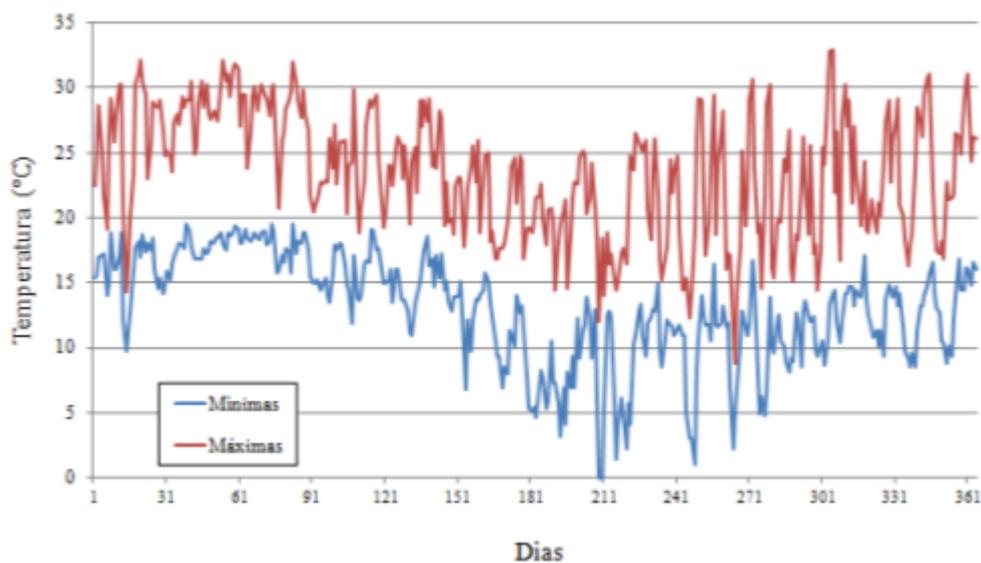


Figura 89: Temperaturas máximas e mínimas ( $^{\circ}\text{C}/\text{dias}$ ) na cidade de Curitiba durante o período de monitoramento (SIMEPAR, 2011).

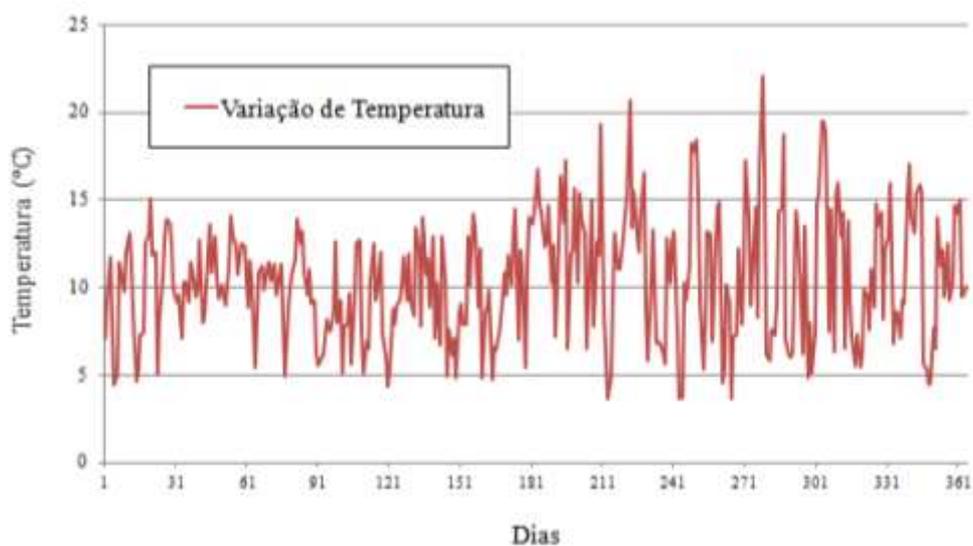


Figura 90: Variações de temperatura ( $^{\circ}\text{C}/\text{dias}$ ) na cidade de Curitiba durante o período de monitoramento (SIMEPAR, 2011).

Nesta pesquisa não foi possível verificar o efeito da temperatura sobre as resistências de aderência, porém este efeito deve ser significativo durante a vida útil do sistema de revestimento cerâmico.

#### 4.4.3 Comparação entre os valores de resistência de aderência (laboratório versus campo)

Os ensaios laboratoriais de argamassas colantes para assentamento de revestimentos cerâmicos limitam-se as condições de cura estabelecidas na NBR 14084 (ABNT, 2005) e estas nem sempre representam as condições reais de exposição, uma vez que esta norma presta-se basicamente a caracterizar o material e não seu desempenho em campo. Por outro lado, a NBR 13749 (ABNT, 1996) trata da aplicação de revestimentos cerâmicos e apresenta limites de desempenho para esta aplicação (0,3 MPa par assentamento tanto interno quanto externo), porém esta norma não contempla especificamente a aplicação de piso sobre piso.

Para verificar o comportamento das argamassas colantes assentadas em laboratório em comparação com os valores obtidos em campo plotou-se o gráfico da Figura 91 onde se pode comparar o comportamento dos revestimentos submetidos à exposição externa e os revestimentos assentados sobre o piso de referência, em laboratório, curados nas diferentes condições de cura, ambos durante 28 dias.

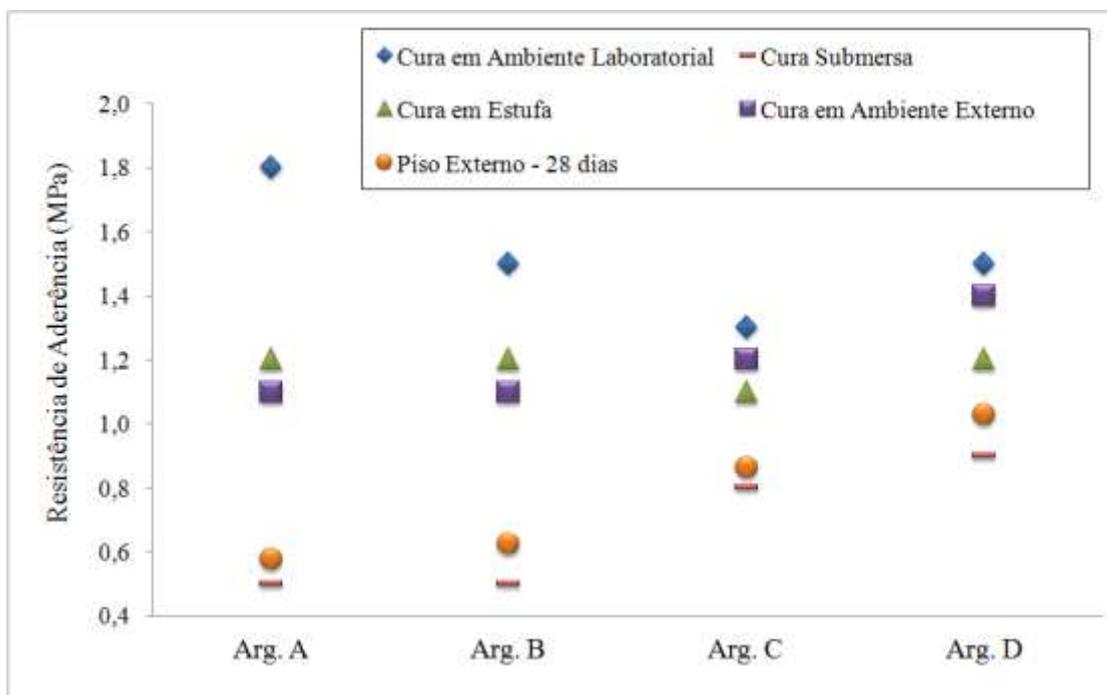


Figura 91: Curvas de comparação dos valores de resistência de aderência obtidos em campo aos 28 dias versus resistência de aderência obtida nos pisos de referência para as diferentes curas.

Optou-se pela comparação aos 28 dias por ser esta data de ensaio das argamassas em laboratório. Os resultados referentes às curas permitem observar comportamento parecido entre os diferentes tipos de cura, sendo que a cura submersa foi a que mostrou maior similaridade com os valores encontrados em campo para os 28 dias. A Figura 92 demonstra as correlações encontradas entre os resultados de resistência de aderência obtidos em campo e o desempenho de resistência de aderência dos revestimentos cerâmicos assentados em um ambiente externo.

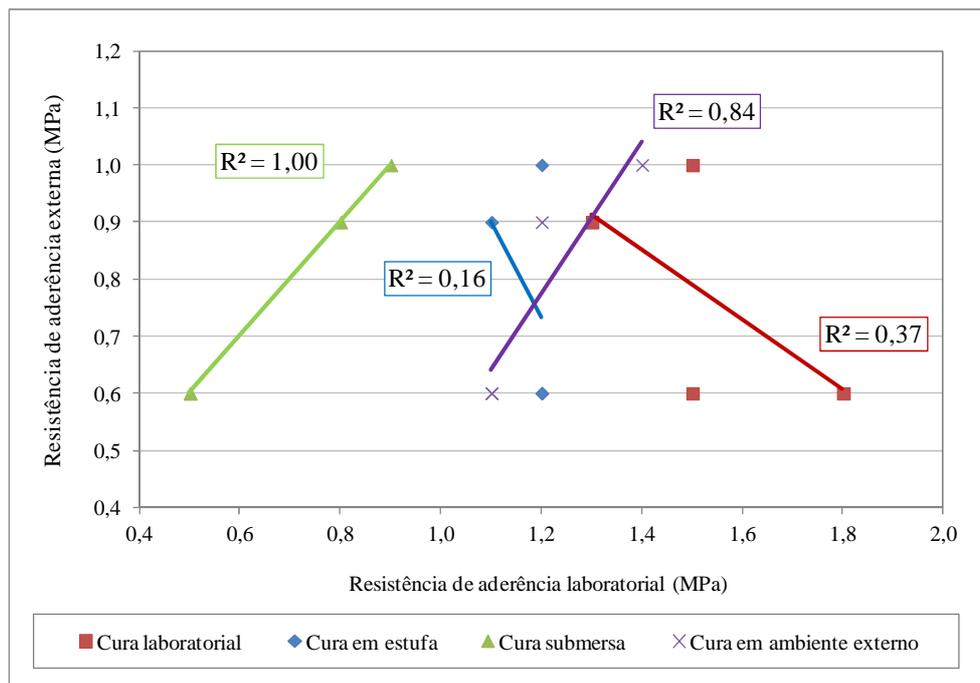


Figura 92: Correlação entre os valores de resistência de aderência obtidos em laboratório sobre o piso de referência e em ambiente externo aos 28 dias.

A diferença de resistência de aderência nos pisos externos foi de apenas 0,1 MPa entre o campo e cura submersa, provavelmente estando dentro de um erro padrão, demonstrando que este tipo de cura é a mais apropriada para demonstrar o comportamento de pisos externos aos 28 dias, conforme pode ser constatado pela correlação obtida para estes ensaios ( $R^2 = 1$ ).

Os resultados para cura em ambiente mostrou comportamento intermediário entre os outros casos estudados. Pode-se verificar que os pontos referentes à cura em ambiente se intercalam com os valores da cura em estufa. Apesar de a cura ter ocorrido no mesmo local do assentamento externo, a argamassa colante não esteve em contato direto com a água, o que pode explicar esta diferença. Apesar disto a correlação entre este tipo de cura e o assentamento externo mostra-se forte ( $R^2 = 0,84$ ).

Verificou-se que a argamassa D aos 28 dias apresentou as maiores resistências de aderência. Este mesmo comportamento foi observado nas curas, sendo que esta argamassa apresentou os melhores resultados nas curas submersa (0,9 MPa), em estufa (1,2 MPa) e em ambiente externo (1,4 MPa). Ao analisar a evolução da resistência desta argamassa, no entanto, verifica-se que estes valores estão estáveis ao longo dos 12 meses, chegando ao fim do período de monitoramento com a mesma resistência (1,0 MPa) que tinha aos 28 dias. Isto pode ser atribuído possivelmente a uma hidratação da maior parte do cimento desta argamassa ainda neste período, o que explicaria o não incremento de resistência. Cabe destacar que esta argamassa é a que contém o menor teor de aglomerantes nas misturas.

As argamassas A, B e C têm os menores valores de resistência de aderência aos 28 dias nos ensaios em campo e também os menores valores de resistência na cura submersa, porém para ambas verifica-se um acréscimo considerável de resistências ao longo do tempo, possivelmente por uma diferente velocidade de hidratação dos compostos no caso destas argamassas. Por fim, aos 12 meses estas argamassas são as que apresentam os maiores valores de resistência de aderência (1,4, 1,5, e 1,7 MPa respectivamente).

Todas as argamassas apresentaram altos valores de aderência na cura em estufa o que indica que estas resistem bem à temperatura. Isto pode ter contribuído para o bom desempenho destas argamassas quando assentadas em ambiente externo. Observa-se que ao longo de um ano as argamassas já ultrapassaram os valores obtidos na cura em ambiente laboratorial e algumas argamassas como a argamassa C demonstram, através da tendência observada nas curvas, que tem potencial de aumentar ainda mais estes valores.

Uma dificuldade encontrada por pesquisadores da área de experimentos é correlacionar seus modelos, sejam teóricos ou experimentais, com o comportamento real aos quais os materiais em obra encontram-se submetidos. Isso demonstra a necessidade de avanços nesta área a fim de ainda em laboratório, desenvolver-se ensaios que busquem a previsão do comportamento das argamassas assentadas neste tipo de piso. Neste contexto o gráfico da Figura 93 apresenta a correlação entre os ensaios de resistência aos 28 dias, tanto em campo quanto nos pisos de referência, e as cargas máximas obtidas pelo Squeeze Flow.

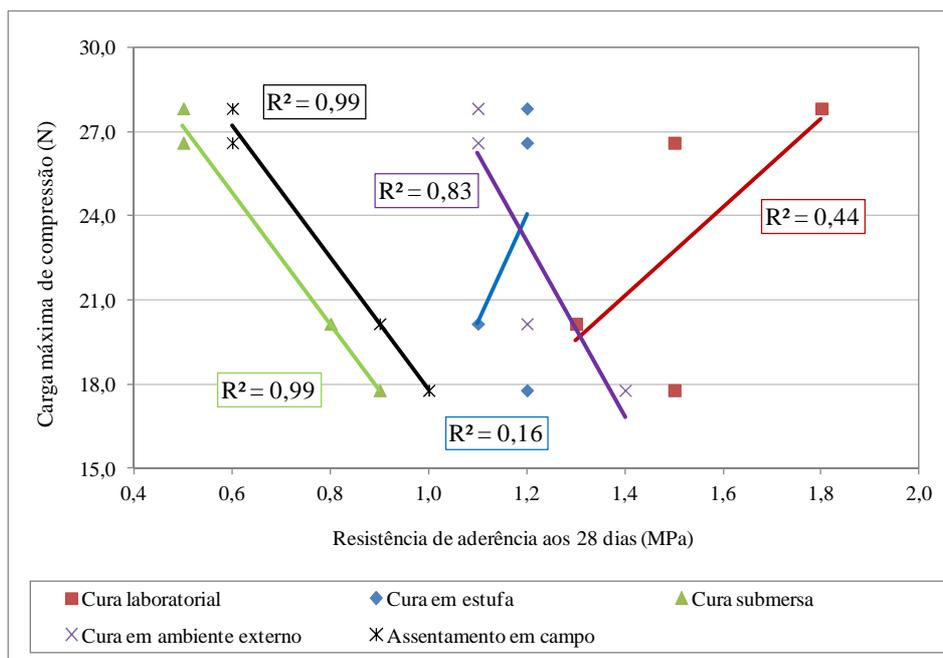


Figura 93: Correlação entre os valores de resistência de aderência aos 28 dias e as cargas máximas obtidas pelo Squeeze Flow com taxa de cisalhamento de 1,0 mm/s e 0 minutos de maturação.

Os resultados apresentados revelam uma correlação expressiva entre os resultados obtidos pelo Squeeze Flow com taxas de cisalhamento de 1,0 mm/s e para ensaio logo após mistura, ou seja, sem tempo de repouso da argamassa. Ao que parece as principais correlações são para os ensaios de resistência de aderência em campo ( $R^2 = 0,99$ ), resistência de aderência para conjuntos submetidos em cura submersa ( $R^2 = 0,99$ ) e curados em ambiente externo ( $R^2 = 0,83$ ). Com base nas correlações obtidas podemos concluir que realmente o Squeeze Flow mostra-se como uma ferramenta potencial de análise de desempenho de argamassas colantes.

Os valores limites de resistência de aderência em argamassa colantes são definidos pela NBR 14081 (ANBT, 2004). Segundo esta norma, argamassas colantes tipo ACIII deverão apresentar para as condições de cura (submersa, em estufa e normal) pelo menos 1,0 MPa de resistência de aderência à tração aos 28 dias. Quanto aos valores encontrados nos pisos de referência, todos se encontram dentro dos limites de norma, com exceção dos valores obtidos para a cura submersa, onde nenhuma das argamassas colantes atingiu os valores mínimos.

Deve-se ressaltar que os valores de norma são para assentamentos de placas cerâmicas com argamassa colante sobre um substrato poroso e não sobre um piso de referência como foi adotado nesta pesquisa.

Uma vez que estas argamassas serão utilizadas para diversas aplicações como o de assentamento de piso sobre piso e também assentamentos de placas pouco porosas como os porcelanatos, se faz necessário um avanço nos métodos de ensaio para contemplar as especificidades de cada aplicação.

Atualmente encontram-se em discussões no CB 18 da ABNT as revisões das normas referentes a argamassas colantes. Como contribuição ao meio técnico, este trabalho apresenta dados obtidos em laboratório que podem servir de base para especificações de limites para a avaliação de argamassas colantes próprias para o assentamento de piso sobre piso. A Tabela 17 apresenta uma proposta de limites de resistência de aderência para argamassas aplicadas no assentamento de piso sobre piso assentadas sobre um piso cerâmico de referência.

Tabela 17: Proposta de requisitos mínimos de resistência de aderência para as argamassas colantes aplicadas no assentamento de piso sobre piso.

Propriedade	Método de ensaio	Argamassas colantes industrializadas
		Tipo Piso sobre Piso
Sob cura normal	Adaptação da NBR 14084 – Argamassa aplicada sobre um piso cerâmico de referência	$\geq 1,0$
Sob cura submersa		$\geq 0,6$
Sob cura em estufa		$\geq 1,0$

Os valores propostos são baseados no desempenho obtido pelos ensaios em laboratório. Uma vez que a cura submersa mostrou-se o requisito crítico, inclusive com resultados muito próximos do obtido em campo aos 28 dias, este valor deve ser mais criterioso do que para os demais tipos de cura. Ainda tratando de normatizações, deve-se iniciar uma discussão, e este trabalho apresenta esta contribuição, sobre a normatização dos procedimentos de assentamento de piso sobre piso, visto as especificidades inerentes a esta técnica conforme já foi discutido.

Cabe salientar também o impacto da mão de obra sobre o desempenho dos revestimentos ensaiados. A aplicação externa foi realizada por um profissional treinado e experiente enquanto os ensaios em laboratório foram feitos por um profissional recém-treinado o que certamente teve influência significativa sobre a eficiência do assentamento.

Outro ponto a abordar é quanto a forma de aplicação. Em campo as placas cerâmicas foram assentadas utilizando-se a técnica de dupla colagem e também o uso de desempenadeira com dentes de 10 mm. No laboratório as argamassas foram assentadas sobre os pisos de referência com colagem simples (cordões somente sobre o piso de referência) e com desempenadeira com dentes de 6 mm. Este fato também influenciou na diferença entre os valores obtidos em campo e em laboratório.

Baseado no exposto pode-se concluir que a técnica de assentamento de piso sobre piso mostra-se viável. As argamassas colantes utilizadas nessa pesquisa, todas disponíveis no mercado, mostraram-se adequadas para a aplicação desta técnica. Os resultados permitem concluir ainda que além da necessidade de argamassas de boa qualidade para que a técnica seja eficiente, deve-se adotar uma mão de obra qualificada para execução dos revestimentos, o que certamente terá influência significativa sobre o desempenho final dos revestimentos.

Todas as argamassas assentadas externamente encontram-se com valores adequados de resistência de aderência, segundo a NBR 13749 (ABNT, 1996), porém há que se discutir sobre estes valores propostos pela norma. Este documento não leva em consideração as especificidades da aplicação de piso sobre piso. Propõe-se para o CB 2 da ABNT a discussão da normatização da aplicação de piso sobre piso, a qual deve abordar os procedimentos para aplicação da técnica, principalmente quanto a aplicação da dupla camada, procedimento este que tende a garantir uma melhor aderência entre as camadas assentadas.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a resistência de aderência de argamassas colantes através de ensaios laboratoriais e em campo. Além disto, as argamassas utilizadas foram caracterizadas para buscar melhor compreender os fatores influentes sobre a resistência de aderência das argamassas colantes aplicadas no assentamento de piso sobre piso.

Quanto à composição das argamassas colantes verificou-se que a proporção dos diversos componentes mostra-se muito influentes na resistência de aderência, principalmente nos valores obtidas até os 28 dias, tanto em campo quanto em laboratório. Destaca-se a proporção de material retido e acumulado na peneira 170 (abertura de 90  $\mu\text{m}$ ) e a proporção agregado/cimento com influências significativas.

O tipo e o teor de cimento utilizado mostram-se muito importante na evolução da resistência de aderência, conforme verificado ao longo de um ano. Ao que parece o teor mínimo de cimento necessário para obtenção de resistência de aderência adequadas deve ser de 45%. Não foi possível obter conclusões objetivas sobre o efeito dos aditivos sobre a resistência de aderência.

Quanto aos agregados, a distribuição granulométrica e as características morfológicas dos agregados mostram-se muito influentes. O empacotamento das partículas, índice de vazios e densidade de massa anidra das argamassas influenciarão diretamente sobre as propriedades no estado fresco das argamassas. As características morfológicas também influenciam no escoamento das argamassas e isto implicará em uma melhor extensão de contato entre a argamassa e as placas cerâmicas.

No estado fresco a quantidade de água especificada por cada fabricante e o teor de ar incorporado nas misturas influencia significativamente o comportamento das argamassas, quanto a trabalhabilidade das misturas. O teor de água de aproximadamente 22% de água parece ser um valor adequado e o teor de ar incorporado de 16% parece contribuir com o desempenho reológico das argamassas colantes.

O Squeeze Flow com taxa de cisalhamento de 1,0 mm/s e tempo de maturação de 0 minutos mostrou-se como uma ferramenta eficiente para comparação entre as argamassas colantes e na previsão do comportamento das misturas no estado endurecido, principalmente até os 28 dias.

Observou-se também que o ensaio de Squeeze Flow com 0 minutos de maturação mostra-se muito sensível a variações no teor de ar incorporado nas misturas. Após 20 minutos de maturação o aditivo passa a governar o perfil reológico das argamassas avaliado pelo Squeeze Flow. O tempo em aberto das argamassas mostrou estreita relação com o comportamento das misturas verificado pelo Squeeze Flow executado após 20 minutos.

Pode-se verificar através das imagens em MEV a influência do estado fresco sobre a extensão de aderência das argamassas sobre os pisos cerâmicos. Na ligação com o piso novo, em comparação com o piso antigo, a aderência é melhor devido a porosidade do tardo do piso novo. Na superfície em contato com o piso antigo é evidente as diferenças de comportamentos entre as argamassas.

As argamassas com as menores cargas no Squeeze são as que apresentam os melhores contatos com o piso antigo. Além disto, verificou-se uma concentração de diversos compostos hidratados nesta região, com destaque para a presença de C-S-H ao qual são atribuídas as resistências de aderência nesta interface.

Quanto aos ensaios de resistência de aderência em laboratório, executado sobre os pisos de referência verifica-se que a cura normal apresenta os maiores valores de resistência de aderência e os valores obtidos com a cura submersa, ao contrário, apresenta os menores valores. A cura submersa representa melhor o comportamento das argamassas assentadas externamente.

Nos pisos assentados externamente verifica-se que todas as argamassas apresentam ganho de resistência de aderência ao longo do período de monitoramento, sendo a única exceção a argamassa D que apresentou resultados constantes durante todas as leituras. Até o período acompanhado (12 meses) nenhuma das argamassas apresentou queda de resistência de aderência em relação à primeira leitura, aos 28 dias.

Os resultados de caracterização das argamassas no estado fresco parecem estar relacionados com a resistência de aderência das argamassas aos 28 dias, sendo a retenção de água e o tempo em aberto, além do Squeeze Flow, os ensaios que se mostram mais influentes nos resultados de laboratório. Em campo além dos ensaios citados, o teor de ar incorporado nas misturas também exerce influencias sobre o desempenho das argamassas colantes usadas para o assentamento das placas cerâmicas.

O comportamento do sistema de revestimento se altera completamente no decorrer do ano avaliado. Apesar disto, todas as argamassas encontram-se com valores adequados e superiores de resistência de aderência, segundo a NBR 13749 (ABNT, 1996). Por fim, este trabalho apresenta também como contribuição ao meio técnico, mais especificamente a ABNT no que se refere às normas de argamassas colantes, limites de desempenho para as argamassas assentadas sobre revestimentos cerâmicos, tanto em laboratório quanto em campo. Sendo os valores de resistência para cura submersa a condição mais próxima dos valores obtidos em campo, salienta-se a necessidade de atenção especial para esta condição, inclusive com limites mais conservadores, em relação às demais curas.

## **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

- ✓ Baseado nos resultados obtidos com este programa experimental e com as limitações deste sugere-se como trabalhos futuros:
- ✓ Estudo da influência do tipo de cimento na evolução da resistência de aderência de argamassas colantes;
- ✓ Estudo do efeito dos diferentes aditivos sobre as propriedades das argamassas, os correlacionando com imagens em microscopia;
- ✓ Padronização do ensaio de Squeeze Flow aplicado a argamassas colantes, sendo testado para tais argamassas dos tipos ACI, ACII e ACIII;
- ✓ Estudo da adaptação do ensaio de retenção de água, com espessura de 5,0mm, aplicado a argamassas colantes, em um espaço amostral maior;
- ✓ Aprofundamento no estudo da relação entre as diferentes curas e o real comportamento das argamassas colantes assentadas em tamanho real, buscando uma normalização própria para argamassas destinadas a aplicação de piso sobre piso;
- ✓ Acompanhamento da evolução da resistência de aderência para períodos superiores a um ano, a fim de correlacionar os resultados com as variações de temperatura e quantidade de chuvas no período.

## REFERÊNCIAS

AKIAMA, S. Y; MEDEIROS, J. S; SABBATINI, F. H. Flexibilidade de argamassas adesivas. II Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassas. II SBTA. Salvador. 1997.

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. Tese de doutorado. Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo – USP. São Carlos (SP). 2005.

ALMEIDA, A. E. F. S; SICHIERI, E. P. Propriedades microestruturais de argamassas de cimento Portland com adições minerais e poliméricas utilizadas na fixação de porcelanato. Cerâmica. Volume 52. 2006.

ANFACER. Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmicas. <<http://www.anfacer.org.br> > acessado em 01/12/2011.

ANTUNES, G. R. Estudo de Manifestações Patológicas em Revestimentos de Fachada em Brasília – Sistematização da Incidência de Casos. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Distrito Federal. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado – Análise petrográfica de agregados para concreto. Parte 1: Agregado miúdo. NBR 7389-1. Rio de Janeiro. 2009

\_\_\_\_\_Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da retenção de água - NBR 13277 – Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado - NBR 13278 – Rio de Janeiro, 2005.

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

\_\_\_\_\_Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação – NBR 13749 – Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_Placas cerâmicas para revestimento – Classificação - NBR 13817 – Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_ Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Especificações - NBR 14081. Rio de Janeiro, 2004

\_\_\_\_\_ Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Execução do substrato padrão e aplicação de argamassa para ensaio - NBR 14082. Rio de Janeiro, 2004

\_\_\_\_\_ Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Determinação do tempo em aberto - NBR 14083. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_ Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Determinação da resistência de aderência à tração - NBR 14084. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_ Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Determinação da densidade de massa aparente - NBR 14086. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_ Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Caracterização reológica pelo método Squeeze Flow - NBR 15839. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_ Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. NBR NM 23. Rio de Janeiro. 2001.

BANFILL, P. F. G. The rheology of fresh mortar – a review. VI Simpósio Brasileiro de tecnologia das argamassas. VI SBTA. Florianópolis. 2005.

BAUER, E. Revestimentos de argamassa - características e peculiaridades. 1. ed. BRASÍLIA: LEM-UnB - SINDUSCON/DF. 2005.

BAUER, E; CASTRO, E. K Patologias mais Correntes nas Fachadas de Edifícios em Brasília. 3º congresso português de argamassas de construção. Lisboa. 2010.

BITTENCOURT Jr., F. P.; MAIA, L. G. Análise do comportamento da argamassa colante frente à diferentes dosagens de aditivo retentor de água – influência sobre o ensaio de retenção de água. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Concreto) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. 2010.

BREA, F. M. Resistência de aderência e tempo em aberto de argamassas colantes com adição de éteres de celulose. In: V Simpósio Brasileiro de argamassas. Anais V SBTA. São Paulo, 2003.

BUSTAMANTE, G. M.; BRESSIANI, J. C. A indústria cerâmica brasileira. *Cerâmica Industrial*. volume. 5, número 3. 2000.

CANDIA, M. C; FRANCO, L. S. Avaliação do tipo de preparo da base nas características superficiais do substrato e dos revestimentos de argamassa. In: Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. *Anais ANTAC*. Salvador. 2000.

CARASEK, H. Aderência de argamassas à base de cimento portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. São Paulo (SP). 1996.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L.M. Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa. In: IV Simpósio Brasileiro de argamassas. *Anais IV SBTA*. Brasília, 2001.

CARASEK, H. Argamassas. In: G. C. Isaia. (Org.). *Materiais de Construção Civil*. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2007, v. 1.

CARDOSO, F. A. Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. São Paulo (SP). 2009.

CINCOTTO, M.A.; SILVA, M.A.C.; CARASEK, H. Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995, (Boletim 68 IPT).

COSTA, M. R. M. M. Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, São Paulo (SP), 2006.

COSTA, M. R. M. M; CINCOTTO, M. A; PILEGGI, R. G. Análise do deslizamento da argamassa colante através do seu comportamento reológico. VII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. *Anais*. Recife. 2007.

EQUIPE DE OBRA. Assentamento de piso sobre piso. *Revista Equipe de Obra*. PINI. Ed. 28. pp 20 - 23. 2010.

FERRARI, S; PEREIRA, E; COSTA, M. R. M. M; SILVA, I. J; NIEBEL, P. R. Análise da retenção de água em argamassas colantes de mercado. In: IV Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassas. *Anais do IV SBTA*. Belo Horizonte. 2011.

FIORITO, A. J. S. I. Manual de argamassa e revestimento: estudos e procedimento de execução. 2ª edição. São Paulo: PINI, 2009.

GEMELLI, E. Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização. Rio de Janeiro, LTC. 2001.

GONÇALVES, J. P; TAVARES, L. M; TOLEDO FILHO, R. D; FAIRBAIN, E. M. R; CUNHA, E. R. Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars. Cement and concrete research. Volume 37. pp. 924-932. 2007.

GRILLO, K. V. F. Análise Comparativa da aderência de tipos rochosos assentados com três argamassas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Geotécnica. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – USP. São Carlos. 2010.

GROOT, C. J. W. P. Aspect of mortar – brick on. In: INTERNATIONAL BRICKLAND BLOCK MASONRY CONFERENCE, 8th, Dublin, 1988. Proceedings. Elsevier. v.1. pp.175 – 181. 1988.

HUNTER, R.J. Foundations of colloid science. 2.ed. New York, Oxford University Press, 2001.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Ceramic tiles - Grouts and adhesives - Part 3: Terms, definitions and specifications for grouts. ISO 10007: part 3. 2010.

\_\_\_\_\_ Ceramic tiles - Grouts and adhesives - Part 4: Test methods for grouts. ISO 10007: part 4. 2010.

JENNI, A; ZURBRIGGEN, R; HOLZER, L; HERWEGH, M. Changes in microstructures and physical properties of polymer-modified mortars during wet storage. Cement and Concrete Research. Volume 36. 2005a.

JENNI, A; ZURBRIGGEN, R; HOLZER, L; HERWEGH, M. Influence of polymerer on microstructure and adhesive strength of cementitious tile adhesive mortars. Cement and Concrete Research. Volume 36. 2005b.

KUDO, E. K; CARDOSO, F. A; PILEGGI, R. G. Squeeze Flow aplicado a argamassas colantes: influência de parâmetros experimentais de configuração e taxa de deslocamento. In: IV Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassas. Anais do IV SBTA. Belo Horizonte. 2011.

LATICRETE. Catálogo técnico de rejunte Permacolor. <<http://www.laticrete.com/architects/products/grouts.aspx>> acessado em 24/08/2011.

LAMIR. Laboratório de análises minerais e rochas. < <http://www.lamir.ufpr.br/> > Acessado em 10/01/2012.

LYRA, J. S. Estudo da influência de policarboxilato comercial na hidratação, reologia e físico-química de superfícies do cimento. Dissertação (Mestrado), Escola politécnica da Universidade de São Paulo – USP. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de materiais. São Paulo. 2010.

MANSUR, A. A. P. Mecanismo físico-químico de aderência na interface argamassa modificada com polímeros/cerâmica de revestimento. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2007.

MANSUR, A. A. P; NASCIMENTO, O. L; MANSUR, H. S. Physico-chemical characterization of EVA-modified mortar and porcelain tiles interfaces. Cement and Concrete Research. Volume 39. pp 1199-1208. 2009.

MEDEIROS, J. S. Tecnologia e projeto de revestimento cerâmico de fachada. Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

MENDES, T. M. Influência do coeficiente de atrito entre os agregados e da viscosidade da matriz no comportamento reológico de suspensões concentradas heterogêneas. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. São Paulo (SP). 2008.

MORENO JUNIOR, R; SELMO, S. M. de S. Aderência de argamassas de reparo de estruturas de concreto. Boletim técnico da escola politecnica da Universidade de São Paulo - USP. São Paulo, 2007.

MOURA, C. B. Aderência de revestimentos externos de argamassa em substratos de concreto: influências das condições de temperatura e ventilação na cura do chapisco. Dissertação de mestrado. Universidade federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre, 2007.

NAGATANI, T; SAITO S; SATO, M; YAMADA, M. Development of an ultra high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and in-lens system. Scanning Microscopy. v.11, 1987.

NOGAMI, L. Fixação de placas de rochas ornamentais: Estudo da aderência com argamassa colante. Mestrado em Geotecnia. Universidade de São Paulo - USP. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2007.

NSIC. Sindicato nacional da indústria de cimento. < <http://www.snic.org.br/>> acessado em 10/01/2012.

OHAMA, Y. Handbook of polymer-modified concrete and mortars – Properties and process technology. Noyes Publications. New Jersey. 1995.

PAES, I. N. L. Avaliação do transporte de água em revestimentos de argamassa nos momentos iniciais pós-aplicação. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. Brasília, DF. 2004.

PEREIRA, P. C; CARASEK, H; FRANCINETE JR, P. Influência da cura no desempenho revestimentos com argamassa inorgânica. In: VI Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassas. Anais do VI SBTA. Florianópolis. 2005.

PILEGGI, R. G. Efeito da distribuição granulométrica sobre o comportamento reológico de concretos refratário. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Carlos. 1996.

PILEGGI, R. G. Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários. 2001. 187p. Tese de doutorado. Universidade de São Carlos, 2001.

PÓVOAS, Y. V. Tempo em aberto de argamassa colante: Método de medida e influência dos aditivos HEC e resina PVAc. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1999.

PÓVOAS, Y, V. PILEGGI, R. G. JOHN, V. M. Análise do filme superficial da argamassa colante no estado fresco. In: VI Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassas. Anais do VI SBTA. Florianópolis. 2005.

PÓVOAS, Y, V. Avaliação da formação de “película” na argamassa colante e sua influência na adesão. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, São Paulo (SP), 2005.

PRETTO, M, E, J. Influência da rugosidade gerada pelo tratamento superficial do substrato de concreto na aderência de revestimento em argamassa. Dissertação de mestrado. Universidade federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre, 2007.

QUARCIONI, V. A. Reconstituição de traço de argamassas: atualização do Método IPT. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

RECENA, F. A. P. Conhecendo argamassa. EDiPUCRS, Porto Alegre, 2008.

SÁ, A. M. V. D. O. Durabilidade de Cimentos Cola em Revestimentos Cerâmicos Aderentes a Fachadas. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto – Portugal. 2005.

SANTOS, N. Avaliação de micro e nanoporosidade de argamassas colantes. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis (SC), 2006.

SANTOS, H. B. Ensaio de aderência das argamassas de revestimentos. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia de Materiais e Construção. Monografia do curso de Especialização em Construção Civil Belo Horizonte, 2008.

SENNA, D. O. Avaliação do comportamento das argamassas modificada por polímeros à base de éter de celulose em ambientes agressivos. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Departamento de Tecnologia. Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana - Bahia. 2008.

SILVA, C. O. Análise crítica dos requisitos e critérios de qualidade da argamassa colante. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

SINAPROCIM. Sindicato nacional de produtos de cimento. <<http://www.sinaprocim.org.br/>> acessado em 24/01/2012.

STOLZ, C. M. Influência da interação entre parâmetros reológicos de argamassas e a área potencial de contato de substratos na aderência de argamassas de revestimento. Dissertação de mestrado. Universidade federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre, 2001.

SUGUIO, K. Geologia sedimentar. Editora Blucher. São Paulo, 2003.

TANNER, R.I. Engineering Rheology. Rev. ed. Oxford Science Publications, New York, 1998.

THURLER, C. L; FERREIRA, V. A. A evolução da resistência de aderência de algumas argamassas colantes nacionais. I simpósio de tecnologia de argamassas. Goiânia. 1995.

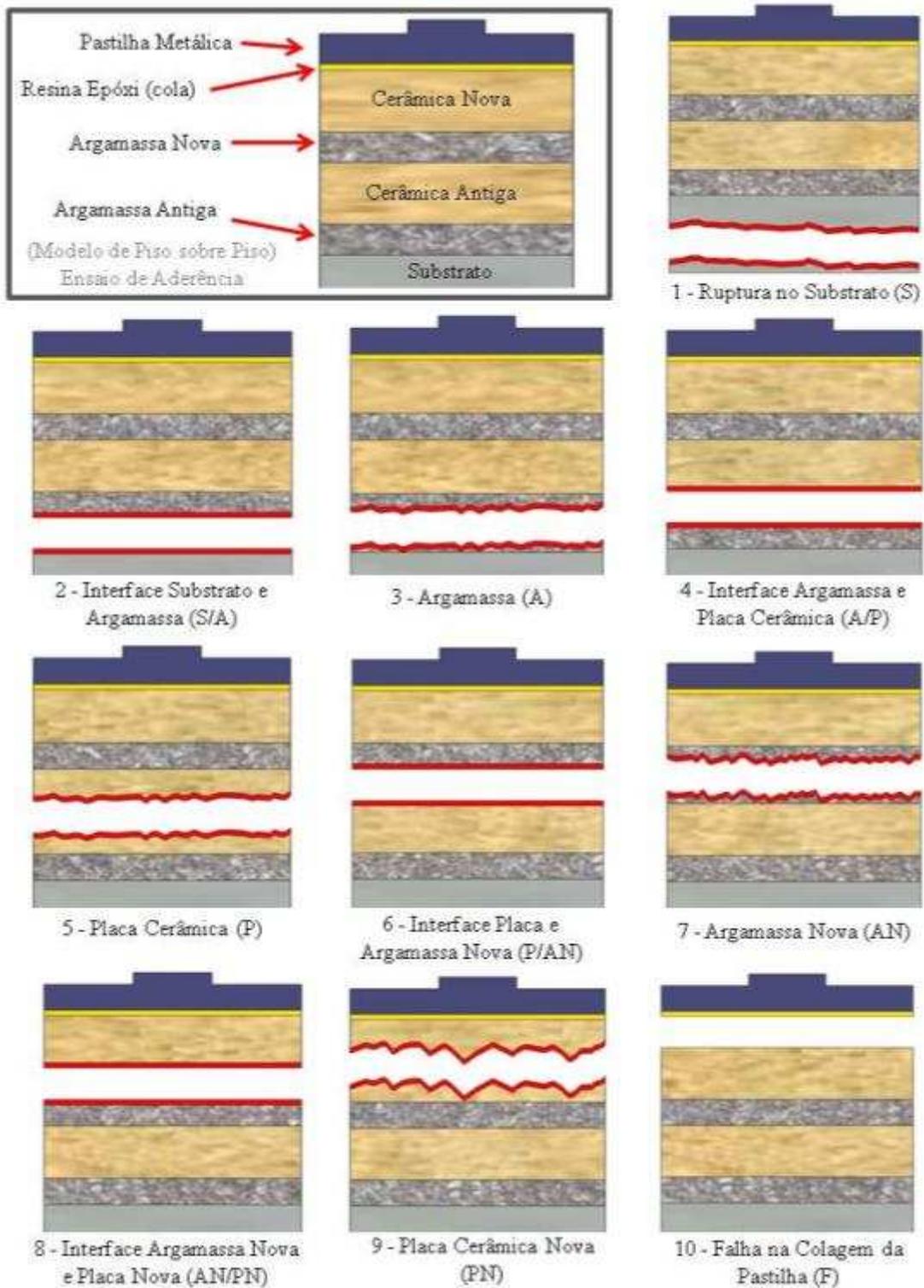
WAGNER H. B. Polymer modification of Portland cement systems. Chemical Technology. 1973.

WETZEL, A; ZURBRIGGEN, R; HERWEGH, M. Spatially resolved evolution of adhesion properties of large porcelain tiles. *Cement and Concrete Composites*. Volume 32. pp 327-338. 2010.

WETZEL, A; HERWEGH, M; ZURBRIGGEN, R; WINNEFELD, F. Influence of shrinkage and water transport mechanisms on microstructure and crack formation of tile adhesive mortars. *Cement and Concrete Composites*. Volume 42. pp 39-50. 2012.

## **ANEXOS**

**Anexo I – Tipos de ruptura possíveis no sistema de revestimento cerâmico do tipo piso sobre piso submetido ao ensaio de resistência de aderência**





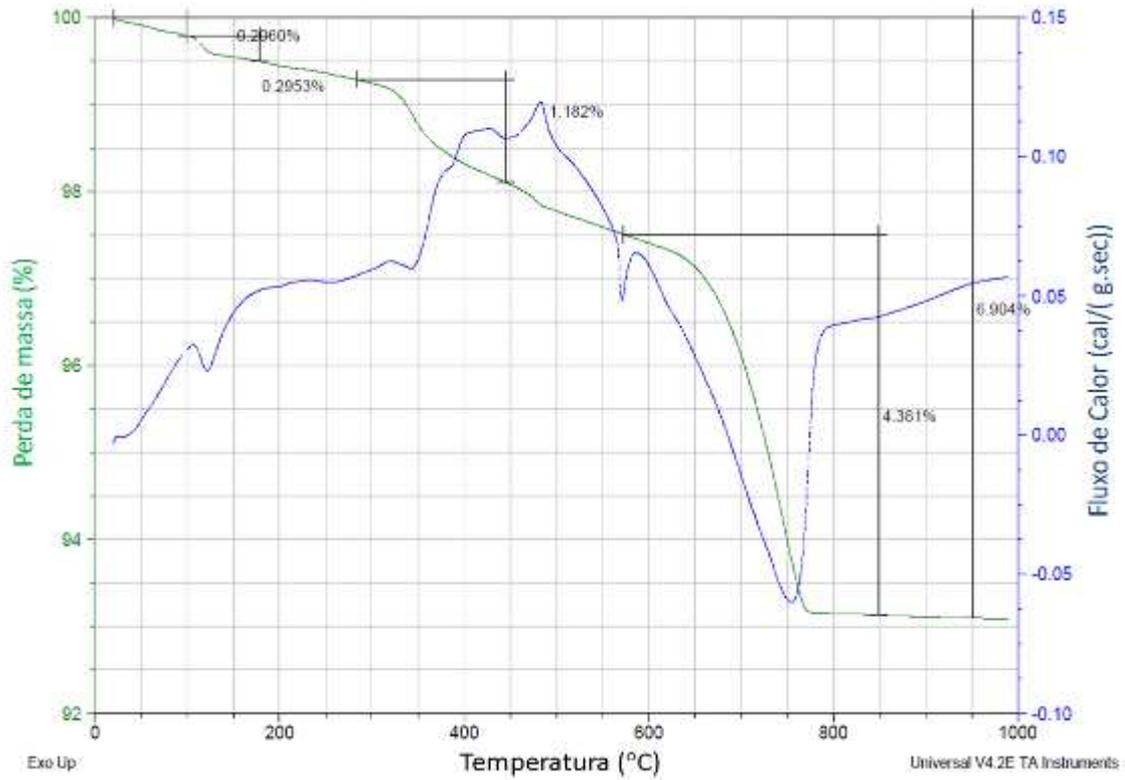


Figura 94: Argamassa A: Curvas TG e DTG.

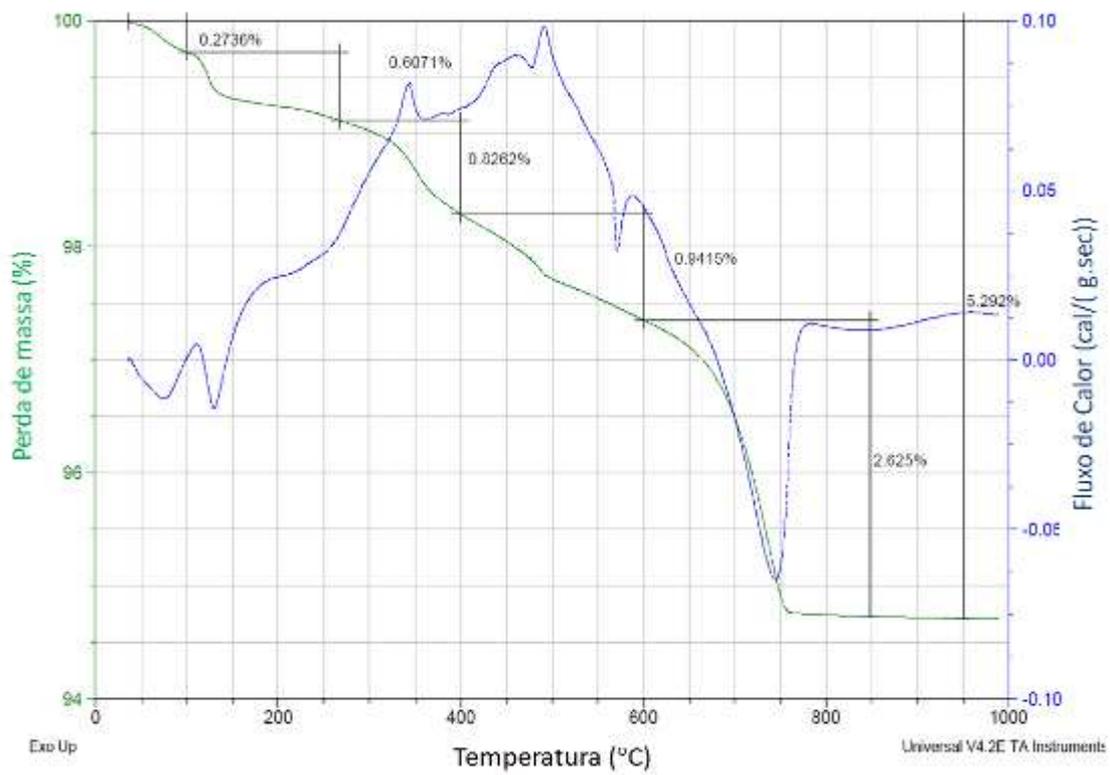


Figura 95: Argamassa B: Curvas TG e DTG.

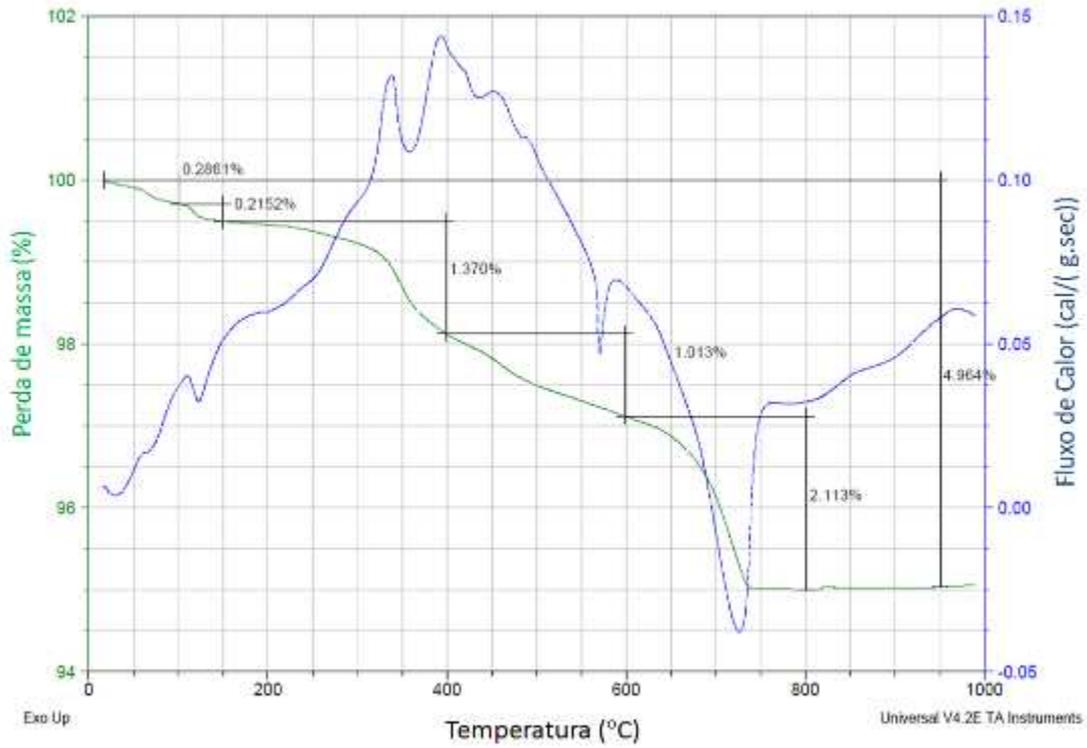


Figura 96: Argamassa C: Curvas TG e DTG.

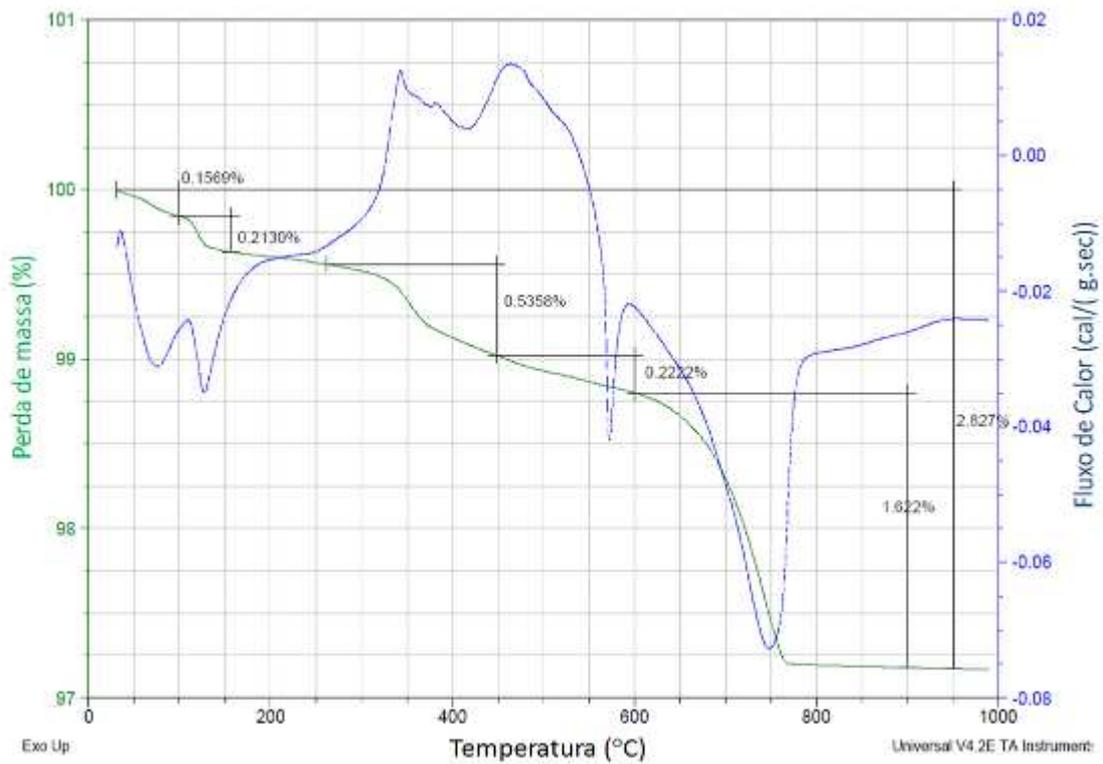


Figura 97: Argamassa D: Curvas TG e DTG.

**Anexo III - Imagens das areias das argamassas colantes obtidas em microscópio óptico**



Argamassa A



Argamassa B



Argamassa C



Argamassa D



Argamassa A



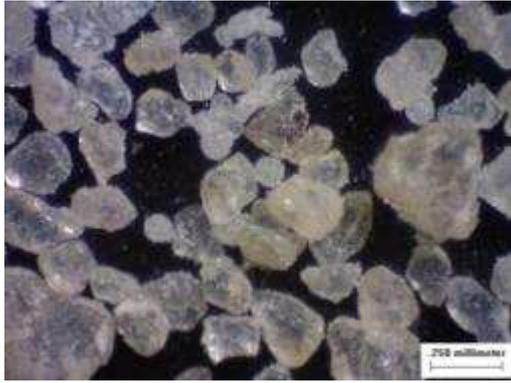
Argamassa B



Argamassa C



Argamassa D



Argamassa A



Argamassa B



Argamassa C



Argamassa D



## RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
B	5	5,99	1,198	0,00402
D	8	7,123578	0,890447	0,00659
B	7	9,14991	1,30713	0,013547
C	9	9,691836	1,076871	0,006607

## ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,704348	3	0,234783	29,89277	1,97E-08	2,991241
Dentro dos grupos	0,196354	25	0,007854			
Total	0,900702	28				

**Anexo V – Planilha de ensaio de resistência de aderência -  
laboratório**

Resultados – Cura Normal				
Argamassa A	Data da moldagem:		16/10/2010	
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 70	1,81	A/ P – 50	1,70
	A/ P – 70	1,97	A/ P – 80	1,84
	A/ P – 50	1,90	A/ P – 80	1,74
	A/ P – 70	2,02	A/ P – 70	1,71
	A/ P – 60	1,77	A/ P – 80	1,84
	A/ P – 60	2,03	A/ P – 80	1,46
	A/ P – 60	2,08	A/ P – 80	1,76
	A/ P – 40	1,65	A/ P – 70	1,56
	A/ P – 50	1,63	A/ P – 90	1,67
	A/ P – 40	1,55	A/ P – 80	1,52
Média inicial:		1,841	Média inicial:	1,678
Desvio máx.:		2,209	Desvio máx.:	2,014
Desvio mín.:		1,473	Desvio mín.:	1,343
Média Final:		1,8	Média Final:	1,7

Resultados – Cura Estufa				
Argamassa A	Data da moldagem:		16/10/2010	
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 90	0,64	A/ P – 80	1,26
	A/ P – 100	1,26	A/ P – 90	1,10
	A/ P – 90	1,29	A/ P – 80	0,93
	A/ P – 90	1,32	A/ P – 90	1,03
	A/ P – 90	1,30	A/ P – 90	1,49
	A/ P – 90	1,15	A/ P – 80	1,27
	A/ P – 90	1,19	A/ P – 80	1,38
	A/ P – 80	0,95	A/ P – 90	0,93
	A/ P – 80	0,94	A/ P – 90	1,24
	A/ P – 90	1,35	A/ P – 90	1,39
Média inicial:		1,140	Média inicial:	1,202
Desvio máx.:		1,368	Desvio máx.:	1,443
Desvio mín.:		0,912	Desvio mín.:	0,962
Média Final:		1,2	Média Final:	1,2

Resultados – Cura Submersa				
Argamassa A	Data da moldagem:		16/10/2010	
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 100	0,52	A/ P – 100	0,56
	A/ P – 100	0,60	A/ P – 100	0,35
	A/ P – 100	0,49	A/ P – 100	0,54
	A/ P – 100	0,53	A/ P – 100	0,54
	A/ P – 100	0,51	A/ P – 100	0,42
	A/ P – 100	0,50	A/ P – 100	0,49
	A/ P – 100	0,68	A/ P – 100	0,48
	A/ P – 100	0,45	A/ P – 100	0,52
	A/ P – 100	0,53	A/ P – 100	0,60
	A/ P – 100	0,61	A/ P – 100	0,42
Média inicial:		0,543	Média inicial:	0,492
Desvio máx.:		0,652	Desvio máx.:	0,590
Desvio mín.:		0,435	Desvio mín.:	0,393
Média Final:		0,5	Média Final:	0,5

Resultados – Cura em Ambiente Externo				
Argamassa A	Data da moldagem:		16/10/2010	
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 90	1,31	A/ P – 90	0,97
	A/ P – 90	1,13	A/ P – 90	1,39
	A/ P – 90	1,04	A/ P – 90	1,12
	A/ P – 90	1,01	A/ P – 80	0,93
	A/ P – 90	1,10	A/ P – 90	1,15
	A/ P – 90	1,11	A/ P – 80	0,92
	A/ P – 90	0,88	A/ P – 80	1,07
	A/ P – 90	1,14	A/ P – 90	1,00
	A/ P – 90	1,23	A/ P – 90	1,03
	A/ P – 90	1,02	A/ P – 90	0,87
Média inicial:		1,096	Média inicial:	1,045
Desvio máx.:		1,315	Desvio máx.:	1,253
Desvio mín.:		0,877	Desvio mín.:	0,836
Média Final:		1,1	Média Final:	1,0

Resultados – Cura Normal				
Argamassa B	Data da moldagem:		04/10/2010	
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 30	1,36	A/ P – 70	1,26
	A/ P – 50	1,37	A/ P – 60	1,46
	A/ P – 40	1,41	A/ P – 60	1,55
	A/ P – 50	1,34	A/ P – 50	1,67
	A/ P – 70	1,19	F	0,70
	A/ P – 60	1,56	A/ P – 70	1,44
	A/ P – 40	1,06	A/ P – 50	0,94
	A/ P – 30	1,46	A/ P – 50	1,28
	A/ P – 40	1,14	A/ P – 50	1,52
	A/ P – 30	1,25	A/ P – 60	1,00
Média inicial:		1,315	Média inicial:	1,282
Desvio máx.:		1,578	Desvio máx.:	1,538
Desvio mín.:		1,052	Desvio mín.:	1,025
Média Final:		1,3	Média Final:	1,4

Resultados – Cura Estufa				
Argamassa B	Data da moldagem:		04/10/2010	
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 90	0,96	A/ P – 80	1,35
	A/ P – 90	1,23	A/ P – 60	1,08
	A/ P – 80	1,19	A/ P – 60	1,05
	A/ P – 90	1,17	A/ P – 80	1,48
	A/ P – 90	1,23	A/ P – 80	0,98
	A/ P – 80	1,47	A/ P – 80	1,21
	A/ P – 90	0,93	A/ P – 70	0,98
	A/ P – 80	1,19	A/ P – 90	1,34
	A/ P – 80	1,17	A/ P – 90	1,26
	A/ P – 70	1,45	A/ P – 90	1,39
Média inicial:		1,199	Média inicial:	1,213
Desvio máx.:		1,439	Desvio máx.:	1,456
Desvio mín.:		0,959	Desvio mín.:	0,971
Média Final:		1,2	Média Final:	1,2

Resultados – Cura Submersa				
Argamassa B	Data da moldagem:		04/10/2010	
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 100	0,16	A/ P – 100	0,43
	A/ P – 100	0,23	A/ P – 100	0,46
	A/ P – 100	0,25	A/ P – 100	0,42
	A/ P – 100	0,31	A/ P – 100	0,55
	A/ P – 100	0,25	A/ P – 100	0,42
	A/ P – 100	0,22	A/ P – 100	0,38
	A/ P – 100	0,24	A/ P – 100	0,60
	A/ P – 100	0,23	A/ P – 100	0,57
	A/ P – 100	0,16	A/ P – 100	0,57
	A/ P – 100	0,24	A/ P – 100	0,57
Média inicial:		0,228	Média inicial:	0,496
Desvio máx.:		0,273	Desvio máx.:	0,596
Desvio mín.:		0,182	Desvio mín.:	0,397
Média Final:		0,2	Média Final:	0,5

Resultados – Cura em Ambiente Externo				
Argamassa B	Data da moldagem:		04/10/2010	
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 90	1,10	A/ P – 80	1,17
	A/ P – 90	1,18	A/ P – 60	1,23
	A/ P – 80	0,86	A/ P – 60	1,23
	A/ P – 90	1,23	A/ P – 80	1,22
	A/ P – 90	0,97	A/ P – 80	0,78
	A/ P – 80	1,05	A/ P – 80	1,07
	A/ P – 90	1,05	A/ P – 70	1,11
	A/ P – 80	1,06	A/ P – 90	1,08
	A/ P – 80	1,07	A/ P – 90	1,01
	A/ P – 70	1,07	A/ P – 90	0,92
Média inicial:		1,063	Média inicial:	1,080
Desvio máx.:		1,276	Desvio máx.:	1,296
Desvio mín.:		0,851	Desvio mín.:	0,864
Média Final:		1,1	Média Final:	1,1

Resultados – Cura Normal				
Argamassa C	Data da moldagem:		18/10/2010	
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 50	1,28	A/ P – 40	1,15
	A/ P – 50	1,30	A/ P – 50	1,40
	A/ P – 50	1,32	A/ P – 50	1,28
	A/ P – 50	1,17	A/ P – 50	1,37
	A/ P – 50	1,01	A/ P – 50	1,45
	A/ P – 50	1,31	A/ P – 60	1,15
	A/ P – 50	1,17	A/ P – 50	1,53
	A/ P – 40	1,20	A/ P – 50	1,28
	A/ P – 50	1,22	A/ P – 50	1,20
A/ P – 60	1,31	A/ P – 50	1,23	
Média inicial:		1,229	Média inicial:	1,303
Desvio máx.:		1,475	Desvio máx.:	1,564
Desvio mín.:		0,983	Desvio mín.:	1,042
Média Final:		1,2	Média Final:	1,3

Resultados – Cura Estufa				
Argamassa C	Data da moldagem:		18/10/2010	
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 50	1,01	A/ P – 50	0,91
	A/ P – 50	1,19	A/ P – 70	1,08
	A/ P – 50	1,11	A/ P – 70	1,03
	A/ P – 60	1,09	A/ P – 60	1,11
	A/ P – 50	1,22	A/ P – 70	1,27
	A/ P – 50	0,86	A/ P – 80	1,18
	A/ P – 50	1,22	A/ P – 80	0,95
	A/ P – 50	1,08	A/ P – 80	1,15
	A/ P – 50	1,10	A/ P – 80	1,16
A/ P – 60	1,29	A/ P – 80	1,12	
Média inicial:		1,118	Média inicial:	1,095
Desvio máx.:		1,341	Desvio máx.:	1,314
Desvio mín.:		0,894	Desvio mín.:	0,876
Média Final:		1,1	Média Final:	1,1

Resultados – Cura Submersa				
Argamassa C	Data da moldagem:		18/10/2010	
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 90	0,61	A/ P – 70	0,82
	A/ P – 80	0,71	A/ P – 60	0,79
	A/ P – 80	0,73	A/ P – 50	0,70
	A/ P – 90	0,68	A/ P – 60	0,87
	A/ P – 70	0,83	A/ P – 70	0,84
	A/ P – 60	0,71	A/ P – 30	0,67
	A/ P – 40	0,71	A/ P – 60	0,75
	A/ P – 40	0,73	A/ P – 10	0,73
	A/ P – 80	0,71	A/ P – 90	0,86
	A/ P – 70	0,80	A/ P – 70	0,77
Média inicial:		0,723	Média inicial:	0,780
Desvio máx.:		0,868	Desvio máx.:	0,936
Desvio mín.:		0,579	Desvio mín.:	0,624
Média Final:		0,7	Média Final:	0,8

Resultados – Cura em Ambiente Externo				
Argamassa C	Data da moldagem:		18/10/2010	
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 10	0,98	A/ P – 20	1,34
	A/ P – 50	1,23	A/ P – 50	1,24
	A/ P – 20	1,20	A/ P – 10	1,45
	A/ P – 20	1,27	A/ P – 20	1,40
	A/ P – 70	1,28	A/ P – 90	1,23
	A/ P	1,32	A/ P – 10	0,85
	A/ P	1,24	A/ P – 80	1,03
	A/ P – 90	1,41	A/ P – 80	1,31
	A/ P – 80	1,21	A/ P – 80	1,23
	A/ P – 80	1,01	A/ P – 70	1,01
Média inicial:		1,216	Média inicial:	1,209
Desvio máx.:		1,459	Desvio máx.:	1,450
Desvio mín.:		0,973	Desvio mín.:	0,967
Média Final:		1,2	Média Final:	1,0

Resultados – Cura Normal				
Argamassa D	Data da moldagem:		06/10/2010	
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 80	1,70	A/ P – 90	1,34
	A/ P – 80	1,48	A/ P – 80	1,42
	A/ P – 90	1,78	A/ P – 90	1,26
	A/ P – 80	1,54	A/ P – 90	1,14
	A/ P – 80	1,47	A/ P – 80	1,28
	A/ P – 90	1,41	A/ P – 80	1,54
	A/ P – 100	1,68	A/ P – 90	1,67
	A/ P – 90	1,37	A/ P – 100	1,48
	A/ P – 90	1,56	A/ P – 100	1,47
	A/ P – 80	1,25	A/ P – 90	1,50
Média inicial:		1,524	Média inicial:	1,410
Desvio máx.:		1,829	Desvio máx.:	1,692
Desvio mín.:		1,220	Desvio mín.:	1,128
Média Final:		1,5	Média Final:	1,4

Resultados – Cura Estufa				
Argamassa D	Data da moldagem:		06/10/2010	
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 90	1,21	A/ P – 80	0,90
	A/ P – 80	1,05	A/ P – 90	0,93
	A/ P – 80	1,21	A/ P – 90	1,18
	A/ P – 70	1,14	A/ P – 90	1,12
	A/ P – 60	0,82	A/ P – 100	1,08
	A/ P – 100	1,19	A/ P – 90	1,13
	A/ P – 90	1,06	A/ P – 90	1,01
	A/ P – 100	1,46	A/ P – 90	1,16
	A/ P – 80	1,36	A/ P – 90	1,23
	A/ P – 70	1,02	A/ P – 90	1,10
Média inicial:		1,152	Média inicial:	1,085
Desvio máx.:		1,383	Desvio máx.:	1,303
Desvio mín.:		0,922	Desvio mín.:	0,868
Média Final:		1,2	Média Final:	1,1

Resultados – Cura Submersa				
Argamassa D	Data da moldagem:		06/10/2010	
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 100	0,69	A/ P – 100	0,61
	A/ P – 100	0,77	A/ P – 100	0,91
	A/ P – 100	0,82	A/ P – 90	0,86
	A/ P – 100	0,71	A/ P – 90	0,98
	A/ P – 100	0,69	A/ P – 80	0,74
	A/ P – 100	0,76	A/ P – 90	0,92
	A/ P – 100	0,91	A/ P – 90	0,79
	A/ P – 90	0,81	A/ P – 100	1,01
	A/ P – 100	0,71	A/ P – 100	1,20
	A/ P – 100	0,73	A/ P – 90	0,74
Média inicial:		0,760	Média inicial:	0,877
Desvio máx.:		0,912	Desvio máx.:	1,053
Desvio mín.:		0,608	Desvio mín.:	0,702
Média Final:		0,8	Média Final:	0,9

Resultados – Cura em Ambiente Externo				
Argamassa D	Data da moldagem:		06/10/2010	
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 90	1,32	A/ P – 90	1,41
	A/ P – 90	1,60	A/ P – 90	1,22
	A/ P – 90	1,59	A/ P – 80	1,25
	A/ P – 90	1,35	A/ P – 100	1,60
	A/ P – 100	1,16	A/ P – 100	1,34
	A/ P – 90	1,30	A/ P – 90	1,37
	A/ P – 70	0,62	A/ P – 100	1,77
	A/ P – 90	1,08	A/ P – 90	1,43
	A/ P – 90	1,33	A/ P – 90	1,78
	A/ P – 70	0,87	A/ P – 90	1,36
Média inicial:		1,222	Média inicial:	1,453
Desvio máx.:		1,466	Desvio máx.:	1,744
Desvio mín.:		0,978	Desvio mín.:	1,162
Média Final:		1,3	Média Final:	1,4

**Anexo VI - Análise de variância (ANOVA) - Resistência de aderência em laboratório**

RESUMO	A	B	C	D	Total	
<b>Cura em Laboratório</b>						
Contagem	20	20	20	20	80	
Soma	25,96532	29,34254	35,19377	25,3213	115,8229	
Média	1,298266	1,467127	1,759689	1,266065	1,447787	
Variância	0,057511	0,027892	0,031469	0,013679	0,070142	
<b>Cura em Estufa</b>						
Contagem	20	20	20	20	80	
Soma	24,12749	22,37605	23,42063	22,12472	92,04888	
Média	1,206374	1,118802	1,171031	1,106236	1,150611	
Variância	0,029436	0,02182	0,043848	0,012657	0,027565	
<b>Cura Submersa</b>						
Contagem	20	20	20	20	80	
Soma	7,241388	16,37559	10,35157	15,03256	49,00111	
Média	0,362069	0,81878	0,517579	0,751628	0,612514	
Variância	0,023011	0,019245	0,005752	0,004877	0,046551	
<b>Cura em Ambiente Externo</b>						
Contagem	20	20	20	20	80	
Soma	21,43357	26,75072	21,40215	24,2453	93,83174	
Média	1,071678	1,337536	1,070108	1,212265	1,172897	
Variância	0,015015	0,076568	0,018265	0,025053	0,044968	
<b>Total</b>						
Contagem	80	80	80	80		
Soma	78,76777	94,8449	90,36812	86,72387		
Média	0,984597	1,185561	1,129602	1,084048		
Variância	0,167449	0,096104	0,220558	0,054182		
<b>ANOVA</b>						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	29,31266	3	9,770886	366,897	1,1E-100	2,634306
Colunas	1,736299	3	0,578766	21,73269	8,87E-13	2,634306
Interações	5,116577	9	0,568509	21,34751	6,82E-28	1,910737
Dentro	8,095868	304	0,026631			
Total	44,2614	319				

**Anexo VII - Planilha de ensaios de resistência de aderência - área externa**

Resultados – Cura Normal				
Argamassa A	Data da moldagem:		22/12/2010	
	Ruptura	1 mês	Ruptura	3 mês
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 100	0,73	A/ P – 80	0,84
	A/ P – 100	0,68	A/ P – 100	0,97
	A/ P – 100	0,82	F	
	A/ P – 100	0,40	A/ P – 60	0,89
	A/ P – 100	1,08	A/ P – 100	1,25
	A/ P – 100	0,57	A/ P – 100	1,11
	A/ P – 100	0,62	F	
	A/ P – 100	0,62	F	
	A/ P – 100	0,54	A/ P – 100	0,93
	A/ P – 100	0,62	F	
	Média inicial:	0,668	Média inicial:	0,999
Desvio máx.:	0,802	Desvio máx.:	1,199	
Desvio mín.:	0,535	Desvio mín.:	0,799	
Média Final:	0,6	Média Final:	0,9	

Resultados – Cura Normal				
Argamassa A	Data da moldagem:		22/12/2010	
	Ruptura	6 mês	Ruptura	12 mês
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 80	1,43	A/ P – 50	1,52
	A/ P – 100	1,48	A/ P – 90	1,41
	A/ P – 100	1,35	A/ P – 50	1,61
	F	0,74	A/ P – 50	1,19
	A/ P – 90	1,22	A/ P – 50	1,65
	A/ P – 100	2,06	A/ P – 100	0,70
	A/ P – 100	0,92	A/ P – 80	1,63
	F	0,82	A/ P – 80	1,34
	A/ P – 100	1,57	A/ P – 50	1,23
	A/ P – 100	1,47	A/ P – 100	1,26
	Média inicial:	1,305	Média inicial:	1,355
Desvio máx.:	1,566	Desvio máx.:	1,626	
Desvio mín.:	1,044	Desvio mín.:	1,084	
Média Final:	1,4	Média Final:	1,4	

Resultados – Cura Normal					
Argamassa B	Data da moldagem:		22/12/2010		
	Ruptura	1 mês	Ruptura	3 mês	
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	
	A/ P – 90	0,53	A/ P – 100	0,64	
	A/ P – 100	0,53	A/ P – 90	0,58	
	A/ P – 100	0,79	A/ P – 100	1,09	
	A/ P – 100	0,88	A/ P – 60	0,32	
	A/ P – 90	0,35	A/ P – 100	0,93	
	A/ P – 90	0,68	A/ P – 20	0,82	
	A/ P – 80	0,48	A/ P – 100	0,78	
	A/ P – 90	0,75	A/ P – 50	0,47	
	A/ P – 90	0,52	A/ P – 100	0,81	
	A/ P – 90	0,63	A/ P – 100	0,79	
Média inicial:		0,614	Média inicial:		0,722
Desvio máx.:		0,737	Desvio máx.:		0,866
Desvio mín.:		0,491	Desvio mín.:		0,577
Média Final:		0,6	Média Final:		0,7

Resultados – Cura Normal					
Argamassa B	Data da moldagem:		22/12/2010		
	Ruptura	6 mês	Ruptura	12 mês	
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	
	A/ P – 100	0,95	A/ P – 90	1,43	
	A/ P – 100	1,13	A/ P – 90	1,30	
	A/ P – 100	1,50	A/ P – 80	1,24	
	A/ P – 100	1,68	A/ P – 50	1,68	
	A/ P – 100	0,83	A/ P – 80	1,33	
	A/ P – 100	1,96	A/ P – 40	1,78	
	A/ P – 100	1,55	A/ P – 100	2,03	
	A/ P – 100	1,49	A/ P – 80	1,81	
	A/ P – 100	0,97	A/ P – 90	1,79	
	A/ P – 100	1,07	A/ P – 100	1,94	
Média inicial:		1,313	Média inicial:		1,632
Desvio máx.:		1,576	Desvio máx.:		1,958
Desvio mín.:		1,051	Desvio mín.:		1,306
Média Final:		1,3	Média Final:		1,7

Resultados – Cura Normal				
Argamassa C	Data da moldagem:		22/12/2010	
	Ruptura	3 mês	Ruptura	3 mês
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 100	0,87	A/ P – 100	0,87
	A/ P – 100		F	
	A/ P – 70	0,78	A/ P – 100	0,78
	A/ P – 70	0,83	A/ P – 100	0,83
	A/ P – 80	0,89	A/ P – 100	0,89
	A/ P – 90	1,34	A/ P – 100	1,34
	A/ P – 100	1,14	A/ P – 100	1,14
	A/ P – 90	0,44	A/ P – 100	0,44
	A/ P – 60	1,02	A/ P – 100	1,02
	A/ P – 40		F	
	Média inicial:	0,905	Média inicial:	0,914
Desvio máx.:	1,086	Desvio máx.:	1,097	
Desvio mín.:	0,724	Desvio mín.:	0,731	
Média Final:	0,9	Média Final:	0,9	

Resultados – Cura Normal				
Argamassa C	Data da moldagem:		22/12/2010	
	Ruptura	6 mês	Ruptura	12 mês
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 100	1,47	A/ P – 80	1,60
	A/ P – 100	1,22	A/ P – 80	1,81
	A/ P – 100	1,67	A/ P – 80	0,77
	A/ P – 100	1,43	A/ P – 100	1,45
	A/ P – 100	1,23	A/ P – 80	1,55
	A/ P – 100	1,09	A/ P – 100	1,47
	A/ P – 100	1,42	A/ P – 100	1,79
	A/ P – 100	1,04	A/ P – 90	1,52
	A/ P – 100	1,62	A/ P – 50	1,33
	A/ P – 100	0,94	A/ P – 100	1,26
	Média inicial:	1,313	Média inicial:	1,455
Desvio máx.:	1,576	Desvio máx.:	1,745	
Desvio mín.:	1,051	Desvio mín.:	1,164	
Média Final:	1,3	Média Final:	1,5	

Resultados – Cura Normal				
Argamassa D	Data da moldagem:		22/12/2010	
	Ruptura	1 mês	Ruptura	3 mês
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 90	1,23	A/ P – 90	0,86
	A/ P – 80	0,99	A/ P – 90	0,91
	P	1,04	A/ P – 100	1,07
	A/ P – 80	1,23	A/ P – 100	1,50
	A/ P – 70	1,30	A/ P – 100	0,93
	A/ P – 40	0,93	F	
	A/ P – 80	1,10	A/ P – 100	0,86
	A/ P – 90	0,91	A/ P – 100	0,58
	A/ P – 80	0,90	A/ P – 100	0,58
	A/ P – 90	0,95	A/ P – 100	0,98
	Média inicial:	1,056	Média inicial:	0,920
Desvio máx.:	1,268	Desvio máx.:	1,104	
Desvio mín.:	0,845	Desvio mín.:	0,736	
Média Final:	1,0	Média Final:	0,9	

Resultados – Cura Normal				
Argamassa D	Data da moldagem:		22/12/2010	
	Ruptura	6 mês	Ruptura	12 mês
	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)	Tipo de Ruptura	Resultado (MPa)
	A/ P – 100	1,01	A/ P – 50	0,83
	A/ P – 80	1,23	A/ P – 20	1,08
	A/ P – 70	1,50	A/ P – 50	0,89
	A/ P – 100	1,02	A/ P – 50	0,65
	A/ P – 90	1,09	A/ P – 100	0,54
	A/ P – 50	1,14	A/ P – 80	1,32
	A/ P – 90	0,79	A/ P – 20	1,00
	A/ P – 70	1,49	A/ P – 50	1,00
	A/ P – 90	1,50	A/ P – 10	1,10
	A/ P – 90	1,21	A/ P – 90	1,18
	Média inicial:	1,199	Média inicial:	0,959
Desvio máx.:	1,438	Desvio máx.:	1,151	
Desvio mín.:	0,959	Desvio mín.:	0,767	
Média Final:	1,1	Média Final:	1,0	

**Anexo VIII - Análise de variância (ANOVA) - Resistência de aderência em assentamento em ambiente externo**

RESUMO	A	B	C	D	Total
<b>1 Mês</b>					
Contagem	10	10	10	10	40
Soma	6,141828	10,56363	6,683754	9,047808	32,43702
Média	0,6141828	1,056363	0,6683754	0,9047808	0,8109255
Variância	0,026439697	0,021524748	0,033768598	0,04731675	0,062620877
<b>3 Mês</b>					
Contagem	10	10	10	10	40
Soma	7,217826	9,208116	10,432602	9,202074	36,060618
Média	0,7217826	0,9208116	1,0432602	0,9202074	0,90151545
Variância	0,050259139	0,066609241	0,033400884	0,056827007	0,061411243
<b>6 Mês</b>					
Contagem	10	10	10	10	40
Soma	13,131888	11,985204	13,053348	13,131888	51,302328
Média	1,3131888	1,1985204	1,3053348	1,3131888	1,2825582
Variância	0,060805272	0,057507164	0,157747173	0,137857086	0,097944261
<b>12 Mês</b>					
Contagem	10	10	10	10	40
Soma	14,545608	9,589734	13,55151	16,320612	54,007464
Média	1,4545608	0,9589734	1,355151	1,6320612	1,3501866
Variância	0,089016023	0,05618093	0,082301711	0,08120255	0,133654043
<b>Total</b>					
Contagem	40	40	40	40	
Soma	41,03715	41,346684	43,721214	47,702382	
Média	1,02592875	1,0336671	1,09303035	1,19255955	
Variância	0,187731153	0,058371052	0,146945087	0,168099608	

## ANOVA

Fonte da variação	SQ	Gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	8,725194554	3	2,908398185	43,95160028	3,15787E-20	2,667443
Colunas	0,710051981	3	0,236683994	3,576759308	0,015562227	2,667443
Interações	3,630658781	9	0,403406531	6,096263815	3,06153E-07	1,94545
Dentro	9,528875761	144	0,066172748			
Total	22,59478108	159				