

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**

**Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais**

**ARGAMASSA DE BASE POLIMÉRICA PARA ADESÃO DE  
BLOCOS EM ALVENARIA: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS, TÉRMICAS E REOLÓGICAS**

**Adriana Nicolini**

**Tese de Doutorado**

Porto Alegre, 28 de setembro de 2019.

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**

**Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais**

**ARGAMASSA DE BASE POLIMÉRICA PARA ADESÃO DE  
BLOCOS EM ALVENARIA: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS, TÉRMICAS E REOLÓGICAS**

**Adriana Nicolini**

Tese realizada sob a orientação da Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marly Maldaner Jacobi e co-orientação do Prof. Dr. Saulo Roca Bragança, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em preenchimento parcial dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciência dos Materiais.

Porto Alegre, 28 de setembro de 2019.

## CIP - Catalogação na Publicação

Nicolini, Adriana

Argamassa de base polimérica para adesão de blocos em alvenaria: avaliação das propriedades mecânicas, térmicas e reológicas / Adriana Nicolini. -- 2019. 104 f.

Orientadora: Marly Maldaner Jacobi.

Coorientador: Saulo Roca Bragança.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Química, Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Argamassa polimérica. 2. látex de éster acrílico e estireno. 3. propriedades mecânicas. 4. Dropping ball. 5. Squeeze flow. I. Jacobi, Marly Maldaner, orient. II. Bragança, Saulo Roca, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

## **BANCA EXAMINADORA**

Profa. Dra. Tatiana Louise ávila de Campos Rocha (Unisinos)

Profa. Dra. Margarete regina Freitas Gonçalves (UFPel)

Profa. Dra. Ruth Heinrich (PGCIMAT – UFRGS)

Prof. Dr. César Liberato Petzhold (PGCIMAT - UFRGS)

## AGRADECIMENTOS

À professora Dra. Marly Maldaner Jacobi pela dedicação em toda a minha trajetória acadêmica, por cerca de 15 anos. Sou fortemente agradecida por todo o conhecimento adquirido. É a profissional da área de química que mais tenho admiração, é uma cientista conhecedora dos polímeros e principalmente das borrachas. E agora das argamassas... Obrigada por ter aceitado o desafio e ter me ajudado a trilhar o caminho do doutorado até o fim!

Ao Prof. Dr. Saulo Roca Bragança agradeço pela orientação durante o trabalho e pelas contribuições.

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Ruth Hinrichs, ao Prof. Dr. Cesar Liberato Petzhold e à Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Tatiana Louise Ávila de Campos Rocha pela participação na banca do exame de qualificação e pelas contribuições.

À empresa FCC, principalmente ao Sr. Valdemar Masseli Junior, Julio Schmitt e Marcelo Reichert por ter permitido a realização deste trabalho. Aos colaboradores (alguns ex-colaboradores) da FCC que de alguma forma contribuíram para este trabalho, em especial à Luana Dezingrini Lopes, Julia Maia, Janete Verdum, Michéle Marques Laureano e Thiago Kunrath.

Aos alunos do Prof. Saulo e da Prof.<sup>a</sup>. Marly que colaboraram na realização de algumas análises e minimizaram a minha distância da Universidade, Camili Rapacki, Lucas Ribas, Guilherme Finkler e Adalberto Viana.

À Unisinos, principalmente ao ITT Performance e à Prof.<sup>a</sup>. Tatiana Rocha, pela realização de algumas análises e pelo conhecimento adquirido no universo da construção civil.

À Fernanda Fontanari Nunes, Silvia Rosane e ao Vinícius Maciel que contribuíram ativamente em diversos momentos nessa trajetória, muito obrigada!

À minha família e aos meus sogros pelo apoio e ao meu marido, Fernando Silveira e aos meus filhos, Maria Luísa e Francisco, pela ausência em diversos momentos.

À todos que colaboraram direta ou indiretamente na realização deste trabalho, o meu agradecimento.

## **LISTA DE TRABALHOS GERADOS:**

- (1) Nicolini, A., Bragança, S.R., Jacobi, M.M., Vitor, P.A.M.; Argamassa de ligação polimérica: caracterização e comparação com argamassa convencional para uso em alvenaria de vedação. *Pôster no 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECIMAT)*, Natal, Brasil, **2016**.
- (2) Nicolini, A., Lopes, L. D., Bragança, S.R., Jacobi, M.M., Vitor, P.A.M.; Avaliação e comparação de argamassas comerciais de ligação polimérica. *Pôster no 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECIMAT)*, Natal, Brasil, **2016**.
- (3) Nicolini, A., Jacobi, M.M., Bragança, S.; Argamassa de ligação polimérica: caracterização e comparação com argamassa convencional para uso em alvenaria de vedação. *Resumo no XII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas (SBTA)*, São Paulo, Brasil, **2017**.

# SUMÁRIO

RESUMO .....	1
ABSTRACT .....	2
1 INTRODUÇÃO .....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 Argamassas .....	5
2.2 Mecanismos de formação de redes ligantes em argamassas com polímero .....	12
2.3 Principais constituintes das argamassas poliméricas .....	15
2.3.1 Resinas acrílicas .....	15
2.3.2 Agregados e cargas .....	16
2.3.3 Espessantes ou aditivos reológicos .....	20
2.3.4 Coalescentes .....	21
2.3.5 Outros aditivos .....	22
2.4 Propriedades das argamassas .....	22
3 PARTE EXPERIMENTAL .....	34
3.1 Matérias-primas .....	34
3.1.1 Viscosidade Brookfield .....	34
3.1.2 Teor de sólidos .....	34
3.1.3 Temperatura mínima de formação de filme (TMFF) .....	35
3.1.4 Espectroscopia de absorção no infravermelho .....	35
3.1.5 Calorimetria exploratória diferencial (DSC) .....	36
3.1.6 Ressonância magnética nuclear (RMN) .....	36
3.1.7 Inchamento em água .....	36
3.1.8 Granulometria .....	36
3.1.9 Fluorescência de raios X .....	37
3.1.10 Análise termogravimétrica (TGA) .....	37

3.2	Preparação das argamassas poliméricas .....	37
3.3	Caracterização das argamassas .....	39
3.3.1	Avaliação reológica por <i>dropping ball</i> .....	39
3.3.2	Avaliação reológica por <i>squeeze-flow</i> .....	39
3.3.3	Resistência de aderência à tração .....	39
3.3.4	Resistência à temperatura de envelhecimento.....	41
3.3.5	Resistência à compressão .....	41
3.3.6	Adesividade .....	41
3.3.7	Porosidade .....	41
3.3.8	Resistência de aderência em bloco.....	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	43
4.1	Caracterização das matérias-primas .....	43
4.2	Caracterização das argamassas no estado fresco .....	50
4.3	Influência do teor de látex sobre as propriedades das argamassas no estado endurecido 57	
4.4	Resistência de aderência à tração após envelhecimento por temperatura .....	59
4.5	Influência da umidade e temperatura de secagem .....	60
4.6	Adesividade .....	63
4.7	Porosidade .....	72
4.8	Resistência de aderência em bloco cerâmico .....	75
5	CONCLUSÕES .....	76
6	REFERÊNCIAS.....	78
	ANEXO A - Curvas de força x deformação (mm) representativa de cada amostra avaliada no teste de resistência à compressão em função do aumento de percentual de látex.....	87
	ANEXO B – Resultados da ANOVA .....	88

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação de misturas à base de polímero.....	7
Figura 2: Modelo de formação das fases polímero e matriz em argamassa cimentícia. ....	13
Figura 3: Modelo de ligação física em cimento modificado com látex polimérico. (a) Cristais da hidratação recobertos pelo látex; (b) Partículas poliméricas e filme polimérico preenchendo as fissuras e poros do cimento.....	14
Figura 4: Modelo de ligação química em cimento modificado com látex polimérico. (a) Reação química entre o látex e os produtos da hidratação; (b) Estrutura 3D da rede que é obtida pela reação do látex com o sistema cimentício.....	14
Figura 5: Interação entre argamassa de assentamento e os blocos em uma alvenaria .....	15
Figura 6: Resistência à compressão das amostras contendo polímero (razão polímero/concreto P/C = 5%), em comparativo com a amostra sem polímero (P/C = 0%), ambas com 15% de metacaulim (MK). ....	19
Figura 7: Representação da cadeia do ácido poliacrílico em pH 4 (cadeia rígida emaranhada) e em pH 9 (cadeia estendida). ....	21
Figura 8: Representação esquemática do espessamento das cadeias do ácido poliacrílico em função do aumento do pH. ....	21
Figura 9: Resultados de compressão de argamassas contendo látex de (a) SBR e (b) éster acrílico (AE), comparando-se diferentes percentuais de adição com uma amostra controle, Control C0, isenta de látex. ....	24
Figura 10: Resultados de (a) compressão e (b) tração de argamassas cimentícias contendo látex de borracha natural (NRL) e látex de EVA em comparativo com uma referência sem látex..	25
Figura 11: Resultados de compressão de argamassa cimentícia contendo látex de éster acrílico e estireno (até 20% da razão polímero (P)/cimento (C)) em comparativo com uma referência sem látex (0% mp/mc). ....	25
Figura 12: Ilustração do ensaio de <i>dropping ball</i> .....	28
Figura 13: Geometria utilizada no ensaio de <i>squeeze-flow</i> em argamassas de revestimento. Dimensões da argamassa moldada: (a) altura inicial = 10 mm; diâmetro inicial = 101 mm; (b) altura final = 7,5 mm. ....	29
Figura 14: Representação esquemática do ensaio de <i>squeeze-flow</i> identificando a condição de início e final de ensaio. D = diâmetro do punção (placa superior) = diâmetro da amostra; h <sub>0</sub> = distância inicial entre o punção e a base (placa inferior) = altura inicial da amostra; h = altura da amostra variável em função do deslocamento do punção superior. ....	30

Figura 15: Curva típica da carga (N) versus deslocamento (mm) no teste de <i>squeeze-flow</i> , ilustrando os 3 estágios. I: fase de deformação elástica linear; II: fase de escoamento; III: fase de enrijecimento. ....	31
Figura 16: Resultados de <i>squeeze-flow</i> ilustrando a influência do tipo de mistura realizada em laboratório no comportamento reológico de uma argamassa industrializada. (a) e (d) – Manual, mistura manual sem procedimento padronizado; (b) e (e) – Norma, mistura de acordo com a norma NBR 13276; (c) e (f) – Mecânica AF, mistura mecânica em argamassadeira com adição fracionada de água. ....	32
Figura 17: Curvas de carga (N) versus deslocamento (mm) de argamassas produzidas com substituição da areia por resíduos. ....	33
Figura 18: Imagem de um equipamento de determinação da TMFF. ....	35
Figura 19: Preparação da argamassa polimérica. (a) agitação mecânica a 350 rpm em temperatura ambiente; (b) aparência da argamassa polimérica durante a agitação mecânica. ....	38
Figura 20: Imagens das etapas de preparação dos corpos de prova para o teste de resistência de aderência à tração: (a) suporte metálico; (b) placas cerâmicas 50 mm x 50 mm; (c) matriz para aplicação da argamassa; (d) aplicação da argamassa; (e) argamassa aplicada na cerâmica; (f) cerâmicas unidas e (g) corpo de prova com o suporte. ....	40
Figura 21: Argamassa aplicada sobre o bloco: (a) filetes sobre o bloco; (b) sobreposição dos blocos. ....	42
Figura 22: Espectro de absorção de infravermelho do látex com atribuição dos números de onda dos grupos funcionais. ....	43
Figura 23: Espectro de <sup>1</sup> H-RMN do látex com apontamento dos principais sinais. ....	45
Figura 24: Termograma do látex obtido por DSC a uma faixa de temperatura de -20 a 180 °C a 20 °C/min. ....	46
Figura 25: TGA do filme obtido a partir do látex de éster acrílico e estireno. ....	47
Figura 26: Perfil da granulometria do calcário representado através da retenção acumulada das partículas. ....	47
Figura 27: Termograma de TGA do calcário dolomítico. ....	49
Figura 28: Carga (N) versus deslocamento (mm) para as argamassas com duas velocidades de deformação diferentes (a) 0,1 mm/s e (b) 3 mm/s. As argamassas foram submetidas até 9 mm de deformação. Identificação dos estágios II e III. ....	51
Figura 29: Carga (N) versus deslocamento (mm) para as argamassas com duas velocidades de deformação diferentes (a) 0,1 mm/s e (b) 3 mm/s. Ampliação da região de análise para deformações entre 4 mm e 7 mm. ....	53

Figura 30: Resultados de Força máxima aplicada (N), a partir do teste de Tukey, para as argamassas ensaiadas com duas velocidades de deformação diferentes (0,1 mm/s e 3 mm/s). .....	54
Figura 31: Viscosidade biaxial ( $\eta_B$ ) versus taxa de cisalhamento biaxial ( $\dot{\epsilon}_B$ ) para as argamassas ensaiadas com duas velocidades de deformação diferentes (a) 0,1 mm/s e (b) 3 mm/s. ....	55
Figura 32: Avaliação da tensão de escoamento em função do teor de látex e velocidade de cisalhamento.....	56
Figura 33: Resistência de aderência à tração das argamassas secas em função do aumento do % de látex. ....	57
Figura 34: Resistência de aderência à tração em função do aumento do % de látex após imersão dos corpos de prova durante 24 horas em água.....	58
Figura 35: Resistência de aderência à tração da argamassa 6-IL após exposição à temperatura por um período de 4 horas, entre 100 e 400 °C.....	60
Figura 36: Resistência de aderência à tração da argamassa 6-IL em função do tempo de secagem a 10 °C de temperatura e 75% de umidade. ....	61
Figura 37: Resistência de aderência à tração da argamassa 6-IL em função do tempo de secagem a 25 °C de temperatura e 50% de umidade. ....	62
Figura 38: Imagem de um corpo de prova (a) antes e (b) após o ensaio de compressão. ....	62
Figura 39: Resistência à compressão em função do aumento do % de látex. ....	63
Figura 40: Tipos de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa. ....	64
Figura 41: Imagem digital dos corpos de prova após tracionamento em corpo-de-prova seco (Faces A e B) e apontamento do tipo predominante de falha. ....	66
Figura 42: Imagem dos corpos de prova após tracionamento em corpo-de-prova saturado. (Faces A e B) e apontamento do tipo predominante de falha. ....	67
Figura 43: Imagem da argamassa IL após tracionamento em corpo-de-prova seco. Lente ocular com magnificação de 20x. (a) aumento de 0,8x da magnitude e (b) aumento de 2x da magnitude. .....	68
Figura 44: Imagem da argamassa 4-IL após tracionamento em corpo-de-prova seco. Lente ocular com magnificação de 20x. (a) aumento de 0,8x da magnitude e (b) aumento de 2x da magnitude. ....	69
Figura 45: Imagem da argamassa 10-IL após tracionamento em corpo-de-prova seco. Lente ocular com magnificação de 20x. (a) aumento de 0,8x da magnitude e (b) aumento de 2x da magnitude. ....	70

Figura 46: Imagem da argamassa IL após tracionamento em corpo-de-prova saturado. Lente ocular com magnificação de 20x. (a) aumento de 0,8x da magnitude e (b) aumento de 2x da magnitude..... 71

Figura 47: Micrografias obtidas para as argamassas em função do percentual de látex preparadas através dos corpos de prova moldados para o ensaio de compressão (a) e após a extração com HCl (b). ..... 73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estruturas químicas dos principais polímeros mais utilizados na forma de látex nas misturas a base de polímeros.....	8
Tabela 2: Propriedades das argamassas de revestimento e assentamento, listadas nos projetos de norma Europeia. ....	23
Tabela 3: Propriedades fundamentais para argamassas colantes. ....	26
Tabela 4: Requisitos de resistência à compressão.....	26
Tabela 5: Requisitos de Resistência potencial de aderência à tração.....	26
Tabela 6: Descritivo das argamassas poliméricas preparadas.....	38
Tabela 7: Propriedades do látex de éster acrílico e estireno. ....	43
Tabela 8: Identificação dos grupamentos químicos. ....	44
Tabela 9: Análise granulométrica do calcário.....	48
Tabela 10: Distribuição do tamanho das partículas do calcário.....	48
Tabela 11: Composição química do calcário obtida por Fluorescência de raios X. ....	49
Tabela 12: Valores de consistência determinados por <i>dropping ball</i> (mm). ....	50
Tabela 13: Resistência de colagem em bloco cerâmico. ....	75

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AE – látex de éster acrílico
- ASE - emulsões álcali solúveis
- ATR – Reflexão Total Atenuada
- CR - policloropreno
- DSC – calorimetria exploratória diferencial
- EVA - copolímero de etileno e acetato de vinila
- HASE – emulsão álcali-solúvel modificada hidrofobicamente
- HEC – hidróxi etil celulose
- HEUR – emulsão uretano-etoxilada modificada hidrofobicamente
- IP – índice de penetração
- MC – metil celulose
- MEV – microscopia eletrônica de varredura
- MK – metacaulim
- NBR – normas brasileiras
- NR – borracha natural
- PAE – látex de éster-acrílico
- PC – concreto polimérico
- PET – polietileno tereftalato
- PP - polipropileno
- PVA – poliacetato de vinila
- Q – grau de inchamento
- RMN-<sup>1</sup>H – ressonância magnética nuclear de hidrogênio-1
- SAE - látex de éster-acrílico e estireno
- SBR – borracha estireno-butadieno
- TEM – microscopia eletrônica de transmissão
- T<sub>g</sub> – temperatura de transição vítrea
- TGA – análise termogravimétrica
- TMFF – temperatura mínima de formação de filme
- UV - ultravioleta
- ε<sub>B</sub> – deformação extensional biaxial
- ε<sub>H</sub> – deformação na amplitude máxima

$\eta_B$  – viscosidade extensional

$\sigma_B$  – tensão máxima

VAE - látex de etileno-acetato de vinila

VaVeova – vinil acetato / vinil éster do ácido versático

$v$  – velocidade de deslocamento

WDXRF - Espectrometria de fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda

## RESUMO

Argamassas são materiais essenciais na construção civil, com aplicação no assentamento de alvenarias e de revestimentos cerâmicos, além da utilização como emboço, reboco (ou revestimento) de paredes, tetos e contrapiso; e, também, rejuntamento de pisos, azulejos e pedras ornamentais. Dentre os sistemas de argamassas que contém polímeros na sua formulação, tem-se a chamada argamassa polimérica ou de ligação química, constituída basicamente por uma resina polimérica e agregados finos e isenta de cimento em sua formulação. A resina age como um ligante e substitui totalmente o cimento. O presente estudo teve como objetivo avaliar argamassas poliméricas à base de um látex de éster acrílico e estireno (látex), que é uma emulsão polimérica aquosa, sem cimento e sem areia. A adição de um látex, ou seja, um polímero em emulsão aquosa, confere às argamassas a praticidade de ser pronta para o uso em alvenaria, tornando o produto interessante, para redução de resíduos em obra, consumo de materiais e aumento de produtividade. As argamassas foram obtidas variando-se o teor de látex e, a partir de um teor mínimo. Assim, investigou-se o efeito da variação do conteúdo de ligante sobre as principais propriedades exigidas para uma argamassa. As argamassas foram caracterizadas quanto às propriedades mecânicas (resistência de aderência à tração e resistência à compressão), térmicas e reológicas. Além disso, estudou-se o efeito do inchamento em água e da temperatura sobre as propriedades das argamassas. Por meio das técnicas de microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura avaliou-se a morfologia e a porosidade superficial das mesmas. Constatou-se que as principais propriedades das argamassas variaram com o teor de látex presente na formulação. Pequenos incrementos de polímero proporcionaram melhoria nas propriedades mecânicas e conferiram ao novo material características compatíveis e adequadas para ser aplicado comercialmente. Em geral, as argamassas apresentaram, morfologicamente, estrutura diferenciada para os extremos de conteúdo polimérico avaliados. Por fim, as metodologias de caracterização se mostraram adequadas para caracterizar o novo material, com exceção da avaliação de resistência de aderência em bloco cerâmico, pois houve quebra do bloco ao invés de ocorrer a descolagem da argamassa.

**Palavras-chave:** látex de éster acrílico e estireno, *squeeze-flow*, argamassa polimérica.

## ABSTRACT

Mortar is one of the most important civil engineering materials, it has been applying for assembling and lining masonry walls, laying and grouting ceramics. Among the mortars that have polymer content, there is one named of polymeric mortar or chemical bond mortar, it is basically produced with polymer resin, fine aggregates and does not have cement in its formula. The polymer resin acts as a binder replacing completely the cement. The goal of this study was to evaluate polymeric mortars (PM) based on poly (styrene-acrylic ester) (Latex), that is a polymer in aqueous emulsion, without sand and cement. The addition of Latex (water based emulsion) in the PM provides the practicality of being ready for using in masonry, making the product interesting for reduction the waste, materials demand and improving the productivity. The polymeric mortars were obtained with different polymer contents, starting with a minimum value of content. Thus, the effects of different polymer contents were evaluated. The mortars were characterized by mechanical properties (tensile and compressive strength), thermal and rheological properties. Also, the swelling degree and the thermal resistance were performed. In additional, the porosity and morphology by scanning electron microscopy and optical microscopy were used for evaluating them. This study demonstrated that the properties evaluated are sensitive to variation of the polymeric latex content. Small increments in the formulation increased mechanical properties, making the material obtained more compatible and suitable for comercial application. In general, the mortars showed different porosity for high and low polymeric latex content. The methodologies used to characterize the mortars showed to be adequate for the new material, except for the shear strength in ceramic blocks, which showed the rupture of the blocks instead of the mortar.

**Key-words:** poly (styrene-acrylic ester) latex, squeeze flow, polymeric mortar.

# 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de materiais mais sustentáveis para a construção civil e que possuam alta resistência e durabilidade é uma das principais exigências do mercado atual, sendo objeto de interesse em pesquisas acadêmicas e industriais<sup>1</sup>. A incorporação de polímeros em materiais já existentes tem permitido a obtenção de materiais inovadores e com propriedades diferenciadas. Argamassas poliméricas são exemplos destes materiais, não somente pela alta performance mecânica, mas também pela sua maior durabilidade, tendo-se como consequência uma redução na necessidade de manutenção e frequência de reparos em comparação com construções feitas com argamassas convencionais e por consequência, maior durabilidade<sup>2, 3</sup>.

Argamassas são materiais muito empregados na construção civil, tendo os seus principais usos no assentamento de alvenarias e nas etapas de revestimento, como emboço, reboco ou revestimento de camada única de paredes e tetos, além de contrapisos para a regularização de pisos e ainda no assentamento e rejuntamento de revestimentos de cerâmica e pedra<sup>4</sup>. Argamassas e concretos à base de cimento são usados mundialmente, porém, apresentam algumas desvantagens, tais como, elevada rigidez, baixa resistência à tração, grande retração após secagem, baixa resistência química e longo tempo de cura. Para minimizar estas desvantagens, muitos trabalhos têm sido desenvolvidos utilizando polímeros em forma de látices, polímeros redispersíveis em pó, polímeros solúveis em água, resinas líquidas ou monômeros. A incorporação de polímeros melhora a adesão, resistência mecânica, resiliência, impermeabilização, resistência química e durabilidade de argamassas e concreto<sup>5-14</sup>.

Entre sistemas que possuem polímeros incorporados, tem-se a argamassa polimérica ou de ligação química, composta basicamente por resina polimérica e agregados finos, sendo isenta de cimento em sua formulação. Neste tipo de sistema, a resina age como um ligante e substitui totalmente o cimento na formulação<sup>15-17</sup>. Entre os polímeros, os mais citados na literatura são as resinas epóxi<sup>18-22</sup>, poliuretanos com o uso de catalisadores<sup>2,23</sup> e poliéster<sup>24-31</sup>.

Embora exista uma vasta literatura sobre argamassas poliméricas ou modificadas com polímeros, em sua grande maioria necessitam de preparo para seu uso, a partir do emprego de catalisadores, ou ainda envolvem cimento e areia na formulação. Uma grande desvantagem da utilização de cimento Portland está relacionada aos potenciais impactos ambientais. Estudos apontam que a indústria do cimento contribui com cerca de 7% na emissão mundial de gases de efeito estufa, principalmente CO<sub>2</sub><sup>25,1</sup>. Essas emissões têm origem em uma etapa da produção

do cimento Portland denominada de clinquerização, onde ocorre a conversão da sua principal matéria-prima, o calcário, em óxido de cálcio. Esse processo gera 50% das emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes da produção do cimento Portland, enquanto que 40% resultam da energia demandada para fazer esta reação acontecer, a uma temperatura de 1450 °C aproximadamente<sup>32</sup>. Além disso, a extração de areia acarreta diversos prejuízos ao meio ambiente, como incidência de processos erosivos, assoreamento de rios, danos a fauna e flora terrestre, depreciação da qualidade da água e de lençóis freáticos, entre outros<sup>33-35</sup>.

Neste cenário, argamassas poliméricas isentas de cimento e areia apresentam-se como uma alternativa tecnicamente viável e ecologicamente adequada. Por outro lado, há uma limitação de estudos que se dedicam a entender as propriedades químicas e mecânicas destes materiais inovadores frente a diferentes teores do ligante polimérico.

Portanto, esta tese visa estudar uma argamassa polimérica totalmente isenta de cimento e areia. A adição de um látex, ou seja, um polímero em emulsão aquosa, confere às argamassas a praticidade de ser pronta para o uso em alvenaria, tornando o produto interessante, minimizando desperdícios em obra para preparo e manuseio de argamassa, proporcionando racionalização de materiais e maior produtividade.

Sendo assim, o objetivo principal é avaliar a influência do teor de polímero em forma de látex e a partir de um teor mínimo, estudar o efeito de sucessivos incrementos do mesmo, sobre as principais propriedades exigidas para uma argamassa.

Como objetivos específicos:

- Desenvolver uma formulação básica com teor mínimo de látex de éster acrílico e estireno e a partir da mesma, preparar formulações com incrementos sucessivos do teor de látex de 2 a 10%;
- Avaliar o efeito de resistência de aderência destas argamassas, a seco, envelhecidas em água e quando submetidas ao envelhecimento por temperatura;
- Avaliar a resistência à compressão das argamassas;
- Avaliar o poder de adesão em uma superfície de cerâmica a partir da avaliação da resistência mecânica;
- Avaliar a reologia das formulações desenvolvidas;
- Avaliar a microestrutura e a porosidade das formulações desenvolvidas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ARGAMASSAS

Argamassa é um agente de ligação que integra um bloco ou tijolo em uma montagem de alvenaria. Séculos atrás, as combinações de areia e cal foram usadas como argamassa. Com o desenvolvimento dos materiais, as argamassas passaram a ter cimento Portland e aditivos para melhorar algumas propriedades. Atualmente é possível encontrar materiais poliméricos na formulação de argamassas, com o objetivo de obter características mecânicas específicas. O uso de polímeros em argamassas e concretos tem se expandido rapidamente por conferir melhores propriedades comparadas com argamassas e concretos convencionais, à base de cimento<sup>4</sup>. Os sistemas de argamassas que agregam polímeros em sua formulação podem ser classificados em três categorias<sup>11,15</sup>, como segue:

- I. Argamassa ou concreto impregnado com polímero: produzido por impregnação de monômero na argamassa endurecida, com polimerização *in-situ*.
- II. Argamassa modificada com polímero; argamassa de cimento de polímero: produzida através da adição de um polímero ou precursor na argamassa convencional fresca.
- III. Argamassa polimérica, de ligação química ou composto polimérico: argamassa isenta de cimento, composta por resina polimérica e agregados finos.

Argamassa polimérica ou concreto polimérico (PC) é um compósito, feito de agregados ligados entre si por uma resina que substitui o cimento, atuando como ligante. Estes materiais apresentam alto desempenho mecânico em comparação aos materiais de construção convencionais e menor tempo de cura<sup>2</sup>.

Em geral, encontra-se na literatura, três constituintes principais utilizados para produção das argamassas poliméricas: resina ou material ligante (8,5 a 12% em massa), agregados (70 a 87,5% em massa) e cargas (5 a 15% em massa) também chamados de agregados finos ou miúdos<sup>24</sup>.

Devido ao emprego de resinas poliméricas em sua formulação o preço do concreto polimérico é mais elevado que o convencional. Entretanto, de acordo com Rocha<sup>36</sup> argamassas não cimentícias para assentamento de bloco cerâmico são 25% mais econômicas do que a

argamassa industrializada e 29% mais econômica que a argamassa convencional, quando considerado o custo final da obra. Para produção de argamassas poliméricas, as resinas mais utilizadas têm sido poliésteres insaturados, acrílicos e epóxis. éster vinílico, furano e uretano, também são mencionados na literatura<sup>18,37,39</sup>.

Em sua grande maioria os concretos e argamassas poliméricas necessitam de preparo para seu uso, a partir do emprego de catalisadores com destaque para o peróxido de metil etil cetona, metal cobalto e peróxido de benzoíla<sup>12,25,37,40</sup>. Entretanto, apesar da pouca disponibilidade de estudos que relatam argamassas poliméricas que não necessitem desta etapa, há produtos sendo comercializados no mercado brasileiro, que segundo seus fabricantes estão prontos para uso.

No que diz respeito às propriedades mecânicas ou à impermeabilidade, é normalmente necessária uma adição 3% a 20% de polímero, em massa. Com menos de 3% de adição de polímero, as propriedades mecânicas e impermeabilidade dificilmente variam. A impermeabilidade só é melhorada quando o polímero forma um filme semi-contínuo na matriz de hidratos de cimento endurecido. Portanto, uma adição mínima de polímero é necessária para garantir a formação do filme, que geralmente é maior que 3% da relação polímero/concreto<sup>41</sup>.

Entre os tipos de polímeros, destacam-se: emulsões aquosas (látex) ou dispersões em fases líquidas (I), polímeros em pó redispersíveis (II), polímeros ou monômeros solúveis em água (III) e polímeros líquidos (IV)<sup>11</sup>. Uma breve descrição destes polímeros é apresentada na sequência deste capítulo. O esquema mostrado na Figura 1 apresenta os látices mais utilizados como polímeros em argamassas e concretos sendo polímeros elastoméricos ou termoplásticos capazes de formar um filme polimérico contínuo quando seco<sup>16</sup>.

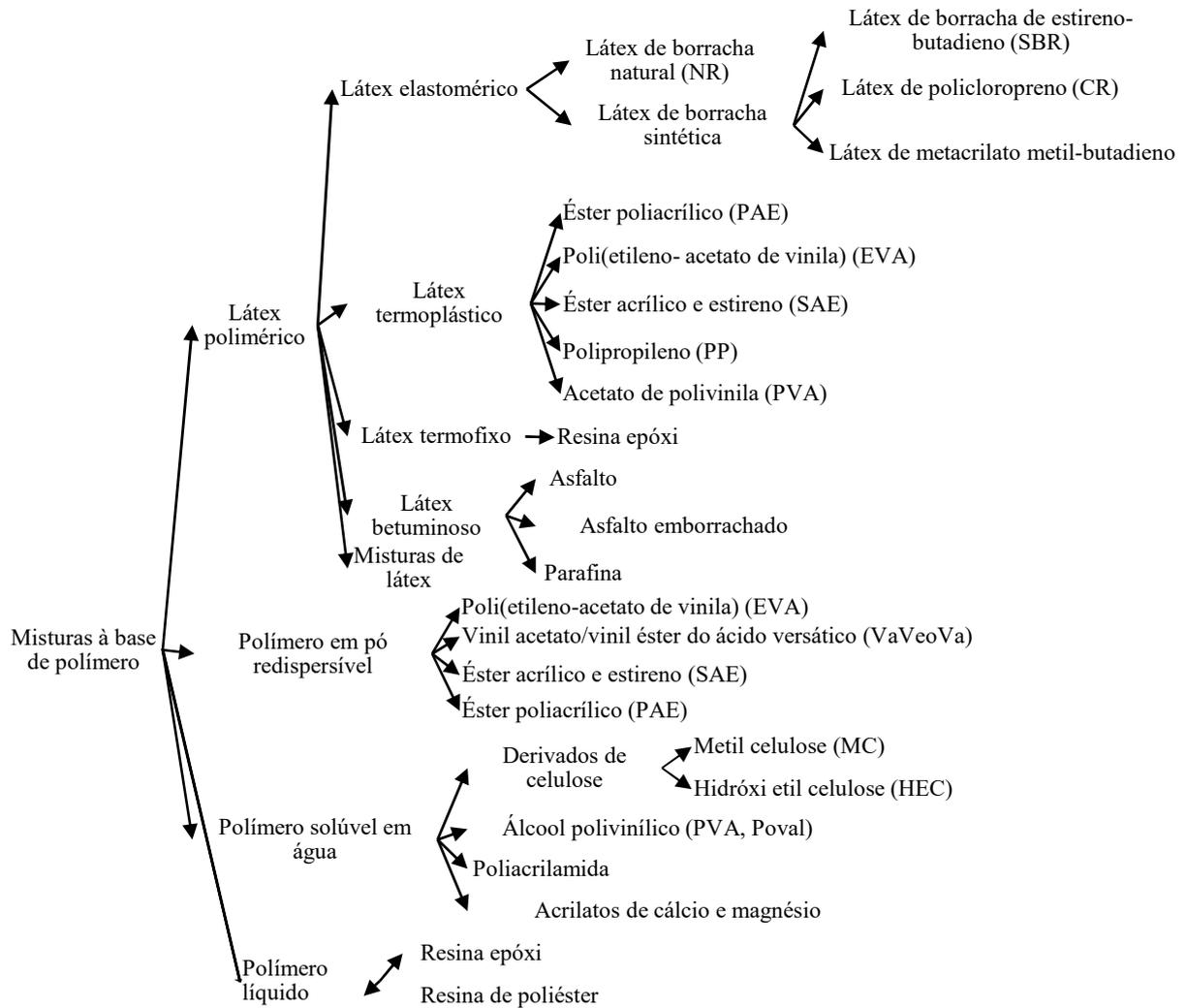
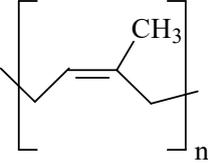
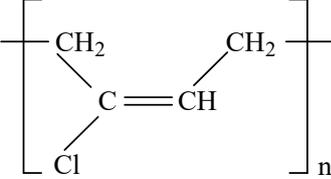
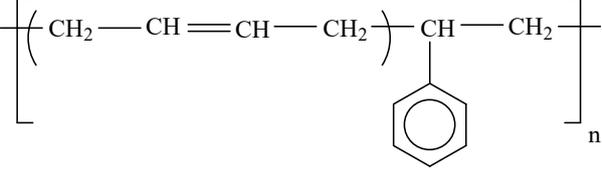
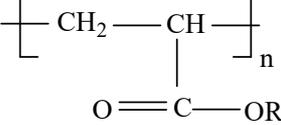
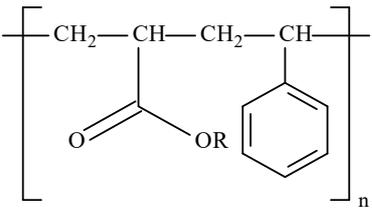
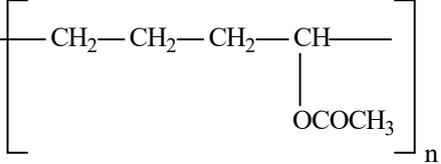


Figura 1: Classificação de misturas à base de polímero.

Fonte: adaptado de Ohama<sup>16</sup>.

- I. Emulsões aquosas poliméricas (látex) ou dispersões em fases líquidas: os polímeros em látex apresentam partículas entre 0,05 e 5  $\mu\text{m}$  de diâmetro dispersas em água e normalmente são produzidos via polimerização em emulsão. A Tabela 1 apresenta as estruturas monoméricas dos principais polímeros listados na Figura 1.

Tabela 1: Estruturas químicas dos principais polímeros mais utilizados na forma de látex nas misturas a base de polímeros.

Tipo de polímero em látex	Sigla	Estrutura Química
látex de borracha natural	NR	 $\left[ \text{CH}_2 - \text{C}(\text{CH}_3) = \text{CH} - \text{CH}_2 \right]_n$
látex de borracha de policloropreno (neoprene)	CR	 $\left[ \text{CH}_2 - \text{C}(\text{Cl}) = \text{CH} - \text{CH}_2 \right]_n$
látex de borracha de estireno-butadieno	SBR	 $\left[ \text{CH}_2 - \text{CH} = \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5) - \text{CH}_2 \right]_n$
látex de éster-acrílico	PAE	 $\left[ \text{CH}_2 - \text{CH}(\text{COOR}) \right]_n$ <p>R = grupo alquil</p>
látex de éster acrílico e estireno	SAE	 $\left[ \text{CH}_2 - \text{CH}(\text{COOR}) - \text{CH}_2 - \text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5) \right]_n$ <p>R = grupo alquil</p>
látex de etileno-acetato de vinila	EVA ou VAE	 $\left[ \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}(\text{OCOCH}_3) \right]_n$

Fonte: adaptado de Ohama (1998)<sup>16</sup>

Os requisitos gerais para os látices são<sup>16</sup>:

- a) Estabilidade química para cátions ativos como íons cálcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) e íons alumínio ( $\text{Al}^{+3}$ ) liberados durante a hidratação do cimento;
  - b) Estabilidade mecânica em condições de alto cisalhamento, como em sistemas de dosagem e transferência com bombas;
  - c) Baixa capacidade de aeração devido ao uso de antiespumantes durante a mistura da argamassa ou concreto;
  - d) Não influenciar negativamente as reações de hidratação do cimento;
  - e) Formação de um filme polimérico contínuo na argamassa ou concreto, devido à uma temperatura de formação de filme menor que a temperatura de aplicação e alta adesão do filme polimérico no cimento e agregados;
  - f) Excelente resistência à água e intempéries;
  - g) Estabilidade térmica em variações de temperatura durante o transporte e armazenamento.
- II. Polímeros em pó redispersíveis: são obtidos via polimerização em emulsão e posteriormente secos por pulverização para obter o polímero em pó. Quando estes polímeros em pó são adicionados sob agitação na mistura com água, eles redispersam ou re-emulsionam facilmente. Normalmente, polímeros em pó redispersíveis são comercializados já misturados no composto seco de cimento para posterior mistura com água.
- III. Polímeros solúveis em água: são polímeros na forma de pó que se solubilizam em água, como derivados celulósicos, álcool polivinílico e poliacrilamida, os quais são adicionados na forma de pó ou solução aquosa ao concreto ou argamassa durante a mistura. O principal efeito de seu uso é a melhoria da trabalhabilidade ou aplicabilidade do concreto e argamassa.
- IV. Polímeros líquidos: são polímeros no estado líquido viscoso, como exemplos, resinas epóxi e resinas de poliéster insaturado, as quais são adicionadas durante a

mistura do concreto ou argamassa cimentícia, juntamente com um endurecedor ou acelerador.

Em geral, a literatura vem reportando ganhos significativos no desempenho mecânico de materiais cimentícios quando há incorporação de polímeros em sua formulação. Um estudo publicado por Gown, Yup Jang & Shin<sup>5</sup>, no qual investigaram quatro misturas de pasta de cimento e quatro misturas de argamassa contendo polímero acrílico redispersível em pó, relata que a adição de polímero foi comprovadamente um método eficaz para retardar o ajuste e a hidratação do cimento e aumentar a durabilidade de sistemas de cimento de endurecimento ultrarrápido sem sacrificar sua resistência a longo prazo. Segundo os autores, aproximadamente 10% da relação polímero para cimento em massa de cimento foi considerada a proporção ideal.

Em outro estudo publicado, Li et al.<sup>7</sup> investigaram a influência de látex polimérico no comportamento de endurecimento, propriedades mecânicas e durabilidade de cimento sulfato-aluminoso. Três látices poliméricos foram utilizados (látex de SBR, SAE e PAE) em duas proporções diferentes (10% e 20%) por sólidos de látex polimérico em relação ao cimento. O estudo demonstrou que a argamassa modificada com látex SBR apresentou maior resistência à compressão na dosagem de 20%, enquanto a argamassa modificada com látex SAE e PAE apresentaram menor resistência à compressão. O látex polimérico contribuiu para o aumento da resistência à flexão, sendo que a argamassa modificada com látex SBR foi a que apresentou a maior resistência à flexão. Os látices de polímero proporcionaram um aumento considerável na resistência à adsorção capilar de água. Os autores relatam que melhores resultados podem ser alcançados, independentemente do tipo de polímero empregado, a partir de um maior teor de polímero. Além disso, o estudo mostrou que a adição de látex polimérico melhorou a microestrutura das argamassas através da formação de filmes contínuos, contribuindo para melhoria das propriedades mecânicas.

Por outro lado, piores resultados de desempenho mecânicos foram reportados e associados a cenários com elevado teor de látex. De acordo com Eren et al.<sup>3</sup> que avaliaram os efeitos da adição de látex de SBR e látex de estireno acrílico em argamassa cimentícia, alguns efeitos secundários tais excesso de bolhas e perda de resistência mecânica podem também ser observados na presença de quantidades elevadas de emulsão de látex. Além disso, o tipo de emulsificante, a presença ou ausência de uma mistura antiespumante pode afetar significativamente o desempenho da emulsão de látex na argamassa de cimento. Logo, o estudo

sugere que a dosagem da emulsão de látex deve ser otimizada levando em conta as possíveis vantagens e os efeitos colaterais sobre o desempenho de argamassas cimentícias.

Moodi et al.<sup>8</sup> estudaram o efeito de diferentes resinas e látex polimérico sobre o aumento de força e durabilidade de concreto modificado com látex polimérico em várias idades, bem como diferentes percentuais: látex de SBR, látex epóxi, resina de poliéster e resina epóxi. Para o látex de SBR foi utilizado 15% e 25% de sólidos de SBR adicionado ao concreto; para o látex epóxi, 25%. A resina de poliéster foi adicionada nas proporções de 10% e 20%. Para resina epóxi uma proporção de 10% em relação à massa de agregados foi utilizada. As propriedades mecânicas foram avaliadas e comparadas com a amostra padrão de cimento. Em termos de resistência à compressão, à tração e à flexão, os concretos modificados com látex, que foram produzidos pela adição de 25% de SBR e 25% de epóxi, apresentaram melhor desempenho que o concreto comum. De modo geral, a modificação dos concretos pôde ser afetada tanto pelo tipo quanto pelo percentual de materiais poliméricos. Os concretos poliméricos fabricados pela adição de 10% e 20% de resina de poliéster mostraram o melhor desempenho em termos de resistência à compressão, à tração e à flexão. Além disso, semelhante aos concretos modificados com látex, a melhoria na resistência à tração e à flexão dos concretos poliméricos foi mais evidente do que na resistência à compressão. Em comparação com o concreto comum, foi observada uma redução significativa na permeabilidade à água do concreto polimérico com 20% de poliéster e também de concretos modificados com 25% de látex de SBR e 25% de epóxi. Por outro lado, o uso de 10% de resina de poliéster e 15% de SBR aumentou a permeabilidade. A resistência à abrasão aumentou drasticamente usando materiais poliméricos em concretos, pois a diminuição na perda de massa para os concretos poliméricos foi de 55% a 85% quando comparada com o concreto simples.

Zichen Lu et al.<sup>9</sup> estudaram o uso de látex acrílico estirenado em concreto e argamassa cimentícios. Diferentes amostras de látex foram sintetizadas variando-se condições reacionais. Os autores verificaram a forte influência do látex, com efeito retardante das reações de hidratação sob temperaturas elevadas.

Assaad<sup>10</sup> estudou a viabilidade de adições de látex de SBR e PVA durante o processamento do clínquer, matéria prima base do cimento, material resultante da calcinação de uma mistura de calcário, argila e de componentes químicos como silício, o alumínio e o ferro, avaliando diversas propriedades, como demanda de água, endurecimento do concreto, resistência à compressão e flexão e adesão em diferentes substratos. Esse tipo de cimento pronto

para uso pode ser de particular interesse em aplicações adesivas que exigem maior aderência a substratos (ou seja, adesivos de azulejo, argamassas de correção, lamas impermeabilizantes) bem como trabalhos de reparo e injeção que exigem maior durabilidade e aderência a barras de aço embutidas. Os resultados dos testes demonstraram maior trabalhabilidade e melhor resistência à flexão e à tração. A quantidade de SBR e PVA devem ser limitadas a menos de 0,4% e 0,3% da massa de cimento, respectivamente, dado que a moagem do clínquer, incluindo a granulometria, podem ser prejudicialmente afetados.

Fernández-Ruiz et al.<sup>12</sup> avaliaram o uso de concreto modificado com resina epóxi, com e sem adição de catalisador e com incorporação de pó de pneu. Parte do cimento foi substituído por estes materiais. O objetivo principal foi melhorar as propriedades mecânicas, pois o concreto, devido ao seu comportamento frágil, apresenta baixa ductilidade e alta porosidade, permitindo que a absorção de compostos afete sua durabilidade. A resistência à compressão e à flexão de cada concreto polimérico de cimento considerado neste trabalho foi menor que a obtida para o concreto tradicional. O autor recomenda a substituição de 15% de cimento com epóxi com endurecedor para obter uma maior resistência à entrada de cloreto e uma tenacidade um pouco maior em relação ao concreto tradicional.

## **2.2 Mecanismos de formação de redes ligantes em argamassas com polímero**

Em compostos cimentícios contendo látices, polímeros solúveis em água e polímeros líquidos, é reportado na literatura a ocorrência de dois mecanismos de formação de redes ligantes: a hidratação do cimento e a formação de filme polimérico, seja por coalescência das partículas do polímero ou por polimerização da resina. Estes mecanismos resultam numa estrutura contendo uma fase de cimento hidratado interpenetrado por um polímero<sup>4</sup>.

O processo de hidratação do cimento geralmente precede o processo de coalescência das partículas poliméricas na forma de látex. Um modelo simplificado do processo é apresentado na Figura 2.

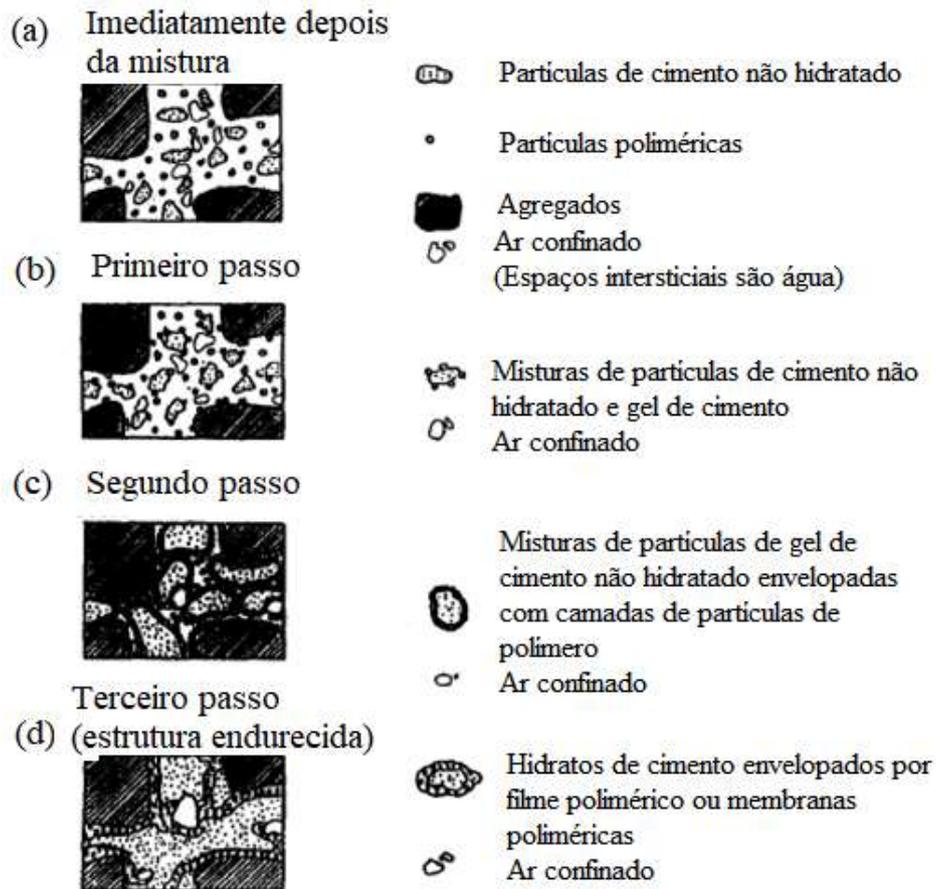


Figura 2: Modelo de formação das fases polímero e matriz em argamassa cimentícia.

Fonte: adaptado de Ohama<sup>42</sup>.

Um aspecto importante em argamassas e concretos modificados com látex é a melhoria da adesão ou resistência de colagem em diversos substratos, como telhas cerâmicas, tijolos, aço, madeira e pedra, quando comparadas com argamassa e concreto convencionais.

Wang et al.<sup>43</sup> publicaram recentemente o mecanismo de cimento modificado com látex de SBR e látex de SBR carboxilado, evidenciando dois mecanismos diferentes de ligação, tanto de ligação física, como química. No mecanismo de ligação física (Figura 3(a)), o filme de látex cobre a superfície dos cristais de hidratação. Na Figura 3(b) as partículas do filme de látex preenchem as fendas e poros do sistema modificado. No mecanismo de ligação química (Figura 4) o autor indica que os grupos ativos reagem com os produtos de hidratação no sistema modificado (a) e apresenta uma estrutura de rede 3D composta pelo látex polimérico e produtos de hidratação (b).

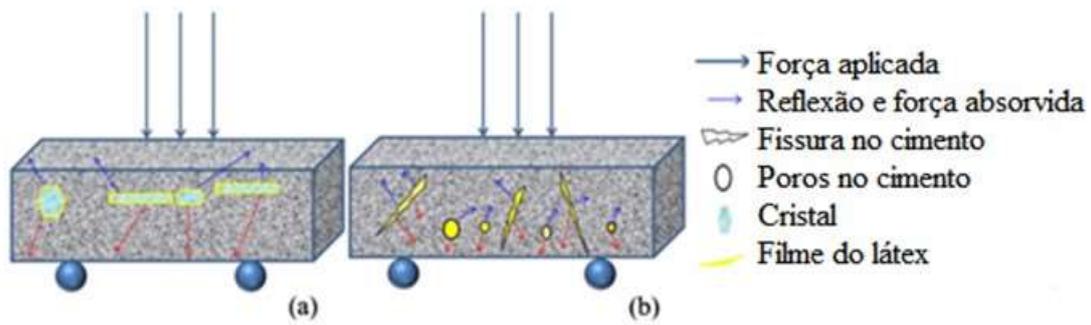


Figura 3: Modelo de ligação física em cimento modificado com látex polimérico. (a) Cristais da hidratação recobertos pelo látex; (b) Partículas poliméricas e filme polimérico preenchendo as fissuras e poros do cimento.

Fonte: Wang et al. <sup>43</sup>

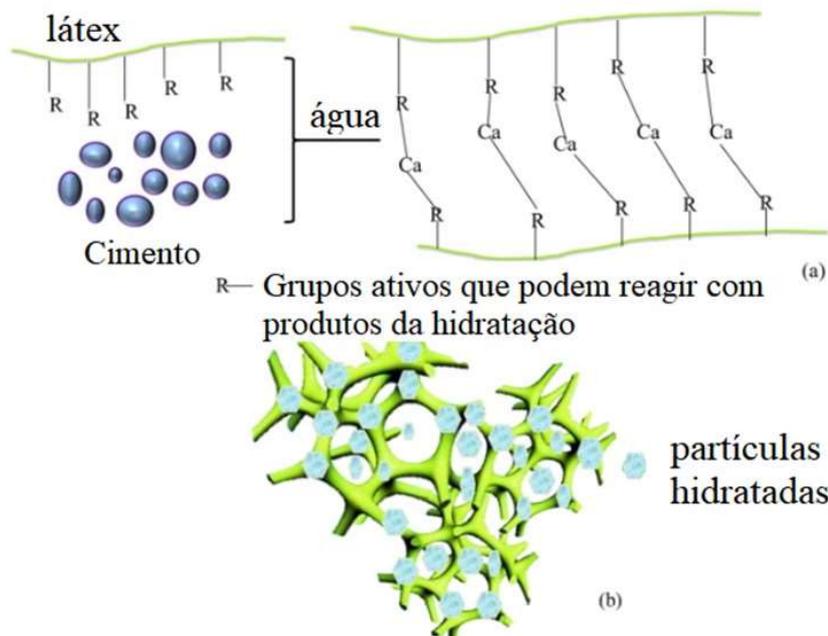


Figura 4: Modelo de ligação química em cimento modificado com látex polimérico. (a) Reação química entre o látex e os produtos da hidratação; (b) Estrutura 3D da rede que é obtida pela reação do látex com o sistema cimentício.

Fonte: Wang et al. <sup>43</sup>

Isaia<sup>4</sup> ilustra a perda de água de uma argamassa fresca em uma junta de assentamento, demonstrando o mecanismo de interação da argamassa e dos blocos (Figura 5). A argamassa entra em contato inicialmente com o bloco inferior e adicionalmente, com o efeito da gravidade, ocorre uma ligação mais efetiva entre a junta de assentamento e o bloco inferior. Com o passar do tempo, ocorre a formação dos cristais de etringita nos poros da unidade de alvenaria, sendo estes cristais mais profundos e em maior quantidade na unidade inferior do que na superior. A

perda de água e consequentemente a formação dos cristais terão influência direta na propriedade de aderência.

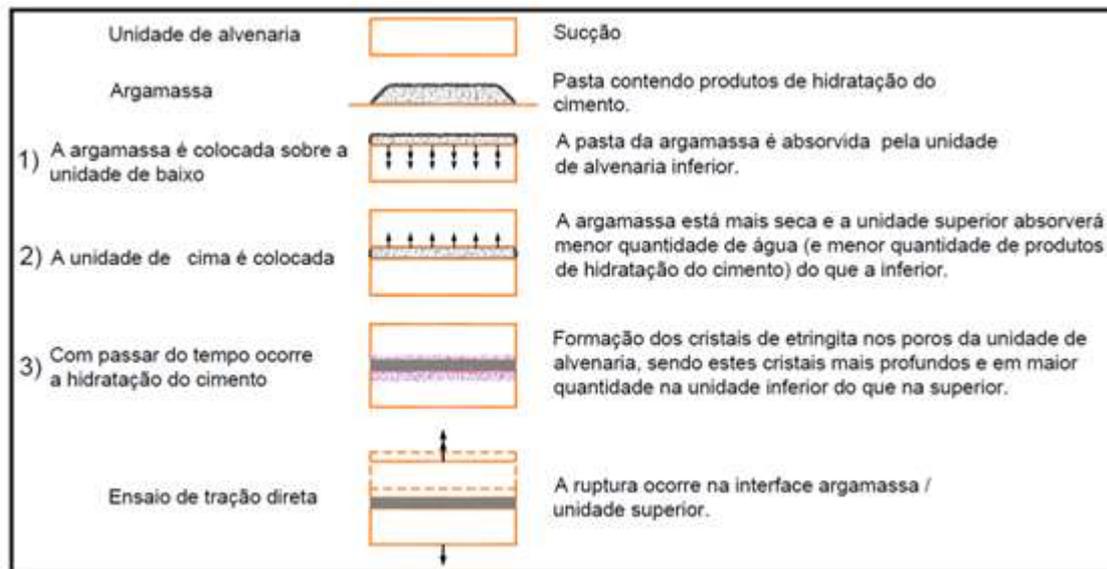


Figura 5: Interação entre argamassa de assentamento e os blocos em uma alvenaria

Fonte: Isaia <sup>4</sup>

## 2.3 PRINCIPAIS CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS

### 2.3.1 Resinas acrílicas

Apesar das resinas epóxi e de poliéster serem amplamente exploradas para produção de concreto polimérico, resinas acrílicas, como o poli-metacrilato de metila, apresentam desempenho mecânicos superiores <sup>44</sup>. Desta forma, resinas acrílicas têm sido objeto de interesse de vários estudos apresentados na literatura.

A influência das resinas acrílicas sobre argamassas modificadas com polímeros foi investigada por Aggarwal et al.<sup>11</sup>. Os autores avaliaram a cura de corpos de prova base epóxi e acrílicas e observaram que a cura úmida proporciona melhores características mecânicas do que a cura seca (ar ambiente). Essas características podem ser interessantes para certas aplicações, como materiais de reparo em ambientes úmidos e industriais. Além disso, a incorporação destes materiais melhorou a trabalhabilidade e houve um aumento de resistência à flexão e resistência à compressão. Também se observou uma diminuição da absorção de água, carbonatação e penetração de íons cloreto quando comparados à argamassa convencional.

Uma importante resina acrílica é o copolímero de estireno e éster acrílico (SAE) na forma de látex. Wang and Wang <sup>45</sup> avaliaram o uso de SAE em argamassa, através do estudo dos efeitos da redução de água e retenção de água na argamassa, correlacionando com diversas propriedades, como teor de ar incorporado, densidade, propriedades mecânicas e resistência à água. Quando SAE foi adicionado ao cimento, evidenciaram que o látex influencia o desenvolvimento da resistência à compressão, mas afeta fracamente a resistência à flexão. Como principais propriedades melhoradas obtiveram a impermeabilização e baixo encolhimento.

Rodríguez et al. <sup>46</sup> investigaram o uso de dois tipos de látex poliméricos, sendo um deles látex de éster acrílico (PAE) em misturas de argamassas com escória siderúrgica. Evidenciaram que o polímero colabora na melhora da retenção de água, permitindo reações de hidratação mais completas. Relatam que a dosagem de emulsão de látex deve ser otimizada, tendo em conta as potenciais vantagens e efeitos colaterais da utilização de polímeros em argamassas.

### **2.3.2 Agregados e cargas**

Uma variedade de tipos de agregados são usados em argamassas e concretos polimérico, como silicatos, calcário, granito, argila, quartzo, brita, carbonato de cálcio, metacaulim, cinzas volantes (*fly ash*), entre outros <sup>7,19</sup>.

O carbonato de cálcio tornou-se o mineral mais utilizado como elemento de carga nas rotas processuais para as indústrias de papel, plásticos, tintas, vidros, cerâmica, alimentação de animais, entre outras. Pode ser utilizado tanto na forma natural ou na forma precipitada. As vantagens do precipitado em relação ao carbonato de cálcio natural, estão ligadas ao índice de alvura bastante elevado e à ausência de impurezas, como quartzo, ferro, entre outras. Em geral, o carbonato de cálcio natural apresenta tamanho de partícula maior que o precipitado <sup>26, 27</sup>.

Jo et al. <sup>26</sup> em seu estudo com resinas de poliéster obtidas a partir de PET (polietileno tereftalato) reciclado, afirmaram que o emprego de carbonato de cálcio como carga apresentou melhor desempenho do que as cinzas volantes em termos de tensão de deformação e fluência.

Bignozzi et al. <sup>25</sup> prepararam novas argamassas poliméricas formuladas com plásticos reciclados para obter materiais com características mecânicas e físicas adaptadas. Como agregado fino utilizaram carbonato de cálcio com um tamanho médio de partículas de 2,5 µm. Os autores verificaram redução nas propriedades de flexão e compressão, porém ainda

comparáveis com argamassas convencionais com cimento Portland. Houve variação na condutividade elétrica dos materiais avaliados, porém ainda foram considerados isolantes.

Os calcários agrícolas também são fontes de carbonato de cálcio. A classificação brasileira atual dos calcários agrícolas é dada pela Instrução Normativa SDA/ N° 35, de 04 de julho de 2006, e seu anexo, da Secretaria de Defesa Agropecuária do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), que dividem os calcários agrícolas nas seguintes categorias, em relação ao teor de MgO (óxido de magnésio):

- Calcário calcítico - menos de 5% de MgO
- Calcário magnesiano - de 5% a 12% de MgO
- Calcário dolomítico - acima de 12% de MgO

Há pouca disponibilidade de estudos sobre a aplicação de calcário dolomítico como carga em argamassas poliméricas. No entanto, é um produto intensamente explorado pelas indústrias e que apresenta uma grande versatilidade. Dentre as aplicações pode-se citar seu uso em fundentes, matéria-prima para as indústrias de vidro, refratários, carga para tintas, indústria siderúrgica, abrasivos, corretivos de solos, entre outros<sup>47</sup>.

Por outro lado, a literatura descreve outros tipos de materiais empregados como agregados ou cargas juntamente em argamassas e concretos que possuem polímeros em sua formulação. Por exemplo, Debska & Wójcik<sup>39</sup>, produziram concreto polimérico com resina epóxi utilizando quartzo como agregado principal. Os autores substituíram parte do agregado por resíduos de borracha. As propriedades mecânicas foram afetadas negativamente, a argamassa tornou-se mais leve e flexível e, portanto, menos suscetível a danos mecânicos. Martínez-López et al.<sup>48</sup> estudaram a adição de resíduos de polímeros como agregados em argamassas poliméricas. Neste trabalho, resíduos de polímeros (PET, policarbonato e pó de pneus automotivos), substituíram parcialmente a areia em argamassa à base de poliéster. Apesar de ter ocorrido resultados inferiores em propriedades mecânicas, estes se mostraram promissores e será avaliado a modificação química com silanos para melhorar a interação da matriz polimérica e proporcionar incremento nas propriedades mecânicas. Al Menhosh et al.<sup>49</sup> estudaram o efeito da adição de metacaulim em concreto polimérico contendo látex de SBR e emulsão de acetato de polivinila. Como carga, utilizou areia como agregado fino e calcário triturado, como agregado grosso, com partículas de tamanho máximo de 10 mm. A substituição

do cimento Portland por 15% de metacaulim e 5% de polímero proporcionaram a melhoria ideal para o concreto de cimento Portland em ambas as propriedades, mecânicas e durabilidade.

Li et al.<sup>7</sup>, citado anteriormente (página 11), prepararam argamassa polimérica a partir de três látices poliméricos diferentes: látex de SBR, de SAE e de PAE e como agregado utilizaram areia. Sun et al.<sup>50</sup> também utilizaram areia em pastas de cimento contendo látex de SBR, sendo este benéfico para a trabalhabilidade de materiais à base de cimento. Ozeren Ozgul & Ozkul<sup>37</sup> prepararam argamassas com resina epóxi e utilizaram areia como agregado grosso, com tamanho de partícula entre 0,075 e 4 mm e sílica como agregado fino, com tamanho de partícula < 100 µm. Neste estudo, o endurecedor com maior funcionalidade resultou em argamassas com maior resistência mecânica. Ruiz et al.<sup>12</sup> prepararam concreto com resina epóxi e resíduo de borracha em pó proveniente de pneu, com areia de tamanho de partícula até 4mm e brita (entre 4 e 16 mm), o qual obtiveram resultados promissores em ductilidade, podendo ser um material interessante para a engenharia de terremotos. Sadrmomtazi et al.<sup>51</sup> utilizaram areia de rio com distribuição de tamanho de partícula de 0,15 à 1,18 mm e sílica pirogênica como aditivo para substituição parcial do cimento em concreto de alta performance utilizando plastificante polimérico, obtendo melhora na resistência à compressão. Moodi et al.<sup>8</sup>, já citado anteriormente (página 12), utilizaram areia como agregado quando investigaram o desempenho de concretos poliméricos contendo resinas de poliéster e epóxi e concreto modificado com látex contendo SBR e látex epoxídico.

Cinzas volantes, subproduto da queima do carvão, tem aplicação consolidada na indústria da construção civil, principalmente em argamassas cimentícias. Este tipo de carga proporciona melhora nas propriedades mecânicas e redução na absorção de água. De acordo com Shi-Cong & Chi-Sun<sup>52</sup> o uso de cinzas volantes também apresenta melhora nas propriedades mecânicas quando comparado ao metacaulim. Seus resultados apontaram que ocorreu um aumento superior da resistência à compressão, quando utilizado 15% de cinzas volantes na formulação e quando utilizado um teor de 10%, os resultados obtidos ficaram muito próximos aos resultados referentes ao uso de 15% de metacaulim. As cinzas também mostraram melhor desempenho na resistência a flexão. Gorninski et al.<sup>30</sup> também apresentam em seu estudo um ganho significativo na elasticidade em decorrência do aumento do teor de cinzas volantes em concreto polimérico base poliéster.

Patel et al.<sup>53</sup> estudaram a substituição parcial da areia por cinzas volantes em concreto leve contendo látex de SBR. Todas as misturas contendo SBR exibiram um bom desempenho

nas propriedades quando comparadas com as misturas sem látex com composições semelhantes. Em todas as combinações, as propriedades foram melhoradas significativamente pela substituição de areia por cinzas volantes, o que melhorou a interface pasta e agregado por seu efeito combinado (reatividade pozolânica e refinamento de poros do concreto).

O metacaulim (MK) é produzido a partir da calcinação do caulim, que por sua vez é obtido através do beneficiamento de argilas caulínicas, cujo teor de caulim em geral situa-se acima de 50%. Dentre os principais benefícios do uso de MK pode-se citar a diminuição do tamanho dos poros do concreto, quando misturado ao cimento tradicional<sup>30,54</sup>. O MK é constituído basicamente por compostos à base de sílica e alumina, proporcionando alta reatividade com o hidróxido de cálcio presente no concreto resultante da hidratação dos compostos do cimento. Rashad<sup>55</sup> relata que a substituição gradual de areia por MK proporciona uma argamassa cimentícia com melhor resistência à compressão e tração.

Al Menhosh et al.<sup>49</sup> relatam que a adição de metacaulim e a adição de polímero conferem ao concreto modificado ótimas propriedades mecânicas, provavelmente pela interação do polímero com o metacaulim. Na Figura 6 os autores comparam a resistência à compressão de 28 dias das amostras utilizando a mistura de polímero no ponto ótimo (razão polímero/concreto P/C = 5%), em comparativo com a amostra sem polímero (P/C = 0%), ambas utilizando 15% de MK.

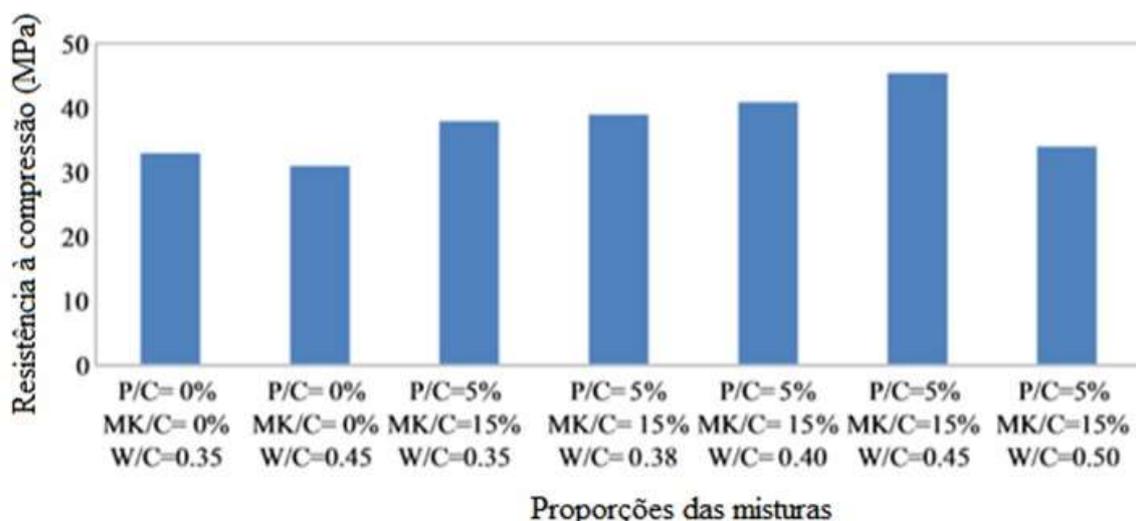


Figura 6: Resistência à compressão das amostras contendo polímero (razão polímero/concreto P/C = 5%), em comparativo com a amostra sem polímero (P/C = 0%), ambas com 15% de metacaulim (MK).

Fonte: Al Menhosh et al.<sup>49</sup>

Também encontra-se na literatura o uso de cargas ou materiais reforçantes, como fibra de vidro, fibras naturais, como piaçava, sisal e resíduos plásticos<sup>19,26,29,56,57,57-61</sup>. Em geral a incorporação destes materiais tem como principal objetivo melhorar o desempenho mecânico dos materiais.

### 2.3.3 Espessantes ou aditivos reológicos

Espessantes ou aditivos reológicos são substâncias utilizadas na formulação de produtos base aquosa, proporcionando uma consistência ideal para aplicação do produto e cobertura do substrato. Além disso os espessantes podem ajudar na suspensão dos pigmentos ou óxidos metálicos<sup>62</sup>. Existem diversos modos de classificar os espessantes. Podem ser orgânicos ou inorgânicos; solúveis, insolúveis, álcali-solúveis ou incháveis em água; naturais ou sintéticos; não-iônicos ou aniônicos; associativos ou convencionais<sup>63</sup>.

Os espessantes convencionais, obtidos por emulsão, são chamados de emulsões álcali-solúveis (ASE). Como exemplo, pode-se citar o álcool polivinílico e ácidos poliacrílicos<sup>63</sup>. Os espessantes associativos modificados hidrofobicamente, são chamados de *hydrophobically-modified alkali soluble emulsion* (HASE), ou *hydrophobically modified urethane—ethoxylate* (HEUR)<sup>63</sup>.

Os produtos álcali solúveis, ou também chamados álcali-expansíveis, relacionados com o ácido poliacrílico, estão presentes em suspensão como cadeias rígidas e emaranhadas (Figura 7). Quando o pH do meio eleva-se para aproximadamente 7, os grupos ácidos começam a dissociar-se e as cadeias de polímero desenrolam-se ou expandem-se. Em uma dissociação completa (geralmente cerca de pH 9), as cadeias alcançam uma extensão máxima e desenvolvem uma viscosidade no sistema através de um emaranhado molecular. Os produtos hidrofobicamente modificados possuem grupos ácidos e outros grupos secundários menos polares ligados ao longo da cadeia principal do polímero. Quando o pH é elevado, as cadeias desenrolam-se e incham por dissociação. Contudo, os grupos secundários também interagem, ou associam-se, uns com os outros e com os componentes da fórmula. Este mecanismo de espessamento duplo é muito importante para o desempenho do aditivo na formulação final (Figura 8)<sup>64</sup>.

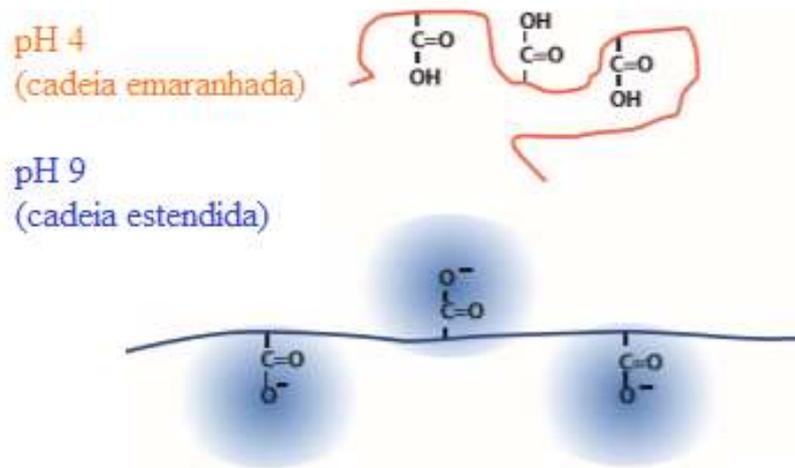


Figura 7: Representação da cadeia do ácido poliacrílico em pH 4 (cadeia rígida emaranhada) e em pH 9 (cadeia estendida).

Fonte: Elementis Specialties<sup>64</sup>

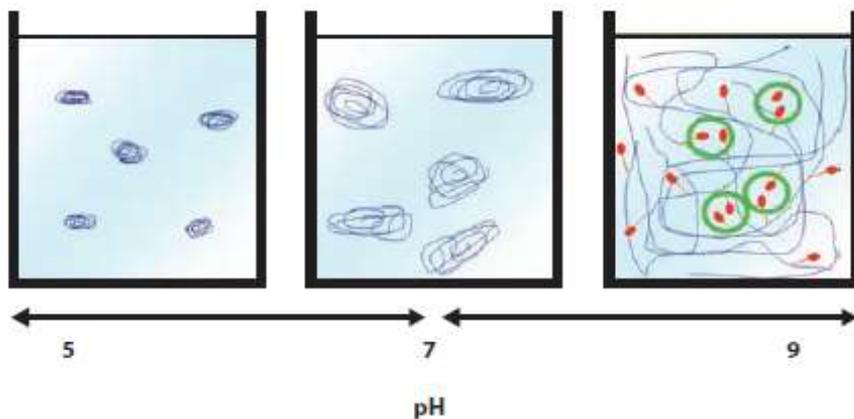


Figura 8: Representação esquemática do espessamento das cadeias do ácido poliacrílico em função do aumento do pH.

Fonte: Elementis Specialties<sup>64</sup>

### 2.3.4 Coalescentes

A capacidade de formação de filme polimérico e sua homogeneidade são importantes para garantir o desempenho mecânico de sistemas aquosos. Agentes coalescentes são substâncias que agem como um plastificante da fase polimérica, diminuindo a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), promovendo a melhor difusão do polímero durante a evaporação do meio líquido e auxiliando o processo de formação de filme<sup>65,66</sup>.

Os coalescentes precisam ter parâmetros de solubilidade compatíveis com os parâmetros de solubilidade da fase polimérica a ser plastificada e não podem desestabilizar as partículas do polímero e outros componentes presentes numa formulação. A capacidade de redução da Tg do polímero formador de filme pela atuação do coalescente (poder plastificante), está relacionada à sua habilidade de interagir com as cadeias poliméricas e aumentar o volume livre entre elas. Esse aumento do volume livre entre as cadeias resulta em um aumento da mobilidade das cadeias poliméricas que favorece a deformação das partículas do polímero, a interdifusão das cadeias poliméricas e a formação de um filme contínuo e homogêneo<sup>60</sup>.

### **2.3.5 Outros aditivos**

Outras substâncias aditivas podem ser agregadas às formulações para conferir propriedades específicas. Para proteção do polímero contra a degradação ocasionada pela ação de agentes como o ozônio, temperatura, radiação ultravioleta (UV) ou luz visível, pode-se utilizar antioxidantes nas formulações<sup>62</sup>.

Alguns materiais também necessitam a adição de estabilizadores, como por exemplo, os materiais à base dispersão aquosa de policloropreno. Durante o seu armazenamento, o pH tende a reduzir, o que pode ocasionar uma redução na estabilidade. Adicionando-se um estabilizador como o hidróxido de potássio, por exemplo, se consegue ajustar o pH destas dispersões<sup>62</sup>.

Em alguns casos pode-se utilizar antiespumante durante a formulação, principalmente em produtos que necessitam de agitação mais vigorosa. A redução das bolhas de ar formadas durante a agitação pode melhorar a dispersão dos demais componentes da formulação<sup>62</sup>.

Nas formulações de concreto polimérico, é possível encontrar na literatura outros materiais inseridos na formulação. Dentre alguns aditivos empregados, pode-se citar óxido de alumínio, sulfato de cálcio e alumina trihidratada<sup>29</sup>, usados para reduzir a flamabilidade.

## **2.4 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS**

A resistência mecânica dos materiais poliméricos é de grande importância e interesse científico e tecnológico, devido aos requisitos e/ou exigências que os diversos polímeros existentes devem atender na maior parte de suas aplicações. Valores de propriedades mecânicas, tais como resistência à tensão, módulo de elasticidade, alongação, entre outros, podem servir

como base de comparação de desempenho mecânico dos diferentes polímeros, assim como para a avaliação dos efeitos decorrentes da modificação do polímero-base (reforços, cargas, aditivos, plastificantes), para especificações.

As argamassas são caracterizadas através de propriedades tanto no estado fresco quanto endurecido. Além disso, diferentes técnicas podem ser utilizadas, dependendo do material, fase do desenvolvimento do projeto e propriedade a ser investigada. Selmo et al.<sup>67</sup> publicou um trabalho apresentando um panorama das especificações e metodologias de ensaio de argamassas industrializadas de múltiplo uso, apontando como fundamentais as propriedades de endurecimento e aderência. A Tabela 2 apresenta as essas propriedades e suas aplicações usuais.

Tabela 2: Propriedades das argamassas de revestimento e assentamento, listadas nos projetos de norma Europeia.

Propriedades indicadas		Aplicações usuais <sup>a</sup>	
		Assentamento de alvenarias	Revestimento de paredes e tetos
Estado anidro	Dimensão máxima dos grãos	-	X
	Teor de água de amassamento	-	X
	Rendimento	-	X
Estado fresco	Consistência	X	X
	Densidade de massa aparente	X	X
	Teor de ar	X	X
	Retenção de água	X	X
	Tempo de aplicação	X	X
Estado endurecido	Densidade de massa específica	-	X
	Resistência à tração na flexão	-	X
	Resistência à compressão	X	X
	Módulo de elasticidade	-	X <sup>b</sup>
	Resistência de aderência	X <sup>b</sup>	-
	Teor de cloretos	X <sup>b</sup>	-
	Durabilidade	X <sup>b</sup>	-

<sup>a</sup>Não estão aqui incluídas as propriedades para argamassas de isolamento térmico, acústica ou com propriedades diferenciadas quanto a gelo/degelo ou resistência ao fogo; <sup>b</sup>Propriedades listadas mas ainda sem métodos de ensaio, segundo os projetos indicados.

Fonte: Selmo<sup>67</sup>.

Uma das propriedades citadas na Tabela 2 como fundamental é a resistência à compressão. Diversos trabalhos têm sido publicados avaliando-se a influência do uso de polímero na resistência à compressão de argamassas. El-Yamany et al.<sup>68</sup> avaliaram o uso de diferentes percentuais de látex de estireno e butadieno (SBR) e éster acrílico (AE) em argamassas não cimentícias álcali ativadas, contendo escória. Os resultados de compressão foram influenciados pela adição de látex, no qual as argamassas contendo látex apresentaram valores superiores de resistência à compressão, quando comparados com uma argamassa isenta de látex (Figura 9), pois o látex polimérico diminui a ocorrência de fissuras.

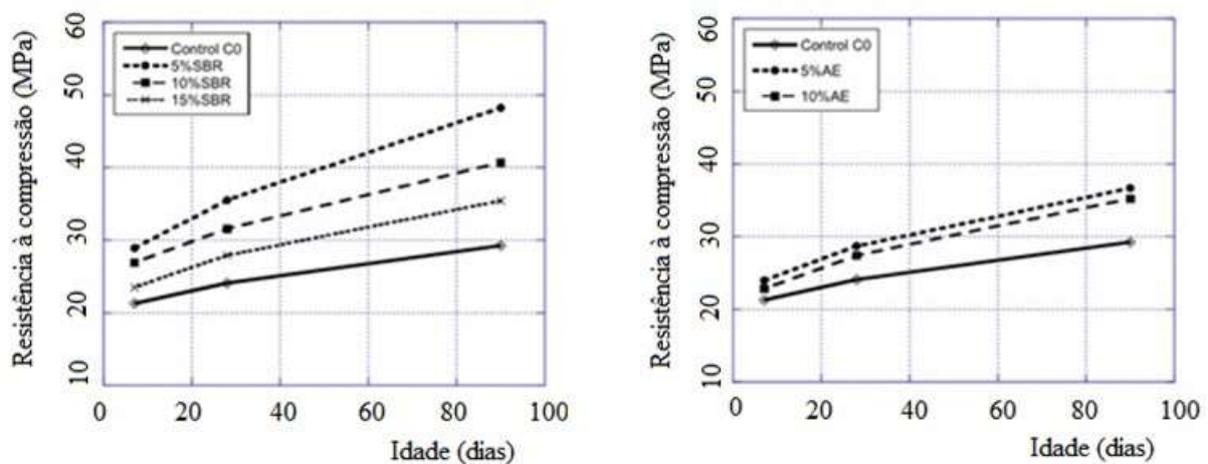


Figura 9: Resultados de compressão de argamassas contendo látex de (a) SBR e (b) éster acrílico (AE), comparando-se diferentes percentuais de adição com uma amostra controle, Control C0, isenta de látex.

Fonte: El-Yamany et al.<sup>68</sup>

Já em argamassas cimentícias, Figura 10, obteve-se uma diminuição da força de compressão quando se adicionou látex. Vo and Plank<sup>69</sup> evidenciaram estes resultados avaliando o uso de látex em argamassa cimentícia, em comparação com uma argamassa padrão cimentícia. A resistência à compressão da argamassa sem látex foi maior do que em argamassas com três diferentes tipos de látex de etileno-acetato de vinila, látex natural e látex natural modificado. Em contrapartida, a resistência à tração da argamassa de referência, sem látex, foi menor que as poliméricas. Devido à sua capacidade de formar filmes poliméricos homogêneos e flexíveis, o uso de látex em argamassas confere coesão e adesão de argamassas em diversos substratos. Assim, o polímero atua como ligante e confere melhoria nas propriedades adesivas.

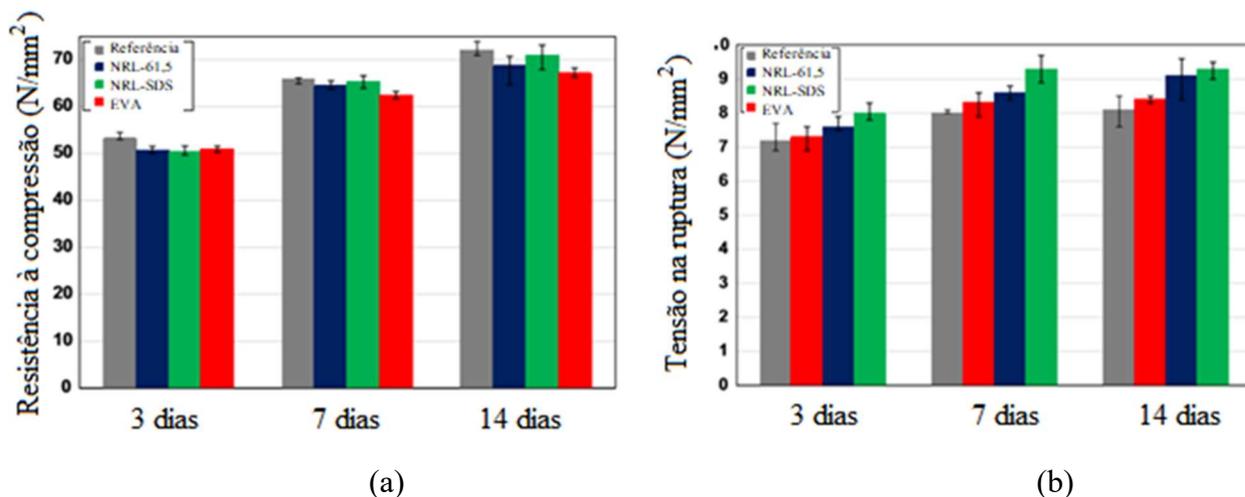


Figura 10: Resultados de (a) compressão e (b) tração de argamassas cimentícias contendo látex de borracha natural (NRL) e látex de EVA em comparativo com uma referência sem látex.

Fonte: Vo and Plank<sup>69</sup>

Wang & Wang<sup>45</sup> também evidenciaram redução da força de compressão em função do aumento do percentual de látex de éster acrílico e estireno em argamassa cimentícia (Figura 11). Porém, os autores ressaltam que os resultados de seu estudo apresentaram valores superiores aos reportados na literatura utilizando outros polímeros.

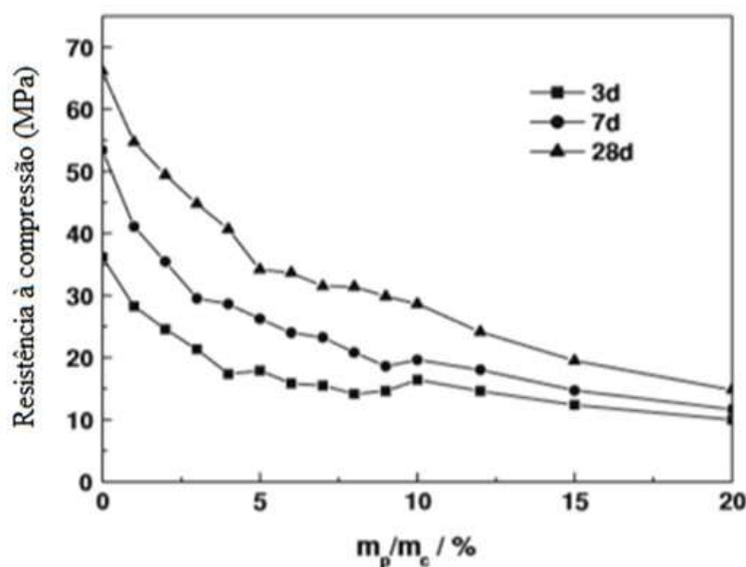


Figura 11: Resultados de compressão de argamassa cimentícia contendo látex de éster acrílico e estireno (até 20% da razão polímero (P)/cimento (C)) em comparativo com uma referência sem látex (0%  $m_p/m_c$ ).

Fonte: Wang & Wang<sup>45</sup>

A Tabela 3 apresenta alguns requisitos necessários para argamassa colante, como resistência de aderência à tração, conforme ABNT NBR 14081-1<sup>70</sup>.

Tabela 3: Propriedades fundamentais para argamassas colantes.

Requisito		Método de ensaio	Unidade	Critério		
				AC I	AC II	AC III
Resistência de aderência à tração aos 28 dias, em função do tipo de cura	Cura normal	ABNT NBR 14081-4 <sup>71</sup>	MPa	≥ 0,5	≥ 0,5	≥ 1,0
	Cura submersa			≥ 0,5	≥ 0,5	≥ 1,0
	Cura em estufa				≥ 0,5	≥ 1,0

Fonte: ABNT NBR 14081-1<sup>70</sup> e ABNT NBR 14081-4<sup>71</sup>.

As Tabelas 4 e 5 apresentam os requisitos de resistência à compressão e resistência potencial de aderência à tração, respectivamente, para argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos conforme ABNT NBR 13281<sup>72</sup>.

Tabela 4: Requisitos de resistência à compressão.

Classe	Resistência à compressão (MPa)	Método de ensaio
P1	≤ 2,0	ABNT NBR 13279
P2	1,5 a 3,0	
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	> 8,0	

Fonte: ABNT NBR 13281<sup>72</sup>.

Tabela 5: Requisitos de Resistência potencial de aderência à tração.

Classe	Resistência potencial de aderência à tração (MPa)	Método de ensaio
A1	≤ 0,20	ABNT NBR 15258
A2	≥ 0,20	
A3	≥ 0,30	

Fonte: ABNT NBR 13281<sup>72</sup>.

No Brasil ainda existe carência de normas técnicas para argamassas poliméricas não cimentícias. Recentemente a ABNT publicou a NBR 16590<sup>73</sup> que estabelece requisitos para composto polimérico para assentamento de alvenaria de vedação (Parte 1) e métodos de ensaio (Parte 2). Considerando que este material é empregado para a formação de sistemas verticais de vedação interna e externa, também devem ser atendidos todos os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 15575-4<sup>74</sup>, sendo resistência mecânica, estanqueidade à passagem de água e pressão de vento, desempenho acústico, desempenho térmico e resistência ao fogo, observando as condições de análise referentes à caracterização de bloco, espessura de revestimento, argamassa de revestimento e composto polimérico para assentamento.

Conforme já apresentado por Selmo et al.<sup>67</sup>, para materiais que são utilizados no estado fresco é de grande relevância a realização de ensaios nesta fase, apesar do desempenho mecânico estar mais diretamente relacionado com o estado endurecido do produto final.

A reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria por meio da análise, entre outras, das respostas de um material à aplicação de uma tensão ou de uma deformação. Os materiais poliméricos sólidos, fundidos ou em solução, podem ser considerados como um tipo especial de material, já que apresentam ao mesmo tempo respostas características de materiais viscosos e elásticos. Essa propriedade é conhecida como viscoelasticidade e é inerente a materiais de elevada massa molar, como os polímeros<sup>75</sup>.

No caso da reologia de suspensões, as partículas sólidas dispersas no fluido perturbam as linhas de fluxo aumentando a resistência do sistema ao escoamento, ou seja, elevando a viscosidade. As características reológicas das suspensões são afetadas por diversos fatores, como: concentração volumétrica de sólidos, temperatura, distribuição granulométrica e morfologia das partículas, entre outros.

Em argamassas, é possível avaliar as propriedades reológicas no estado fresco, pastoso. Devido ao alto teor de partículas sólidas e a forte interação entre as mesmas, o comportamento reológico desvia do modelo ideal de Newton para comportamentos não-lineares<sup>75,76</sup>, tendo-se o comportamento pseudoplástico quando a viscosidade da suspensão diminui com o aumento da taxa (ou tensão) de cisalhamento e o dilatante quando ocorre o aumento da viscosidade do sistema com a taxa de cisalhamento.

Uma propriedade avaliada no comportamento reológico de um material é a tensão de escoamento (*yield stress*), que é tensão mínima necessária para que se inicie o fluxo. Quando submetidos a tensões abaixo da de escoamento, os materiais comportam-se como sólidos rígidos<sup>75</sup>. Os materiais que apresentam pseudoplasticidade ou dilatância e que necessitam de uma tensão crítica para começar a escoar são denominados fluidos de Bingham. Sistemas poliméricos altamente carregados com partículas inorgânicas normalmente apresentam este comportamento.

Os ensaios reológicos de argamassas, geralmente, são realizados por ensaios de mesa de fluidez (*flow table*), *dropping ball* ou penetrômetros<sup>77,78</sup>. No entanto, nestes ensaios tem-se apenas uma taxa de cisalhamento e permitem a medição indireta de apenas um único parâmetro

reológico, como a tensão de escoamento ou a viscosidade. Logo, não mostram o perfil reológico de uma argamassa<sup>79,80</sup>.

O teste de mesa de fluidez consiste em medir o espalhamento horizontal de uma argamassa moldada na forma de um cone padrão, onde o material é submetido a sucessivos impactos após a retirada do cone. O método apresenta a vantagem de ser dinâmico e avalia qualitativamente a tendência à segregação de fases no sistema, em decorrência da aplicação de impactos. Entretanto, os resultados obtidos não dissociam a contribuição de cada um dos parâmetros reológicos (viscosidade e tensão de escoamento), e são apresentados quantitativamente na forma de índice de consistência ou porcentagem de espalhamento e não em termos de unidades reológicas fundamentais<sup>77,78</sup>. Outra desvantagem do método quando utilizado para caracterização de argamassas é que não reproduz as condições de aplicações práticas do material, como lançamento e cisalhamento.

O ensaio de *dropping ball* é baseado na queda livre de uma esfera padronizada sobre uma argamassa moldada em um cilindro metálico. A Figura 12 apresenta um esquema do ensaio. Uma esfera padronizada cai de uma altura determinada sobre a massa confinada em um cilindro e os parâmetros de variação das alturas, indicadas no quadro a direita são avaliados, gerando-se o parâmetro Índice de Penetração (IP) ou índice de retenção. É um ensaio geralmente relacionado à tensão de escoamento do material, mas deve-se levar em conta que existe a influência do impacto da bola sobre o material e que a densidade da argamassa influencia bastante a medida.

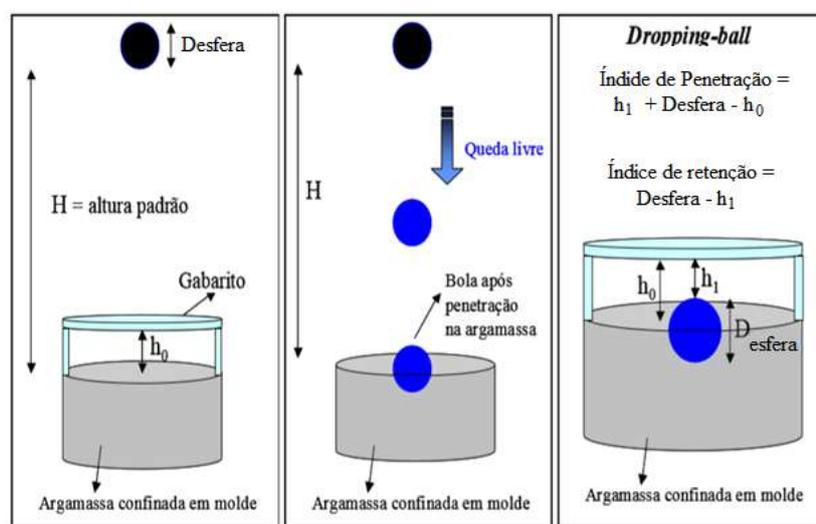


Figura 12: Ilustração do ensaio de *dropping ball*.

Fonte: Adaptado de Cardoso<sup>81</sup> e BS4551<sup>82</sup>

Os métodos mais empregados, de baixo custo e fácil execução, já citados nesta seção, são de extrema importância para a avaliação da aplicabilidade dos materiais. Porém, a avaliação reológica fica limitada. Estes ensaios não dissociam a contribuição da tensão de escoamento e da viscosidade na resistência ao fluxo e são denominados monopontos, pois normalmente se utiliza apenas uma mesma taxa de solitação<sup>40</sup>.

Uma técnica mais amplamente utilizada para avaliação de argamassas é a técnica de *squeeze-flow*. Este método tem sido usado e reportado por diversos autores como um método robusto que pode simular o processo de mistura, transporte e aplicação de uma argamassa, utilizando-se diferentes taxas de cisalhamento<sup>51,79,80,83</sup>. No Brasil, a metodologia foi publicada em norma no ano de 2010<sup>84</sup>. Na Figura 13 é apresentado uma imagem de uma argamassa avaliada por *squeeze-flow*, antes (a) e após (b) a compressão<sup>78</sup>.

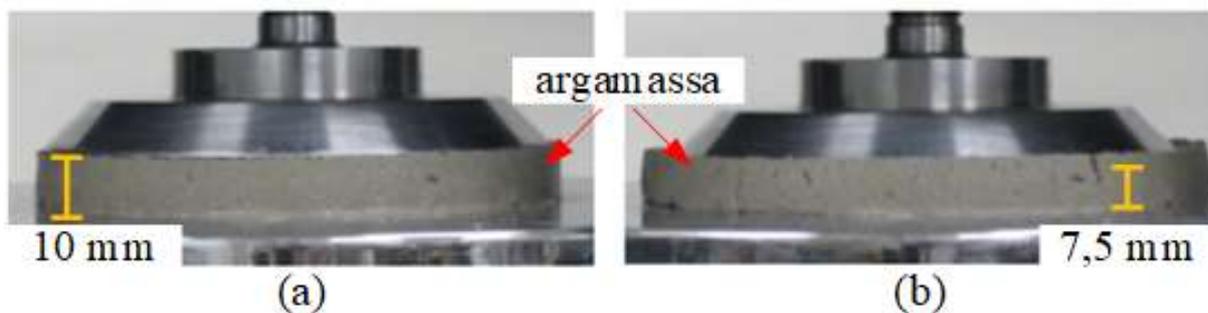


Figura 13: Geometria utilizada no ensaio de *squeeze-flow* em argamassas de revestimento. Dimensões da argamassa moldada: (a) altura inicial = 10 mm; diâmetro inicial = 101 mm; (b) altura final = 7,5 mm.

Fonte: adaptado de Cardoso<sup>78</sup>

Estudos citados na literatura reportam que é uma técnica simples e que oferece boa repetibilidade, gerando resultados de força de compressão em função de tempo e do deslocamento<sup>77,78,80,85</sup>. Esta técnica também pode gerar parâmetros reológicos, como a viscosidade e tensão de escoamento<sup>77</sup>. A Figura 14 apresenta um esquema do ensaio.

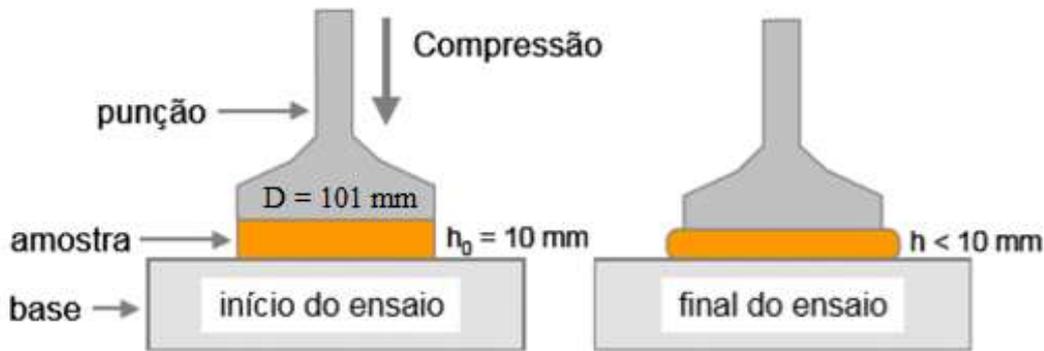


Figura 14: Representação esquemática do ensaio de *squeeze-flow* identificando a condição de início e final de ensaio.  $D$  = diâmetro do punção (placa superior) = diâmetro da amostra;  $h_0$  = distância inicial entre o punção e a base (placa inferior) = altura inicial da amostra;  $h$  = altura da amostra variável em função do deslocamento do punção superior.

Fonte: Adaptado de Cardoso et al.<sup>76</sup>

O perfil típico de um ensaio de *squeeze-flow* é expresso numa curva de variação da carga (ou tensão) versus deslocamento (compressão) da amostra, Figura 15. A curva de carga aplicada versus deformação da amostra apresenta três estágios principais: no primeiro estágio, a pequenas deformações, o material comporta-se como um sólido, apresentando deformação elástica linear e está relacionado à tensão de escoamento do material; no estágio II, um pequeno aumento na carga, provoca grandes deslocamentos. A compressão resulta em uma deformação radial elongacional e de cisalhamento, as forças que mantinham o material sob comportamento elástico foram superadas e assim, o mesmo flui por deformação plástica e/ou viscosa, dependendo das suas características. Esta região é conhecida como região intermediária; e no último estágio (III), o material apresenta uma resistência à deformação, ou seja, necessita-se grande aumento da força para pequenas deformações, ocorrendo um aumento expressivo da carga necessária para prosseguir a deformação do material<sup>78,80</sup>.

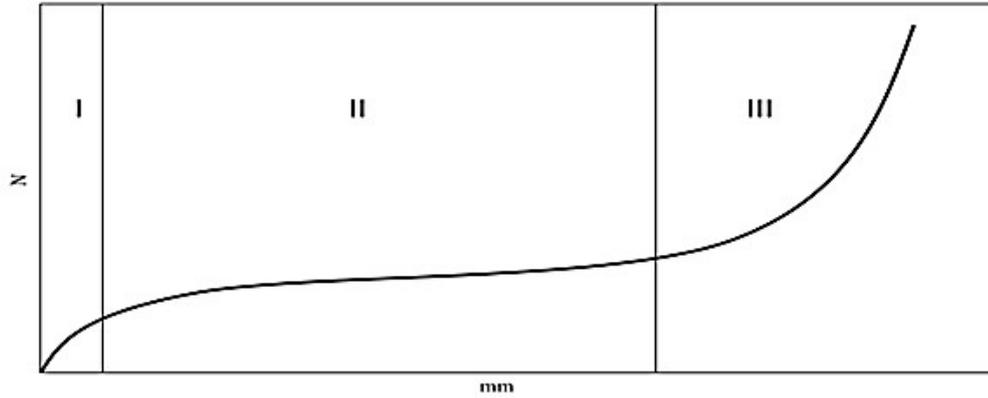


Figura 15: Curva típica da carga (N) versus deslocamento (mm) no teste de *squeeze-flow*, ilustrando os 3 estágios. I: fase de deformação elástica linear; II: fase de escoamento; III: fase de enrijecimento.

Fonte:Cardoso et al.<sup>80</sup>

Cardoso et al.<sup>77</sup> estimaram a viscosidade de argamassas de revestimento através do ensaio de *squeeze-flow*. A taxa de deformação extensional biaxial ( $\dot{\epsilon}_B$ ) é diretamente proporcional a metade da taxa de deformação vertical de Hencky ( $\dot{\epsilon}_H$ ), como apresentado na equação 1.

$$\dot{\epsilon}_B = \frac{\dot{\epsilon}_H}{2} = \frac{v}{(2h)} \quad \text{Equação (1)}$$

onde:  $h$  é a altura instantânea da amostra,  $v$  é a velocidade de deslocamento da placa superior. A viscosidade extensional é definida como a razão entre a tensão de extensão biaxial ( $\sigma_B$ ), que é a carga de compressão dividida pela área da placa superior, e a taxa de deformação extensional. A viscosidade extensional ( $\eta_B$ ) pode ser calculado pela equação 2, onde a variável  $L$  é a carga,  $h_0$  é a altura inicial e  $R$  é o raio da amostra.

$$\eta_B = \frac{\sigma_B}{\dot{\epsilon}_B} = 2L \left[ \frac{h_0 - (vt)}{v\pi R^2} \right] \quad \text{Equação (2)}$$

Conforme descrito por Cardoso et al.<sup>77</sup> o método de *squeeze-flow* é bastante sensível a variações no material, sendo que a efetividade da mistura de uma argamassa tem grande influência no comportamento reológico e, conseqüentemente, nos resultados obtidos por *squeeze-flow*. Na Figura 16 Cardoso apresenta variações dos resultados frente a diferentes métodos de mistura. Ao comparar misturas realizadas a partir de um procedimento manual (Figura 16 (a)) e outra mistura realizada seguindo os procedimentos recomendados pela ABNT NBR 13276 (Figura 16 (b)) os resultados demonstraram que argamassas misturadas

manualmente são mais difíceis de serem deformadas e com baixa repetibilidade, indicando um material mal misturado. A heterogeneidade do sistema ficou evidenciada pela evolução aleatória do comportamento reológico observado após 60 minutos (Figura 16 (d) e (e)). Na prática, uma argamassa com esse comportamento seria mais difícil de ser aplicada, com significativa variação no comportamento reológico entre bateladas e, provavelmente, com evolução microestrutural bastante heterogênea resultando num revestimento com propriedades diferentes ao longo da fachada.

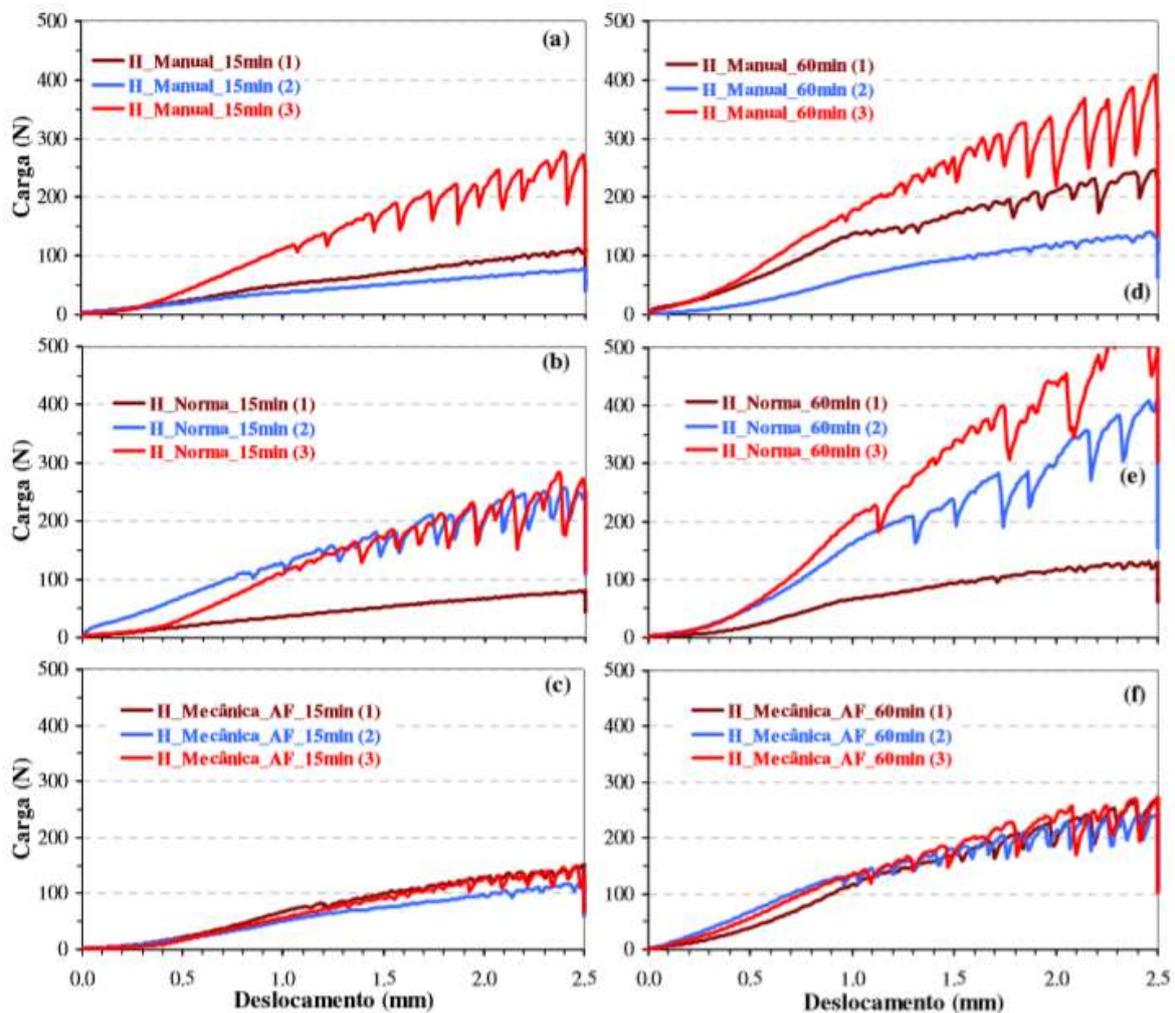


Figura 16: Resultados de *squeeze-flow* ilustrando a influência do tipo de mistura realizada em laboratório no comportamento reológico de uma argamassa industrializada. (a) e (d) – Manual, mistura manual sem procedimento padronizado; (b) e (e) – Norma, mistura de acordo com a norma NBR 13276; (c) e (f) – Mecânica AF, mistura mecânica em argamassadeira com adição fracionada de água.

Fonte: Cardoso et al.<sup>78</sup>

Entretanto, quando a argamassa foi submetida à mistura com adição de água de forma fracionada, o processo foi capaz de fornecer energia suficiente para desaglomeração e homogeneização da composição. Os resultados de *squeeze-flow* nas Figuras 16(c) e (f), demonstram um comportamento reológico constante entre diferentes bateladas, sendo uma argamassa mais fácil de ser espalhada de acordo com os menores níveis de carga se comparada às amostras preparadas com os outros procedimentos de mistura. O comportamento reológico da composição modifica-se pouco até 60 minutos e a dispersão dos resultados é muito pequena, indicando uma consolidação gradual e homogênea do material. Portanto, o fato do método ser altamente sensível à mistura possibilita sua utilização para avaliar a efetividade de processos de mistura aplicados às argamassas.

Azevedo et al.<sup>86</sup> utilizaram a técnica de *squeeze-flow* para avaliar a influência do uso de resíduos em substituição ao cimento e areia em argamassas. Nesta avaliação (Figura 17) evidenciaram que a adição de resíduo reduziu a força máxima aplicada devido à incorporação de ar gerada pela adição do resíduo, quando comparado com um padrão de referência (nomeada ACRef).

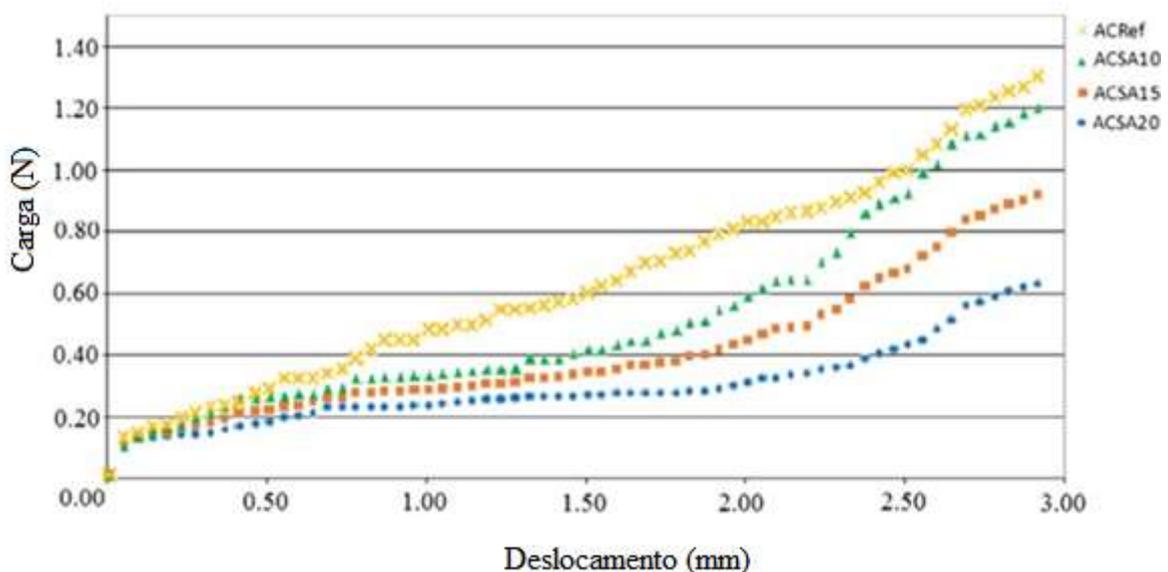


Figura 17: Curvas de carga (N) versus deslocamento (mm) de argamassas produzidas com substituição da areia por resíduos.

Fonte: Azevedo et al.<sup>86</sup>

### **3 PARTE EXPERIMENTAL**

#### **3.1 MATÉRIAS-PRIMAS**

As matérias-primas abaixo foram utilizadas na preparação das argamassas de base polimérica:

- Látex de éster acrílico e estireno
- Calcário dolomítico
- Espessante acrílico alcali-expansível hidrofobicamente modificado
- Hidróxido de amônio
- Água
- Biocida de uso industrial à base de bronopol e isotiazolizona
- Coalescente de uso industrial à base de hidrocarbonetos

As duas principais matérias-primas presentes na formulação foram caracterizadas, o látex de éster acrílico e estireno e o calcário dolomítico. Para o látex foram determinados a viscosidade, teor de sólidos, pH, temperatura mínima de formação de filme, inchamento em água, temperatura de transição vítrea e foram realizadas caracterizações por ressonância magnética nuclear de hidrogênio, espectroscopia de absorção no infravermelho e análise termogravimétrica (TGA). Para o calcário, obteve-se a granulometria e curva granulométrica e foram realizadas caracterizações por fluorescência de raios X e análise termogravimétrica.

##### **3.1.1 Viscosidade Brookfield**

A viscosidade do látex foi determinada em viscosímetro Brookfield DV-I +, utilizando sensor de cisalhamento 4, rotação de 10 rpm e temperatura de 25 °C. O resultado obtido foi uma média entre 3 medições.

##### **3.1.2 Teor de sólidos**

O teor de sólidos do látex foi obtido através da secagem de aproximadamente 0,6 g de material em analisador de umidade com aquecimento por infravermelho, modelo MB45, marca

Toledo. A amostra permaneceu à 150 °C durante 20 min até peso constante, por gravimetria. O resultado é a média entre 3 determinações.

### 3.1.3 Temperatura mínima de formação de filme (TMFF)

Temperatura Mínima de Formação de Filme (TMFF) é a temperatura na qual se constata visualmente a formação de um filme polimérico contínuo, incolor e livre de fissuras. A TMFF foi determinada através da aplicação de uma camada de látex de espessura definida sobre uma placa de vidro munida de um gradiente de temperatura em toda a sua extensão, seguindo a norma ASTM D2354-98<sup>77</sup>. O gradiente de temperatura da placa é escolhido em função da Tg do polímero. A Figura 18 apresenta uma imagem do equipamento. O resultado é a média entre 2 determinações.



Figura 18: Imagem de um equipamento de determinação da TMFF.

Fonte: BrasEq<sup>87</sup>

### 3.1.4 Espectroscopia de absorção no infravermelho

A caracterização do látex foi realizada em um espectrômetro modelo Cary 630 FTIR, marca Agilent, utilizando-se ATR (reflexão total atenuada) para confirmação dos grupos funcionais. Foram realizadas 32 varreduras na região entre 4000 e 650  $\text{cm}^{-1}$ .

### 3.1.5 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

A temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) do látex foi determinada por DSC utilizando-se um equipamento de análise térmica DSC Q2000, TA Instruments. Utilizou-se uma taxa de aquecimento de 20 °C/min e fluxo de nitrogênio (70 mL/min). A temperatura inicial foi de -20 °C e a final foi de 180 °C. Foram realizados dois ciclos de aquecimento, sendo que o resultado foi obtido no segundo ciclo.

### 3.1.6 Ressonância magnética nuclear (RMN)

O látex também foi caracterizado por espectroscopia de Ressonância Magnética Nuclear de  $^1\text{H}$  em equipamento Varian 400 MHz para se comprovar qualitativamente a natureza química do polímero. O espectro foi obtido de um filme inchado em clorofórmio deuterado.

### 3.1.7 Inchamento em água

Para avaliação do comportamento do polímero de éster acrílico e estireno, após a remoção da água do látex e seco, este foi imerso em água, e seu grau de inchamento avaliado a 30°C, em banho termostatizado, por 30 dias. Após o filme inchado, foi secado superficialmente e pesado. A partir da massa de água absorvida, calculou-se o grau de inchamento (Q) através da equação 3.

$$Q = \frac{\text{massa de solvente absorvida}}{\text{massa da amostra seca}} \quad \text{Equação (3)}$$

### 3.1.8 Granulometria

A granulometria do calcário foi determinada através de dois métodos: Difração a Laser e fracionamento em peneiras acopladas a um agitador eletromagnético. A série de peneiras utilizadas foram, em Mesh: 20, 28, 48, 00, 150, 200, 325, 500 e 635.

A distribuição do tamanho médio das partículas foi obtida através do Analisador Cilas, modelo 1180 líquido, obtendo-se também os valores da frequência da distribuição de tamanho, D10%, D50% e D90%, em  $\mu\text{m}$ , os quais se referem às médias dos diâmetros de partículas nos intervalos abaixo de 10, 50 e 90% na curva de distribuição de tamanho.

### **3.1.9 Fluorescência de raios X**

A composição química do calcário foi avaliada por Espectrometria de fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda (WDXRF), em um equipamento Panalytical, modelo Axios Max e Espectrometria de Absorção atômica, equipamento Thermo Scientific, modelo iCE 3000.

### **3.1.10 Análise termogravimétrica (TGA)**

As análises foram realizadas em um equipamento STA 8000, Perkin Elmer, a uma taxa de aquecimento de  $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ , no intervalo de  $25\text{ }^\circ\text{C}$  a  $850\text{ }^\circ\text{C}$  sob atmosfera de nitrogênio.

## **3.2 PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS POLIMÉRICAS**

Para a definição das argamassas a serem preparadas e avaliadas partiu-se de um percentual inicial de látex, baseado na literatura<sup>24</sup> e foram feitos sucessivos incrementos de 2% até se atingir 10% a mais em relação ao percentual inicial. Os incrementos foram feitos em relação à massa total de látex. Na Tabela 6 segue o descritivo das argamassas.

Tabela 6: Descritivo das argamassas poliméricas preparadas.

Identificação	Descrição
IL	Amostra referência com o % inicial de látex
2 - IL	Argamassa com aumento de 2% em relação ao % inicial de látex
4 - IL	Argamassa com aumento de 4% em relação ao % inicial de látex
6 - IL	Argamassa com aumento de 6% em relação ao % inicial de látex
8 - IL	Argamassa com aumento de 8% em relação ao % inicial de látex
10 - IL	Argamassa com aumento de 10% em relação ao % inicial de látex

O látex de éster acrílico e estireno, a água, o biocida e o agente coalescente foram misturados sob agitação mecânica por 15 minutos. Na sequência, adicionou-se o espessante, mantendo-se a agitação por mais 5 minutos, seguindo-se a adição de hidróxido de amônio. Por último, incorporou-se o calcário, prosseguindo com agitação até completa homogeneização do sistema. A velocidade angular da haste giratória foi de 350 rpm. A Figura 19 apresenta o equipamento e a aparência da argamassa durante o processo de mistura.

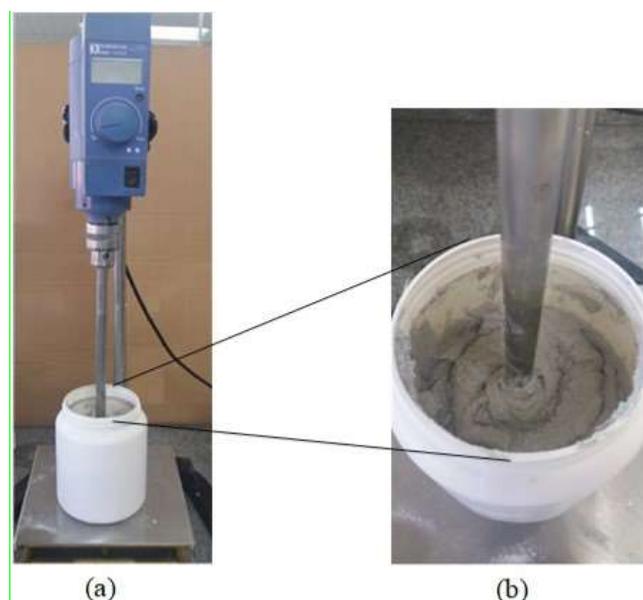


Figura 19: Preparação da argamassa polimérica. (a) agitação mecânica a 350 rpm em temperatura ambiente; (b) aparência da argamassa polimérica durante a agitação mecânica.

### **3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS**

#### **3.3.1 Avaliação reológica por *dropping ball***

O comportamento reológico das argamassas foi avaliado a partir da sua consistência obtida por *dropping ball*, cujo esquema já foi apresentado na Figura 12 do item 2.4. O resultado é uma média de 5 determinações. As amostras foram ambientadas na temperatura de 23 °C +/- 2 °C.

#### **3.3.2 Avaliação reológica por *squeeze-flow***

Para a realização deste ensaio utilizou-se uma máquina universal de ensaios, JJ Lloyd Instruments - M5K munida de uma célula de carga de 5kN. A geometria utilizada para a amostra foi de um cilindro de argamassa fresca com 101 mm de diâmetro e 10 mm de altura, obtida dentro de um molde plástico. Duas velocidades de deslocamento foram utilizadas, 0,1 e 3 mm/s, com um deslocamento máximo de 9 mm. As medidas foram feitas em triplicata e ensaiadas na temperatura de 23 °C +/- 2 °C. Como referência foi utilizada a ABNT NBR 15839<sup>84</sup>.

#### **3.3.3 Resistência de aderência à tração**

A resistência de aderência à tração foi avaliada em uma máquina universal de ensaios EMIC modelo DL 500 munida de uma célula de carga de 5000 N. A Figura 20 (a-g) apresenta esquematicamente o processo utilizado na preparação dos corpos de prova. A argamassa foi aplicada em corpos de prova de cerâmica, previamente cortados nas dimensões 50 mm x 50 mm. A cerâmica utilizada é do tipo comercial com Qualidade A (ótima resistência à produtos químicos) e PEI 4 (Produto recomendado para ambientes residenciais (todas as dependências) e comerciais com alto tráfego)<sup>71</sup>. Para fixar o corpo de prova cerâmico na máquina de ensaios, foi colado um suporte metálico. Para aplicação da argamassa utilizou-se uma matriz com o intuito de estabelecer uma camada com espessura padrão para todos os corpos de prova.

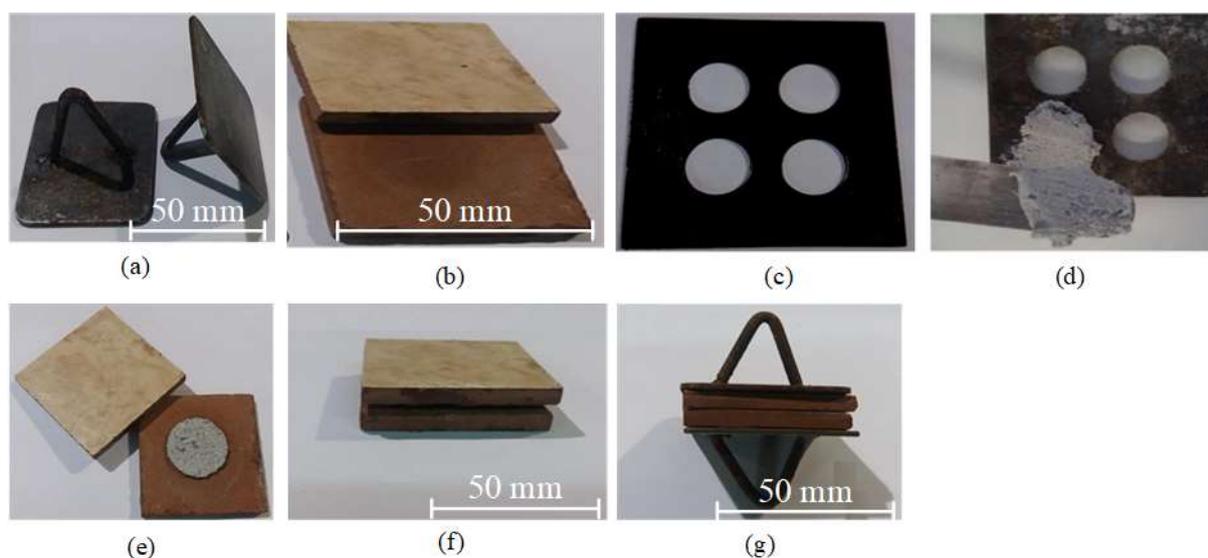


Figura 20: Imagens das etapas de preparação dos corpos de prova para o teste de resistência de aderência à tração: (a) suporte metálico; (b) placas cerâmicas 50 mm x 50 mm; (c) matriz para aplicação da argamassa; (d) aplicação da argamassa; (e) argamassa aplicada na cerâmica; (f) cerâmicas unidas e (g) corpo de prova com o suporte.

Os corpos de prova munidos do suporte metálico foram secos em estufa de ar circulante, durante 48 horas à 70 °C. Após serem retirados da estufa e atingirem a temperatura ambiente, os mesmos foram submetidos ao ensaio de tração.

Para avaliar a resistência à tração em condições de saturação em água, os corpos de prova, secos e à temperatura ambiente, foram imersos em água por um período de 24 horas. Após este período, foram removidos da água e submetidos imediatamente ao ensaio.

Imagens das superfícies das cerâmicas descoladas foram feitas com câmera digital logo após o ensaio com a finalidade de se avaliar o aspecto visual da descolagem.

Para avaliar a influência da umidade e temperatura de secagem sobre o processo de colagem, corpos de prova foram preparados como descrito acima e, imediatamente, colocados em estufa com temperatura e umidade controladas, nas condições: 10 °C e 75% de umidade e 25 °C e 50% de umidade, permanecendo nestas condições por um período de 168 horas (7 dias). Após serem retirados da estufa, foram imediatamente submetidos à tração.

Os resultados são expressos em MPa e são resultado de uma média de 10 corpos de prova. A metodologia é baseada na ABNT NBR 14081-4:2012<sup>79</sup>, pois não se encontrou na literatura metodologia própria para argamassa polimérica isenta de cimento.

### **3.3.4 Resistência à temperatura de envelhecimento**

Para avaliação da resistência à temperatura foi seguido o mesmo procedimento de aplicação em corpo de prova cerâmico, conforme apresentando no item 3.3.3. Porém, imediatamente após a união dos corpos de prova, estes foram colocados em mufla por um período de 4 horas. As temperaturas avaliadas foram 100 °C, 200 °C, 250 °C, 300 °C e 400 °C, sendo que para cada temperatura foi avaliado um conjunto diferente de corpos de prova. Após a retirada da mufla e o corpo de prova atingir a temperatura ambiente, foi realizado o ensaio de resistência à tração. O resultado foi expresso em MPa e foram utilizados 5 corpos de prova para cada avaliação.

### **3.3.5 Resistência à compressão**

Para a realização deste ensaio utilizou-se uma máquina universal de ensaios, Shimadzu AG-X com célula de carga de 50 kN. O corpo de prova foi moldado em formato cilíndrico com a altura igual ao dobro do diâmetro (20 mm diâmetro x 40 mm de altura). A velocidade de deslocamento foi de 1 mm/min. Os resultados foram expressos em MPa e foram utilizados 5 corpos de prova para cada avaliação.

### **3.3.6 Adesividade**

A adesividade, representada pela superfície dos corpos de prova após a descolagem, foi analisada por microscopia ótica. As observações foram feitas em um microscópio estereoscópio OPT 5000 Power da marca Optacam.

### **3.3.7 Porosidade**

Para avaliar a porosidade das argamassas utilizou-se microscopia eletrônica de varredura (MEV). As amostras foram obtidas por corte dos corpos de prova moldados para o ensaio de compressão. Algumas amostras submetidas ao ataque de HCl 37%, P.A, Química Moderna. Gotejou-se o ácido na superfície e aguardou-se o tempo de 30 segundos. Após o preparo foram secas e avaliadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura EVO MA10, Carl Zeiss do Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Cabe mencionar que nas condições em que as análises foram realizadas não houve necessidade de metalização das amostras.

### 3.3.8 Resistência de aderência em bloco

A argamassa foi colocada dentro de uma embalagem plástica para realizar a aplicação no formato de dois filetes sobre o bloco. A Figura 21 mostra a imagem da argamassa aplicada sobre o bloco e sobreposição dos blocos para realização da colagem. Após a aplicação, outro bloco foi colocado sobre a argamassa. O conjunto permaneceu na temperatura de  $23 \pm 2$  °C por um período de 7 dias. Após este período, o conjunto foi colocado em prensa para realizar um cisalhamento na linha de união dos blocos. O valor determinado em kgf é a média de 3 corpos de prova.

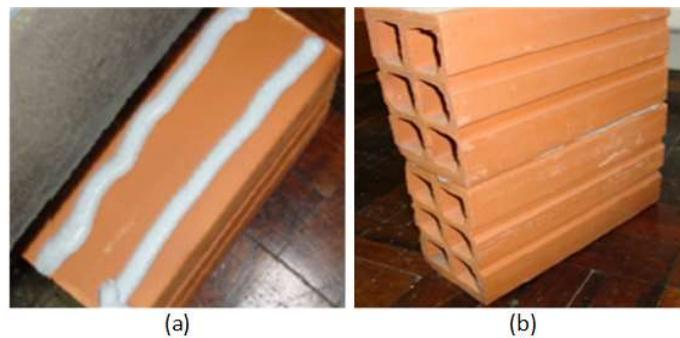


Figura 21: Argamassa aplicada sobre o bloco: (a) filetes sobre o bloco; (b) sobreposição dos blocos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

As características do látex de éster acrílico e estireno utilizado na preparação das argamassas a serem discutidas, encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7: Propriedades do látex de éster acrílico e estireno.

Propriedades	
Viscosidade Brookfield (spindle 4, 10 rpm, 25 °C)	6880 cP
Teor de sólidos (150°C, 0,6g, 20 min)	51,91 %
pH	8,63
TMFF* com adição de coalescente	0 °C

\* TMFF = temperatura mínima de formação de filme

Na Figura 22 é apresentado o espectro de absorção de infravermelho de um filme obtido a partir do látex e a Tabela 8 registra o número de onda tabelado dos grupamentos químicos identificados no espectro de infravermelho.

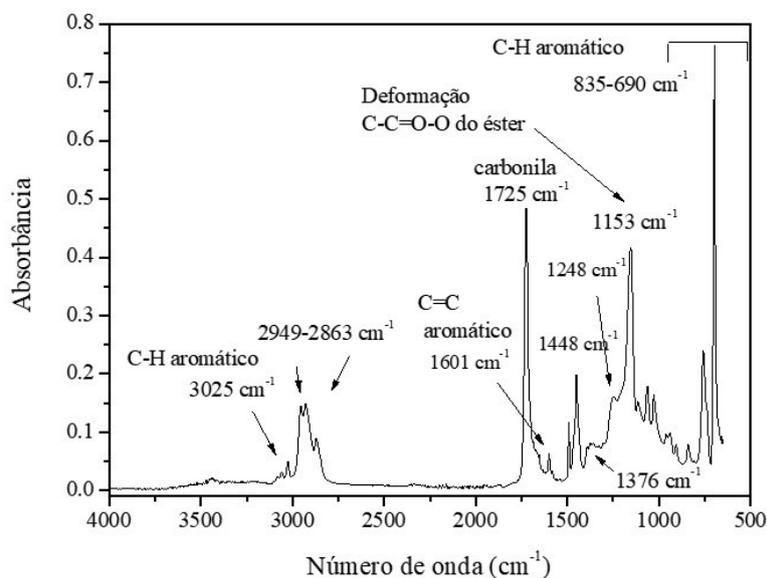


Figura 22: Espectro de absorção de infravermelho do látex com atribuição dos números de onda dos grupos funcionais.

Tabela 8: Identificação dos grupamentos químicos.

Número de onda (cm <sup>-1</sup> )	Grupamento
3025	Deformação axial da ligação C-H de aromático
2949-2863	Deformações axiais de C-H alifático
1725	Deformação axial de C=O de carbonila
1601	Deformação axial de C=C aromático
1448	Deformação angular simétrica no plano do grupo CH <sub>2</sub>
1376	Deformação angular simétrica no plano do grupo CH <sub>3</sub>
1246	Deformação axial de C-C=O-O de éster
1153	Deformação axial assimétrica de O-C-C de éster
835-690	Deformações do anel aromático

As bandas de absorção assinaladas com seta no espectro, 835-690 cm<sup>-1</sup> corresponde a anel aromático o que é compatível com a presença de estireno, banda em 1248 cm<sup>-1</sup>, relacionada à grupamento éster acrílico, assim como se constata a presença de bandas relacionadas a deformação axial de C-H alifático e aromático, respectivamente, na região de 3025 cm<sup>-1</sup> e entre 2949-2863 cm<sup>-1</sup>. Portanto, estas principais bandas são compatíveis com a resina.

Corroborando com o espectro de infravermelho, na caracterização do polímero que constitui o látex por <sup>1</sup>H-RMN também foi evidenciado compatibilidade com éster acrílico e estireno (Figura 23). Entre 0,5 e 1,5 ppm tem-se os sinais de CH<sub>2</sub> - CH<sub>2</sub>; entre 2 e 2,5 ppm sinal do hidrogênio metilênico do estireno; entre 3,5 e 4 ppm sinal de hidrogênio de grupamento R ligado ao oxigênio do éster; a partir de 6,5 ppm sinal referente aos hidrogênios do anel aromático do estireno.

Esta caracterização por RMN teve caráter apenas qualitativo no presente estudo, pois a amostra foi analisada em forma de gel tendo como solvente o clorofórmio deuterado, devido a insolubilidade do filme neste e em outros solventes, o que é provavelmente indicação de uma leve reticulação radicalar introduzida pelo fabricante.

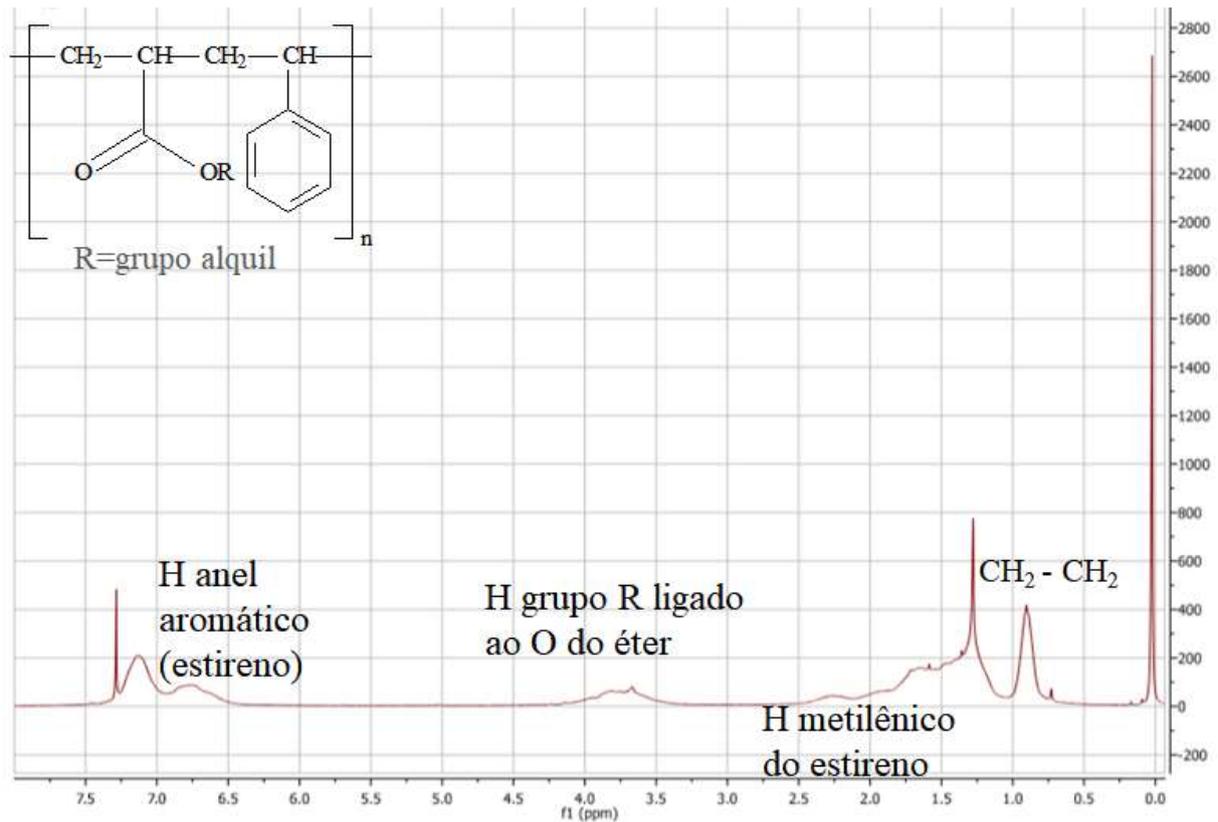


Figura 23: Espectro de <sup>1</sup>H-RMN do látex com apontamento dos principais sinais.

A Figura 24 apresenta o termograma de calorimetria diferencial exploratória (DSC) do filme seco obtido a partir do látex, com a determinação de uma temperatura de transição vítrea igual a 18 °C. Para polímeros com esta T<sub>g</sub>, a formação adequada de filme se dá em condições climáticas de alta temperatura de aplicação. Sendo assim, para que este polímero possa ser utilizado como componente de argamassa, faz-se necessário a adição de um agente coalescente nas formulações preparadas, de modo a reduzir a T<sub>g</sub>, viabilizando a aplicação industrial do produto e consequente formação de filme em clima frio.

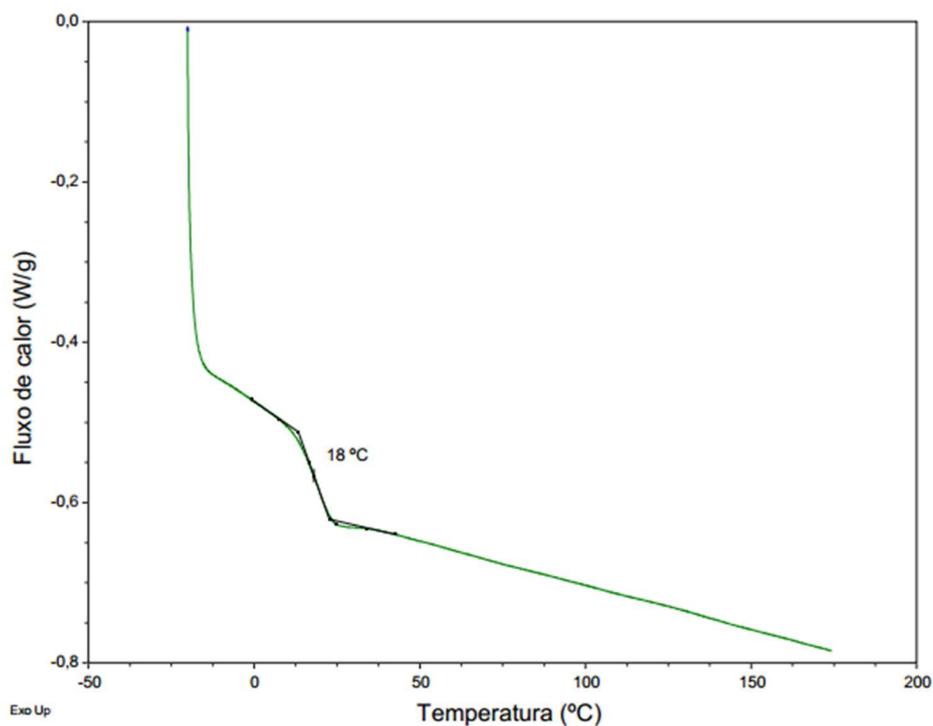


Figura 24: Termograma do látex obtido por DSC a uma faixa de temperatura de -20 a 180 °C a 20 °C/min.

Em relação ao grau de inchamento do látex, após 24h de imersão em água, obteve-se um grau de inchamento 10% e, após 1 mês, de 37%. O filme polimérico não reemulsionou e nem dissolveu, assim, evidenciando boa resistência à água. A Figura 25 apresenta o termograma obtido para o látex, no qual verifica-se basicamente duas perdas de massa: a primeira perda de massa, que ocorre logo no início do aquecimento e finaliza à 150 °C, ocorre devido à perda de água e aditivos de baixa massa molar; e a segunda perda de massa, no intervalo de 250 °C a 450 °C, ocorre pela degradação do polímero.

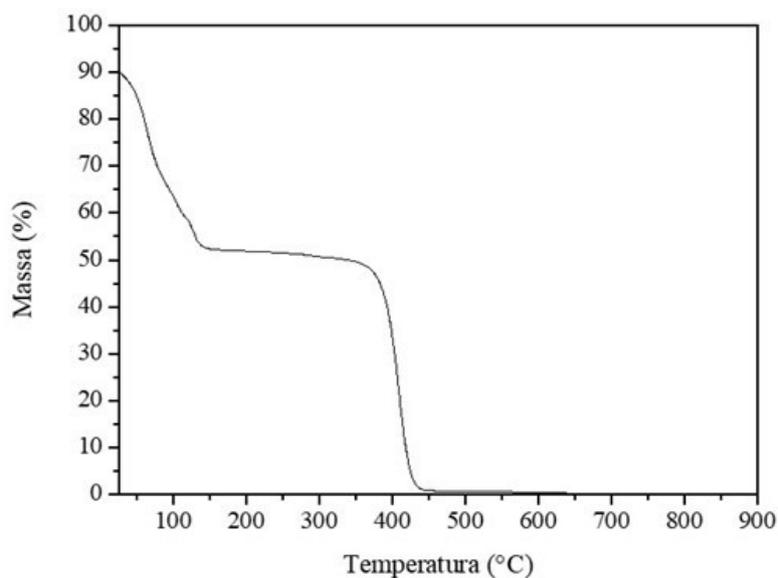


Figura 25: TGA do filme obtido a partir do látex de éster acrílico e estireno.

Outro componente importante desta argamassa é o calcário dolomítico o qual foi caracterizado quanto ao seu perfil granulométrico e comportamento térmico. Na Figura 26 se visualiza o perfil granulométrico do mesmo, constatando-se um perfil de distribuição bem largo. Os valores apresentados na Tabela 9 expressam a média da granulometria obtida entre 10 medições. Mais de 60% das partículas concentram-se em tamanhos maiores que 0,045 mm, porém, também apresenta um percentual bem representativo de finos, mais de 20% em partículas menores que 0,02 mm.

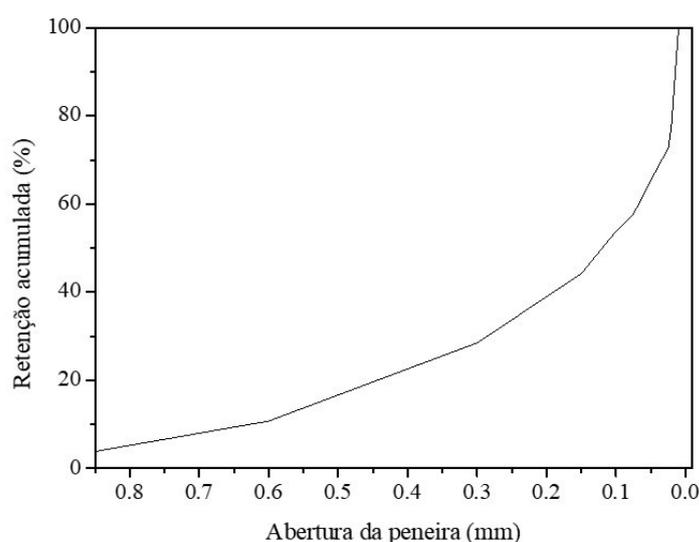


Figura 26: Perfil da granulometria do calcário representado através da retenção acumulada das partículas.

Tabela 9: Análise granulométrica do calcário.

Mesh	Abertura da peneira (mm)	Retenção (%)
20	0,85	3,9
28	0,6	6,9
48	0,3	17,7
100	0,15	15,7
150	0,106	8,5
200	0,075	5,1
325	0,045	9,1
500	0,025	5,8
635	0,02	5,7
> 635	< 0,02	21,6

A Tabela 10 apresenta a distribuição do tamanho médio das partículas do calcário, obtido através de difração de laser. Foram calculados pelo software, os valores da frequência da distribuição de tamanho, D10%, D50% e D90%, os quais se referem às médias dos diâmetros de partículas nos intervalos abaixo de 10, 50 e 90% na curva de distribuição de tamanho.

Tabela 10: Distribuição do tamanho das partículas do calcário.

Frequência de distribuição	Diâmetro médio em $\mu\text{m}$
D10%	23,9
D50%	326,3
D90%	797,3
Diâmetro médio da partícula	369,8

Na tentativa de comparar-se os resultados de granulometria obtidos por peneiramento e por difração à laser, verifica-se que não é possível fazer comparação direta. A técnica via peneiramento apresenta alta variabilidade, apesar de terem sido feitas diversas medições. É uma técnica manual e além de apresentar alta probabilidade de aglomeração das partículas, encontra-se diferença entre a abertura nominal da peneira e a abertura real. Na difração à laser também se tem interferentes, como por exemplo, aglomeração das partículas.

A composição química do calcário determinado por Fluorescência de raios X encontra-se na Tabela 11. Como o percentual de MgO é superior à 12, o calcário é classificado como dolomítico.

Tabela 11: Composição química do calcário obtida por Fluorescência de raios X.

Composto	% em massa
CaO	31,9
MgO	20,1
SiO <sub>2</sub>	11,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,36
K <sub>2</sub> O	0,17
MnO	< 0,05
Na <sub>2</sub> O	< 0,05
P <sub>2</sub> O	< 0,05
TiO <sub>2</sub>	< 0,05
perda ao fogo	34,84

A Figura 27 apresenta o termograma do calcário, o qual apresenta uma perda de massa gradativa devido à descarbonatação e um resíduo de 41,8% à 900 °C.

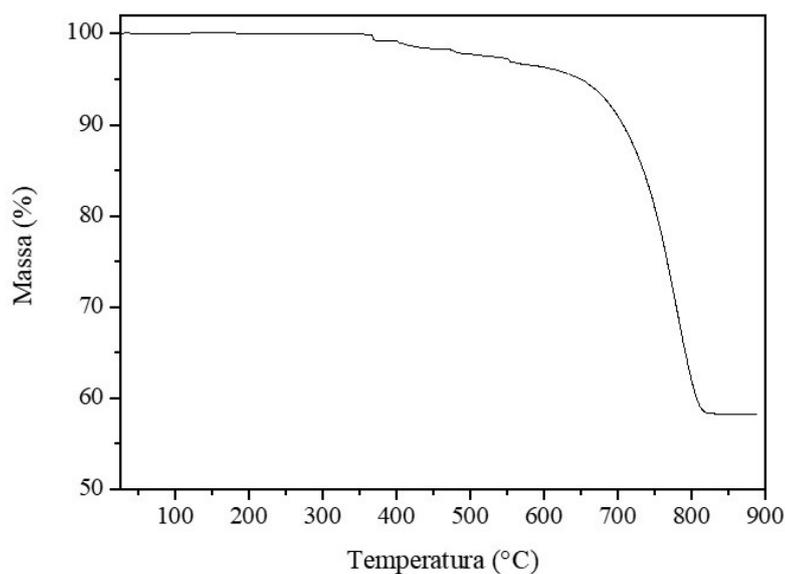


Figura 27: Termograma de TGA do calcário dolomítico.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

Inicialmente são apresentados os ensaios realizados nas argamassas ainda no estado fresco, *dropping ball* e *squeeze-flow*, e, posteriormente, a caracterização no estado seco (endurecido). A Tabela 12 apresenta os resultados para consistência, avaliada por *dropping ball*.

Tabela 12: Valores de consistência determinados por *dropping ball* (mm).

Amostra	IL	2-IL	4-IL	6-IL	8-IL	10-IL
Média do índice de retenção	*	*	*	7,88	9,89	11,50
Padrão	-	-	-	0,39	0,40	0,43

\*consistência muito fluida, impossibilitando a medição

As argamassas com baixos teores de látex mostraram-se muito fluidas para a realização deste ensaio. A esfera metálica afundou completamente na amostra, impossibilitando a medição. Na prática, provavelmente essas argamassas apresentarão um nível elevado de escorrimto e necessitarão de ajustes nos componentes da formulação, provavelmente látex e calcário, para se ajustar a consistência. Com o aumento do percentual de látex, a partir da argamassa 6-IL, já se obtém uma boa consistência na argamassa, sendo o aumento proporcional ao aumento do percentual de látex. Com o maior conteúdo de material ligante e a utilização de um espessante associativo, pode-se inferir que estes proporcionam melhor incorporação do calcário e consistência mais adequada para a aplicação das argamassas. Este ensaio é um ensaio simples e serve para fornecer uma prévia avaliação da consistência. Porém, os dados que podem ser extraídos do mesmo são limitados. Portanto, uma avaliação da reologia foi realizada por análise de *squeeze-flow*.

A Figura 28 apresenta as curvas completas da carga versus deslocamento obtida por *squeeze-flow*, das argamassas ensaiadas em duas velocidades de cisalhamento, 0,1 mm/s e 3 mm/s, enquanto na Figura 29 encontram-se estas mesmas curvas ampliadas na faixa de deslocamento entre 4 a 7mm.

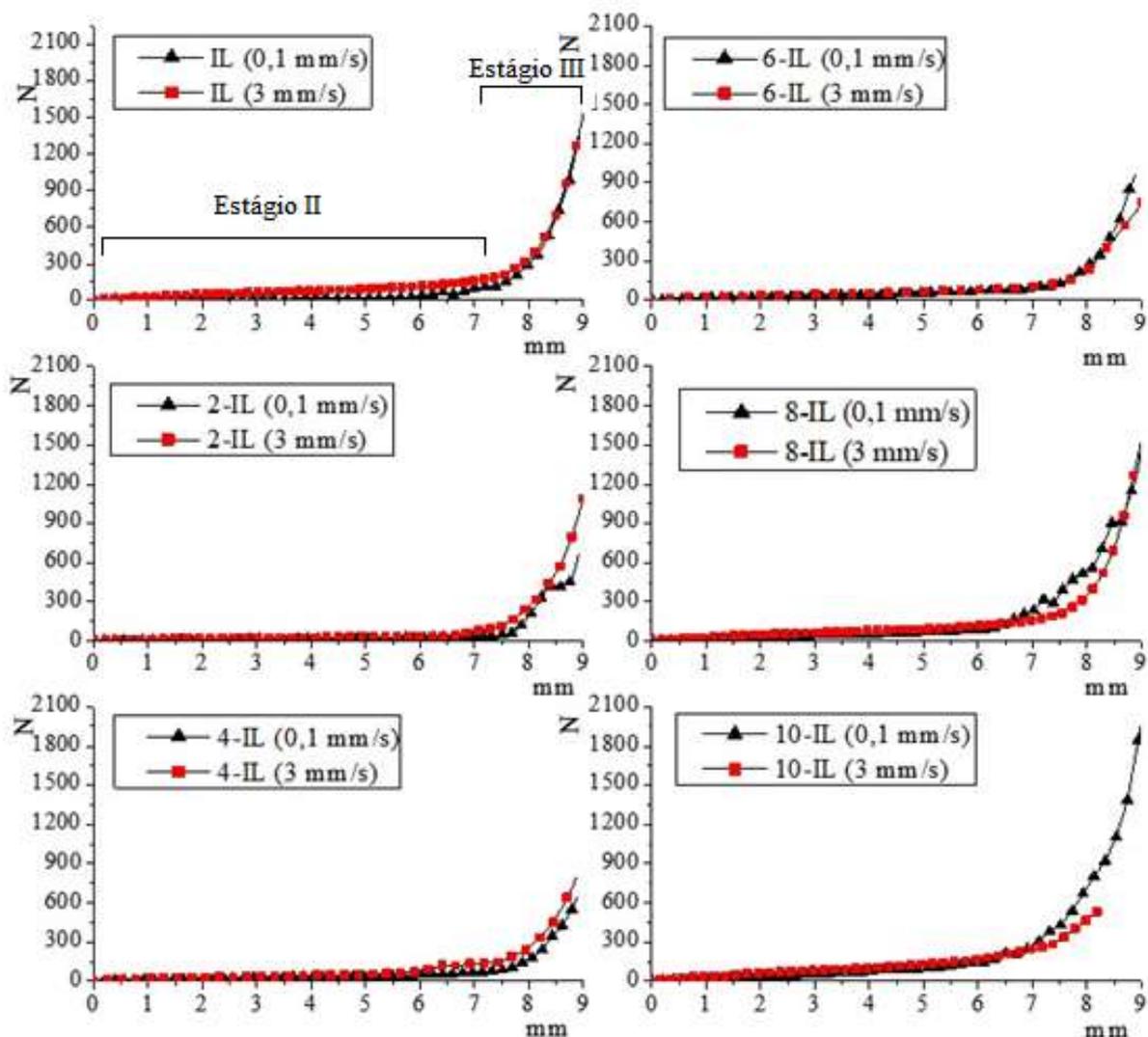


Figura 28: Carga (N) versus deslocamento (mm) para as argamassas com duas velocidades de deformação diferentes (a) 0,1 mm/s e (b) 3 mm/s. As argamassas foram submetidas até 9 mm de deformação. Identificação dos estágios II e III.

Avaliando-se a Figura 28, observa-se que todas as curvas exibem duas regiões distintas de comportamento: (a) na primeira parte, até 6 a 7 mm de deslocamento, observa-se uma deformação linear com valores de carga muito baixos, característicos de um fluxo viscoso ou deformação plástica; e (b) um estágio caracterizado por grande aumento de carga para um pequeno valor de deslocamento. Este aumento brusco de carga (estágio III) pode ser atribuído à força necessária para romper a interação entre os agregados.

Os resultados são perfil típico de comportamentos de *squeeze-flow*, fases II e III, respectivamente. Dado os baixos valores de carga (N), o estágio I é difícil de observar e, portanto, não é representativo. A influência do conteúdo de látex pode ser constatada.

No estágio II as argamassas requerem baixas cargas para deformação até aproximadamente 6 mm de deslocamento, sendo menores para as argamassas IL e 2-IL, as quais contêm menor percentual de látex. A partir deste valor a interação dos agregados provavelmente torna-se mais intensa e eleva expressivamente a carga necessária para prosseguir com a deformação.

As argamassas 2-IL e 8-IL, na velocidade de 0,1 mm/s, apresentaram algumas oscilações. As oscilações normalmente sugerem a ocorrência de altos níveis de cisalhamento interno no material<sup>76</sup>. Este fato também pode ser atribuído à uma provável heterogeneidade na distribuição granulométrica dessas duas argamassas em questão.

Comparando-se o perfil das curvas em relação às duas velocidades estudadas (0,1 mm/s e 3 mm/s), Figura 28, de um modo geral, considera-se que não houve variação significativa entre os perfis individuais nas duas velocidades avaliadas.

A influência da velocidade (0,1 mm/s e 3 mm/s) pode ser constatada na Figura 29, com as curvas ampliadas na região de deformação entre 4 mm e 7 mm, onde as argamassas com maior percentual de látex (8-IL e 10-IL) exigiram cargas mais altas para a velocidade de cisalhamento de 3 mm/s. Nestas condições, ocorre maior resistência à deformação devido aos teores maiores de látex, ou seja, maior conteúdo ligante, no qual ocorre maior interação polímero/carga, sendo necessário uma força maior para deformar a argamassa no estado fresco.

Correlacionando-se os resultados de *squeeze-flow* com a trabalhabilidade, para a argamassa polimérica 10-IL, a qual apresentou maior carga de compressão que as demais para deformar até 9 mm, espera-se, na prática, que a mesma apresente maior dificuldade de espalhamento e deformação. As argamassas IL e 2-IL, por terem se apresentado muito fluidas frente às demais, deverão mostrar facilidade ao espalhamento, provavelmente até em excesso, com possível deslizamento do substrato utilizado, como um bloco cerâmico por exemplo.

As argamassas 8-IL e 10-IL apresentaram maior resistência à deformação plástica durante o estágio de endurecimento por deformação (estágio II), provavelmente pelo fato de apresentarem maior percentual de látex.

A transição para o estágio de endurecimento por deformação, transição do estágio II para o estágio III, ocorreu em grandes deslocamentos (> 6,5 mm). Esses resultados são semelhantes aos relatados por Cardoso et al.<sup>77</sup>.

As curvas da Figura 29 demonstram que as argamassas poliméricas apresentaram características reológicas diferentes na região entre 4 e 7mm, pois cada argamassa mostrou capacidade distinta de absorção da carga durante a deformação imposta pela punção móvel do equipamento.

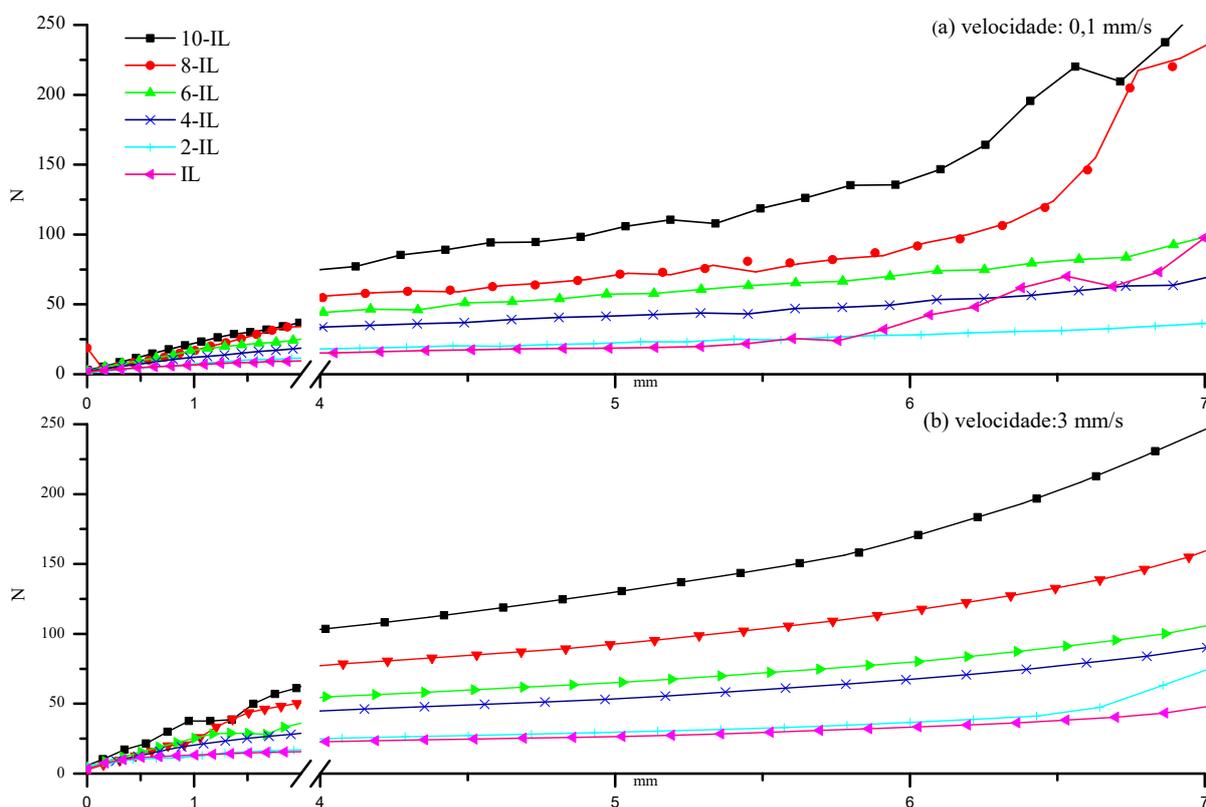


Figura 29: Carga (N) versus deslocamento (mm) para as argamassas com duas velocidades de deformação diferentes (a) 0,1 mm/s e (b) 3 mm/s. Ampliação da região de análise para deformações entre 4 mm e 7 mm.

A fim de avaliar a carga máxima atingida no deslocamento máximo de 9 mm, foi feita uma análise comparativa dos valores médios. A análise de variância (ANOVA) foi utilizada para avaliar os resultados das análises e suas triplicatas com intervalo de confiança de 95%. Uma vez que o resultado da ANOVA apresentou resultado significativo, o teste de comparação de médias Tukey foi conduzido<sup>88</sup>. Este teste permite a comparação entre as médias de todos os tratamentos avaliados. Os resultados da análise da ANOVA e do Tukey são apresentados no ANEXO B.

A Figura 30 mostra os resultados a partir do teste de Tukey da comparação entre médias da força máxima aplicada. A partir destes resultados é possível afirmar que para a maioria das

argamassas não há diferença significativa entre as médias avaliadas, exceto para a argamassa 10-IL (em 0,1 mm/s) que se diferencia estatisticamente das argamassas 6-IL (em 3 mm/s), 4-IL (em 0,1 mm/s) e 2-IL (em 0,1 mm/s). Entretanto, cabe salientar que as argamassas, em sua grande maioria, apresentaram desvios consideráveis no valor máximo da força aplicada, o que pode ter influenciado para que os resultados das médias não fossem, em sua grande maioria, estatisticamente diferentes. Além disso, os desvios apresentados podem ser justificados, uma vez que, o valor considerado foi a força apresentada no deslocamento de 9 mm. Logo, é plausível que neste valor de deslocamento ocorram interações e interferências, decorrentes da acomodação das partículas sólidas que compõem a amostra, dificultando o deslocamento e aumentando as solicitações necessárias sob as amostras.

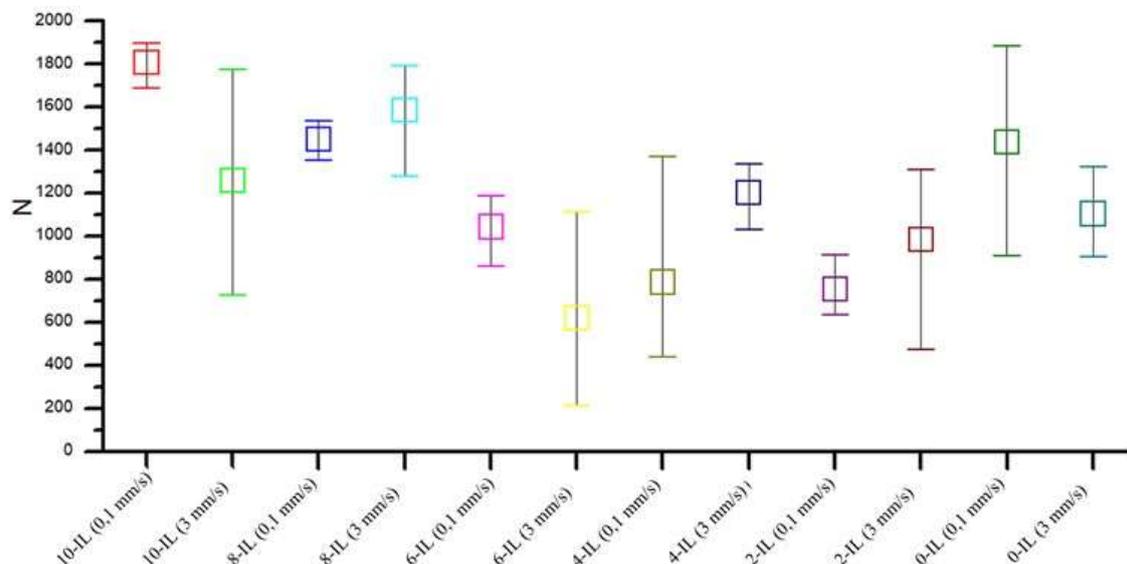


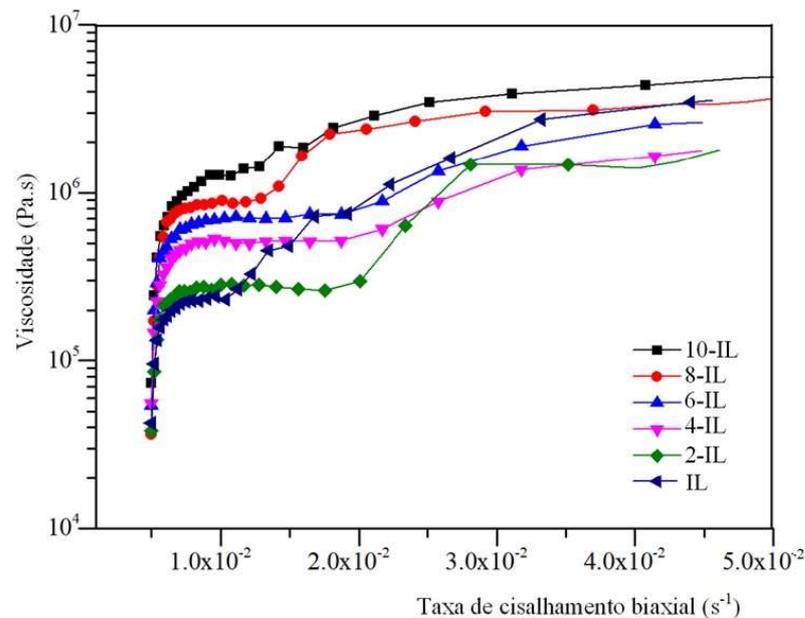
Figura 30: Resultados de Força máxima aplicada (N), a partir do teste de Tukey, para as argamassas ensaiadas com duas velocidades de deformação diferentes (0,1 mm/s e 3 mm/s).

A viscosidade é considerada a principal característica reológica de um fluido, pois, ela determina sua facilidade em escoar continuamente sob a ação de uma tensão de cisalhamento externa. Quanto menor a viscosidade de um fluido, menor é a tensão necessária para submetê-lo a uma determinada taxa de cisalhamento constante. Todos os fluidos que obedecem a esta relação são denominados fluidos newtonianos<sup>77,78</sup>.

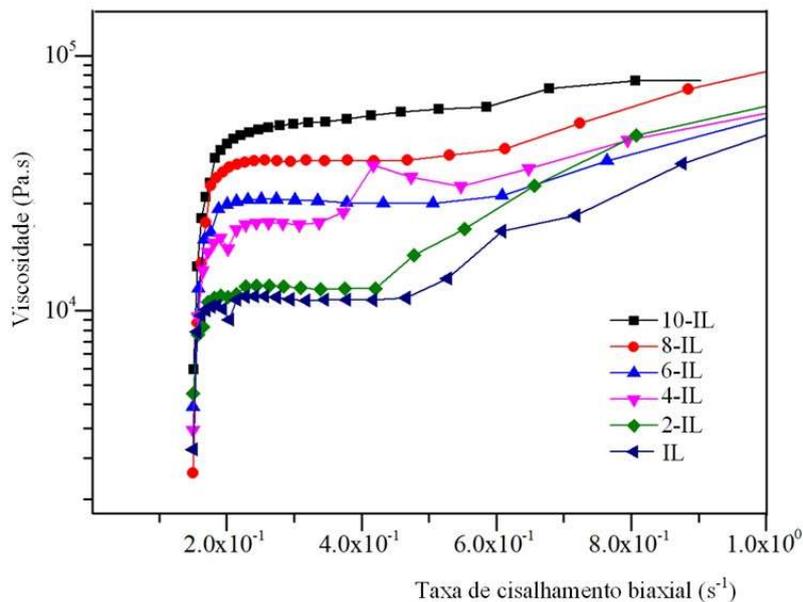
A Figura 31 compara as curvas de viscosidade versus a taxa de cisalhamento biaxial para as duas velocidades avaliadas, podendo-se observar que quanto maior o percentual de látex polimérico, maior é a viscosidade da argamassa. O comportamento encontrado nesta análise

pode ser considerado semelhante aos resultados da argamassa convencional de cimento relatada por Cardoso et al.<sup>77</sup>.

Os valores de viscosidade diminuíram quando a velocidade de deformação aumentou. No entanto, após uma fase de compactação que ocorre no início de cada curva, um valor de platô é atingido após o qual a viscosidade começa a aumentar significativamente à medida que o endurecimento por deformação se inicia.



(a)



(b)

Figura 31: Viscosidade biaxial ( $\eta_B$ ) versus taxa de cisalhamento biaxial ( $\dot{\epsilon}_B$ ) para as argamassas ensaiadas com duas velocidades de deformação diferentes (a) 0,1 mm/s e (b) 3 mm/s.

A tensão de escoamento (ou *yield stress*) refere-se à resistência do material a ser submetido ao fluxo inicial. A comparação dos resultados da tensão de escoamento na Figura 32 indica um comportamento coerente entre os valores obtidos pelo aumento do teor de látex.

Além disso, os resultados sugerem que a velocidade tem influência sobre a tensão de escoamento. Como pode ser observado na Figura 32, as argamassas apresentam maior resistência ao escoamento inicial na velocidade de 3 mm/s. Este efeito pode estar relacionado a uma possível sinergia entre a resina e o material inorgânico presente nas argamassas. Em maiores velocidades a acomodação das partículas inorgânicas é dificultosa, por outro lado, em menores velocidades as partículas e as cadeias poliméricas têm mais tempo para se acomodarem devido à viscoelasticidade do polímero ligante. Além disso, o látex, atuando como ligante, confere maior resistência quando submetido a uma força maior.

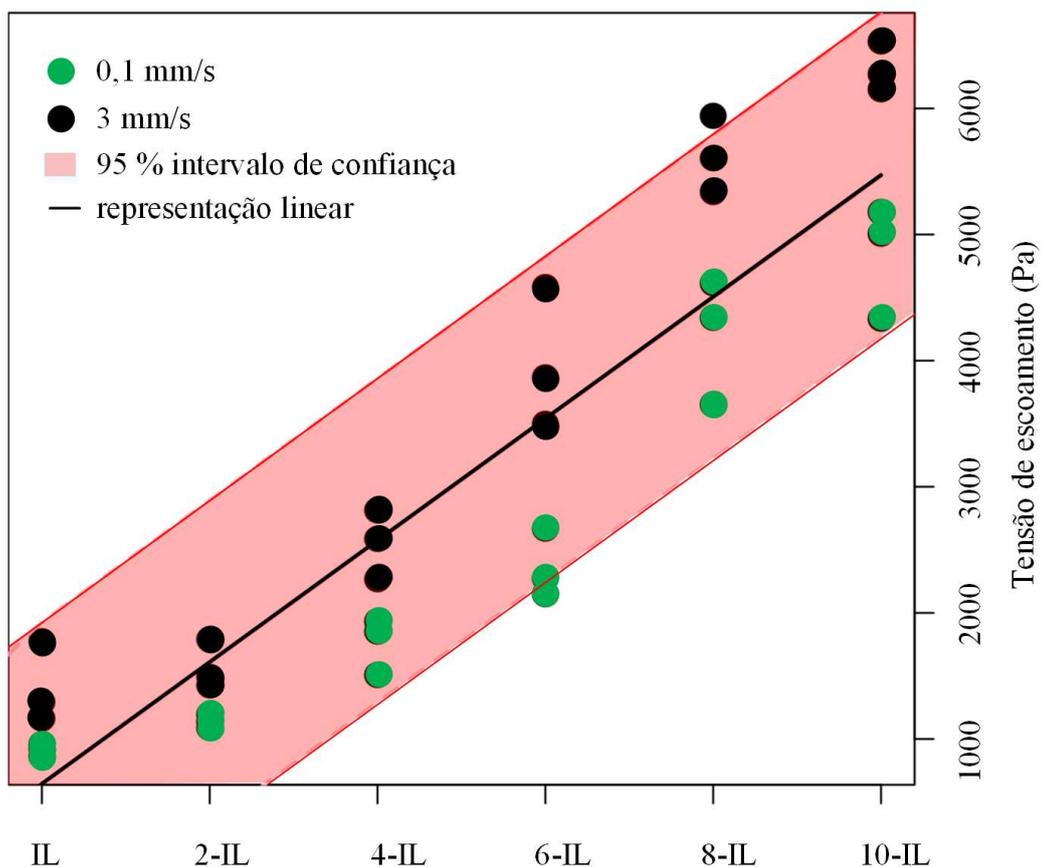


Figura 32: Avaliação da tensão de escoamento em função do teor de látex e velocidade de cisalhamento.

### 4.3 INFLUÊNCIA DO TEOR DE LÁTEX SOBRE AS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

A influência do teor de látex nas argamassas após secagem, endurecidas, foi avaliado quanto à resistência de aderência à tração e à compressão. Os resultados são apresentados nas Figuras 33 e 34.

Na Figura 33 são apresentados os resultados de aderência à tração determinados nos corpos de prova descritos no item 3.3.3. Observa-se que um aumento de apenas 2% do látex em relação ao percentual inicial base provoca um aumento de mais de 60% na resistência à colagem, comprovando a eficiência da utilização de polímero da argamassa e sua atuação como sendo o componente ligante. Adicionalmente, o látex também conferiu excelentes propriedades adesivas. Já um aumento de 6% de látex provoca uma melhoria em 200% na resistência de colagem, sendo este um ponto de destaque no gráfico. Para teores maiores de látex, 8-IL e 10-IL, observa-se uma redução da resistência, fato que pode ser atribuído ao excesso de polímero, o qual pode estar atuando como um plastificante do sistema. Os valores absolutos são superiores aos estabelecidos para uma argamassa convencional, de assentamento e revestimento de paredes e tetos (ABNT NBR 13281<sup>72</sup>) e para argamassa colante (ABNT NBR 14081<sup>70</sup>), superiores 0,5 MPa, valor mínimo referenciado nestas normas.

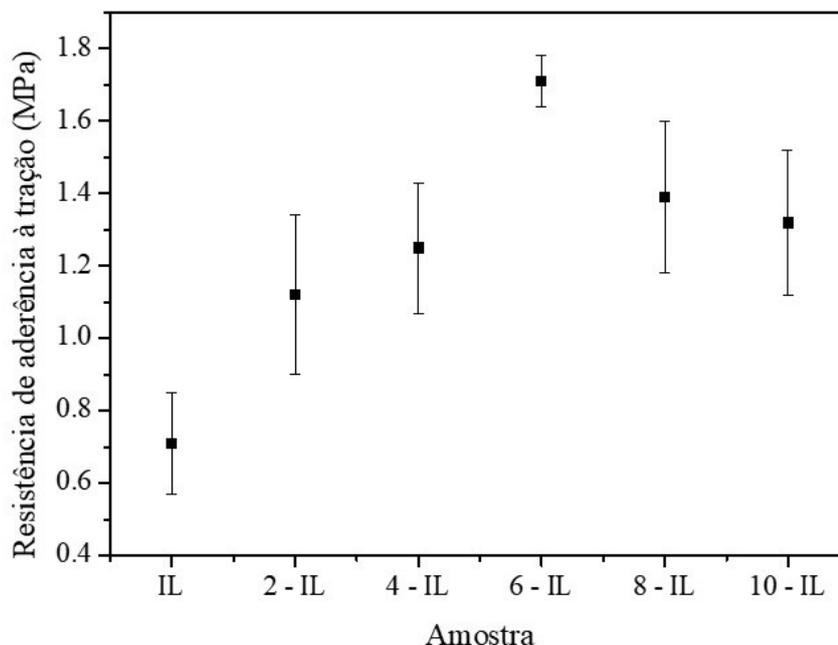


Figura 33: Resistência de aderência à tração das argamassas secas em função do aumento do % de látex.

A influência do teor de látex também foi avaliada em corpos de prova saturados em água, após imersão por um período de 24 horas. A resistência de aderência à tração destes corpos de prova, enquanto saturados, está apresentada na Figura 34.

Em concordância com a resistência de aderência dos corpos de prova em estado seco, o aumento de apenas 2% de látex em relação ao percentual inicial provoca um aumento de mais de 60% na resistência de colagem, novamente comprovando a eficiência da utilização de polímero da argamassa, principalmente na resistência à água. Um aumento de 4% já provoca uma melhoria em 200% na resistência de colagem, com estabilização da resistência em 8% de aumento do percentual de látex.

Comparando-se os resultados em corpo de prova seco e úmido, observa-se uma redução significativa da resistência de colagem (entre 75 e 60%) quando ocorre a saturação em água. Este comportamento pode ser atribuído ao inchamento da película do polímero e, consequentemente, à sua fragilização e perda da resistência. Deve ser lembrado que o filme inchou cerca de 10% em água, no período de 24 horas.

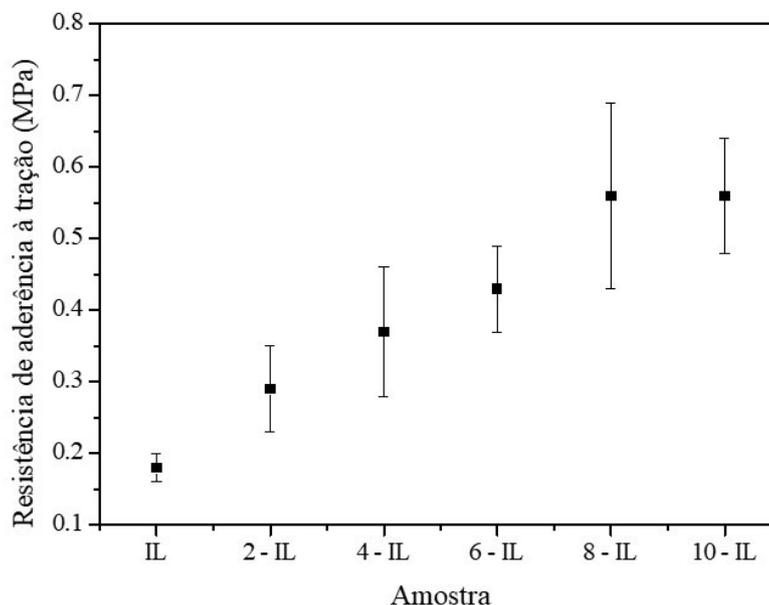


Figura 34: Resistência de aderência à tração em função do aumento do % de látex após imersão dos corpos de prova durante 24 horas em água.

Aggarwal et. al.<sup>11</sup> também evidenciaram redução da absorção de água com o aumento do percentual de polímero em argamassa modificada com emulsão acrílica e resina epóxi,

porém cimentícia. Com isso, tiveram melhoria nas propriedades mecânicas avaliadas. Este fato foi atribuído pela redução da porosidade da argamassa em função da adição de polímero<sup>11</sup>. Comportamento similar é reportado por Pei et al.<sup>89</sup> os quais investigaram a adição de copolímero estireno-acrilato de butila, sintetizado pelos pesquisadores, em argamassa cimentícia. Os autores atribuíram ao fato de que os poros estão preenchidos com polímero ou vedados com uma película de polímero.

#### **4.4 RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO APÓS ENVELHECIMENTO POR TEMPERATURA**

A avaliação do envelhecimento térmico foi realizada no intuito de entender o comportamento do material em temperaturas elevadas, pois na prática, o material pode sofrer dano com a temperatura em caso de aquecimento de uma parede de alvenaria, por exemplo. A avaliação limitou-se a argamassa 6 – IL pelo fato desta ter apresentado o maior valor de resistência de aderência à tração. Os resultados são apresentados na Figura 35, para as temperaturas de 100 °C, 200 °C, 250 °C, 300 °C, 350 °C e 400 °C, podendo-se observar queda na resistência de aderência à medida que aumenta a temperatura. Nas temperaturas de 350 °C e 400 °C houve separação dos corpos de prova antes mesmo de se realizar a descolagem. Ou seja, a partir de 300 °C o material já não apresenta propriedades de adesão.

Até 250 °C considera-se o material ainda com boa resistência à aderência. Apesar de não ser para a mesma aplicação, mas pode-se citar como analogia, uma argamassa colante industrializada do tipo ACII que deve apresentar uma resistência de aderência à tração  $\geq 0,5$  MPa. ACII é uma argamassa colante (AC) do tipo II, ou seja, conforme classificação pela ABNT NBR 14081<sup>70</sup>, trata-se de uma argamassa colante industrializada cujas características de adesividade permitem absorver os esforços existentes em revestimento de pisos e paredes internos e externos sujeitos a ciclos de variação termoigrométrica e a ação do vento.

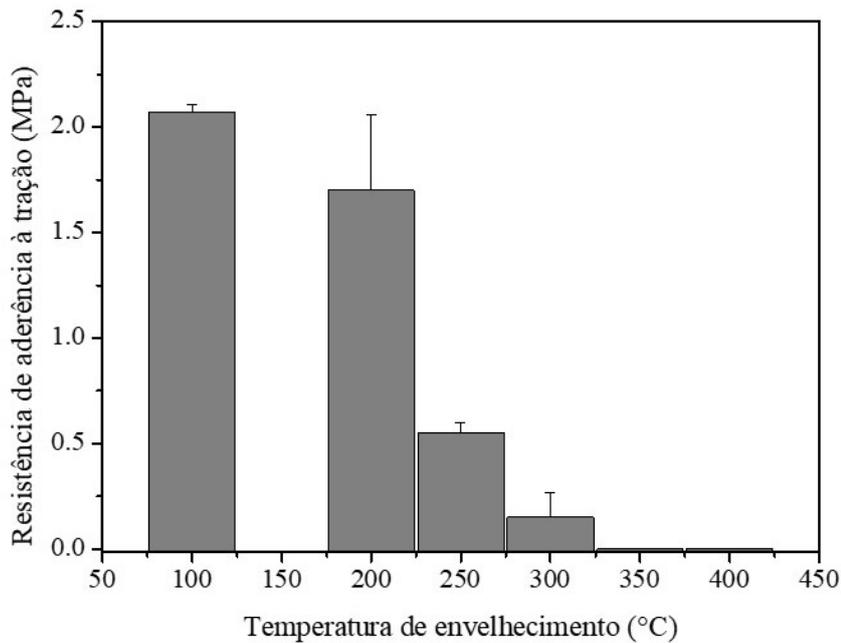


Figura 35: Resistência de aderência à tração da argamassa 6-IL após exposição à temperatura por um período de 4 horas, entre 100 e 400 °C.

É possível correlacionar os resultados de resistência de aderência versus temperatura com as perdas de massa que ocorrem nas faixas de temperatura do termograma de TGA do polímero (Figura 25) e do calcário (Figura 27). A partir de 350 °C o material já se encontra desestruturado e sem resistência mecânica, pois já se tem a degradação do polímero e o início da decarbonatação, comprometendo totalmente a adesão do material.

#### 4.5 INFLUÊNCIA DA UMIDADE E TEMPERATURA DE SECAGEM

Para avaliar a influência da umidade e da temperatura na secagem da argamassa 6-IL e correlacionar com a resistência de aderência, o material foi submetido durante 7 dias à 10 °C e 75% de umidade, conforme resultados apresentados na Figura 36. Estes parâmetros foram selecionados de forma a simular condições climáticas de inverno e verão, porém, fazendo-se os ajustes necessários e compatíveis com a disponibilidade do equipamento (estufa) utilizado.

É evidente, nos dados apresentados, que a resistência de aderência vai aumentando em função do tempo, uma vez que a secagem da amostra e formação de filme do polímero vai ocorrendo. Entretanto, comparando-se com os resultados de aderência da argamassa 6-IL apresentado na Figura 33 no qual a amostra secou à 70 °C, verifica-se que mesmo após 7 dias,

atingiu-se apenas 57% da resistência de aderência em condições favoráveis de temperatura e umidade.

A baixa temperatura e alta umidade provavelmente dificultaram a formação de filme do polímero, mesmo estando acima de 0 °C (temperatura mínima de formação de filme), bem como a evaporação da água, mecanismos que nem sempre ocorrem separadamente<sup>90</sup>. Além disso, o filme polimérico deve estar inchado devido a alta umidade e nestas condições a resistência mecânica e poder de adesão ficam prejudicados. Aumentando-se a temperatura para 25 °C e reduzindo a umidade para 50%, já se observa um aumento da resistência de aderência, conforme apresentado na Figura 37. Após 7 dias, já se atingiu 67% da resistência de aderência quando comparado com condições favoráveis de temperatura e umidade.

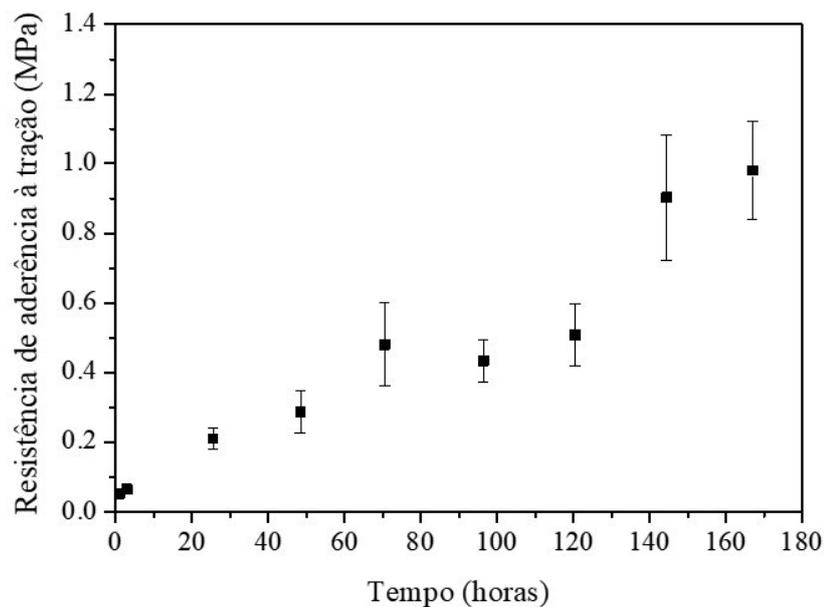


Figura 36: Resistência de aderência à tração da argamassa 6-IL em função do tempo de secagem a 10 °C de temperatura e 75% de umidade.

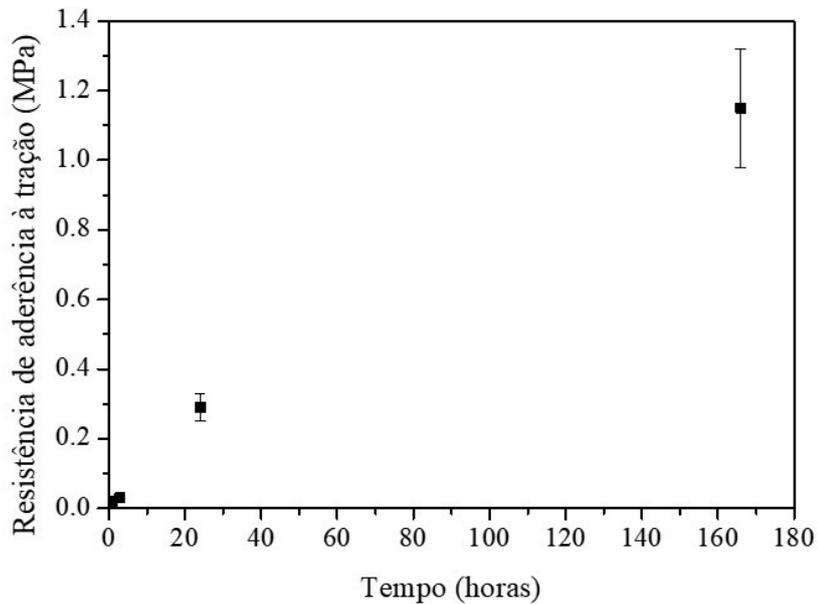


Figura 37: Resistência de aderência à tração da argamassa 6-IL em função do tempo de secagem a 25 °C de temperatura e 50% de umidade.

A resistência à compressão das argamassas também foi avaliada. Na Figura 38 é apresentado uma imagem de um corpo de prova após o ensaio de compressão. Nesta imagem pode-se notar que há um deslizamento das camadas durante a aplicação da força, observando-se uma fratura dúctil. A Figura 39 apresenta os resultados de resistência à compressão (nominal) em comparativo com o percentual de látex presente em cada argamassa, ficando evidente um aumento significativo da resistência à compressão para teores mais altos de látex.



Figura 38: Imagem de um corpo de prova (a) antes e (b) após o ensaio de compressão.

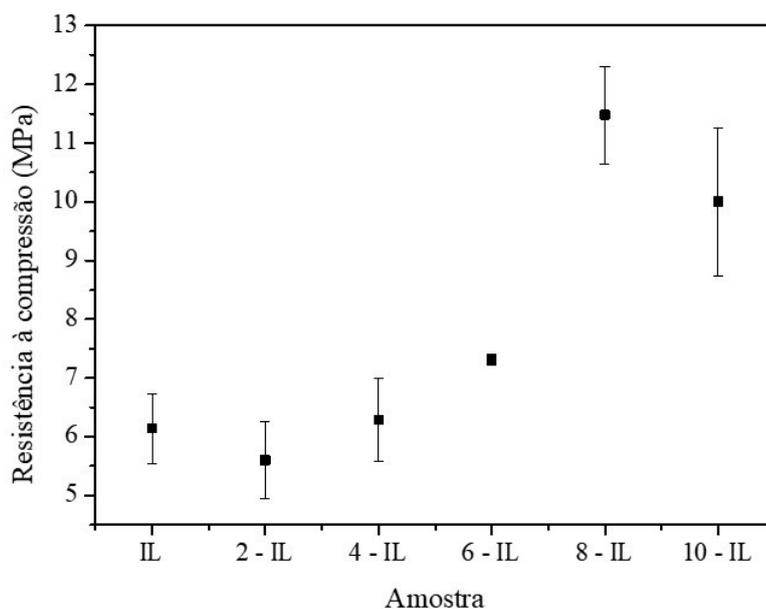


Figura 39: Resistência à compressão em função do aumento do % de látex.

O ANEXO A apresenta um exemplo de cada curva de compressão dos corpos de prova ensaiados. O perfil da curva corrobora com o apresentando na imagem do corpo de prova, típico de um comportamento dúctil<sup>91</sup>.

Com base nos resultados de todas as argamassas, considera-se que as argamassas poliméricas apresentam valores de resistência à compressão adequados para a aplicação, comparativos com argamassa convencional, cimentícia, que apresenta valores mínimos de 1,5 a 2,0 MPa, requisitos conforme ABNT NBR 13281<sup>72</sup>.

#### 4.6 ADESIVIDADE

Isaia<sup>4</sup> ressalta que um aspecto importante que deve ser observado quando da realização do teste de arrancamento é que, tão importante quanto os valores de resistência de aderência obtidos, é a análise do tipo de ruptura, ocasionado pela adesividade da argamassa no substrato em análise. Quando a ruptura é do tipo coesiva, ocorrendo no interior da argamassa ou da base (tipos B e C, Figura 40), os valores são menos preocupantes, ao menos que sejam muito baixos. Por outro lado, quando a ruptura é do tipo adesiva (tipo A, Figura 40), ou seja, ocorre na interface argamassa substrato, os valores devem ser mais elevados, pois existe um potencial

maior para patologia, ou seja, ocorrência de falhas na aplicação final. A ruptura do tipo D significa que a porção mais fraca é a camada superficial do revestimento de argamassa. A ruptura do tipo E é um defeito de colagem, devendo este ponto de ensaio ser desprezado.

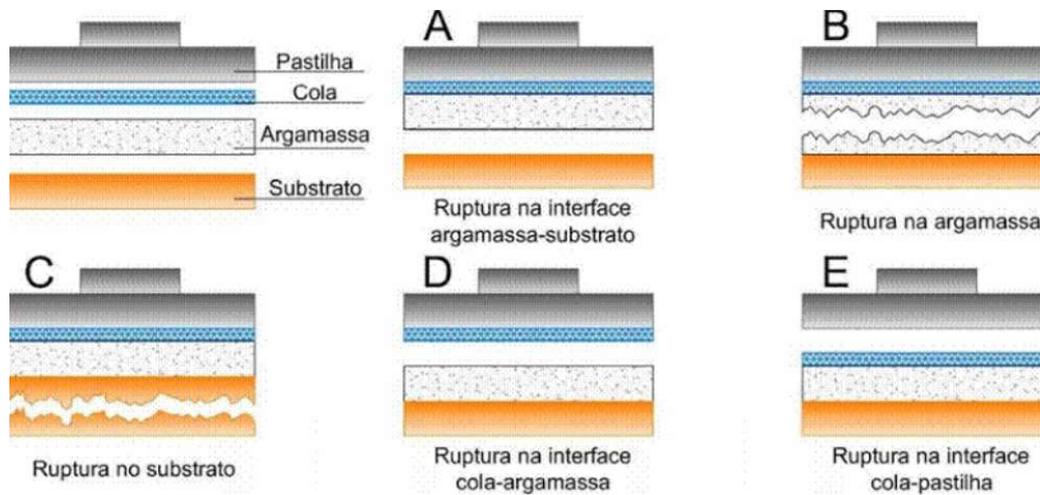


Figura 40: Tipos de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa.

Fonte: Isaia<sup>4</sup>

Para um melhor entendimento qualitativo do processo de adesão, imagens digitais e imagens de microscopia ótica foram realizadas após a descolagem dos corpos-de-prova das superfícies cerâmicas. Nessas imagens é possível avaliar o tipo de falha apresentada. Entre os tipos principais de falha, inclui-se a falha adesiva, a qual apresenta o desprendimento da camada de adesivo do substrato, ficando uma das superfícies do substrato praticamente limpa, sem material adesivo; ou falha coesiva, na qual ocorre separação da camada de adesivo sem desprendimento do substrato. Podem ocorrer também outros dois modos de falha, como falta de união dos substratos e delaminação da camada superficial. Encontram-se nas Figura 41 e 42, respectivamente, imagens dos corpos de prova submetidos à tração enquanto secos e após saturação em água. Estas imagens representam o aspecto da descolagem obtido visualmente após o tracionamento.

Analisando-se as imagens digitais, Figura 41 (corpos-de-prova secos), verifica-se para a primeira argamassa (IL), de mais baixo percentual de látex, falha tanto adesiva quanto coesiva, podendo ser um indicativo da heterogeneidade da amostra por possuir um percentual muito baixo de polímero. Nas imagens seguintes já se observa maior uniformidade no tipo de

falha, predominantemente coesiva. Um detalhamento maior vai ser visualizado nas ampliações mostradas posteriormente.

Na Figura 42, são apresentados os corpos-de prova tracionados após saturação em água, verifica-se para as duas primeiras argamassas (IL e 2-IL), de mais baixo percentual de látex, um percentual maior de falha adesiva, podendo estar relacionada com a perda de resistência do filme polimérico inchado e poder de adesão. Nas imagens seguintes já se observa maior uniformidade no tipo de falha, predominantemente coesiva.

Amostras	Face A	Face B	Tipo de falha
IL			Adesiva e Coesiva
2-IL			Predominantemente coesiva
4-IL			Predominantemente coesiva
6-IL			Predominantemente coesiva
8-IL			Predominantemente coesiva
10-IL			Predominantemente coesiva

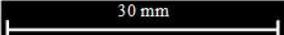


Figura 41: Imagem digital dos corpos de prova após tracionamento em corpo-de-prova seco (Faces A e B) e apontamento do tipo predominante de falha.

Amostras	Face A	Face B	Tipo de falha
IL			Predominante adesiva
2-IL			Predominante adesiva
4-IL			Predominante coesiva
6-IL			Predominante coesiva
8-IL			Predominante coesiva
10-IL			Predominante coesiva

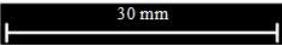


Figura 42: Imagem dos corpos de prova após tracionamento em corpo-de-prova saturado. (Faces A e B) e apontamento do tipo predominante de falha.

A sequência de figuras a seguir, Figura 43 a 45, também apresentadas em função do aumento do percentual de látex de éster acrílico e estireno, foram obtidas através de microscopia ótica no intuito de se observar maior detalhamento do tipo de falha.

Na primeira imagem, Figura 43 (a), argamassa IL, ampliando-se o campo de falha coesiva, observa-se pequenas regiões de delaminação, conforme apontado na Figura 43 (b), na qual apresenta apenas pequenos pontos de rompimento da cerâmica. A falha coesiva e as pequenas regiões de delaminação podem ser atribuídas ao baixo percentual de polímero.

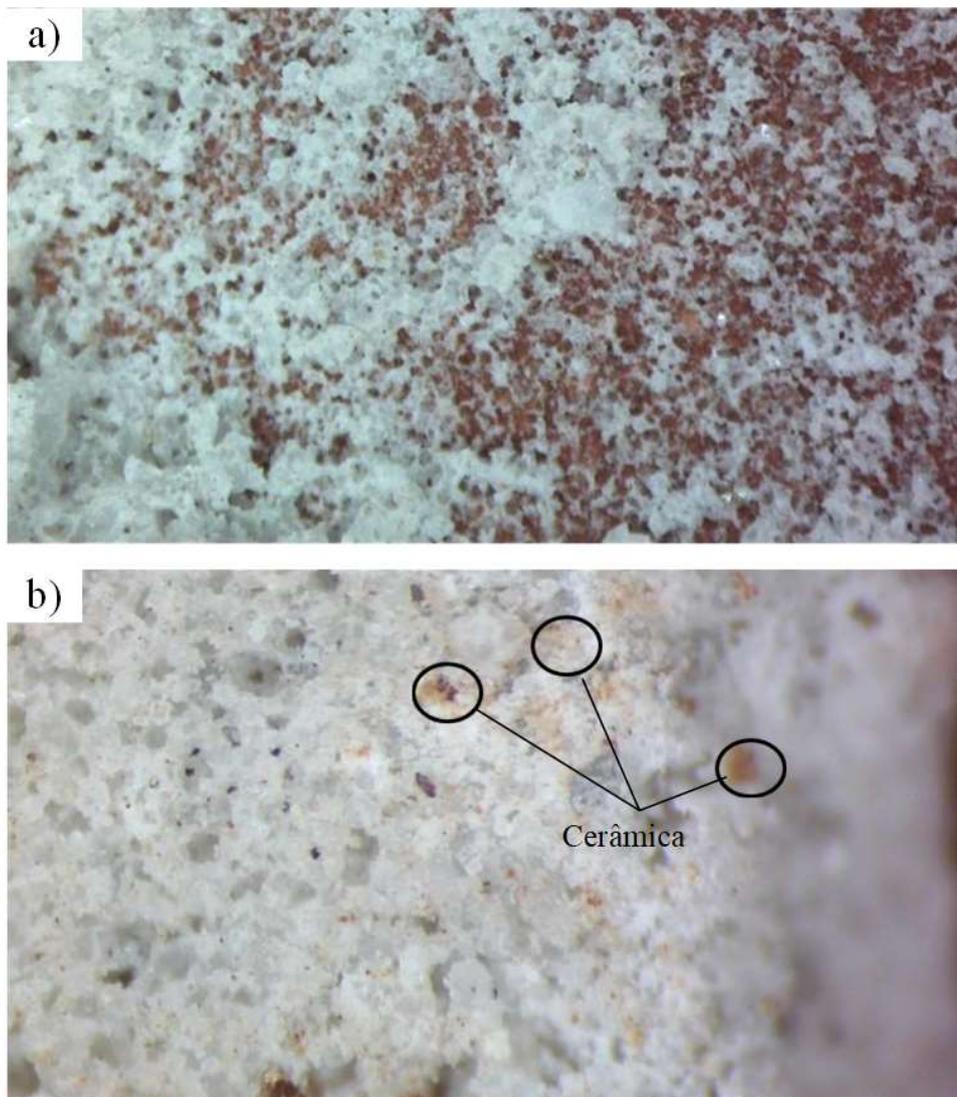


Figura 43: Imagem da argamassa IL após tracionamento em corpo-de-prova seco. Lente ocular com magnificação de 20x. (a) aumento de 0,8x da magnitude e (b) aumento de 2x da magnitude.

A partir da amostra 4-IL (Figura 44) visualiza-se o aparecimento de uma região maior de delaminação da cerâmica, permanecendo aspecto similar, nas argamassas 6-IL, 8-IL e 10-IL. A argamassa 10-IL pode ser visualizada na Figura 45. Este comportamento pode ser atribuído pelo maior percentual de polímero nestas argamassas, favorecendo a adesão do composto sobre o material cerâmico.

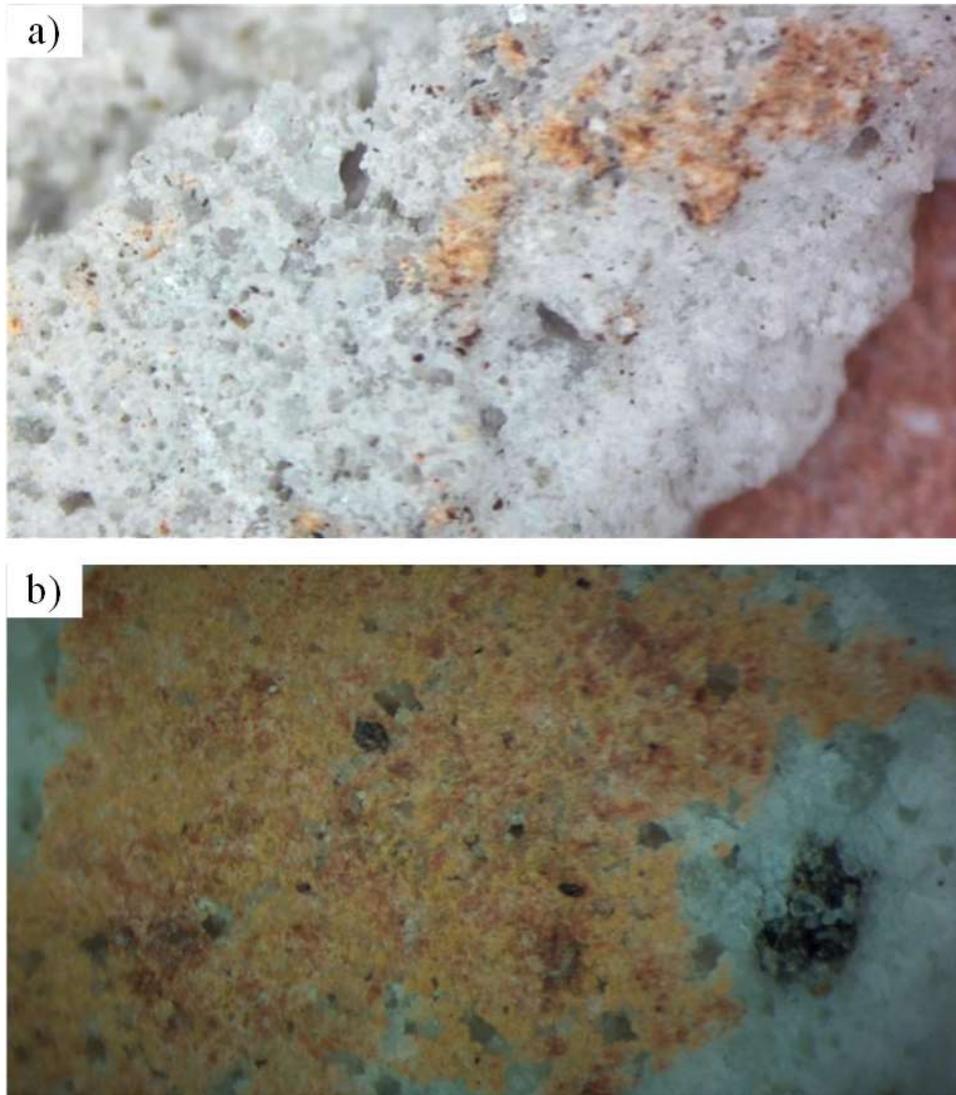


Figura 44: Imagem da argamassa 4-IL após tracionamento em corpo-de-prova seco. Lente ocular com magnificação de 20x. (a) aumento de 0,8x da magnitude e (b) aumento de 2x da magnitude.

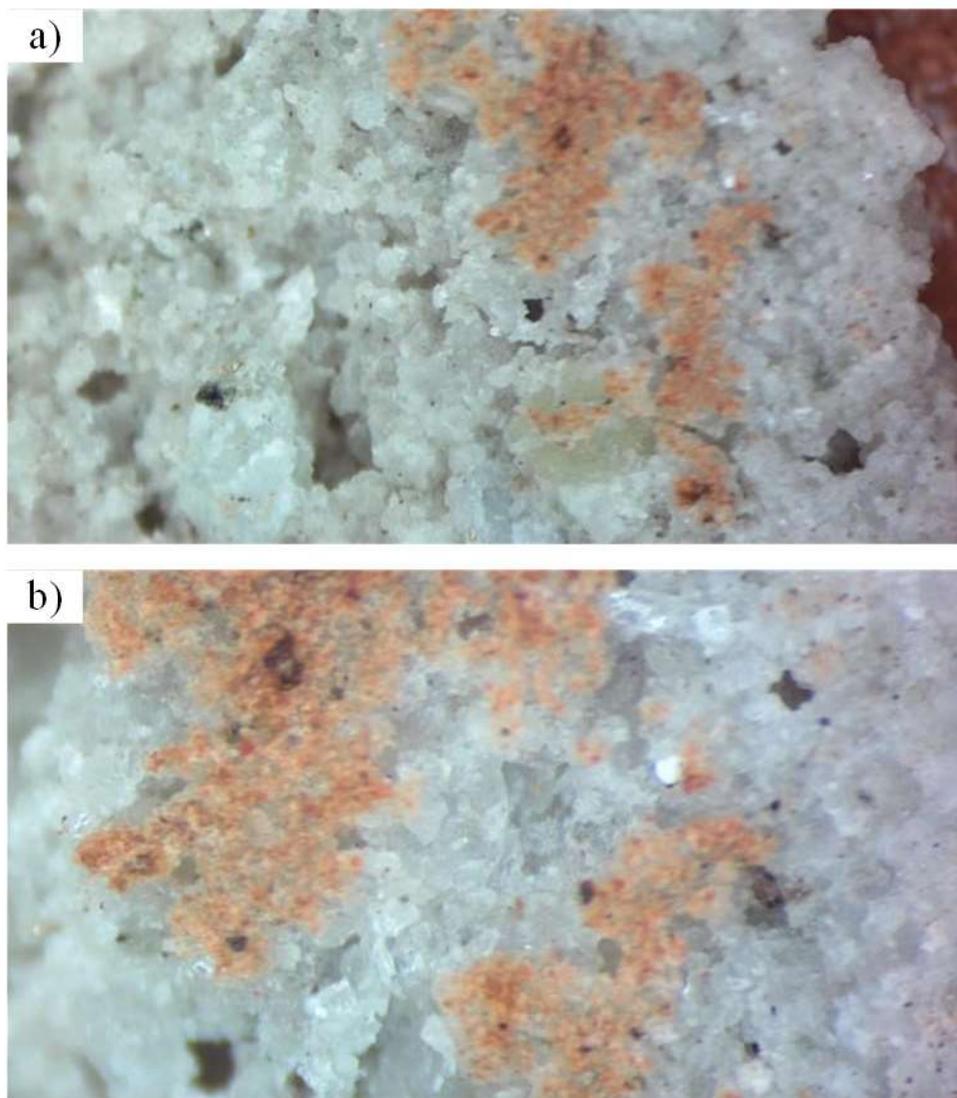


Figura 45: Imagem da argamassa 10-IL após tracionamento em corpo-de-prova seco. Lente ocular com magnificação de 20x. (a) aumento de 0,8x da magnitude e (b) aumento de 2x da magnitude.

A Figura 46 refere-se às imagens obtidas por microscopia ótica da argamassa IL, tracionada após envelhecimento em água, na qual pode ser verificado o tipo de falha predominantemente coesiva. As demais argamassas apresentaram similar comportamento, também com o tipo de falha predominantemente coesiva

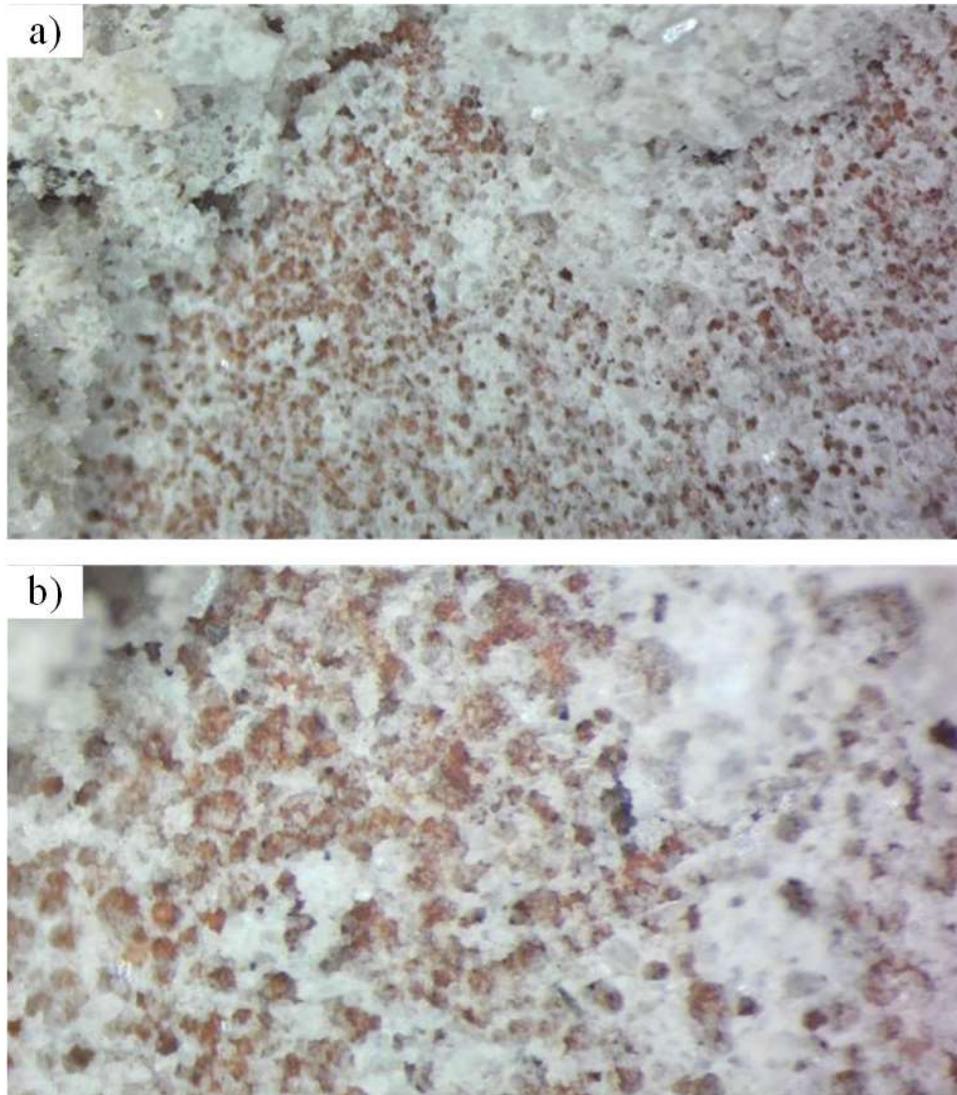


Figura 46: Imagem da argamassa IL após tracionamento em corpo-de-prova saturado. Lente ocular com magnificação de 20x. (a) aumento de 0,8x da magnitude e (b) aumento de 2x da magnitude.

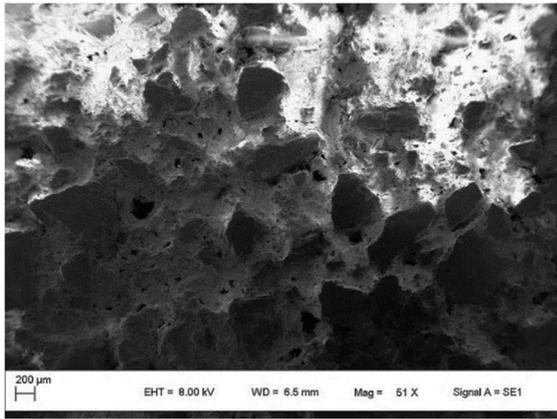
Corroborando aos modos de falha apresentados por Isaia<sup>4</sup> e correlacionando os valores de resistência de aderência à tração apresentados anteriormente (Figuras 33 e 34) com os tipos de falha apresentados nas imagens desta seção, conclui-se que as argamassas, de um modo geral, apresentam bons resultados de desempenho no requisito de aderência, uma vez que a

falha predominante foi coesiva. Mesmo nas argamassas com menor percentual de látex observou-se áreas de falha coesiva e resultados de aderência ainda satisfatórios.

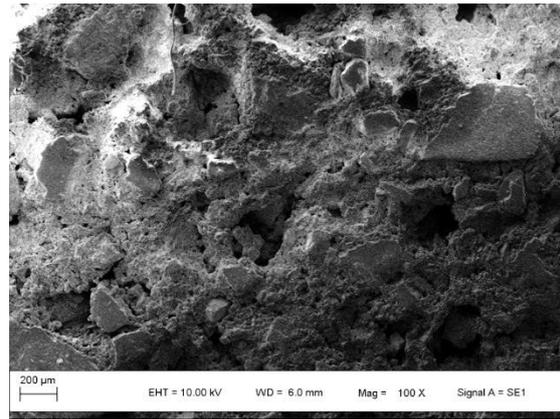
#### **4.7 POROSIDADE**

A Figura 47 apresenta as micrografias das argamassas em função do percentual de látex obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), tanto para as amostras cortadas diretamente do corpo de prova moldado para o teste de compressão (a), quanto para as amostras onde houve o tratamento superficial em HCl (b), com o objetivo de extrair fração mineral superficial e avaliar a porosidade das mesmas. As argamassas, de um modo geral, apresentam uma matriz sólida de calcário recoberta por filme polimérico. A argamassa IL, contendo o menor percentual de látex é a que mais se diferencia em termos de estrutura, apresentando uma superfície mais irregular, provavelmente pelo baixo teor de polímero. A amostra apresenta alta porosidade e afastamento das partículas. As micrografias das demais argamassas apresentam estrutura mais contínua e muito similar entre si.

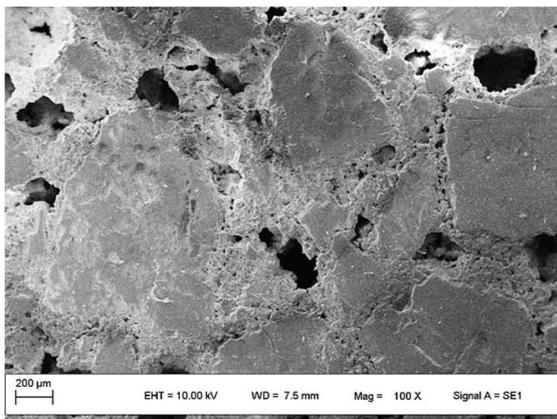
Comparando-se as imagens antes (Figura 47 (a)) e após a extração (Figura 47 (b)) não se observa alteração significativa na superfície das amostras. A argamassa 10-IL, contendo o maior percentual de látex é a que mais se diferencia em termos de estrutura. As demais apresentam estrutura muito similar.



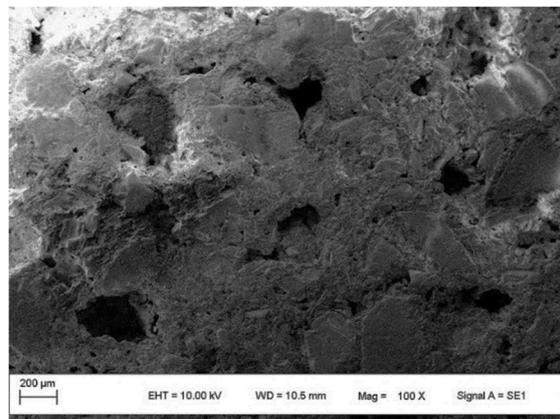
IL



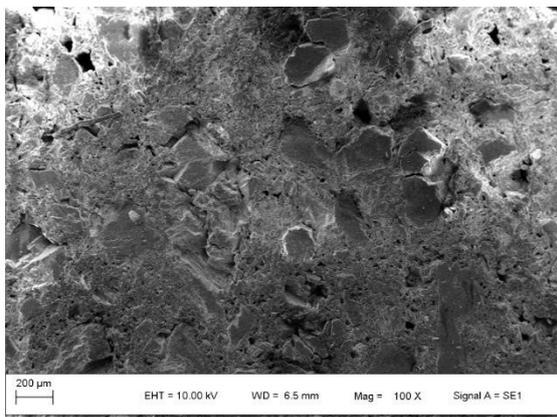
2-IL



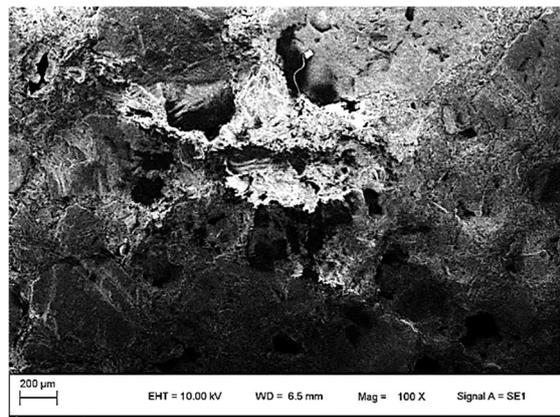
4-IL



6-IL



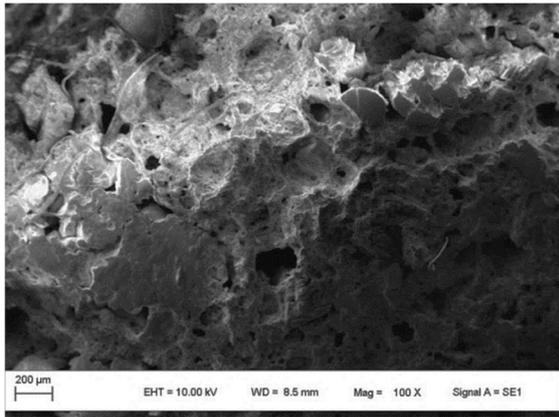
8-IL



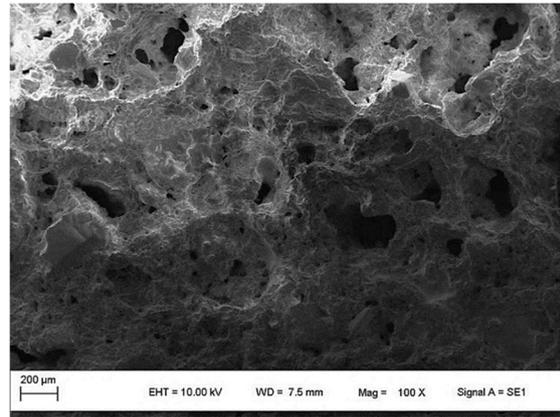
10-IL

(a)

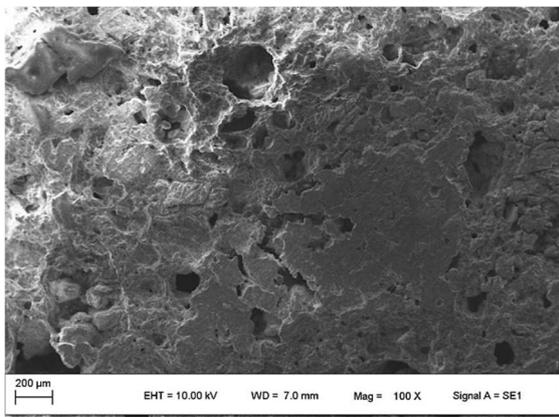
Figura 47: Micrografias obtidas para as argamassas em função do percentual de látex preparadas através dos corpos de prova moldados para o ensaio de compressão (a) e após a extração com HCl (b).



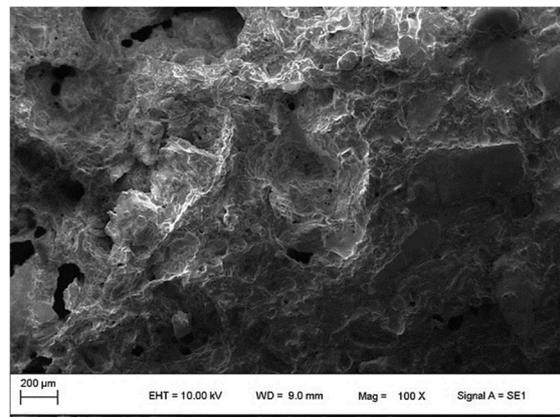
IL



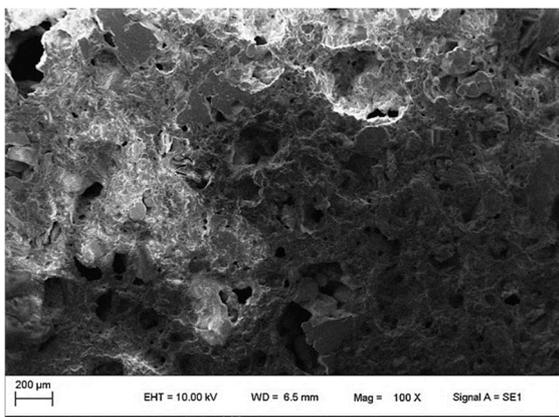
2-IL



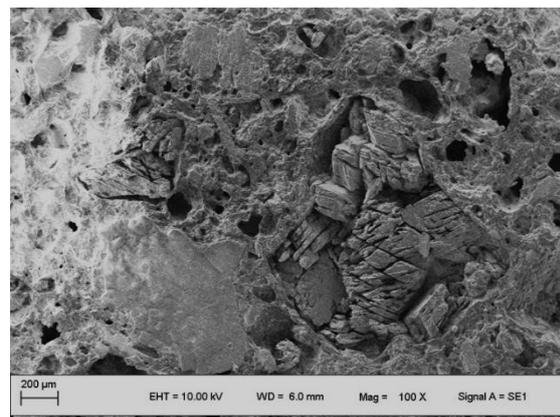
4-IL



6-IL



8-IL



10-IL

(b)

Figura 47: Micrografias obtidas para as argamassas em função do percentual de látex preparadas através dos corpos de prova moldados para o ensaio de compressão (a) e após a extração com HCl (b).

#### 4.8 RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA EM BLOCO CERÂMICO

A Tabela 14 apresenta os resultados de resistência de colagem em bloco cerâmico, conforme apresentado no item 3.3.8 da Parte Experimental. Entretanto, estes dados refletem apenas a resistência do bloco avaliado, pois as argamassas não descolaram, ou seja, o rompimento ocorreu no bloco cerâmico. Sendo assim, este método não se mostrou adequado para avaliar a resistência mecânica da argamassa. Porém, cabe ressaltar que o rompimento do bloco é um indicativo da alta resistência da argamassa, que possui resistência maior que o bloco.

Tabela 13: Resistência de colagem em bloco cerâmico.

Amostra	Resistência de colagem (MPa)
IL	2,5
2 – IL	2,9
4 – IL	2,9
6 – IL	2,9
8 – IL	2,9
10 – IL	2,5

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados pode-se concluir que:

- É possível obter uma argamassa polimérica a partir de látex de éster acrílico e estireno como agente ligante e o calcário dolomítico com tamanho médio de partícula 0,37 mm;

- Partindo de uma formulação básica com um teor mínimo de látex, observou-se que incrementos sucessivos de 2% até um máximo de 10% influenciaram as propriedades avaliadas, como reologia, resistência mecânica, resistência térmica e morfologia;

- O teste de *dropping ball* demonstrou que a fluidez depende do teor de látex e que um teor mínimo é necessário para que este teste possa ser aplicado e, conseqüentemente, a massa ter uma consistência adequada para a sua aplicação. O teste mostrou-se apenas qualitativo;

- Uma avaliação mais precisa da reologia pode ser realizada por *squeeze-flow*, a partir do qual pode ser observado a influência do teor de látex sobre a carga necessária para a deformação, constatando-se um maior efeito para deformações na faixa de 4 à 7 mm. Não foi observada influência da velocidade de deslocamento, no intervalo entre 0,1 e 3 mm/s;

- A resistência de aderência à tração é dependente do percentual de polímero. Um aumento de 2% resulta aumento de 60% na resistência de aderência. Na investigação da variação de concentrações de látex polimérico, partindo-se de percentuais iniciais da literatura<sup>24</sup>, constata-se que é possível otimizar-se as propriedades para transpor em escala industrial, visando otimizar custo e desempenho do material. A melhoria dessa propriedade com o aumento do teor de polímero também é observada para a corpos de prova saturados em água;

- A resistência à compressão é dependente do percentual de polímero. Com base nos resultados de todas as argamassas formuladas, considera-se que esses novos materiais apresentam valores de resistência à compressão adequados para a aplicação de alvenaria de bloco e são compatíveis com os valores da argamassa convencional, cimentícia, cujos requisitos são definidos segundo a norma ABNT NBR 13281;

- A argamassa que apresentou melhor resistência de aderência à tração, 6 – IL, também apresentou resistência térmica significativa até 250 °C, mantendo uma resistência de adesão compatível com as exigências para um produto desta natureza;

- A umidade altera significativamente as propriedades mecânicas. Os testes nas argamassas secas e saturadas mostraram que quando secas elas atingem o seu maior valor de resistência de aderência à tração quando comparadas com as mesmas envelhecidas em água. Ao contrário de um sistema convencional à base de cimento, no qual se faz necessário a retenção de água para que ocorram todas as reações, para este novo material é necessário que ocorra a evaporação da água para a formação do filme polimérico aglutinante;

- A metodologia de avaliação de aderência mostrou-se adequada à caracterização desse novo material;

- Com base nos resultados de todas as argamassas, considera-se que os novos materiais apresentam excelente propriedade adesiva, comprovando a eficiência da adição de um polímero como agente ligante, proporcionando valores de resistência à compressão adequados para aplicação em alvenaria de blocos, comparativos com argamassa convencional, cimentícia (ABNT NBR 13281);

- Através das imagens de microscopia ótica das argamassas ensaiadas para avaliação da resistência de aderência à tração, é possível observar qualitativamente tanto falha adesiva, quanto coesiva e delaminação do substrato cerâmico, sendo estas relacionadas com o percentual de polímero;

- Através das imagens de microscopia eletrônica de varredura, as argamassas apresentaram, de um modo geral, uma sólida matriz de calcário recoberta por filme polimérico. Foi possível evidenciar uma diferenciação significativa em termos de porosidade apenas para os dois extremos na avaliação, ou seja, para a amostra IL, de menor percentual de látex e a amostra 10-IL, de maior percentual de látex. As demais apresentam microestrutura muito similar;

- É possível variar a formulação, principalmente quanto ao teor de látex de éster acrílico e estireno e obter argamassas poliméricas com boa resistência mecânica e propriedades reológicas adequadas para uma aplicação industrial. Assim, estes novos materiais podem ser utilizados com custo e resistência adequados;

- O método de resistência de colagem em bloco cerâmico não se mostrou adequado para avaliar diferenças no desempenho mecânico das argamassas.

## 6 REFERÊNCIAS

- (1) Isaia, G. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*, 2nd ed.; Geraldo Cechella Isaia: São Paulo, 2010; Vol. 1.
- (2) Del Vecchio, F. J. C.; Reis, J. M. L.; da Costa Mattos, H. S. Elasto-Viscoplastic Behaviour of Polyester Polymer Mortars under Monotonic and Cyclic Compression. *Polymer Testing* **2014**, *35*, 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2014.02.007>.
- (3) Eren, F.; Gödek, E.; Keskinates, M.; Tosun-Felekoğlu, K.; Felekoğlu, B. Effects of Latex Modification on Fresh State Consistency, Short Term Strength and Long Term Transport Properties of Cement Mortars. *Construction and Building Materials* **2017**, *133*, 226–233. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.080>.
- (4) Isaia, G. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*, 2nd ed.; Geraldo Cechella Isaia: São Paulo, 2010; Vol. 2.
- (5) Gwon, S.; Jang, S. Y.; Shin, M. Microstructure Evolution and Strength Development of Ultra Rapid Hardening Cement Modified with Redispersible Polymer Powder. *Construction and Building Materials* **2018**, *192*, 715–730. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.178>.
- (6) Caimi, S.; Timmerer, E.; Banfi, M.; Storti, G.; Morbidelli, M. Core-Shell Morphology of Redispersible Powders in Polymer-Cement Waterproof Mortars. *Polymers* **2018**, *10* (10), 1122. <https://doi.org/10.3390/polym10101122>.
- (7) Li, L.; Wang, R.; Lu, Q. Influence of Polymer Latex on the Setting Time, Mechanical Properties and Durability of Calcium Sulfoaluminate Cement Mortar. *Construction and Building Materials* **2018**, *169*, 911–922. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.005>.
- (8) Moodi, F.; Kashi, A.; Ramezani-pour, A. A.; Pourebrahimi, M. Investigation on Mechanical and Durability Properties of Polymer and Latex-Modified Concretes. *Construction and Building Materials* **2018**, *191*, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.198>.
- (9) Lu, Z.; Kong, X.; Zhang, Q.; Cai, Y.; Zhang, Y.; Wang, Z.; Dong, B.; Xing, F. Influences of Styrene-Acrylate Latexes on Cement Hydration in Oil Well Cement System at Different Temperatures. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **2016**, *507*, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.07.082>.

- (10) Assaad, J. J. Development and Use of Polymer-Modified Cement for Adhesive and Repair Applications. *Construction and Building Materials* **2018**, *163*, 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.103>.
- (11) Aggarwal, L. K.; Thapliyal, P. C.; Karade, S. R. Properties of Polymer-Modified Mortars Using Epoxy and Acrylic Emulsions. *Construction and Building Materials* **2007**, *21* (2), 379–383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.007>.
- (12) Fernández-Ruiz, M. A.; Gil-Martín, L. M.; Carbonell-Márquez, J. F.; Hernández-Montes, E. Epoxy Resin and Ground Tyre Rubber Replacement for Cement in Concrete: Compressive Behaviour and Durability Properties. *Construction and Building Materials* **2018**, *173*, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.004>.
- (13) Konar, B. B.; Das, A.; Gupta, P. K.; Saha, M. Physicochemical Characteristics of Styrene-Butadiene Latex- Modified Mortar Composite Vis-à-Vis Preferential Interactions. *Journal of Macromolecular Science, Part A* **2011**, *48* (9), 757–765. <https://doi.org/10.1080/10601325.2011.596072>.
- (14) Liu, S.; Kong, Y.; Wan, T.; Zhao, G. Effects of Thermal-Cooling Cycling Curing on the Mechanical Properties of EVA-Modified Concrete. *Construction and Building Materials* **2018**, *165*, 443–450. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.060>.
- (15) Pratap, A. Vinyl Ester and Acrylic Based Polymer Concrete for Electrical Applications. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials* **2002**, *45* (1), 117–125. [https://doi.org/10.1016/S0960-8974\(02\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S0960-8974(02)00036-0).
- (16) Ohama, Y. Polymer-Based Admixtures. *Cement and Concrete Composites* **1998**, *20* (2), 189–212. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(97\)00065-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(97)00065-6).
- (17) Ohama, Y. In *HandBook f Polymer-Modified Concrete and Mortars - Properties and process technology*; Noyes Publications: College of Engineering Nihon University Koriyama, Japan, 1995.
- (18) Nóvoa, P. J. R. O.; Ribeiro, M. C. S.; Ferreira, A. J. M.; Marques, A. T. Mechanical Characterization of Lightweight Polymer Mortar Modified with Cork Granulates. *Composites Science and Technology* **2004**, *64* (13–14), 2197–2205. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.03.006>.
- (19) Barrera, G. M.; Santiago, E. V.; Gencel, O.; Hagg Lobland, H. E. Polymer Concretes: A Description and Methods for Modification and Improvement. *Journal of Materials Education* **2011**, *33* (1–2), 37–52.

- (20) Reis, J. M. L. Sisal Fiber Polymer Mortar Composites: Introductory Fracture Mechanics Approach. *Construction and Building Materials* **2012**, *37*, 177–180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.088>.
- (21) Reis, J. M. L.; Moreira, D. C.; Nunes, L. C. S.; Sphaier, L. A. Evaluation of the Fracture Properties of Polymer Mortars Reinforced with Nanoparticles. *Composite Structures* **2011**, *93* (11), 3002–3005. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.05.002>.
- (22) Elalaoui, O.; Ghorbel, E.; Mignot, V.; Ben Ouezdou, M. Mechanical and Physical Properties of Epoxy Polymer Concrete after Exposure to Temperatures up to 250 °C. *Construction and Building Materials* **2012**, *27* (1), 415–424. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.027>.
- (23) Siddique, R.; Khatib, J.; Kaur, I. Use of Recycled Plastic in Concrete: A Review. *Waste Management* **2008**, *28* (10), 1835–1852. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.011>.
- (24) Muthukumar, M.; Mohan, D. Studies on Polymer Concretes Based on Optimized Aggregate Mix Proportion. *European Polymer Journal* **2004**, *40* (9), 2167–2177. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2004.05.004>.
- (25) Bignozzi, M. C.; Saccani, A.; Sandrolini, F. New Polymer Mortars Containing Polymeric Wastes. Part 1. Microstructure and Mechanical Properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* **2000**, *31* (2), 97–106. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(99\)00063-9](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(99)00063-9).
- (26) Jo, B.-W.; Tae, G.-H.; Kim, C.-H. Uniaxial Creep Behavior and Prediction of Recycled-PET Polymer Concrete. *Construction and Building Materials* **2007**, *21* (7), 1552–1559. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.10.003>.
- (27) Jo, B.-W.; Park, S.-K.; Park, J.-C. Mechanical Properties of Polymer Concrete Made with Recycled PET and Recycled Concrete Aggregates. *Construction and Building Materials* **2008**, *22* (12), 2281–2291. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.009>.
- (28) Gorninski, J. P.; Dal Molin, D. C.; Kazmierczak, C. S. Strength Degradation of Polymer Concrete in Acidic Environments. *Cement and Concrete Composites* **2007**, *29* (8), 637–645. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.04.001>.
- (29) Tonet, K. G.; Gorninski, J. P. Polymer Concrete with Recycled PET: The Influence of the Addition of Industrial Waste on Flammability. *Construction and Building Materials* **2013**, *40*, 378–389. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.049>.
- (30) Gorninski, J. P.; Dal Molin, D. C.; Kazmierczak, C. S. Study of the Modulus of Elasticity of Polymer Concrete Compounds and Comparative Assessment of Polymer Concrete and

- Portland Cement Concrete. *Cement and Concrete Research* **2004**, 34 (11), 2091–2095. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.03.012>.
- (31) Strength Developments and Deformation Characteristics of MMA-Modified Vinyl Ester Polymer Concrete | SpringerLink <https://link.springer.com/article/10.1186%2Fs40069-018-0232-0> (accessed Apr 27, 2019).
- (32) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Intergovernmental Panel on Climate Change, Edenhofer, O., Eds.; Cambridge University Press: New York, NY, 2014.
- (33) Nogueira, G. R. F. A Extração de Areia Em Cursos D'água e Seus Impactos: Proposição de Uma Matriz Interação. Trabalho Final de Curso para título de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária., Universidade Federal de Juiz de Fora, 2016.
- (34) Guedes, L. A. Os Impactos Ambientais Causados Pela Extração de Areia No Ribeirão José Da Silva e Água Quente. Trabalho de conclusão, Universidade de Brasília, Município de Posse e Guarani de Goiás, 2013.
- (35) Noufal E., R.; Manju, U. I-Sand: An Environment Friendly Alternative to River Sand in Reinforced Cement Concrete Constructions. *Construction and Building Materials* **2016**, 125, 1152–1157. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.130>.
- (36) Rocha, G. G. N. da. Caracterização microestrutural do Metacaulim de alta reatividade. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.
- (37) Ozeren Ozgul, E.; Ozkul, M. H. Effects of Epoxy, Hardener, and Diluent Types on the Hardened State Properties of Epoxy Mortars. *Construction and Building Materials* **2018**, 187, 360–370. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.215>.
- (38) Fischer, J.; Bradler, P. R.; Schmidtbauer, D.; Lang, R. W.; Wan-Wendner, R. Long-Term Creep Behavior of Resin-Based Polymers in the Construction Industry. *Materials Today Communications* **2019**, 18, 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.11.006>.
- (39) Dębska, B.; Wójcik, K. Evaluation of the Influence of Aggregate Type on Selected Properties of Epoxy Mortars. *E3S Web Conf.* **2018**, 49, 00018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184900018>.
- (40) Odera, R. S.; Onukwuli, O. D.; Aigbodion, V. S. Experimental Correlation between Varying Processing Parameter and Compressive Strength of Polymer-Modified Cement Mortar Composites. *Int J Adv Manuf Technol* **2018**, 98 (9), 2591–2599. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2405-z>.

- (41) Hazimmah, D.; Ayob, A.; Yee, L. S.; Cung, W. C. Microstructural Aspects in Steel Fiber Reinforced Acrylic Emulsion Polymer Modified Concrete. *E3S Web Conf.* **2018**, *34*, 01017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183401017>.
- (42) Ohama, Y. In *HandBook f Polymer-Modified Concrete and Mortars - Properties and process technology*; Noyes Publications: College of Engineering Nihon University Koriyama, Japan, 1995.
- (43) Wang, M.; Wang, R.; Yao, H.; Farhan, S.; Zheng, S.; Wang, Z.; Du, C.; Jiang, H. Research on the Mechanism of Polymer Latex Modified Cement. *Construction and Building Materials* **2016**, *111*, 710–718. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.117>.
- (44) Tonet, K. Concreto Polímero Com Resina Reciclada de PET- Influência Na Combustibilidade Frente à Adição de Resíduos Industriais. Dissertação de Mestrado, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2009.
- (45) Wang, R.; Wang, P. Function of Styrene-Acrylic Ester Copolymer Latex in Cement Mortar. *Mater Struct* **2010**, *43* (4), 443–451. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9501-3>.
- (46) Rodríguez, Á.; Gutiérrez-González, S.; Santamaría-Vicario, I.; Calderón, V.; Junco, C.; Gadea, J. Hydration in Mortars Manufactured with Ladle Furnace Slag (LFS) and the Latest Generation of Polymeric Emulsion Admixtures. In *International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC 2018)*; Taha, M. M. R., Ed.; Springer International Publishing, 2018; pp 485–490.
- (47) Sampaio, J. A.; Almeida, S. L. M. de. Calcário e Dolomito. In *Rochas e Minerais Industriais*; 2008; pp 363–391.
- (48) Martínez-López, M.; Martínez-Barrera, G.; del Coz-Díaz, J. J.; Martínez-Martínez, J. E.; Gencel, O.; Ribeiro, M. C. S.; Varela-Guerrero, V. Polymer Waste Materials as Fillers in Polymer Mortars: Experimental and Finite Elements Simulation. *Case Studies in Construction Materials* **2018**, *9*, e00178. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00178>.
- (49) Al Menhosh, A.; Wang, Y.; Wang, Y.; Augusthus-Nelson, L. Long Term Durability Properties of Concrete Modified with Metakaolin and Polymer Admixture. *Construction and Building Materials* **2018**, *172*, 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.215>.
- (50) Sun, K.; Wang, S.; Zeng, L.; Peng, X. Effect of Styrene-Butadiene Rubber Latex on the Rheological Behavior and Pore Structure of Cement Paste. *Composites Part B: Engineering* **2019**, *163*, 282–289. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.017>.

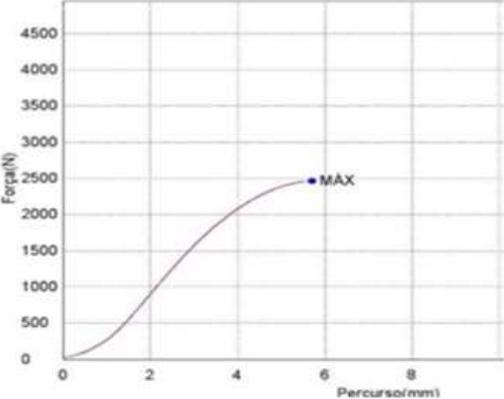
- (51) Sadrmomtazi, A.; Tajasosi, S.; Tahmouresi, B. Effect of Materials Proportion on Rheology and Mechanical Strength and Microstructure of Ultra-High Performance Concrete (UHPC). *Construction and Building Materials* **2018**, *187*, 1103–1112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.070>.
- (52) Shi-Cong, K.; Chi-Sun, P. A Novel Polymer Concrete Made with Recycled Glass Aggregates, Fly Ash and Metakaolin. *Construction and Building Materials* **2013**, *41*, 146–151. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.083>.
- (53) Patel, J.; Patil, H.; Patil, Y.; Vesmawala, G. Strength and Transport Properties of Concrete with Styrene Butadiene Rubber Latex Modified Lightweight Aggregate. *Construction and Building Materials* **2019**, *195*, 459–467. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.092>.
- (54) Sabir, B. B.; Wild, S.; Bai, J. Metakaolin and Calcined Clays as Pozzolans for Concrete: A Review. *Cement and Concrete Composites* **2001**, *23* (6), 441–454. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5).
- (55) Rashad, A. M. A Preliminary Study on the Effect of Fine Aggregate Replacement with Metakaolin on Strength and Abrasion Resistance of Concrete. *Construction and Building Materials* **2013**, *44*, 487–495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.038>.
- (56) Donnini, J.; Spagnuolo, S.; Corinaldesi, V. A Comparison between the Use of FRP, FRCM and HPM for Concrete Confinement. *Composites Part B: Engineering* **2019**, *160*, 586–594. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.111>.
- (57) Farinha, C. B.; de Brito, J.; Veiga, R. Assessment of Glass Fibre Reinforced Polymer Waste Reuse as Filler in Mortars. *Journal of Cleaner Production* **2019**, *210*, 1579–1594. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.080>.
- (58) Chowdhury, T. U.; Kazi Azizul Haque; Mahmud Amin Mahi; Md. Mostafizur Rahman. A Review on the Use of Polyethylene Terephthalate (PET) as Aggregates in Concrete. *Malaysia Journal of Science* **2018**, *37*, 118–136. <https://doi.org/10.22452/mjs.vol37no2.4>.
- (59) Mercante, I.; Alejandrino, C.; Ojeda, J. P.; Chini, C.; Maroto, C.; Fajardo, N. Mortar and Concrete Composites with Recycled Plastic: A Review. *Science and Technology of Materials* **2018**, *30* (1), 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.stmat.2018.11.003>.
- (60) Fidelis, M. E. A.; Toledo Filho, R. D.; de Andrade Silva, F.; Mobasher, B.; Müller, S.; Mechtcherine, V. Interface Characteristics of Jute Fiber Systems in a Cementitious Matrix. *Cement and Concrete Research* **2019**, *116*, 252–265. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.12.002>.

- (61) Galicia-Aldama, E.; Mayorga, M.; Arteaga-Arcos, J. C.; Romero-Salazar, L. Rheological Behaviour of Cement Paste Added with Natural Fibres. *Construction and Building Materials* **2019**, *198*, 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.179>.
- (62) Coelho, L. J. *Adesivos Para Calçados: Produtos e Aplicações*; Assintecal By Brasil: Novo Hamburgo, 2002.
- (63) Say, G. D. Alkali-Swellable and Alkali-Soluble Thickeners Technology. In *Capítulo 25 - Polymer in aqueous media*; American Chemical Society, 1989; pp 457–494.
- (64) Elementis Specialties. *Manual de Reologia: Um Guia Prático de Aditivos Reológicos*; Elementis Specialties, Inc, 2013; p 48.
- (65) Salvato, R. *Manual Descomplicado de Tecnologia de Tintas: Um Guia Rápido e Prático Para Formulação de Tintas e Emulsões*; Blucher: São Paulo, 2017.
- (66) Wang, Y.; Winnik, M. A. Effect of a Coalescing Aid on Polymer Diffusion in Latex Films. *Macromolecules* **1990**, *23* (21), 4731–4732. <https://doi.org/10.1021/ma00223a038>.
- (67) Selmo, S. M. de S.; Nakakura, E. H.; Miranda, L. F. R.; Medeiros, M. H. F. de; Silvia, C. O. Propriedades e Especificações de Argamassas Industrializadas de Múltiplo Uso. *Escola Politécnica da USP* 27.
- (68) El-Yamany, H. E.; El-Salamawy, M. A.; El-Assal, N. T. Microstructure and Mechanical Properties of Alkali-Activated Slag Mortar Modified with Latex. *Construction and Building Materials* **2018**, *191*, 32–38. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.200>.
- (69) Vo, M. L.; Plank, J. Evaluation of Natural Rubber Latex as Film Forming Additive in Cementitious Mortar. *Construction and Building Materials* **2018**, *169*, 93–99. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.098>.
- (70) ABNT. *ABNT NBR 14081-1:2012 Argamassa Colante Industrializada Para Assentamento de Placas Cerâmicas Parte 5: Determinação Do Deslizamento*; Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012; p 6.
- (71) ABNT. *ABNT NBR 14081-4:2012 - Argamassa Colante Industrializada Para Assentamento de Placas Cerâmicas - Parte 4: Determinação Da Resistência de Aderência à Tração*; Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012; p 8.
- (72) 9FNS\*

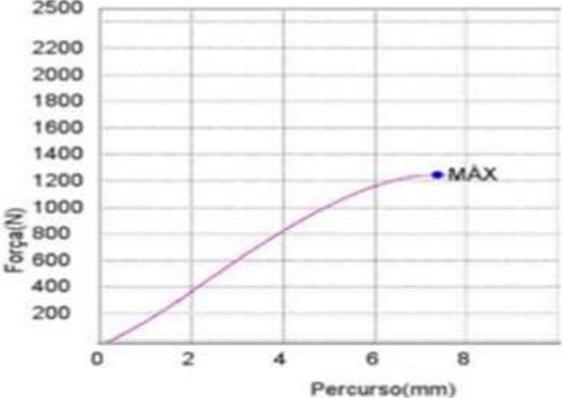
- (73) ABNT. *ABNT NBR 16590-2:2017 Composto Polimérico Para Assentamento Em Alvenaria de Vedação Parte 2: Métodos de Ensaio*; Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017; p 2.
- (74) ABNT. *ABNT NBR 15575-4:2013 Edificações Habitacionais - Desempenho Parte 4: Requisitos Para Os Sistemas de Vedações Verticais Internas e Externas — SVVIE*; Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013; p 63.
- (75) Bretas, R.; D'Ávila, M. *Reologia de Polímeros Fundidos*, 2nd ed.; EDUFSCAR, 2005.
- (76) Cardoso, F. A.; Pileggi, R.; John, V. Caracterização Reológica de Argamassas Pelo Método Squeeze-Flow; Florianópolis; p 23.
- (77) Cardoso, F. A.; John, V. M.; Pileggi, R. G.; Banfill, P. F. G. Characterisation of Rendering Mortars by Squeeze-Flow and Rotational Rheometry. *Cement and Concrete Research* **2014**, *57*, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.12.009>.
- (78) Cardoso, F. A.; Pileggi, R. G.; John, V. M. *Squeeze-flow aplicado a argamassas de revestimento: manual de utilização*; Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010; p 36.
- (79) Betioli, A. M.; John, V. M.; Gleize, P. J. P.; Pileggi, R. G. Caracterização Reológica de Pasta Cimentícia: Associação de Técnicas Complementares. **2009**, *9*, 37–48.
- (80) Cardoso, F. A.; John, V. M.; Pileggi, R. G. Rheological Behavior of Mortars under Different Squeezing Rates. *Cement and Concrete Research* **2009**, *39* (9), 748–753. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.05.014>.
- (81) Cardoso, F. A. Método de Formulação de Argamassas de Revestimento Baseado Em Distribuição Granulométrica e Comportamento Reológico. Tese Doutorado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica - Departamento da Construção Civil, 2009.
- (82) BSI. *BS 4551-1:1998 - Methods of Testing Mortars, Screeds and Plasters. Physical Testing*; 1998; p 32.
- (83) Klimaczewski, F. A. Avaliação da reologia no estado fresco de argamassas com substituição de cimento portland por cinza volante, sílica da casca do arroz e metacaulim. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Rio Grande do Sul, 2017.
- (84) ABNT. *ABNT NBR 15839:2010 - Argamassa de Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos – Caracterização Reológica Pelo Método Squeeze-Flow*; Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010; p 6.

- (85) Phan, T. H.; Chaouche, M.; Moranville, M. Squeeze Flow of Self-Compacting Cement Pastes. In *2nd International RILEM Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering*; RILEM Publications: Quebec City, Canada, 2006. <https://doi.org/10.1617/2351580028.073>.
- (86) Azevedo, A. R. G.; Alexandre, J.; Zanelato, E. B.; Marvila, M. T. Influence of Incorporation of Glass Waste on the Rheological Properties of Adhesive Mortar. *Construction and Building Materials* **2017**, *148*, 359–368. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.208>.
- (87) BrasEq. Temperatura mínima para formação de filme <http://braseq.blogspot.com/> (accessed May 29, 2017).
- (88) Box, G.; Hunter, J. S.; Hunter, W. G. *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*, Second Edition.; Wiley: Canada, 2005.
- (89) Pei, M.; Kim, W.; Hyung, W.; Ango, A. J.; Soh, Y. Effects of Emulsifiers on Properties of Poly(Styrene–Butyl Acrylate) Latex-Modified Mortars. *Cement and Concrete Research* **2002**, *32* (6), 837–841. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00733-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00733-5).
- (90) Winnik, M. A. Latex Film Formation. *Current Opinion in Colloid & Interface Science* **1997**, *2* (2), 192–199. [https://doi.org/10.1016/S1359-0294\(97\)80026-X](https://doi.org/10.1016/S1359-0294(97)80026-X).
- (91) Canevarolo Jr, S. V. *Técnicas de Caracterização de Polímero*; Artliber, 2004.

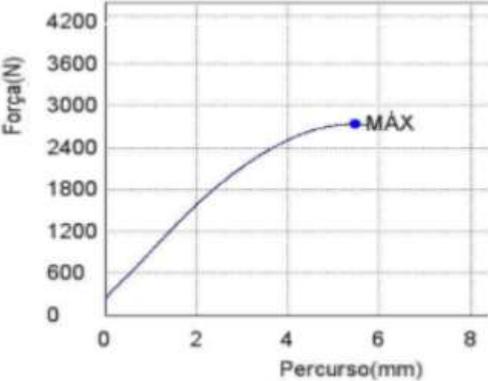
**ANEXO A - Curvas de força x deformação (mm) representativa de cada amostra avaliada no teste de resistência à compressão em função do aumento de percentual de látex.**



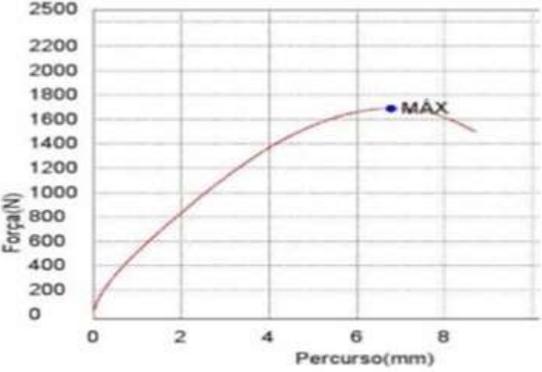
1L



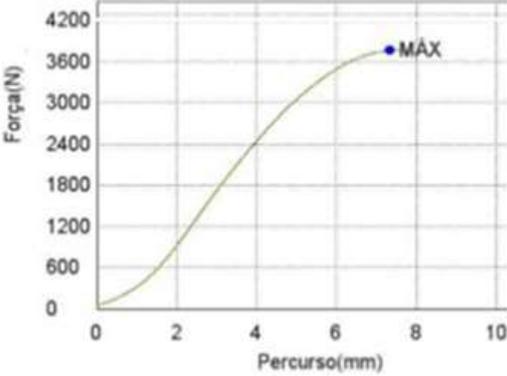
2-IL



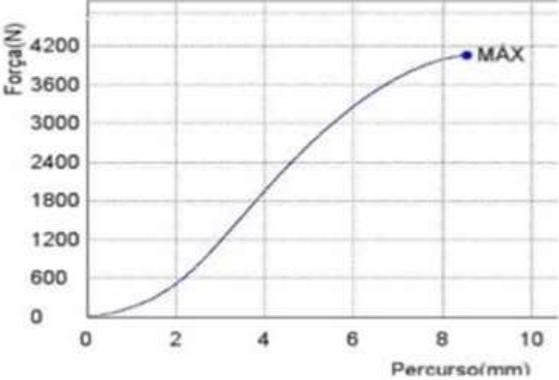
4-IL



6-IL



8-IL



10-IL

## ANEXO B – Resultados da ANOVA

Entradas e resultados da estatística descritiva

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
IL (0,1 mm/s)	3	0	1807.794	108.1983	62.46832
IL (3 mm/s)	3	0	1261.673	524.1316	302.6076
2-IL (0,1 mm/s)	3	0	1450.574	91.69081	52.93771
2-IL (3 mm/s)	3	0	1586.719	269.6711	155.6947
4-IL (0,1 mm/s)	3	0	1044.436	167.0481	96.44525
4-IL (3 mm/s)	3	0	621.3391	456.2198	263.3986
6-IL (0,1 mm/s)	3	0	787.2681	509.3743	294.0874
6-IL (3 mm/s)	3	0	1203.621	155.1756	89.59068
8-IL (0,1 mm/s)	3	0	754.4661	145.2447	83.85709
8-IL (3 mm/s)	3	0	984.1042	447.6859	258.4716
10-IL (0,1 mm/s)	3	0	1438.026	492.1295	284.1311
10-IL (3 mm/s)	3	0	1106.616	210.6242	121.604

Resultados da ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	11	4.25E+06	385922.4	3.31927	0.00676
Error	24	2.79E+06	116267.2		
Total	35	7.04E+06			

Resultados da Análise de comparação de médias de Tukey

Tukey test		MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
IL (3 mm/s)	IL (0.1 mm/s)	-546.121	278.4088	2.77409	0.71247	0.05	0	-1549.96	457.7189
2-IL (0.1 mm/s)	IL (0.1 mm/s)	-357.22	278.4088	1.81455	0.9737	0.05	0	-1361.06	646.6192
2-IL (0.1 mm/s)	IL (3 mm/s)	188.9003	278.4088	0.95954	0.99989	0.05	0	-814.939	1192.74
2-IL (3 mm/s)	IL (0.1 mm/s)	-221.075	278.4088	1.12298	0.9995	0.05	0	-1224.91	782.7648
2-IL (3 mm/s)	IL (3 mm/s)	325.0459	278.4088	1.65111	0.98686	0.05	0	-678.794	1328.886
2-IL (3 mm/s)	2-IL (0.1 mm/s)	136.1456	278.4088	0.69157	0.99999	0.05	0	-867.694	1139.985
4-IL (0.1 mm/s)	IL (0.1 mm/s)	-763.359	278.4088	3.87758	0.26517	0.05	0	-1767.2	240.481
4-IL (0.1 mm/s)	IL (3 mm/s)	-217.238	278.4088	1.10349	0.99958	0.05	0	-1221.08	786.6017
4-IL (0.1 mm/s)	2-IL (0.1 mm/s)	-406.138	278.4088	2.06303	0.93809	0.05	0	-1409.98	597.7015
4-IL (0.1 mm/s)	2-IL (3 mm/s)	-542.284	278.4088	2.7546	0.72064	0.05	0	-1546.12	461.5558
4-IL (3 mm/s)	IL (0.1 mm/s)	-1186.46	278.4088	6.02675	0.01139	0.05	1	-2190.29	-182.615

4-IL (3 mm/s) IL (3 mm/s)	-640.334	278.4088	3.25266	0.50216	0.05	0	-1644.17	363.5052
4-IL (3 mm/s) 2-IL (0.1 mm/s)	-829.235	278.4088	4.2122	0.17577	0.05	0	-1833.07	174.6049
4-IL (3 mm/s) 2-IL (3 mm/s)	-965.38	278.4088	4.90377	0.06707	0.05	0	-1969.22	38.4593
4-IL (3 mm/s) 4-IL (0.1 mm/s)	-423.097	278.4088	2.14917	0.92049	0.05	0	-1426.94	580.7431
6-IL (0.1 mm/s) IL (0.1 mm/s)	-1020.53	278.4088	5.18389	0.04391	0.05	1	-2024.37	-16.6865
6-IL (0.1 mm/s) IL (3 mm/s)	-474.405	278.4088	2.4098	0.8497	0.05	0	-1478.24	529.4342
6-IL (0.1 mm/s) 2-IL (0.1 mm/s)	-663.306	278.4088	3.36935	0.45225	0.05	0	-1667.15	340.534
6-IL (0.1 mm/s) 2-IL (3 mm/s)	-799.451	278.4088	4.06092	0.21279	0.05	0	-1803.29	204.3883
6-IL (0.1 mm/s) 4-IL (0.1 mm/s)	-257.168	278.4088	1.30632	0.99807	0.05	0	-1261.01	746.6721
6-IL (0.1 mm/s) 4-IL (3 mm/s)	165.929	278.4088	0.84286	0.99997	0.05	0	-837.911	1169.769
6-IL (3 mm/s) IL (0.1 mm/s)	-604.174	278.4088	3.06898	0.5833	0.05	0	-1608.01	399.666
6-IL (3 mm/s) IL (3 mm/s)	-58.053	278.4088	0.29489	1	0.05	0	-1061.89	945.7867
6-IL (3 mm/s) 2-IL (0.1 mm/s)	-246.953	278.4088	1.25443	0.99865	0.05	0	-1250.79	756.8864
6-IL (3 mm/s) 2-IL (3 mm/s)	-383.099	278.4088	1.946	0.95752	0.05	0	-1386.94	620.7407
6-IL (3 mm/s) 4-IL (0.1 mm/s)	159.1849	278.4088	0.8086	0.99998	0.05	0	-844.655	1163.025
6-IL (3 mm/s) 4-IL (3 mm/s)	582.2814	278.4088	2.95777	0.63277	0.05	0	-421.558	1586.121
6-IL (3 mm/s) 6-IL (0.1 mm/s)	416.3524	278.4088	2.11492	0.92783	0.05	0	-587.487	1420.192
8-IL (0.1 mm/s) IL (0.1 mm/s)	-1053.33	278.4088	5.35052	0.0339	0.05	1	-2057.17	-49.4885
8-IL (0.1 mm/s) IL (3 mm/s)	-507.207	278.4088	2.57643	0.79156	0.05	0	-1511.05	496.6323
8-IL (0.1 mm/s) 2-IL (0.1 mm/s)	-696.108	278.4088	3.53597	0.38476	0.05	0	-1699.95	307.732
8-IL (0.1 mm/s) 2-IL (3 mm/s)	-832.253	278.4088	4.22754	0.17232	0.05	0	-1836.09	171.5863
8-IL (0.1 mm/s) 4-IL (0.1 mm/s)	-289.969	278.4088	1.47294	0.99467	0.05	0	-1293.81	713.8701
8-IL (0.1 mm/s) 4-IL (3 mm/s)	133.127	278.4088	0.67624	1	0.05	0	-870.713	1136.967
8-IL (0.1 mm/s) 6-IL (0.1 mm/s)	-32.802	278.4088	0.16662	1	0.05	0	-1036.64	971.0376
8-IL (0.1 mm/s) 6-IL (3 mm/s)	-449.15	278.408	2.2815	0.8878	0.05	0	-1452.9	554.685
8-IL (3 mm/s) IL (0.1 mm/s)	-823.69	278.408	4.1840	0.1822	0.05	0	-1827.5	180.149
8-IL (3 mm/s) IL (3 mm/s)	-277.56	278.408	1.4099	0.9962	0.05	0	-1281.4	726.270
8-IL (3 mm/s) 2-IL (0.1 mm/s)	-466.47	278.408	2.3694	0.8623	0.05	0	-1470.3	537.37
8-IL (3 mm/s) 2-IL (3 mm/s)	-602.61	278.408	3.0610	0.5868	0.05	0	-1606.4	401.224
8-IL (3 mm/s) 4-IL (0.1 mm/s)	-60.331	278.408	0.3064	1	0.05	0	-1064.1	943.508
8-IL (3 mm/s) 4-IL (3 mm/s)	362.765	278.408	1.8427	0.9707	0.05	0	-641.07	1366.60
8-IL (3 mm/s) 6-IL (0.1 mm/s)	196.836	278.408	0.9998	0.9998	0.05	0	-807.00	1200.67
8-IL (3 mm/s) 6-IL (3 mm/s)	-219.516	278.4088	1.11506	0.99953	0.05	0	-1223.36	784.3233
8-IL (3 mm/s) 8-IL (0.1 mm/s)	229.638	278.4088	1.16648	0.9993	0.05	0	-774.202	1233.478
10-IL (0.1 mm/s) IL (0.1 mm/s)	-369.768	278.4088	1.87828	0.96655	0.05	0	-1373.61	634.0715
10-IL (0.1 mm/s) IL (3 mm/s)	176.3526	278.4088	0.89581	0.99994	0.05	0	-827.487	1180.192
10-IL (0.1 mm/s) 2-IL (0.1 mm/s)	-12.5477	278.4088	0.06374	1	0.05	0	-1016.39	991.2919
10-IL (0.1 mm/s) 2-IL (3 mm/s)	-148.693	278.4088	0.75531	0.99999	0.05	0	-1152.53	855.1463
10-IL (0.1 mm/s) 4-IL (0.1 mm/s)	393.5905	278.4088	1.99929	0.94929	0.05	0	-610.249	1397.43
10-IL (0.1 mm/s) 4-IL (3 mm/s)	816.687	278.4088	4.14847	0.1907	0.05	0	-187.153	1820.527
10-IL (0.1 mm/s) 6-IL (0.1 mm/s)	650.758	278.4088	3.30561	0.47929	0.05	0	-353.082	1654.598
10-IL (0.1 mm/s) 6-IL (3 mm/s)	234.4055	278.4088	1.19069	0.99915	0.05	0	-769.434	1238.245
10-IL (0.1 mm/s) 8-IL (0.1 mm/s)	683.5599	278.4088	3.47223	0.40997	0.05	0	-320.28	1687.4
10-IL (0.1 mm/s) 8-IL (3 mm/s)	453.9219	278.4088	2.30575	0.88109	0.05	0	-549.918	1457.762

10-IL (3 mm/s) IL (0.1 mm/s)	-701.178	278.4088	3.56172	0.37481	0.05	0	-1705.02	302.6619
10-IL (3 mm/s) IL (3 mm/s)	-155.057	278.4088	0.78763	0.99998	0.05	0	-1158.9	848.7826
10-IL (3 mm/s) 2-IL (0.1 mm/s)	-343.957	278.4088	1.74718	0.97996	0.05	0	-1347.8	659.8823
10-IL (3 mm/s) 2-IL (3 mm/s)	-480.103	278.4088	2.43874	0.84027	0.05	0	-1483.94	523.7366
10-IL (3 mm/s) 4-IL (0.1 mm/s)	62.18082	278.4088	0.31586	1	0.05	0	-941.659	1066.02
10-IL (3 mm/s) 4-IL (3 mm/s)	485.2773	278.4088	2.46503	0.83145	0.05	0	-518.562	1489.117
10-IL (3 mm/s) 6-IL (0.1 mm/s)	319.3483	278.4088	1.62217	0.98852	0.05	0	-684.491	1323.188
10-IL (3 mm/s) 6-IL (3 mm/s)	-97.0041	278.4088	0.49274	1	0.05	0	-1100.84	906.8355
10-IL (3 mm/s) 8-IL (0.1 mm/s)	352.1503	278.4088	1.78879	0.97625	0.05	0	-651.689	1355.99
10-IL (3 mm/s) 8-IL (3 mm/s)	122.5123	278.4088	0.62232	1	0.05	0	-881.327	1126.352
10-IL (3 mm/s) 10-IL (0.1 mm/s)	-331.41	278.4088	1.68344	0.98478	0.05	0	-1335.25	672.43

### Amostras que apresentam diferença máxima estatisticamente significativa

Amostras	Mean Difference	Prob
6-IL (3 mm/s) e 10-IL (0.1 mm/s)	-1186.46	0.01139
4-IL (0.1 mm/s) e 10-IL (0.1 mm/s)	-1020.53	0.04391
2-IL (0.1 mm/s) e 10-IL (0.1 mm/s)	-1053.33	0.0339