

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

USO DE BENTONITA COMO ADITIVO IMPERMEABILIZANTE EM
ARGAMASSA POLIMÉRICA CIMENTÍCIA

Paula Baptista Leme

São Carlos-SP
2024

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**USO DE BENTONITA COMO ADITIVO IMPERMEABILIZANTE EM
ARGAMASSA POLIMÉRICA CIMENTÍCIA**

Paula Baptista Leme

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais como requisito
parcial à obtenção do título de MESTRA EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientadora: Dra. Ana Paula da Luz

Coorientador: Dr. Marcio Raymundo Morelli

SÃO CARLOS-SP

2024

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Maria e João.

VITAE

Bacharel em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Paulo
(2019).



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Paula Baptista Leme, realizada em 19/01/2024.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Ana Paula da Luz (UFSCar)

Prof. Dr. Guilherme Yuuki Koga (UFSCar)

Profa. Dra. Cátia Fredericci (IPT)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, João e Maria, e, minhas irmãs, Juliana e Fernanda, pela paciência, palavras e incentivo aos meus estudos e por me incentivarem a sempre ir atrás dos meus sonhos.

À minha noiva e parceira de vida, Janaína, pelo apoio e ajuda em todo processo do mestrado.

Aos meus orientadores Dra. Ana Paula da Luz e Dr. Marcio Raymundo Morelli, pelo incentivo, paciência, orientações e por concordarem em me orientar mesmo quando uma mudança de rota foi necessária.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM/UFSCar, especialmente à equipe da secretaria, pelos serviços prestados.

Aos professores do PPGCEM, por todo conhecimento e experiências compartilhadas durante a realização de disciplinas do meu mestrado.

Aos meus colegas Breno Parente Bezerra, Jhonata Verza e Gustavo Soares por todo apoio e discussões técnicas.

Às empresas Buntech e Archroma pelo fornecimento das amostras que possibilitaram a realização deste estudo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

A impermeabilização é uma das etapas mais importantes na construção civil. Estudos recentes reportaram melhorias significativas no comportamento de impermeabilização de argamassas contendo bentonita. Entretanto, a adição de altas porcentagens deste aditivo pode resultar na redução da consistência e fluidez de argamassas, além de afetar o processo de hidratação do cimento Portland e as propriedades finais dos produtos em questão. Neste sentido, essa dissertação teve como objetivo avaliar o uso de bentonita sódica ativada ou cálcica como aditivo impermeabilizante de baixo custo na confecção de argamassas poliméricas. Para isso, efetuou-se a preparação de uma argamassa comercial e outras formuladas (baseadas em traços de 3,5:1 e 3:1 – razão de componentes sólidos:líquidos) contendo teores variados (0-6%-peso) de bentonita sódica ativada e cálcica. Foi realizada a caracterização das bentonitas escolhidas, assim como a avaliação do desempenho das argamassas a partir de ensaios de fluidez, absorção de água, resistência mecânica, ensaios de estanqueidade e análise microestrutural. Os resultados indicaram que as bentonitas apresentavam diferenças em sua composição química, sendo que a sódica ativada possuía menor granulometria, maior reatividade e, conseqüentemente, seu inchamento foi três vezes maior (25 ml/2g) do que a bentonita cálcica (8 ml/2g). De modo geral, todas argamassas analisadas apresentaram redução de espalhamento com a adição das bentonitas. Ademais, observou-se uma redução expressiva (6,17%) na absorção de água das amostras contendo 6%-p de bentonita sódica ativada em relação a argamassa de referência. Testes de estanqueidade comprovaram a aplicabilidade das argamassas preparadas com 2%-p de bentonita cálcica ou sódica. A incorporação de até 2%-p de bentonita sódica a formulação comercial promoveu uma redução de 18,6% de penetração de água após 48h sob a pressão positiva de 0,25 MPa.

Palavras chaves: Argamassa polimérica; Bentonita; Impermeabilização; Inchamento; Hidratação.

ABSTRACT

USE OF BENTONITE AS WATERPROOFING ADDITIVE IN POLYMERIC CEMENT MORTAR

Waterproofing is one of the most crucial stages in civil construction. Recent studies have reported significant improvements in the waterproofing behavior of mortars containing bentonite. However, the addition of high percentages of this additive can result in a reduction in the consistency and fluidity of mortars, affecting the hydration process of Portland cement and the final properties of the products. In this context, this dissertation aimed to evaluate the use of activated sodium or calcic bentonite as a low-cost waterproofing additive in the preparation of optimized polymeric mortars. For this purpose, the preparation of a commercial mortar and others formulated (based on ratios of 3.5:1 and 3:1 – ratio of solid:liquid components) containing varied amounts (0-6 wt.%) of activated sodium and calcic bentonite was carried out. The chosen bentonites were characterized, and the performance of the mortars was evaluated through tests of fluidity, water absorption, mechanical resistance, watertightness tests, and microstructural analysis. The results indicated differences in the chemical composition of the bentonites, with activated sodium having smaller particle size, higher reactivity, and, consequently, three times greater swelling (25 ml/2g) than calcic bentonite (8 ml/2g). In general, all analyzed mortars showed reduced flow with the addition of bentonites. Furthermore, a significant reduction (6.17%) in water absorption was observed in samples containing 6wt.% of activated sodium bentonite compared to the reference mortar. Watertightness tests confirmed the applicability of mortars prepared with 2wt.% of calcic or sodium bentonite. The incorporation of up to 2wt.% of activated sodium bentonite into the commercial formulation resulted in an 18.6% reduction in water penetration after 48 hours under positive pressure of 0.25 MPa.

Keywords: Polymeric mortar; Bentonite; Waterproofing; Swelling; Hydration.

ÍNDICE DE ASSUNTOS

| | Pág. |
|--|------|
| FOLHA DE APROVAÇÃO..... | i |
| AGRADECIMENTOS | iii |
| RESUMO..... | v |
| ABSTRACT | vii |
| ÍNDICE DE ASSUNTOS | ix |
| ÍNDICE DE TABELAS | xi |
| ÍNDICE DE FIGURAS | xiii |
| SÍMBOLOS E ABREVIATURAS..... | xix |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Objetivos..... | 2 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 2.1 Bentonita | 5 |
| 2.1.1 Montmorilonita | 5 |
| 2.1.2 Tipos e classificação de bentonitas | 7 |
| 2.1.3 Processo de ativação com carbonato de sódio..... | 9 |
| 2.1.4 Comportamento reológico das bentonitas | 11 |
| 2.1.4.1 Interação entre as partículas de argila..... | 11 |
| 2.1.5 Aplicações | 13 |
| 2.2 Cimento <i>Portland</i> | 16 |
| 2.2.1 Hidratação do cimento..... | 17 |
| 2.2.2 Influência do óxido de cálcio e óxido de magnésio na cura do cimento | 20 |
| 2.3 Impermeabilização | 21 |
| 2.3.1 Mecanismo de atuação da água nas edificações | 22 |
| 2.3.2 Escolha da Impermeabilização | 26 |
| 2.2.2.1 Tipos de sistemas de impermeabilização..... | 27 |
| 2.2.2.2 Argamassa Impermeabilizante..... | 28 |
| 2.3.3 Mecanismos de proteção de superfície contra umidade | 34 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 37 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1 | Caracterização da bentonita cálcica e sódica ativada..... | 37 |
| 3.1.1 | Distribuição do tamanho de partícula | 38 |
| 3.1.2 | Determinação do inchamento..... | 38 |
| 3.1.3 | Análise Química – Fluorescência de raios X (FRX)..... | 38 |
| 3.1.4 | Difratometria de raios X (DRX)..... | 38 |
| 3.2 | Preparação de argamassas poliméricas | 39 |
| 3.3 | Ensaio de caracterização e performance das argamassas poliméricas | 39 |
| 3.3.1 | Resistência a estanqueidade (pressão positiva e negativa)..... | 40 |
| 3.3.2 | Fluidez e variação de fluidez | 41 |
| 3.3.3 | Absorção de água da membrana cimentícia..... | 42 |
| 3.3.4 | Resistência a compressão após cura de 28 dias..... | 42 |
| 3.3.5 | Análise microestrutural | 43 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 45 |
| 4.1 | Caracterização das bentonitas selecionadas..... | 45 |
| 4.2 | Definição dos traços das argamassas impermeabilizantes | 48 |
| 4.2.1 | Análise química e mineralógica das argamassas analisadas..... | 48 |
| 4.2.2 | Efeito do tipo e do teor das bentonitas na reologia das argamassas | 48 |
| 4.2.3 | Caracterização das demais propriedades das argamassas preparadas.... | 57 |
| 4.3 | Avaliação do efeito das resinas utilizadas na preparação das argamassas.. | 66 |
| 4.4 | Ensaio de estanqueidade | 74 |
| 5 | CONCLUSÕES | 77 |
| 6 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 79 |
| 7 | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 81 |
| | ANEXO A | 87 |
| | ANEXO B | 89 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | Pág. |
|---|------|
| Tabela 2.1 – Principais componentes do cimento Portland COMUM [22]..... | 16 |
| Tabela 2.2 – Tipos de umidade e superfícies afetadas | 26 |
| Tabela 2.3 – Uso indicado para cada sistema de impermeabilização por membrana [2] | 29 |
| Tabela 2.4 - PCCs utilizados e temperatura de transição vítrea (Tg) desses materiais [35] | 30 |
| Tabela 3.1 - Materiais utilizados na etapa experimental | 37 |
| Tabela 3.2 - Ensaio de desempenho das argamassas polimérica com cimento avaliadas nessa dissertação | 40 |
| Tabela 4.1 - Resumo dos resultados de resistência a pressão negativa | 74 |
| Tabela 4.2 - Resumo dos resultados de resistência a pressão positiva..... | 75 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|------|
| Figura 2.1 – Estrutura 2:1 típica da montmorillonita [8,9]..... | 5 |
| Figura 2.2 – Diferença do comportamento de inchamento de bentonita cálcica versus bentonita sódica [11]..... | 7 |
| Figura 2.3 – Imagem ilustrando o efeito da delaminação da bentonita sódica devido a sua hidratação [4] | 8 |
| Figura 2.4 –Diferenças no comportamento de dispersão de bentonitas de diferentes tipos em meio aquoso [7]..... | 8 |
| Figura 2.5 – Processo de ativação de bentonitas conforme desenvolvido pela empresa Erbslon & Co [8] | 10 |
| Figura 2.6 – Influência da adição de carbonato de sódio na ativação de bentonitas e seu efeito no inchamento destes materiais [14]..... | 10 |
| Figura 2.7 –Tipos de interações em solução aquosa de partículas defloculadas de montmorillonita a) interação face a face b) interação aresta a aresta c) interação face a aresta. [16]..... | 12 |
| Figura 2.8 – Estrutura de géis tixotrópicos formados por bentonitas de baixa concentração: a) gel do tipo face a aresta b) gel do tipo aresta a aresta c) estrutura “house of cards”. [Adaptado 16]..... | 13 |
| Figura 2.9 – Influência da adição de bentonita na redução da condutividade hidráulica de solos [17]..... | 14 |
| Figura 2.10 – Retenção de água versus pressão de sucção para uma bentonita e um geotextil [18]..... | 14 |
| Figura 2.11 –Gradiente de pressão exercida pelo slurry TBM e a pressão hidrostática da água do solo [19]..... | 15 |
| Figura 2.12 –Redução na absorção de água com o aumento da porcentagem de bentonita [21]..... | 16 |
| Figura 2.13 – Representação esquemática da liberação de calor (A) e a concentração de Ca^{+2} em solução (B) durante a cura do cimento e indicação das etapas de Estágio inicial (I), Indução (II), período acelerado (III), período de desaceleração (IV) e estágio final (V) [24] | 18 |
| Figura 2.14 – Etapas de hidratação de uma partícula de cimento [26] | 19 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.15 – Esquema ilustrativo do efeito da umidade por capilaridade em edificações [1] | 23 |
| Figura 2.16 – Efeitos associados com a umidade por capilaridade. (a-b) Manchas formadas devido a Infiltração, (c) eflorescência e (d) aparecimento de bolor [29] | 23 |
| Figura 2.17 – Frissuras em fachada decorrentes da umidade por precipitação [29] | 24 |
| Figura 2.18 – Ilustração de como ocorre a umidade por percolação [1]..... | 24 |
| Figura 2.19 – Efeito da umidade por condensação [31] | 25 |
| Figura 2.20 – Pressão hidrostática da água sobre a impermeabilização [18] .. | 26 |
| Figura 2.21 – Sistema de impermeabilização rígido e flexível [32]..... | 27 |
| Figura 2.22 – Classificação de argamassas impermeabilizantes cimentícias [32] | 30 |
| Figura 2.23 – Comportamento de (a) resistência a flexão e (b) adesão de argamassas contendo diferentes PCCs em função do tempo [35]..... | 32 |
| Figura 2.24 – Absorção de água x tempo de exposição externa de argamassa contendo diferentes aditivos poliméricos [35]..... | 33 |
| Figura 2.25 – Evolução da impermeabilidade de argamassas cimentícias devido a adição de bentonita ou quartzo [5] | 33 |
| Figura 2.26 – Impermeabilidade a pressão de argamassas em função da adição de vários tipos de bentonitas ou quartzo [6] | 34 |
| Figura 2.27 – (a) Consistência e (b) fluidez da argamassa em função do tipo de bentonita ou quartzo adicionado a mistura [6]..... | 34 |
| Figura 2.28 – Mecanismos tradicionais de proteção de superfície [33]..... | 35 |
| Figura 2.29 – Mecanismo de impermeabilização matriz cimento-bentonita [5] | 36 |
| Figura 3.1 – Ensaio de estanqueidade sob pressão positiva e negativa | 41 |
| Figura 4.1 – Distribuição de tamanho de partículas das bentonitas estudadas | 45 |
| Figura 4.2 – Comparação dos resultados de inchamento das bentonitas em meio aquoso | 46 |
| Figura 4.3 – Composição química das bentonitas avaliadas | 47 |

Figura 4.4 – Difratoogramas de raio X obtidos para as bentonitas avaliadas. Fases identificadas: S = Saponita ($\text{Ca}_{0,2}\text{Mg}_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 29-1491); M = Montmorillonita ($\text{Na}_{0,3}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 29-1498); C = Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, 29-1488); D = quartzo (SiO_2 , 77-1060); A = Antigorita ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, 52-1572)..... 47

Figura 4.5 – Composição química da parte sólida das argamassas analisadas. 49

Figura 4.6 – : Difratoogramas da parte sólida das argamassas antes do seu processamento. Q = α -quartzo (SiO_2 , 77-1060), H= hatrurita (Ca_3SiO_5 , 86-402), M = mervinita ($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)$, 35-591), P= periclásio (MgO , 75-447) S= silicato de cálcio (belita) (Ca_2SiO_4 , 42- 551) C= óxido de cálcio (CaO , 17-912).....49

Figura 4.7 – Valores absolutos da fluidez das argamassas preparadas (parte A da argamassa comercial e traço 3,5:1) em função do tempo e do teor de adição das bentonitas (a) cálcica e (b) sódica ativada..... 50

Figura 4.8 – Variação da fluidez das argamassas preparadas (parte A da argamassa comercial e traço 3,5:1) em função do tempo e do teor de adição das bentonitas (a) cálcica e (b) sódica ativada 51

Figura 4.9 – Valores absolutos da fluidez das argamassas preparadas (parte A da formulação desenvolvida e traço 3,5:1) em função do tempo e do teor de adição das bentonitas (a) cálcica e (b) sódica ativada. 53

Figura 4.10 – Variação da fluidez das argamassas preparadas (parte A da formulação desenvolvida e traço 3,5:1) em função do tempo e do teor de adição das bentonitas (a) cálcica e (b) sódica ativada..... 54

Figura 4.11 – Valores absolutos da fluidez das argamassas preparadas (parte A da formulação desenvolvida e traço 3:1) em função do tempo e do teor de adição das bentonitas (a) cálcica e (b) sódica ativada..... 55

Figura 4.12 – Variação da fluidez das argamassas preparadas (parte A da formulação desenvolvida e traço 3:1) em função do tempo e do teor de adição das bentonitas (a) cálcica e (b) sódica ativada..... 56

- Figura 4.13 – Absorção de água após 28 dias de cura da (a) argamassa comercial, (b) formulada com traço 3,5:1 e (c) formulada com traço 3:1. As misturas continham teores de 0-6%-p das bentonitas selecionadas 58
- Figura 4.14 – Resistência à compressão após 28 dias de cura da argamassa (a) comercial, (b) formulada com traço 3,5:1 e (c) formulada com traço 3:1 e contendo diferentes teores de bentonita 60
- Figura 4.15 – : Difractogramas da argamassa comercial traço 3,5:1 com e sem a adição de 2%-p das bentonitas (cálcica ou sódica) após o período de cura de 28 dias. Q = α -quartzo (SiO_2 , 77-1060), H= hatrurita (Ca_3SiO_5 , 86-402), P = periclásio (MgO , 75-447) C = hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, 84-1263) R= Riversideite-9-A($\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2$, 29-329) Ca= Cálcio silício (Ca-Si, 89-6162).....61
- Figura 4.16 – Difractogramas da argamassa formulada com traço 3,5:1 e com e sem a adição de 2%-p de bentonita (cálcica ou sódica) após o período de cura de 28 dias. Q = quartzo (SiO_2 , 77-1060), CO = óxido de cálcio (CaO , 28-775) C = hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). CSH = silicato de cálcio hidratado ($\text{Ca}_{1.5}\text{SiO}_3 \cdot 5x \cdot \text{H}_2\text{O}$, 33-306). 62
- Figura 4.17 – Micrografias das argamassas analisadas após 28 dias de cura sem adição de bentonita. (a) Argamassa comercial e (b) formulada (traço 3,5:1). Imagens obtidas com aumento de 100 x no modo elétrons secundários (SE)..63
- Figura 4.18 – Micrografias da seção da fratura das argamassas sem adição de bentonita e enrijecidas após 28 dias de cura. (a e b) Amostra comercial e (c e d) amostra formulada (traço 3,5:1). 64
- Figura 4.19 – Micrografias destacando a formação da fase hidróxido de cálcio (CH) na microestrutura da argamassa formulada – traço 3,5:1. (a e b) Sem adição de bentonita (0%-p), ou contendo 2%-p de bentonita (c) sódica ativada ou (d) cálcica..... 65
- Figura 4.20 – Micrografias destacando a presença e distribuição dos poros nas argamassas (a) comercial e (b) formulada (traço 3,5:1) contendo 2%-p da bentonita cálcica..... 66

| | |
|--|----|
| Figura 4.21 – Valores absolutos da fluidez das argamassas da composição 1 (parte A comercial + parte B formulada e traço 3,5:1) em função do tempo e do teor de adição das bentonitas (a) cálcica e (b) sódica ativada | 68 |
| Figura 4.22 – Variação da fluidez das argamassas da composição 1 (parte A comercial + parte B formulada e traço 3,5:1) em função do tempo e do teor de adição das bentonitas (a) cálcica e (b) sódica ativada | 69 |
| Figura 4.23 – Valores absolutos da fluidez das argamassas da composição 2 composição teste 2 = parte A formulada + parte B comercial e traço 3,5:1). em função do tempo e do teor de adição das bentonitas (a) cálcica e (b) sódica ativada..... | 70 |
| Figura 4.24 – Variação de fluidez das argamassas da composição teste 2 = parte A formulada + parte B comercial e traço 3,5:1. em função do tempo e do teor de adição das bentonitas (a) cálcica e (b) sódica ativada | 71 |
| Figura 4.25 – Resultado de absorção de água a) composição 1 (parte A comercial + parte B formulada e traço 3,5:1) e b) composição 2 (parte A formulada + parte B comercial e traço 3,5:1). | 72 |
| Figura 4.26 – Resultado de resistência a compressão a) composição 1 (parte A comercial + parte B formulada e traço 3,5:1) e b) composição 2 (parte A formulada + parte B comercial e traço 3,5:1). | 73 |
| Figura 4.27 –Imagens das amostras submetidas aos ensaios de resistência a pressão positiva: a) argamassa comercial de referência, contendo b) 2%-p de bentonita cálcica e c) 2 %-p de bentonita sódica. | 75 |
| Figura 4.28 – Imagens das amostras submetidas aos ensaios de resistência a pressão negativa: a) argamassa comercial de referência, contendo b) 2%-p de bentonita cálcica e c) 2 %-p de bentonita sódica. | 76 |

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ASTM: American Standard for Testing of Materials

CTC: Capacidade de Troca Catiônica

GCL: Geosynthetic Clay Liner

PCC: Polímero concreto cimento

NBR: Norma Brasileira

TBM: Tunnel Boring Machine

C3S: Silicato tricálcio (Alita)

C2S: Silicato dicálcio (Belita)

C3A: Aluminato tricálcio

C4AF: Ferroaluminato tetracálcio

CSH: Silicato de cálcio hidratado

CH: Hidróxido de cálcio

1 INTRODUÇÃO

A impermeabilização de estruturas e construções são de extrema importância, pois evitam que a umidade entre em contato com o concreto, o que reduz o surgimento de patógenos, trincas e fissuras, protege contra os efeitos do intemperismo e aumenta o tempo de vida útil das edificações. Dentre os tipos de impermeabilização existentes no mercado, as argamassas poliméricas com adição de cimento se destacam pelo seu uso em fachadas, lajes, caixas d'água, banheiros e subterrâneos. Dessa forma, elas precisam apresentar adequada resistência à umidade por capilaridade, percolação, pressão positiva e negativa. [1,2]

Contudo, sabe-se que a maior parte das argamassas poliméricas, principalmente as semiflexíveis, não atingem as especificações indicadas na NBR 11905, quanto ao quesito resistência à umidade em pressão negativa e positiva. Isso ocorre devido ao uso de pequenas quantidades de aditivos impermeabilizantes, como silanos e resinas, nas formulações das argamassas poliméricas, pois estes apresentam alto custo. Além disso, esses agentes possuem mecanismos de impermeabilização superficial, por meio da formação de um filme polimérico e da modificação da superfície dos componentes da argamassa, passando de um comportamento hidrofílico para hidrofóbico [2]. Portanto, mesmo que esse produto seja aplicado em várias demãos, em muitos casos, somente esse tipo de mecanismo de impermeabilização não é suficiente para resistir às pressões hidráulicas altas.

A bentonita é um argilomineral que possui propriedades importantes, como capacidade de troca catiônica, tamanho de partículas em escala nanométrica, refratariedade, induz aumento da viscosidade quando dispersada em água, comportamento reológico do tipo tixotrópico e inchamento quando em contato com água, o que lhe proporciona grande versatilidade de aplicações industriais (mais de 11 segmentos). Destaca-se seu papel na construção civil, atuando como aditivo para uso na impermeabilização de paredes de metrô, solo, barragens e aterros [3,4].

Estudos recentes [5,6] reportaram mudanças significativas na impermeabilidade sob pressão hidráulica de argamassas contendo bentonita. Yang et al. [5] propuseram que o mecanismo de impermeabilização da bentonita consiste na atuação desta como um componente na matriz com o cimento, diminuindo os tamanhos dos poros da argamassa endurecida e, quando em contato com a água, ela incha formando uma película impermeável que impede a absorção de água. Além disso, Liu et al. [6] verificaram que bentonitas sódicas contribuem mais efetivamente para aumentar a impermeabilização de superfícies, quando comparadas às bentonitas cálcicas, em função de sua maior capacidade de inchamento.

Apesar do Brasil não possuir reservas de bentonitas sódicas naturais, estas podem ser produzidas a partir do tratamento de bentonitas cálcicas por meio de um processo de ativação com carbonato de sódio [7], o qual permite a troca dos cátions Ca^{2+} interlaminares pelos de Na^+ , dando origem as bentonitas sódicas ativadas.

Neste contexto, esta dissertação propôs a avaliação do efeito da incorporação de diferentes teores de uma bentonita cálcica ou uma sódica ativada em argamassas poliméricas contendo cimento Portland.

1.1 Objetivos

O objetivo da presente dissertação consistiu em avaliar a atuação de dois tipos de bentonita (uma cálcica e uma sódica ativada) quando incorporadas a argamassas poliméricas contendo cimento, visando a otimização do desempenho da resistência à umidade sob pressão negativa e positiva destes materiais.

Para atingir o objetivo definido, as seguintes etapas (objetivos específicos) foram definidas:

- (i) Avaliação das características físico-químicas da bentonita cálcica e da bentonita sódica ativada selecionadas como aditivos;
- (ii) Identificação do teor ótimo e a influência do tipo de bentonita nas propriedades e desempenho das argamassas poliméricas elaboradas;

- (iii) Análise dos pontos positivos e das limitações da incorporação deste aditivo nas argamassas desenvolvidas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Bentonita

Bentonita é a nomenclatura utilizada para denominar argilas com alto teor de montmorilonita. Dessa forma, elas comumente apresentam alta área superficial, capacidade de troca catiônica, capacidade de hidratação e plasticidade quando em contato com água [7,8].

2.1.1 Montmorilonita

A Figura 2.1 apresenta a estrutura cristalina típica de uma montmorillonita, a qual é formada por 2 folhas tetraédricas de sílica e uma folha octaédrica de alumina intermediária, formando uma estrutura do tipo 2:1, que também é denominada como lamela e que possui dimensões menores que 1 nm.

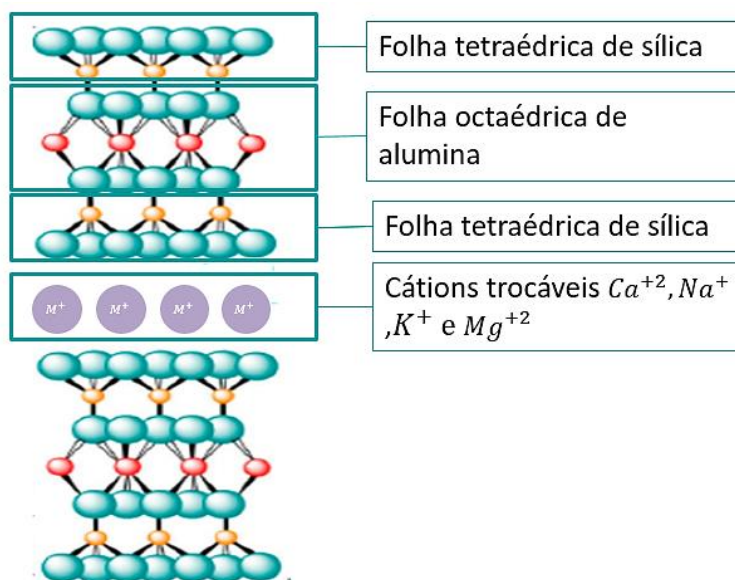


Figura 2.1: Estrutura cristalina 2:1 típica da montmorillonita [8,9].

As ligações químicas entre os átomos de cada folha, que formam a lamela, são fortes e do tipo mista covalente-iônica, e, portanto, são de difíceis ruptura. Por outro lado, as ligações entre as lamelas são secundárias do tipo de

Van der Waals, o que permite a separação destas quando na presença de excesso de água ou sob a aplicação de solicitações mecânicas [8].

Geralmente, devido às substituições isomórficas nas posições tetraédricas ou octaédricas, como por exemplo de Al^{+3} por Mg^{+2} , a montmorilonita apresenta excesso de cargas negativas que são contrabalanceadas por cátions intercambiáveis na região interlamelar. Como a ligação química desses cátions com a lamela é fraca, estes podem ser modificados, o que favorece inúmeras aplicações tecnológicas para a montmorillonita. Essa característica é chamada de capacidade de troca de cátions (CTC) e para a bentonita ela está em torno de 80 – 150 mEq/100g de argila seca [8,9].

Além da CTC, as bentonitas possuem a capacidade de hidratação também conhecida como inchamento, a qual ocorre a partir da adsorção de água na região interlamelar, promovendo o distanciamento das lamelas e o enfraquecimento das ligações, o que, em alguns casos, pode resultar na delaminação completa e separação total destas.

Além dessas características mencionadas, a seguir apresenta-se, de maneira sucinta, uma lista com algumas das propriedades das bentonitas que lhes conferem grande versatilidade para aplicações industriais [3]:

- *Granulometria*: trata-se da facilidade de desagregação, a qual permite obter pós extremamente finos;
- *Superfície específica*: a sua alta área específica superficial (~800 m²/g) permite a aplicação destas em massas cerâmicas, em processos de catálise e branqueamento de óleos;
- *Reologia*: está diretamente associada à sua capacidade de hidratação, o que permite a sua dispersão em meio aquoso de forma coloidal;
- *Refratariedade*: podem ser submetidas a altas temperaturas sem que sua estrutura química seja afetada;
- *Viscosidade*: promove o aumento irreversível da viscosidade de um fluido;
- *Tixotropia*: Trata-se do comportamento reológico que um fluido adquire após a adição de uma determinada concentração de bentonita, que confere ao meio a propriedade de gel quando em repouso e estado de sol quando sob

agitação, propiciando a aplicação destas misturas como fluidos de perfuração, tintas, entre outros.

2.1.2 Tipos e classificação das bentonitas

As bentonitas podem ser classificadas de acordo com a predominância do tipo de cátion trocável, como, por exemplo: bentonita sódica (Na^+), cálcica (Ca^{+2}), policatiônica (quando não se tem nenhuma predominância de cátion) e magnésiana (Mg^{+2}) [9]. Além disso, elas podem também ser diferenciadas quanto a sua capacidade de hidratação, havendo aquelas que: (i) incham e possuem Na^+ como cátion predominante, ou (ii) que incham em menor intensidade, sem delaminação, que são as policatiônicas ou cálcicas. [8,10].

A Figura 2.2 ilustra o mecanismo de hidratação das bentonitas, no qual a água é adsorvida na região interlamelar, provocando o distanciamento das lamelas e, conseqüentemente, o enfraquecimento das ligações de Van der Waals. No caso das bentonitas sódicas, a adsorção de água é suficiente para que ocorra a delaminação completa da estrutura, conforme mostra a Figura 2.3 [4,7].

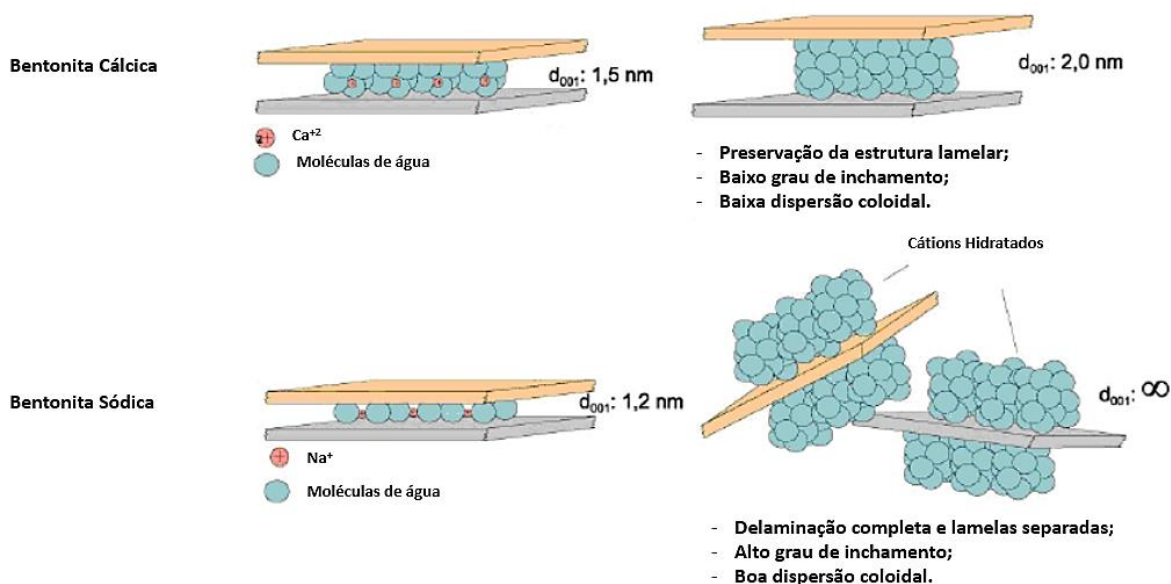


Figura 2.2: Diferença do comportamento de inchamento de bentonita cálcica versus bentonita sódica [11].

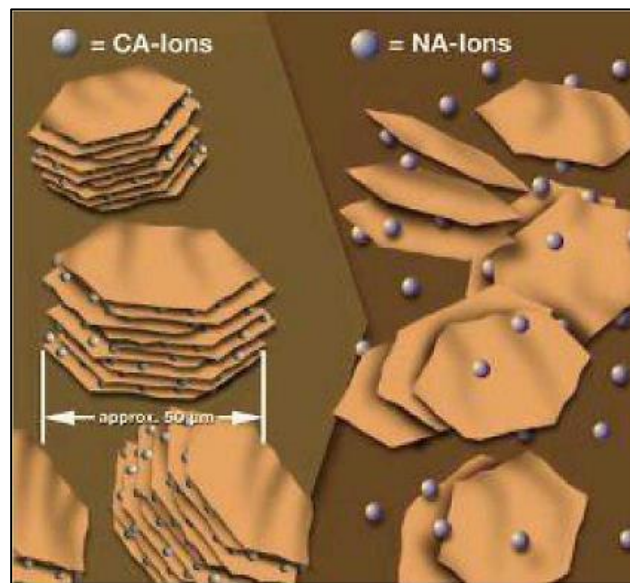


Figura 2.3: Imagem ilustrando o efeito da delaminação da bentonita sódica devido a sua hidratação [4].

Devido a sua maior capacidade de hidratação, as bentonitas sódicas se dispersam de maneira homogênea, defloculada em meio aquoso. Entretanto, a cálcica não apresenta a delaminação completa, o que resulta na formação de uma suspensão heterogênea e com a segregação do material particulado no fundo do recipiente (Figura 2.4).



Figura 2.4: Diferenças no comportamento de dispersão de bentonitas de diferentes tipos em meio aquoso [7].

Esse comportamento característico em meio aquoso das bentonitas sódicas confere melhores propriedades [7]. Além disso, as bentonitas podem passar por diversas modificações químicas como ativação alcalina ou ácida e organofilização, o que permite a aplicação destes materiais em diferentes situações [8].

2.1.3 Processo de ativação de bentonita com carbonato de sódio

Alguns países, como o Brasil, somente possuem disponibilidade de bentonitas policatiônicas ou cálcicas [8,10]. No entanto, a fim de promover a mudança das características das argilas existentes, em 1933 a empresa Erbsloh & Co desenvolveu e patenteou um processo cujo objetivo era promover a troca dos cátions interlamelares de Ca^{+2} por íons de Na^+ , conforme mostra a Figura 2.5, transformando bentonitas cálcicas em sódicas ativadas [8]. Neste sentido, avaliou-se a adição de 2,5 a 3,0% em peso de carbonato de sódio ou barrilha (Na_2CO_3) às bentonitas, seguida de procedimentos como homogeneização, laminação ou extrusão na presença de umidade controlada, secagem e moagem dos materiais obtidos.

Testes efetuados com as bentonitas ativadas (obtidas seguindo o procedimento destacado na Figura 2.5) comprovaram o aumento do inchamento destes materiais quando em contato com água, atestando a eficiência na troca dos cátions interlamelares de Ca^{+2} por íons de Na^+ (Figura 2.6) [8].

O desenvolvimento do processo de ativação das bentonitas cálcicas foi motivado a partir da constatação das melhores propriedades de aplicação tecnológica das bentonitas sódicas, principalmente devido ao maior potencial iônico (relação entre carga e raio iônico) das bentonitas cálcicas em relação as sódicas, o que leva a maior força das ligações na região interlamelar e menor capacidade de hidratação [12].

Evangeline et al. [13] verificaram nos seus estudos uma redução significativa de condutividade hidráulica de bentonitas cálcicas ativadas com carbonato de sódio em relação as cálcicas, demonstrando que o processo de ativação melhora as propriedades destas últimas.

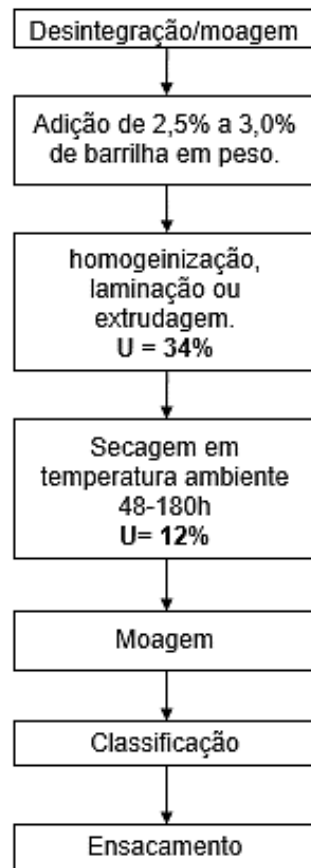


Figura 2.5: Processo de ativação de bentonitas conforme desenvolvido pela empresa Erbsloh & Co [8].

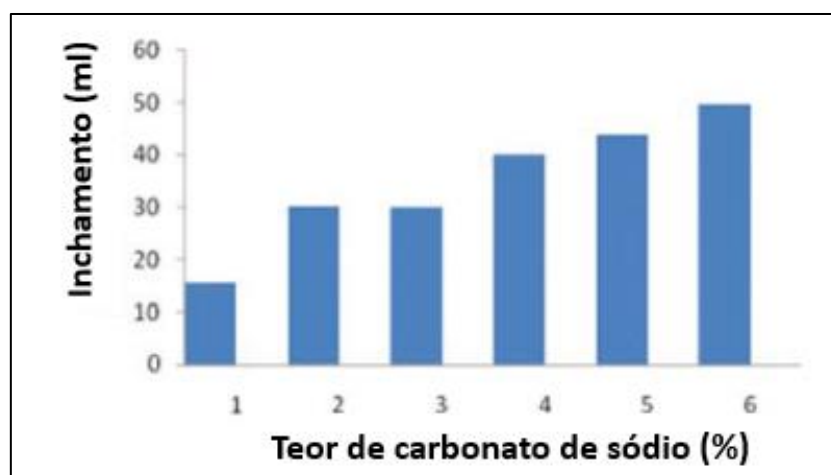


Figura 2.6: Influência da adição de carbonato de sódio na ativação de bentonitas cálcicas e seu efeito no inchamento destes materiais [14].

Entretanto, a eficácia do processo de ativação depende da qualidade do processo escolhido e da quantidade de carbonato de sódio adicionado à bentonita, sendo que, um processo de ativação de baixa qualidade pode levar a troca parcial dos cátions de cálcio por sódio e a baixa estabilidade da ativação, ou seja, com o tempo a bentonita sódica ativada volta a ser cálcica [14,15].

Dessa forma, é imprescindível que seja realizada pesquisas para a determinação das condições ideais para a ativação da bentonita (teor de água, cisalhamento e teor de barrilha adicionado). Kaufhold et al. [14] analisaram a dosagem de carbonato de sódio (entre 1-6 %-p), o que corresponde a uma quantidade deste aditivo abaixo ou ligeiramente superior a CTC da bentonita escolhida. Verificou-se a troca completa dos cátions de cálcio por sódio quando o carbonato foi adicionado em excesso (acima da CTC) e com uma grande quantidade de água. Por outro lado, a troca parcial dos cátions foi identificada quando o carbonato adicionado estava abaixo da CTC da argila usada.

Outros procedimentos de ativação e as melhorias advindas destes processos [12] são apresentados no Anexo A.

2.1.4 Comportamento reológico das bentonitas

Uma das características das bentonitas é a sua capacidade de mudança da reologia da mistura quando adicionada a um sistema aquoso. Dessa maneira, a adição destas argilas a uma composição de argamassa impermeabilizante deve ser avaliada cuidadosamente para que a trabalhabilidade da mistura não inviabilize a sua utilização.

Neste sentido, esta seção tem como objetivo explicar a interação da bentonita + água e a alteração da reologia da suspensão gerada e conceitos básicos de tixotropia.

2.1.4.1 Interação entre as partículas de argila e o meio aquoso

As bentonitas podem formar uma suspensão coloidal, quando diluída em água. Segundo Shiroma [16], cada partícula coloidal é composta por 10^3 a 10^9 átomos, sendo que esses podem formar partículas esféricas (esferocolóides) ou

assimétricas, fibras (como celulose) ou placas (como a maioria dos argilominerais).

Além disso, em uma suspensão coloidal, as bentonitas possuem um caráter bipolar, com cargas negativas localizada na face e cargas positivas nas arestas, existindo três formas de interação entre duas partículas coloidais:

- Interação entre as faces maiores (*face-to-face*-FF);
- Interação entre aresta e aresta (*edge-to-edge*-EE);
- Interação entre face e aresta (*face-to-edge*-FE ou EF).

Nas formas (a) e (b) ocorre principalmente a interação entre duas camadas iônicas difusas e na forma (c) predomina a interação eletrostática, uma vez que, possuem cargas opostas (Figura 2.7).

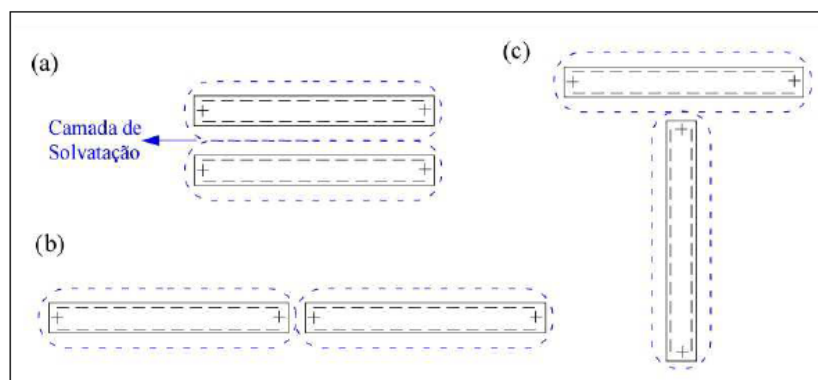


Figura 2.7: Tipos de interações em solução aquosa de partículas defloculadas de montmorilonita a) interação face a face b) interação aresta a aresta c) interação face a aresta [16].

Caso as partículas sejam majoritariamente assimétricas, como em uma suspensão coloidal de bentonita sódica, estas podem flocular devido as interações EE e EF, formando um gel rígido e elástico (gelificação). Neste caso, a estrutura do gel se assemelha a uma casa feita com cartas de baralho [16], como ilustrado na Figura 2.8. Essa floculação promove a alteração da reologia do fluido em que a bentonita é inserida, gerando uma mistura com comportamento tixotrópico.

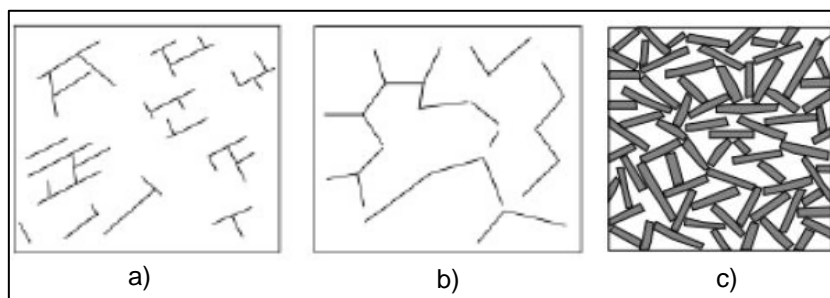


Figura 2.8: Estrutura de géis tixotrópicos formados por bentonitas de baixa concentração: (a) gel do tipo face a aresta, (b) gel do tipo aresta a aresta e (c) estrutura “house of cards”. (Adaptado de [16]).

2.1.5 Aplicações

Sabendo do contexto deste projeto e das diversas possíveis aplicações da bentonita (Anexo B), esta seção focará apenas na apresentação de dados voltados ao uso deste tipo de argila na construção civil.

- *Impermeabilização de solo*

A mistura de bentonita no solo para impermeabilização é amplamente utilizada como forro em aterro sanitário. Nguyen et al. [17] observaram a redução significativa da condutividade hidráulica com o aumento da porcentagem de bentonita sódica misturada ao solo (Figura 2.9), confirmando a ação positiva deste aditivo.

- *Impermeabilização de barragem e aterro (GCL)*

Os forros de bentonita geossintético são utilizados a décadas como um elemento essencial para disposição de resíduos municipais e industriais, principalmente devido à sua capacidade de retenção de água e inchamento [18]. Além disso, devido ao sistema de aplicação do GCL, esses materiais são submetidos a altas pressões de sucção. A Figura 2.10 indica a capacidade de retenção de água pela bentonita sódica natural em função da aplicação de pressão de sucção, a qual apresenta desempenho superior ao do composto geotêxtil tradicional.

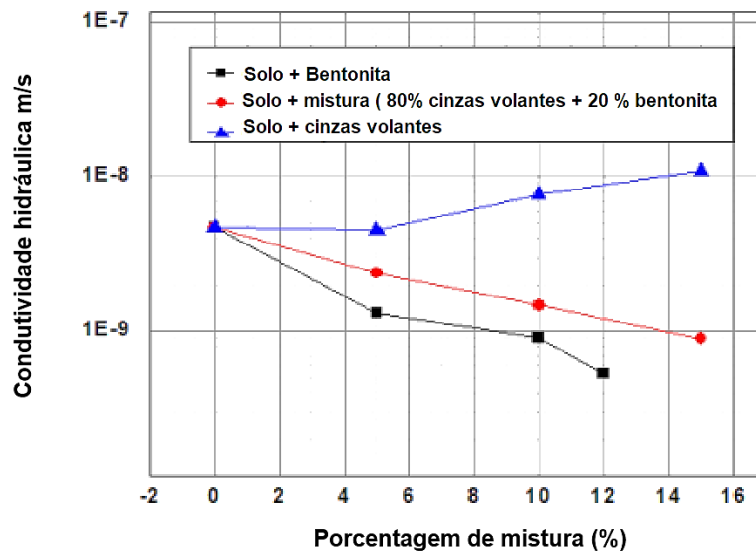


Figura 2.9: Influência da adição de bentonita na redução da condutividade hidráulica de solos [17].

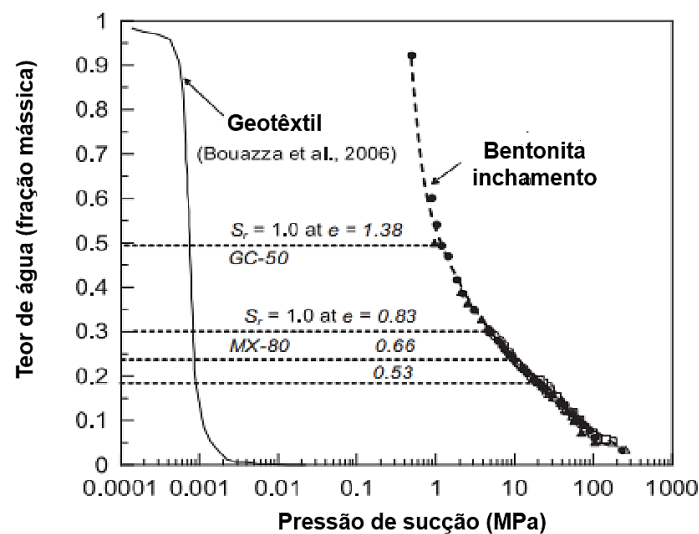


Figura 2.10: Retenção de água versus pressão de sucção para uma bentonita e um geotêxtil [18].

- *Impermeabilização das paredes do metrô (Graute e "slurry")*

Normalmente, a escavação de um metrô é realizada por um equipamento denominado Tunnel Boring Machine (TBM) e, durante este processo, é imprescindível a impermeabilização das paredes do túnel, a fim de se promover sustentação e evitar o desmoronamento do mesmo.

Portanto, a bentonita é utilizada na forma de uma barbotina (*slurry*) no momento da escavação, para evitar a infiltração de água e auxiliar na retirada de

resíduos de rochas e pedras provenientes do processo de retirada de materiais. A Figura 2.11 indica que a pressão que a suspensão confere as paredes do metrô é superior a pressão hidráulica exercida pela água contida no solo. Dessa forma, não ocorre a infiltração de água e as paredes do metrô permanecem íntegras [19].

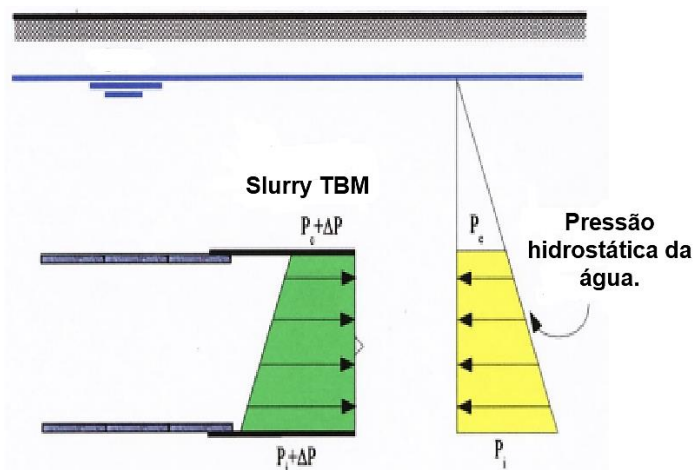


Figura 2.11: Gradiente de pressão exercida pela suspensão TBM e a pressão hidrostática da água do solo [19].

Além disso, o *graute* bicomponente, composto de uma parte A (cimento, bentonita e retardador de pega) e uma parte B (contendo um acelerador de pega que permite o endurecimento da mistura em poucas horas), também, é um produto comumente utilizado para garantir a impermeabilização e sustentação das paredes do metrô [20]. Neste caso, a bentonita tem a função de aumentar a impermeabilidade da mistura na fase fresca e endurecida, além de ajustar as propriedades reológicas da mesma, evitando o escorrimento do *graute* nas paredes [20].

Visando ilustrar este efeito, a Figura 2.12 apresenta a redução da absorção de água de um *graute* com o aumento da quantidade de bentonita adicionada a mistura [21].

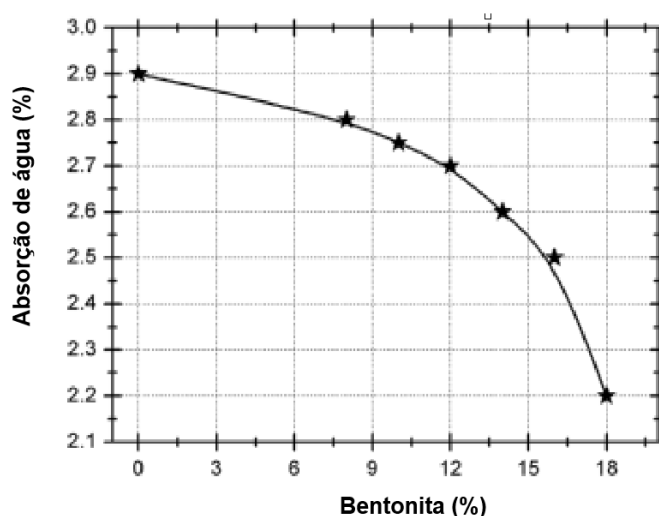


Figura 2.12 – Redução da absorção de água de um graute com o aumento da porcentagem de bentonita [21].

2.2 Cimento Portland

O cimento Portland é um dos componentes essenciais das argamassas impermeabilizantes e ele é constituído por diversos minerais. Além dos constituintes principais, como indicado na Tabela 2.1, este ligante também possui fases secundárias, como o óxido de magnésio (MgO) e o óxido de cálcio (CaO). Baseado em conhecimento prévio, nessa dissertação optou-se pela utilização do cimento CP II-E, que é um cimento composto (clinker + gesso) e escória de alto forno.

Tabela 2.1: Principais componentes do clinker [22].

| Nome do composto | Composição dos óxidos | Abreviatura |
|----------------------------|---|-------------|
| Silicato tricálcio (Alita) | $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ | C3S |
| Silicato dicálcio (Belita) | $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ | C2S |
| Aluminato tricálcio | $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ | C3A |
| Ferroaluminato tetracálcio | $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ | C4AF |

A palavra cimento, vem do latim “Caementum”, termo que identifica o material com propriedades hidráulicas, ou seja, um ligante, que quando

misturado com água endurece [23]. Esse processo de endurecimento se dá através de reações químicas de hidratação com a água, que liberam calor e dão origem aos cristais de hidratos, como hidróxido de cálcio (CH), trissulfoaluminato de cálcio (AFt) e monossulfoaluminato (AFm) [24].

2.2.1 Hidratação do cimento

A hidratação do cimento Portland ocorre a partir de reações químicas entre as fases anidras e a água, resultando na nucleação e precipitação de fases hidratadas que levam à pega e endurecimento da mistura [24].

A hidratação completa deste ligante é favorecida com a utilização de razões água/cimento (massa/massa) entre 0,3 e 0,6 %, o que permite uma consistência adequada para a pasta fresca. Na medida que a hidratação progride a pasta apresenta um aumento de sua viscosidade e ganho de rigidez (pega), momento em que a mistura inicial se converte em um sólido com alguma resistência mecânica inicial. Porém, a medida que as reações são desenvolvidas, esse corpo sólido vai adquirindo maior resistência mecânica e dureza, sendo este conhecido como processo de endurecimento do cimento, o qual usualmente requer 28 dias para ser finalizado (etapa de cura) [24].

Durante o período de cura do cimento, suas fases anidras (C3S, C2S, C3A e C4AF) reagem com a água e liberam calor (reações exotérmicas) em uma cinética dividida em cinco estágios: inicial (I), indução (II), aceleração (III), desaceleração (IV) e final (v), conforme mostrado na Figura 2.13 [25].

- *Estágio Inicial ou pré indução*

Inicialmente há a dissolução das fases C3S, C2S, C3A e C4AF (Tabela 2.1) em água, dando origem a uma camada de gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que reveste a superfície do grão amorfo do clínquer. Os íons liberados na dissolução do C3A e C4AF também reagem com íons de Ca^{+2} e SO_4^{-2} , dando origem a um gel amorfo, rico em aluminato, sobre a superfície do grão de clínquer ou pequenas e espessas agulhas de etringita, trissulfoaluminato de cálcio hidratado (fase AFt, Equação 2.1 e Figura 2.14) [25].

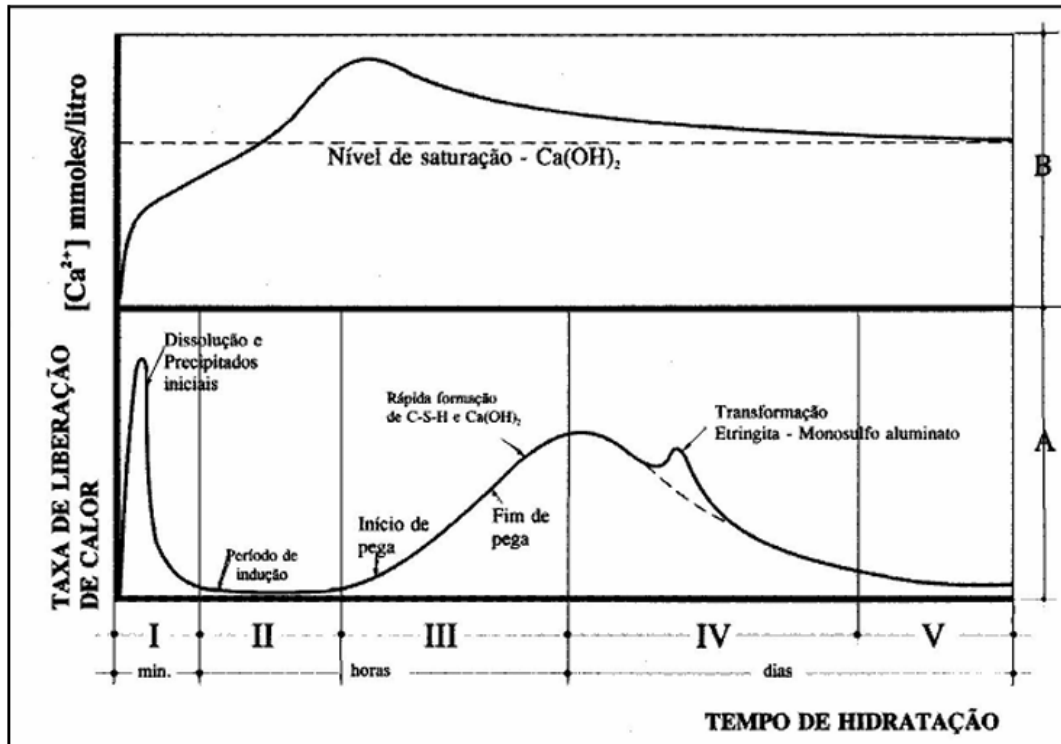
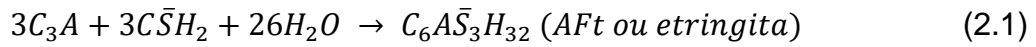


Figura 2.13: Representação esquemática da liberação de calor (A) e a concentração de Ca^{2+} em solução (B) durante a cura do cimento e indicação das etapas do processo de hidratação: estágio inicial (I), indução (II), aceleração (III), desaceleração (IV) e estágio final (V) [24].

- *Estágio de Indução (II)*

Nessa etapa uma camada de gel amorfo e coloidal, formado pela precipitação da etringita e, em menor escala, C-S-H (Etapa 2, Figura 2.14), se deposita sobre as partículas de clínquer. Subsequentemente, ocorre o aumento da concentração de íons de Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} e OH^- em solução, sendo que, a concentração de íons de cálcio atinge a saturação e inicia-se posteriormente o seu declínio.

Nesse período, há a liberação de pouco calor (Figura 2.13) e dura aproximadamente 3h e 30 min, sendo finalizada quando a camada de gel depositada sobre o clínquer é destruída.

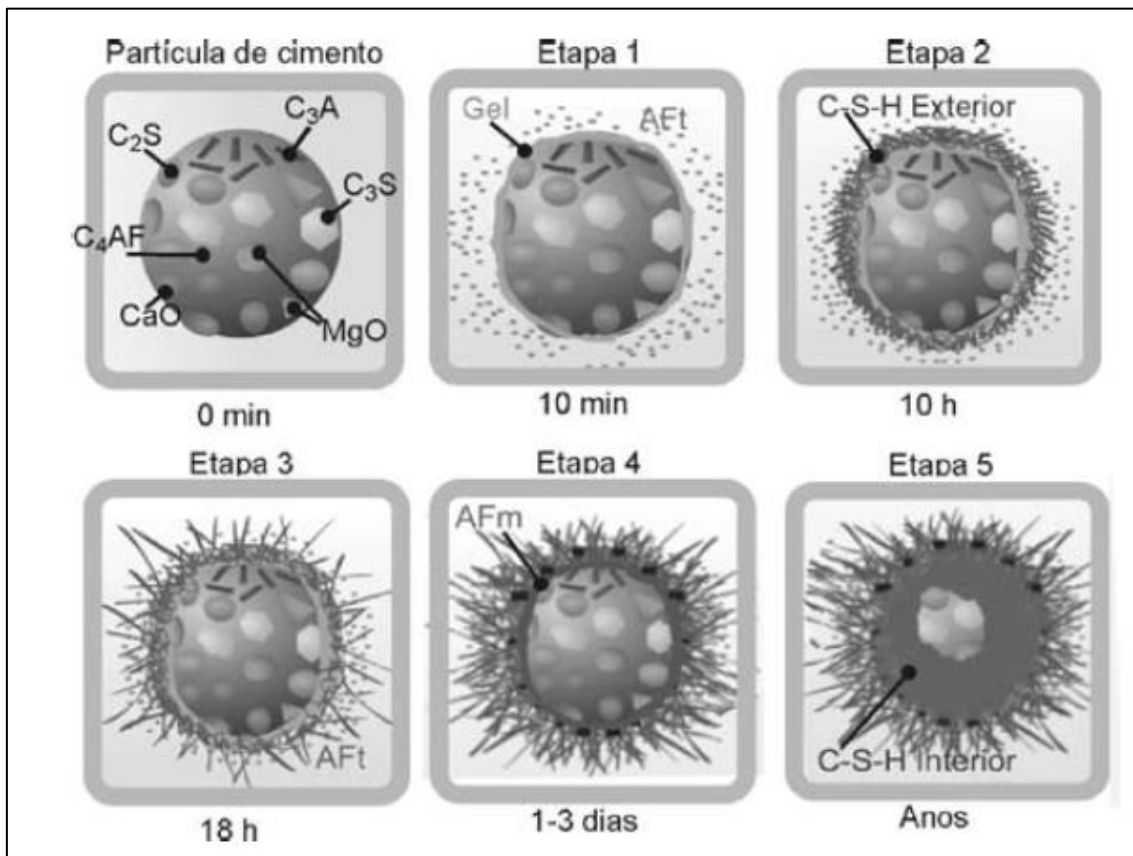
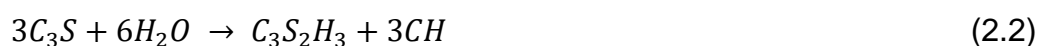


Figura 2.14: Etapas de hidratação de uma partícula de cimento [26].

- *Estágio de aceleração (III)*

Nessa etapa predomina o mecanismo de dissolução-precipitação, com supersaturação iônica e rápida formação do C-S-H e CH (Equações 2.1 - 2.3), resultando em declínio gradual de Ca^{+2} na solução. Este período finaliza com o aparecimento do segundo pico da Figura 2.13, que sinaliza o período de desaceleração e geração de calor.

O período de pega se dá nesta etapa, caracterizado pela rápida hidratação da alita (C_3S , Equação 2.2) e com expressiva liberação de calor.



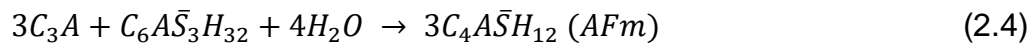


- *Estágio de desaceleração (IV)*

Inicia-se a redução gradual da evolução do calor e da concentração de íons na solução (Figura 2.13), em decorrência da precipitação de hidratos que recobrem as partículas do cimento e dificultam a solubilização das fases anidras. Após o período aproximado de 24 h, se tem início de reações lentas, que também dão origem a C-S-H e CH, observa-se o crescimento de cristais na forma de agulhas de etringita (Etapa 3, Figura 2.14).

- *Estágio final (V)*

Há a hidratação da fase ferrita ou a conversão da fase AFt para a AFm (Equação 2.4), dando origem a formação de cristais e placas hexagonais delgadas de monossulfoaluminato (fase AFm, Figura 2.14 – Etapas 4 e 5) a partir da reação do trissulfoaluminato de cálcio (AFt) com o C₃A e o C₄AF.



2.2.2 *Influência do óxido de cálcio e óxido de magnésio na cura do cimento*

O óxido de magnésio (periclásio), juntamente com o óxido de cálcio e sulfato de cálcio são agentes expansivos, ou seja, ao serem adicionados à pasta cimentícia eles induzem transformações que podem preencher espaços vazios da microestrutura resultante. Portanto, em muitos casos, o uso desse aditivo pode compensar a retração do cimento [27].

Contudo, a dosagem destes agentes expansivos deve ser controlada, pois o excesso deles e de seus produtos de hidratação (Equações 2.5 e 2.6) pode causar trincas e falhas no material. Por exemplo, o Mg(OH)₂ (brucita) ocupa um espaço maior que o MgO inicial, e a expansão resultante associada a

acomodação desta fase pode tensionar a microestrutura da pasta cimentícia [27].

De acordo com a ASTM C150, a quantidade máxima de MgO a ser adicionada ao cimento é limitada a 6%-peso, podendo ocasionar a expansão máxima de 0,8% [27].



Ademais, Quarcioni [24] verificou em seus experimentos que a adição da cal no cimento, promove dois fenômenos, um químico pela alteração da velocidade de reação com a formação de mais hidratos de cimento, e outro físico, devido ao filler carbonático e a fração insolúvel do hidróxido de cálcio poderem atuar como nucleador para a precipitação de mais fases hidratadas. De maneira geral, esses dois fenômenos combinados promovem aceleração da hidratação do cimento Portland, principalmente, no período de indução onde prevalecem a formação de etringita (Aft) e de aluminatos de cálcio hidratados, na forma de gel amorfo.

2.3 Impermeabilização

Toda construção fica sujeita ao intemperismo, podendo esta se deteriorar com o tempo. O principal causador dessa deterioração é o contato constante dos materiais com a água, pois além desta causar degradações físicas nas edificações, ela também permite o transporte de agentes agressivos ao substrato, os quais promovem transformações químicas [5,28].

Sabe-se que uma impermeabilização realizada incorretamente pode favorecer o aparecimento de infiltrações, as quais são difíceis de serem detectadas. Conseqüentemente, o custo para a correção destes efeitos é extremamente caro e pode levar a necessidade de demolições e retrabalho, além de diminuir consideravelmente o tempo de vida útil da edificação [29].

Dessa forma, é de extrema importância que uma impermeabilização seja realizada de maneira adequada. A escolha do tipo de impermeabilização da superfície irá depender se esta se encontra em áreas internas ou externas e para qual tipo de umidade o impermeabilizante é resistente.

2.3.1 Mecanismo de atuação da água nas edificações

Dentre os tipos de umidade que acometem as edificações, as principais são a umidade por capilaridade, precipitação, percolação, condensação e por pressão hidráulica negativa ou positiva. Cada uma delas são descritas a seguir:

- *Umidade por Capilaridade*

A umidade por capilaridade refere-se ao fenômeno no qual ocorre ascensão de água devido à tensão superficial e a viscosidade do fluido, acometendo as construções nas paredes ou estruturas que estão em contato direto com o solo. A água é transferida do solo para a parede e ocupa espaços vazios dos materiais de construção utilizados, como mostra a Figura 2.15 [1]. Essa ascensão de água pode causar manchas nas paredes (Figura 2.16a-b), dissolver componentes da construção, cristalizar sais através do fenômeno conhecido com eflorescência (Figura 2.16c) ou pode causar o surgimento de patógenos, como bolores (Fig. 2.16d) [29].

- *Umidade por precipitação.*

Essa umidade está associada a chuvas com ventos fortes nas fachadas. Nesses casos, a água da chuva atinge a fachada com uma força horizontal elevada, o que favorece que as gotas do líquido penetrem em falhas no revestimento e na impermeabilização, comprometendo severamente a durabilidade das mesmas e favorecendo o aparecimento de fissuras, conforme ilustra a Figura 2.17.

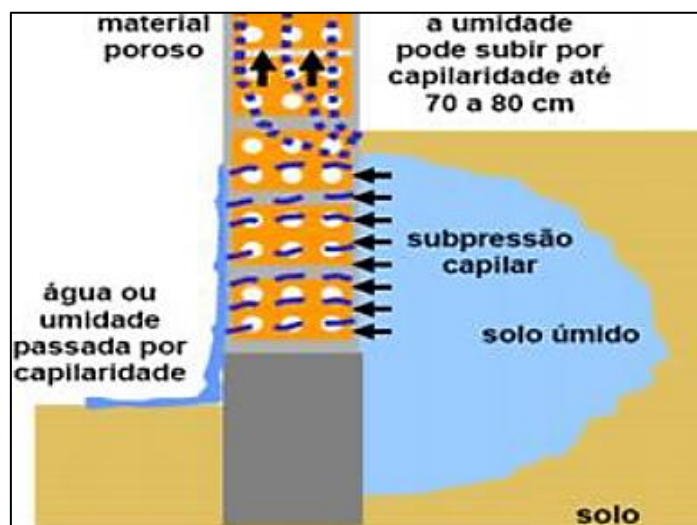


Figura 2.15: Esquema ilustrativo do efeito da umidade por capilaridade em edificações [1].

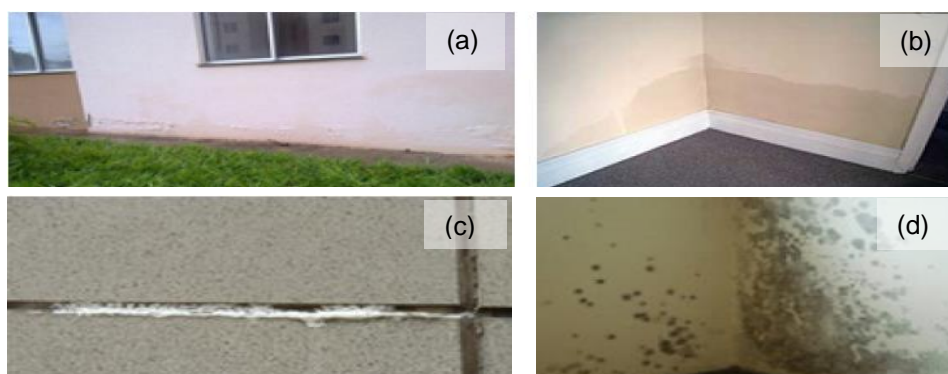


Figura 2.16: Efeitos associados com a umidade por capilaridade. (a-b) Manchas formadas devido a Infiltração, (c) eflorescência e (d) aparecimento de bolor [29].

- *Umidade por percolação.*

Umidade por percolação refere-se ao fenômeno no qual a água é transportada de gota a gota a partir de um substrato, por um processo similar ao da osmose, até atravessar um meio, encharcando uma parede inteira [1, 29]. Este mecanismo pode ser definido como a água que escoar por gravidade sem pressão hidrostática, fenômeno que ocorre em terraços e coberturas, como mostra a Figura 2.18 [1].



Figura 2.17: Fissuras em fachada decorrentes da umidade por precipitação [29].

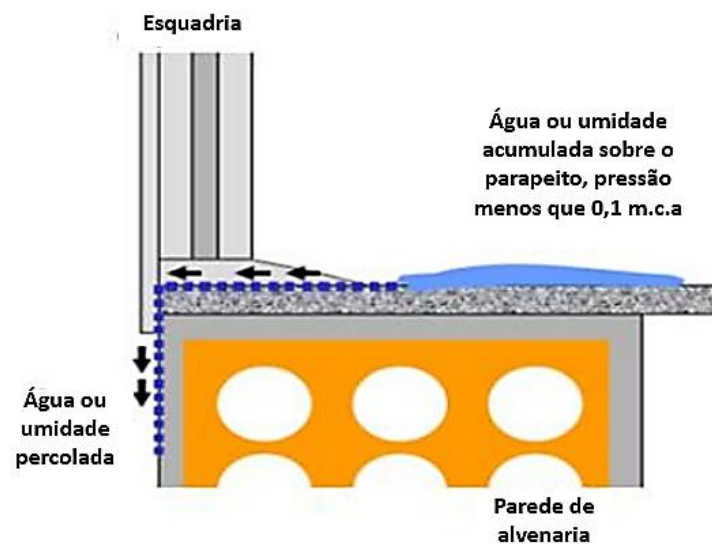


Figura 2.18: Ilustração de como ocorre a umidade por percolação [1].

- *Umidade por condensação*

Este fenômeno ocorre devido à alta umidade relativa do ar e a condensação desta em superfícies frias, como paredes e tetos (temperatura menor que o ponto de orvalho da água (Figura 2.19), sendo observado principalmente em dias chuvosos e frios [30, 31].



Figura 2.19: Efeito da umidade por condensação [31].

- *Umidade devido à pressão hidráulica positiva ou negativa.*

De forma geral, a umidade devido à pressão hidráulica positiva ou negativa é definida como a água que exerce pressão hidráulica superior a 1 kPa em um substrato, conforme indicado na Figura 2.20. É muito comum a ocorrência desse fenômeno em piscinas, caixa d'água, obras subterrâneas, reservatórios e outros [28].

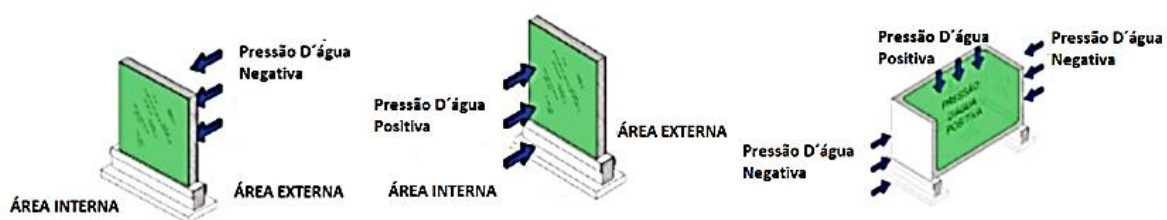


Figura 2.20: Pressão hidrostática da água sobre a impermeabilização [28].

Desta forma, a impermeabilização de superfícies é essencial para a durabilidade de uma construção. O método de impermeabilização a ser usado é definido a partir da forma como a superfície ficará exposta ao contato com a água (umidade) [28]. A Tabela 2.2 apresenta, resumidamente, os tipos de umidade e as respectivas superfícies afetadas.

Tabela 2.2: Tipos de umidade e superfícies afetadas.

| Tipo de umidade | Descrição | Superfícies afetadas |
|--|--|--|
| Percolação | Caracterizada por livre escoamento sem pressão hidrostática | Terraços, coberturas, empenas e fachadas |
| Condensação | Condensação de água em determinadas superfícies e condições de temperatura e pressão | Banheiro, cozinha, saunas, frigoríficos etc. |
| Capilaridade | Água presente naturalmente no subsolo que é absorvida pelo substrato por capilaridade | Subsolos, alvenaria e concreto |
| Por fluído sob pressão unilateral ou bilateral | A água exerce pressão hidrostática positiva ou negativa superiores a 1 KPa sobre a impermeabilização | Subsolos, caixa d'água, piscinas, etc. |

Pode-se ainda escolher o tipo de impermeabilizante considerando os seguintes fatores: pressão hidráulica, frequência de umidade, exposição a intempéries, exposição a cargas e manutenção, facilidade de construção, compatibilidade com o projeto e custo compatível com o porte e a durabilidade da obra [29].

2.3.2 Escolha da Impermeabilização

A escolha do sistema de impermeabilização (rígido ou flexível) é essencial para que a impermeabilização seja feita de forma correta e evite-se retrabalho e gastos adicionais em uma obra.

A Figura 2.21 destaca que áreas externas em contato constante com intempéries (chuva, sol, clima quente, clima frio) requerem um sistema flexível de impermeabilização, pois o mesmo precisa acompanhar e resistir à dilatação natural do concreto; já em áreas internas, que não estão em contato com intempéries, podem-se utilizar um sistema de impermeabilização rígido.

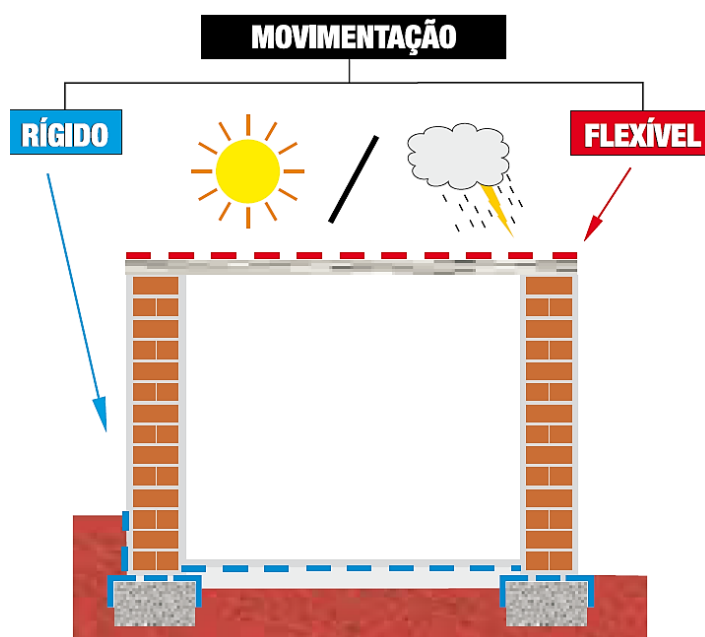


Figura 2.21: Sistema de impermeabilização rígido e flexível [32].

Dessa forma, é importante avaliar os quesitos do ambiente no qual será realizada a impermeabilização e verificar qual o sistema mais adequado para esse ambiente.

2.3.2.1 Tipos de sistema impermeabilizante

De forma geral, os impermeabilizantes são classificados como rígidos ou flexíveis [29]:

- Impermeabilizantes rígidos: argamassas poliméricas ou resinas termoplásticas que não possuem flexibilidade e são indicados para ambientes internos com pouca exposição a intempéries.
- Impermeabilizantes flexíveis: argamassa polimérica ou manta asfáltica que podem ser aplicados em superfícies externas, pois possuem em sua composição polímeros que conferem uma certa flexibilidade ao produto, permitindo que este acompanhe a dilatação e contração natural do concreto exposto a intempéries.

Nesse estudo o foco foi voltado para a melhoria da propriedade impermeabilizante de argamassas poliméricas cimentícias rígidas, pois sabe-se que a maioria dos produtos de mercado não possuem resistência adequada a umidade com pressão hidráulica positiva e/ou negativa, conforme requerido pela norma NBR 11905.

2.3.2.2 Argamassa impermeabilizante

A argamassa impermeabilizante, que também é conhecida como argamassa polimérica, é composta basicamente de cimento, agregados minerais inertes, polímeros acrílicos e aditivos. Ao contrário do produto comum que é permeável, a redução desta propriedade nas composições impermeabilizantes é advinda da presença de aditivos hidrofugantes, que contribuem para o mecanismo principal de impermeabilização que é o revestimento de superfície [28, 33, 34].

Estas argamassas especiais podem ser utilizadas como impermeabilizante de caixas d'água, reservatórios, piscinas e poços de elevadores, devendo apresentar resistência à absorção de água por capilaridade (umidade do solo), resistência à pressão hidrostática e resistência à umidade por percolação. Além disso, elas podem ser classificadas como argamassas bicomponente, monocomponente, flexível e rígida, conforme mostra a Figura 2.22.

Um sistema de impermeabilização flexível é indicado para áreas externas, pois é mais resistente a intempérie do que um sistema rígido. Basicamente o que define se uma argamassa impermeabilizante será flexível, rígida, monocomponente ou bicomponente é o polímero utilizado. A flexibilidade desses polímeros está diretamente associada à sua temperatura de transição vítrea (T_g), pois quanto maior a T_g , mais flexível será o revestimento formado. Além disso, o estado físico que esse polímero é comercializado define se o sistema será monocomponente (pós dispersíveis) ou bicomponente (emulsão).

Tabela 2.3 – Uso indicado para cada sistema de impermeabilização por membrana [2].

| Tipo | Água de percolação | Água de condensação | Umidade do solo | Fluído sob pressão |
|---|---------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------|
| Membrana epoxídica (natureza rígida) | X | X | X | X |
| Membrana acrílica | X | X | | |
| Membrana de emulsão asfáltica | X | X | X | X |
| Membrana de asfalto modificado sem adição de polímero | X | X | X | X |
| Membrana de asfalto modificado com adição de polímero elastomérico | X | X | X | X |
| Membrana de asfalto elastomérico (solução) membrana de poliuretano | X | X | X | X |
| Membrana poliuretano | X | X | X | X |
| Membrana poliuréia | X | X | X | X |
| Membrana de polímero modificado com adição de cimento | X | X | X | X |
| Membrana de poliuretano modificada com adição de asfalto | X | X | X | X |
| Membrana elastomérica (SBS) | X | X | | |
| Membrana elastomérica (IIR) em solução | X | X | X | X |
| Membrana elastomérica de policloropreno e polietileno clorossulfonado | X | X | | |

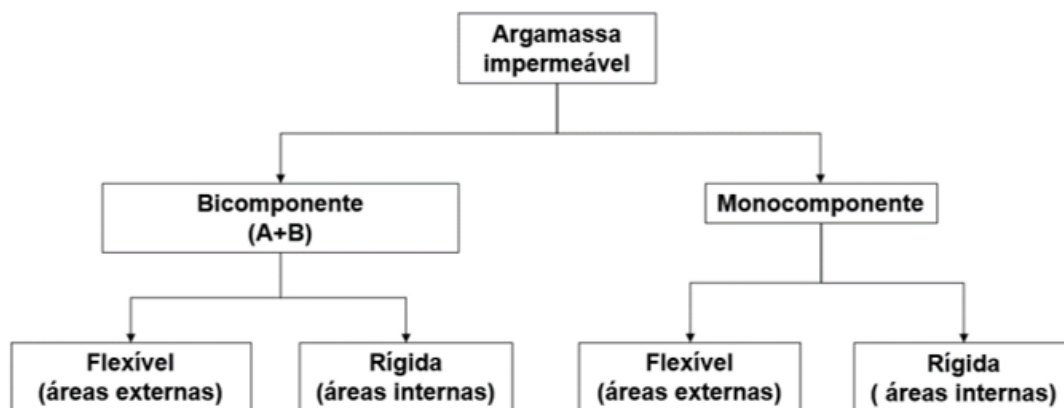


Figura 2.22: Classificação de argamassas impermeabilizantes cimentícias [32].

Segundo Schulze et al. [35], os polímeros termoplásticos utilizados para modificar argamassas também são conhecidos como polímeros cimento concreto (PCC). Estes são comercializados na forma de emulsão ou pós dispersíveis, sendo que estes últimos são obtidos industrialmente através da secagem da emulsão pela técnica de “*spray-drying*”. A função destes materiais é formar um filme de alta resistência à tração e adesão em diferentes tipos de superfícies, permitindo ainda a formação de ligações com os componentes inorgânicos do cimento e induzindo inúmeros benefícios para as construções como: aumento da adesão com o substrato e aumento da impermeabilização de superfícies [35].

Dentre os polímeros disponíveis, os mais utilizados são etileno acetato de vinila (EVA), estireno-acrílico (SA), acetato de vinila-etileno (VAE), etileno-cloreto de vinil-laurato de vinila, entre outros. Por exemplo, alguns autores [35, 36] avaliaram as propriedades mecânicas e a hidrofobicidade de argamassas poliméricas formuladas com diferentes tipos de PCCs (Tabela 2.4).

Tabela 2.4: PCCs utilizados e temperatura de transição vítrea (T_g) destes materiais [35].

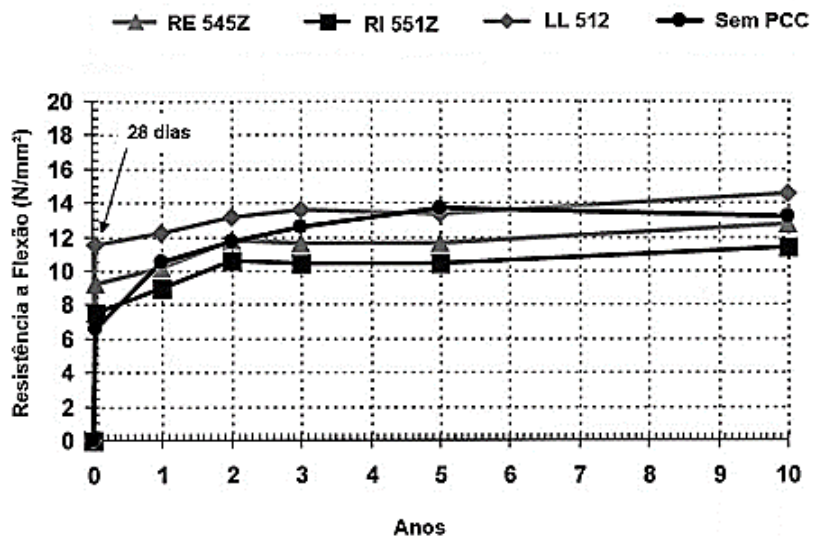
| Nome comercial | Polímero | T_g (°C) |
|------------------|--|------------|
| Vinnapas RE 545Z | Acetato de vinila-etileno | -7 |
| Vinnapas RI 551Z | Etileno-cloreto de vinil-laurato de vinila | 1 |
| Vinnapas LL 512 | Estireno-acrílico | 20 |

A Figura 2.23 indica a evolução do comportamento mecânico e de adesão das argamassas analisadas ao longo de um período de 28 dias até 10 anos, sendo destacado que a composição que continha o polímero Vinnapas RE 545 Z teve um melhor desempenho nas condições avaliadas. No entanto, menores valores de absorção de água (Figura 2.24) foram verificados para esta argamassa mencionada. Desta forma, o uso de diferentes aditivos ou dosagem de vários tipos de PCCs pode ser requerida para se obter produtos que atendam todos os quesitos necessários para determinada aplicação. Contudo, o aumento da quantidade destes componentes aumenta o custo das argamassas poliméricas.

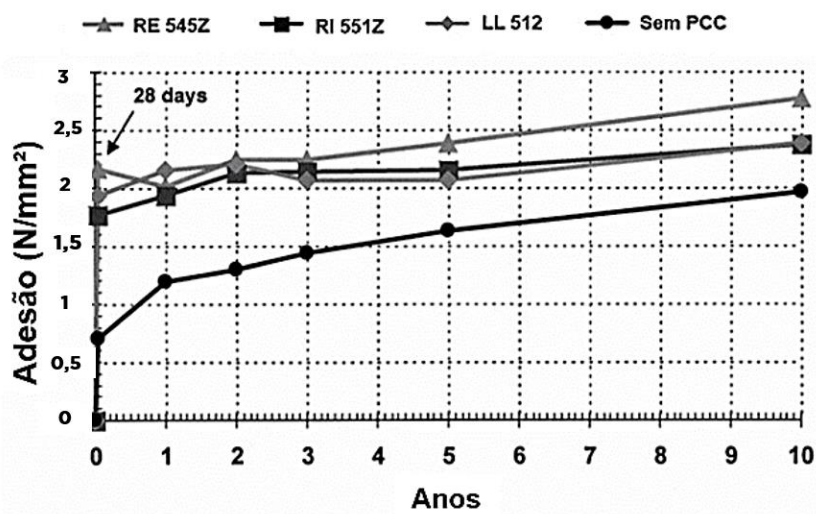
Neste contexto, Yang et al. [5] reportaram que a adição de bentonita (8%-peso) em argamassas cimentícias resultou em aumentos de até 61,48%, 42,09% e 76,47% da resistência à compressão, à flexão e impermeabilidade, respectivamente. Para ilustrar este efeito, a Figura 2.25 apresenta a variação da impermeabilidade das argamassas quando adicionados diferentes teores de bentonita ou quartzo às composições analisadas.

Liu et al. [6] complementaram os estudos apresentados por Yang et al. [5], realizando a avaliação comparativa do desempenho de várias bentonitas em argamassas cimentícias. Estes autores destacaram que as argilas que mais contribuíram para aumentar a impermeabilidade sob pressão foram as bentonitas sódicas e contendo magnésio, conforme indicado na Figura 2.26.

No entanto, apesar da bentonita sódica ter apresentado excelentes resultados de impermeabilidade sob pressão, observou-se que dependendo da quantidade adicionada, houve a necessidade de ajuste na formulação e a definição da dosagem ideal desta argila para garantir a aplicabilidade e adequada reologia da mistura. A Figura 2.27 mostra a perda de consistência e fluidez da argamassa com a adição de bentonita, o que reduziu a trabalhabilidade das composições.



(a)



(b)

Figura 2.23: Comportamento de (a) resistência à flexão e (b) adesão de argamassas contendo diferentes PCCs em função do tempo [35].

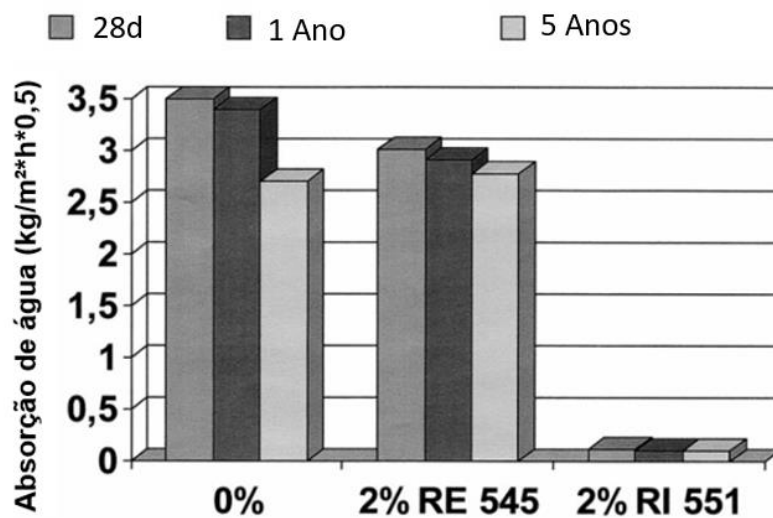


Figura 2.24: Absorção de água x tempo de exposição externa de argamassas contendo diferentes aditivos poliméricos [35].

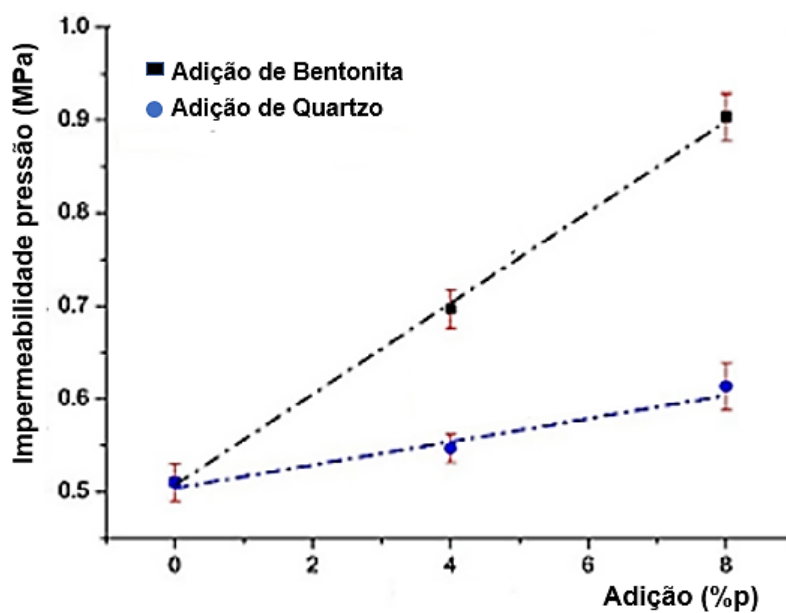


Figura 2.25: Evolução da impermeabilidade de argamassas cimentícias devido a adição de bentonita ou quartzo [5].

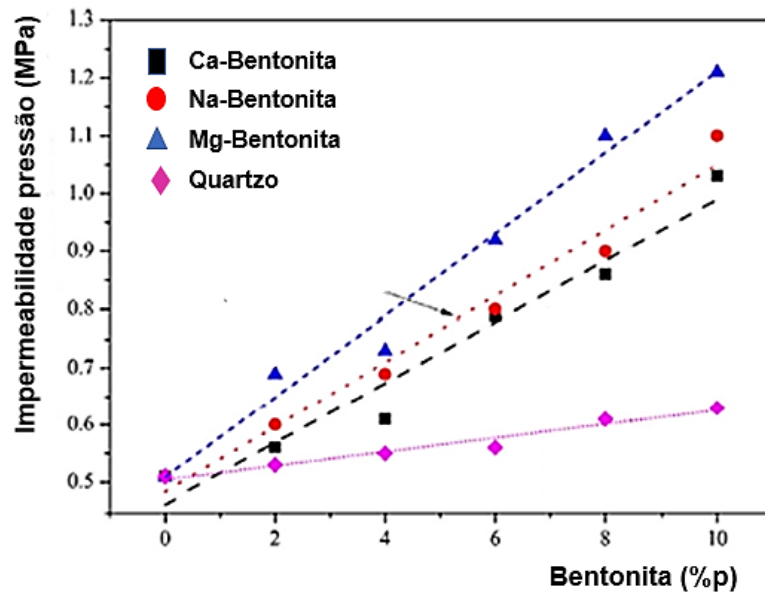


Figura 2.26: Impermeabilidade a pressão de argamassas em função da adição de vários tipos de bentonitas ou quartzo [6].

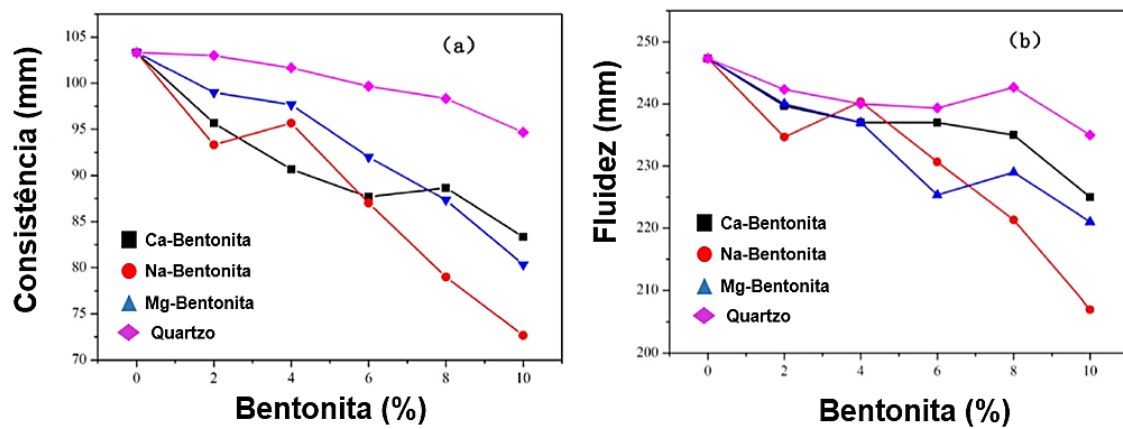


Figura 2.27: (a) Consistência e (b) fluidez da argamassa em função do tipo de bentonita ou quartzo adicionado a mistura [6].

2.3.3 Mecanismos de proteção de superfície contra a umidade

A Figura 2.28 mostra os quatro mecanismos principais de proteção de superfícies sólidas contra a umidade [33]. Sendo eles:

- *Impregnação/hidrofóbica*: Basicamente consiste no tratamento da superfície do substrato com um agente hidrofóbico, como é o caso dos silanos. Tal procedimento induz uma redução considerável da adsorção de água, contudo, ele não tem influência significativa no transporte de vapor de água.
- *Impregnação/selagem parcial ou total*: Nesse caso os agentes hidrofóbicos são adsorvidos pela superfície, podendo reagir ou não com os constituintes da mesma, formando uma camada com vedação parcial ou total.
- *Revestimento de superfície*: Este mecanismo consiste na aplicação de uma camada de revestimento que irá proteger a superfície, podendo ser uma camada extrafina (espessura menor que 100 μm), fina (espessura 100 – 500 μm) ou grossa (500 μm - 5 mm). As membranas poliméricas, membranas acrílicas, mantas asfálticas, etc., se enquadram nesta categoria.

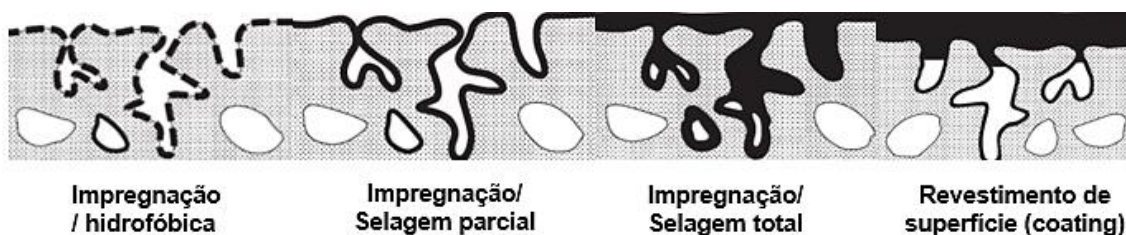


Figura 2.28: Mecanismos tradicionais de proteção de superfícies [33].

De acordo com Yang et al. [5], a bentonita também pode ser utilizada como aditivo em argamassas para impermeabilização. Contudo, o mecanismo de proteção é diferente dos tradicionais (Figura 2.29), seguindo as etapas indicadas abaixo:

Etapa I: A bentonita atua como um componente da matriz com o cimento e, durante a hidratação deste último, observam-se reações pozolânicas entre a bentonita e o hidróxido de cálcio.

Etapa II: As reações pozolânicas entre a bentonita e o hidróxido de cálcio, resultam em mais hidratos do tipo C-S-H, isto é, silicato de cálcio hidratado, preenchendo os espaços e diminuindo o tamanho dos poros. Além disso, alguns produtos da hidratação podem ser gerados na superfície da bentonita.

Etapa III: Quando a água é adsorvida por capilaridade pela argamassa, ela entra em contato com a bentonita, essa última incha e forma uma película impermeável, impedindo a passagem da água, o que diminui consideravelmente a adsorção por capilaridade.

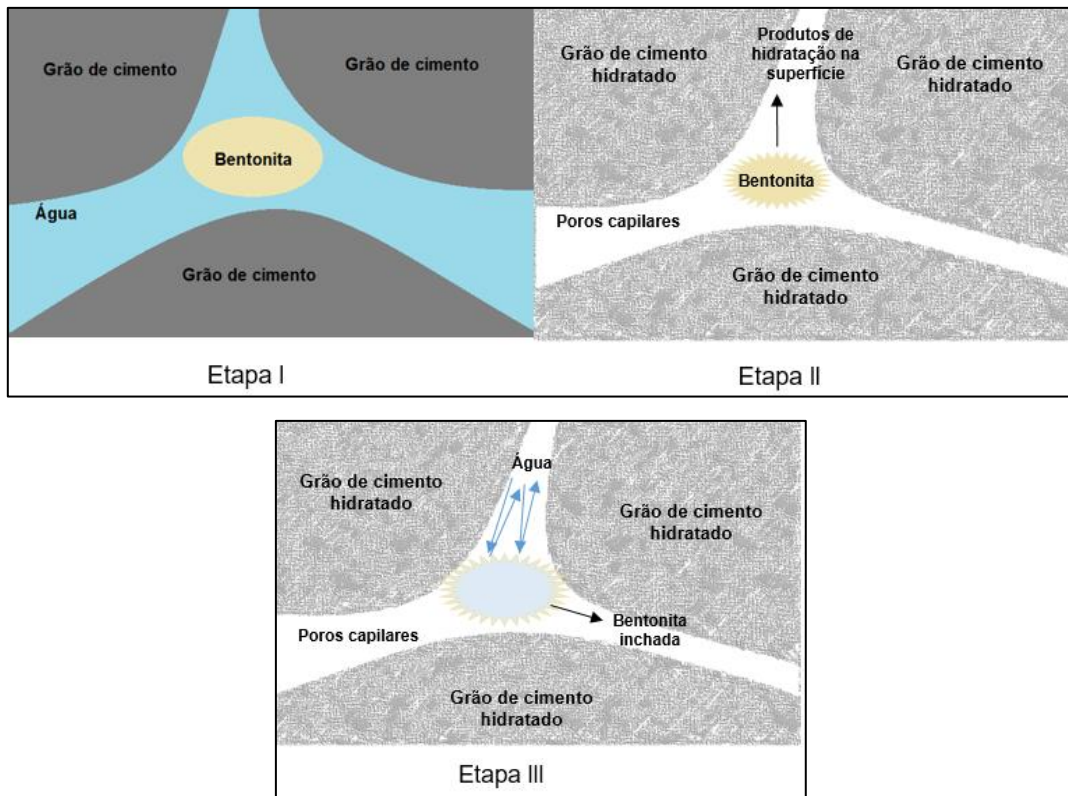


Figura 2.29: Mecanismo de impermeabilização da matriz cimento-bentonita [5].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental adotado nesse estudo foi dividido em duas etapas, sendo elas: (i) caracterização inicial das bentonitas utilizadas, (ii) preparação e ensaios de desempenho da argamassa polimérica contendo diversos teores de bentonita, a fim de definir a melhor porcentagem e tipo de bentonita para a otimização da impermeabilização das composições estudadas.

A Tabela 3.1 apresenta os materiais utilizados. A formulação da argamassa polimérica foi de 3 partes do componente A e 1 parte do componente B, sendo a aplicação efetuada em 3 demãos cruzadas com intervalo de 6 horas entre as demãos. Este é o mesmo traço e forma de aplicação recomendada pelo fabricante da argamassa comercial bicomponente rígida, que foi escolhida como referência para este estudo.

Tabela 3.1: Materiais utilizados na etapa experimental.

| Materiais | Descrição | Procedência | Componente de formulação | Composição (%-p) |
|-----------------------------|--|--------------------|---------------------------------|--|
| Brasgel NT 25 | Bentonita cálcica | Buntech | A | 2, 4 e 6 sobre a massa do componente A |
| Brasgel T | Bentonita sódica ativada | Buntech | A | 2, 4 e 6 sobre a massa do componente A |
| Eter de celulose | Aditivo reológico | Buntech | A | 0,1 |
| Areia Fina | - | - | A | 69,9 |
| Cimento Portland CP II E 32 | Cimento composto com adição de escória | - | A | 30,0 |
| Mowilith LDM 6177 | Emulsão polimérica | Archroma | B | 12,0 |
| Água | - | - | B | 86,0 |
| Argamassa comercial | Sika top 100 | Sika Brasil | - | - |

Com o objetivo de avaliar a influência do tipo de emulsão polimérica e a interação com os componentes do cimento, também realizamos ensaios com as seguintes composições: argamassa comercial preparada com a emulsão polimérica Mowilith LDM 6177 (composição teste 1 = parte A comercial + parte B formulada e traço 3,5:1) e a argamassa formulada (traço 3,5:1) em combinação com a resina do produto comercial (composição teste 2 = parte A formulada + parte B comercial). Ainda, optou-se por investigar o efeito da adição de bentonita cálcica e bentonita sódica ativada nos teores (0,5%, 1% e 2%-p) sobre a parte sólida dos materiais testados.

3.1 Caracterização da bentonita cálcica e sódica ativada

A caracterização da bentonita cálcica e sódica ativada foi realizada por meio dos ensaios de distribuição de tamanho de partículas, inchamento, análise química e mineralógica.

3.1.1 Distribuição de tamanho de partículas

A distribuição de tamanhos de partículas das bentonitas foi avaliada com o uso de um equipamento sedígrafo, Micromeritics Sedigraph 5100, e seguindo o procedimento descrito na norma ASTM B761-17. Três alíquotas foram coletadas e analisadas, sendo apresentado o valor médio das medidas executadas.

3.1.2 Determinação do inchamento

O inchamento mede a capacidade de hidratação e delaminação da bentonita. Os testes foram realizados conforme a “Cemp 058 – Determinação do Inchamento” [37], sendo que esse método consiste na adição de 2 g de bentonita em base seca a 100 ml de água destilada contida em uma proveta.

A bentonita foi adicionada aos poucos, após o término da adição a proveta foi mantida em repouso e a leitura realizada após 24 horas da última adição e o resultado foi expresso em ml/2g bentonita.

3.1.3 Análise Química – Fluorescência de raios X (FRX)

A fluorescência de raios X é uma técnica que permite a identificação da composição química (em termos de elementos e óxidos) de diferentes materiais. Ela foi utilizada para a investigação e caracterização das diferentes bentonitas testadas. Para isso foi utilizado o equipamento Shimadzu EDX-720, realizado no vácuo, com um colimaador de 10 mm e copo de polietileno.

3.1.4 Difractometria de raios X

A identificação das fases cristalinas presentes nas bentonitas foram determinadas a partir da técnica de difração de raios X [38]. As medidas foram realizadas em equipamento Bruker D8 Focus, utilizando radiação de Cu K α e operando com 30 mA e 40kV. A faixa de varredura de 2 θ foi de 5-80°.

3.2 Preparação das argamassas poliméricas

A argamassa polimérica formulada nesta dissertação consistiu de uma parte sólida (Parte A) e uma líquida (Parte B), como indicado na Tabela 3.1. A parte A continha a mistura dos componentes sólidos, sendo efetuada a homogeneização manual a seco deste conteúdo em saco plástico e pelo período de 2 minutos. A parte B era composta da emulsão polimérica diluída a 12%-p, a qual foi preparada sob agitação com o auxílio de um misturador de bancada.

Após preparada a parte A e a parte B, estas foram misturadas com o auxílio de um agitador mecânico na proporção 3,5 parte A: 1 Parte B e 3 parte A: 1 parte B. Foram aplicadas 3 demãos cruzadas destas argamassas com intervalo de no mínimo 3 horas entre as aplicações, sobre o substrato de

concreto (ensaio de estanqueidade) ou sobre superfície coberta com plástico (demais ensaios).

Após 28 dias de cura, foram realizados os ensaios de caracterização e de desempenho da argamassa polimérica. Para efeito comparativo, avaliou-se também a argamassa impermeabilizante Sikatop 100 (Sika Brasil) como material de referência, a qual é bi-componente e semiflexível.

3.3 Ensaios de caracterização e performance das argamassas poliméricas

Como mencionado anteriormente, uma argamassa impermeabilizante precisa ter resistência a umidade por percolação, por capilaridade e pela aplicação de pressão positiva ou negativa. Além disso, é necessário que ela tenha adequada resistência mecânica e uma certa flexibilidade para resistir a dilatação e contração natural do concreto quando este é exposto a intempéries. Também é desejável que a argamassa possua uma boa compatibilidade e trabalhabilidade ou fluidez de no mínimo 60 minutos.

Essas propriedades foram avaliadas por meio dos ensaios listados a seguir:

Tabela 3.2: Ensaios de desempenho das argamassas polimérica com cimento avaliadas nesta dissertação.

| Ensaio | Unidade | Parâmetro | Método de ensaio |
|--|---|--------------------------------------|------------------|
| Estanqueidade à água sob pressão negativa | MPa | Min 0,1 | ABNT NBR 11905 |
| Varição de consistência após 60 min em relação a mistura inicial | % | Máx. 35 | ABNT NBR 11905 |
| Absorção de água da membrana cimentícia | % | Max 12 | ASTM D 570 |
| Resistência a compressão após cura 28 dias | MPa | Ensaio comparativo entre formulações | |
| Compatibilidade | Teste visual | | |
| Análise microestrutural | Visando identificar, a partir da análise de imagens, a redução de porosidade devido à adição de bentonita | | |

3.3.1 Resistência a estanqueidade (pressão positiva e negativa).

Uma argamassa impermeabilizante pode ser aplicada em piscinas e caixas d'água, portanto, é necessário que o impermeabilizante resista a pressão hidráulica negativa e positiva.

A Figura 3.1 ilustra o ensaio de estanqueidade à pressão positiva e negativa. No ensaio de estanqueidade à pressão positiva, a argamassa impermeabilizante é aplicada na faceta que entrará em contato com a pressão hidráulica, enquanto no teste à pressão negativa, a faceta que está em contato com a pressão hidráulica não possui impermeabilizante, sendo aplicado impermeabilizante em todas as outras facetas do bloco de concreto.

O tempo de cura da argamassa foi de 28 dias e foram realizados os ensaios com 5 m.c.a, 10 m.c.a e 25 m.c.a, seguindo a norma ABNT NBR 15885. Esse ensaio foi realizado na Falcão Bauer (São Paulo), laboratório especialista em ensaios normatizados na área da construção civil.



Figura 3.1: Ensaio de estanqueidade sob pressão positiva e negativa.

3.3.2 Fluidez e variação de fluidez

Conforme o procedimento descrito na seção 3.2, realizou-se o preparo de 1,5 kg de argamassa para a realização dos testes de fluidez. Para estes ensaios, um plástico foi fixado na superfície de uma bancada, sendo em seguida vertida a argamassa no molde cônico, cujas dimensões constam na norma ASTM C230/230. Após o preenchimento do molde, este foi levantado e, após o

espalhamento das argamassas, efetuou-se a medição do diâmetro final obtido em três posições distintas, para ser possível calcular o valor de espalhamento médio.

Após cada ensaio, as argamassas foram recolhidas e mantidas em béqueres para novas avaliações da fluidez, as quais foram realizadas após 20, 40, 60, 90 e 180 min desde o início da preparação da argamassa. Além disso, as medidas foram interrompidas quando o espalhamento atingia um valor igual ou menor que 130 mm.

A variação da fluidez das argamassas foi calculada a partir da Equação 3.1, sendo almejado a obtenção de valores menores ou iguais a 35 % dentro do intervalo de tempo analisado.

$$V(\%) = \frac{(F_i - F_t)}{F_i} \times 100 \quad (3.1)$$

onde: V (%) = Variação de Fluidez; F_i (mm) = Fluidez inicial; F_t (mm) = Fluidez no tempo t.

3.3.3 Absorção de água da membrana cimentícia

Neste ensaio foi fixado um plástico sobre uma bancada e sobre este foi aplicado 3 demãos cruzadas da argamassa impermeabilizante, com intervalo de 3 horas entre demãos [34]. Após 14 dias de cura à temperatura ambiente, a membrana cimentícia foi removida do plástico e virada, esperando-se mais 14 dias, totalizando 28 dias de cura.

Após este período, foram cortados 3 corpos de provas (com dimensões de 100 mm x 100 mm) de cada uma das composições testadas. Estes materiais foram imersos em água potável e a absorção de água foi mensurada após 7 dias, usando a Equação 3.2. Segundo a ABNT NBR 15885, os valores obtidos deveriam ser inferiores a 12%.

$$A(\%) = \frac{(M_2 - M_1)}{M_1} \times 100 \quad (3.2)$$

sendo: A (%) = Absorção de água em porcentagem mássica; M2(g) = Massa da amostra após 7 dias; M1(g) = Massa inicial da amostra.

3.3.4 Resistência a compressão após cura de 28 dias

Foram confeccionados corpos de prova cilíndricos de argamassa, com dimensões 40 mm x 40 mm, os quais tiveram suas resistências à compressão avaliadas após 28 dias de cura.

Os ensaios foram realizados em equipamento EMIC DL 10000, com velocidade de aplicação de carga de 1,3 mm/min. Foram obtidos os valores da carga máxima aplicada (em kgf) e necessária para o rompimento dos corpos de prova. Para cada composição testada foram efetuados os ensaios em quintuplicada.

A partir dos dados obtidos, calculou-se a resistência à compressão das argamassas, conforme a Equação 3.3

$$R_c(\text{MPa}) = \frac{(F \times 0,0980665)}{A_t} \times 100 \quad (3.3)$$

onde, R_c (MPa) = resistência à compressão em MPa, A_t (cm²) = área transversal do corpo de prova; F (kgf) = Força aplicada e necessária para ruptura do corpo de prova.

3.3.5 Análise microestrutural

Foram realizadas análises de microscopia eletrônica de varredura das argamassas com o objetivo de se avaliar o efeito da adição de bentonita na redução da porosidade das amostras.

Para isso, foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura da marca TESCAN MIRA, sendo utilizadas amostras obtidas após ensaios de resistência a compressão. A superfície de fratura foi preparada e recoberta com ouro para viabilizar a coleta das imagens. Além disso, ensaios de difração de raios X foram

também conduzidos, como indicado na seção 3.1.4, para a identificação das fases contidas nas amostras obtidas após 28 dias de cura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das bentonitas selecionadas

Com o objetivo de caracterizar as bentonitas cálcica e sódica ativada foram realizados ensaios para determinação da distribuição de tamanho de partículas (DTP), inchamento, composição química e mineralógica destes materiais.

A Figura 4.1 exibe as DTPs das bentonitas estudadas, sendo identificado que estes materiais apresentaram diâmetros de partícula majoritariamente menores que 60 μm . A bentonita cálcica possui tamanho médio das partículas de 11,2 μm , enquanto a sódica ativada possui granulometria mais fina com d_{50} de 1,06 μm .

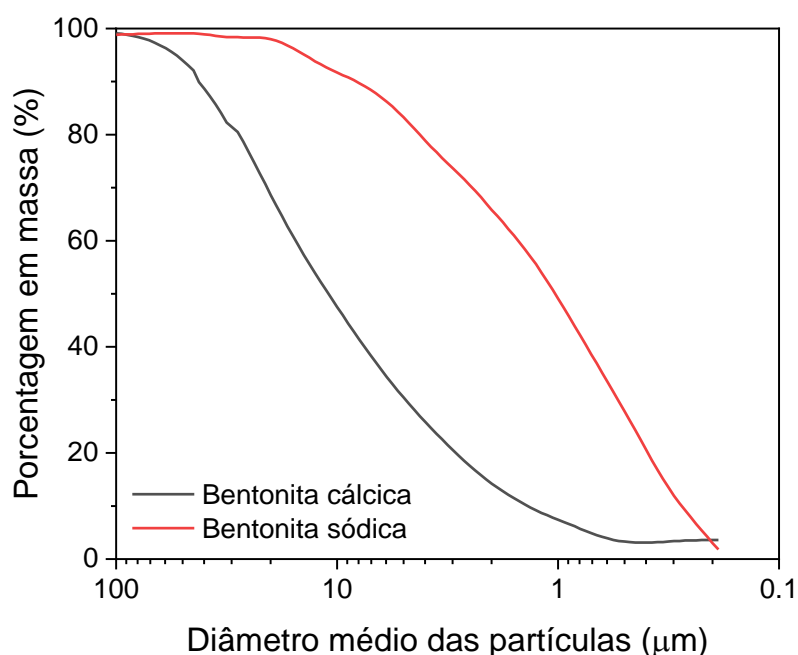


Figura 4.1: Distribuição de tamanho de partículas das bentonitas estudadas.

Os resultados da avaliação do inchamento das bentonitas estão de acordo com a distribuição de tamanho das partículas destes materiais, pois aquela de menor granulometria apresentou o triplo de inchamento (25 ml/2g) em relação a

bentonita cálcica (8 ml/2g, Figura 4.2). Portanto, o processo de ativação da bentonita sódica foi eficaz e resultou em um material de maior reatividade, conforme descrito por Neto et al. [8].

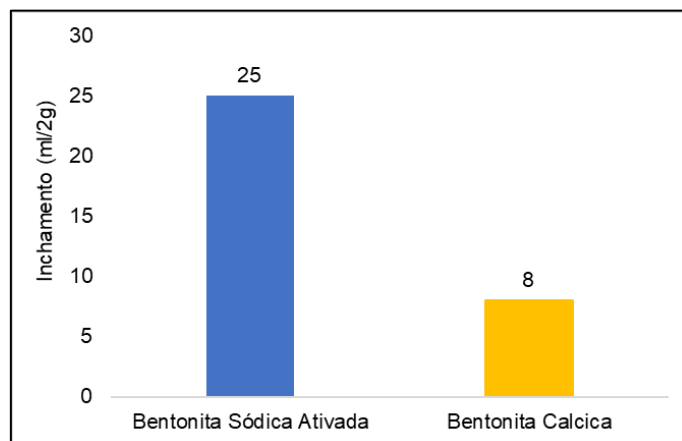


Figura 4.2: Comparação dos resultados de inchamento das bentonitas em meio aquoso.

Identificou-se que as bentonitas apresentam algumas diferenças em suas composições químicas, como mostrado na Figura 4.3. Por exemplo, a cálcica possui maior teor de Fe_2O_3 e SiO_2 em relação à bentonita sódica ativada. A maior presença de sílica nesta primeira foi também confirmada nos ensaios de difração de raios X (Figura 4.4), onde verificou-se a presença de picos mais intensos da fase α -quartzo na bentonita cálcica. Por outro lado, a maior quantidade de Al_2O_3 da bentonita sódica ativada (Figura 4.3) pode justificar a maior intensidade e presença da fase montmorillonita neste material ou a presença de caulinita (Figura 4.4). Outras fases secundárias presentes nos materiais estudados foram: caulinita, saponita e antigorita, como indicado nos difratogramas. Como esperado, a bentonita sódica ativada possui ainda em sua composição tanto o Na_2O como CaO (Figura 4.3)

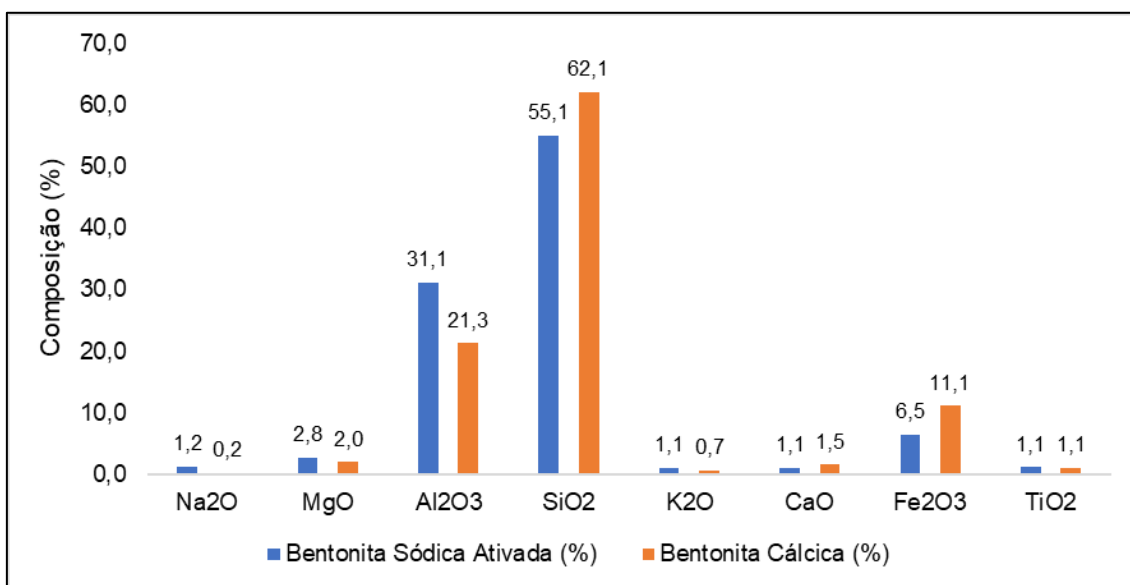


Figura 4.3: Composição química das bentonitas avaliadas.

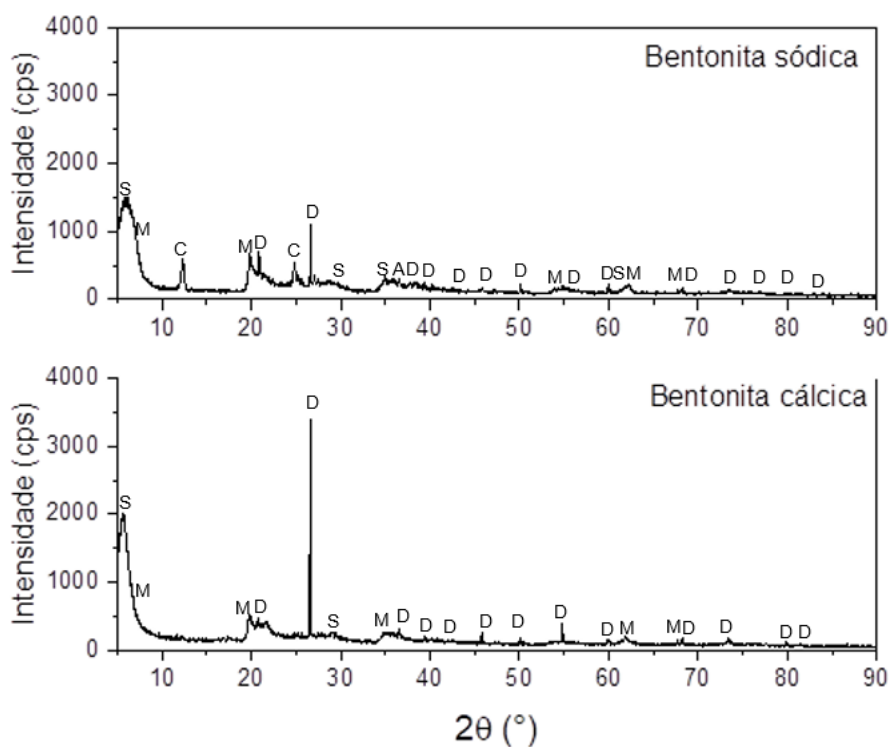


Figura 4.4: Difractogramas de raios X obtidos para as bentonitas avaliadas. Fases identificadas: S = Saponita ($\text{Ca}_{0.2}\text{Mg}_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 29-1491); M = Montmorillonita ($\text{Na}_{0.3}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 29-1498); C = Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, 29-1488); D = α -quartzo (SiO_2 , 77-1060); A = Antigorita ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, 52-1572).

4.2 Definição dos traços das argamassas impermeabilizantes

4.2.1 *Análise química e mineralógica das argamassas analisadas*

Diferenças foram verificadas entre os componentes presentes na composição química das argamassas analisadas. A Figura 4.5 indica que a fração sólida da argamassa comercial possui maiores quantidades de óxido de cálcio (13,3%), que pode estar associada a maior quantidade de fases ricas em cálcio, e de óxido de magnésio (3,1%) quando comparado com a composição formulada. Conforme reportado por Ramalho [49], esses componentes, quando livres, possuem propriedades expansivas e preenchem vazios da microestrutura resultante. Ainda assim, o teor limite de óxido de magnésio (periclásio), como recomendado pela norma ASTM C150 é de 6%-p e foi verificado que ambos os materiais analisados atendem tal requisito. Além disso, a argamassa formulada apresentou maiores quantidades de Al_2O_3 e SiO_2 em sua composição (Figura 4.5).

A partir dos ensaios de difração de raios X (Figura 4.6), identificou-se a presença de picos intensos de quartzo nas argamassas analisadas. Verificou-se ainda picos associados a fase Ca_3SiO_5 (hatrurite), $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)$ (mervinita) e periclásio (MgO) no material comercial (referência), enquanto na composição formulada foi observada apenas a presença de picos das fases Ca_2SiO_4 (belita) e hatrurite.

4.2.2. *Efeito do tipo e do teor das bentonitas na reologia das argamassas*

Parte sólida da argamassa comercial

Inicialmente avaliou-se o efeito da adição de diferentes teores das bentonitas cálcica e sódica (0%, 0,5%, 1% e 2%-peso) a parte A (sólida) de uma argamassa comercial (Sikatop 100, material de referência), com o traço 3,5:1, visando identificar possíveis mudanças no comportamento reológico das misturas.

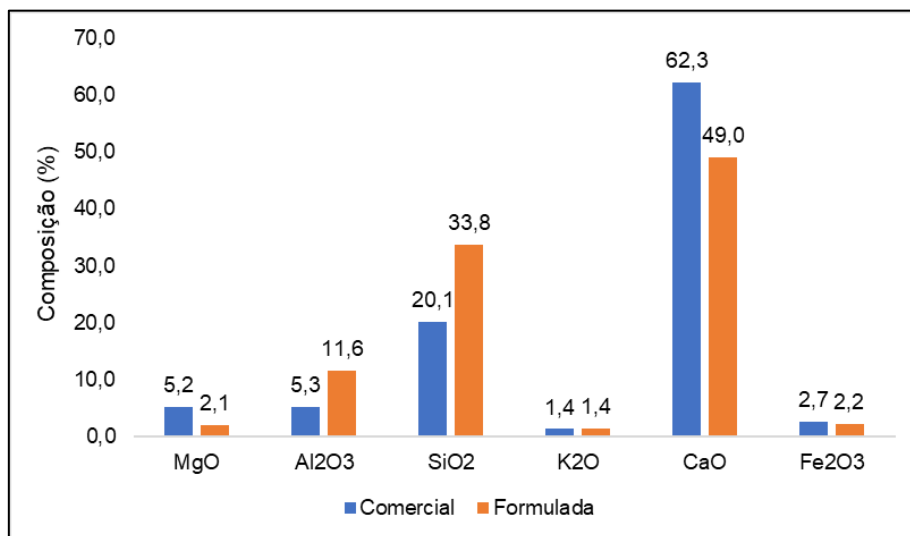


Figura 4.5: Composição química da parte sólida das argamassas analisadas.

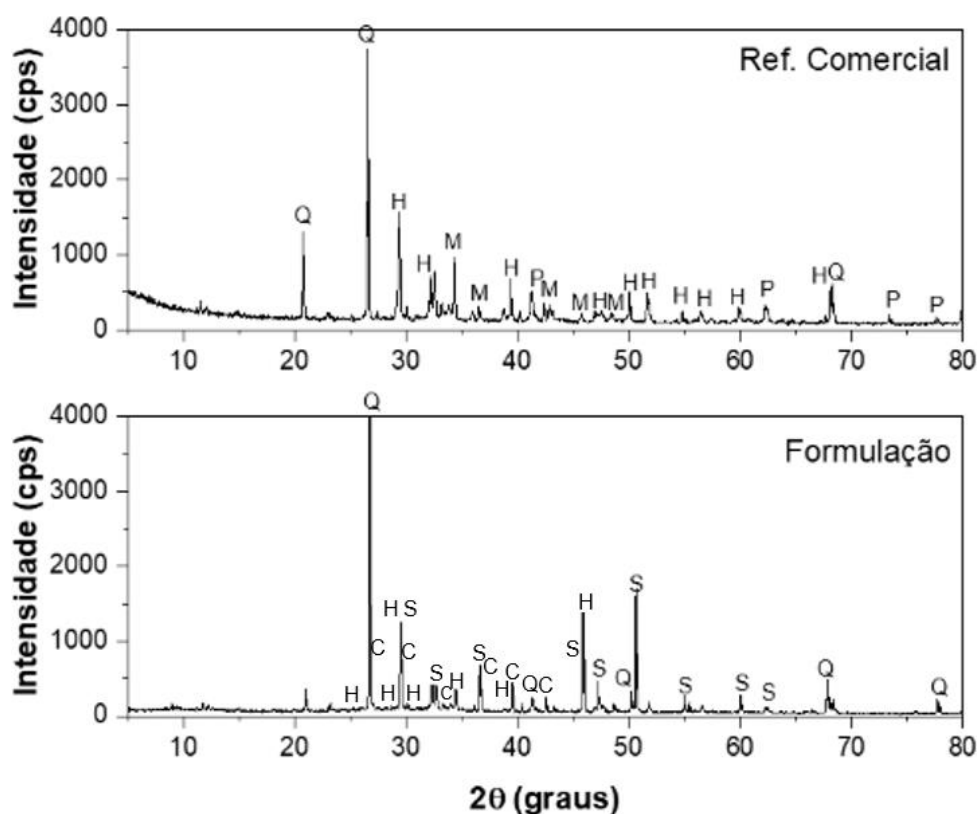


Figura 4.6: Difractogramas da parte sólida das argamassas antes do seu processamento. Q = α -quartzo (SiO_2 , 77-1060), H = hatrurite (Ca_3SiO_5 , 86-402), M = mervinita ($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)$, 35-591), P = periclásio (MgO , 75-447) S= silicato de cálcio (belita) (Ca_2SiO_4 , 42- 551) C = óxido de cálcio (CaO , 17-912).

Em geral, observou-se que houve a queda da fluidez com o acréscimo dos teores de bentonita (Figuras 4.7 e 4.8), devido a possível floculação das pastas em função da formação de um gel associado as interações EE (aresta a aresta) e EF (aresta a face) entre as partículas de bentonita, conforme proposto por Shiroma [16]. Tais transformações são associadas a mudança da reologia do sistema aquoso estudado.

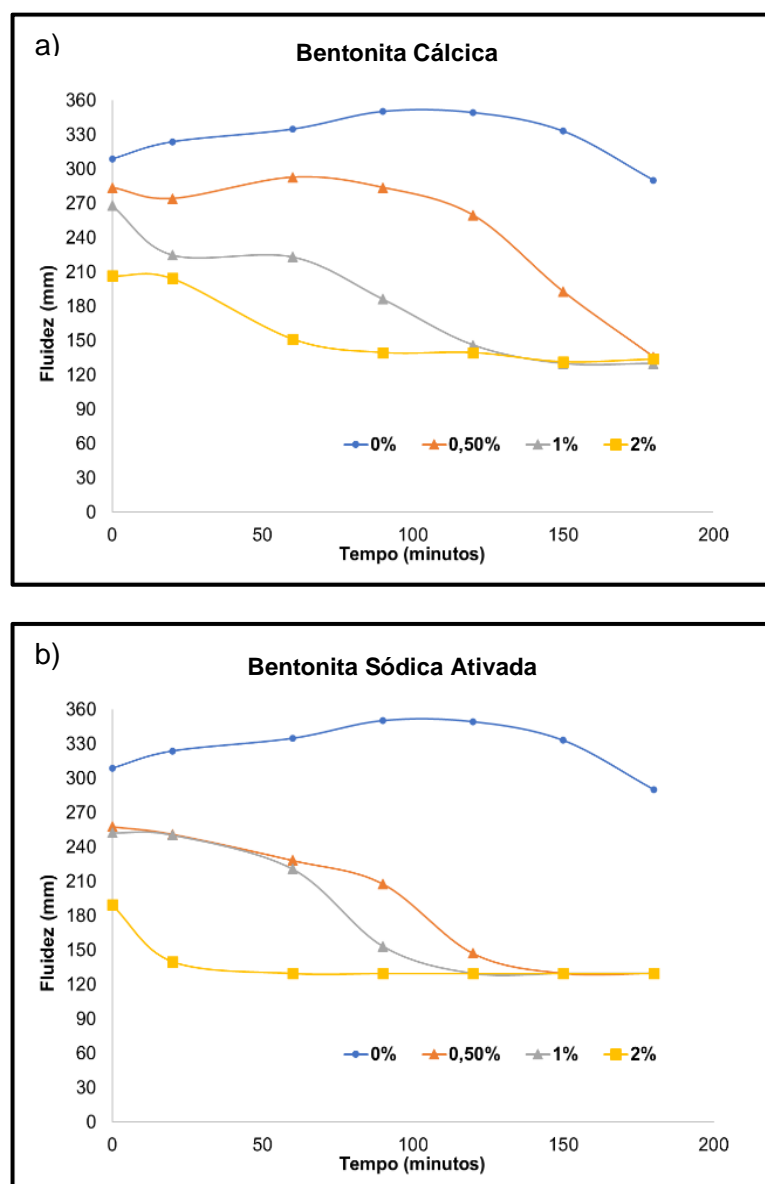


Figura 4.7: Valores absolutos da fluidez das argamassas preparadas (parte A da argamassa comercial e traço 3,5:1) em função do tempo e do teor de adição das bentonitas (a) cálcica e (b) sódica ativada.

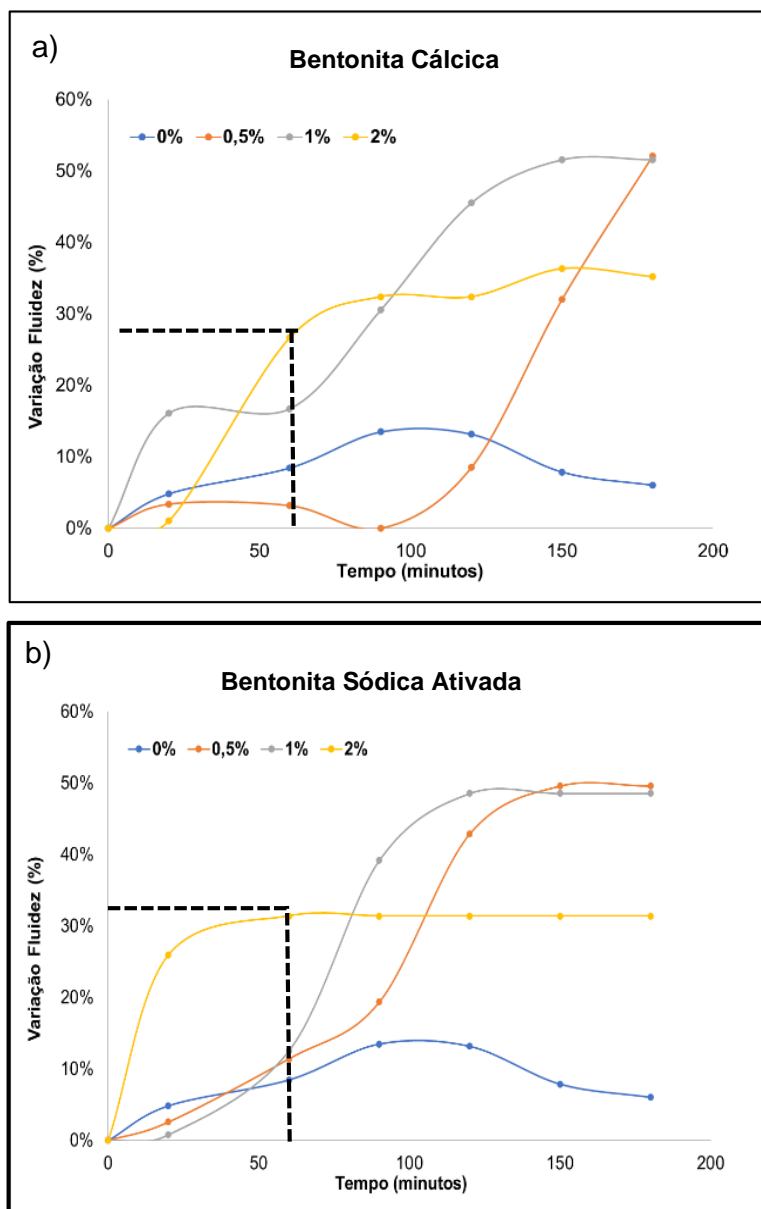


Figura 4.8: Variação da fluidez das argamassas preparadas (parte A da argamassa comercial e traço 3,5:1) em função do tempo e do teor de adição das bentonitas (a) cálcica e (b) sódica ativada.

As argamassas contendo bentonita sódica ativada exibiram maior variação de seus níveis de fluidez (Figura 4.7b e 4.8b). Foi verificado que, até a concentração de 2% de bentonita, nenhuma das amostras ensaiadas apresentou variação de espalhamento superior a 35% dentro do intervalo de 60 min, atendendo ao requerido pela norma ABNT NBR 11905.

Quando comparamos os resultados obtidos com os do estudo realizado por Liu et al. [6], verificamos que a tendência da redução da fluidez com a adição da bentonita é mantida, sendo esta mais evidente naquela que é mais fina e reativa (bentonita sódica).

Parte sólida da argamassa formulada

Considerando a possibilidade de a argamassa comercial possuir componentes adicionais que poderiam influenciar a ação da bentonita, optou-se num segundo momento em formular uma argamassa e avaliar novamente a adição de 0%, 0,5%, 1% e 2% das bentonitas nesta nova mistura. O mesmo traço (3,5 parte A: 1 parte B) foi utilizado nesta etapa.

Ao se conduzir os ensaios de fluidez (Figura 4.9), verificou-se que a formulação preparada sem adição de bentonita possuía menor fluidez (273 mm) em relação a argamassa comercial de referência (309 mm). A variação de fluidez desta composição também foi inferior a 35% num intervalo de tempo de até 60 minutos, ou seja, ela atendeu a norma ABNT NBR 11905. Por esta razão, considerou-se que a formulação elaborada era adequada para o propósito deste estudo.

De maneira geral, observou-se que tanto a adição de bentonita cálcica ou sódica ativada (Figura 4.9 e Figura 4.10), independentemente da concentração, reduziu a fluidez em aproximadamente 41% quando comparado a formulação sem este aditivo. Ao compararmos o comportamento da variação de fluidez com o tempo da argamassa comercial (Figura. 4.8) com a formulada (Figura 4.10), notamos uma redução de fluidez mais pronunciada para esta primeira quando na presença de bentonita, enquanto a argamassa formulada apresenta menores mudanças nesta propriedade.

Este comportamento distinto pode estar relacionado a uma maior velocidade de hidratação, devido à presença de periclásio na argamassa comercial, o qual consome a água do meio para formação da brucita. Ademais, é possível que outros aditivos amorfos, presentes na argamassa comercial, estejam influenciando na velocidade de hidratação desta composição.

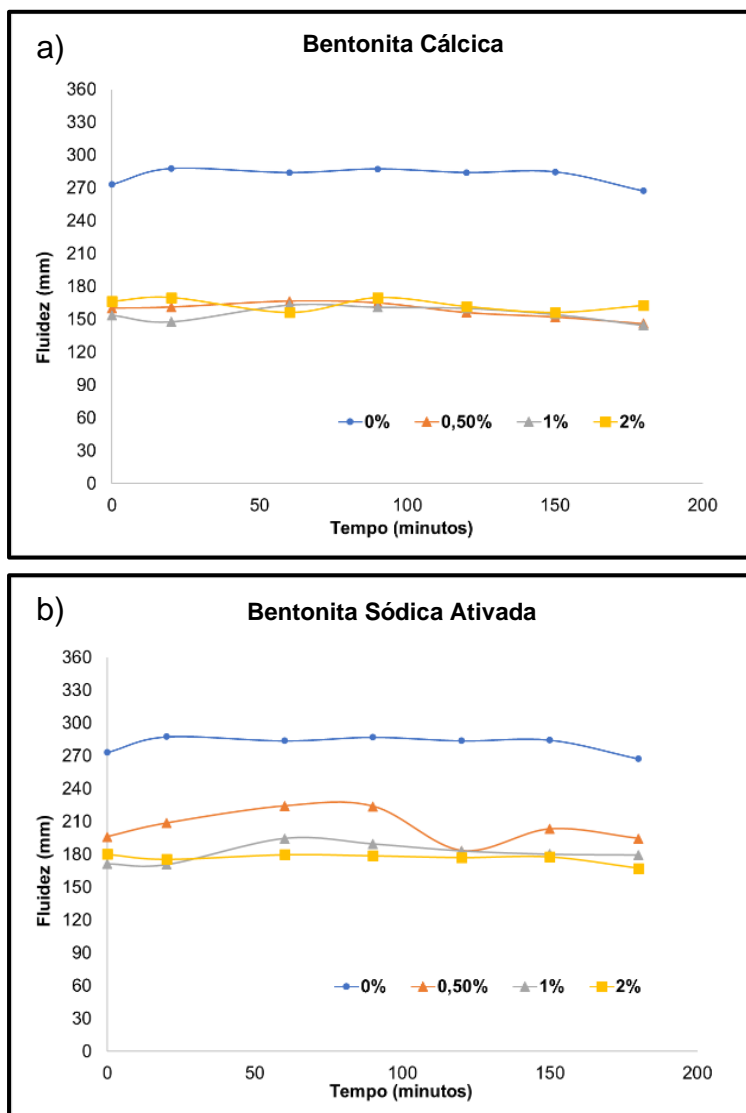


Figura 4.9: Valores absolutos da fluidez das argamassas preparadas (parte A da formulação desenvolvida traço 3,5:1) em função do tempo e do teor de adição das bentonitas (a) cálcica e (b) sódica ativada.

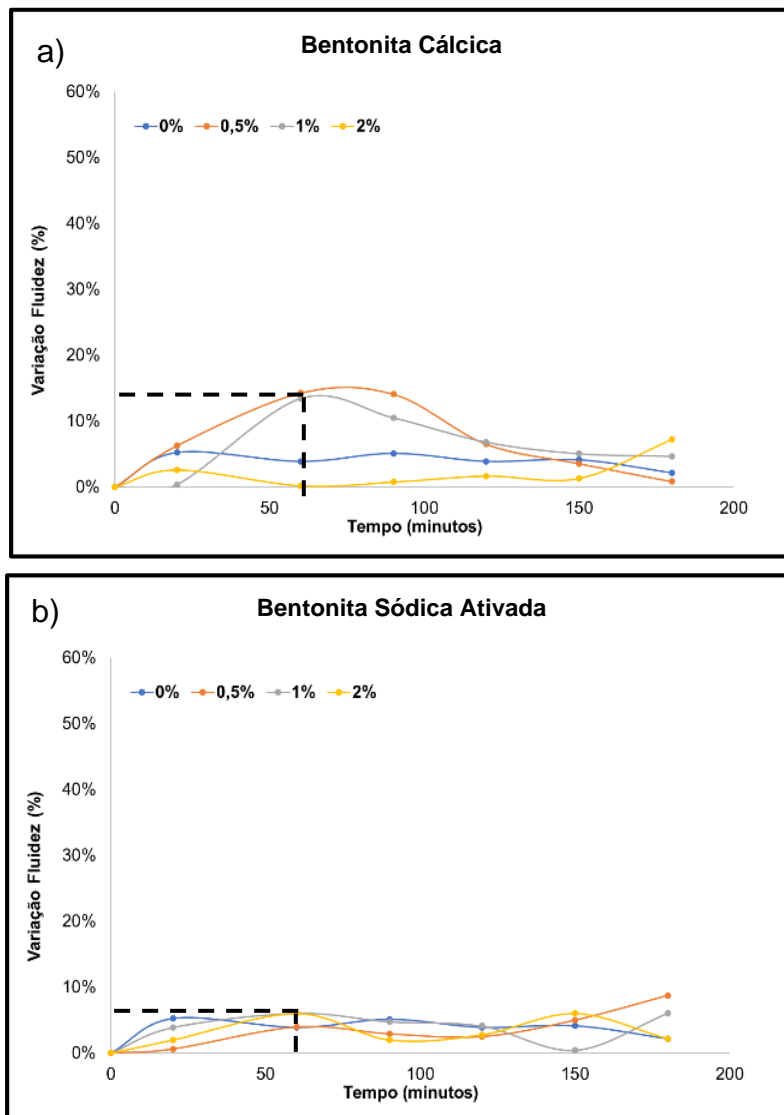


Figura 4.10: Variação da fluidez das argamassas preparadas (parte A da formulação desenvolvida e traço 3,5:1) em função do tempo e do teor de adição das bentonitas (a) cálcica e (b) sódica ativada.

Com o objetivo de ainda permitir a incorporação de uma maior quantidade de bentonita à formulação desenvolvida sem comprometer fortemente as características reológicas das misturas, optou-se por avaliar um novo traço da argamassa formulada, considerando 3 partes A para 1 parte B. Neste caso, foi possível incrementar a adição de bentonita para até 6%-peso. As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam os resultados obtidos nesta nova avaliação.

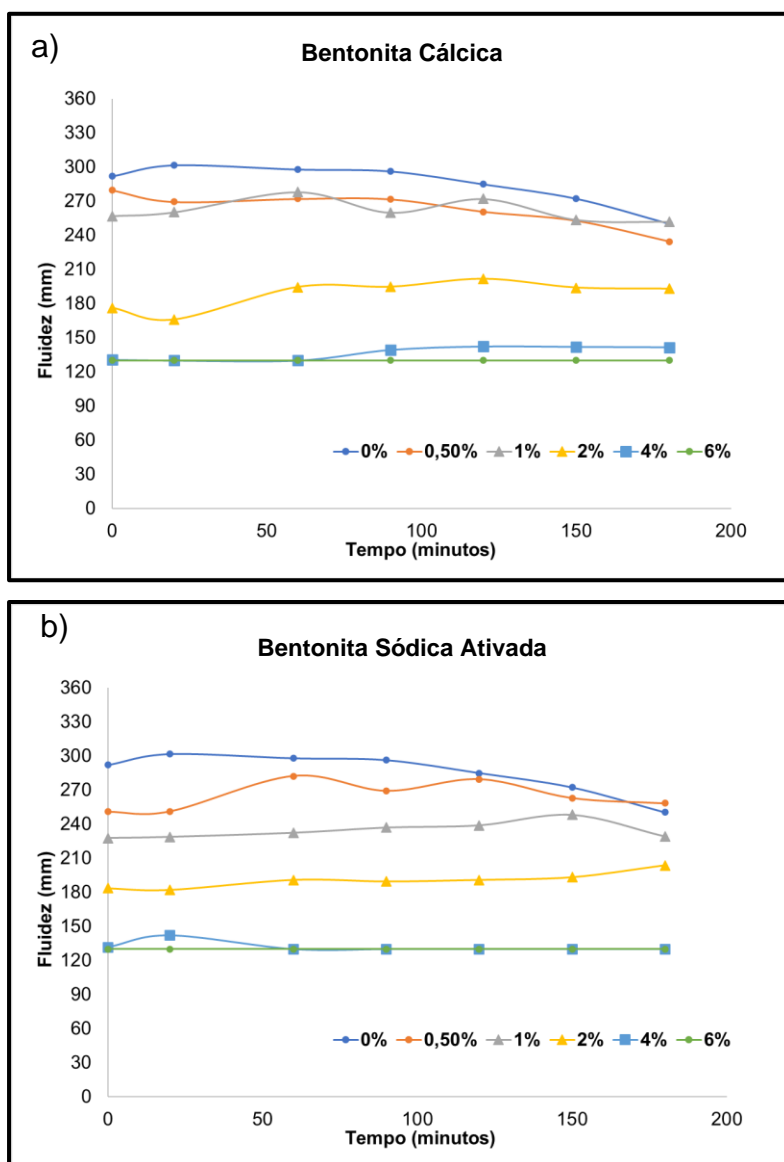


Figura 4.11: Valores absolutos da fluidez das argamassas preparadas (parte A da formulação desenvolvida e traço 3:1) em função do tempo e do teor de adição das bentonitas (a) cálcica e (b) sódica ativada.

Como esperado, a adição de maior quantidade da parte líquida, e, conseqüentemente de mais água, promoveu um aumento de 11% de fluidez (Figura 4.11) em relação ao traço 3,5:1 da argamassa formulada sem adição de bentonita (Figura 4.9).

Além disso, no novo traço proposto, foi verificado que a redução de fluidez só foi significativa após a adição de 2% de bentonita, seja cálcica ou sódica

ativada, onde houve perda inicial de 40% da fluidez em relação a amostra sem este aditivo.

Foi possível constatar que houve uma maior redução de fluidez com a adição da bentonita sódica ativada (Figura 4.11 e Figura 4.12), isso se deve ao maior inchamento desta bentonita (Figura 4.2), promovendo uma maior exposição das faces (carga negativa) e arestas (carga positiva) das partículas e, conseqüentemente, a floculação da suspensão.

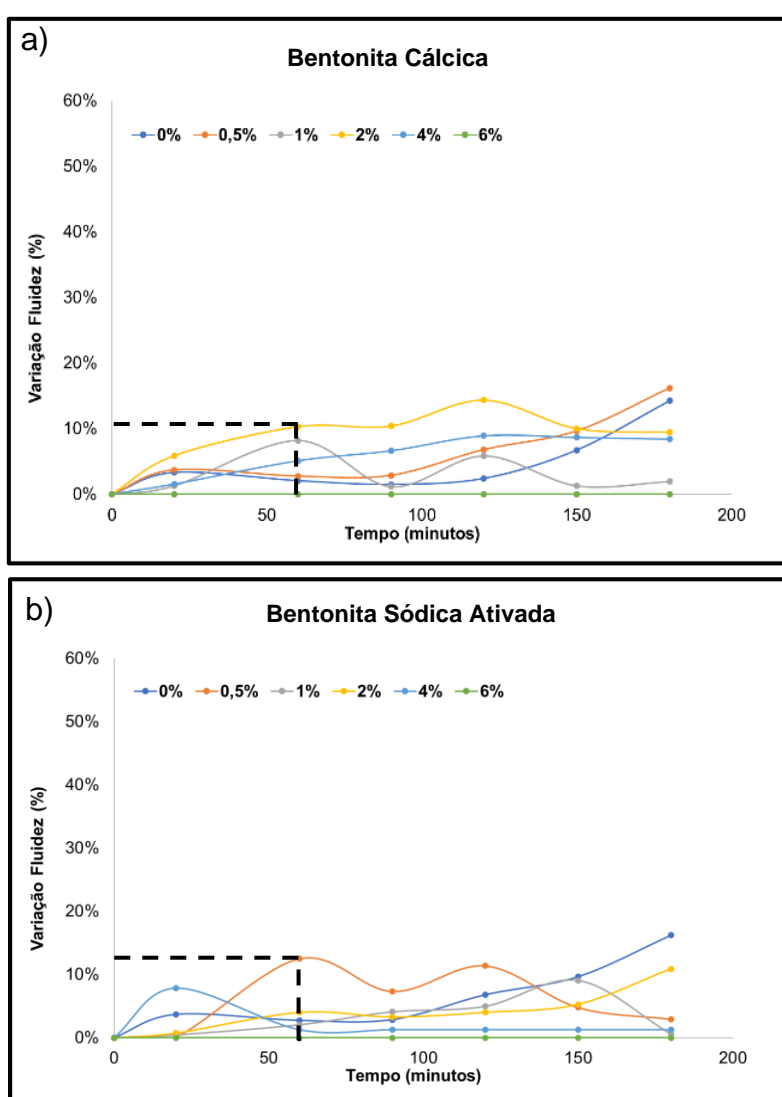


Figura 4.12: Variação da fluidez das argamassas preparadas (parte A da formulação desenvolvida e traço 3:1) em função do tempo e do teor de adição das bentonitas (a) cálcica e (b) sódica ativada.

Verificou-se também que a adição de maiores valores de bentonita (4 e 6%-p) reduziu drasticamente a fluidez da argamassa, resultando em espalhamentos da ordem de 125 mm (mesmo tamanho da abertura do cone usado nos ensaios de fluidez). Apesar disso, as argamassas contendo alto teor de bentonita ainda apresentaram características adequadas para aplicação com pincel sobre um substrato, sendo que a realização de movimentos verticais e horizontais durante o espalhamento das misturas resultavam na obtenção de composições mais fluídas. Tal fato, permitiu que algumas amostras fossem preparadas para posteriores avaliações.

Com base nestes resultados, foi verificado que a argamassa comercial apresentou propriedades reológicas diferentes da composição formulada, uma vez que, apesar de sua maior fluidez inicial, tal propriedade foi mais afetada (reduzida) quando foi realizada a incorporação da bentonita ao sistema. Tal fato pode estar associado as diferenças na composição química e mineralógica destes materiais (como visto na seção 4.2.1)

4.2.3 Caracterização das demais propriedades das argamassas preparadas

A Figura 4.13 mostra os resultados de absorção de água das composições analisadas. A argamassa comercial não apresentou mudanças significativas desta propriedade com a variação do tipo e o aumento da quantidade de bentonita (Figura 4.13a). Porém, observou-se um crescente aumento da absorção de água com o incremento da quantidade de bentonita para a formulação preparada com traço 3,5:1 (Figura 4.13b). Dentre as duas opções disponíveis (cálcica e sódica ativada, Figura 4.13b), pode-se verificar que as argamassas contendo bentonita cálcica resultaram em maiores valores de absorção de água, tal fato pode estar relacionado a este aditivo possuir menor capacidade de inchamento (Figura 4.2). Conforme proposto por Liu et al. [6], tal característica comumente resulta em uma menor impermeabilização das composições. O incremento desta propriedade não era esperado, porém, tal comportamento pode indicar que a adição de 2%p desta bentonita foi insuficiente para que o efeito impermeabilizante fosse possível de ser detectado.

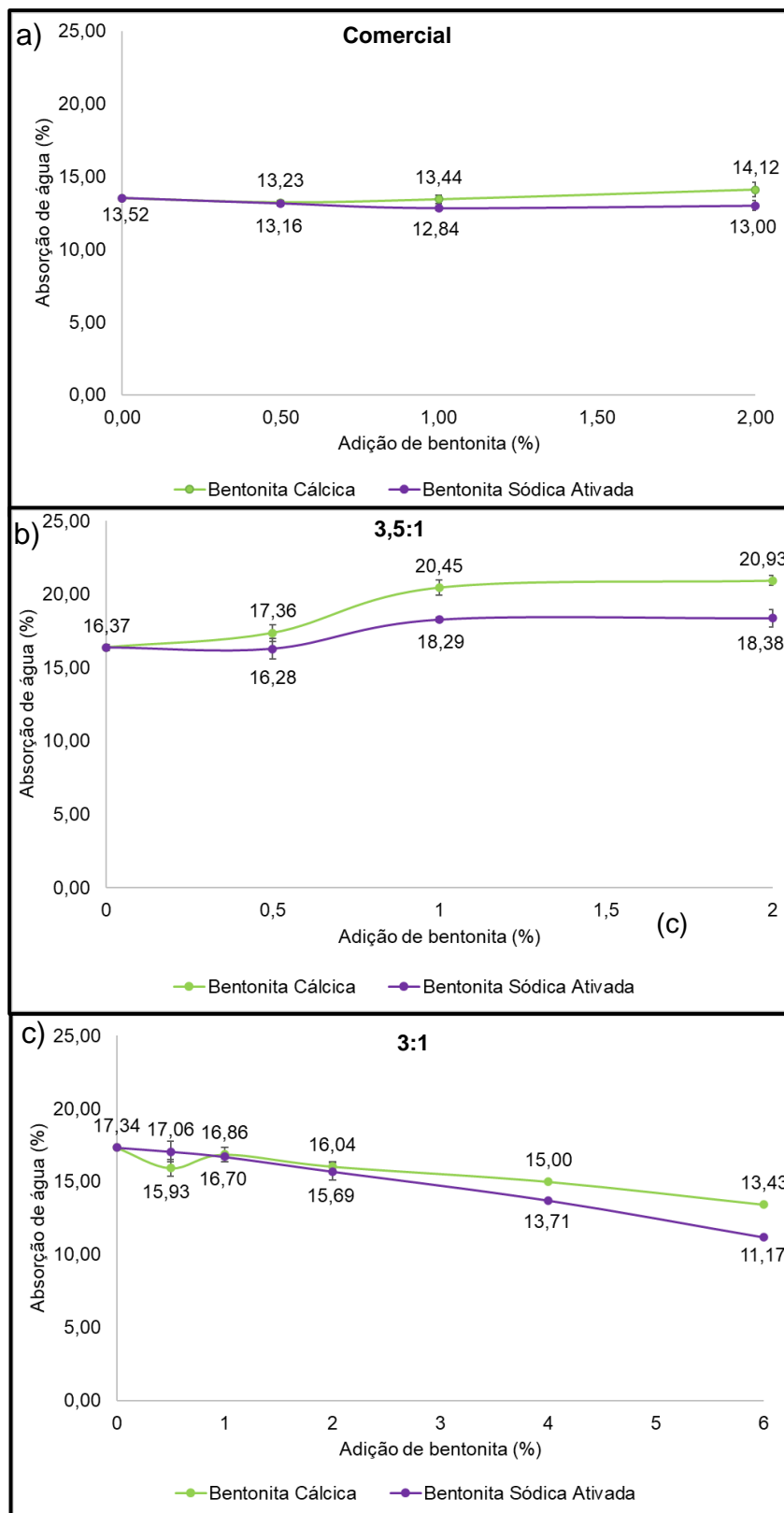


Figura 4.13: Absorção de água após 28 dias de cura da (a) argamassa comercial, (b) formulada com traço 3,5:1 e (c) formulada com traço 3:1. As misturas continham teores de 0-6%-p das bentonitas selecionadas.

Por outro lado, uma tendência oposta foi notada para a argamassa formulada com traço 3:1, havendo o decréscimo da absorção de água com o incremento de bentonita. Por exemplo, a mistura contendo 6%-p de bentonita sódica ativada apresentou absorção de 11,17%, o que corresponde a uma redução de 35% em relação a argamassa sem bentonita (Figura 4.13c).

Acredita-se que o inchamento da bentonita sódica ativada (como visto na seção 4.1) induziu a redução da porosidade existente e promoveu a formação de uma camada superficial impermeabilizante na argamassa. Possivelmente, este efeito ficou mais evidente a medida que uma maior quantidade desta bentonita foi introduzida no traço 3:1. Mesmo a argamassa 3:1 contendo bentonita cálcica também apresentou a tendência de redução da absorção de água com o aumento deste aditivo (Figura 4.13c). O maior teor de água usado no traço 3:1 em relação ao 3,5:1, pode ter ainda favorecimento este maior inchamento das partículas de bentonita.

Outro aspecto importante é a influência da bentonita na resistência à compressão das argamassas após 28 dias de cura. Como indicado na Figura 4.14, este aditivo não interferiu de forma significativa nesta propriedade. Contudo a formulação preparada, independente do traço avaliado (3,5:1 ou 3:1) apresentou valores de resistência mecânica da ordem de 6 vezes menor do que a formulação comercial.

Tal desempenho pode estar relacionado a presença de uma maior quantidade de óxido de cálcio (cerca de 13,3 %) e de óxido de magnésio (~3,1%) na argamassa comercial em relação a formulada (3,5:1, ver Figura 4.5). Considerando que estes componentes contribuem com as reações de hidratação durante a interação das composições com água, possivelmente, as diferenças nos produtos de reação e distribuição das fases na microestrutura resultaram em melhor desempenho para o produto comercial (Figura 4.14).

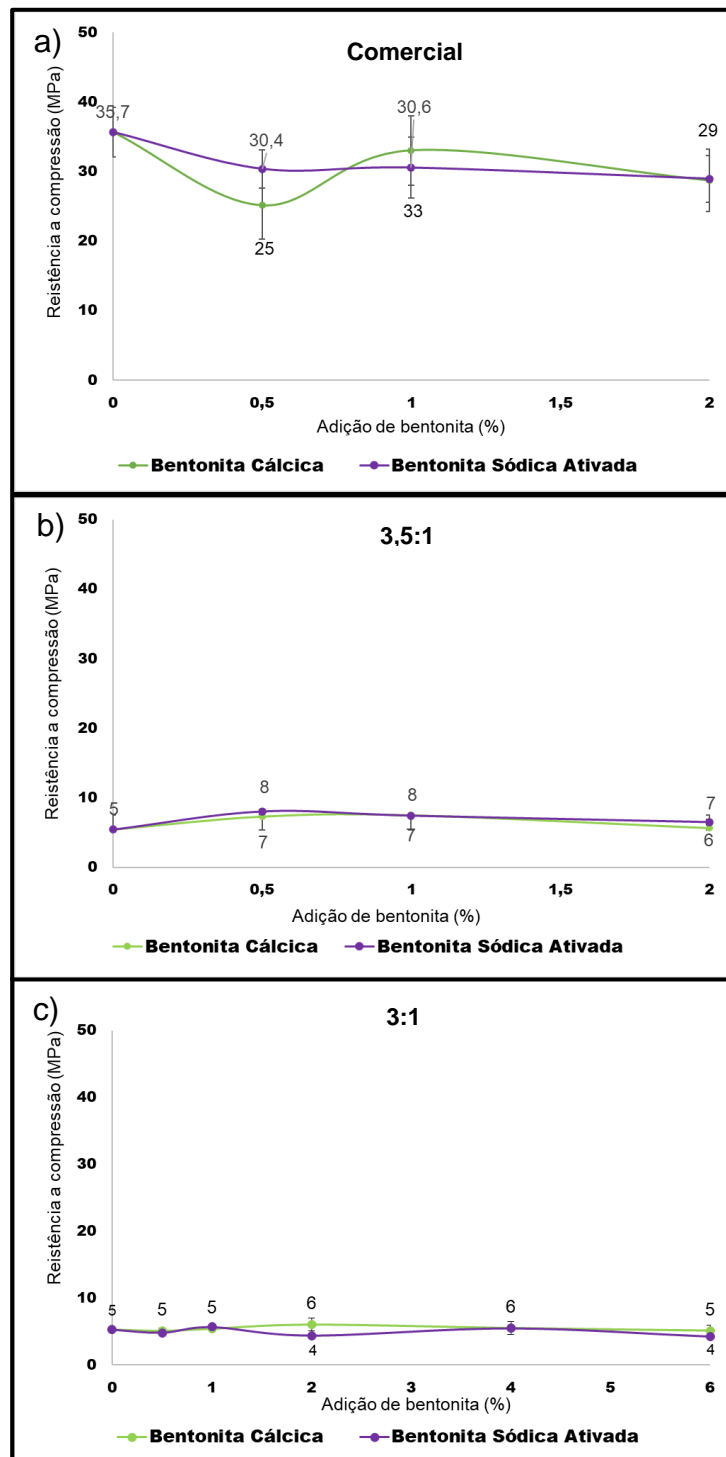


Figura 4.14: Resistência à compressão após 28 dias de cura da argamassa (a) comercial, (b) formulada com traço 3,5:1 e (c) formulada com traço 3:1 e contendo diferentes teores de bentonita.

Com o objetivo de se identificar as transformações de fases ocorridas na microestrutura das amostras, ensaios de difração de raios X foram conduzidos

nas argamassas contendo 0 ou 2%-p de bentonita (traço 3,5:1) após 28 dias de cura. A Figura 4.15 mostra os difratogramas obtidos para a argamassa comercial, sendo verificado que os picos das fases iniciais (antes da mistura com água) ainda se mantiveram nas amostras curadas, sendo apenas verificado a presença do hidróxido de cálcio (CH) como composto adicional e pequenos picos de $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2$.

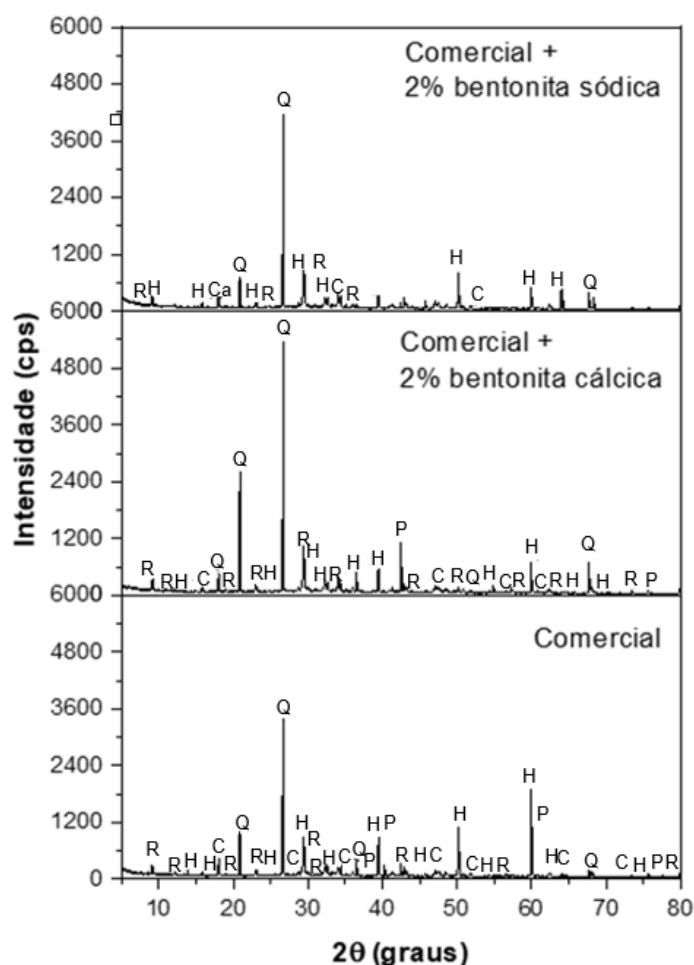


Figura 4.15: Difratogramas da argamassa comercial com e sem a adição de 2%-p das bentonitas (cálcica ou sódica) após o período de cura de 28 dias. Q = α -quartzo (SiO_2 , 77-1060), H= hatrurite (Ca_3SiO_5 , 86-402), P = periclásio (MgO , 75-447) C = hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, 84-1263) R= Riversideite-9-A ($\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2$, 29-329).

Notou-se ainda que a formulação comercial (com ou sem bentonita) não se hidratou completamente ou não formou quantidade suficiente de cristais de silicatos hidratados para identificação via DRX. Por outro lado, a argamassa formulada com ou sem a adição de 2%-p das bentonitas selecionadas (Fig. 4.16) apresentou em sua composição a formação de cristais de CSH ($\text{Ca}_{1.5}\text{SiO}_{3.5}\cdot x\text{H}_2\text{O}$) e CH. No entanto, a presença destas fases não contribuiu efetivamente para o aumento da resistência mecânica das amostras produzidas, sendo verificado melhor desempenho para a argamassa comercial (Fig. 4.14)

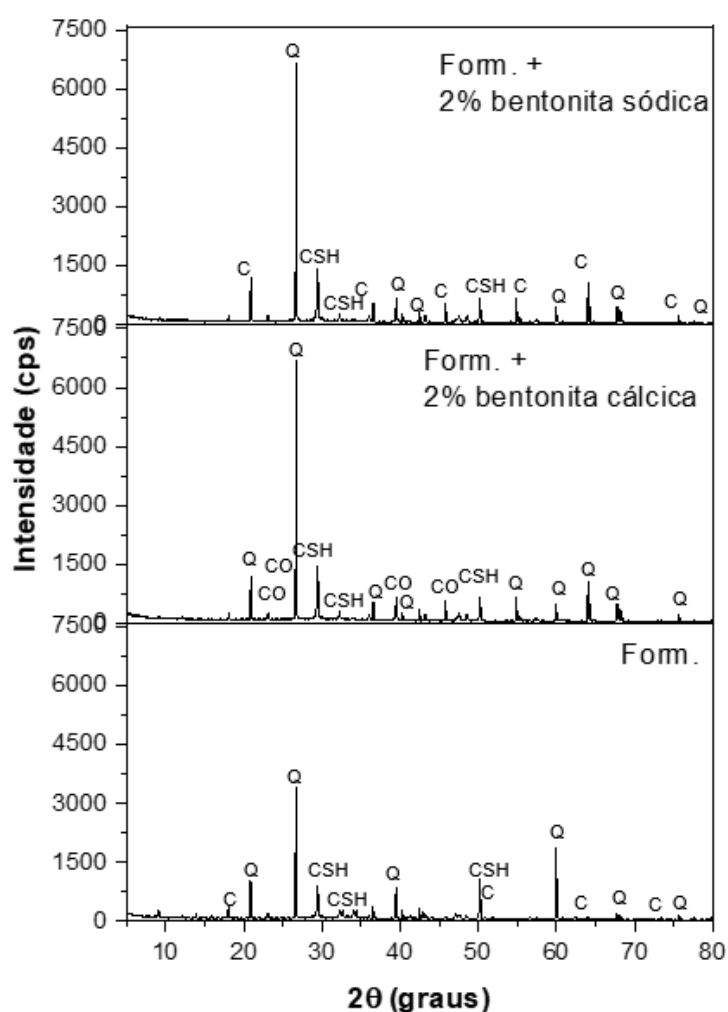


Figura 4.16: Difractogramas da argamassa formulada com traço 3,5:1 e com e sem a adição de 2%-p de bentonita (cálcica ou sódica) após o período de cura de 28 dias. Q = α -quartzo (SiO_2 , 77-1060), CO = óxido de cálcio (CaO , 28-775) C = hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). CSH = silicato de cálcio hidratado ($\text{Ca}_{1.5}\text{SiO}_{3.5}\cdot x\text{H}_2\text{O}$, 33-306).

Neste sentido, para melhor justificar os resultados obtidos, a microestrutura das amostras foi complementarmente analisada via microscopia eletrônica de varredura a fim de se observar a distribuição das fases e poros nas argamassas enrijecidas e a presença de cristais das fases hidratadas.

Imagens de menor magnificação (100x), como as apresentadas na Figura 4.17, foram coletadas a fim de possibilitar a observação da distribuição e tamanho dos poros contidos na microestrutura das argamassas sem bentonita (0%-p). Observou-se a presença de muitos poros ao longo da área fraturada das amostras, sendo verificado vazios com tamanhos de até 244 μm na argamassa comercial e 468 μm na formulada. Poros da ordem de 200 μm podem ser associados a incorporação de ar durante a etapa de processamento, conforme apontado por [39]. Dessa maneira, o uso de antiespumantes muitas vezes é recomendado para auxiliar na redução deste tipo de defeito. A grande quantidade de poros maiores na argamassa formulada sem adição de bentonita, pode justificar a superior absorção de água desta composição quando comparada a amostra comercial (Figura 4.13).

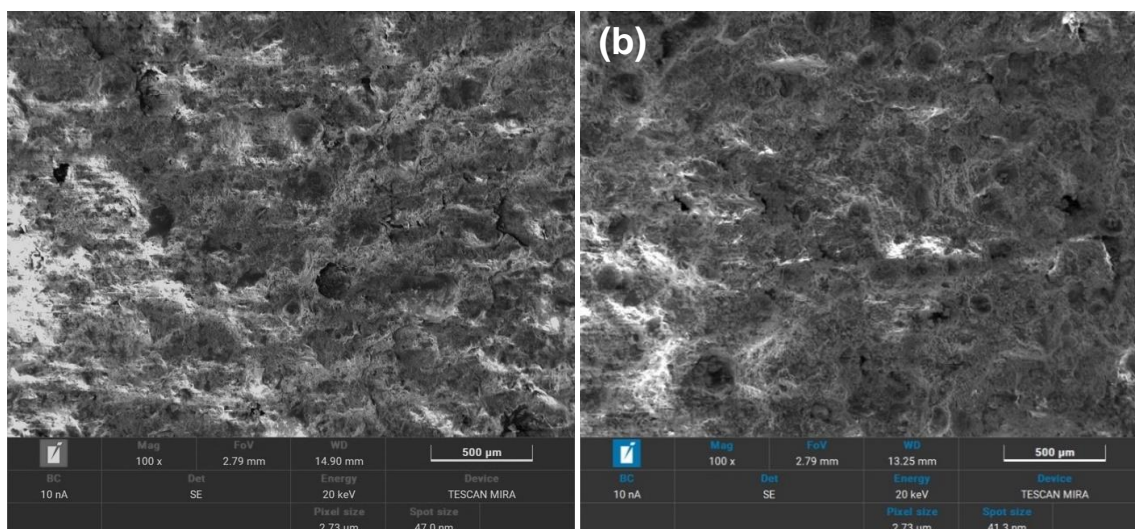


Figura 4.17 – Micrografias das argamassas analisadas após 28 dias de cura sem adição de bentonita. (a) Argamassa comercial e (b) formulada (traço 3,5:1). Imagens obtidas com aumento de 100 x no modo elétrons secundários (SE).

Cristais de trissulfoaluminato de cálcio hidratado, que se assemelham a agulhas, característicos da etringita, que são formados na etapa III (aceleração) da hidratação do cimento, foram também identificados na microestrutura das composições sem adição de bentonita (Figura 4.18).

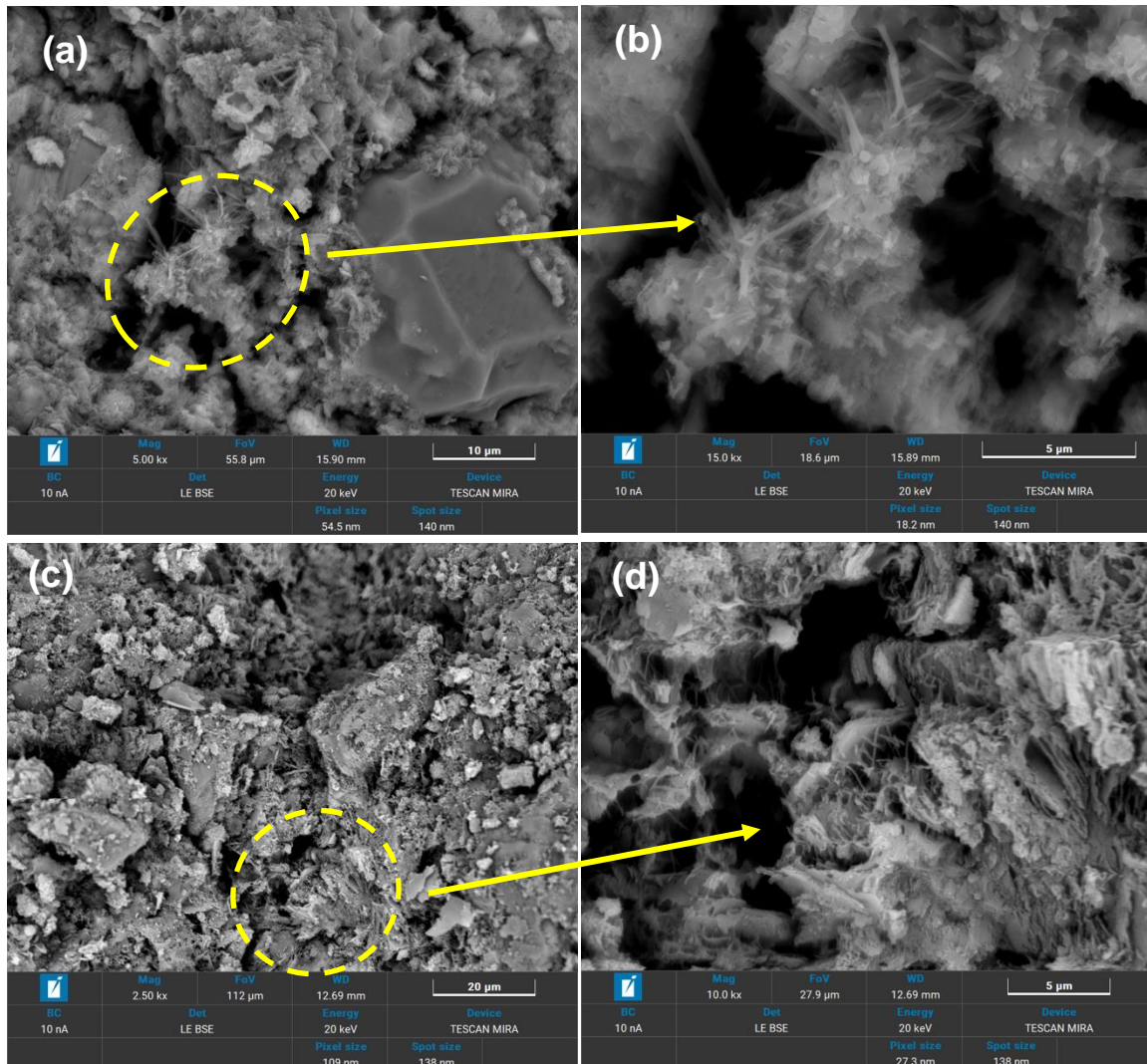


Figura 4.18– Micrografias, obtidas por MEV, da seção da fratura das argamassas sem adição de bentonita e enrijecidas após 28 dias de cura. (a e b) Amostra comercial e (c e d) amostra formulada (traço 3,5:1).

Porém, somente nas argamassas formuladas com e sem adição de bentonita (traço 3,5:1) é que foram identificados cristais grandes da fase CH gerados junto aos poros (Figura 4.19). Vieira e Molin [40] também reportaram a

formação de cristais grandes de hidróxido de cálcio orientados nos poros de concretos contendo diferentes tipos de cimento.

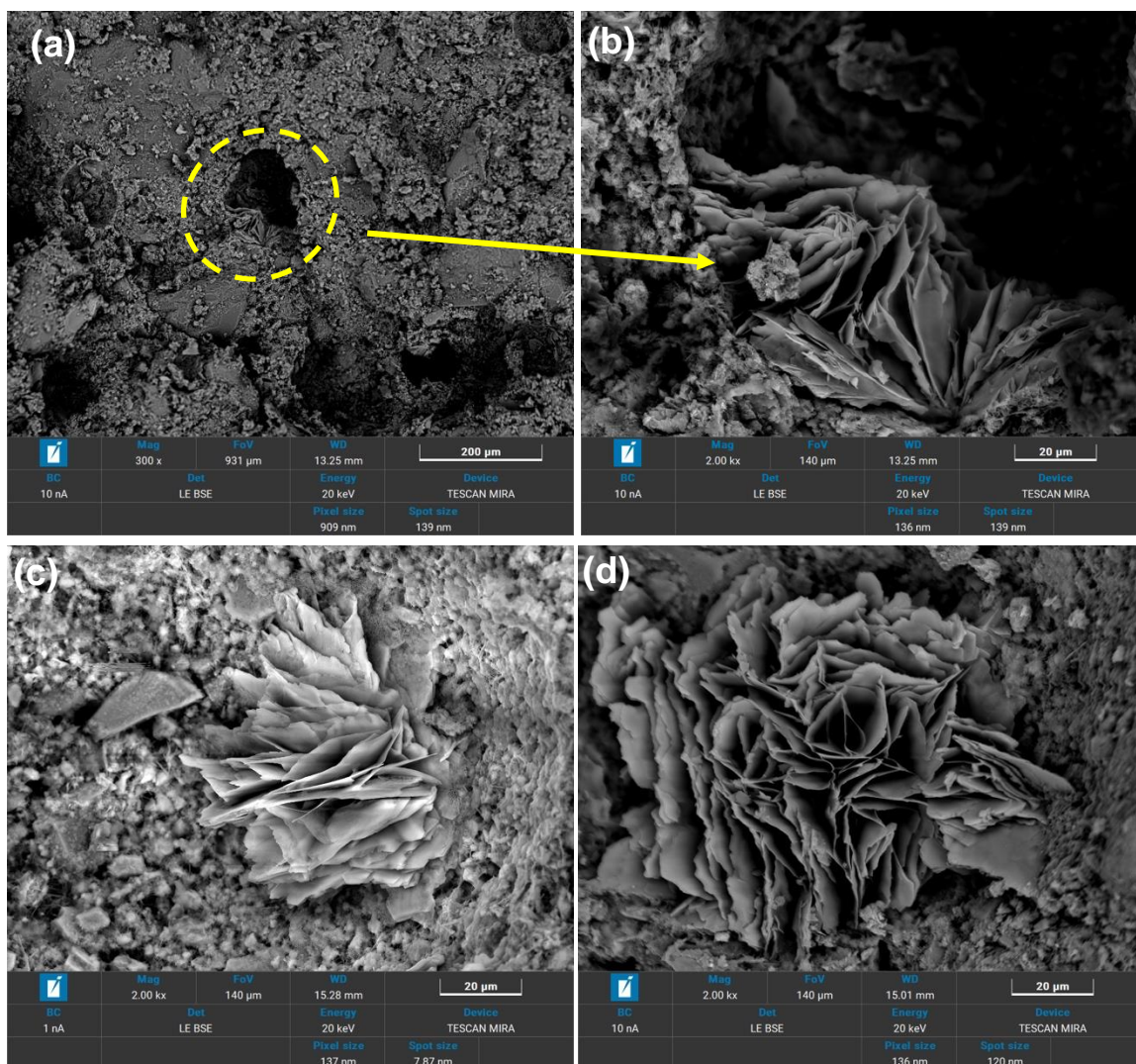


Figura 4.19 – Micrografias, obtidas por MEV, destacando a formação da fase hidróxido de cálcio (CH) na microestrutura da argamassa formulada – traço 3,5:1. (a e b) Sem adição de bentonita (0%-p), ou contendo 2%-p de bentonita (c) sódica ativada e (d) cálcica.

No caso das formulações contendo 2%-p de bentonita, verificou-se que as amostras eram visivelmente mais porosas do que aquelas preparadas sem este aditivo (Figura 4.20). Cristais de CSH e CH foram notavelmente identificados em várias regiões das amostras e suas características eram similares as

apresentadas nas Figuras 4.18 e 4.19. Portanto, pode-se afirmar que o comportamento mecânico inferior das argamassas formuladas está associado à elevada quantidade de poros e diferenças composicionais entre estas e o material comercial usado como referência.

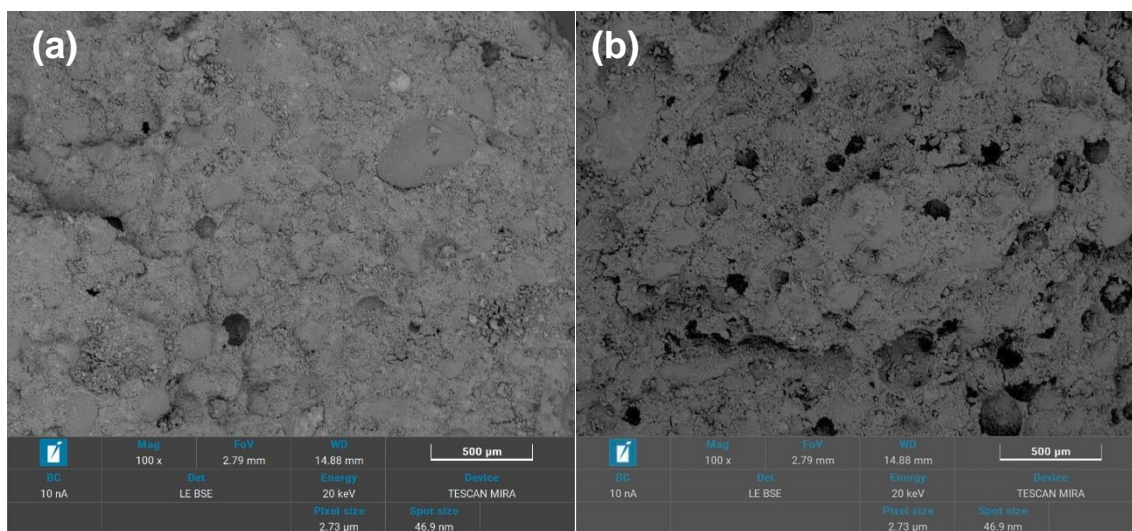


Figura 4.20 – Micrografias destacando a presença e distribuição dos poros nas argamassas (a) comercial e (b) formulada (traço 3,5:1) contendo 2%-p da bentonita cálcica.

Devido a pequena quantidade de bentonita adicionada, não foi possível identificar partículas isoladas deste aditivo que pudesse comprovar o mecanismo de interação da bentonita com o cimento, conforme proposto por Yang et.al [5]. No entanto, alguns autores associam a atuação da bentonita ao favorecimento do micropreenchimento dos poros de concretos e argamassas por cristais de fases hidratadas, o que pode ser verificado neste estudo.

4.3 Avaliação do efeito das resinas utilizadas na preparação das argamassas

As composições preparadas anteriormente foram processadas considerando, para o caso da argamassa comercial, o uso da parte líquida que acompanhava este produto. Por sua vez, a formulação desenvolvida foi

processada com a emulsão polimérica Mowilith LDM 6177, a qual é comumente utilizada neste tipo de produto. Porém, em virtude das diferenças no comportamento mecânico das amostras preparadas e avaliadas (seção 4.2.3), optou-se na continuidade deste estudo por analisar qual seria o efeito da troca das resinas na preparação das composições estudadas.

Portanto, nesta seção serão apresentados resultados referentes a argamassa comercial preparada com a emulsão polimérica Mowilith LDM 6177 (composição teste 1 = parte A comercial + parte B formulada e traço 3,5:1) e a argamassa formulada (traço 3,5:1) em combinação com a resina do produto comercial (composição teste 2 = parte A formulada + parte B comercial). Ainda, optou-se por investigar o efeito da adição de bentonita cálcica e bentonita sódica ativada nos teores (0,5%, 1% e 2%) sobre a parte sólida dos materiais testados.

A argamassa impermeabilizante bi-componente e semiflexível comercial escolhida é uma composição a base de cimento, areias selecionadas e resina acrílica, sendo esta última recomendada para uso em concreto, argamassa ou alvenaria.

As Figuras 4.21 e 4.22 exibem os resultados obtidos para o ensaio de fluidez da composição 1 (parte A comercial + parte B formulada), sendo identificado a redução significativa de sua fluidez com a adição e o aumento do teor tanto da bentonita cálcica quanto da sódica em função do tempo.

Ao se comparar os resultados de variação de fluidez da composição 1 (Figura 4.21) com aqueles da argamassa comercial (Figura 4.8), foi verificado um aumento significativo dos valores mensurados, o que indica que a parte líquida (Parte B) da argamassa comercial pode ter algum aditivo, como um defloculante ou retardador de pega, que influencia a reologia das misturas.

Neste caso, praticamente todas as misturas testadas apresentaram variação superior a 35% após 60 minutos de ensaio, com exceção daquelas contendo apenas 0,5% de bentonita (Figura 4.22).

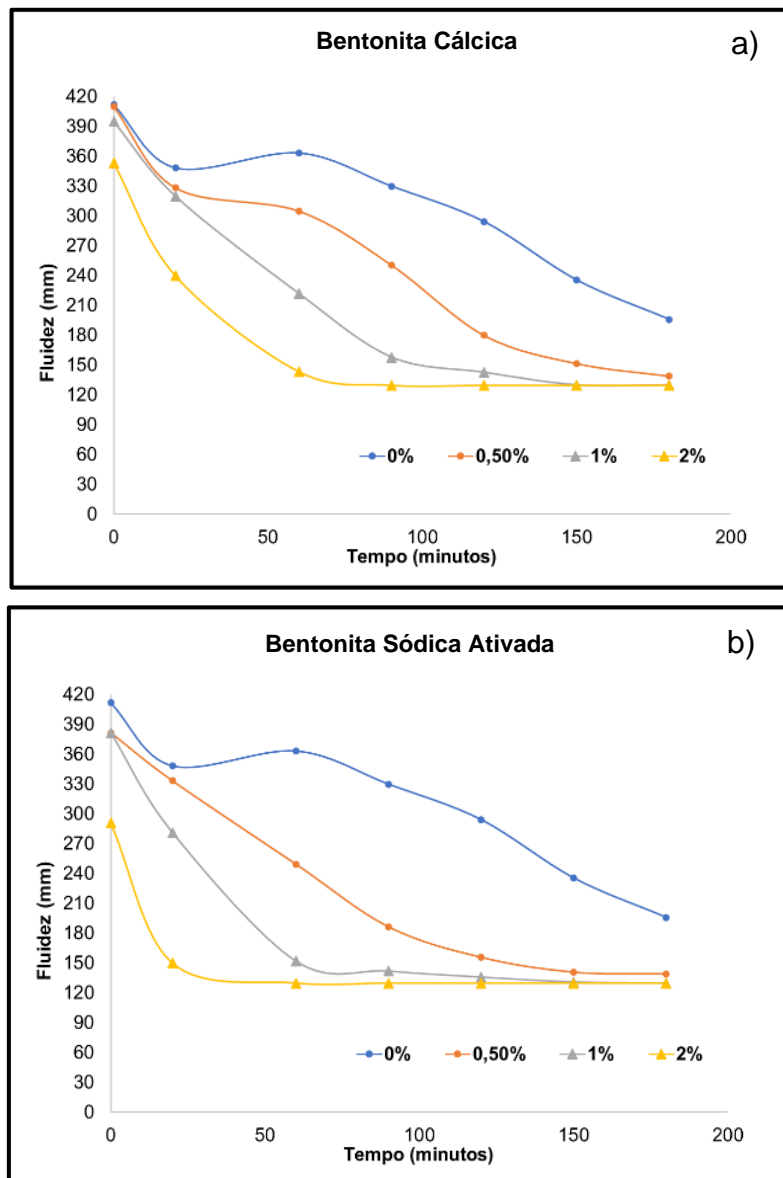


Figura 4.21: Valores absolutos da fluidez das argamassas da composição 1 (parte A comercial + parte B formulada e traço 3,5:1) em função do tempo e do teor de adição das bentonitas (a) cálcica e (b) sódica ativada.

A Figura 4.23 exibe os resultados obtidos para o ensaio de fluidez da composição 2. Foi verificado que o espalhamento inicial da composição 2 sofreu redução significativa (210 mm) em relação a composição 1 (420 mm, Figura 4.21). Contudo, a variação de fluidez da composição 2 após 60 minutos permaneceu abaixo de 35% atendendo a ABNT NBR 11905.

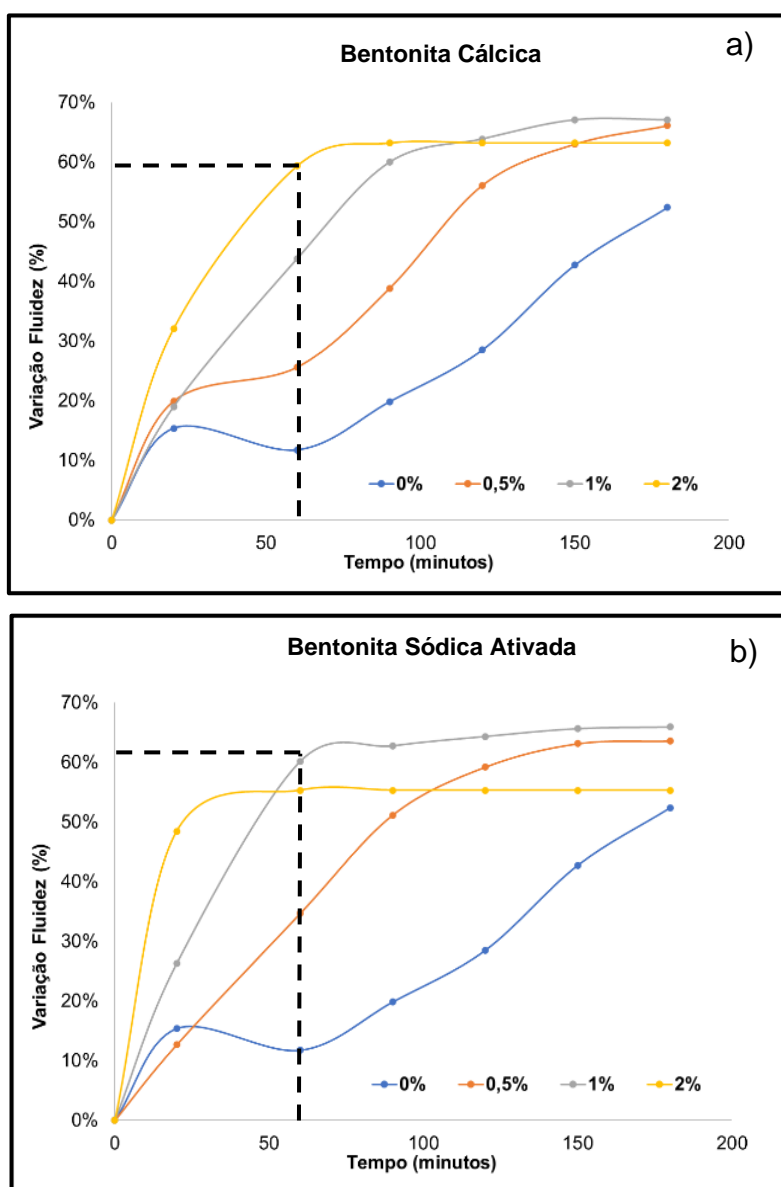


Figura 4.22 Variação da fluidez das argamassas da composição 1 (parte A comercial + parte B formulada e traço 3,5:1) em função do tempo e do teor de adição das bentonitas (a) cálcica e (b) sódica ativada.

Além disso, apesar das formulações com 1% e 2%-p de bentonita apresentarem fluidez próxima a 130 mm, próximo ao diâmetro do cone (Figura 4.24), elas exibiram boa trabalhabilidade possibilitando a aplicação e continuidade dos demais ensaios.

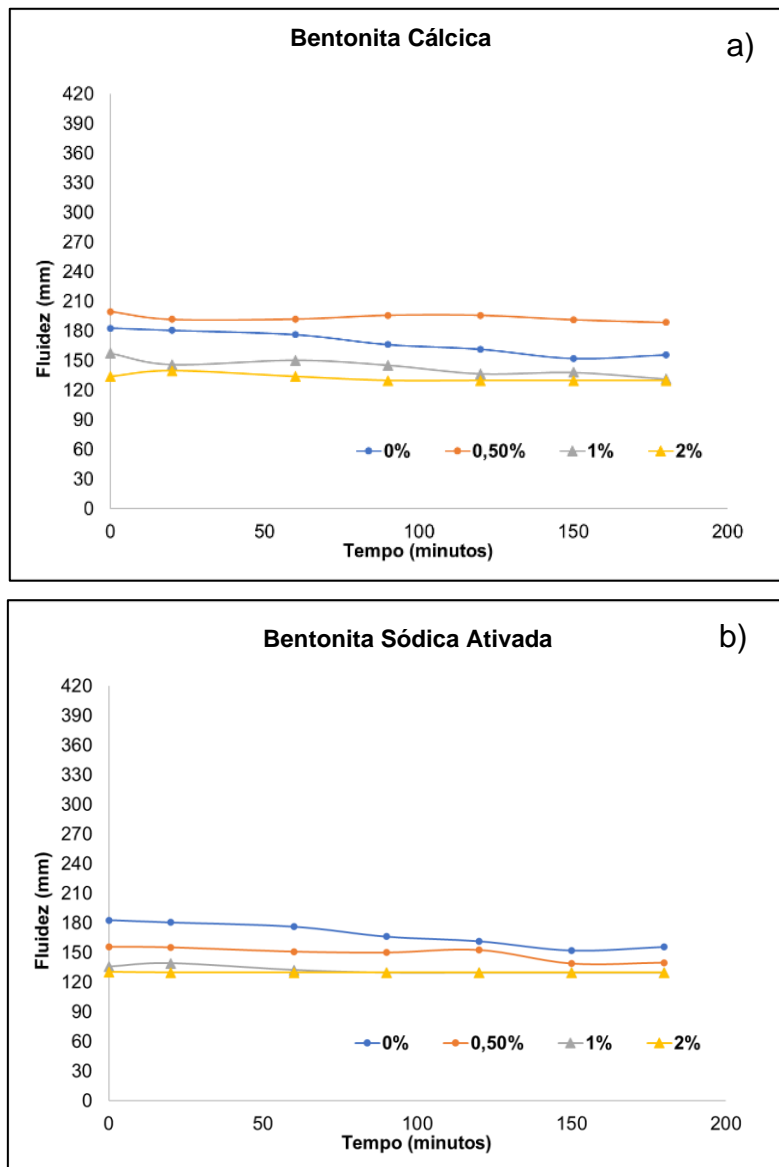


Figura 4.23 Valores absolutos da fluidez das argamassas da composição teste 2 = parte A formulada + parte B comercial e traço 3,5:1). em função do tempo e do teor de adição das bentonitas (a) cálcica e (b) sódica ativada.

A Figura 4.25 exibe os resultados de absorção de água das argamassas analisadas após 28 dias de cura em função da adição de bentonita. Apesar de ambas as composições apresentarem uma tendência de redução de absorção, essa variação não foi significativa.

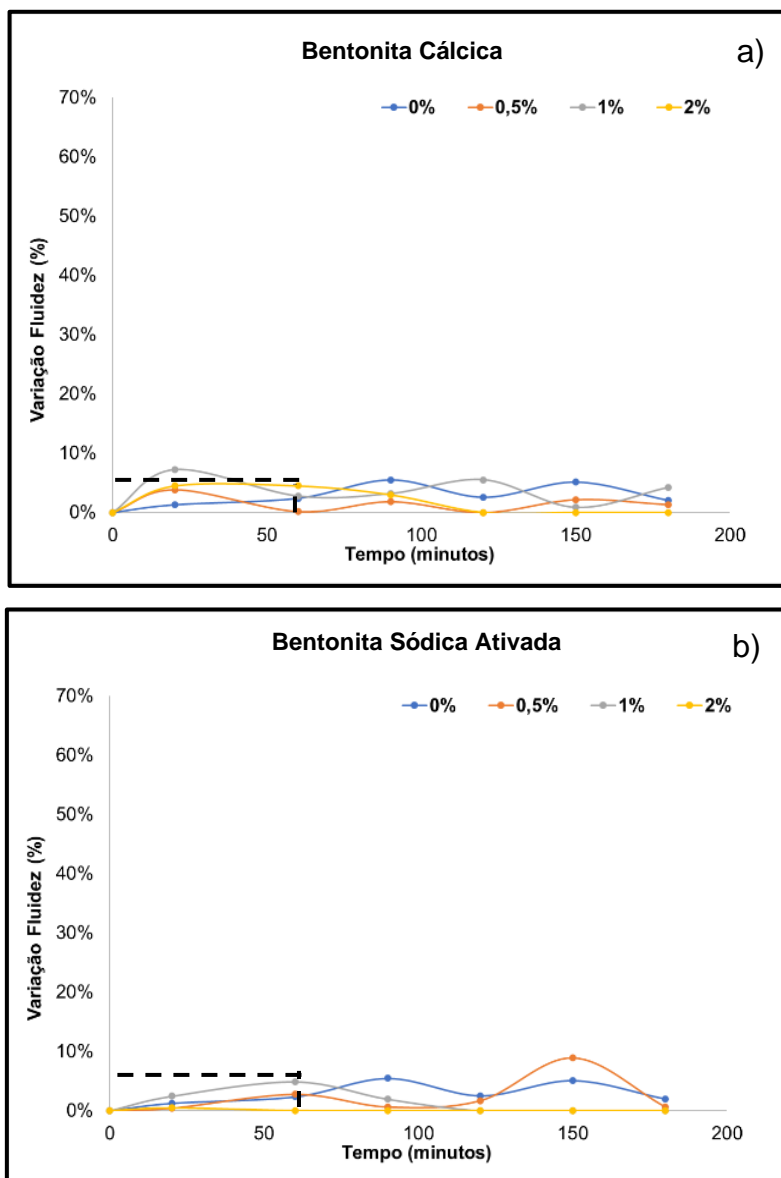


Figura 4.24 Variação de fluidez das argamassas da composição teste 2 = parte A formulada + parte B comercial e traço 3,5:1 em função do tempo e do teor de adição das bentonitas (a) cálcica e (b) sódica ativada.

Nota-se, que ao contrário dos resultados de absorção de água da argamassa comercial e preparada (Figura 4.13b tendência de leve aumento de absorção com a adição de bentonita), as composições 1 e 2 (Figura 4.25) apresentaram a redução de absorção de água. Tal comportamento se deve a interação da parte sólida com a resina, uma vez que, apesar de ambas as resinas serem acrílicas e possuírem o papel de proporcionar a impermeabilização da superfície, essas possivelmente são fabricadas por fornecedores distintos.

Dessa maneira, elas podem possuir aditivos e peso molecular distintos, impactando nas interações subsequentes com o cimento, componentes finos e agregados presentes na parte sólida.

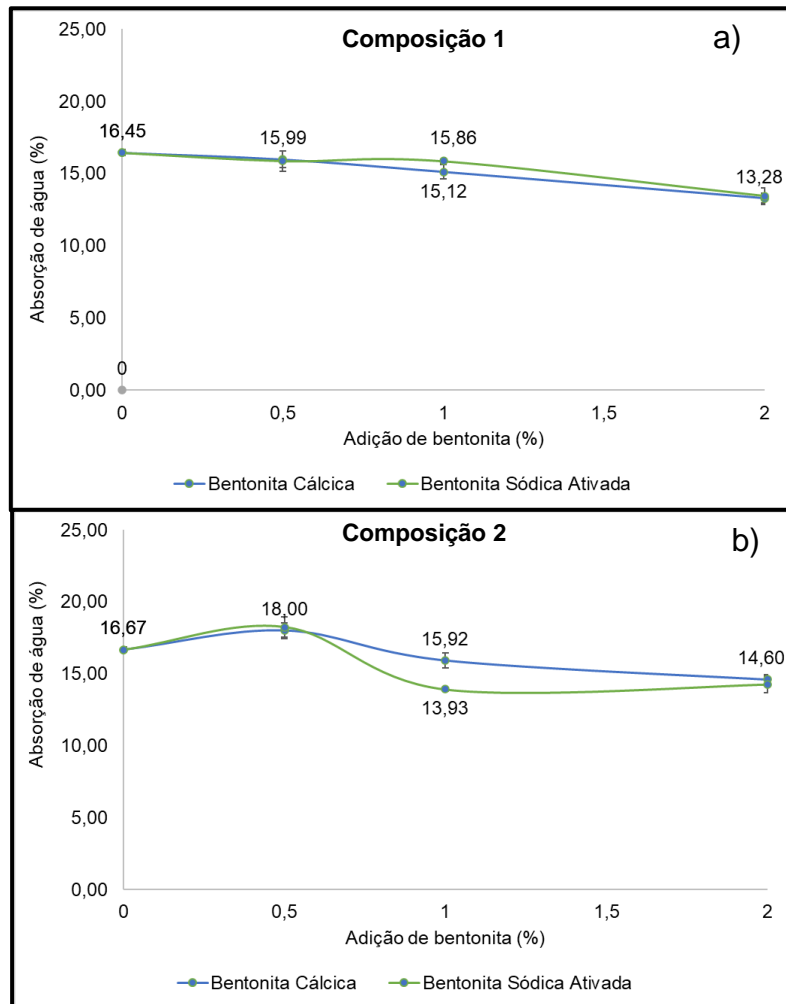


Figura 4.25: Resultado de absorção de água a) composição 1 (parte A comercial + parte B formulada e traço 3,5:1) e b) composição 2 (parte A formulada + parte B comercial e traço 3,5:1).

Quanto a resistência à compressão (Figura 4.26) das argamassas avaliadas, verificou-se que a composição 2 ainda apresentou pior desempenho (valores aproximadamente 3 vezes menores) em comparação com a composição 1. Dessa maneira, o pior desempenho mecânico das argamassas formuladas se deve a diferenças na parte sólida destas composições quando comparada com o material comercial (de referência).

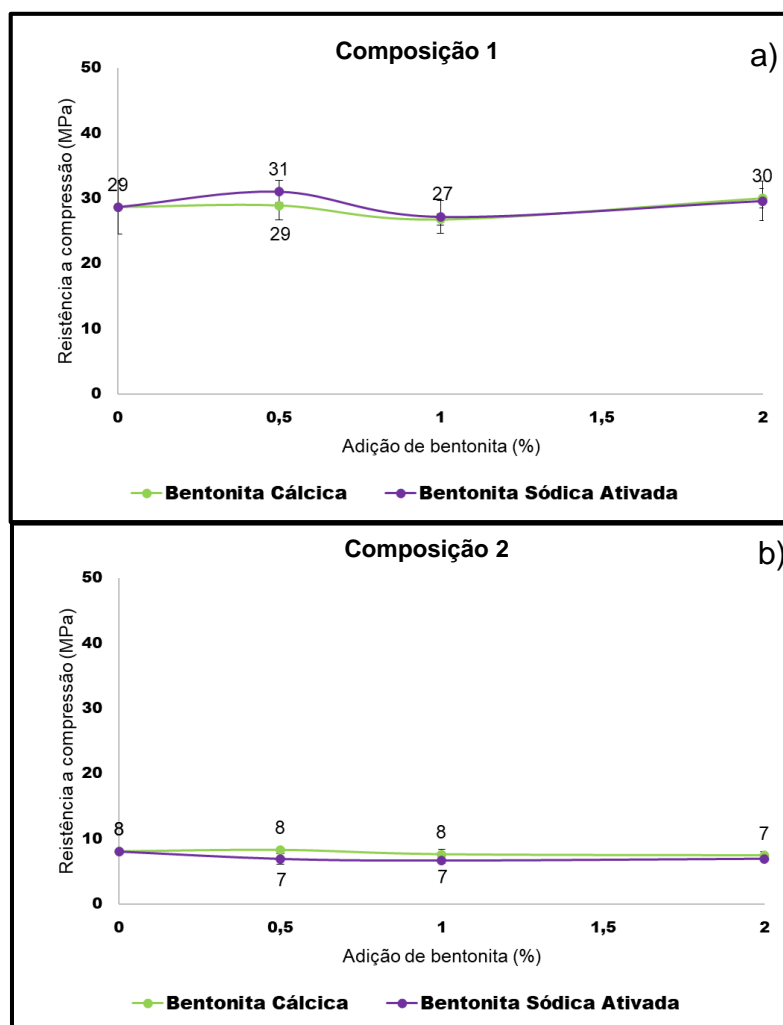


Figura 4.26: resultado de resistência a compressão a) composição 1 (parte A comercial + parte B formulada e traço 3,5:1) e b) composição 2 (parte A formulada + parte B comercial e traço 3,5:1).

Deste modo, os ensaios realizados nessa etapa mostraram uma alteração de reologia, com redução significativa de fluidez inicial, tanto da composição 1 em relação a amostra comercial, quanto da composição 2 em relação a amostra formulada, o que indica que a composição comercial possui uma maior velocidade de reação de hidratação, podendo estar associada a presença de periclásio e a reação de hidratação para a formação da brucita, ou a algum aditivo amorfo contido originalmente na mistura.

Além disso, verificamos uma tendência de redução da absorção de água com a adição de bentonita, sendo esta mais significativa para a bentonita sódica

ativada, a qual possui maior capacidade de inchamento e proporciona maior floculação da mistura.

4.4 Ensaios de estanqueidade

Em virtude dos resultados obtidos na caracterização das argamassas analisada optou-se nesta etapa por efetuar ensaios de estanqueidade apenas na composição comercial sem adição de bentonita (0%-p) ou contendo 2%-p destes aditivos (bentonita sódica ativada ou cálcica), a fim avaliar o efeito desta adição no aumento de resistência à absorção de água sob pressão.

Os dados coletados indicaram que todas as amostras ensaiadas apresentaram resistência inferior ao mínimo requerido pela ABNT NBR 11905:2015, tanto para a resistência a pressão positiva (resistir a pressão de 0,25 MPa, Tabela 4.1) quanto a pressão negativa (resistir a pressão de 0,1 MPa, Tabela 4.2).

Apesar deste desempenho, a composição contendo 2%-p de bentonita sódica apresentou uma redução de 18,6% na penetração de água no ensaio de resistência a pressão positiva a 0,25 MPa por 24h (Tabela 4.1 e Figura 4.27).

Tabela 4.1: Resumo dos resultados de resistência a pressão positiva.

| Amostra | Pressão 0,1 MPa por 48h | Pressão 0,25 MPa por 24h |
|--|--------------------------------|--|
| Sem adição de bentonita (referência) | Sem nenhuma ocorrência | Penetração de água no interior do corpo de prova média de 8,6 cm |
| Adição de 2 %-p de bentonita cálcica | Sem nenhuma ocorrência | Penetração de água no interior do corpo de prova média de 8,6 cm |
| Adição de 2%-p de bentonita sódica ativada | Sem nenhuma ocorrência | Penetração de água no interior do corpo de prova média de 7 cm |

Em geral, as argamassas contendo bentonita tiveram visualmente uma nítida melhora visual de resistência a pressão negativa (Figura 4.28). Portanto, como reportado por Yang et al. [5], a incorporação de bentonita às argamassas

tende a otimizar a resistência a penetração e percolação de água destes materiais.

Tabela 4.2: Resumo dos resultados dos ensaios de resistência a pressão negativa.

| Amostra | Pressão 0,1 MPa por 48h |
|--|---------------------------------------|
| Sem adição de bentonita (referência) | Houve percolação de água nas laterais |
| Adição de 2 %-p de bentonita cálcica | Houve percolação de água nas laterais |
| Adição de 2%-p de bentonita sódica ativada | Houve percolação de água nas laterais |

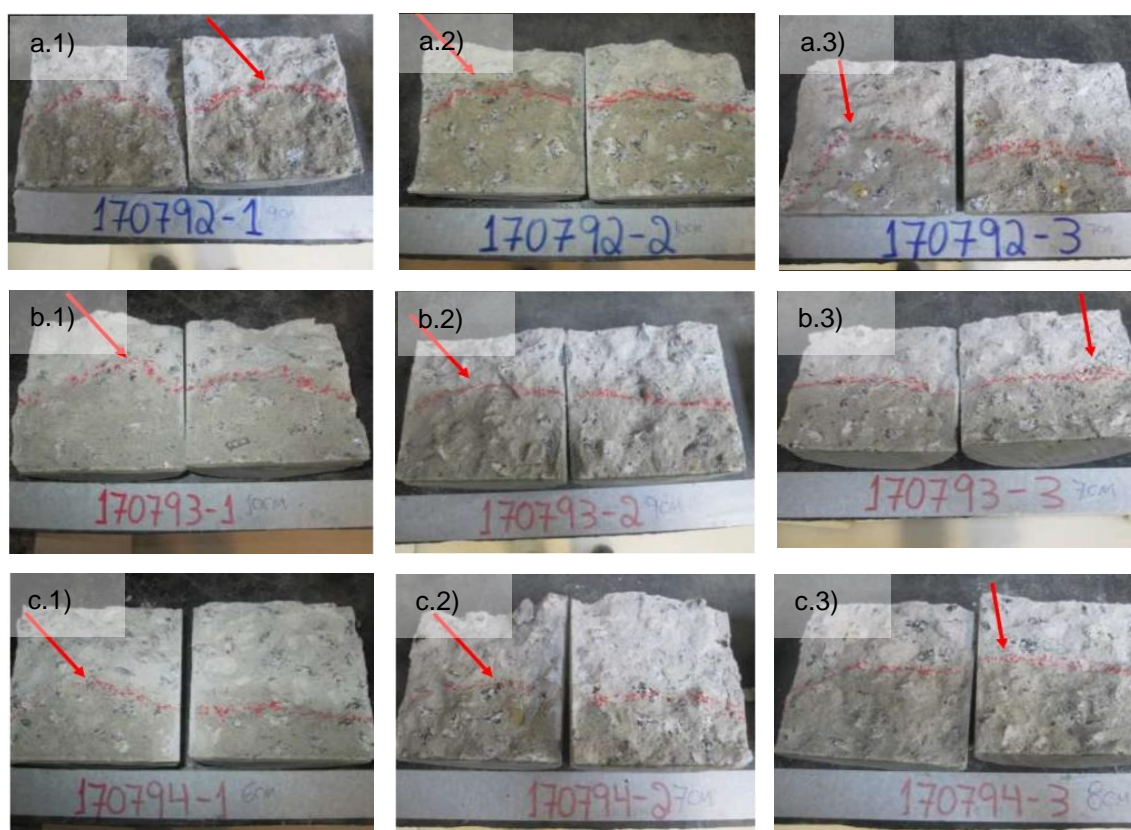


Figura 4.27 – Imagens das amostras submetidas aos ensaios de resistência a pressão positiva: a) argamassa comercial de referência, ou contendo b) 2%-p de bentonita cálcica e c) 2 %-p de bentonita sódica.

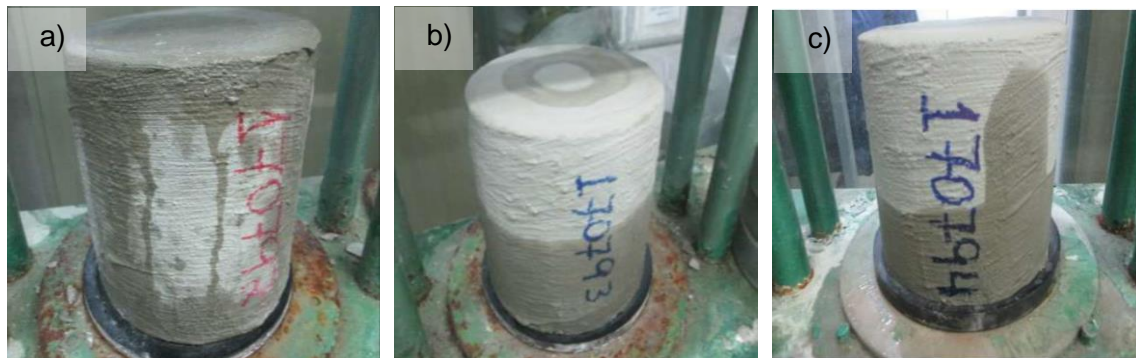


Figura 4.28 - Imagens das amostras submetidas aos ensaios de resistência a pressão negativa: a) argamassa comercial de referência, ou contendo b) 2%-p de bentonita cálcica e c) 2 %-p de bentonita sódica.

5 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a atuação de dois tipos de bentonita (uma cálcica e uma sódica ativada) quando incorporadas a argamassas poliméricas contendo cimento, visando a otimização do desempenho da resistência à umidade sob pressão negativa e positiva destes materiais. Ademais verificamos os pontos positivos e negativos da adição desse aditivo.

A partir dos resultados coletados, pode-se destacar as seguintes conclusões:

- A incorporação de bentonita às composições estudadas, promoveu redução significativa de fluidez, o que impossibilitou a adição de dosagens mais significativas desse aditivo.
- A adição de bentonita promoveu alterações na reologia das argamassas frescas (comercial e formuladas com traço 3,5 (parte sólida):1(parte líquida)) devido a ação flocculante deste aditivo, o que limitou a incorporação das bentonitas para até 2%-p para viabilizar a possível aplicação destas formulações. A incorporação de até 6%-p de bentonita a argamassas com traço 3 (parte sólida):1(parte líquida) foi estudada, sendo verificado uma intensa redução da fluidez destas misturas. Porém, como ponto positivo, identificou-se a redução de 35% da absorção de água destas amostras em relação a composição comercial.
- A bentonita sódica ativada ocasionou maior flocculação dos sistemas analisados quando comparada com a equivalente cálcica. Isso pode estar relacionado com o reduzido tamanho de partículas (bentonita sódica ativada $d_{50} = 1,06$ e bentonita cálcica $d_{50} = 11,2 \mu\text{m}$) e maior capacidade de inchamento (bentonita sódica ativada = 25ml/2g e bentonita cálcica = 8 ml/2g) desta primeira, e, portanto, sua maior reatividade;
- Foram identificadas diferenças na composição química das composições sólidas da argamassa comercial e formuladas. O material comercial apresentou quartzo, hatrurite (Ca_3SiO_5), mervinita ($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)$) e periclásio (MgO) como fases cristalinas iniciais,

enquanto as formuladas continham principalmente quartzo e silicato de cálcio (Ca_2SiO_4) e hatrurite. Possivelmente o tipo de cimento (ligante) utilizado nas argamassas também eram distintos, ocasionando diferenças nas fases hidratadas resultantes nas amostras após 28 dias de cura. Notou-se a formação de fases do tipo trissulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita), silicato de cálcio hidratado e hidróxido de cálcio na microestrutura das argamassas, o que pode ser comprovado nos ensaios de DRX e MEV;

- As argamassas preparadas com traços 3,5:1 e 3:1 apresentaram elevado número de defeitos (poros e vazios) em suas microestruturas após cura. Tal característica contribuiu para a obtenção de menores valores de resistência à compressão para tais composições quando comparado a argamassa comercial;
- Embora três tipos de formulações tenham sido inicialmente preparadas e caracterizadas (comercial = referência e duas outras elaboradas = traço 3,5:1 e 3:1), apenas amostras da composição de referência contendo 0 ou 2%-p de bentonita cálcica ou sódica ativada foram submetidas a avaliação de resistência a absorção de água sobre pressão. A incorporação da bentonita sódica ativada a argamassa promoveu a redução de 18,6 % da penetração de água sob pressão positiva, porém os requisitos da norma ABNT NBR 11905:2015 não foram atingidos;
- Para que seja viável a adição de maiores quantidades de bentonita a estes materiais monolíticos, faz-se necessário ajustar as formulações da argamassa preparada. Outras estratégias, como o uso de antiespumante (para reduzir a quantidade de ar incorporado e minimizar o número e tamanho dos poros contidos na microestrutura), defloculante (para controlar a floculação e induzir o aumento da fluidez e trabalhabilidade das misturas) e espessante celulósico para melhor controle da reologia e processamento destes materiais também podem ser necessárias.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para continuidade do estudo do tema proposto, sugere-se:

- Avaliar a adição de antiespumante às composições de argamassa, visando controlar e minimizar a porosidade da matriz após 28 dias de cura;
- Analisar a influência do tipo de cimento contido na parte sólida da formulação da argamassa, a fim de identificar qual ligante pode promover ganhos mais significativos para a resistência mecânica deste tipo de argamassa;
- Investigação do uso de defloculantes e espessantes para controlar a reologia e permitir a incorporação de maiores quantidades de bentonita às argamassas estudadas;
- Analisar e controlar a distribuição de tamanho de partículas da fração sólida das argamassas, a fim de otimizar o empacotamento e promover melhorias para a resistência a compressão das peças das argamassas processadas;
- Investigar a influência da adição de polímero na propriedade de inchamento das bentonitas.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MONLEVADE, J. **Análise de Patologias decorrentes de infiltrações nas edificações**. Bacharelado. Faculdade Doctum de João Monlevade. p.18-32. João Monlevade, 2019.
- [2] JANTSCH, A. C. A. **Análise do desempenho de argamassas estabilizadas submetidas a tratamento superficial com aditivos cristalizantes**. Dissertação (Mestrado)-Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, p.47. Santa Maria, 2015.
- [3] SILVA, A. A. **Contribuição ao estudo das bentonitas do município de Boa Vista Estado da Paraíba**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. p 87-90 São Paulo, 2011.
- [4] REDKO, B. V.P. Bentonitas o que elas são e como podem ser usadas pelas indústrias de celulose e de papel. **REDKO CONSULTORES ASSOCIADOS C LTDA**. P.1-13 São Paulo, [s.l: s.n.].
- [5] YANG, H. et al. Effects of bentonite on pore structure and permeability of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 276–283, China, 2019.
- [6] LIU, M. et al. Influence of various bentonites on the mechanical properties and impermeability of cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 241. P. 1-11. China, 2020.
- [7] AMORIM, L. V. et al. Estudo comparativo entre variedades de argilas bentoníticas de Boa Vista, Paraíba. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 11, p. 30-40, 2006.
- [8] NETO, É. T.; NETO, Â. A. T. Modificação química de argilas: desafios científicos e tecnológicos para obtenção de novos produtos com maior valor agregado. **Química Nova**, V.32 n°3, p. 809-817, Santo André, 2009.
- [9] BRASILEIRO, C. T. **Otimização da ativação com carbonato de lítio (Li₂CO₃) através de diferentes métodos na reologia da argila verde lodo**

purificada para fluidos de perfuração base água e base óleo. Mestrado—João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, p. 20-24. João Pessoa, 2018.

[10] FERREIRA, H. **Otimização do processo de organofilização de bentonitas visando seu uso em fluidos de perfuração não aquosos.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande, p. 5-11. Campina Grande, 2009.

[11] ROSSETTO, T. S. **Caracterização de areias descartadas de fundição com diferentes teores de bentonita.** Bacharelado—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, p. 28-29. Santa Catarina, 2010.

[12] BAHRANOWSKI, K.; KLIMEK, A.; GAWEŁ, A.; SERWICKA, E.M. Rehydration Driven Na-Activation of Bentonite—Evolution of the Clay Structure and Composition. **Materials** 2021. V.14. p. 1-13. Polônia. 2021.

[13] EVANGELINE, Y. S.; VINOD, S.; MANJU, A. K. Permeability variation of sodium activated bentonites. **Indian Geotechnical Conference.** p. 43-46. Índia. 2009.

[14] KAUFHOLD, S. et al. Comparison of methods for distinguishing sodium carbonate activated from natural sodium bentonites. **Applied clay science,** v. 86, p. 23-37. Alemanha. 2013.

[15] LEBEDENKO, F; PLÉE, D. Some considerations on the ageing of Na₂CO₃-activated bentonites. **Applied Clay Science,** v. 3, n. 1, p. 1-10. França. 1988.

[16] SHIROMA, P. H. **Estudo do comportamento reológico de suspensões aquosas de bentonita e CMC: influência da concentração do NaCl.** 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

[17] NGUYEN, L. C.; CHU, H. L.; HO, L. S. Soil treatment by bentonite and fly ash for liners of waste landfill: A case study in Vietnam. **GEOMATE Journal,** v. 17, n. 63, p. 315-322. Vietnam, 2019.

- [18] SEIPHOORI, A. et al. Water retention and swelling behaviour of granular bentonites for application in Geosynthetic Clay Liner (GCL) systems. **Soils and Foundations**, v. 56, n. 3, p. 449-459, 2016.
- [19] EL-NAHHAS, F. M. Tunnelling and supported deep excavations in the Greater Cairo. In: Keynote Paper at the Int. Symposium on Utilization of Underground Space in Urban Areas. **International Tunnelling Association & Egyptian Tunnelling Society**, Sharm El-Sheikh, p. 27-56. Egito. 2006.
- [20] TODARO.C; SALTARIN. S; CARDU. M. Bentonite in two-component grout applications. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, p. 1-12. Itália, 2022.
- [21] MESBOUA. N; BENYOUNES. K; BENMOUNAH. A. Study of the impact of bentonite on the physico-mechanical and flow properties of cement grout. **Cogent engineering**, v. 5, n. 1, p. 1-12, Argélia, 2018.
- [22] MACHADO, M.C. **Resíduos de construção e demolição como substrato para plantas: avaliação química e ambiental**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- [23] SOUZA, T. M. et al. Hidratação da magnésia e seu efeito ligante em concretos refratários sem cimento. **Cerâmica**, v. 59, p. 206-215, 2013.
- [24] QUARCIONI, V.A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland-estudo em pasta**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. p 5-14. São Paulo.2008
- [25] LEMOS, R.G. **Estudo do comportamento hidráulico, mecânico e químico de barreiras hidráulicas verticais, compostas por solo residual, bentonita e cimento sob ação de substâncias agressivas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese de doutorado. p 74-97. Porto Alegre.2006.
- [26] COSTA, C. et al. Estudo de argamassas de base cimentícia por microscopia electrónica de varrimento. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 21, n. 3/4, p. 31-35, 2009.

- [27] RAMALHO, R. V. A. **Análise de propriedades mecânicas de pastas de cimento aditivadas com Óxido de Magnésio e Látex SBR**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Tese de doutorado. Natal. 2022.
- [28] BUTZKE, V. I. **Estudos comparativos entre argamassa impermeabilizante e manta asfáltica para impermeabilização**. Bacharelado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 15-26. Porto Alegre, 2020.
- [29] RODRIGUES, R.; JÚNIOR, A.; LIMA, E. Erros, diagnósticos e soluções de impermeabilização na construção civil. **Inter Scientia**, v. 4 n°2. P 19-32. João Pessoa, 2016.
- [30] MAGALHÃES, R. et al. Estudo de caso se patologias causadas pela umidade face a inexistência de implantação do sistema de impermeabilização nas garagens 1° e 2° subsolo de um edifício residencial multifamiliar de múltiplos pavimentos em Belém/PA. **RCT - Revista de ciência e tecnologia**, p. 1-18. Belém, 2019.
- [31] TINTAS & PINTURA. Umidade por condensação – **Causas e Soluções**. Disponível em: <<https://tintasepintura.pt/humidade-por-condensacao-causas-e-solucoes/>>. Acesso em: 6 Mar 2022.
- [32] VEDACIT. Impermeabilização de estruturas. 6. ed. p.15 **Vedacit**, 2010.
- [33] SREWIL, Y. Cracks of concrete and repair works & case study. **Module G-4 Dresden seminar “rehabilitation Engineering”**. p.1-12. Alemanha, 2006. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/298178705>>.
- [34] GAVA, G. P.; GASQUES, E. G. F. Avaliação da influência de aditivos hidrofugantes/impermeabilizantes nas propriedades das argamassas. **Revista Técnico-científica**, p 1- 9. Paraná, 2016.
- [35] SCHULZE, J.; KILLERMANN, O. Long-term performance of redispersible powders in mortars. **Cement and concrete research** v.31, p. 357-362. Alemanha, 2000.

[36] GOMES, C. E. M. et al. Mechanical and microstructural properties of redispersible polymer-gypsum composites. **Materials Research**, v. 22, n. 3. p. 1-9. Campinas, 2019.

[37] COMISSÃO DE ESTUDOS DE MATÉRIAS PRIMAS (CEMP). **CEMP 058-Bentonita para fundição – determinação do inchamento**. São Paulo, 2015. 2p. disponível em <<https://www.abifa.org.br/cemp/content/normas/058.pdf>> Acesso em: 17 Abr 2022.

[38] CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 10. ed. LTC. p.71-76. Rio de Janeiro, 2021.

[39] CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, Victor Carlos. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, p. 18-32, 2009.

[40] VIEIRA.G. et al. Avaliação da resistência à compressão, resistência à tração e formação de microfissuras em concretos produzidos com diferentes tipos de cimentos, quando aplicado um pré-carregamento de compressão. **Ambiente Construído**, v. 11, p. 25-40, 2011.

[41] VOLZONE, C.; GARRIDO, L. B. The effect of some physico-chemical and mineralogical properties on the Na_2CO_3 activation of Argentine bentonites. **Applied clay science**, v. 6, n. 2, p. 143-154. Argentina. 1991.

[42] VOLZONE, C ; GARRIDO, L. Changes in suspension properties of structural modified montmorillonites. **Cerâmica**, v. 47, p. 4-8. Argentina. 2001.

[43] YILDIZ, N.; SARIKAYA, Y.; ÇALIMLI, AJACS. The effect of the electrolyte concentration and pH on the rheological properties of the original and the Na_2CO_3 -activated Kütahya bentonite. **Applied Clay Science**, v. 14, n. 5-6, p. 319-327. Peru. 1999.

[44] KARAGÜZEL, C. et al. Activation of (Na, Ca) -bentonites with soda and MgO and their utilization as drilling mud. **Applied Clay Science**, v. 48, n. 3, p. 398-404, Peru. 2010.

- [45] BOUSSEN, S. et al. The rheological, mineralogical and chemical characteristic of the original and the Na₂CO₃-activated Tunisian swelling clay (Aleg Formation) and their utilization as drilling mud. **Applied Clay Science**, v. 118, p. 344-353, 2015.
- [46] MAGZOUB, M. I. et al. Effects of sodium carbonate addition, heat and agitation on swelling and rheological behavior of Ca-bentonite colloidal dispersions. **Applied Clay Science**, v. 147, p. 176-183, Catar. 2017.
- [47] MAHMOUD, M. et al. Upgrading Calcium Bentonite to Sodium Bentonite Using Seawater and Soda Ash. **Energy & Fuels**, v. 33, n. 11, p. 10888-10894, Catar. 2019.
- [48] SHAH, L.A et al. Preparation and characterization of purified Na-activated bentonite from Karak (Pakistan) for pharmaceutical use. **Clay Minerals**, v. 48, n. 4, p. 595-603, Paquistão. 2013.
- [49] GOUGEON, R. D. et al. Analysis of two bentonites of enological interest before and after commercial activation by solid Na₂CO₃. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 51, n. 14, p. 4096-4100, França. 2003.
- [50] MOSBAHI, M. et al. Basic activation of lower Eocene clay from Meknassy-Mezzouna basin (centerwestern Tunisia), synthesis of zeolite and clarification of soybean oils. **Applied Clay Science**, v. 138, p. 1-11. Tunísia. 2017.
- [51] YOUSSEF .E.O, et al. Enhancing clay adsorption properties: A comparison between chemical and combined chemical/thermal treatments. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 12, p. 100544, França. 2021.

ANEXOS

ANEXO A – Processos de ativação de bentonita e melhora de propriedades [12]

| Processo de Ativação | Proposta | Referência |
|--|---|-------------------|
| Mistura de bentonita, água (24 e 34% em massa) e carbonato de sódio (1,5,2,2 e 3,5 % sobre massa de bentonita) | Estudo de melhora na estabilidade da bentonita e melhora de propriedades reológicas. | [15] |
| Adição de solução saturada de carbonato de sódio (100mer/100g bentonita), repouso por 24h seguida de diluição 6% para estudo de propriedades reológicas. | Melhora de propriedades reológicas de bentonitas argentinas com a adição de carbonato de sódio para aplicação em fluido de perfuração | [41,42] |
| Adição de carbonato de sódio em várias dosagens (1-15g/100g de bentonita), dispesão dos componentes em 800 ml de água, seguido de processo de separação e secagem. | Melhora de propriedades reológicas | [43] |
| Bentonita hidratada com 40% de água, adição de carbonato de sódio a seco com a aplicação de cisalhamento, tempo de cura 1 mês. Também foram realizados estudos de adição de MgO | Melhora de propriedades reológicas | [44] |
| Adição de carbonato de sódio (0,2,3,5 e 10% sobre a massa de bentonita) sobre a bentonita, é promovido processo de cisalhamento e tempo de cura 1 mês. | Melhora de propriedades reológicas | [45] |
| Adição de carbonato de sódio (2,4,12% sobre a massa de bentonita), processo de ativação com a argila em suspensão com ou sem aquecimento (70°C) e tempo de cura de 24h. | Melhora de propriedades reológicas | [46] |
| Ativação de 22,5 g de bentonita em 300 ml de água do mar, alcalinização com NaOH até pH 9, adição de Carbonato de sódio (0,5 , 1 e 1,5g), seguidos de processos de filtração e secagem. | Melhora de propriedades reológicas | [47] |
| Mistura de 100 g de bentonita, carbonato de sódio (2,3,5,8% sobre a massa de bentonita) e 1000 ml de água quente por 1 h seguido por processos de resfriamento, purificação, centrifugação e secagem | Aplicação farmacêutica | [48] |
| Adição de 3% de carbonato de cálcio a lama de bentonita á 80°C | Estudo de sorção de proteínas (aplicação em vinificação) | [49] |

ANEXO A – Continuação

| | | |
|---|---|------|
| Mistura de 5g de argila, carbonato de sódio (2,3,5,10% sobre a massa de bentonita) em 150 ml de água, com tempos de ativação 1,2 e 4h e seguido de secagem a 60°C. | Estudo de propriedades adsorventes para aplicação em clarificação de óleo | [50] |
| Adição de carbonado de sódio(4g/100g bentonita) em 500 ml de água quente por 1h, seguido de processos de resfriamento, sedimentação, filtragem, lavagem, secagem a 105°C e calcinação a 450°C por 24h. | Estudo de propriedades adsorventes a para tratamento de efluentes | [51] |

ANEXO B – Aplicações de bentonitas fonte [1].

| Segmento Industrial | Aplicação |
|----------------------------|--|
| Industria de fundição | Ligante de areia para fundição de aço e ferrosos |
| Minério de ferro | Ligante para pelletização de minério de ferro |
| Petróleo | Fluidos de perfuração on-shore |
| | Fluidos de perfuração off-shore |
| | Fluidos para perfuração direcional |
| | Agente catalítico de craqueamento |
| Construção civil | Perfuração de poços artesianos |
| | Impermeabilização de solos |
| | Impermeabilização de barragens, canais e túneis para metrô |
| | Concreto e argamassa |
| | Isolantes de lagoas e açudes |
| | Fundações, estaqueamento e paredes de diafragma |
| | Aterramento elétrico |
| Bebidas e Alimentos | Clarificação de vinhos |
| | Clarificação de sucos |
| | Clarificação de cervejas |
| | Clarificação de caldo de cana-de-açúcar |
| | Agente filtrante de óleos, sucos e vinhos |
| | Complemento alimentar |
| | Agente desproteinizante |
| Refino e óleos | Clarificação de óleos vegetais |
| | Clarificação de óleos minerais |
| | Clarificação de óleos de origem animal |
| | Clarificação de óleos de gorduras e sebos |
| | Reciclagem de óleos usados em motores à explosão |

ANEXO B – Continuação

| Segmento Industrial | Aplicação |
|----------------------------|---|
| Sabão | Carga para sabão |
| | Fabricação de produtos de limpeza |
| Tintas | Tinta a base água |
| | Tinta a base óleo |
| | anti-sedimentante para tintas |
| | espessador de adesivos, esmaltes e vernizes |
| Borracha e Plásticos | Cargas tecnológicas |
| | Cargas reforçantes |
| | Cargas tecnológica e inertes |
| | nanocompósitos |
| Cosmética | Mascaras |
| | Shampoo |
| | Sabonetes |
| | Condicionadores |
| | Batons |
| | Hidratantes |
| | Crems |
| | Esfoliantes |
| | Maquiagens |
| | Ação antidernatosa |
| Papel | Cargas para papel |
| | papelão |
| | descoloração de papel reciclado |
| Farmacêutica | Carta ativa e inerte |
| | comprimidos |
| | bactericidas |
| | bacteriostática |
| | cicatrizante |
| | Massa para eletrodos em eletroencefalograma |