

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE**  
**MATERIAIS - PPGCEM**

**LEONARDO FONTANELA**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA NOS ESTADOS FRESCO**  
**E ENDURECIDO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO**

**CRICIÚMA**

**2022**

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE**  
**MATERIAIS - PPGCEM**

**LEONARDO FONTANELA**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA NOS ESTADOS FRESCO**  
**E ENDURECIDO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO**

Dissertação de Mestrado - DM, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade do Extremo Sul Catarinense UNESC para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin

**CRICIÚMA**

**2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

F679a Fontanela, Leonardo.

Avaliação das propriedades da argamassa nos estados fresco e endurecido com adição de fibras de polipropileno / Leonardo Fontanela. - 2022.  
159 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2022.

Orientação: Adriano Michael Bernardin.

Coorientação: Elaine Guglielmi Pavei Antunes.

1. Argamassa. 2. Argamassa - Propriedades termomecânicas. 3. Argamassa reforçada com fibras. 4. Fibras de polipropileno. I. Título.

CDD. 22. ed. 620.135

Leonardo Fontanela

Avaliação das Propriedades da Argamassa nos Estados Fresco e Endurecido com Adição de Fibras de Polipropileno.

Esta Dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre(a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 31 de março de 2022.

**Banca Examinadora:**



**Prof. Dr. Eduardo Junca**

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



**Prof. Dr. Michael Peterson**

Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC



**Profª Drª Glauce Warmeling Duarte**

Centro Universitário Barriga Verde – UNIBAVE

Aos incentivadores da minha carreira acadêmica: meus pais e minha esposa.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pela concessão de auxílio para custeio de taxa escolar proveniente do Programa de Suporte à Pós-Graduação de Instituições Comunitárias de Educação Superior, PROSUC.

Ao professor orientador Dr. Adriano Michael Bernardin pela oportunidade, condução e conhecimentos repassados durante esta pesquisa.

À professora coorientadora Dr<sup>a</sup>. Elaine Guglielmi Pavei Antunes pelas experiências e sugestões nesta pesquisa, bem como orientação no estágio obrigatório de docência.

Aos professores deste Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, PPGCEM, pelos ensinamentos durante o decorrer da pesquisa.

À empresa Votorantim Cimentos S/A e seus gestores da regional Sul pelo apoio e incentivo na participação deste programa de Pós-Graduação e no desenvolvimento da pesquisa.

À empresa Maccaferri do Brasil Ltda pela disponibilização de informações de seus produtos.

Aos laboratoristas do IDT i.parque pelo apoio nos ensaios laboratoriais.

Aos colegas de classe da pós-graduação.

Aos membros da Banca Avaliadora.

Agradecimentos em especial à minha esposa e aos meus pais, pelo incentivo e compressão ao longo deste período de dedicação.

E, sobretudo a DEUS pela existência desta jornada e deste momento ímpar em minha vida.

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

Leonardo da Vinci



## RESUMO

A construção civil é um setor da economia que historicamente utiliza na execução das edificações seus principais insumos sem grandes transformações há mais de um século. Porém, nas últimas décadas os estudos e a ciência aplicada pela engenharia para o aperfeiçoamento do desempenho destes materiais básicos tem sido uma constante no segmento. A argamassa de revestimento cimentícia é um dos principais objetos de pesquisas seja para melhoria de performance ou para mitigação de patologias derivadas da retração excessiva do cimento e fissuração. Diversas pesquisas estudam os efeitos da incorporação de fibras sintéticas durante o preparo da argamassa com este intuito, principalmente a de polipropileno (PP). Utilizando a metodologia de análise de variância (ANOVA), esta pesquisa busca avaliar o comportamento da pasta de cimento com adição desta fibra, e obter uma formulação adequada para aplicação em uma argamassa de revestimento. A fibra de polipropileno foi avaliada em quantidade variando de 0% a 0,4% sobre o peso do cimento, validando em matrizes de cimento Portland CP IV e CP V bem como variando a relação água / cimento até 0,5. A pesquisa ocorreu em duas etapas, sendo a primeira avaliando a pasta de cimento e a segunda a argamassa. Na etapa inicial, com a caracterização pelos ensaios nos estados fresco e endurecido da pasta obteve-se a formulação A6 (utilizando cimento CP V, teor de fibra 0,4% e relação A/C 0,3), definida de Pasta Ótima (P.O) na pesquisa, como a que reuniu características mais viáveis para aplicação dos testes em argamassa. Desta forma, a segunda etapa da pesquisa foi a incorporação do agregado miúdo à Pasta Ótima. Obtendo então uma argamassa, simulou-se a variação da quantidade deste agregado (traço 1:1, 1:3 e 1:5) e da sua granulometria (fina, média e grossa) para medir e avaliar as propriedades frente aos mesmos ensaios aplicados nas pastas. A aplicação da análise de variância (ANOVA) nos resultados possibilitou avaliar a tendência de variação produzida pelos fatores. Nas pastas, destaca-se a relação A/C como o principal fator para variação nos resultados, já a fibra de polipropileno no teor de 0,4% não obteve interferências significativas. Nas argamassas, a variação da granulometria não alterou significativamente as propriedades de resistências, enquanto que a variação do traço trouxe alterações nas propriedades da argamassa. O teor de 0,4% de fibra de polipropileno não provocou alterações nas propriedades medidas.

**Palavras-chave:** Fibra de polipropileno. Reforço. Pasta de cimento. Argamassa de revestimento.

## ABSTRACT

The civil construction is a segment of the economy that historically uses its main inputs in the execution of buildings without major transformations for more than a century. However, in recent decades, research and science applied by engineering to improve the performance of these basic materials has been a constant in the segment. The cementitious coating mortar is one of the main objects of research, whether to improve performance or for the mitigation of pathologies derived from excessive cement shrinkage and cracking. Several researches study the effects of the incorporation of synthetic fibers during the preparation of the mortar for this purpose, mainly that of polypropylene (PP). Using the analysis of variance (ANOVA) methodology, this research aims to evaluate the behavior of cement paste with the addition of this fiber, and to obtain a suitable formulation for application in a coating mortar. The polypropylene fiber was evaluated in quantities ranging from 0% to 0,4% on the weight of the cement, validating in CP IV and CP V Portland cement matrices as well as varying the water / cement ratio up to 0,5. The research was in two stages, the first evaluating the cement paste and the second the mortar. In the initial stage, with the characterization by tests in the fresh and hardened states the A6 formulation was obtained (using CP V cement, fiber content 0,4% and W/C ratio 0,3), defined as Optimal Paste (P.O.) in the research, as the one that brought together the most viable characteristics for the application of tests in mortar. In this way, the second stage of the research was the incorporation of the fine aggregate to the Optimal Paste. Obtaining a mortar, the variation of the amount of this aggregate (trace 1:1, 1:3 and 1:5) and its granulometry (fine, medium and coarse) were simulated to measure and evaluate the properties against them tests applied to the pastes. The application of analysis of variance (ANOVA) on the results made it possible to evaluate the trend of variation produced by the factors. In the pastes, the W/C ratio stands out as the main factor for the variation in the results, whereas the polypropylene fiber in the content of 0.4% did not have major interferences. In the mortars, the variation of granulometry did not significantly alter the properties of resistance, while the variation of the trace brought changes in the properties of the mortar. The 0.4% polypropylene fiber content did not cause changes in the measured properties.

**Keywords:** Polypropylene fiber. Reinforcement. Cement paste. Coating mortar.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 01 – Fluxograma esquemático do processo de fabricação via seca do cimento Portland.....   | 30 |
| Figura 02 – Desenho esquemático do conjunto de equipamentos que compõem a produção e resfriamento do clínquer.....   | 33 |
| Figura 03 – Evolução média da resistência à compressão dos diferentes tipos de cimento Portland.   | 35 |
| Figura 04 – Classificação das fibras artificiais segundo BISFA.....  | 39 |
| Figura 05 – Exemplos de fibras de polipropileno.....   | 40 |
| Figura 06 – Desenho esquemático do efeito ‘parede’.....  | 47 |
| Figura 07 – Desenho esquemático da formação dos produtos de hidratação na zona de transição interfacial entre a pasta de cimento e os agregados em concreto..... | 48 |
| Figura 08 – Microscopia eletrônica (MEV) de amostras da fibra de polipropileno.....  | 53 |
| Figura 09 – Fluxograma da metodologia utilizada.....   | 58 |
| Figura 10 – Dosagem dos componentes das formulações.....   | 60 |
| Figura 11 – Homogeneização das misturas em argamassadeira.....   | 61 |
| Figura 12 – Determinação do índice de consistência em mesa de adensamento.....   | 62 |
| Figura 13 – Determinação da densidade de massa.....  | 63 |
| Figura 14 – Corpos de prova para ensaios de resistência:.....  | 65 |
| Figura 15 – Ensaio de resistência à tração na flexão de 3 pontos.....  | 66 |
| Figura 16 – Ensaio de resistência à compressão axial.....  | 67 |
| Figura 17 – Obtenção dos corpos de prova para aferição da variação dimensional.....  | 68 |
| Figura 18 – Equipamento com relógio comparador e barra metálica padrão de calibração.....  | 69 |
| Figura 19 – Exemplo medição variação dimensional corpo de prova CP1 da formulação B2a.....   | 72 |
| Figura 20 – Diagrama de Pareto para índice de consistência das pastas.....   | 75 |
| Figura 21 – Média do índice de consistência das pastas em função da relação água / cimento.....  | 76 |
| Figura 22 – Diagrama de Pareto para densidade de massa das pastas.....   | 79 |
| Figura 23 – Média da densidade das pastas em função da relação água / cimento.....   | 80 |
| Figura 24 – Média da densidade das pastas em função do tipo de cimento.....  | 80 |
| Figura 25 – Diagrama de Pareto para o teor de ar incorporado das pastas.....   | 82 |
| Figura 26 – Média do teor de ar incorporado das pastas em função da relação água / cimento.....  | 83 |
| Figura 27 – Diagrama de Pareto para resistência à tração na flexão das pastas.....   | 86 |
| Figura 28 – Média da resistência à tração na flexão das pastas em função da relação água / cimento.....  | 87 |
| Figura 29 – Superfície de resposta entre tipo de cimento e relação água / cimento na resistência à flexão das pastas.....  | 87 |
| Figura 30 – Superfície de resposta entre tipo de cimento e % de fibra na resistência à flexão das pastas.....  | 88 |
| Figura 31 – Corpo de prova após rompimento enfatizando a presença das fibras.....  | 89 |
| Figura 32 – Diagrama de Pareto para resistência à compressão das pastas.....   | 92 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 33 – Média da resistência à compressão axial das pastas em função da relação água / cimento .....                              | 93  |
| Figura 34 – Média da variação dimensional das pastas .....  | 94  |
| Figura 35 – Diagrama de Pareto aos 3 dias para variação dimensional das pastas.....   | 96  |
| Figura 36 – Média da variação dimensional aos 3 dias das pastas em função do tipo de cimento .....                                    | 97  |
| Figura 37 – Diagrama de Pareto aos 7 dias para variação dimensional das pastas.....   | 99  |
| Figura 38 – Superfície de resposta aos 7 dias entre tipo de cimento e relação água / cimento na variação dimensional das pastas ..... | 99  |
| Figura 39 – Diagrama de Pareto aos 28 dias para variação dimensional das pastas.....  | 101 |
| Figura 40 – Média da variação de massa das pastas.....  | 103 |
| Figura 41 – Diagrama de Pareto aos 3 dias para variação de massa das pastas .....   | 104 |
| Figura 42 – Média da variação de massa aos 3 dias das pastas em função da relação água / cimento .....                                | 105 |
| Figura 43 – Média da variação de massa aos 3 dias das pastas em função do tipo de cimento .....                                       | 105 |
| Figura 44 – Diagrama de Pareto aos 7 dias para variação de massa das pastas .....   | 107 |
| Figura 45 – Superfície de resposta aos 7 dias entre tipo de cimento e teor de fibra na variação de massa das pastas .....             | 108 |
| Figura 46 – Superfície de resposta aos 7 dias entre relação água / cimento e teor de fibra na variação de massa das pastas .....      | 108 |
| Figura 47 – Diagrama de Pareto aos 28 dias para variação de massa das pastas .....  | 110 |
| Figura 48 – Superfície de resposta aos 28 dias entre tipo de cimento e teor de fibra na variação de massa das pastas .....            | 111 |
| Figura 49 – Superfície de resposta aos 28 dias entre relação água / cimento e teor de fibra na variação de massa das pastas .....     | 111 |
| Figura 50 – Microscopia eletrônica (MEV) de amostras da formulação A6.....  | 113 |
| Figura 51 – Índice de consistência das argamassas na etapa de pré-testes .....  | 114 |
| Figura 52 – Diagrama de Pareto para índice de consistência das argamassas .....   | 116 |
| Figura 53 – Superfície de resposta entre o traço e granulometria para índice de consistência das argamassas .....                     | 117 |
| Figura 54 – Diagrama de Pareto para densidade de massa das argamassas.....  | 119 |
| Figura 55 – Diagrama de Pareto para o teor de ar incorporado das argamassas .....   | 121 |
| Figura 56 – Diagrama de Pareto para resistência à tração na flexão das argamassas .....   | 122 |
| Figura 57 – Valores médios para resistência à tração na flexão com a variação do traço das argamassas .....                           | 123 |
| Figura 58 – Diagrama de Pareto para resistência à compressão das argamassas .....   | 125 |
| Figura 59 – Valores médios para resistência à compressão com a variação do traço das argamassas .....                                 | 126 |
| Figura 60 – Média da variação dimensional das argamassas .....  | 127 |
| Figura 61 – Diagrama de Pareto aos 7 dias para a variação dimensional das argamassas .....  | 129 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 62 – Valores médios para a variação dimensional em função do traço das argamassas aos 7 dias .....                        | 130 |
| Figura 63 – Valores médios para a variação dimensional em função da granulometria das argamassas aos 7 dias .....                | 131 |
| Figura 64 – Diagrama de Pareto aos 28 dias para a variação dimensional das argamassas .....                                      | 133 |
| Figura 65 – Valores médios para a variação dimensional em função do traço das argamassas aos 28 dias .....                       | 134 |
| Figura 66 – Média da variação de massa das argamassas .....  | 135 |
| Figura 67 – Diagrama de Pareto aos 3 dias para a variação de massa das argamassas .....  | 136 |
| Figura 68 – Superfície de resposta para a perda de massa em função da interação entre o traço e a granulometria aos 3 dias ..... | 137 |
| Figura 69 – Diagrama de Pareto aos 7 dias para a variação de massa das argamassas .....  | 138 |
| Figura 70 – Valores médios para a variação de massa em função do traço das argamassas aos 7 dias .....                           | 139 |
| Figura 71 – Diagrama de Pareto aos 28 dias para a variação de massa das argamassas .....   | 141 |
| Figura 72 – Valores médios para a variação de massa em função do traço das argamassas aos 28 dias .....                          | 142 |
| Figura 73 – Valores médios para a variação de massa em função da granulometria das argamassas aos 28 dias .....                  | 142 |
| Figura 74 – Microscopia eletrônica (MEV) de amostras de argamassa B1 e B3 .....  | 143 |
| Figura 75 – Microscopia eletrônica (MEV) de amostras de argamassa B3 e B4 .....  | 144 |



## LISTA DE TABELAS E QUADROS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 01 – Composição química do clínquer.....  | 28  |
| Tabela 02 – Composição do cimento Portland.....  | 29  |
| Quadro 01 – Influência do tipo de cimento nas propriedades das pastas, argamassas e concretos .. | 35  |
| Quadro 02 – Caracterização da areia natural.....   | 51  |
| Quadro 03 – Características físicas e características mecânicas da fibra FibroMac 6.....         | 52  |
| Tabela 03 – Matriz experimental tipo fatorial $2^k$ com ponto central para pasta de cimento..... | 56  |
| Tabela 04 – Matriz experimental tipo fatorial $2^k$ com ponto central para argamassa.....        | 57  |
| Tabela 05 – Massa dos componentes das formulações das pastas.....                                | 59  |
| Tabela 06 – Massa dos componentes das formulações das argamassas.....                            | 70  |
| Tabela 07 – Massa ajustada dos componentes das argamassas após fase de pré-testes.....           | 71  |
| Tabela 08 – Índice de consistência das pastas.....   | 73  |
| Tabela 09 – ANOVA para índice de consistência das pastas ( $R^2 = 0,982$ ).....                  | 74  |
| Tabela 10 – Densidade de massa das pastas.....   | 77  |
| Tabela 11 – ANOVA para densidade de massa das pastas ( $R^2 = 0,997$ ).....                      | 78  |
| Tabela 12 – Teor de ar incorporado das pastas.....   | 81  |
| Tabela 13 – ANOVA para teor de ar incorporado das pastas ( $R^2 = 0,997$ ).....                  | 81  |
| Tabela 14 – Resistência à tração na flexão das pastas.....                                       | 84  |
| Tabela 15 – ANOVA para resistência à tração na flexão das pastas ( $R^2 = 0,997$ ).....          | 84  |
| Tabela 16 – Resistência à compressão das pastas.....   | 90  |
| Tabela 17 – ANOVA para resistência à compressão das pastas ( $R^2 = 0,892$ ).....                | 90  |
| Tabela 18 – Variação dimensional das pastas.....   | 94  |
| Tabela 19 – ANOVA para variação dimensional das pastas aos 3 dias ( $R^2 = 0,657$ ).....         | 95  |
| Tabela 20 – ANOVA para variação dimensional das pastas aos 7 dias ( $R^2 = 0,752$ ).....         | 98  |
| Tabela 21 – ANOVA para variação dimensional das pastas aos 28 dias ( $R^2 = 0,400$ ).....        | 100 |
| Tabela 22 – Variação de massa das pastas.....  | 102 |
| Tabela 23 – ANOVA para variação de massa das pastas aos 3 dias ( $R^2 = 0,890$ ).....            | 103 |
| Tabela 24 – ANOVA para variação de massa das pastas 7 dias ( $R^2 = 0,973$ ).....                | 106 |
| Tabela 25 – ANOVA para variação de massa das pastas 28 dias ( $R^2 = 0,986$ ).....               | 109 |
| Quadro 04 – Formulação A6, pasta ótima (P.O.).....   | 112 |
| Quadro 05 – Características da pasta ótima (formulação A6).....                                  | 113 |
| Tabela 26 – Etapa de pré-teste das argamassas, A/C e I.C. ....                                   | 114 |
| Tabela 27 – Índice de consistência das argamassas ajustadas.....                                 | 115 |
| Tabela 28 – ANOVA para índice de consistência das argamassas ( $R^2 = 0,995$ ).....              | 116 |
| Tabela 29 – Densidade de massa das argamassas ajustadas.....                                     | 118 |
| Tabela 30 – ANOVA para densidade de massa das argamassas ( $R^2 = 0,966$ ).....                  | 118 |
| Tabela 31 – Teor de ar incorporado das argamassas ajustadas.....                                 | 120 |
| Tabela 32 – ANOVA para teor de ar incorporado nas argamassas ( $R^2 = 0,843$ ).....              | 120 |
| Tabela 33 – Resistência à tração na flexão das argamassas.....                                   | 121 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 34 – ANOVA para resistência à tração na flexão das argamassas ( $R^2 = 0,502$ ) .....     | 122 |
| Tabela 35 – Resistência à compressão das argamassas .....  | 124 |
| Tabela 36 – ANOVA para resistência à compressão das argamassas ( $R^2 = 0,946$ ) .....           | 124 |
| Tabela 37 – Variação dimensional das argamassas .....  | 127 |
| Tabela 38 – ANOVA para variação dimensional das argamassas aos 3 dias ( $R^2 = 0,660$ ) .....    | 128 |
| Tabela 39 – ANOVA para variação dimensional das argamassas aos 7 dias ( $R^2 = 0,998$ ) .....    | 128 |
| Tabela 40 – ANOVA para a variação dimensional das argamassas aos 28 dias ( $R^2 = 0,849$ ) ..... | 132 |
| Tabela 41 – Variação de massa das argamassas .....   | 135 |
| Tabela 42 – ANOVA para a variação de massa das argamassas aos 3 dias ( $R^2 = 0,937$ ) .....     | 136 |
| Tabela 43 – ANOVA para a variação de massa das argamassas aos 7 dias ( $R^2 = 0,760$ ) .....     | 138 |
| Tabela 44 – ANOVA para a variação de massa das argamassas aos 28 dias ( $R^2 = 0,989$ ) .....    | 140 |



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                |   |
|----------------|---|
| ABNT           | Associação Brasileira de Normas Técnicas          |
| ANOVA          | Análise de variância                              |
| ASTM           | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| A.I.           | Teor de ar incorporado                            |
| A/C            | Relação água-cimento                              |
| CP             | Cimento Portland                                  |
| df             | Grau de liberdade                                 |
| I.C.           | Índice de consistência                            |
| ITZ            | Zona de transição interfacial                     |
| MEV            | Microscopia eletrônica de varredura               |
| MF             | Módulo de finura                                  |
| MS             | Média quadrática                                  |
| NBR            | Norma Brasileira                                  |
| p              | Teste de confiabilidade                           |
| P.O.           | Pasta ótima                                       |
| PP             | Polipropileno                                     |
| R <sup>2</sup> | Coefficiente de determinação                      |
| SS             | Soma dos quadrados                                |



## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                    | <b>25</b> |
| <b>2. OBJETIVOS .....</b>                                     | <b>27</b> |
| 2.1. OBJETIVO GERAL .....                                     | 27        |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                              | 27        |
| <b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>                         | <b>28</b> |
| 3.1. MATERIAIS CONSTITUINTES DA PASTA E ARGAMASSA.....        | 28        |
| 3.1.1. Cimento Portland.....                                  | 28        |
| 3.1.1.1. Processo Produtivo e Estatísticas .....              | 29        |
| 3.1.1.1.1. Pré-homogeneização .....                           | 30        |
| 3.1.1.1.2. Moagem da farinha.....                             | 31        |
| 3.1.1.1.3. Produção do clínquer .....                         | 31        |
| 3.1.1.1.4. Resfriamento .....                                 | 32        |
| 3.1.1.1.5. Moagem do cimento .....                            | 32        |
| 3.1.1.1.6. Estatísticas .....                                 | 33        |
| 3.1.1.2. Cimento Portland CP IV e CP V .....                  | 34        |
| 3.1.1.3. Hidratação do Cimento Portland .....                 | 36        |
| 3.1.2. Agregado Miúdo .....                                   | 37        |
| 3.1.3. Fibras de Polipropileno.....                           | 38        |
| 3.2. ARGAMASSA.....   | 42        |
| 3.2.1. Conceituação .....                                     | 42        |
| 3.2.2. Propriedades .....                                     | 42        |
| 3.2.2.1. Propriedades da argamassa no estado fresco .....     | 43        |
| 3.2.2.2. Propriedades da argamassa no estado endurecido ..... | 44        |
| 3.3. AS FIBRAS E OS MATERIAIS CIMENTÍCIOS .....               | 45        |
| 3.3.1. A Zona de Transição Interfacial.....                   | 46        |
| 3.3.1.1. Aspectos Gerais .....                                | 46        |

|   |            |
|---|------------|
| 3.3.1.2. Características .....                          | 47         |
| <b>4. MATERIAIS .....</b>                               | <b>50</b>  |
| 4.1. CIMENTO PORTLAND .....                             | 50         |
| 4.2. AGREGADO MIÚDO.....                                | 50         |
| 4.3. FIBRA DE POLIPROPILENO .....                       | 51         |
| 4.4. ÁGUA .....   | 53         |
| <b>5. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....</b>               | <b>54</b>  |
| 5.1. PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO .....                     | 54         |
| 5.2. AS VARIÁVEIS E FORMULAÇÕES.....                    | 54         |
| <b>6. METODOLOGIA .....</b>                             | <b>58</b>  |
| 6.1. PASTAS - PREPARAÇÃO E DOSAGEM.....                 | 58         |
| 6.2. PASTAS - ENSAIOS APLICADOS.....                    | 61         |
| 6.2.1. Índice de Consistência .....                     | 61         |
| 6.2.2. Densidade de Massa e Teor de Ar Incorporado..... | 62         |
| 6.2.3. Resistência à Tração na Flexão .....             | 64         |
| 6.2.4. Resistência à Compressão Axial.....              | 66         |
| 6.2.5. Variação Dimensional e de Massa .....            | 67         |
| 6.3. DETERMINAÇÃO DA PASTA ÓTIMA.....                   | 69         |
| 6.4. ARGAMASSAS - PREPARAÇÃO E DOSAGEM.....             | 70         |
| 6.5. ARGAMASSAS - VARIAÇÃO DIMENSIONAL E DE MASSA ..... | 72         |
| <b>7. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                 | <b>73</b>  |
| 7.1. RESULTADOS OBTIDOS .....                           | 73         |
| 7.1.1. Pastas .....                                     | 73         |
| 7.1.2. Argamassa .....                                  | 114        |
| <b>8. CONCLUSÕES .....</b>                              | <b>145</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                 | <b>147</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>                                     | <b>153</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização de materiais compósitos na indústria da construção civil já se consolidou como uma referência para melhorar o desempenho dos sistemas utilizados a partir dos materiais que formam sua matriz. Os produtos mais comuns, como o concreto e argamassa já são considerados materiais compósitos por sua própria natureza (de matriz cerâmica), pois possuem mais de uma fase que são insolúveis entre si.

Aliado ao objetivo de buscar melhorias para o seu desempenho, são constantes os estudos nestes materiais com a adição dos mais diversos tipos de fibras, reforçando alguma propriedade ou buscando solução para alguma patologia. O surgimento de fissuras na argamassa de revestimento é uma destas. Antunes e Masuero (2016) apontam que a sua ocorrência no revestimento externo é uma grave manifestação patológica, sendo uma das principais causas de destacamento e subsequente queda do revestimento. Estas adições de fibras evidenciam mais ainda a característica de materiais compósitos, pois criam uma nova fase, insolúvel, no material em estudo.

Usualmente, quando o objetivo dos estudos é incorporar teores de fibra na argamassa, busca-se avaliar o comportamento da mesma no estado fresco e suas propriedades no estado endurecido, geralmente sobre um traço pré-estabelecido, com as características do agregado miúdo já definidas e uma relação água/cimento padronizada. Todavia, torna-se importante iniciar estudos um passo atrás, na pasta de cimento, verificando para teores diferentes de fibra uma relação água/cimento mais propícia e validando em mais de um tipo de matriz (cimento Portland CP IV e CP V, por exemplo). A partir desta validação, objetiva-se encontrar uma pasta ótima para adicionar o agregado miúdo, verificando então o comportamento com a variação do traço e da sua granulometria. Um item importante a ser definido é o tipo de fibra a empregar nos estudos, pois o mercado disponibiliza os mais variados tipos que se traduzem em características e propriedades diferentes. Desde a sua composição, citam-se exemplos das mais comuns como as fibras metálicas, poliméricas e naturais. Além disso, suas dimensões precisam ser adequadas pois interferem diretamente na reologia e conseqüentemente no estado endurecido do material.

Desta forma, este estudo propõe inicialmente avaliar o efeito da incorporação da fibra de polipropileno em corpos de prova da pasta de cimento, e

utilizar os melhores resultados em corpos de prova de argamassa, buscando validar os resultados obtidos nos estados fresco e endurecido. A intenção da adição de fibra de polipropileno é evitar uma retração excessiva do cimento, o que pode ocasionar fissuras em uma camada de revestimento, e a consequente manifestação patológica.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Avaliar o efeito da adição de fibra de polipropileno sobre as propriedades físico-mecânicas da argamassa de revestimento.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Determinar a relação água/cimento adequada à trabalhabilidade de pastas e argamassas em função da adição de fibra de polipropileno,

Avaliar o efeito do tipo de cimento Portland nas propriedades das pastas em função da adição de fibras de polipropileno.

Avaliar a influência da variação do traço e da granulometria do agregado miúdo nas propriedades da argamassa com adição de fibra de polipropileno.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. MATERIAIS CONSTITUINTES DA PASTA E ARGAMASSA

##### 3.1.1. Cimento Portland

O cimento hoje conhecido é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação de água. O nome Portland decorre de uma patente requerida pelo inglês Joseph Aspdin em 1824, que em suas experiências realizou a queima conjunta de pedras calcárias e argilas que se traduziu nas características descritas, conforme citado por Fonseca (SNIC, 2015).

Seu principal constituinte é o clínquer, um material sinterizado e peletizado, resultante da calcinação a uma temperatura aproximada de 1450 °C entre uma mistura de calcário, argila e eventuais adições químicas de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera, empregadas para garantir a química da mistura dentro de limites específicos (KIHARA e CENTURIONE, 2005). Na Tabela 01 é apresentada a composição química típica do clínquer.

Tabela 01 – Composição química do clínquer

| Nomenclatura                | Composição Química  | Sigla | Teor (%) |
|-----------------------------|---|-------|----------|
| Silicato tricálcico         | $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$                                      | C3S   | 20 - 65  |
| Silicato dicálcico          | $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$                                      | C2S   | 10 - 55  |
| Aluminato tricálcico        | $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$                             | C3A   | 0 - 15   |
| Ferroaluminato tetracálcico | $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ | C4AF  | 5 - 15   |

Fonte: Bentur e Mindess (2007).

Novos materiais foram incorporados na forma de adições na sua composição básica, com o intuito de melhorar a qualidade do cimento Portland e seu desempenho, além da redução de custos da sua fabricação. Com estas adições se obtêm cimentos que acentuam determinadas propriedades, satisfazendo diferentes aplicações na construção civil. As principais adições são as escórias granuladas de alto forno, cinzas pozzolânicas e filler calcário. A composição dos diversos tipos de

cimento Portland e suas adições estão especificadas na NBR 16697:2018, conforme Tabela 02.

Tabela 02 – Composição do cimento Portland

| Designação Normalizada – Tipo de Cimento Portland | Sigla   | Classe de Resistência | Sufixo | Composição (%)               |                                 |                     |                      |
|---|---------|-----------------------|--------|------------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------|
|   |         |                       |        | Clínquer + sulfato de cálcio | Escória granulada de alto forno | Material Pozolânico | Material Carbonático |
| Comum   | CP I    |                       |        | 95 - 100                     |                                 | 0 - 5               |                      |
|   | CP I S  |                       |        | 90 - 94                      | 0                               | 0                   | 6 - 10               |
| Composto c/ escória                               | CP II E | 25                    |        | 51 - 94                      | 6 - 34                          | 0                   | 0 - 15               |
| Composto c/ pozolana                              | CP II Z | 32                    |        | 71 - 94                      | 0                               | 6 - 14              | 0 - 15               |
| Composto c/ mat. carbonático                      | CP II F | 40                    | RS     | 75 - 89                      | 0                               | 0                   | 11 - 25              |
|   |         |                       | BC     |                              |                                 |                     |                      |
| Alto forno  | CP III  |                       |        | 25 - 65                      | 35 - 75                         | 0                   | 0 - 10               |
| Pozolânico  | CP IV   |                       |        | 45 - 85                      | 0                               | 15 - 50             | 0 - 10               |
| Alta resistência inicial                          | CP V    | ARI                   |        | 90 - 100                     | 0                               | 0                   | 0 - 10               |
| Branco estrutural                                 | CP B    | 25, 32, 40            |        | 75 - 100                     | 0                               | 0                   | 0 - 25               |
| Branco não estrutural                             |         |                       |        | 50 - 74                      | 0                               | 0                   | 26 - 50              |

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 16697 (2018).

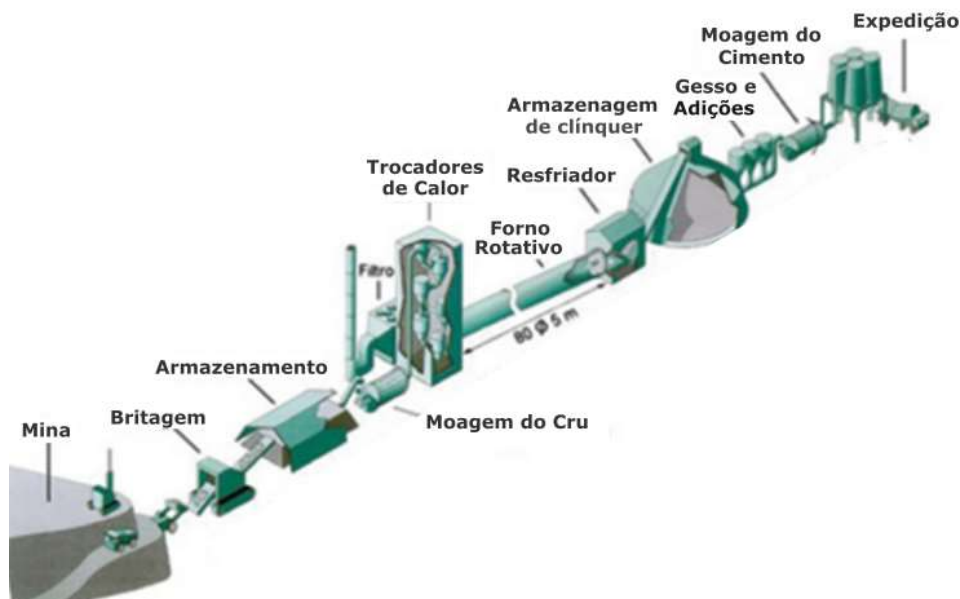
### 3.1.1.1. Processo Produtivo e Estatísticas

Para a produção do cimento Portland é necessária a extração das matérias-primas de partida em jazidas ou lavras: calcário e argila, que representam respectivamente 75% a 90% e 10% a 25%, variando conforme o fabricante e o tipo de cimento a ser produzido. Battagin (2011) explica que as matérias-primas devem conter os minerais principais necessários ao cimento, por isto este *blend* de rochas pode ainda conter adições de minério de ferro, areia ou bauxita, para incorporar à mistura algum componente químico essencial não presente nas rochas, a exemplo do  $Fe_2O_3$ . Ainda na jazida, para o calcário obtido pelo desmonte de rochas é necessária a

fragmentação em britadores, geralmente equipamentos dotados de mandíbulas que realizam a britagem das rochas obtendo cascalho como produto final para início do processo na fábrica.

O processo fabril de beneficiamento e transformação das matérias-primas em cimento pode ocorrer por dois tipos principais: processo via úmida e processo via seca. O primeiro utiliza água nas etapas iniciais de moagem, foi usado até os anos 1970 e despendia alto custo energético. Conforme Battagin (2011), este processo foi substituído gradativamente pela via seca após a crise mundial do petróleo naquela década. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC), em 2010 99% dos fornos das indústrias brasileiras já utilizavam o processo via seca (Figura 01).

Figura 01 – Fluxograma esquemático do processo de fabricação via seca do cimento Portland



Fonte: Votorantim Cimentos (2017).

Em uma fábrica cimenteira, o processo produtivo contém as principais etapas, a saber: pré-homogeneização, moagem da farinha, produção do clínquer, resfriamento e moagem do cimento (VOTORANTIM CIMENTOS, 2017).

#### 3.1.1.1.1. Pré-homogeneização

O recebimento das matérias-primas na fábrica inicia-se na etapa da pré-homogeneização, em que os materiais fragmentados são empilhados em camadas

com o objetivo de minimizar os efeitos das variações na composição química das matérias-primas. A mistura ideal destes materiais é realizada em balanças dosadoras, juntamente com a finalidade de controlar as propriedades químicas do material. Dá-se o nome a esta mistura de 'farinha de cru'. Neste procedimento também ocorre o armazenamento do material, necessário para alimentação constante das etapas seguintes (representado pelo 'armazenamento' na Figura 01).

#### 3.1.1.1.2. Moagem da farinha

É necessária a moagem da farinha de cru a um material pulverulento usando-se moinhos de rolos ou de bolas. Estes moinhos também separam a farinha moída, apta a seguir o processo (aproximadamente 0,050 mm), da fração que permanece no equipamento para ainda ser moída, e assim atingir a finura pré-estabelecida. A separação é feita por meio de um separador de partículas tipo filtro manga ou eletrostático (LIMA, 2011).

#### 3.1.1.1.3. Produção do clínquer

O produto formado nesta etapa é denominado de clínquer, um material peletizado que contém os minerais necessários para o desempenho base do cimento final. A sua formação ocorre com a calcinação do calcário contido na farinha de cru, iniciando com o processo de pré-calcinação. Em uma torre vertical constituída por um conjunto de equipamentos denominados de ciclones (Figura 02 P), durante a passagem da farinha entre eles ocorre em contrafluxo o contato gradativo com os gases reaproveitados do forno, com a temperatura inicial de 400 °C no topo da torre e até 900 °C na sua base. Ao final, a farinha já sofreu parcialmente o processo de calcinação, ocorrendo parte da decomposição do carbonato de cálcio em óxido de cálcio e gás carbônico. Lima (2011) cita que para cada 1.600 kg de material alimentado no topo da torre, apenas 1.000 kg chegam ao final dela. Na sequência da linha produtiva, toda a reação de calcinação é concluída dentro do forno, promovendo a descarbonatação do calcário. O forno de cimento (Figura 02 F) possui carcaça metálica, formato cilíndrico, de movimento rotativo e é revestido internamente de material refratário. Sua leve inclinação permite o fluxo da farinha pelo interior em direção à saída e à chama dos queimadores em um processo contínuo que induz a

formação de minerais. Neste percurso ocorre o processo de clinquerização, em temperatura de 1.450 °C onde há a fusão do material, formando o clínquer.

Durante o processo ainda em temperatura de 550 °C ocorre uma importante reação, a fração argilosa componente da farinha de cru é submetida à desidroxilação. A argila fornece minerais importantes como ferro, alumínio e sílica, que nesta reação dão origem a silicatos de alumínio e ferro os quais possuem reatividade com o óxido de cálcio (CaO) liberado em paralelo pela decomposição do calcário (SANTOS, 2004). Ocorre então a formação dos elementos que constituem a composição química do clínquer (Tabela 01), ou fases, sendo que na temperatura de 1.100 °C é formado o silicato dicálcio ( $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ). Entre 1.400 °C e 1.450 °C ocorre a formação do aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ ), do ferroaluminato tetracálcico ( $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e do silicato tricálcio ( $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ).

#### 3.1.1.1.4. Resfriamento

Iniciando ainda dentro do forno, após um complexo e contínuo processo de queima, é necessário para completar a etapa de clinquerização um resfriamento rápido, responsável pela solidificação da fase líquida causando a pelotização do clínquer (forma esférica e com diâmetros variados). O objetivo também é impedir que as reações de transformações mineralógicas obtidas no interior do forno sejam revertidas durante o resfriamento (BATTAGIN, 2011). No forno, o resfriamento ocorre até a temperatura de 1.200 °C e é concluído até a temperatura de 80 °C em um resfriador do tipo satélite (Figura 02 R) ou grelha, acoplado ao forno. Battagin (2011) ainda explica que “os resfriadores constituem intercambiadores de calor cujo objetivo é reduzir o mais rápido possível a temperatura do material que sai do forno, visando estabilizar as fases mineralógicas formadas durante a sinterização”.

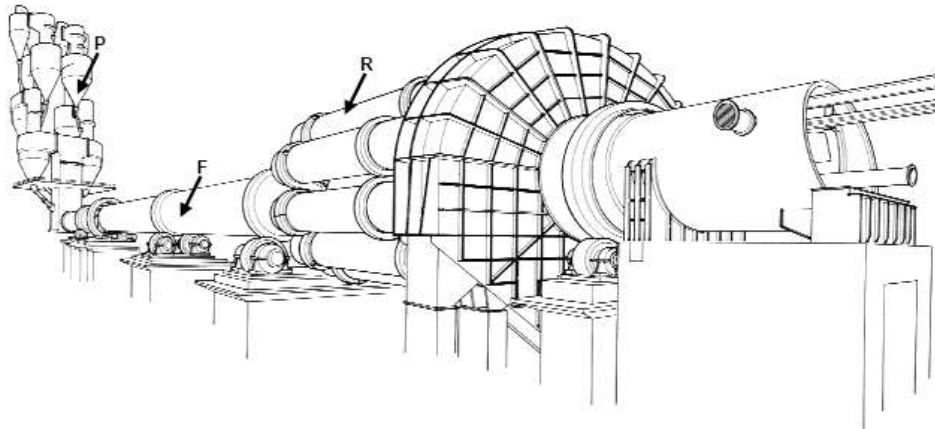
#### 3.1.1.1.5. Moagem do cimento

O processamento final para obtenção dos diversos tipos de cimento consiste em adicionar ao clínquer os materiais que vão diferenciar as tipologias, em um processo de redução de tamanho por moagem em moinho de bolas contínuo. Cada um dos materiais aditivos é dosado e adicionado ao moinho junto ao clínquer até obtenção de um material fino e pulverulento dentro das especificações

estabelecidas. A principal adição é o gesso, que atua como regulador do tempo de pega conferindo maior tempo de trabalhabilidade, sendo constituinte em todos os tipos de cimento. Os demais, são o filler carbonático, escória de alto forno e cinza pozzolânica (GOMES, 2017), que dão a diferenciação entre os tipos de cimento.

Ao final do ciclo, o material estará apto às operações de ensacamento ou carregamento a granel para distribuição aos consumidores.

Figura 02 – Desenho esquemático do conjunto de equipamentos que compõem a produção e resfriamento do clínquer: (P) torre de pré-calcinação com ciclones, (F) forno rotativo e (R) resfriador satélite.



Fonte: Battagin (2011).

#### 3.1.1.1.6. Estatísticas

O cimento Portland é um produto de alto consumo mundial, devido a sua importância no desenvolvimento das cidades e das economias. As matérias-primas essenciais, como o calcário e a argila para o cimento, estão distribuídas em jazidas por todos os continentes, proporcionando grandes reservas mundiais e sendo o cimento produzido em dezenas de países (CIMENTO.ORG). No topo do cenário produtivo mundial estão China e Índia. De economias emergentes, grandes reservas de matéria-prima e alto consumo, elas são responsáveis respectivamente por aproximadamente 57% e 7% de toda a produção de cimento Portland no mundo, que em 2017 foi de 4.200 milhões de toneladas. O Brasil é o maior produtor da América Latina, figurando entre os 10 maiores produtores mundiais e sendo responsável por aproximadamente 54 milhões de toneladas em 2018 (correspondente a 1,3% de toda a produção anual mundial) segundo estatísticas do Sindicato Nacional da Indústria do

Cimento, SNIC. Sua capacidade produtiva nas plantas fabris é de 70 milhões de toneladas anuais.

### 3.1.1.2. Cimento Portland CP IV e CP V

Um dos principais tipos de cimento empregados para produção de argamassas, o cimento Portland CP IV é muito eficiente nesta utilização, com adequada redução do efeito de eflorescência. É conhecido como Cimento Portland Pozolânico porque tem na sua composição de 15% a 50% de material pozolânico (NBR 16697:2018). Por isso, proporciona estabilidade no uso com agregados reativos, melhorando o desempenho ante a reação álcali-agregado e em ambientes de ataque ácido, em especial de ataque por sulfatos. As principais vantagens deste tipo de cimento, além da mitigação da reação álcali-agregado, também estão ligadas à estabilidade, durabilidade e impermeabilidade que conferem ao concreto por exemplo: menor calor de hidratação, maior resistência ao ataque por sulfatos, maior resistência à compressão em idades mais avançadas, maior resistência à tração e à flexão e a uma melhor durabilidade. Atualmente é o tipo mais utilizado para produção de argamassas viradas em canteiro de obra na construção civil. É produzido em duas classes de resistência, 25 e 32 MPa. Sua fabricação é concentrada nas regiões Nordeste e Sul do Brasil, nesta última devido à disponibilidade da cinza pozolânica como um subproduto das indústrias termelétricas que utilizam carvão mineral como combustível na geração de energia elétrica. As estatísticas do setor apontam que os estados da região Sul do país são responsáveis por 16,7% da produção nacional de cimento (SNIC, 2020). Por tipo, o CP IV corresponde a 14% de toda a produção, o CP V corresponde a 8% e o tipo de cimento mais produzido no país é o CP II com 58%.

O cimento CP V é conhecido como Cimento Portland de Alta Resistência Inicial porque devido ao seu processo de fabricação tem alta reatividade nas primeiras horas de aplicação, fazendo com que atinja resistências elevadas em um curto intervalo de tempo (pode atingir 26 MPa no primeiro dia quando aplicado a um concreto). A Figura 03 ilustra a curva da evolução da resistência à compressão conforme o tempo, acentuada no CP V em relação aos demais tipos de cimento Portland. Muito empregado na produção das indústrias de pré-moldados, devido à característica anterior, permite também a desforma das peças com maior rapidez em comparação ao cimento Portland Pozolânico. Battagin (2011) cita que tal propriedade

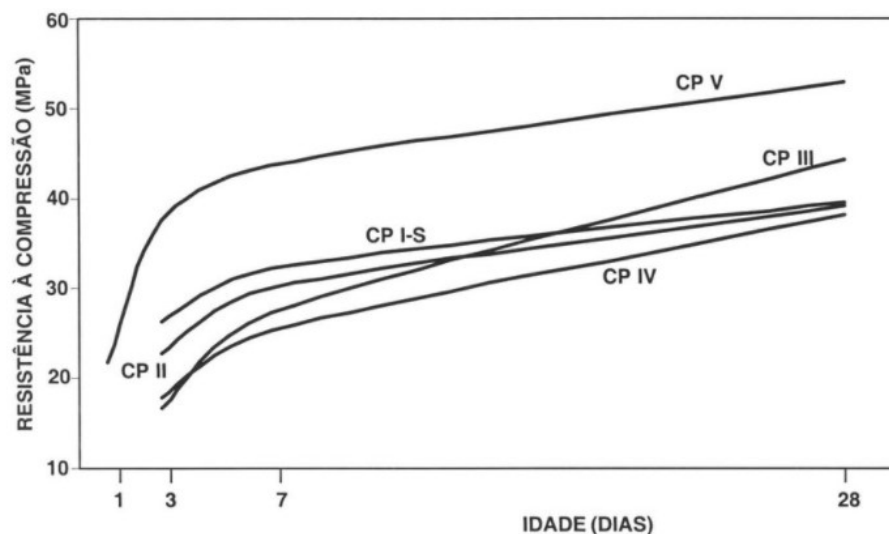
é conseguida pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer. Além disto, o clínquer permanece no moinho por um tempo mais prolongado, recebendo uma moagem mais fina. Conforme a Tabela 02, ainda na sua composição, também se diferencia do cimento CP IV por não receber adição de pozolana. O Quadro 01 traz uma comparação da influência dos cimentos CP IV e CP V em certas propriedades do concreto.

Quadro 01 – Influência do tipo de cimento nas propriedades das pastas, argamassas e concretos

| Tipo de cimento Portland        | Propriedades                                      |                                       |                  |                                  |              |
|---------------------------------|---|---------------------------------------|------------------|----------------------------------|--------------|
|                                 | Resistência à compressão                          | Calor gerado na reação cimento - água | Impermeabilidade | Resistência a agentes agressivos | Durabilidade |
| CP IV – Pozolânico              | Menor nos primeiros dias e maior no final da cura | Menor                                 | Maior            | Maior                            | Maior        |
| CP V – Alta Resistência Inicial | Muito maior nos primeiros dias                    | Maior                                 | Padrão           | Menor                            | Padrão       |

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland ABCP (2019).

Figura 03 – Evolução média da resistência à compressão dos diferentes tipos de cimento Portland.



Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland ABCP (2019).

### 3.1.1.3. Hidratação do Cimento Portland

Para que o cimento adquira as propriedades necessárias a um sistema compósito, é indispensável a presença da água na fase líquida para proporcionar as reações de hidratação do composto. Fisicamente, este processo é a transformação das partículas de cimento para um sistema conectado, mais conhecido como a pega. Este complexo processo tem início no contato dos grãos anidros de cimento com a água, provocando reações entre os minerais do clínquer, as várias formas de sulfato de cálcio, a cal livre, o álcali e a água, que se processam em taxas diferentes (SOUZA, 2007).

Mehta e Monteiro (2006) analisaram os produtos formados pela hidratação do cimento e citam os seguintes produtos ou fases sólidas, sendo: o silicato de cálcio hidratado (CSH), o hidróxido de cálcio (CH), o sulfoaluminato de cálcio hidratado, além de grãos de clínquer não hidratados. A principal é a fase de silicato de cálcio hidratado ( $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), sendo a mais importante para a determinação das propriedades da pasta. Constituinte de 50% a 60% do volume dos sólidos em uma pasta de cimento Portland completamente hidratada, seus cristais tendem a formar uma rede reticular. O hidróxido de cálcio também é conhecido como portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), constitui de 20% a 25% do volume dos sólidos na pasta hidratada, e tende a formar grandes cristais prismáticos hexagonais. Já os sulfoaluminatos de cálcio hidratados constituem de 15% a 20% do volume dos sólidos na pasta hidratada, sendo uma das fases mais conhecidas a etringita ( $3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ), e tendem a formar cristais prismáticos em forma de agulha (Mehta e Monteiro, 2006).

Quanto ao mecanismo de reação e formação dos produtos descritos, a constituição de base inicia-se conforme a Tabela 01, em que o cimento Portland é composto em sua grande maioria por silicatos, em comparação com os aluminatos. O silicato tricálcico (C3S) é o composto mais importante para o desenvolvimento da resistência no primeiro mês, enquanto o silicato dicálcico (C2S) tem sua reação mais lenta e contribui para a resistência a longo prazo (SOUZA, 2007). Embora presentes em menor quantidade, as reações dos aluminatos são muito importantes e afetam a hidratação dos silicatos, e a velocidade da reação do aluminato tricálcico (C3A) é consideravelmente maior que a do silicato tricálcico (C3S).

Helene e Terzian (1993) explicam que o grau de hidratação do cimento influencia diretamente a resistência à compressão do concreto, para uma relação

água / cimento fixada. Os autores citam que ao analisar a evolução da resistência à compressão em diferentes idades, observa-se que 'os cimentos Portland com adições ativas – escória e pozolana (CPII E e CPII Z, respectivamente) – apresentam crescimento significativamente superior – da ordem de 8%, a 91 dias de idade, comparativamente ao cimento Portland comum (CP I). Estas constatações se devem às reações pozolânicas que são mais lentas e só ocorrem em presença de água, demonstrando uma vez mais a importância e a vantagem de uma cura prolongada nos casos de emprego de cimentos com adições reativas. Helene e Terzian (1993) citam ao analisar a taxa de crescimento da resistência ao longo das idades, que aos 03 dias ela é sempre maior que aos 28 e 91 dias. Isto ocorre porque a resistência à compressão em menor idade depende da hidratação de compostos distintos daqueles que mais influenciam as resistências em maiores idades. Conforme citado anteriormente por Souza (2007), a velocidade da reação do aluminato tricálcico (C3A) é consideravelmente maior que a do silicato tricálcico (C3S). Helene e Terzian observam também que o C3A e o C4AF estão mais hidratados a uma idade menor, enquanto em idades maiores prevalece a influência de hidratação do C3S e C2S.

Estas reações provocam também a geração de calor em função do tempo. Mehta e Monteiro (2006), e Helene e Terzian (1993) citam este processo em quatro etapas após o contato inicial do cimento com a água, podendo ser resumida em: a) pré-indução: alta liberação de calor – primeiros minutos; b) indução ou dormência: baixa e constante queda de calor liberado – primeiras horas; c) aceleração: retomada da aceleração de hidratação com alta evolução do calor – 3 a 24h; d) pós-aceleração: desaceleração da hidratação do cimento e decréscimo da quantidade de calor liberado – após 12h.

### 3.1.2 Agregado Miúdo

Segundo a NBR 9935:2011, define-se como agregado o material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação da argamassa ou concreto. Quanto a sua origem, divide-se em agregado natural e agregado artificial. A mesma NBR 9935:2011 informa que o agregado natural é um material pétreo granular que pode ser utilizado tal e qual encontrado na natureza, podendo ser submetido à lavagem, classificação ou britagem. Já o agregado artificial é um material granular resultante do processo industrial envolvendo alteração

mineralógica, química ou físico-química da matéria-prima original. Quanto a sua dimensão, divide-se em agregado graúdo e agregado miúdo, sendo que este último é o que faz parte da composição das argamassas.

O agregado miúdo é também especificado pela NBR 9935:2011 como sendo o agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 $\mu$ m, em ensaio realizado de acordo com a NBR NM 248:2003. Um dos tipos de agregado miúdo é a areia, que pode receber três classificações referentes à granulometria pela determinação do Módulo de Finura (MF): areia grossa - MF superior a 3,9, areia média - MF entre 3,9 a 2,4, e areia fina - MF inferior a 2,4. A NBR 7211:2009 define o Módulo de Finura como a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100. Quanto maior for o MF do agregado, maiores são as partículas dele.

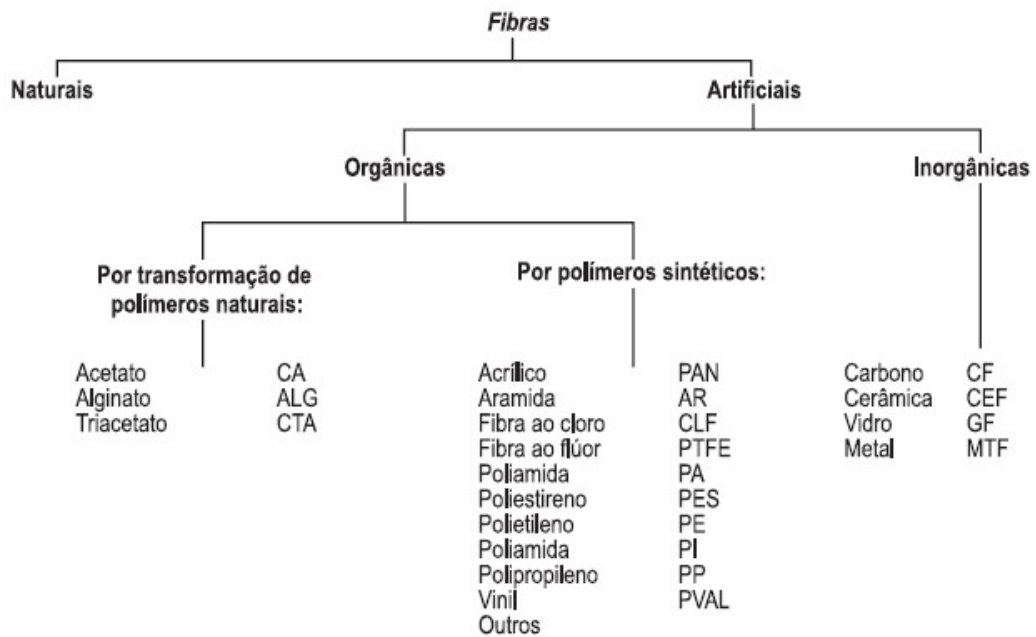
Os agregados desempenham funções importantes nos materiais em que são adicionados. Eles auxiliam na resistência aos esforços mecânicos, na redução de variação volumétrica e atuam na redução do custo final do material. Como componentes dos concretos e argamassas, a trabalhabilidade no estado fresco é diretamente influenciada pelas características dos agregados miúdos e graúdos (no caso do concreto) como a quantidade, proporção, granulometria, forma e textura. Grãos de formas arredondadas proporcionam uma melhor plasticidade em comparação aos grãos de formas lamelares ou angulares. Martins (2008) cita que a composição granulométrica e a quantidade de agregados também influenciam esta propriedade, e quando não são uniformes levam a um maior consumo de cimento e água para obter o empacotamento necessário. Agregados muito finos possuem área específica maior, requerendo mais água e aumentando também o consumo de cimento, o que ocasiona elevação de custos no produto final (MARTINS, 2008).

### 3.1.3. Fibras de Polipropileno

Dentre os diversos tipos de fibras disponíveis para uso na construção civil, as fibras de polipropileno estão entre as mais utilizadas para reforço em concretos e argamassas. Bentur e Mindess (2007) citam que as fibras de polipropileno são produzidas a partir da resina de polipropileno homopolimérico, sendo compostas por macromoléculas lineares que possuem na sua cadeia entre 50 e 80% em peso de

acrilonitrilo (SARZALEJO, 2014). O Escritório Internacional de Padronização de Fibras Sintéticas (BISFA) apresenta a classificação das fibras artificiais em função da matéria-prima: fibras orgânicas (polímeros naturais ou sintéticos) e fibras inorgânicas (metálicas), onde as fibras de polipropileno são enquadradas como orgânicas de polímeros sintéticos, conforme Figura 04.

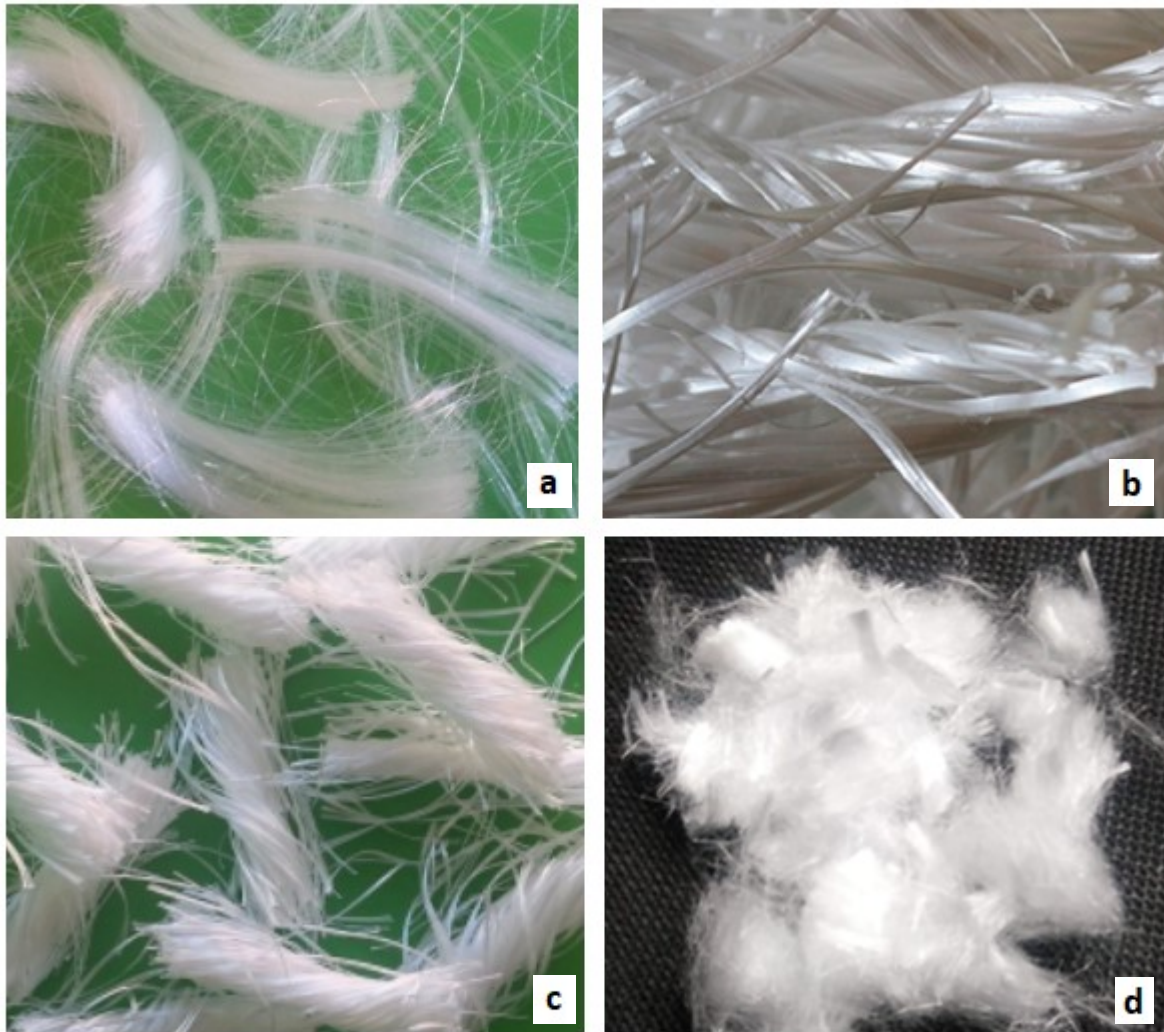
Figura 04 – Classificação das fibras artificiais segundo BISFA



Fonte: The International Bureau for Standardisation of Man-Made Fibres BISFA (2020).

A Figura 05 mostra alguns exemplos de fibras de fibras de polipropileno, fabricadas em diversos tamanhos e seções: (a) microfibra 12mm monofilamento, (b) macrofibra 51mm seção retangular, (c) macrofibra 50mm multifilamentos, (d) microfibra 6mm seção circular.

Figura 05 – Exemplos de fibras de polipropileno.



Fonte: Autor (2022).

Uma das principais vantagens desta fibra é sua resistência aos álcalis do cimento. Devido a este fato de não ocorrer sua degradação em meio alcalino, elas se sobressaem em relação às fibras vegetais e às fibras de vidro. Também apresentam formatos variados em diâmetro e comprimento, têm facilidade na mistura, quando incorporado em argamassas e concretos não altera o processo produtivo e não necessitam de equipamentos especiais para tal. Em comparação com as fibras de aço, as fibras poliméricas não sofrem o processo de corrosão. E em comparação com as fibras vegetais, não sofrem fácil degradação. Habib (2013) constatou a contribuição positiva sobre as resistências à compressão, flexão e tração das fibras de polipropileno e de náilon em argamassas cimentícias, enquanto a fibra de vidro apresentou efeito contrário. Outra vantagem advinda das fibras de polipropileno é seu

custo relativamente baixo quando comparadas às fibras de alto módulo de elasticidade (desejável), a exemplo das fibras de carbono (SILVA, 2006).

Como desvantagem, sua baixa resistência ao fogo deve ser considerada. O ponto de fusão desta fibra é menor (aproximadamente 165 °C) em relação às fibras de aço, sendo seu uso em concretos expostos ao fogo discutível. Sezlag (2019) analisou a ocorrência da fusão delas ao expor corpos de prova de pasta de cimento à temperatura de 250 °C. Ocorreram vazios no volume da matriz que contribuíram para a formação de fissuras. Também observou a formação de uma fina camada de polipropileno (1 a 2 µm de espessura) nestes pontos, mas que não afetou a química da matriz de cimento por não ser reativo com os componentes dela. Bentur e Mindess (2007) destacam outras aparentes desvantagens, como a sensibilidade à luz solar e oxigênio, baixo módulo de elasticidade (1 a 8 GPa) e baixa ligação com a matriz.

Mas um ponto favorável quanto a utilização das fibras diante da elevação da temperatura, tanto em argamassas quanto em concreto, a exemplo da ocorrência de um incêndio, é explicado por Sarzalejo (2014). O comportamento da fibra de polipropileno em temperatura aproximada a 170 °C é a sua fusão com o aumento da temperatura, que gera poros livres na matriz e forma com isso um sistema que abriga vapores e gases, reduzindo as tensões de vapor no seu interior. Isto colabora para limitar os efeitos do fenômeno de *spalling*, considerado o lascamento da estrutura devido à formação destas tensões internas em decorrência do aquecimento.

As propriedades mecânicas dos produtos cimentícios, em especial o módulo de elasticidade e a aderência, podem ser otimizados com o uso de fibras. Um exemplo é que as fibras de polipropileno podem passar por tratamentos apropriados na superfície para melhorar sua aderência e a ligação com o cimento, aumentando também a dispersão na matriz. Estes tratamentos atuam direto no molhamento das fibras, pois a estrutura química do polipropileno o torna hidrofóbico em relação à matriz cimentícia (BENTUR e MINDESS, 2007). Sobre a retenção de água, importante propriedade nas argamassas, Siqueira (2006) concluiu em seu estudo que os traços com a presença de fibra aumentaram a retenção da água na argamassa, demonstrando que parece haver um teor de fibras ótimo acima do qual há a redução da capacidade de retenção de água. Uma aparente desvantagem da incorporação de fibras é na resistência à compressão. O estudo de Silva (2006) avaliou que corpos de prova com fibras tiveram queda na resistência na ordem de 42% em relação a corpos

de prova sem fibras. A autora cita que a formação de ‘aglomerados’ de fibras durante a mistura pode contribuir formando vazios entre os filamentos.

Em relação a dosagem das fibras nas argamassas, fator que impacta nas suas propriedades, não se tem definição normatizada ou consenso entre pesquisadores sobre teores ideais. É comum estudos abordarem teores variando de 0,05% a 2,0%, alcançando até 5%.

## 3.2 ARGAMASSA

### 3.2.1. Conceituação

Segundo definição da NBR 13281:2005, conceitua-se argamassa como sendo a mistura homogênea de agregado miúdo, aglomerante inorgânico e água, podendo conter ou não aditivo, com propriedades de aderência e endurecimento. As argamassas são utilizadas na construção civil para diversas finalidades. A depender do seu tipo tem-se as principais: argamassa para assentamento e para revestimento de tetos e paredes; a última subdivide-se entre revestimento interno e externo.

As argamassas são constituídas por material ativo, a pasta, e por material inerte, o agregado miúdo. A pasta é uma mistura isolada do aglomerante com a água, sendo responsável pela ligação dos agregados (areia) entre si, a fim de formar um todo homogêneo (ROCHA, 2005). O aglomerante mais empregado é o cimento Portland, porém é muito comum o uso de mais de um tipo de aglomerante, a cal, denominando a esta mistura de argamassa mista.

### 3.2.2. Propriedades

Uma argamassa de revestimento desempenha importantes funções em uma edificação. Canola (2002) cita dentre elas: a proteção dos elementos de vedação da edificação contra a influência direta de agentes agressivos, a estanqueidade à água e gases, a regularização da superfície dos elementos de vedação ou estruturais, a atuação como base regular e apropriada para receber outros revestimentos ou acabamento final e a contribuição para a estética da edificação. Palomar, Barluenga e Puentes (2015) citam que “as argamassas de revestimento podem modificar significativamente o desempenho térmico e acústico dos edifícios, reduzindo o

consumo de energia e melhorando o controle de ruídos na edificação”. Para que todas estas funções tenham a performance desejada conforme seu projeto, as argamassas de revestimentos no estado fresco e no estado endurecido devem apresentar determinadas propriedades, que caracterizam o seu bom desempenho ao produto final. As normas vigentes não especificam valores ótimos ou aceitos para elas, visto que algumas são propriedades conceituais para um bom desempenho, a exemplo da trabalhabilidade, adesão inicial e capacidade de deformação. Para outras são apresentados enquadramentos conforme intervalos, a exemplo das resistências à compressão e tração na flexão, retenção de água e densidade.

#### 3.2.2.1. Propriedades da argamassa no estado fresco

- a) Retenção de água: é a capacidade de manter a consistência diante das solicitações que provocam a perda da água de amassamento, necessária para garantir a hidratação do aglomerante hidráulico (cimento) e lubrificar os materiais secos. Também interfere no trabalho de acabamento da argamassa de revestimento, bem como nas características no estado endurecido. Propriedade importante que influencia diretamente a retração por secagem, uma das principais causas de fissuração no estado endurecido, cita Schankoski (2012).
- b) Consistência: é a propriedade que exprime o quão dura ou mole está a argamassa, podendo receber três classificações conforme a quantidade de energia para conformação: seca, plástica ou fluida. Carasek (2007) menciona que do ponto de vista reológico a maior ou menor fluidez está associada à capacidade da mistura resistir ao escoamento (sendo que as de consistência mais fluida apresentam menor tensão de escoamento).
- c) Trabalhabilidade: essencial para a aplicação da argamassa, deve ser de fácil manuseio pelo profissional, deslizando sem dificuldade, mas sem ser fluida, mantendo coesão ao ser transportada e desprendendo da colher de aplicação ao ser lançada contra o substrato, proporcionando assim adesão necessária na superfície vertical. Rocha (2006) afirma que a trabalhabilidade é uma propriedade complexa que resulta de um conjunto de outras propriedades

como a consistência, plasticidade, coesão, tixotropia, adesão, massa específica e retenção de água.

- d) Plasticidade: propriedade da argamassa de deformar-se sem ruptura quando submetida a forças superiores às que promovem sua estabilidade, mantendo a deformação após cessado o esforço deformante. Esta característica é muito influenciada por fatores como teor de ar incorporado, tipo e teor de aglomerante, presença de aditivos e intensidade de energia da mistura (SCHANKOSKI, 2012).
- e) Adesão inicial: traduz-se na aderência da argamassa fresca ao substrato, indicando o futuro comportamento da aderência no estado endurecido. Faz parte da característica da reologia e trabalhabilidade da argamassa, porém depende também das propriedades do substrato como porosidade e rugosidade.

#### 3.2.2.2. Propriedades da argamassa no estado endurecido

- a) Aderência: capacidade que a interface substrato-argamassa possui de absorver tensões normais (tração) e tangenciais (cisalhamento) sem se romper. A aderência é influenciada por diversas características como: trabalhabilidade, retenção de água, porosidade, condições da execução e cura.
- b) Retração: é a redução de volume da argamassa, ocasionada pelo seu processo de secagem e perda da água de amassamento, ou seja, está relacionada diretamente à variação de umidade na pasta do aglomerante. Ela inicia após o seu lançamento no substrato em que parte da água é absorvida por sucção pela sua porosidade. Pelo processo de secagem e endurecimento da argamassa, parte da água sofre evaporação e outra parte reage na hidratação do aglomerante (CANOVA, 2002). O efeito deste processo de redução de volume na pasta é o surgimento de fissuras ou microfissuras.
- c) Capacidade de Deformação: para uma boa performance, a argamassa de revestimento precisa ser capaz de absorver deformações da parede, o que

permite a dissipação dos esforços atuantes sem a ocorrência de ruptura e fissuras prejudiciais, e sem prejuízo da aderência ao substrato (SCHANKOSKI, 2012). Isto é caracterizado pelo módulo de elasticidade, que define como se dá a transferência de tensões em um elemento.

- d) Permeabilidade: propriedade que identifica a possibilidade de passagem de água por meio de um dado material. A permeabilidade não é função simples da porosidade, está associada também ao teor de aglomerante, grau de hidratação da pasta e também forma dos agregados.
  
- e) Resistência Mecânica: mesmo não sendo uma propriedade de relevância extrema para as argamassas, elas precisam adquirir resistência suficiente para suportar as movimentações do substrato, oriundas de variação dimensional, recalques, secagem ou dilatação oriunda de variações térmicas. É necessário suportar as tensões de tração, compressão e cisalhamento as quais o revestimento está sujeito.

### 3.3. AS FIBRAS E OS MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Dentro da engenharia de materiais, os materiais cimentícios são classificados como materiais cerâmicos, que apresentam por sua própria natureza uma característica de serem duros, porém frágeis. Para Van Vlack (2000), as combinações das estruturas atômicas, das fases formadas, além dos elementos químicos presentes nesta classe de materiais, conferem a eles esta propriedade de dureza e também de fragilidade, aliada a baixas deformações.

Para intervir nesta característica e tornar os materiais cimentícios mais robustos em situações as quais sejam necessárias, em geral as fibras se apresentam como opção. Para as fibras não estruturais (de baixo módulo) sua incorporação na matriz de cimento tende a agir quando ocorre a ruptura frágil propriamente dita da matriz, passando a fibra a ser a responsável pela resistência do conjunto até o seu limite. Silva (2006) relata que uma matriz de cimento sem adição de fibra, quando solicitada por um determinado esforço de tração, suportará a tensão originada até uma tensão de ruptura, quando se romperá. É este o comportamento que caracteriza o material como de ruptura frágil, possuindo somente o trecho elástico em uma curva

tensão-deformação. Ao adicionar fibras de polipropileno, surge um material compósito que quando solicitado a um esforço de tração, apresenta tanto um comportamento elástico (delimitado pela ruptura da matriz) quanto um plástico, a partir do que haverá a atuação da fibra.

A interação entre fibra e matriz passa a ser então um fator de grande interferência na eficácia do desempenho mecânico do conjunto, independentemente do tipo de fibra, sendo que as mais importantes são a adesão física e química, a fricção, e a ancoragem mecânica induzida por deformações na superfície da fibra ou geometria. Não deve ocorrer o desprendimento fácil da fibra na matriz, o atrito entre elas será o responsável pela transferência das tensões para a fibra. Silva (2006) destaca ainda que o aparecimento de fissuras na matriz e as propriedades de resistência à ruptura e deformação na ruptura do compósito estão diretamente relacionados com a tensão de atrito. Demais características como módulo de elasticidade, facilidade de dispersão, geometria da fibra e resistência a ambiente alcalino são propriedades também importantes na função de reforço das fibras na matriz.

### 3.3.1. A Zona de Transição Interfacial

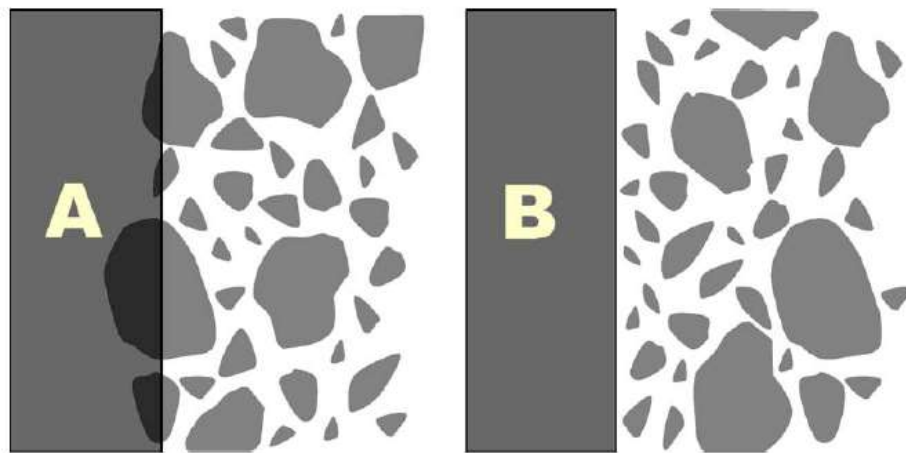
#### 3.3.1.1. Aspectos Gerais

A zona de transição interfacial (ITZ) em compósitos cimentícios é considerada a região no entorno do material de reforço ou agregado que representa a ligação da sua interface com a matriz. É de relevante importância para as propriedades e o desempenho do compósito, porém é considerada um ponto crítico para o desempenho do material devido as suas características diferenciadas em relação à matriz (GAO et al, 2013). Também é caracterizada por não ser uma fase definida dentro do composto, não apresentando um limite claro entre a ITZ e a massa da pasta. Por este motivo considera-se como uma região de transição.

Sua origem é em provável decorrência do efeito 'parede' provocado pela discrepância de tamanho entre os grãos de cimento e as fibras ou agregados incorporados. Enquanto os grãos de cimento apresentam uma faixa de tamanho entre 1 e 100  $\mu\text{m}$ , um agregado apresenta tamanho muito maior, causando uma falha no empacotamento dos grãos de cimento. Como resultado, Gao et al (2013) explicam

que a fração volumétrica dos grãos de cimento na região próxima à superfície de um agregado ou fibra é menor em comparação às regiões mais afastadas. Scrivener et al (2004) mencionam que nesta região ocorre a predominância de partículas menores de cimento, sendo uma zona de transição gradual e altamente heterogênea conforme ilustra a Figura 06. Nela, tem-se um objeto sólido plano (A) colocado aleatoriamente em um conjunto de grãos de cimento que cortaria os grãos. Nesta impossibilidade, o empacotamento dos grãos é interrompido, gerando uma zona de maior porosidade com grãos menores próxima ao agregado (B).

Figura 06 – Desenho esquemático do efeito ‘parede’

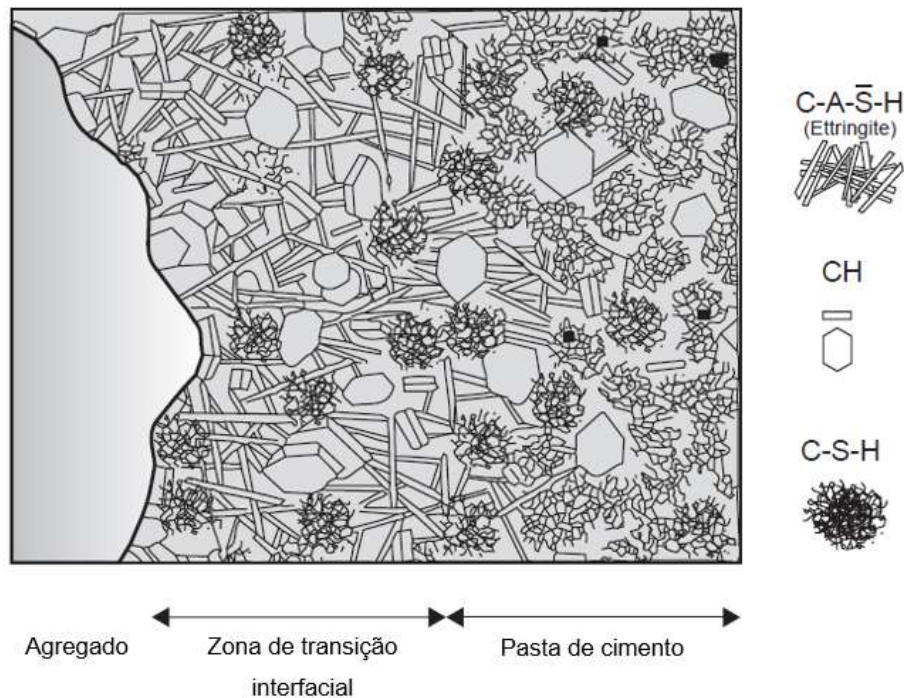


Fonte: Scrivener et al (2004).

### 3.3.1.2. Características

O efeito ‘parede’ que origina a zona de transição interfacial é o responsável por uma das principais características da ITZ: o maior grau de porosidade em relação à pasta de cimento. Savastano e Agopyan (1999) argumentam que na superfície da fibra (parede) é formado um filme de água que auxilia a formação da porosidade, além de ser um ponto de concentração de cristais de hidróxido de cálcio (portlandita, CH) e de trissulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita) próximo à interface, definindo a zona de transição com características muito diferentes da matriz. A Figura 07 ilustra uma representação esquemática da ITZ em concreto elaborada por Mehta e Monteiro (2006) em relação à observação dos diferentes produtos de hidratação presentes nesta fase, em comparação com a pasta: há predominância da etringita e portlandita.

Figura 07 – Desenho esquemático da formação dos produtos de hidratação na zona de transição interfacial entre a pasta de cimento e os agregados em concreto



Fonte: Mehta e Monteiro (2006).

Com relação à formação destas fases muito próximas à superfície das fibras, Chan e Li (1997) mediram a microdureza na região como forma de avaliar as propriedades mecânicas na zona de transição. Observaram que a medição delas junto à pasta de cimento afastada da superfície da fibra é praticamente constante, e ao se aproximar da superfície da fibra a uma distância de 50  $\mu\text{m}$  a microdureza é reduzida. Porém esta redução é revertida quando se aproxima muito da superfície da fibra. Os autores então atribuem essa mudança à formação abundante das fases de portlandita e etringita. Esse mecanismo relaciona a maior porosidade e a baixa resistência como sendo um ponto fraco no local de menor nível da microdureza.

Em se tratando da extensão da ITZ, ou sua espessura, Gao et al (2013) observaram que a maior idade de cura do compósito cimentício (a partir de 28 dias, de 56 para 90 dias) causa uma ligeira redução da espessura. Observaram também que a variação do fator água / cimento não apresenta efeitos relevantes neste aspecto. Para a avaliação da porosidade, detectaram que um aumento na idade de cura e uma redução no fator água / cimento contribuiu para o decréscimo da porosidade na zona de transição interfacial.

Xu et al (2017) constataram em uma avaliação entre fibra de polipropileno e fibra metálica que a espessura da zona de transição varia conforme o tamanho da seção da fibra, impactando no efeito 'parede' que as fibras provocam. Uma fibra metálica, com seção maior, tende a gerar um efeito 'parede' reto enquanto a de polipropileno, com seção menor, um efeito curvado, impactando na espessura da ITZ formada: 30  $\mu\text{m}$  com a fibra metálica e 15  $\mu\text{m}$  com a de polipropileno. Para a melhoria de resistência mecânica na ITZ, estudos como o de Chan e Li (1997) sugerem a densificação da matriz com o uso de sílica ativa, além da redução da relação água / cimento. Isto atua diretamente na porosidade na região, pela mudança na sua microestrutura, e tende a fortalecer a interface fibra e pasta de cimento. Scrivener et al (2004) afirmam que esta densificação no empacotamento da ITZ foi obtida pela alteração da distribuição do tamanho das partículas, com a introdução de sílica ativa de tamanho na ordem de 1  $\mu\text{m}$ .

## 4. MATERIAIS

### 4.1 CIMENTO PORTLAND

Para o desenvolvimento desta pesquisa, a matriz cimentícia contou com dois tipos de cimento: Cimento Portland CP IV com classe de resistência 32 MPa e Cimento Portland CP V classe ARI, ambos da fabricante Votorantim Cimentos S/A e comercializados sob a marca Votoran.

Para a caracterização dos cimentos optou-se por considerar as informações dos laudos de produção dos respectivos lotes fornecidos pelo fabricante (Anexos 01 e 02). Dos laudos foram extraídas as massas específicas: 2,86 g/cm<sup>3</sup> para o cimento CP IV e 3,12 g/cm<sup>3</sup> para o cimento CP V.

### 4.2 AGREGADO MIÚDO

Para a escolha do tipo de agregado a utilizar nesta pesquisa, levou-se em consideração a disponibilidade do material na região de Criciúma, SC, bem como o material comumente utilizado nas pesquisas do Laboratório de Materiais de Construção Civil do i-parque. Dentro desses critérios, utilizou-se uma areia lavada de origem natural, proveniente de cava, que atende aos critérios da NBR 7211:2009 Agregados para concreto, e buscando enquadramento também na ASTM C144-17 *Standard specification for aggregate for masonry mortar*.

Um agregado miúdo é definido pela NBR 7211:2009 como sendo o agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm. Desta forma, realizou-se o ensaio de caracterização do material no laboratório citado, pela determinação da composição granulométrica conforme NBR NM 248:2003, cujos resultados são mostrados no Quadro 02.

Quadro 02 – Caracterização da areia natural

| Tipo de agregado: Areia lavada natural                  |        |                             |          |                 |          | Data: 08/06/2020              |                    |   |
|---|--------|-----------------------------|----------|-----------------|----------|-------------------------------|--------------------|---|
| Agregados – Composição granulométrica – NBR NM 248:2003 |        |                             |          |                 |          |                               |                    |   |
| Peneiras  |        | 1ª determinação             |          | 2ª determinação |          | % Retido médio                | % Retido acumulado |   |
| nº  | mm     | Peso retido (g)             | % Retido | Peso retido (g) | % Retido |                               |                    |   |
| 4   | 4,75   | 16,5                        | 2,5      | 12,6            | 1,8      | 2,2                           | 2,8                | - |
| 8   | 2,4    | 99,8                        | 15,1     | 105,8           | 15,5     | 15,3                          | 18,1               | - |
| 16  | 1,2    | 114,0                       | 17,3     | 118,1           | 17,3     | 17,3                          | 35,4               | - |
| 30  | 0,6    | 95,1                        | 14,4     | 98,2            | 14,4     | 14,4                          | 49,8               | - |
| 50  | 0,3    | 122,8                       | 18,6     | 125,7           | 18,4     | 18,5                          | 68,4               | - |
| 100   | 0,15   | 152,6                       | 23,1     | 156,5           | 22,9     | 23,0                          | 91,4               | - |
| Fundo   | < 0,15 | 53,0                        | 8,0      | 62,7            | 9,2      | 8,6                           | -                  | - |
| Total   |        | 660                         | 100      | 682             | 100      | 100                           | 2,66               | - |
| <b>D<sub>máx</sub>: 4,8</b>                             |        | <b>Classificação: Média</b> |          |                 |          | <b>Módulo de finura: 2,66</b> |                    |   |

Fonte: Laboratório de Construção Civil LMCC (2020).

Na realização da distribuição granulométrica da areia obteve-se um módulo de finura (MF) de 2,66, classificando-a em areia média, com o diâmetro máximo de 4,75 mm e massa específica seca 2,50 g/cm<sup>3</sup>.

Com os resultados da caracterização do material, foram definidos os intervalos de granulometria a serem utilizados como tamanho de grão. Considerando a disponibilidade de material retido nas peneiras, definiu-se inicialmente como o grão grosso o material passante na peneira 2,4 mm e retido na 1,2 mm; o grão médio sendo o passante na 1,2 mm e retido na 0,6 mm; e o fino como passante na 0,6 mm e retido na 0,15 mm. Optou-se por descartar os materiais dos extremos, como o passante na peneira com abertura de malha de 150 µm (fundo do peneiramento - contendo também a fração pulverulenta inferior a 75 µm), e o retido na peneira 2,4 mm por apresentar quantidades insuficientes e evitar presença de grãos maiores de impurezas.

#### 4.3 FIBRA DE POLIPROPILENO

A fibra utilizada na pesquisa é classificada como microfibras devido ao pequeno comprimento dos seus filamentos. Sua origem é polimérica, tendo o polipropileno como matéria-prima para o processamento por estiramento dos seus multifilamentos. Utilizou-se a fibra produzida pelo fabricante Maccaferri do Brasil Ltda,

comercializada sob a marca FibroMac 6 com comprimento de 6 mm. A orientação é que o material já é apto ao uso sem necessidade de tratamento posterior, também é informado que o mesmo não sofreu nenhum tratamento na fabricação após a formação dos filamentos. O Quadro 03 apresenta as características físicas e características mecânicas desta fibra, conforme divulgado em boletim técnico do fabricante.

Quadro 03 – Características físicas e características mecânicas da fibra FibroMac 6

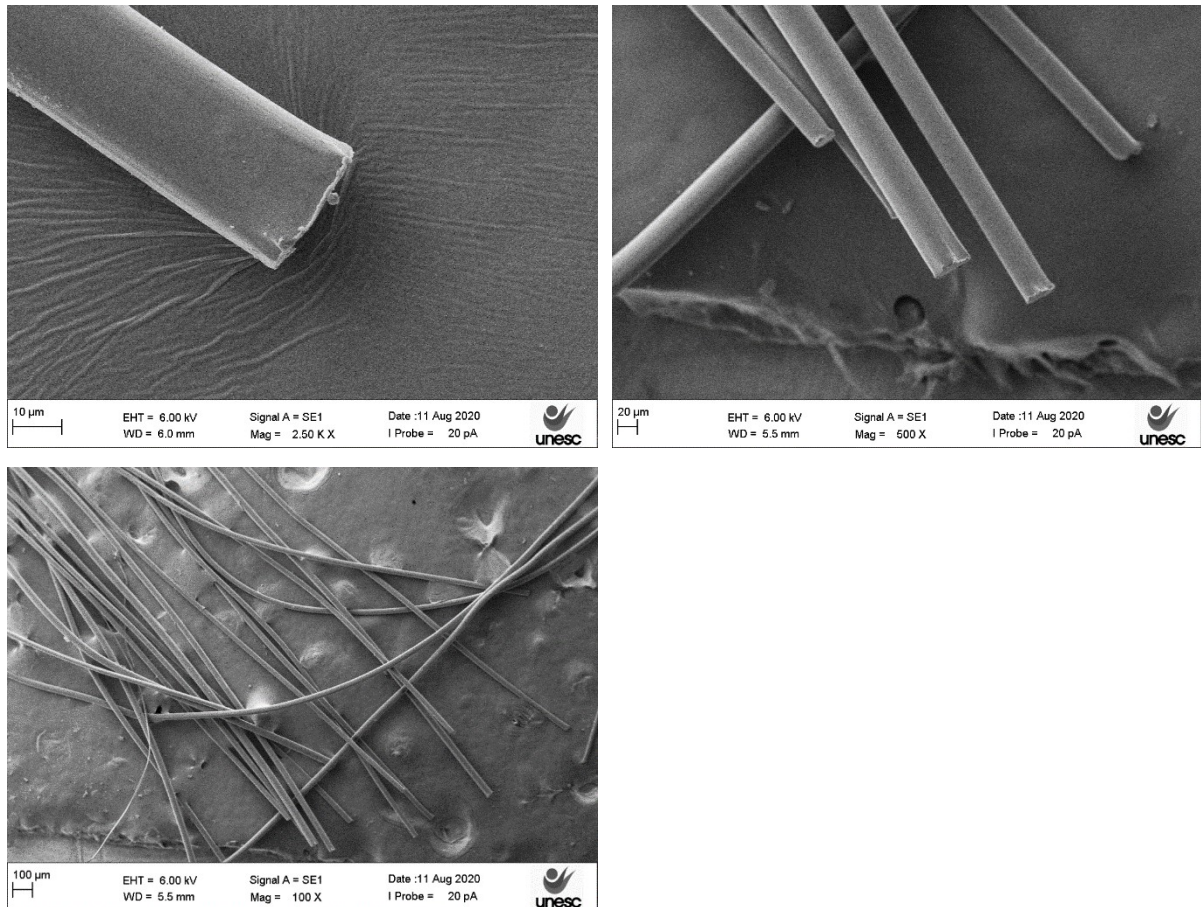
| <b>Características Físicas</b>   |                   |               |
|----------------------------------|-------------------|---------------|
| Diâmetro                         | μm                | 18            |
| Seção                            |                   | Circular      |
| Comprimento                      | mm                | 6             |
| Alongamento                      | %                 | 80            |
| Matéria-prima                    |                   | Polipropileno |
| Peso específico                  | g/cm <sup>3</sup> | 0,91          |
| <b>Características Mecânicas</b> |                   |               |
| Temperatura de fusão             | °C                | 160           |
| Temperatura de ignição           | °C                | 365           |
| Resistência à tração             | MPa               | 300           |
| Módulo de Young                  | MPa               | 3000          |

Fonte: Maccaferri do Brasil Ltda (2008).

A justificativa para a escolha deste tipo de fibra a utilizar no estudo é o conjunto das propriedades nela encontradas. Seu tamanho reduzido em comparação com as demais existentes e a flexibilidade dos seus filamentos auxiliam na reologia da argamassa e na trabalhabilidade para sua aplicação no estado fresco. A disponibilidade no mercado, o baixo custo de aquisição e sua boa aceitação na prática endossam os pontos favoráveis para o emprego desta fibra na pesquisa.

As amostras dos filamentos da fibra foram submetidas à análise em microscópio eletrônico de varredura (MEV). A Figura 08, mostra a seção circular dos filamentos com diâmetro médio de 18 μm constante em toda sua extensão, com superfície de aspecto liso e aparentemente uniforme. As extremidades apresentam imperfeições, rugosidades e leve variação da seção, aspectos provocados pelo corte dos filamentos em decorrência do seu processo de fabricação por estiramento.

Figura 08 – Microscopia eletrônica (MEV) de amostras da fibra de polipropileno



Fonte: Autor (2022).

#### 4.4 ÁGUA

A água utilizada nos experimentos foi fornecida pela concessionária local, sendo limpa e isenta de produtos nocivos à hidratação do cimento, conforme preconiza a NBR 15900-10:2009, sendo dispensada de realização de ensaios químicos.

## 5. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

### 5.1 PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO

O planejamento estatístico deste experimento é uma etapa importante a ser considerada, uma vez que objetiva uma representatividade e confiabilidade dos resultados encontrados, e que envolve variáveis essenciais no desempenho de uma argamassa e uma pasta de cimento. Assim, o planejamento experimental estatístico (*Design of experiments*, DoE) atua na definição das formulações, guia a execução do experimento, e auxilia na análise e interpretação dos resultados. Para Montgomery (2018), “todo experimento é um experimento planejado, alguns mal, outros muito bem planejados”, tendo assim uma opção de escolha do rumo do trabalho em questão.

Neste trabalho a análise do planejamento experimental estatístico foi realizada pela técnica da análise de variância (ANOVA), sendo a mais apropriada neste caso devido ao planejamento contar com mais de 2 fatores (variáveis envolvidas). Montgomery (2018) cita que o planejamento experimental estatístico é amplamente utilizado “quando é necessário estudar o efeito conjunto dos fatores em uma resposta”, em que um dos casos mais importantes é chamado de projeto fatorial  $2^k$ , sendo ‘k’ fatores estudados a dois níveis. O autor ainda cita que “os níveis podem ser quantitativos, como dois valores de temperatura, pressão ou tempo; ou eles podem ser qualitativos, como duas máquinas, dois operadores, os níveis alto e baixo de um fator, ou ainda a presença ou ausência de um fator”.

### 5.2 AS VARIÁVEIS E FORMULAÇÕES

O planejamento experimental deste trabalho foi aplicado inicialmente na composição básica dos constituintes da pasta de cimento e da argamassa, ambas reforçadas com fibra de polipropileno. Conforme mencionado na fundamentação teórica, uma pasta é caracterizada pela mistura de aglomerante e água. Assim, o seu planejamento contou com 3 fatores, a saber: cimento (aglomerante), água e a fibra de polipropileno a ser incorporada. Cada fator foi testado em 2 níveis, além de 1 ponto central em cada nível (valor médio). O planejamento fatorial do tipo  $2^k$  estudado está representado pela Equação 01:

$$2^3 + 1$$

(01)

A matriz cimentícia selecionada foram os dois tipos de cimento Portland informados no capítulo 4 (Materiais): cimento pozolânico CP IV e cimento de alta resistência inicial CP V. Como o tipo de cimento não pode ser caracterizado como nível quantitativo (pois é a matriz), esta variável foi abordada com um fator qualitativo. A composição deles é o item preponderante para se abordar esses dois tipos de cimento no estudo, pois com a presença da cinza pozolânica no CP IV e sua ausência no CP V pode-se verificar a influência dela nas características finais da pasta na presença da fibra de polipropileno. Também foi utilizado um *blend* de 50% de cada tipo de cimento para utilizar como ponto central deste fator.

Quanto ao segundo fator do planejamento, a água, sua medida é sempre relacionada à quantidade de cimento, pela relação água / cimento. Foi essencial considerá-la neste estudo para garantir a variação nas propriedades da pasta no estado fresco e características no estado endurecido (visto que a água é a responsável pela hidratação da matriz cimentícia). A relação água / cimento (fator quantitativo) foi selecionada em dois níveis: 0,3 e 0,5, adotando 0,4 como o ponto central.

Por fim, a adição da fibra de polipropileno no planejamento foi o terceiro fator (quantitativo). Muito se pesquisou a respeito do teor a considerar na pesquisa, visto que não se tem uma quantidade ideal normativa ou que seja consenso entre pesquisadores e/ou fabricantes. Estudos como o de Oliveira (2001) abordaram teores entre 0,05% a 0,3%, já Alsadey (2016) avaliou em um range mais elevado de 0,5%, 1,0% e 1,5%, e Habib (2013) incorporou até 2,0% nos seus experimentos. Fabricantes deste material, como o da fibra utilizada nesta pesquisa, recomendam que a utilização de 0,2% seja suficiente para aplicação na prática. Desta forma, considerando tanto as recomendações de fabricantes quanto pesquisas já realizadas, empregou-se neste trabalho os teores de 0% e 0,4% sobre a massa do cimento, adotando 0,2% como ponto central. Com isto tem-se um intervalo formado por dois níveis em que se busca encontrar variação das propriedades mensuradas na pasta com a adição de fibra.

Com a aplicação do planejamento fatorial para obtenção das pastas, todas as combinações possíveis dos níveis fatoriais foram testadas. A Tabela 03 mostra as nove combinações ou formulações utilizadas.

Tabela 03 – Matriz experimental tipo fatorial  $2^k$  com ponto central para pasta de cimento

| Formulação | Cimento | A/C | % Fibra | Identificação |
|------------|---------|-----|---------|---------------|
| 1          | IV      | 0,3 | 0       | A1            |
| 2          | IV      | 0,3 | 0,4     | A2            |
| 3          | IV      | 0,5 | 0       | A3            |
| 4          | IV      | 0,5 | 0,4     | A4            |
| 5          | V       | 0,3 | 0       | A5            |
| 6          | V       | 0,3 | 0,4     | A6            |
| 7          | V       | 0,5 | 0       | A7            |
| 8          | V       | 0,5 | 0,4     | A8            |
| 9          | IV + V  | 0,4 | 0,2     | A9            |

Fonte: Autor (2022).

Na Tabela 03 tem-se os seguintes itens:

- Cimento: Tipo de cimento Portland a ser usado, IV (tipo CP IV), IV+V (mistura dos cimentos), V (tipo CP V).
- A/C: relação água / cimento, 0,3, 0,4, 0,5.
- % Fibra: quantidade de fibra, 0%, 0,2%, 0,4%.
- O ponto central deste planejamento considera o valor intermediário dos níveis das variáveis em estudo: 0,4 para a relação A/C, 0,2% de adição de fibra de polipropileno, e a mistura 50%/50% dos cimentos CP IV e CP V. Todos os valores considerados foram em relação à massa seca de cimento.

Para os estudos na argamassa de revestimento, os conceitos do planejamento fatorial  $2^k$  aplicados na pasta foram repetidos. No entanto, o ponto de partida foi a pasta ótima obtida pela realização de todo planejamento fatorial desta (após a análise dos resultados). Os critérios para designar qual a pasta ótima para continuar os estudos na argamassa foram definidos após os ensaios realizados no capítulo 6 (Metodologia). Uma argamassa, além da pasta, leva a inclusão do agregado miúdo (areia), podendo ou não ser aditivada (fator não considerado neste trabalho).

Assim, nesta etapa do estudo tem-se somente a variação da areia para analisar, a 2 fatores: o traço da areia (variável quantitativa) e a sua granulometria (variável qualitativa). Para o traço, que representa numericamente a quantidade de areia em relação a uma unidade de cimento (em massa) foram inicialmente adotados

1:1 e 1:5, com um ponto central (1:3). O questionamento a ser respondido ao final desta etapa é qual o comportamento dos traços com quantidade reduzida de areia (1:1), quantidade intermediária (1:3) e quantidade maior (1:5) na presença de um percentual determinado de fibra de polipropileno encontrado na pasta de cimento otimizada. Para a granulometria da areia foi analisado o seu comportamento mediante a separação em três faixas de tamanhos de partículas: fina, média e grossa (sendo a de média o ponto central). Esta separação ocorreu por processo de peneiramento, obtendo os grãos entre 2,4 mm a 0,15 mm.

Com a aplicação do planejamento fatorial para obtenção das argamassas, todas as combinações possíveis dos níveis fatoriais foram testadas. A Tabela 04 mostra as cinco combinações ou formulações encontradas.

Tabela 04 – Matriz experimental tipo fatorial  $2^k$  com ponto central para argamassa

| Formulação | Pasta | Traço (Areia) | Granulometria (Areia) | Identificação |
|------------|-------|---------------|-----------------------|---------------|
| 10         | P.O.  | T1            | F                     | B1            |
| 11         | P.O.  | T1            | G                     | B2            |
| 12         | P.O.  | T5            | F                     | B3            |
| 13         | P.O.  | T5            | G                     | B4            |
| 14         | P.O.  | T3            | M                     | B5            |

Fonte: Autor (2022).

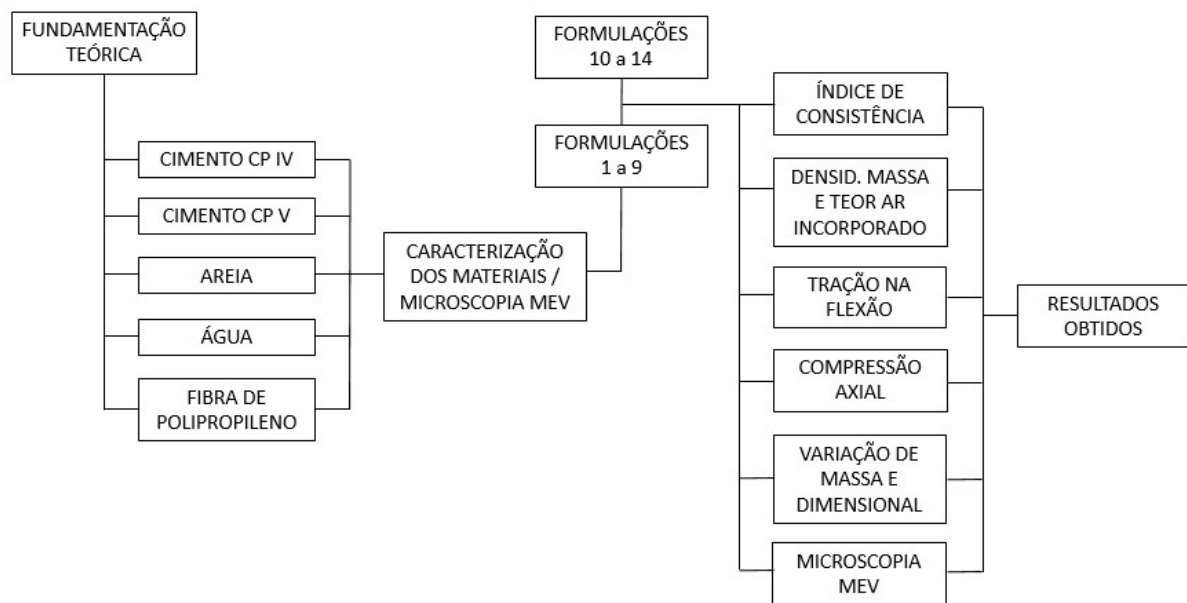
Na Tabela 04 tem-se os seguintes itens:

- P.O.: pasta ótima de cimento.
- Traço: T1 (1:1), T3 (1:3), T5 (1:5).
- Granulometria: G (grossa), M (média), F (fina).
- O ponto central deste planejamento considera o valor intermediário dos níveis das variáveis em estudo, 1:3 para traço (T3), e média para a granulometria da areia (M).

## 6. METODOLOGIA

No passo inicial para o desenvolvimento da pesquisa houve a definição do planejamento fatorial  $2^k$  apresentado no capítulo 5 (Planejamento Experimental). Desta forma foram obtidas as formulações a serem ensaiadas tanto para a obtenção das pastas quanto para as argamassas. O desenvolvimento da metodologia seguiu o fluxograma elaborado na Figura 09.

Figura 09 – Fluxograma da metodologia utilizada



Fonte: Autor (2022).

### 6.1 PASTAS - PREPARAÇÃO E DOSAGEM

Os procedimentos experimentais das formulações, caracterizações, preparos de corpos de prova, e ensaios nos estados fresco e endurecido foram executados nas instalações do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) e do Laboratório Experimental de Estruturas (LEE) do Instituto de Engenharia e Tecnologia (i·dt) do Parque Científico e Tecnológico (i·parque) da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC).

Com as composições da Tabela 03 foram obtidas as quantidades em massa de cimento e água sobre o volume estimado de pasta a produzir em cada uma, entre 1.000 e 1.300 cm<sup>3</sup> (dentro da capacidade e trabalhabilidade da argamassadeira

utilizada). Os resultados são expressos na Tabela 05. As quantidades encontradas resultaram da aplicação da Equação 02 em função do volume total da pasta, utilizando a massa específica dos componentes e relação água / cimento. O cálculo da massa de fibra foi sobre o volume da pasta.

$$C_{im} = \frac{V_{mistura}}{V_{componentes}} \quad (02)$$

Tabela 05 – Massa dos componentes das formulações das pastas

| Formulação | Cimento CP IV (g) | Cimento CP V (g) | Água (g) | Fibra (g) | Volume (cm <sup>3</sup> ) |
|------------|-------------------|------------------|----------|-----------|---------------------------|
| A1         | 1.539,3           | -                | 461,8    | -         | 1.000                     |
| A2         | 1.539,3           | -                | 461,8    | 3,64      | 1.000                     |
| A3         | 1.530,0           | -                | 765,0    | -         | 1.300                     |
| A4         | 1.530,0           | -                | 765,0    | 4,73      | 1.300                     |
| A5         | -                 | 1.611,6          | 483,5    | -         | 1.000                     |
| A6         | -                 | 1.611,6          | 483,5    | 3,64      | 1.000                     |
| A7         | -                 | 1.584,4          | 792,2    | -         | 1.300                     |
| A8         | -                 | 1.584,4          | 792,2    | 4,73      | 1.300                     |
| A9         | 884,3             | 884,3            | 707,4    | 2,37      | 1.300                     |

Fonte: Autor (2022).

Para a preparação das formulações utilizou-se balança de precisão (0,1g) para aferir a massa dos componentes (Figura 10). Os materiais foram homogeneizados em misturador mecânico com cuba de aço inoxidável (argamassadeira) com volume total de 5 L e pá de agitação com movimento planetário em duas velocidades (Figura 11), conforme especificação das normas ASTM C305-20 *Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency* e NBR 16541:2016 Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – preparo da mistura para realização de ensaios.

Figura 10 – Dosagem dos componentes das formulações



Fonte: Autor (2022).

Para o procedimento de mistura adotou-se como base as orientações das mesmas ASTM C305-20 e NBR 16541:2016, esta última especificada apenas para argamassas. Devido às características da fibra de polipropileno de ser fornecida em pequenos aglomerados, teve-se o cuidado de dispersá-las ao máximo de forma manual antes da pesagem. A sua adição na mistura ocorreu com os demais materiais em processo de homogeneização na argamassadeira, de forma manual e gradativa (durante o tempo de 20 segundos) para a não formação de agrupamentos conforme sugerido por Ronconi (2018) em sua pesquisa (visto que a forma de inserção da fibra na mistura não é mencionada nas normas anteriores). Falhas na dispersão da mistura podem provocar retenção de parte da água da mistura.

Figura 11 – Homogeneização das misturas em argamassadeira



Fonte: Autor (2022).

## 6.2 PASTAS - ENSAIOS APLICADOS

Para a caracterização dos ensaios no estado fresco, amostras das pastas foram coletadas da cuba da argamassadeira para determinação do índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado. Para o estado endurecido, foram moldados corpos de prova para avaliação da resistência à tração na flexão, resistência à compressão, variação dimensional e de massa. Nos tópicos a seguir são detalhados estes ensaios.

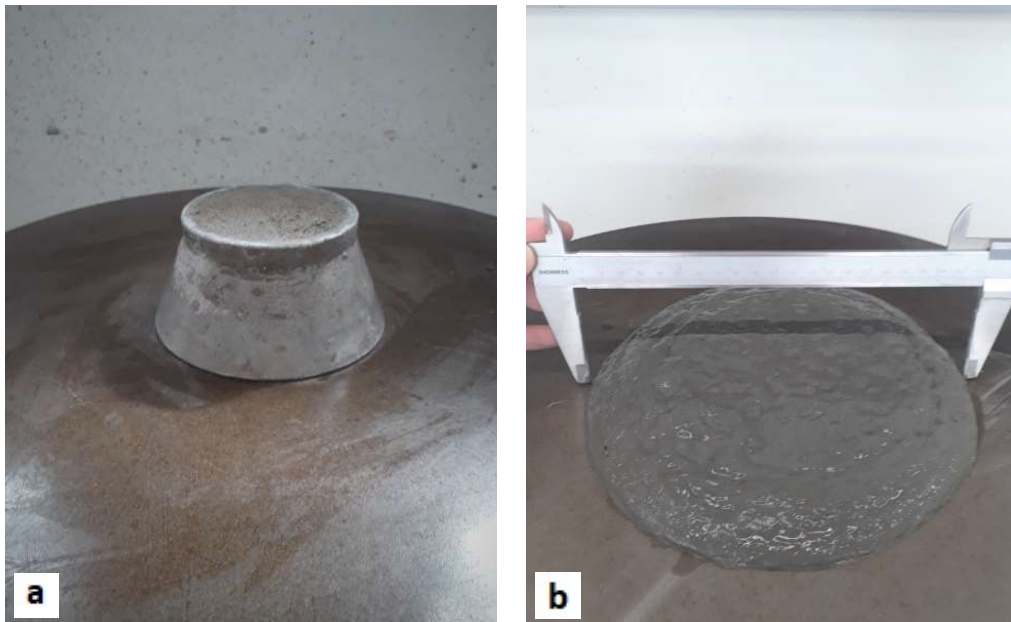
### 6.2.1 Índice de Consistência

O manuseio de uma argamassa para aplicação no estado fresco é uma das principais propriedades a serem caracterizadas, podendo esta trabalhabilidade do material ser referenciada pela sua consistência. As normas NBR 13276:2016 Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência, e a ASTM C1437-15 *Standard test method for flow of hydraulic cement mortar* trazem as orientações para esta caracterização. Esta metodologia foi também aplicada nas formulações das pastas,

como forma de verificar sua trabalhabilidade, sendo adotado o procedimento da norma brasileira.

A execução do ensaio ocorreu com o preenchimento do molde troncônico em três camadas de pastas para moldagem da amostra, que após sua desforma recebeu aplicação de 30 golpes pela mesa de adensamento manual. Com o auxílio de um paquímetro com precisão de 0,5  $\mu\text{m}$  aferiu-se a medida do espalhamento da pasta, caracterizando o índice de consistência (Figura 12).

Figura 12 – Determinação do índice de consistência em mesa de adensamento: (a) Moldagem da pasta no molde troncônico. (b) Medição do espalhamento.



Fonte: Autor (2022).

### 6.2.2 Densidade de Massa e Teor de Ar Incorporado

A determinação desses parâmetros no estado fresco da pasta ou argamassa é importante para correlacionar os resultados dos ensaios de resistência no estado endurecido. A NBR 13278:2005 Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, define a metodologia do ensaio para apuração destes parâmetros, sendo utilizada nesta pesquisa também para as pastas.

Para a determinação da densidade de massa foram obtidas inicialmente as massas do recipiente cilíndrico metálico padronizado vazio e preenchido com água, como entradas para o cálculo. As amostras das pastas foram recolhidas da cuba da

argamassadeira após o preparo, introduzidas no recipiente metálico em três camadas com a aplicação de 20 golpes de espátula em cada uma, e o recipiente levado à balança para obtenção da sua massa (Figura 13).

A densidade de massa ( $D$ ) pode ser obtida aplicando a Equação 03:

$$D = \frac{M_c - M_v}{V_r} * 1000 \quad (03)$$

onde:

$D$  – densidade de massa ( $\text{kg/m}^3$ )

$M_c$  – massa do recipiente cilíndrico com a amostra do ensaio (g)

$M_v$  – massa do recipiente cilíndrico vazio (g)

$V_r$  – volume do recipiente cilíndrico vazio ( $\text{cm}^3$ )

Figura 13 – Determinação da densidade de massa



Fonte: Autor (2022).

Com a obtenção da densidade de massa ( $D$ ), pode-se calcular o teor de ar incorporado ( $A$ ) das amostras com a Equação 04.

$$A = 100 * \left(1 - \frac{D}{D_t}\right) \quad (04)$$

onde:

$A$  – teor de ar incorporado (%)

$D$  – densidade de massa ( $\text{g/cm}^3$ )

$Dt$  – densidade de massa teórica, sem vazios ( $\text{g/cm}^3$ )

Ainda segundo a NBR 13278:2005, para argamassas dosadas em obra (não industrializadas) a densidade de massa teórica ( $Dt$ ) deve ser calculada pela Equação 05:

$$Dt = \frac{\sum Mi}{\sum \frac{Mi}{\gamma_i}} \quad (05)$$

onde:

$Dt$  – densidade de massa teórica

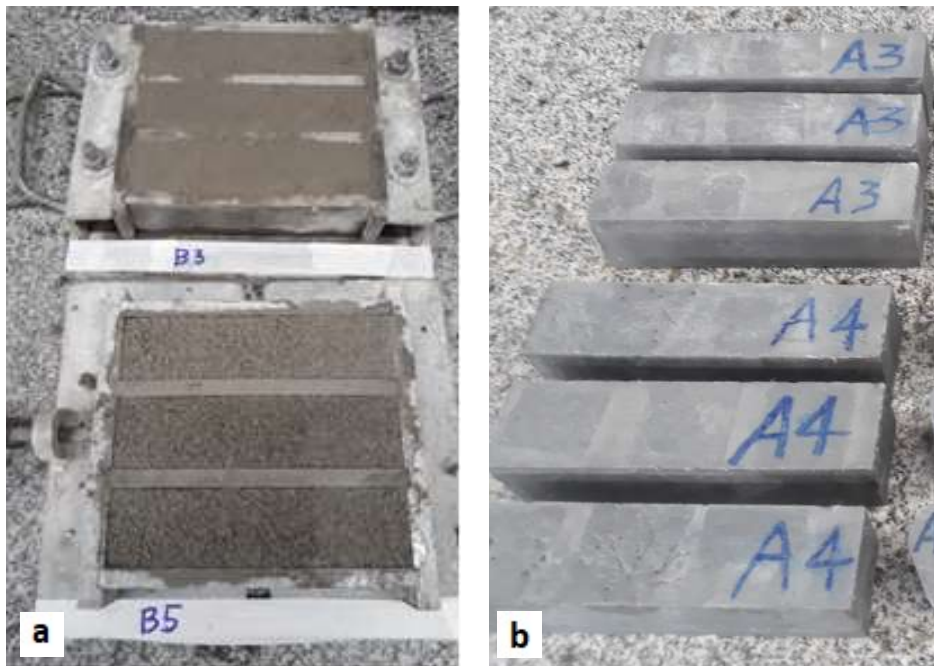
$Mi$  – massa seca de cada componente da argamassa, e massa da água

$\gamma_i$  – massa específica de cada componente da argamassa

### 6.2.3 Resistência à Tração na Flexão

No estado endurecido as pastas foram avaliadas inicialmente quanto à resistência à tração na flexão. Seguindo os procedimentos da NBR 13279:2005 Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, utilizou-se o conjunto padrão de três moldes prismáticos metálicos para produção dos corpos de prova com dimensão 40 mm x 40 mm x 160 mm de cada amostra. As pastas foram inseridas nos moldes em duas camadas e adensadas a 30 golpes cada com o auxílio da mesa de adensamento (Figura 14 a). Após 24h ocorreu a desforma dos corpos de prova e a aplicação de cura úmida em tanque até o rompimento (Figura 14 b).

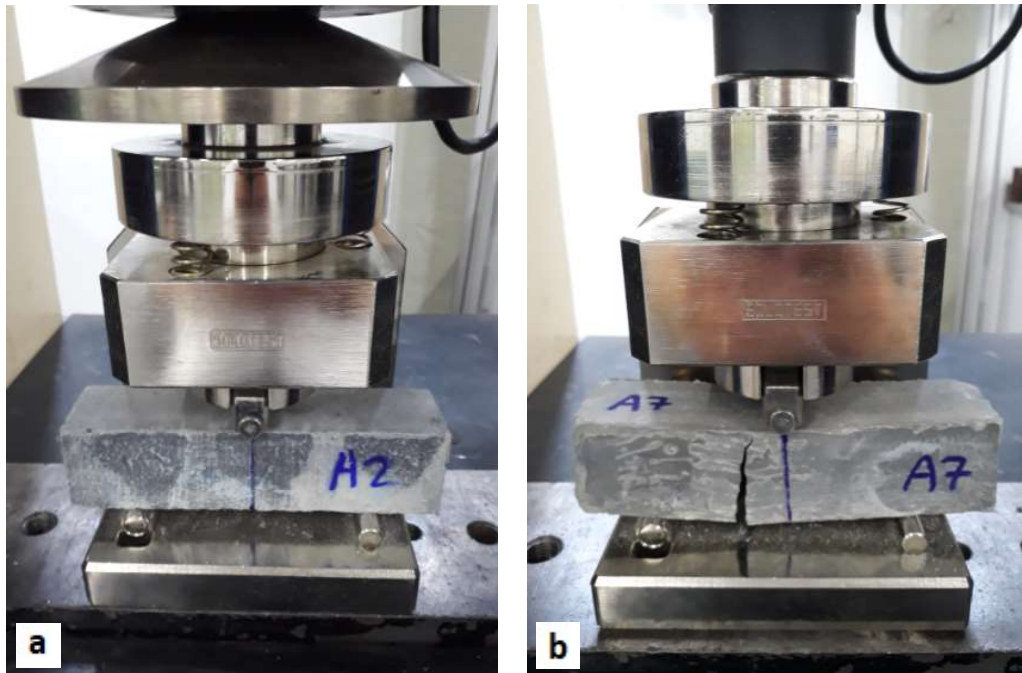
Figura 14 – Corpos de prova para ensaios de resistência: (a) Moldagem.  
(b) Idade 28 dias.



Fonte: Autor (2022).

Com a idade de 28 dias de cura preconizada pela norma, promoveu-se o rompimento de três corpos de prova de cada formulação em equipamento tipo prensa servo hidráulica da fabricante EMIC modelo DL10000. O tipo de ensaio aplicado foi o de flexão a 3 pontos, com distância de 100 mm entre os apoios inferiores e velocidade de aplicação de carga 2 mm/min (Figura 15).

Figura 15 – Ensaio de resistência à tração na flexão de 3 pontos: (a) Preparação do corpo de prova no equipamento. (b) Rompimento do corpo de prova.



Fonte: Autor (2022).

Com a carga aplicada até o rompimento dos corpos de prova, pode-se calcular a resistência à tração na flexão das amostras com a Equação 06.

$$R_f = \frac{1,5 * F_f * L}{40^3} \quad (06)$$

onde:

$R_f$  – resistência à tração na flexão (MPa)

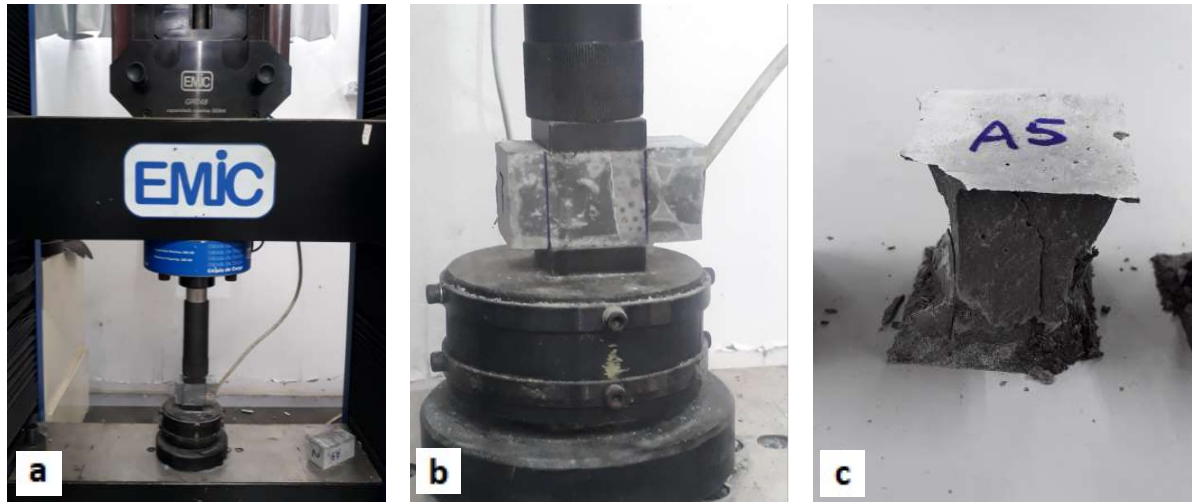
$F_f$  – carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N)

$L$  – distância entre os apoios (mm)

#### 6.2.4 Resistência à Compressão Axial

No estado endurecido as pastas foram avaliadas também aos 28 dias de idade quanto a resistência à compressão axial, de acordo com a NBR 13279:2005, sendo ensaiadas nas metades dos corpos de prova após ensaio de resistência à tração na flexão. O equipamento utilizado foi uma prensa servo hidráulica da fabricante EMIC modelo DL30000, com o dispositivo de carga de dimensões 40 mm x 40 mm e velocidade de aplicação de carga 2 mm/min (Figura 16).

Figura 16 – Ensaio de resistência à compressão axial: (a) Preparação do corpo de prova e equipamento. (b) Rompimento do corpo de prova. (c) Corpo de prova pós ruptura



Fonte: Autor (2022).

Com a carga aplicada até o rompimento dos corpos de prova, pode-se calcular a resistência à compressão das amostras com a Equação 07.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (07)$$

onde:

$R_c$  – resistência à compressão (MPa)

$F_c$  – carga máxima aplicada (N)

### 6.2.5 Variação Dimensional e de Massa

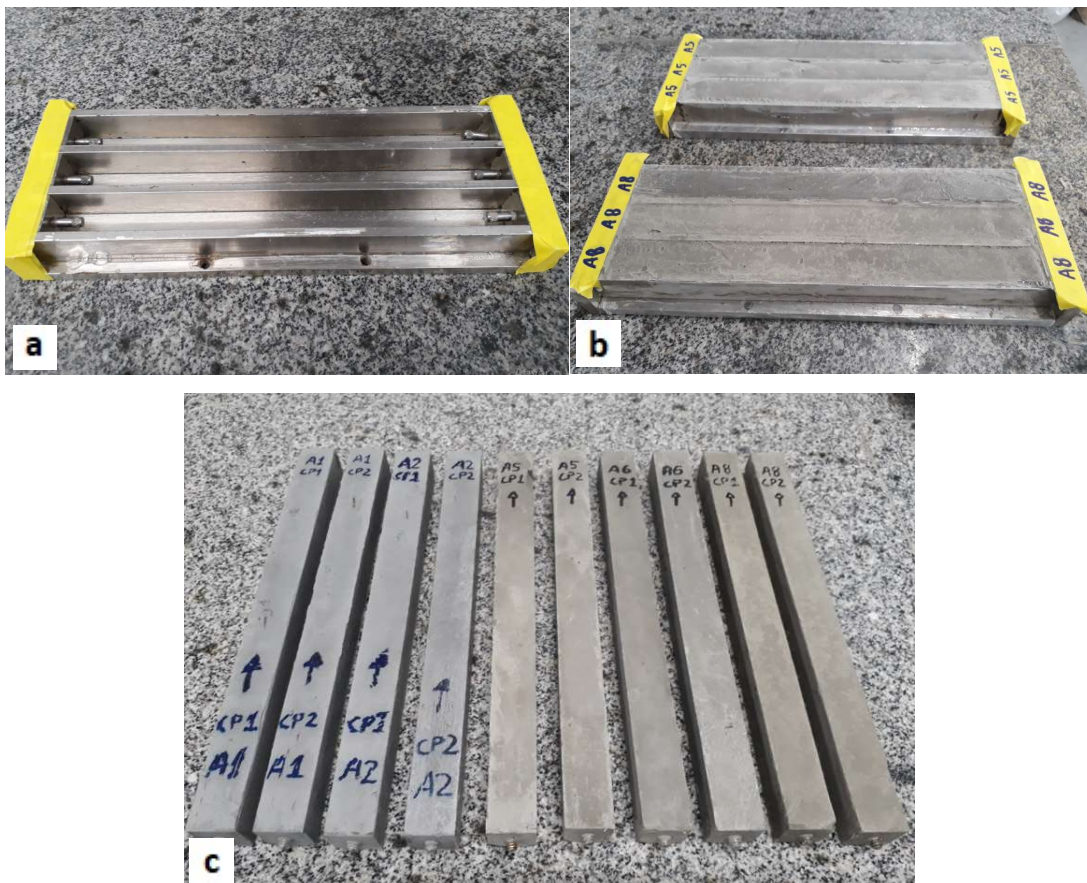
A incorporação das fibras de polipropileno não estruturais nas argamassas tendenciam a mitigar as fissuras provocadas pela retração, atuando na variação dimensional da mesma durante a fase de endurecimento e secagem no substrato. A NBR 15261:2005 traz uma metodologia para determinação da variação dimensional de corpos de prova de argamassa (retração ou expansão linear), a qual foi aplicada neste estudo para avaliar o comportamento das formulações das pastas e argamassas, com e sem a presença de fibra.

Para as pastas foram utilizadas as formulações da Tabela 05, que seguiram os procedimentos de mistura e homogeneização do item 6.1. A partir de então seguiu-

se os procedimentos da NBR 15261:2005, preparando os moldes específicos de 25 mm x 25 mm x 285 mm com a inserção de 02 pinos metálicos nas extremidades e padronizando o comprimento efetivo em 250 mm (Figura 17a). Foram moldados 02 corpos de prova de cada formulação, com preenchimento das pastas em duas camadas no molde e aplicando 25 golpes com o soquete padrão em ambas (Figura 17b). Após 48h ocorreu a desmoldagem e obtenção dos corpos de prova para aferição das leituras iniciais (Figura 17c).

Figura 17 – Obtenção dos corpos de prova para aferição da variação dimensional:

(a) Moldes. (b) Moldagem das formulações. (c) Corpos de prova

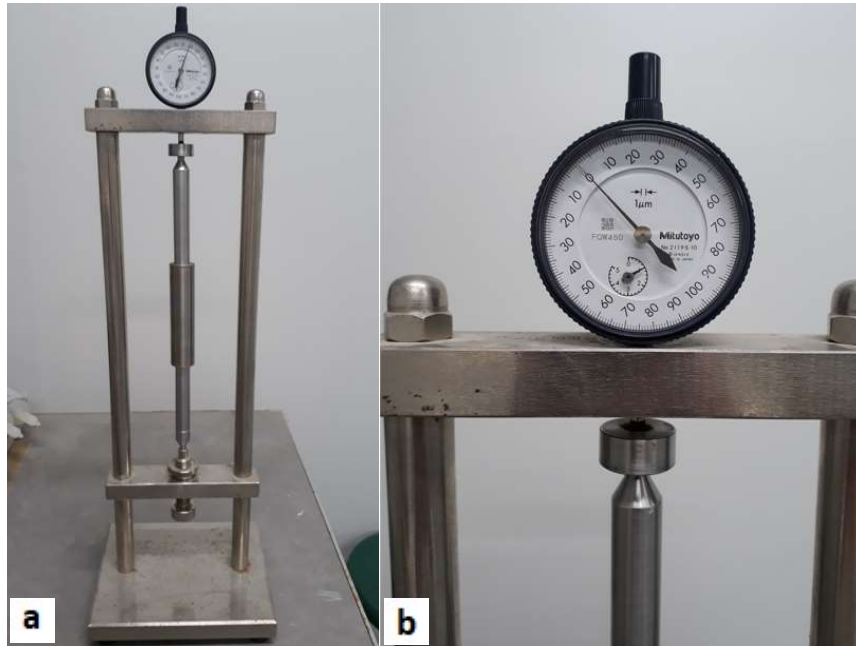


Fonte: Autor (2022).

Para as leituras, foram utilizados balança de precisão 0,01 g para aferição da massa e equipamento com relógio comparador analógico marca Mitutoyo modelo 2119S-10 com precisão 0,001 mm e capacidade de leitura até 5 mm de variação máxima, para aferição da variação dimensional (Figura 18). A calibração do relógio ocorreu antes de cada medição, utilizando a barra padrão conforme as características

da norma, sendo zerado na leitura 1 mm para possibilitar assim a medida de retração abaixo do comprimento da barra padrão caso fosse necessário.

Figura 18 – Equipamento com relógio comparador e barra metálica padrão de calibração: (a) Vista Geral. (b) Relógio comparador calibrado.



Fonte: Autor (2022).

Além das leituras iniciais após desmoldagem dos corpos de prova, foram aferidas também as leituras com idades de 3 dias, 7 dias e 28 dias quanto à massa e variação dimensional. Os corpos de prova e o equipamento permaneceram durante o período em sala / ambiente controlado. A norma prevê que cada corpo de prova seja posicionado da mesma forma no aparelho e permitindo o livre giro do mesmo para obter a leitura, visto a precisão do relógio. Os resultados da variação dimensional são apresentados em milímetros por metro (mm/m) e a variação da massa em gramas (g).

### 6.3 DETERMINAÇÃO DA PASTA ÓTIMA

Após caracterizadas e ensaiadas todas as formulações das pastas de cimento da Tabela 05, os resultados obtidos foram submetidos ao tratamento estatístico pelo método da ANOVA no programa *Statistica 12 versão Trial*. O objetivo foi avaliar a interferência das variáveis e seus níveis nos resultados encontrados, e assim elencar uma formulação que apresente numericamente bons resultados para

seguir na etapa das argamassas, designada de pasta ótima (P.O.). Para isso, tal formulação precisaria apresentar índice de consistência que permita uma trabalhabilidade visualmente adequada, alta densidade de massa, baixo teor de ar incorporado, baixos percentuais de variação de massa e de variação dimensional, além de valores altos para resistência à compressão e resistência à tração na flexão

#### 6.4 ARGAMASSAS - PREPARAÇÃO E DOSAGEM

Com a definição da pasta ótima (P.O.), os estudos experimentais passaram a incorporar o agregado miúdo, tornando-a a partir deste ponto uma argamassa, variando sua granulometria e quantidade (traço). Estas variáveis acrescidas na P.O. compõem então as formulações da Tabela 06.

Para a dosagem dos componentes, utilizou-se a mesma metodologia aplicada nas pastas (usando a Equação 02), obtendo-se as quantidades em massa de cimento, água e areia para produção de 1.000 cm<sup>3</sup> de cada formulação de argamassa da Tabela 04. Os resultados são expressos na Tabela 06. O cálculo da massa de fibra também ocorreu sobre este volume produzido.

Tabela 06 – Massa dos componentes das formulações das argamassas

| Formul. | Cimento<br>CP V (g) | Areia<br>(g) | Água<br>(g) | Fibra<br>(g) | Volume<br>(cm <sup>3</sup> ) | Areia<br>Traço | Areia<br>Granulom. | A/C | Fibra<br>% |
|---------|---------------------|--------------|-------------|--------------|------------------------------|----------------|--------------------|-----|------------|
| B1      | 979,9               | 979,9        | 294,0       | 3,64         | 1.000                        | 1:1            | Fina               | 0,3 | 0,4        |
| B2      | 979,9               | 979,9        | 294,0       | 3,64         | 1.000                        | 1:1            | Grossa             | 0,3 | 0,4        |
| B3      | 381,6               | 1.908,0      | 114,5       | 3,64         | 1.000                        | 1:5            | Fina               | 0,3 | 0,4        |
| B4      | 381,6               | 1.908,0      | 114,5       | 3,64         | 1.000                        | 1:5            | Grossa             | 0,3 | 0,4        |
| B5      | 549,3               | 1.647,9      | 164,8       | 3,64         | 1.000                        | 1:3            | Média              | 0,3 | 0,4        |

Fonte: Autor (2022).

Os procedimentos de pesagem, homogeneização e preparo das argamassas seguiram os mesmos adotados com as pastas, assim como os instrumentos e equipamentos utilizados. As etapas de caracterização no estado fresco e posterior moldagem de corpos de prova seguiram da mesma forma.

Porém, durante a homogeneização das argamassas no agitador percebeu-se a ausência/baixa de trabalhabilidade de algumas delas devido à falta de coesão das partículas, que impedia a própria homogeneização da mistura e futura moldagem

dos corpos de prova. Foi necessário então aumentar a quantidade de água para continuar o estudo, e optou-se por repetir o ensaio para estas formulações com incremento gradativo de 0,05 na relação A/C até se obter uma trabalhabilidade satisfatória medida pelo índice de consistência, obtendo-se ao final um I.C. médio entre 141 e 184 mm para A/C entre 0,40 e 0,60. Para a formulação B3, mesmo com A/C 0,75, não foi possível medir o I.C.

Como nesta etapa as variáveis e seus níveis precisaram ser ajustados (conforme resultados em 7.1.2) denominou-se como etapa de pré-testes, visto que os resultados obtidos com as formulações inicialmente definidas na Tabela 04 não obtiveram êxito para dar sequência no trabalho. Com estes ajustes, as formulações da Tabela 06 dão lugar às formulações ajustadas na Tabela 07.

Tabela 07 – Massa ajustada dos componentes das argamassas após fase de pré-testes

| Formul. | Cimento CP V (g) | Areia (g) | Água (g) | Fibra (g) | Volume (cm <sup>3</sup> ) | Areia Traço | Areia Granulom. | A/C | Fibra % |
|---------|------------------|-----------|----------|-----------|---------------------------|-------------|-----------------|-----|---------|
| B1a     | 979,9            | 979,9     | 489,9    | 3,64      | 1.000                     | 1:1         | Fina            | 0,5 | 0,4     |
| B2a     | 979,9            | 979,9     | 489,9    | 3,64      | 1.000                     | 1:1         | Grossa          | 0,5 | 0,4     |
| B3a     | 549,3            | 1.647,9   | 274,6    | 3,64      | 1.000                     | 1:3         | Fina            | 0,5 | 0,4     |
| B4a     | 549,3            | 1.647,9   | 274,6    | 3,64      | 1.000                     | 1:3         | Grossa          | 0,5 | 0,4     |
| B5a     | 704,0            | 1.407,9   | 352,0    | 3,64      | 1.000                     | 1:2         | Média           | 0,5 | 0,4     |

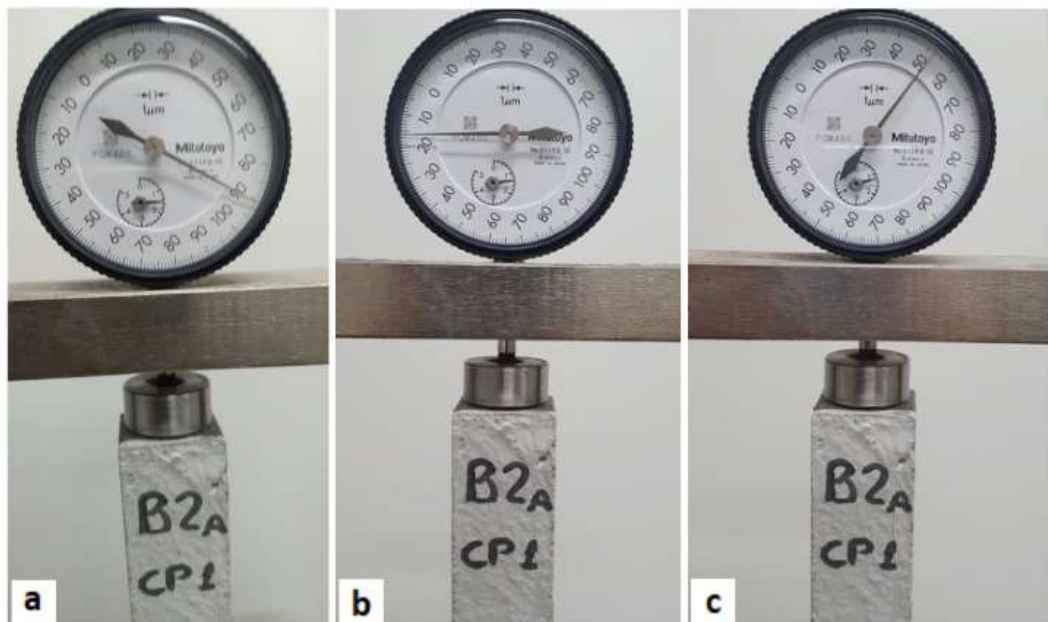
Fonte: Autor (2022).

Com as formulações ajustadas da Tabela 07, seguiu-se a metodologia descrita no item 6.2 para os procedimentos de pesagem, dosagem e homogeneização de cada formulação da argamassa. A avaliação no estado fresco do índice de consistência foi possível em todas elas, diferente da etapa de pré-testes. Os procedimentos para determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado foram executados conforme o item 6.2.2. As moldagens dos corpos de prova para caracterização no estado endurecido também foram executadas, e após 28 dias de cura foram submetidos à avaliação da resistência mecânica à tração na flexão e resistência à compressão axial, conforme os itens 6.2.3 e 6.2.4.

## 6.5 ARGAMASSAS - VARIAÇÃO DIMENSIONAL E DE MASSA

Seguindo os mesmos procedimentos descritos no item 6.2.5 para as pastas, as formulações de argamassa da Tabela 07 também foram avaliadas quanto à variação dimensional para observação da perda de massa e retração dos corpos de prova, nas idades de 3, 7 e 28 dias de idade. A Figura 19 ilustra o registro no relógio comparador das leituras do corpo de prova CP1 da formulação B2a.

Figura 19 – Exemplo medição variação dimensional corpo de prova CP1 da formulação B2a: (a) 3d: 1,490 mm, (b) 7d: 1,384 mm, (c): 28d: 1,252 mm.



Fonte: Autor (2022).

## 7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 7.1. RESULTADOS OBTIDOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos nas caracterizações e ensaios produzidos com as formulações e corpos de prova das pastas e argamassas, no formato de tabelas de dados e gráficos. Todos estes resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) em triplicata, não pela média. A ANOVA acompanha cada caracterização e ensaio, sendo apresentada e discutida a tabela desta análise e o diagrama de Pareto com os fatores e/ou interações. Além disto, é apresentado e discutido o gráfico de médias para fatores isolados com significância ou então o gráfico de superfície de resposta para interações com significância. Quando houverem estas significâncias mínimas de 95% também é apresentada a equação de regressão linear para a variável em questão. Na seção de Anexos são apresentadas as tabelas com coeficientes gerados pela ANOVA que permitem a elaboração destas equações.

#### 7.1.1. Pastas

As formulações da Tabela 05 foram avaliadas quanto a sua trabalhabilidade pela medição do índice de consistência (I.C.), apresentado na Tabela 08.

Tabela 08 – Índice de consistência das pastas

| Combinação | Cimento | A/C | % Fibra | Média (mm) | Desvio Padrão |
|------------|---------|-----|---------|------------|---------------|
| A1         | IV      | 0,3 | 0       | 240        | 1,63          |
| A2         | IV      | 0,3 | 0,4     | 238        | 0,82          |
| A3         | IV      | 0,5 | 0       | 374        | 1,25          |
| A4         | IV      | 0,5 | 0,4     | 353        | 2,05          |
| A5         | V       | 0,3 | 0       | 213        | 1,70          |
| A6         | V       | 0,3 | 0,4     | 214        | 1,25          |
| A7         | V       | 0,5 | 0       | 352        | 20,54         |
| A8         | V       | 0,5 | 0,4     | 365        | 0,47          |
| A9         | IV + V  | 0,4 | 0,2     | 269        | 5,44          |

Fonte: Autor (2022).

Para analisar o efeito da adição de fibra de polipropileno, da relação água / cimento e do tipo de cimento sobre o índice de consistência das pastas, foi realizada uma análise estatística dos resultados obtidos na Tabela 08. A Tabela 09 apresenta a análise de variância para os resultados de índice de consistência das pastas.

Tabela 09 – ANOVA para índice de consistência das pastas ( $R^2 = 0,982$ )

| Fator       | SS       | df | MS       | F        | p        |
|-------------|----------|----|----------|----------|----------|
| (1) Cimento | 460,06   | 1  | 460,06   | 1,4335   | 0,353853 |
| (2) A/C     | 36180,50 | 1  | 36180,50 | 112,7368 | 0,008754 |
| (3) % fibra | 12,50    | 1  | 12,50    | 0,0389   | 0,861788 |
| 1 × 2       | 213,56   | 1  | 213,56   | 0,6654   | 0,500348 |
| 1 × 3       | 162,00   | 1  | 162,00   | 0,5048   | 0,551081 |
| 2 × 3       | 5,56     | 1  | 5,56     | 0,0173   | 0,907365 |
| Erro        | 641,86   | 2  | 320,93   |          |          |
| Total SS    | 37676,02 | 8  |          |          |          |

Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

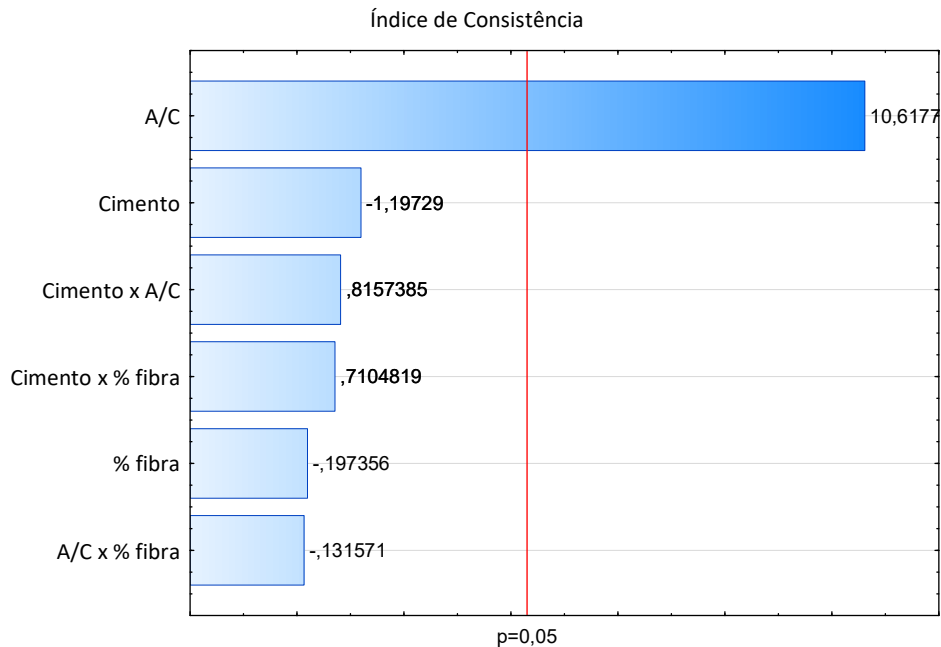
Fonte: Autor (2022).

A análise dos resultados da ANOVA para o índice da consistência das pastas, Tabela 09, mostra que o único fator com significância estatística para os resultados, dada pelo valor de p, foi a relação A/C, com um  $p < 0,05$  ( $p = 0,008$ ), o que resulta em uma significância estatística (confiabilidade) maior que 95%. Os demais fatores e suas interações não apresentaram significância estatística para o índice de consistência ( $p > 0,05$ ). Ele é uma propriedade relacionada com a capacidade de fluidez e espalhamento do material, representada pela proporção de água em relação aos sólidos da mistura. Sendo assim, o fator A/C é o que expressa essa relação, e por este motivo é determinante para alteração de resultados do índice de consistência (a qual foi validada pela análise da ANOVA em questão). O fator fibra, mesmo reduzindo na medida do abatimento, por ser uma adição na mistura não provocou alterações significativas. Os estudos de Karahan (2010) e Alsadey (2016) também verificaram que a adição de fibra em diferentes teores diminuiu a trabalhabilidade das misturas, reduzindo sua fluidez. O fator tipo de cimento não provoca alterações significativas de volume da matriz, por este motivo também não apresenta significância estatística.

A análise do diagrama de Pareto para o I. C. (Figura 20) ilustra graficamente que a relação A/C é o principal fator que a influencia. O tipo de cimento e a presença

das fibras, que apresentam pouca influência sobre o I. C., obtiveram significância dos resultados abaixo de 95% conforme visto anteriormente.

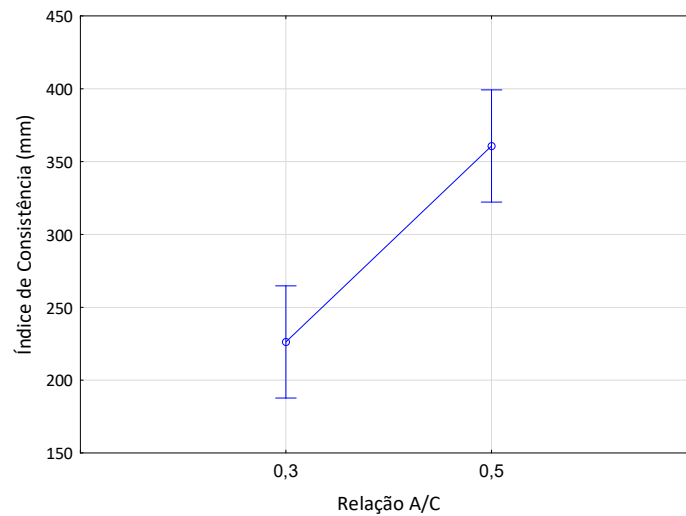
Figura 20 – Diagrama de Pareto para índice de consistência das pastas



Fonte: Autor (2022).

Como o único fator significativo para o I.C. foi a relação A/C, esta propriedade é mostrada como um gráfico de médias na Figura 21. Avaliando o I.C. das pastas, os resultados plotados na Figura 21 mostram uma diferença de mais de 60% entre os diâmetros medidos na mesa de espalhamento entre as formulações com A/C 0,3 e A/C 0,5. As médias mostram o comportamento do abatimento proporcional ao aumento de A/C conforme esperado, visto que o acréscimo de água aumenta a fluidez da pasta e seu espalhamento. Para A/C 0,3 a média alcançada do I.C. foi de 225 mm, enquanto para A/C 0,5 a média do I.C. foi de 361 mm. Embora a Norma Brasileira não especifique um I.C. padrão, avalia-se o resultado alcançado para A/C 0,3 mais satisfatório em comparação com A/C 0,5 onde a fluidez muito elevada passa a prejudicar a trabalhabilidade das pastas.

Figura 21 – Média do índice de consistência das pastas em função da relação água / cimento



Fonte: Autor (2022).

Com a análise estatística também é permitido elaborar o modelo de regressão linear para a variável de resposta em questão, permitindo estimar um valor esperado para esta em função do comportamento dos fatores analisados que apresentam significância superior a 95%. A Equação 08 apresenta o modelo geral da equação de regressão linear, sendo que os seus coeficientes são extraídos conforme tabela de coeficientes gerada pela ANOVA. As propriedades medidas possuem cada qual a sua tabela. Para a propriedade do índice de consistência das pastas, a Equação 09 representa a sua respectiva equação de regressão linear, conforme coeficientes do Anexo 03.

$$\alpha = \beta_0 + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \varepsilon \quad (08)$$

onde:

$\alpha$  – variável de resposta

$\beta_0$  – coeficiente principal

$\beta_1$  – coeficiente fator 1

$x_1$  – fator 1

$\beta_2$  – coeficiente fator 2

$x_2$  – fator 2

$\varepsilon$  – erro

$$I. C. = 290 + 67 * A/C + 6 \quad (09)$$

onde:

I. C. - índice de consistência (mm)

A/C - relação A/C

As formulações da Tabela 05 também foram avaliadas quando a sua densidade de massa no estado fresco, apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Densidade de massa das pastas

| Combinação | Cimento | A/C | % Fibra | Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) |
|------------|---------|-----|---------|--------------------------------|
| A1         | IV      | 0,3 | 0       | 1,898                          |
| A2         | IV      | 0,3 | 0,4     | 1,940                          |
| A3         | IV      | 0,5 | 0       | 1,735                          |
| A4         | IV      | 0,5 | 0,4     | 1,733                          |
| A5         | V       | 0,3 | 0       | 2,014                          |
| A6         | V       | 0,3 | 0,4     | 2,003                          |
| A7         | V       | 0,5 | 0       | 1,806                          |
| A8         | V       | 0,5 | 0,4     | 1,787                          |
| A9         | IV + V  | 0,4 | 0,2     | 1,879                          |

Fonte: Autor (2022).

Para analisar o efeito da adição de fibra de polipropileno, da relação água / cimento e do tipo de cimento sobre a densidade no estado fresco das pastas, foi realizada a análise estatística dos resultados obtidos na Tabela 10. A Tabela 11 apresenta a análise de variância para os resultados da densidade das pastas.

Tabela 11 – ANOVA para densidade de massa das pastas ( $R^2 = 0,997$ )

| Fator       | SS       | df | MS       | F        | p        |
|-------------|----------|----|----------|----------|----------|
| (1) Cimento | 11521,04 | 1  | 11521,04 | 63,1763  | 0,015463 |
| (2) A/C     | 78960,90 | 1  | 78960,90 | 432,9868 | 0,002302 |
| (3) % fibra | 10,48    | 1  | 10,48    | 0,0575   | 0,832862 |
| 1 × 2       | 380,57   | 1  | 380,57   | 2,0869   | 0,285419 |
| 1 × 3       | 616,08   | 1  | 616,08   | 3,3783   | 0,207450 |
| 2 × 3       | 348,87   | 1  | 348,87   | 1,9130   | 0,300795 |
| Erro        | 364,73   | 2  | 182,36   |          |          |
| Total SS    | 92202,66 | 8  |          |          |          |

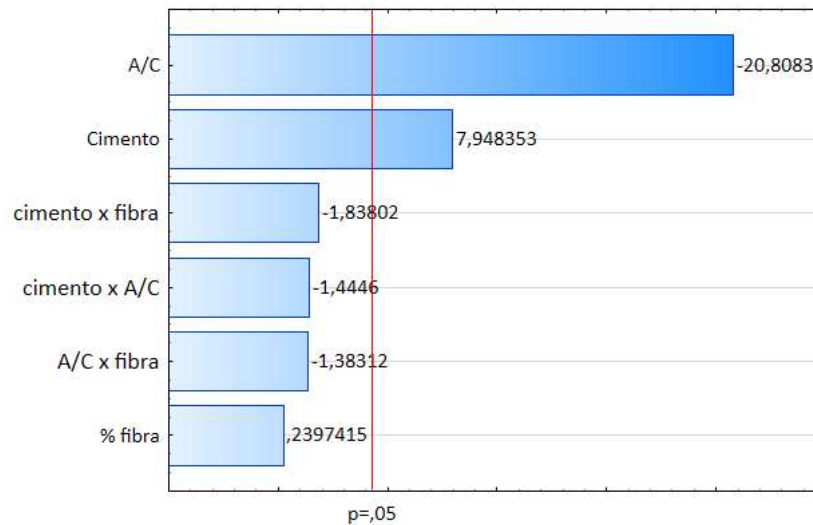
Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

Fonte: Autor (2022).

A análise dos resultados da ANOVA para a densidade de massa das pastas, Tabela 11, mostra dois fatores com significância estatística para os resultados, dada pelo valor de p: a relação A/C, com um  $p < 0,05$  ( $p = 0,002$ ), e o tipo de cimento, com um  $p < 0,05$  ( $p = 0,015$ ), em que ambos resultam em uma significância estatística (confiabilidade) maior que 95%. A relevância do fator A/C, traduzida na quantidade de água na mistura, está relacionada à diferença entre os pesos específicos da água e do cimento, que conforme esta variação altera a densidade de massa da mistura. Os tipos de cimento possuem pesos específicos diferentes entre si, fato que também contribui significativamente para alteração da densidade de massa da mistura.

A análise do diagrama de Pareto para a densidade de massa (Figura 22) ilustra graficamente que a relação A/C e o tipo de cimento são os principais fatores que a influenciam. A presença das fibras apresentou mínima influência sobre a densidade, assim como a interação entre os fatores, que obtiveram significância dos resultados abaixo de 95% conforme mostra a figura. A baixa variação da densidade na presença da fibra está relacionada ao seu teor, não sendo suficiente para ocorrer variações significantes. A análise de microscopia eletrônica mostrou que a dispersão das fibras na matriz não gerou porosidade ou vazios que impactassem na densidade. Outros pesquisadores verificaram redução da densidade, como Szelag (2019) constatou redução de 1 a 2% com a presença das fibras, assim como Siqueira (2006) observou tendência à diminuição com teores de fibra 0,25% e 0,50%.

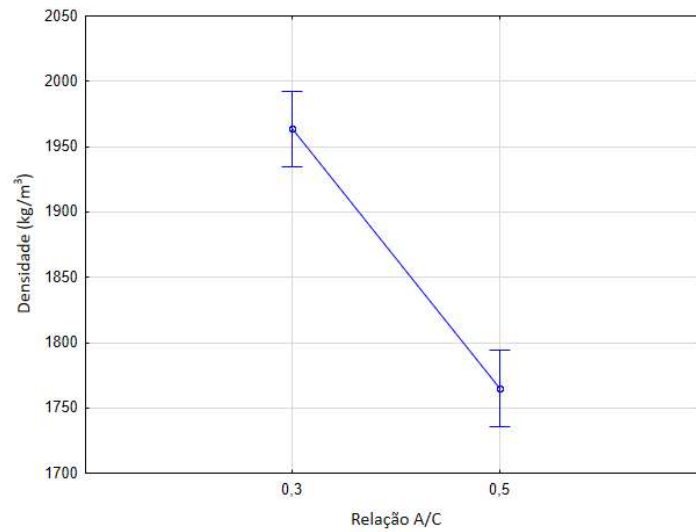
Figura 22 – Diagrama de Pareto para densidade de massa das pastas



Fonte: Autor (2022).

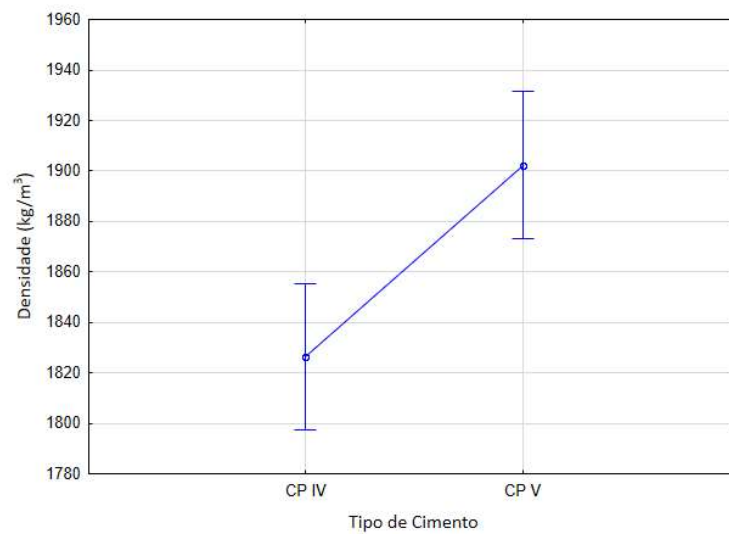
Os dois fatores que apresentaram significância estatística são mostrados como gráficos de médias, na Figura 23 para a relação A/C e na Figura 24 para o tipo de cimento. Avaliando as médias da densidade em função da relação A/C, as formulações com A/C 0,3 obtiveram média superior a  $1,950 \text{ g/cm}^3$  enquanto as com relação A/C 0,5 obtiveram média de  $1,765 \text{ g/cm}^3$ . A água atua na redução da densidade da pasta ainda no estado fresco, visto que apresenta  $1/3$  da densidade média dos cimentos. Em relação ao tipo de cimento, as formulações com cimento CP V obtiveram maior densidade,  $1,902 \text{ g/cm}^3$  de média, enquanto as formulações com cimento CP IV obtiveram menor densidade,  $1,826 \text{ g/cm}^3$ . Esta ocorrência segue os pesos específicos dos cimentos, devido a sua composição o cimento CP V (mais denso que o CP IV) torna a pasta que o compõe mais densa também.

Figura 23 – Média da densidade das pastas em função da relação água / cimento



Fonte: Autor (2022).

Figura 24 – Média da densidade das pastas em função do tipo de cimento



Fonte: Autor (2022).

O modelo de regressão linear para a variável de resposta densidade de massa é mostrado na Equação 10, conforme coeficientes do Anexo 04.

$$D = 1865 - 99 * A/C + 37 * C + 4 \quad (10)$$

onde:

D - densidade de massa (kg/m<sup>3</sup>)

A/C - relação A/C

## C - tipo de cimento

As formulações da Tabela 05 também foram avaliadas quando ao teor de ar incorporado, apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Teor de ar incorporado das pastas

| Combinação | Cimento | A/C | % Fibra | Ar Incorp. (%) |
|------------|---------|-----|---------|----------------|
| A1         | IV      | 0,3 | 0       | 5,17           |
| A2         | IV      | 0,3 | 0,4     | 2,83           |
| A3         | IV      | 0,5 | 0       | 1,70           |
| A4         | IV      | 0,5 | 0,4     | 1,67           |
| A5         | V       | 0,3 | 0       | 3,85           |
| A6         | V       | 0,3 | 0,4     | 4,19           |
| A7         | V       | 0,5 | 0       | 1,23           |
| A8         | V       | 0,5 | 0,4     | 2,08           |
| A9         | IV + V  | 0,4 | 0,2     | 1,25           |

Fonte: Autor (2022).

A análise de variância (ANOVA) para o efeito da adição de fibra de polipropileno, da relação água / cimento e do tipo de cimento sobre o teor de ar incorporado das pastas é mostrada na Tabela 13.

Tabela 13 – ANOVA para teor de ar incorporado das pastas ( $R^2 = 0,997$ )

| Fator       | SS       | df | MS       | F        | p        |
|-------------|----------|----|----------|----------|----------|
| (2) A/C     | 10,95004 | 1  | 10,95004 | 12,94000 | 0,015589 |
| (3) % fibra | 0,17625  | 1  | 0,17625  | 0,20828  | 0,667260 |
| 2 x 3       | 0,99108  | 1  | 0,99108  | 1,17119  | 0,328566 |
| Erro        | 4,23108  | 5  | 0,84622  |          |          |
| Total SS    | 16,34844 | 8  |          |          |          |

Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

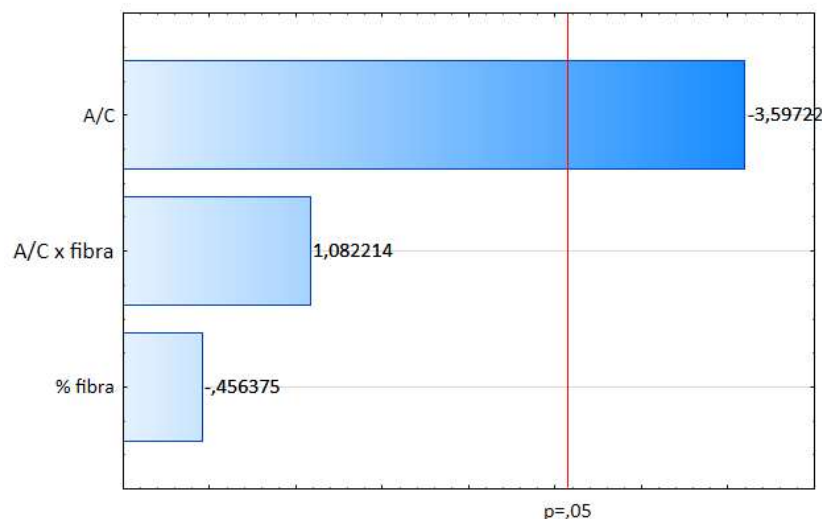
Fonte: Autor (2022).

A ANOVA para o teor de ar incorporado das pastas mostrou inicialmente que nenhum dos três fatores apresentou significância estatística. Desta forma foi necessário eliminar um dos fatores para reanálise com o intuito de alcançar o mínimo de 95% de significância. Por este motivo, a Tabela 13 com a ANOVA não consta o

fator tipo de cimento. Assim, esta tabela mostra um único fator com significância estatística para os resultados, dada pelo valor de  $p$ : a relação A/C, com um  $p < 0,05$  ( $p = 0,015$ ) que resulta em uma significância estatística (confiabilidade) maior que 95%. A relação A/C atua diretamente no teor de ar incorporado através da quantidade de vazios formados, por isso a sua significância. O outro fator, fibra, e a interações entre eles não apresentaram significância estatística para o teor de ar incorporado das pastas ( $p > 0,05$ ). Assim como na propriedade de densidade, a baixa variação na presença da fibra está relacionada ao seu teor, não sendo suficiente para ocorrer variações significantes. A análise de microscopia eletrônica mostrou que a dispersão das fibras na matriz não gerou porosidade ou vazios que impactassem no teor de ar incorporado.

A análise do diagrama de Pareto para o teor de ar incorporado. (Figura 25) ilustra graficamente que a relação A/C é o único fator que o influencia. A presença das fibras apresenta pouca influência, com significância dos resultados abaixo de 95% conforme visto anteriormente.

Figura 25 – Diagrama de Pareto para o teor de ar incorporado das pastas

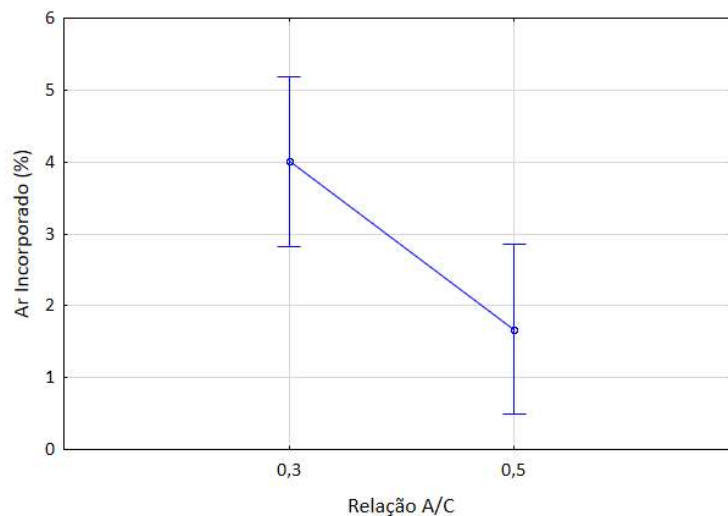


Fonte: Autor (2022).

Como o único fator significativo para o teor de ar incorporado foi a relação A/C, esta propriedade é mostrada como um gráfico de médias na Figura 26. Avaliando o teor de ar incorporado das pastas, os resultados plotados na Figura 26 mostram uma diferença maior que duas vezes entre os percentuais de ar incorporado (A.I.)

medidos para as formulações com A/C 0,3 e A/C 0,5. O comportamento obtido para o A.I. foi inverso ao aumento de A/C, onde para A/C 0,3 a média alcançada foi de 4,0%, enquanto para A/C 0,5 a média do A.I. foi de 1,67%. Este efeito é explicado pela maior quantidade de água na mistura com A/C 0,5, deixando-a com menos vazios e conseqüentemente menor teor de ar incorporado.

Figura 26 – Média do teor de ar incorporado das pastas em função da relação água / cimento



Fonte: Autor (2022).

A Equação 11 apresenta o modelo de regressão linear para o teor de ar incorporado com confiabilidade de 95%, conforme coeficientes do Anexo 05.

$$A.I. = 2,66 - 1,17 * A/C + 0,3 \quad (11)$$

onde:

A.I. – ar incorporado (%)

A/C - relação A/C

Após 28 dias de cura os corpos de prova das formulações da Tabela 05 foram então avaliados quanto às propriedades no estado endurecido, resistência à tração na flexão, resistência à compressão, variação de dimensional e de massa, sendo a primeira apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 – Resistência à tração na flexão das pastas

| Combinação | Cimento | A/C | % Fibra | Média (MPa) | Desvio Padrão |
|------------|---------|-----|---------|-------------|---------------|
| A1         | IV      | 0,3 | 0       | 12,20       | 1,24          |
| A2         | IV      | 0,3 | 0,4     | 10,74       | 0,26          |
| A3         | IV      | 0,5 | 0       | 8,63        | 0,79          |
| A4         | IV      | 0,5 | 0,4     | 7,10        | 0,68          |
| A5         | V       | 0,3 | 0       | 15,14       | 1,67          |
| A6         | V       | 0,3 | 0,4     | 15,88       | 1,78          |
| A7         | V       | 0,5 | 0       | 4,46        | 0,17          |
| A8         | V       | 0,5 | 0,4     | 6,09        | 1,58          |
| A9         | IV + V  | 0,4 | 0,2     | 9,77        | 0,53          |

Fonte: Autor (2022).

Para analisar o efeito da adição de fibra de polipropileno, da relação água / cimento e do tipo de cimento sobre a resistência à tração na flexão dos corpos de prova das pastas, a análise de variância dos resultados obtidos na Tabela 14 para a resistência à tração na flexão é mostrada na Tabela 15.

Tabela 15 – ANOVA para resistência à tração na flexão das pastas ( $R^2 = 0,997$ )

| Fator       | SS       | df | MS       | F        | p        |
|-------------|----------|----|----------|----------|----------|
| (1) Cimento | 1,0530   | 1  | 1,05300  | 11,805   | 0,075270 |
| (2) A/C     | 95,7137  | 1  | 95,71369 | 1073,037 | 0,000931 |
| (3) % fibra | 0,0484   | 1  | 0,04840  | 0,543    | 0,538022 |
| 1 x 2       | 21,9847  | 1  | 21,98467 | 246,468  | 0,004033 |
| 1 x 3       | 3,6032   | 1  | 3,60321  | 40,395   | 0,023873 |
| 2 x 3       | 0,0809   | 1  | 0,08094  | 0,907    | 0,441346 |
| Erro        | 0,1784   | 2  | 0,08920  |          |          |
| Total SS    | 122,6623 | 8  |          |          |          |

Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

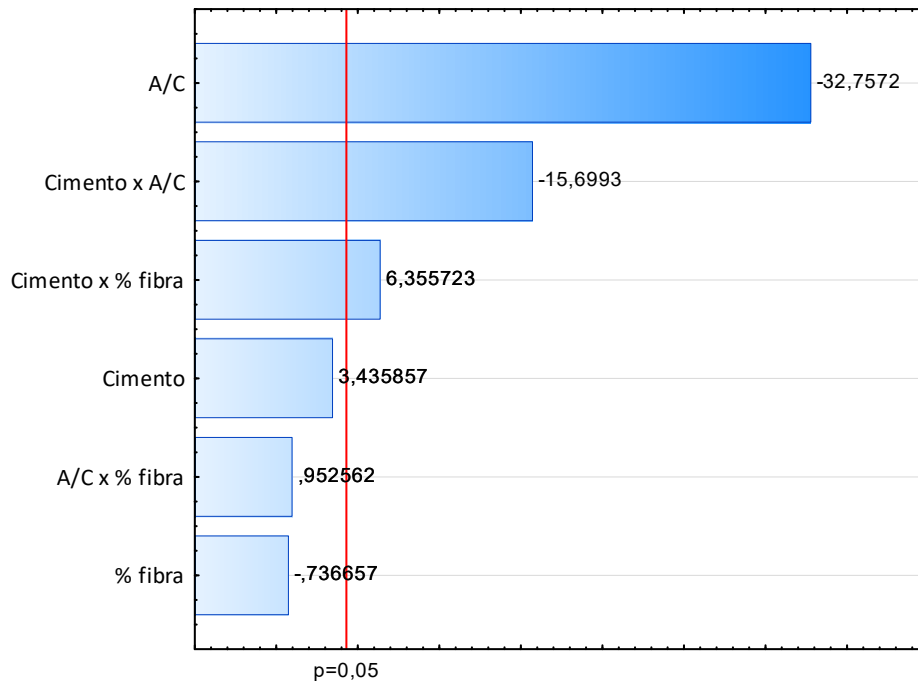
Fonte: Autor (2022).

A ANOVA para a resistência à tração na flexão mostra um fator único com significância estatística para os resultados, dado pelo valor de p, a relação A/C com um  $p < 0,05$  ( $p = 0,0009$ ). Este fator é o único a ter significância devido a importância da quantidade de água para o ganho de resistência da pasta, em que a sua dosagem adequada interfere de forma direta na hidratação do cimento e no ganho de resistência, e quando inadequada interfere negativamente na resistência mecânica. A

ANOVA mostra também duas interações entre fatores, sendo a interação entre tipo de cimento *versus* A/C com um  $p < 0,05$  ( $p = 0,004$ ), e a interação entre o tipo de cimento *versus* o teor de fibra com um  $p < 0,05$  ( $p = 0,02$ ), em que ambos resultam em uma significância estatística (confiabilidade) dos resultados maior que 95%. Os outros fatores, tipo de cimento e fibra, não apresentaram significância estatística para a resistência à tração na flexão dos corpos de prova ( $p > 0,05$ ). Os tipos de cimento analisados são da mesma classe final de resistência, portanto não devem apresentar significativas diferenças nos resultados de resistência à tração na flexão. A inclusão das fibras também não alterou significativamente os resultados, visto que são de propriedades não estruturais. A interação entre a A/C *versus* teor de fibra da mesma forma não apresentou significância estatística mínima de 95%. Outros pesquisadores notaram alguma ação significativa das fibras, Habib et al (2013) verificou que a resistência à tração na flexão é maior conforme aumenta-se o teor de fibra. Szelag (2019) notou em sua pesquisa que ela foi maior 11% ao incorporar fibras de polipropileno em corpos de prova de pastas. Já para Siqueira (2006) a incorporação das fibras provoca uma tendência de redução desta resistência nos teores de 0,25% e 0,50% os quais pesquisou

A análise do diagrama de Pareto para a resistência à tração na flexão (Figura 27) mostra graficamente que a relação A/C e as interações entre tipo de cimento *versus* A/C e o tipo de cimento *versus* o teor de fibra são o principal fator e as interações que a influenciam. Isoladamente, a presença das fibras e o tipo de cimento apresentam pouca influência sobre a resistência à tração na flexão, com significância dos resultados abaixo de 95% conforme mostra a figura.

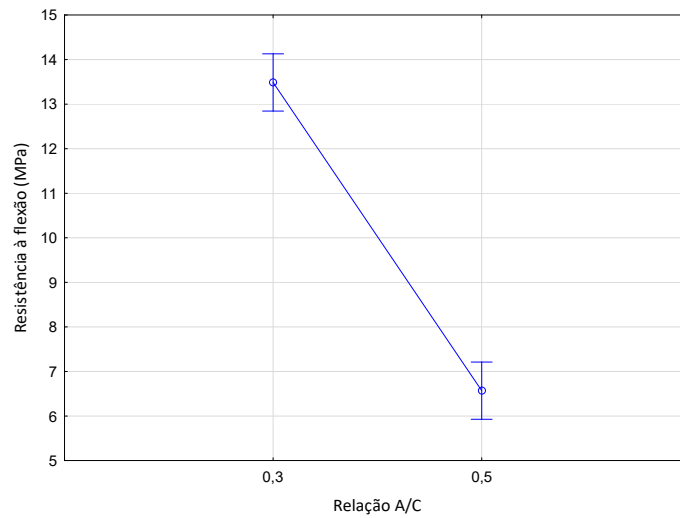
Figura 27 – Diagrama de Pareto para resistência à tração na flexão das pastas



Fonte: Autor (2022).

Como o único fator significativo para a resistência à tração na flexão foi a relação A/C, esta propriedade é mostrada como um gráfico de médias na Figura 28. Avaliando a resistência à tração na flexão das pastas, os resultados plotados na Figura 28 mostram uma diferença de 100% entre os valores de resistência à tração na flexão medidos para as formulações com A/C 0,3 e A/C 0,5. As médias mostram o comportamento desta resistência inversamente proporcional ao aumento de A/C. Para A/C 0,3 a média obtida foi de 13,49 MPa, enquanto para A/C 0,5 a média foi de 6,57 MPa. A água na mistura é essencial para a reação de hidratação do cimento, havendo o ganho de resistência mecânica. Mas após a quantidade suficiente, este excedente é eliminado no processo de secagem, promovendo a geração de vazios na estrutura e a consequente redução da resistência. Este é o ocorrido para a relação A/C 0,5. Ambos os resultados se enquadram dentro da NBR 13281:2005, visto que não cita valores mínimo e máximo. Mas por apresentar maior resistência, avalia-se o resultado alcançado para A/C 0,3 mais satisfatório em comparação com A/C 0,5.

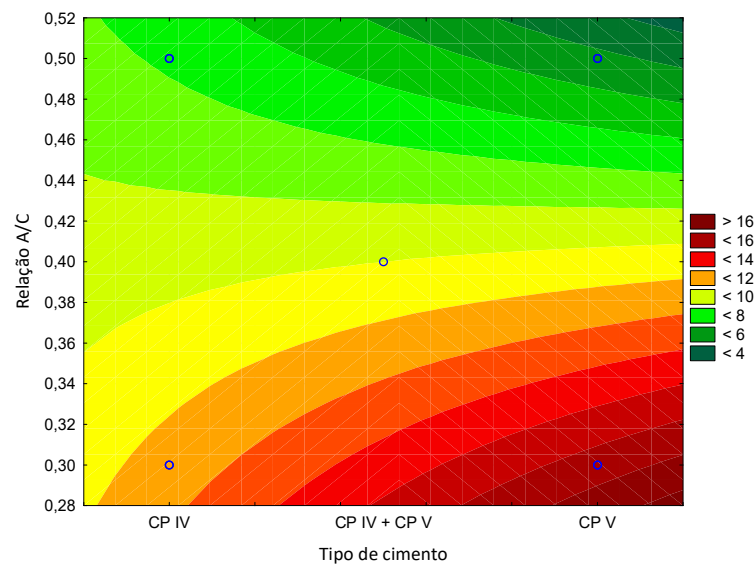
Figura 28 – Média da resistência à tração na flexão das pastas em função da relação água / cimento



Fonte: Autor (2022).

Como a análise da ANOVA mostrou haver interação entre fatores com significância estatística para a resistência à tração na flexão, é possível obter os gráficos da superfície de resposta entre eles, ilustrados nas Figuras 29 e 30.

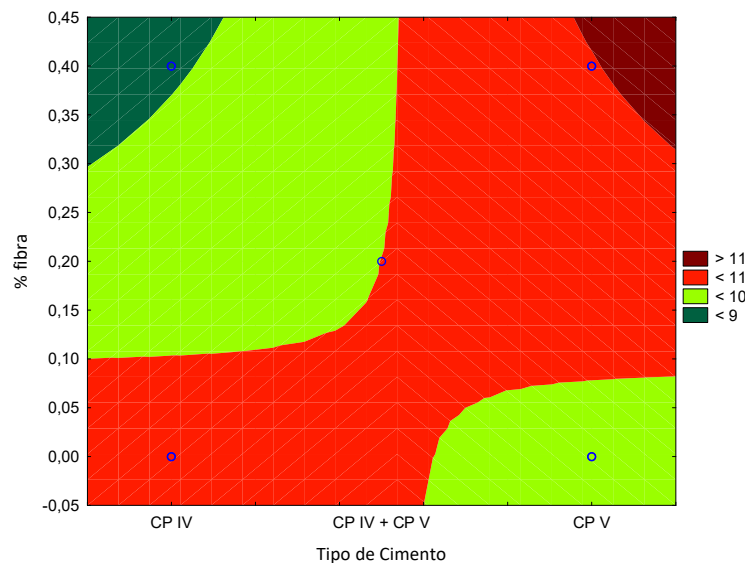
Figura 29 – Superfície de resposta entre tipo de cimento e relação água / cimento na resistência à flexão das pastas.



Fonte: Autor (2022).

Pela Figura 29 os corpos de prova com maiores resistências foram obtidos pelas formulações com cimento CP V e menor relação A/C conforme esperado. Com o mesmo tipo de cimento e maior relação A/C as resistências obtidas foram as menores, em decorrência da quantidade de água em excesso para as reações de hidratação do cimento e ganho de resistência.

Figura 30 – Superfície de resposta entre tipo de cimento e % de fibra na resistência à flexão das pastas.



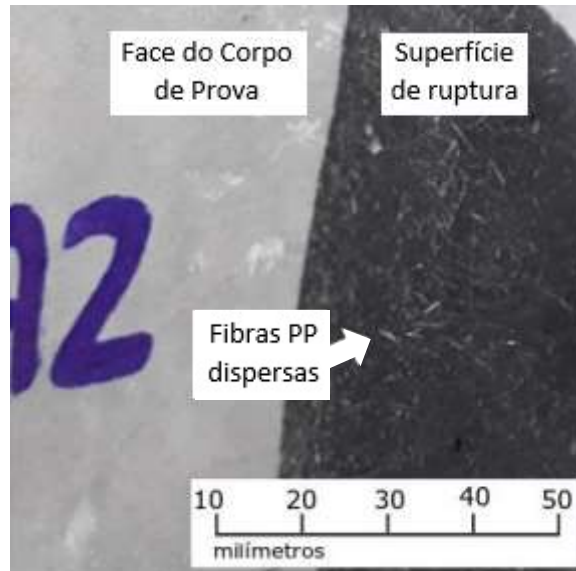
Fonte: Autor (2022).

Pela Figura 30 conclui-se que os corpos de prova com maiores resistências à tração na flexão foram obtidos pela formulação com cimento CP V na presença da fibra de polipropileno. Para o cimento CP IV a presença da fibra propôs ação inversa, reduzindo a resistência à flexão nas pastas.

A Figura 31 mostra a superfície de ruptura de um corpo de prova de pasta com adição da fibra, registrada com câmera fotográfica digital Canon EOS T5. As fibras uniformemente distribuídas na superfície da amostra alteram a forma do rompimento dela. Pois, ao final do ensaio de resistência à tração na flexão as metades permaneceram unidas pela atuação da fibra, separando-as somente após o manuseio, ao contrário dos corpos de prova sem a sua adição que se dividiram de imediato ao ser aplicada a força de rompimento. O mesmo comportamento foi observado por Oliveira (2001), em que informa uma melhora na forma da ruptura dos corpos de prova com fibras mesmo quando elas não atuam de forma favorável na

resistência, ocorrendo uma ruptura menos frágil em que as fibras proporcionam uma pequena deformação plástica até a ruptura

Figura 31 – Corpo de prova após rompimento enfatizando a presença das fibras



Fonte: Autor (2022), registro com câmera fotográfica digital Canon EOS T5.

A Equação 12 mostra o modelo de regressão linear para a resistência à tração na flexão, conforme coeficientes do Anexo 06.

$$R.F. = 10 - 3,45 * A/C - 1,65 * C * A/C + 0,67 * C * F + 0,1 \quad (12)$$

onde:

R. F. – resistência à tração na flexão (MPa)

A/C – relação A/C

C – tipo de cimento

F – % fibra

Após 28 dias de cura os corpos de prova das formulações da Tabela 05 que foram avaliados quanto a resistência à tração na flexão tiveram as suas metades, após rompimento neste ensaio, avaliadas quanto a resistência à compressão, sendo os resultados apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Resistência à compressão das pastas

| Combinação | Cimento | A/C | % Fibra | Média (MPa) | Desvio Padrão |
|------------|---------|-----|---------|-------------|---------------|
| A1         | IV      | 0,3 | 0       | 70,75       | 6,15          |
| A2         | IV      | 0,3 | 0,4     | 66,17       | 8,75          |
| A3         | IV      | 0,5 | 0       | 34,72       | 2,01          |
| A4         | IV      | 0,5 | 0,4     | 32,21       | 0,89          |
| A5         | V       | 0,3 | 0       | 79,17       | 7,51          |
| A6         | V       | 0,3 | 0,4     | 79,67       | 7,24          |
| A7         | V       | 0,5 | 0       | 35,99       | 3,19          |
| A8         | V       | 0,5 | 0,4     | 37,44       | 0,20          |
| A9         | IV + V  | 0,4 | 0,2     | 33,81       | 5,27          |

Fonte: Autor (2022).

A Tabela 17 apresenta a análise de variância para os resultados de resistência à compressão.

Tabela 17 – ANOVA para resistência à compressão das pastas ( $R^2 = 0,892$ )

| Fator       | SS       | df | MS       | F        | p        |
|-------------|----------|----|----------|----------|----------|
| (1) Cimento | 100,896  | 1  | 100,896  | 0,79153  | 0,439178 |
| (2) A/C     | 3018,750 | 1  | 3018,750 | 23,68217 | 0,016575 |
| (3) % fibra | 3,287    | 1  | 3,287    | 0,02579  | 0,882624 |
| 1 x 2       | 29,710   | 1  | 29,710   | 0,23308  | 0,662291 |
| 1 x 3       | 10,212   | 1  | 10,212   | 0,08011  | 0,795554 |
| Erro        | 382,408  | 3  | 127,469  |          |          |
| Total SS    | 3545,263 | 8  |          |          |          |

Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

Fonte: Autor (2022).

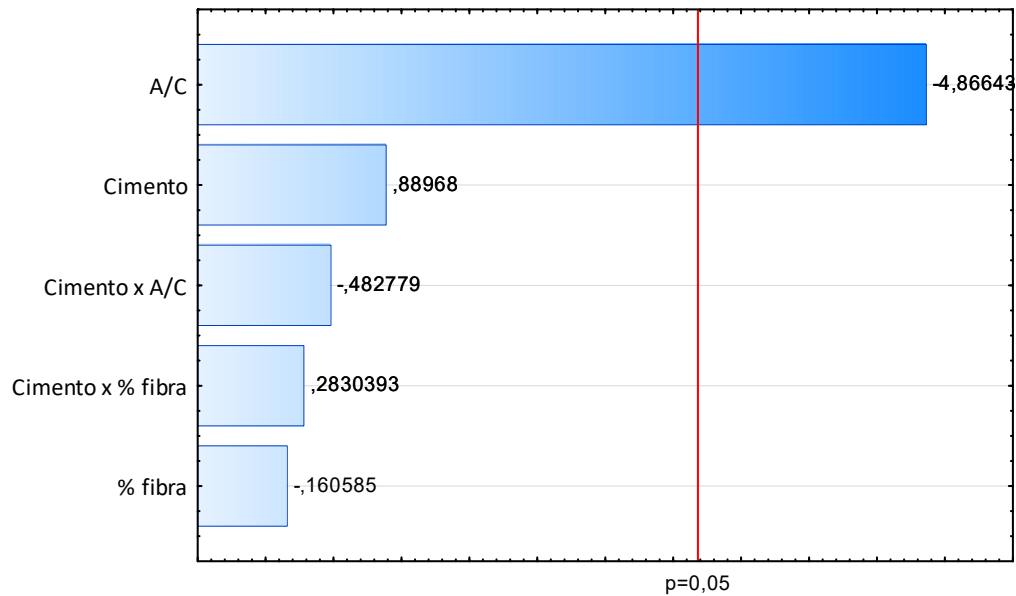
Um único fator apresentou significância estatística para os resultados, dado pelo valor de p, a relação A/C com um  $p < 0,05$  ( $p = 0,016$ ) em que resulta em uma significância estatística (confiabilidade) maior que 95%. Da mesma forma que na propriedade de resistência à tração na flexão, este fator é o único a ter significância devido a importância da quantidade de água para o ganho de resistência da pasta, onde a sua dosagem adequada interfere de forma direta na hidratação do cimento e no ganho de resistência, e quando inadequada interfere negativamente na resistência

mecânica. Os demais fatores e as interações não apresentaram significância estatística para a resistência à compressão dos corpos de prova ( $p > 0,05$ ).

O diagrama de Pareto para a resistência à compressão (Figura 32) mostra que a relação A/C é o fator que a influencia. A presença das fibras, o tipo de cimento e demais interações apresentam pouca influência sobre a resistência à compressão, com significância dos resultados abaixo de 95% conforme mostra a figura. Estes fatores seguem o mecanismo que ocorre na resistência à tração na flexão, em que os tipos de cimento analisados são da mesma classe final de resistência, portanto não devem apresentar significativas diferenças nos resultados de resistência à compressão.

A inclusão das fibras também não alterou significativamente os resultados, visto que são de propriedades não estruturais. Em comparação a outros pesquisadores, Habib et al (2013) em seu estudo comparativo entre fibras em argamassa constatou que a resistência à compressão com fibra de polipropileno tem seu valor reduzido ao utilizar um teor de 0,5%. Para teores de 1% e 2% constatou o aumento da resistência à compressão. Alsadey (2016) aplicou teores de fibra similares (0,5%, 1%, 1,5%) e verificou ganho de resistência à compressão entre 20% e 35% conforme o aumento do teor. Já Karahan (2010) verificou que a adição de fibra no resultado de resistência à compressão foi desprezível. Oliveira (2001) verificou que em argamassas com traço 1:3 a inclusão das fibras apresentou em geral uma sutil redução desta propriedade em relação as argamassas sem fibras.

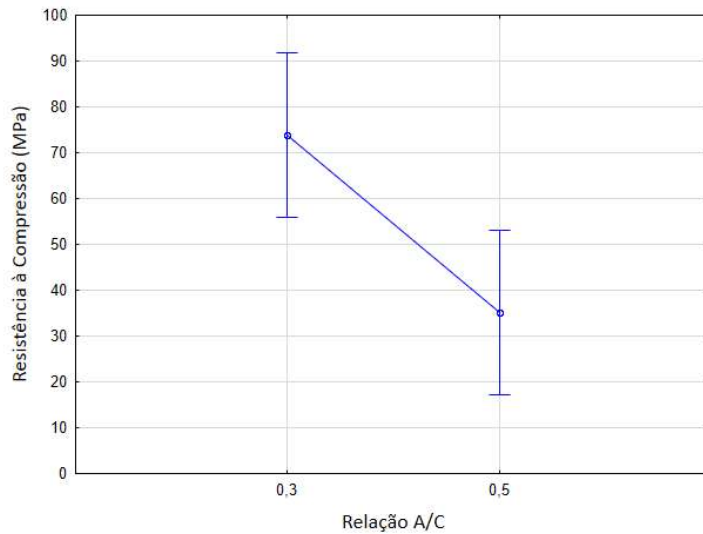
Figura 32 – Diagrama de Pareto para resistência à compressão das pastas



Fonte: Autor (2022).

Como o único fator significativo para a resistência à compressão axial foi a relação A/C, esta propriedade é mostrada como um gráfico de médias na Figura 33. Avaliando a resistência à compressão axial das pastas, os resultados plotados na Figura 33 mostram comportamento similar à resistência à tração na flexão, ou seja, comportamento da resistência inverso à relação A/C. Para A/C 0,3 a média obtida foi de 73,94 MPa, enquanto para A/C 0,5 a média reduziu para 35,09 MPa. Embora a redução, ambos valores são considerados elevados em se tratando de pasta/argamassa. Comparativamente a demais pesquisadores, Szelag (2019) ao avaliar o impacto das fibras de polipropileno no combate de microfissuras nas pastas de cimento, observou que para o teor de 0,5% com A/C variando de 0,4 a 0,6 ocorreu uma redução da resistência à compressão que dependendo do tipo de cimento foi na ordem de 10% a 20% em relação a corpos de prova sem fibra

Figura 33 – Média da resistência à compressão axial das pastas em função da relação água / cimento



Fonte: Autor (2022).

A Equação 13 mostra o modelo de regressão linear para a resistência à compressão para a relação A/C com significância superior a 95%, conforme coeficientes do Anexo 07.

$$R. C. = 52,21 - 19,42 * A/C + 3,99 \quad (13)$$

onde:

R. C. – resistência à compressão (MPa)

A/C – relação A/C

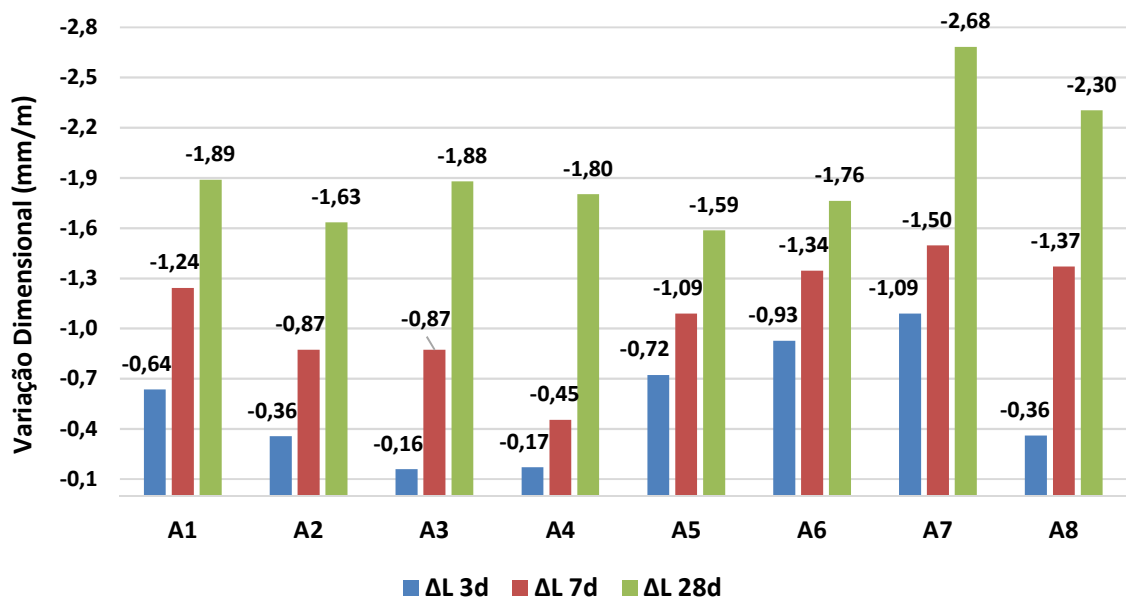
Conforme mencionado no item 6.2.5 os corpos de prova das pastas foram avaliados quanto a sua variação dimensional. A Tabela 18 apresenta as leituras da variação de cada corpo de prova frente à calibração da barra padrão, nas idades de 3d, 7d e 28d, além da leitura inicial após desforma. A mesma apresenta também a evolução desta variação em milímetros por metro (mm/m) ao longo destas idades, também apresentada graficamente na Figura 34.

Tabela 18 – Variação dimensional das pastas

| Formul. | Corpo de Prova | Leitura Var. Dimensional (mm) |       |       |       | Var. Dimensional (mm/m) |               |                |
|---------|----------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------------------------|---------------|----------------|
|         |                | Inicial                       | 3d    | 7d    | 28d   | $\Delta L$ 3d           | $\Delta L$ 7d | $\Delta L$ 28d |
| A1      | 1              | 1,988                         | 1,873 | 1,718 | 1,565 | -0,46                   | -1,08         | -1,69          |
|         | 2              | 1,890                         | 1,687 | 1,539 | 1,369 | -0,81                   | -1,40         | -2,08          |
| A2      | 1              | 1,342                         | 1,248 | 1,104 | 0,930 | -0,38                   | -0,95         | -1,65          |
|         | 2              | 1,942                         | 1,858 | 1,744 | 1,537 | -0,34                   | -0,79         | -1,62          |
| A3      | 1              | 0,634                         | 0,614 | 0,327 | 0,172 | -0,08                   | -1,23         | -1,85          |
|         | 2              | 1,076                         | 1,016 | 0,947 | 0,599 | -0,24                   | -0,52         | -1,91          |
| A4      | 1              | 1,490                         | 1,437 | 1,371 | 1,035 | -0,21                   | -0,48         | -1,82          |
|         | 2              | 2,137                         | 2,105 | 2,029 | 1,691 | -0,13                   | -0,43         | -1,78          |
| A5      | 1              | 2,494                         | 2,349 | 2,278 | 2,128 | -0,58                   | -0,86         | -1,46          |
|         | 2              | 2,051                         | 1,835 | 1,723 | 1,624 | -0,86                   | -1,31         | -1,71          |
| A6      | 1              | 2,388                         | 2,122 | 2,031 | 1,945 | -1,06                   | -1,43         | -1,77          |
|         | 2              | 2,489                         | 2,292 | 2,174 | 2,051 | -0,79                   | -1,26         | -1,75          |
| A7      | 1              | 1,262                         | 1,054 | 0,936 | 0,648 | -0,83                   | -1,30         | -2,46          |
|         | 2              | 2,005                         | 1,669 | 1,583 | 1,278 | -1,34                   | -1,69         | -2,91          |
| A8      | 1              | 2,013                         | 1,900 | 1,678 | 1,451 | -0,45                   | -1,34         | -2,25          |
|         | 2              | 2,245                         | 2,178 | 1,895 | 1,655 | -0,27                   | -1,40         | -2,36          |

Nota: as leituras dos corpos de prova da formulação A9 não foram possíveis devido ao rompimento na desforma. Fonte: Autor (2022).

Figura 34 – Média da variação dimensional das pastas



Fonte: Autor (2022).

A Tabela 19 apresenta a análise de variância para o efeito da adição de fibra de polipropileno, da relação água / cimento e do tipo de cimento sobre a variação dimensional dos corpos de prova das pastas na idade 3 dias.

Tabela 19 – ANOVA para variação dimensional das pastas aos 3 dias ( $R^2 = 0,657$ )

| Fator       | SS       | df | MS       | F        | p        |
|-------------|----------|----|----------|----------|----------|
| (1) Cimento | 0,786769 | 1  | 0,786769 | 10,43127 | 0,010327 |
| (2) A/C     | 0,185761 | 1  | 0,185761 | 2,46289  | 0,151011 |
| (3) % fibra | 0,157609 | 1  | 0,157609 | 2,08964  | 0,182206 |
| 1 x 2       | 0,053361 | 1  | 0,053361 | 0,70748  | 0,422066 |
| 1 x 3       | 0,016129 | 1  | 0,016129 | 0,21384  | 0,654747 |
| 2 x 3       | 0,103041 | 1  | 0,103041 | 1,36615  | 0,272499 |
| Erro        | 0,678817 | 9  | 0,075424 |          |          |
| Total SS    | 1,981487 | 15 |          |          |          |

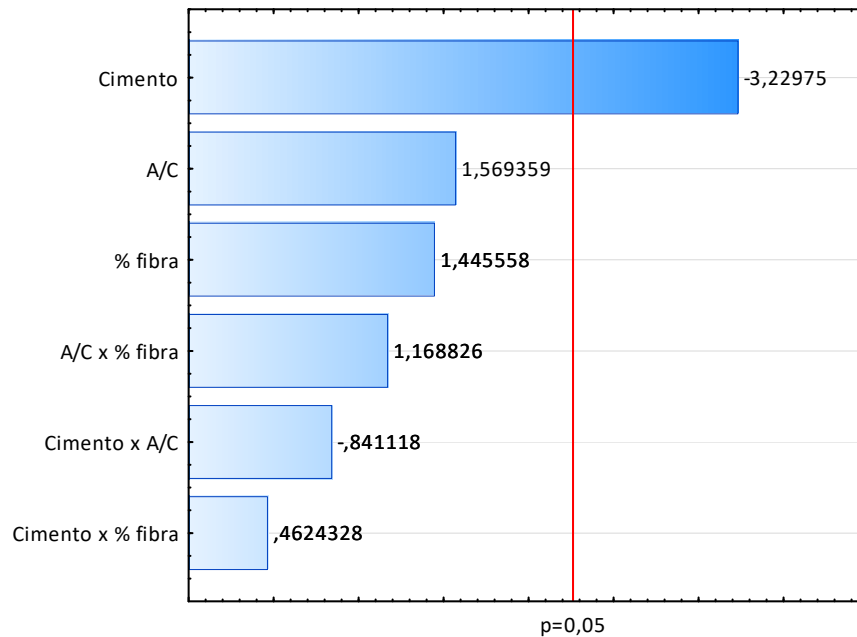
Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

Fonte: Autor (2022).

A ANOVA para a variação dimensional na idade 3 dias mostra um único fator com significância estatística para os resultados, o tipo de cimento, com um  $p < 0,05$  ( $p = 0,010$ ) maior que 95% (confiabilidade). A diferença na composição entre os tipos de cimento caracteriza a velocidade das reações de hidratação, a secagem e o ganho de resistência das pastas que as compõe, influenciando de forma direta na variação dimensional na idade inicial. Os demais fatores e as interações não apresentaram significância estatística na idade de 3 dias ( $p > 0,05$ ), em que o tipo de cimento prevaleceu a influência.

O diagrama de Pareto para a variação dimensional aos 3 dias (Figura 35) ilustra graficamente que o tipo de cimento é o fator que a influencia. A presença das fibras, o fator A/C e demais interações apresentam pouca influência nesta idade, com significância dos resultados abaixo de 95% conforme mostra a figura.

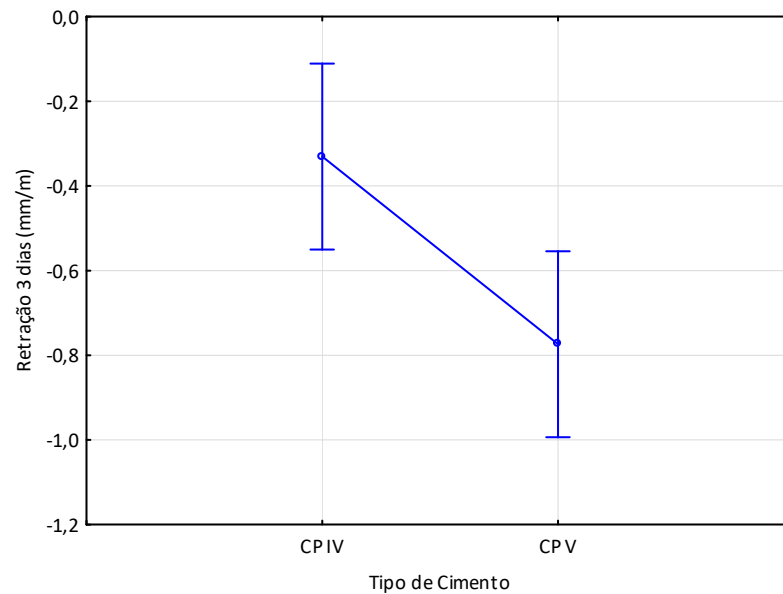
Figura 35 – Diagrama de Pareto aos 3 dias para variação dimensional das pastas



Fonte: Autor (2022).

O gráfico de médias para o tipo de cimento é mostrado na Figura 36. Avaliando as médias obtidas, as formulações com cimento CP IV apresentaram retração média de 0,33 mm/m, ou seja, 42% menor que as formulações com CP V que apresentaram retração média de 0,77 mm/m. A adição de cinza pozolânica na composição do cimento CP IV confere ao mesmo um retardo no início da pega e nas propriedades citada nos parágrafos anteriores, reduzindo a sua variação dimensional e retração nesta idade inicial de 3 dias em comparação ao cimento CP V.

Figura 36 – Média da variação dimensional aos 3 dias das pastas em função do tipo de cimento



Fonte: Autor (2022).

A Equação 14 apresenta o modelo de regressão linear para a variação dimensional aos 3 dias em função do tipo de cimento, conforme coeficientes do Anexo 08.

$$V.D3. = -0,55 - 0,22 * C + 0,06 \quad (14)$$

onde:

$V.D3.$  – variação dimensional aos 3 dias (mm/m)

$C$  – tipo de cimento

A Tabela 20 apresenta a análise de variância para variação dimensional na idade de 7 dias.

Tabela 20 – ANOVA para variação dimensional das pastas aos 7 dias ( $R^2 = 0,752$ )

| Fator       | SS       | df | MS       | F        | p        |
|-------------|----------|----|----------|----------|----------|
| (1) Cimento | 0,863041 | 1  | 0,863041 | 14,44799 | 0,004211 |
| (2) A/C     | 0,031329 | 1  | 0,031329 | 0,52447  | 0,487338 |
| (3) % fibra | 0,108241 | 1  | 0,108241 | 1,81204  | 0,211187 |
| 1 x 2       | 0,373321 | 1  | 0,373321 | 6,24969  | 0,033865 |
| 1 x 3       | 0,210681 | 1  | 0,210681 | 3,52697  | 0,093100 |
| 2 x 3       | 0,046225 | 1  | 0,046225 | 0,77384  | 0,401908 |
| Erro        | 0,537609 | 9  | 0,059734 |          |          |
| Total SS    | 2,170447 | 15 |          |          |          |

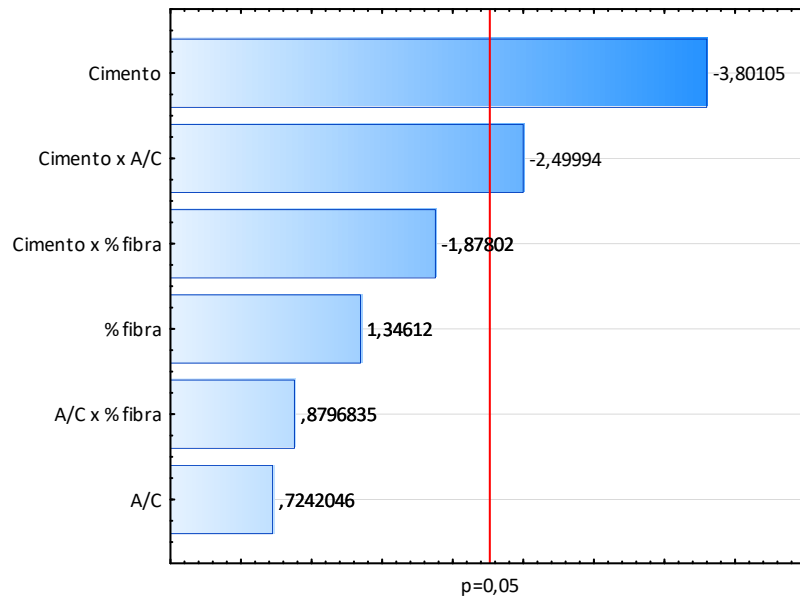
Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

Fonte: Autor (2022).

A ANOVA para a variação dimensional na idade de 7 dias (Tabela 20) mostra novamente o tipo de cimento como fator com significância estatística para os resultados, dado pelo valor de  $p < 0,05$  ( $p = 0,004$ ), além da interação com o fator A/C, com um  $p < 0,033$ , em que ambos resultam em uma significância estatística (confiabilidade) maior que 95%. Nesta idade intermediária a composição dos dois tipos de cimento analisados continua conferindo alterações significativas nos resultados, conforme analisado na idade inicial 3 dias, porém em menor intensidade. Isto faz com que a quantidade de água na mistura (A/C) passe também a influenciar os resultados agora aos 7 dias, mas somente quando os resultados são analisados em conjunto com o tipo de cimento, e não como fator isolado. O fator fibra e as interações não apresentaram significância estatística na idade de 7 dias ( $p > 0,05$ ).

O diagrama de Pareto para a variação dimensional aos 7 dias (Figura 37) mostra o tipo de cimento como fator que a influencia, além da interação com o fator A/C. A presença das fibras, o fator isolado A/C e demais interações apresentam pouca influência nesta idade, com significância dos resultados abaixo de 95% conforme mostra a figura.

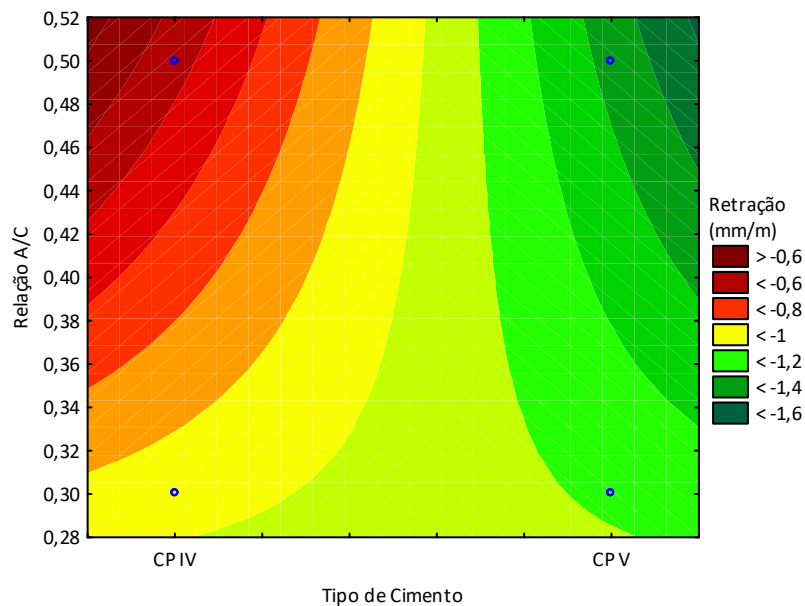
Figura 37 – Diagrama de Pareto aos 7 dias para variação dimensional das pastas



Fonte: Autor (2022).

O gráfico da superfície de resposta para a interação entre o tipo de cimento e a relação A/C é mostrado na Figura 38.

Figura 38 – Superfície de resposta aos 7 dias entre tipo de cimento e relação água / cimento na variação dimensional das pastas.



Fonte: Autor (2022).

Pela Figura 38, os corpos de prova com menores retrações foram obtidos pelas formulações com cimento CP IV e maior A/C (0,5). Os corpos de prova com

maiores retrações foram obtidos pelas formulações com cimento CP V e mesma A/C (0,5). Devido ao fato de este tipo de cimento não apresentar adição de cinza pozzolânica, os corpos de prova com este material caracterizam esta maior retração, e quando analisados os resultados com a maior quantidade de água na mistura a mesma acentua a perda de água provocada pelo processo de secagem. Esta combinação provoca, comparativamente às formulações com cimento CP IV, o aumento na variação dimensional dos seus corpos de prova (retração). Desta forma, a variação do tipo de cimento é o fator que mais influencia na variação dimensional na idade 7 dias, conforme citado anteriormente.

A Equação 15 apresenta o modelo de regressão linear para a variação dimensional aos 7 dias, conforme coeficientes do Anexo 09.

$$V.D7. = -1,09 - 0,23 * C - 0,15 * C * A/C + 0,06 \quad (15)$$

onde:

*V.D7.* – variação dimensional aos 7 dias (mm/m)

*C* – tipo de cimento

*A/C* – relação A/C

A Tabela 21 apresenta a análise de variância para variação dimensional na idade de 28 dias.

Tabela 21 – ANOVA para variação dimensional das pastas aos 28 dias ( $R^2 = 0,400$ )

| Fator       | SS       | df | MS       | F        | p        |
|-------------|----------|----|----------|----------|----------|
| (1) Cimento | 2,22010  | 1  | 2,220100 | 2,606927 | 0,134692 |
| 1 x 2       | 2,76890  | 1  | 2,768896 | 3,251345 | 0,098795 |
| 1 x 3       | 0,73960  | 1  | 0,739600 | 0,868467 | 0,371383 |
| 2 x 3       | 0,54170  | 1  | 0,541696 | 0,636080 | 0,442010 |
| Erro        | 9,36777  | 11 | 0,851616 |          |          |
| Total SS    | 15,63806 | 15 |          |          |          |

Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

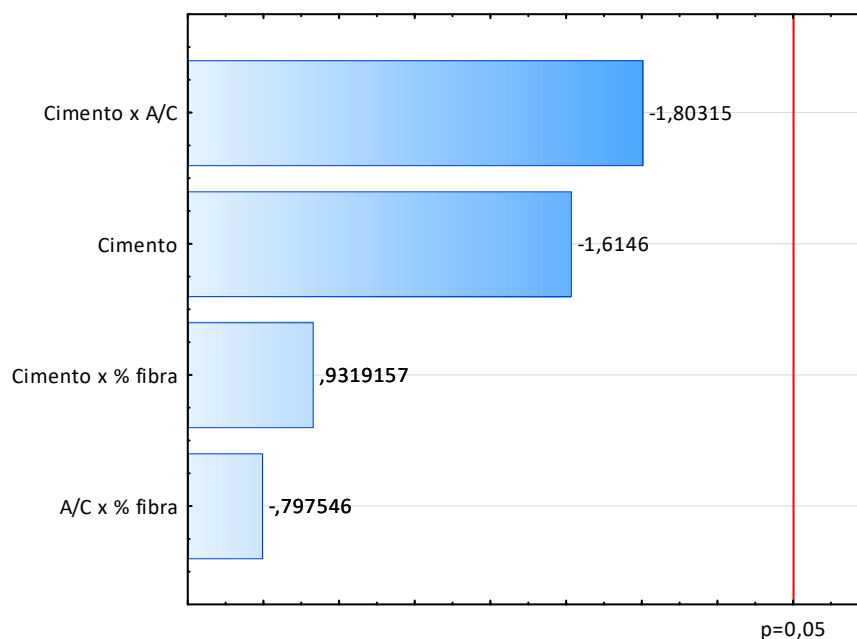
Fonte: Autor (2022).

A análise dos resultados da ANOVA para a variação dimensional na idade de 28 dias dos corpos de prova das pastas, considerando inicialmente todos os fatores

e ou interações, não mostrou nenhum fator com alguma significância que possa apresentar uma tendência para os resultados. Para uma melhor análise, tornou-se necessário refazê-la reduzindo apenas a um fator como mostra a Tabela 21 (o tipo de cimento) para validar uma tendência. Mesmo deste modo, não se obteve uma significância estatística (confiabilidade) superior a 95%, alcançando no máximo 90% para a interação entre o tipo de cimento e o fator A/C, dado pelo valor de  $p = 0,098$ . Ocorre desta forma uma mudança no padrão de significância entre os fatores em função do tempo, em que conforme o aumento da idade dos corpos de prova há uma redução na intensidade das reações dos materiais, evidenciado na análise da idade de 7 dias. Por este motivo aos 28 dias de cura não se destaca a predominância de um fator que ocasione variação significativa dos resultados. A secagem dos corpos de prova continua a ocorrer (menos intensa), de modo que o material continue com sua curva de ganho da resistência mecânica conforme o tempo até sua estabilização, natural dos materiais cimentícios.

A análise do diagrama de Pareto para a variação dimensional aos 28 dias (Figura 39) ilustra graficamente a baixa significância dos fatores e interações ajustados conforme citado anteriormente.

Figura 39 – Diagrama de Pareto aos 28 dias para variação dimensional das pastas



Fonte: Autor (2022).

A ausência de fatores ou interações com significância torna a variação dimensional aos 28 dias uma constante, não sendo possível apresentar um modelo de regressão linear.

No ensaio de variação dimensional os corpos de prova também foram avaliados quanto à variação da massa, pela perda de massa ao longo das idades. A Tabela 22 apresenta as leituras desta variação de cada corpo de prova nas idades de 3d, 7d e 28d, além da massa inicial após desforma. Apresenta também a evolução desta variação em percentual ao longo das idades, e as médias são apresentadas graficamente na Figura 40.

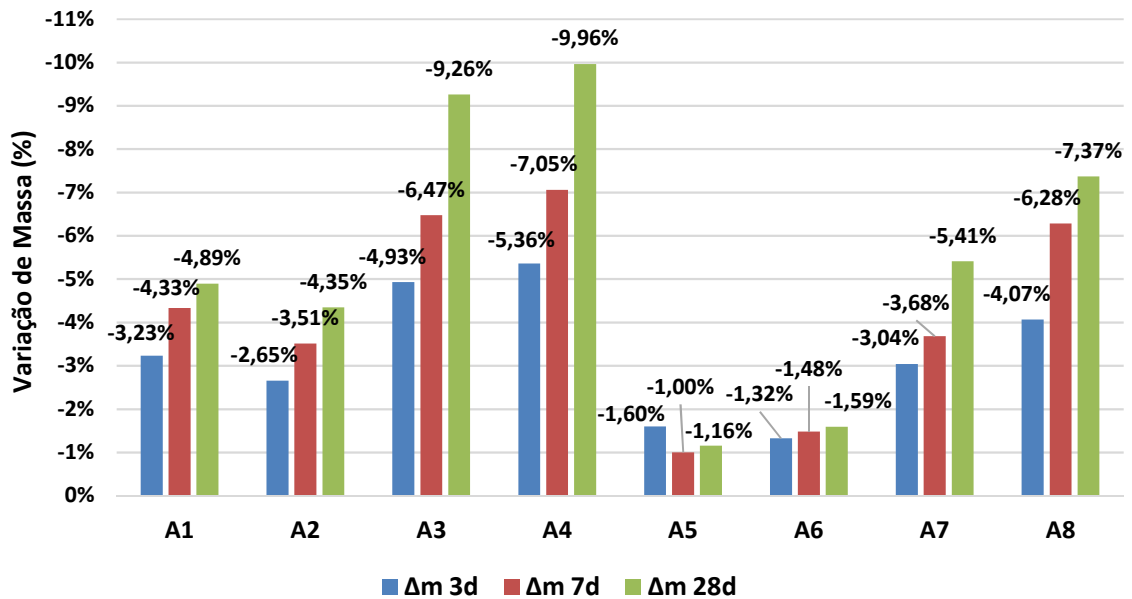
Tabela 22 – Variação de massa das pastas

| Formul. | Corpo de Prova | Leitura da massa (g) |        |        |        | Variação de massa (%) |               |                |
|---------|----------------|----------------------|--------|--------|--------|-----------------------|---------------|----------------|
|         |                | Inicial              | 3d     | 7d     | 28d    | $\Delta m$ 3d         | $\Delta m$ 7d | $\Delta m$ 28d |
| A1      | 1              | 372,90               | 360,30 | 355,84 | 353,97 | -3,38%                | -4,57%        | -5,08%         |
|         | 2              | 377,60               | 365,98 | 362,15 | 359,83 | -3,08%                | -4,09%        | -4,71%         |
| A2      | 1              | 362,50               | 352,29 | 348,87 | 346,54 | -2,82%                | -3,76%        | -4,40%         |
|         | 2              | 372,40               | 363,13 | 360,25 | 356,42 | -2,49%                | -3,26%        | -4,29%         |
| A3      | 1              | 293,62               | 278,99 | 274,19 | 266,54 | -4,98%                | -6,62%        | -9,22%         |
|         | 2              | 304,76               | 289,91 | 285,47 | 276,42 | -4,87%                | -6,33%        | -9,30%         |
| A4      | 1              | 303,37               | 286,73 | 283,05 | 274,78 | -5,49%                | -6,70%        | -9,42%         |
|         | 2              | 317,01               | 300,43 | 293,52 | 283,71 | -5,23%                | -7,41%        | -10,50%        |
| A5      | 1              | 387,00               | 384,82 | 385,00 | 384,16 | -0,56%                | -0,52%        | -0,73%         |
|         | 2              | 382,50               | 372,43 | 376,81 | 376,46 | -2,63%                | -1,49%        | -1,58%         |
| A6      | 1              | 375,50               | 369,19 | 368,82 | 368,77 | -1,68%                | -1,78%        | -1,79%         |
|         | 2              | 392,00               | 388,21 | 387,39 | 386,58 | -0,97%                | -1,18%        | -1,38%         |
| A7      | 1              | 329,37               | 317,96 | 315,45 | 309,46 | -3,46%                | -4,23%        | -6,04%         |
|         | 2              | 322,60               | 314,18 | 312,48 | 307,19 | -2,61%                | -3,14%        | -4,78%         |
| A8      | 1              | 327,90               | 312,60 | 307,76 | 304,27 | -4,67%                | -6,14%        | -7,21%         |
|         | 2              | 329,20               | 317,79 | 308,08 | 304,41 | -3,47%                | -6,42%        | -7,53%         |

Nota: as leituras dos corpos de prova da A9 não foram possíveis devido ao rompimento na desforma.

Fonte: Autor (2022).

Figura 40 – Média da variação de massa das pastas



Fonte: Autor (2022).

Para analisar o efeito da adição de fibra de polipropileno, da relação água / cimento e do tipo de cimento sobre a variação de massa dos corpos de prova das pastas, foi realizada a análise estatística dos resultados separados em cada idade. A Tabela 23 apresenta a análise de variância para esta variação de massa na idade 3 dias.

Tabela 23 – ANOVA para variação de massa das pastas aos 3 dias ( $R^2 = 0,890$ )

| Fator       | SS       | df | MS       | F        | p        |
|-------------|----------|----|----------|----------|----------|
| (1) Cimento | 0,000943 | 1  | 0,000943 | 23,31209 | 0,000936 |
| (2) A/C     | 0,001843 | 1  | 0,001843 | 45,55998 | 0,000084 |
| (3) % fibra | 0,000009 | 1  | 0,000009 | 0,22941  | 0,643384 |
| 1 x 2       | 0,000001 | 1  | 0,000001 | 0,03065  | 0,864891 |
| 1 x 3       | 0,000020 | 1  | 0,000020 | 0,50044  | 0,497214 |
| 2 x 3       | 0,000133 | 1  | 0,000133 | 3,29349  | 0,102949 |
| Erro        | 0,000364 | 9  | 0,000040 |          |          |
| Total SS    | 0,003314 | 15 |          |          |          |

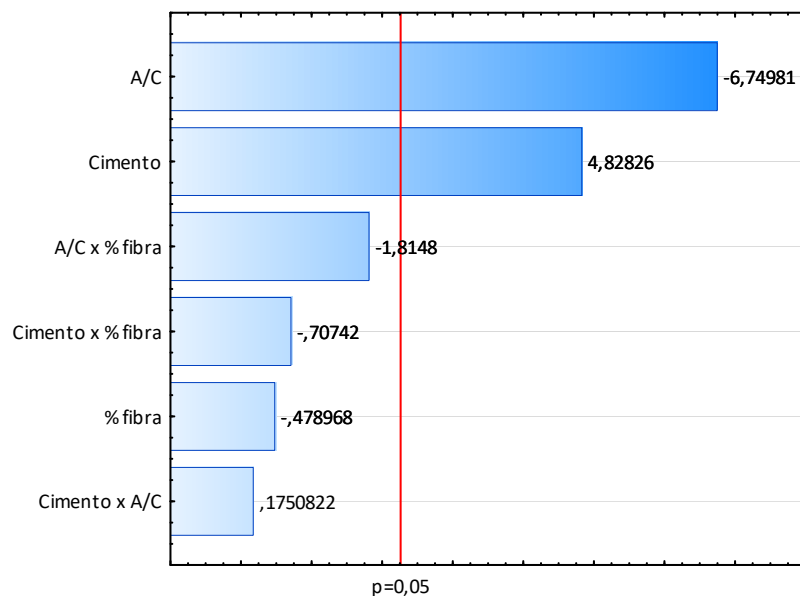
Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

Fonte: Autor (2022).

Dois fatores têm significância estatística para os resultados, o tipo de cimento, com  $p = 0,00093$  e o a relação A/C, com um  $p = 0,000084$ , ambos resultam em uma significância estatística muito próxima a 100%. O fator tipo de cimento apresenta sua influência pelos mesmos motivos como no comportamento da variação dimensional. O fator A/C passa a ter influência pois trata-se de perda de massa, em que a atuação do processo de secagem promove a evaporação de água havendo a redução de massa dos corpos de prova. Já as interações e o fator fibra não apresentaram significância estatística na idade de 3 dias ( $p > 0,05$ ), sendo insuficientes para reduzir significativamente a variação de massa.

A análise do diagrama de Pareto para a variação de massa aos 3 dias (Figura 41) ilustra graficamente os fatores que a influenciam.

Figura 41 – Diagrama de Pareto aos 3 dias para variação de massa das pastas

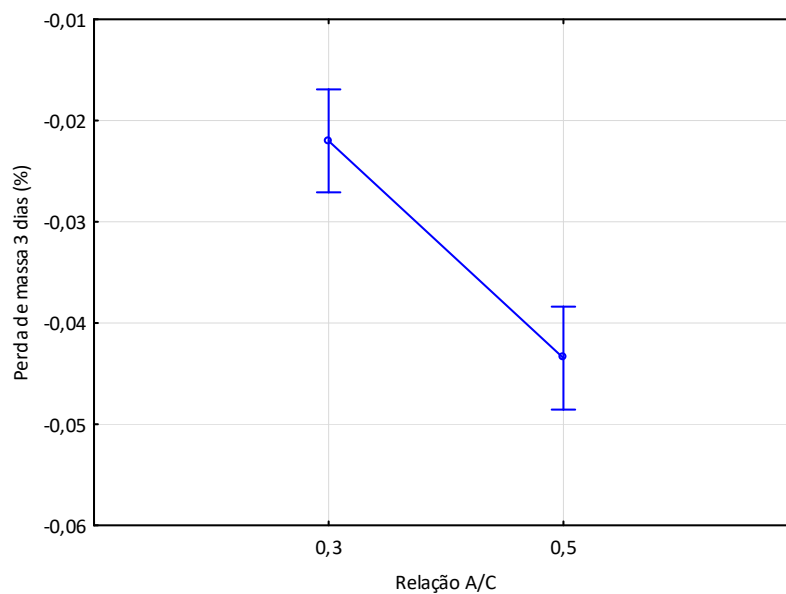


Fonte: Autor (2022).

Os dois fatores que apresentaram significância estatística são mostrados como gráficos de médias, na Figura 42 para a relação A/C e na Figura 43 para o tipo de cimento. Avaliando as médias da perda de massa em função da relação A/C, a maior perda aos 3 dias ocorreu na relação A/C 0,5 com 4,35% de perda, enquanto na relação A/C 0,3 a perda foi de 2,2%. A maior quantidade de água presente com A/C 0,5 faz com que o corpo de prova possua mais material a evaporar no processo de secagem, acentuando a perda de massa em comparação ao A/C 0,3. Em relação ao

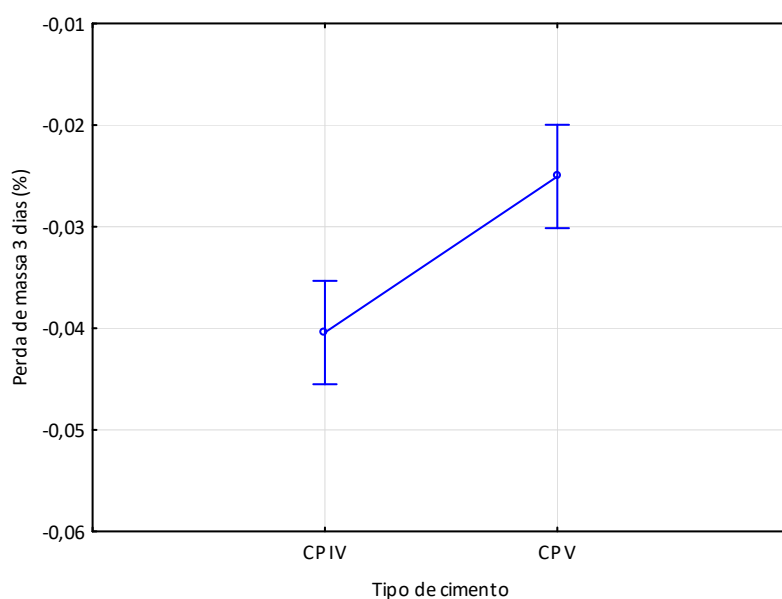
tipo de cimento, as formulações com cimento CP IV obtiveram maior perda de massa com 4,04% de média, enquanto nas formulações com cimento CP V esta perda reduziu para 2,5%.

Figura 42 – Média da variação de massa aos 3 dias das pastas em função da relação água / cimento



Fonte: Autor (2022).

Figura 43 – Média da variação de massa aos 3 dias das pastas em função do tipo de cimento



Fonte: Autor (2022).

A Equação 16 apresenta o modelo de regressão linear para a variação de massa aos 3 dias, conforme coeficientes do Anexo 10.

$$V.M3. = -0,03 + 0,007 * C - 0,01 * A/C + 0,001 \quad (16)$$

onde:

$V.M3.$  – variação de massa aos 3 dias (%)

$C$  – tipo de cimento

$A/C$  – relação A/C

A Tabela 24 apresenta a análise de variância para variação de massa na idade 7 dias.

Tabela 24 – ANOVA para variação de massa das pastas 7 dias ( $R^2 = 0,973$ )

| Fator       | SS       | df | MS       | F        | p        |
|-------------|----------|----|----------|----------|----------|
| (1) Cimento | 0,001994 | 1  | 0,001994 | 92,1378  | 0,000005 |
| (2) A/C     | 0,004332 | 1  | 0,004332 | 200,1247 | 0,000000 |
| (3) % fibra | 0,000200 | 1  | 0,000200 | 9,2562   | 0,013964 |
| 1 x 2       | 0,000081 | 1  | 0,000081 | 3,7333   | 0,085374 |
| 1 x 3       | 0,000275 | 1  | 0,000275 | 12,6839  | 0,006105 |
| 2 x 3       | 0,000311 | 1  | 0,000311 | 14,3454  | 0,004299 |
| Erro        | 0,000195 | 9  | 0,000022 |          |          |
| Total SS    | 0,007388 | 15 |          |          |          |

Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

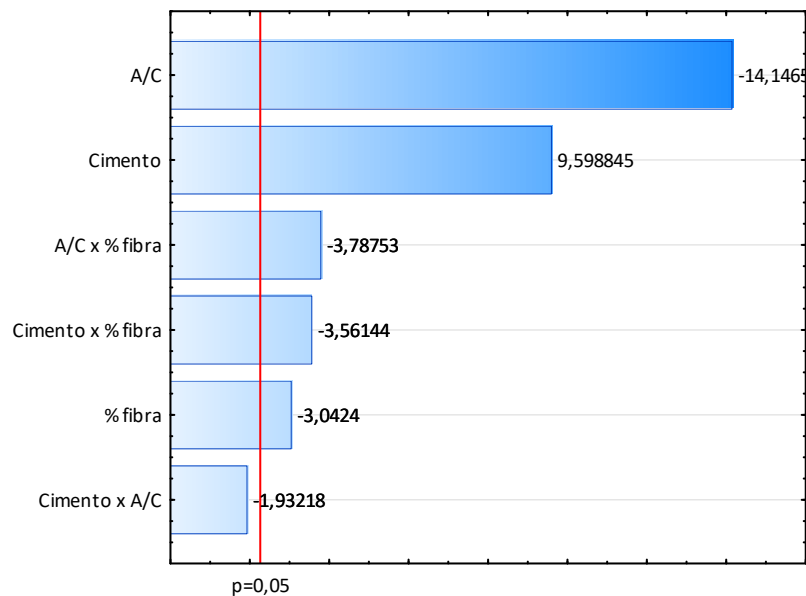
Fonte: Autor (2022).

A variação de massa aos 7 dias, Tabela 24, mostra que todos os fatores e suas interações (exceto entre tipo de cimento vs A/C) apresentam elevada significância estatística para os resultados. Os fatores tipo de cimento e A/C apresentam confiabilidade muito próxima a 100%, repetindo o efeito da idade 3 dias. Porém, aos 7 dias a adição da fibra e as interações com ela passam a apresentar significância. Como fator isolado, ela apresenta 98% de significância. Entre as interações com o tipo de cimento e com a relação A/C, as fibras apresentam p equivalente a 99% de confiabilidade entre ambos. Isto demonstra que até a idade inicial de 3 dias onde o corpo de prova apresenta grande quantidade de água, a

presença desta quantidade de fibras não é capaz ou suficiente para agir de forma a minimizar a perda de massa com a secagem. Também é neste período que ocorre o maior percentual de reação de hidratação do cimento, objetivando o ganho de resistência mecânica. Aos 7 dias, passados os picos de secagem e reação de hidratação, nota-se então que as fibras passam a ter interferência com o aumento de significância.

A análise do diagrama de Pareto para a variação de massa aos 7 dias (Figura 44) ilustra graficamente os fatores que a influenciam.

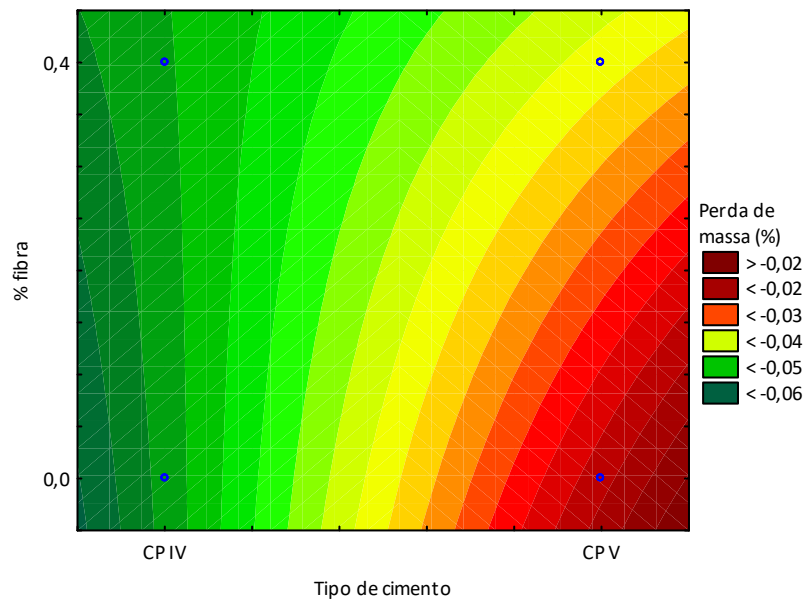
Figura 44 – Diagrama de Pareto aos 7 dias para variação de massa das pastas



Fonte: Autor (2022).

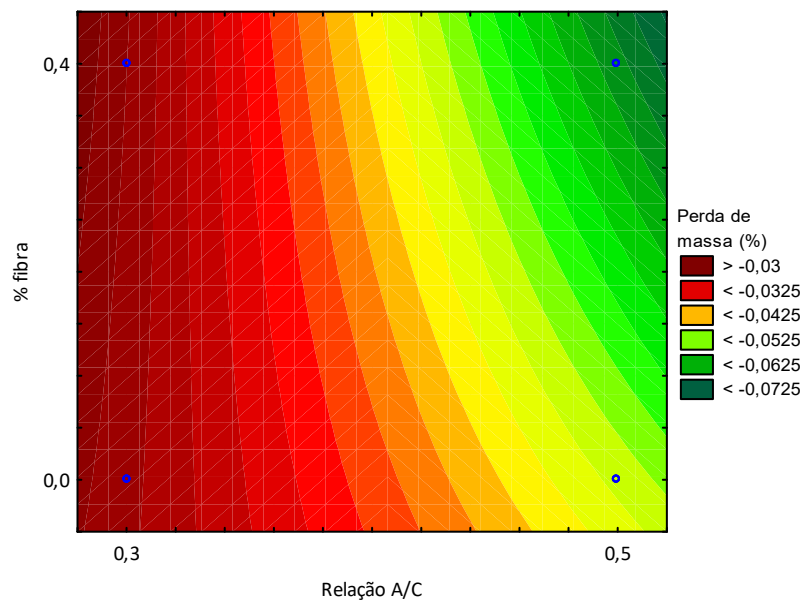
Como a ANOVA aos 7 dias mostrou haver interação entre fatores com significância estatística para a variação de massa, é possível obter os seus gráficos da superfície de resposta, ilustrados nas Figuras 45 e 46.

Figura 45 – Superfície de resposta aos 7 dias entre tipo de cimento e teor de fibra na variação de massa das pastas.



Fonte: Autor (2022).

Figura 46 – Superfície de resposta aos 7 dias entre relação água / cimento e teor de fibra na variação de massa das pastas.



Fonte: Autor (2022).

Aos 7 dias, quando combinado com o tipo de cimento, a presença das fibras em teor 0,4% não alterou a perda de massa para o cimento CP IV. Já no CP V as fibras acentuaram a perda de massa em comparação à região do gráfico sem a

presença delas. Quando comparado ao fator A/C a presença da fibra reduziu a perda de massa na relação A/C 0,3, diferentemente quando comparado com o A/C 0,5 em que a inclusão da fibra acentuou a perda de massa nesta idade de 7 dias.

A Equação 17 mostra o modelo de regressão linear para a variação de massa aos 7 dias, conforme coeficientes do Anexo 11.

$$V.M7. = -0,042 + 0,011 * C - 0,016 * A/C - 0,003 * F - 0,004 * C * F - 0,004 * A/C * F + 0,001 \quad (17)$$

onde:

*V.M7.* – variação de massa aos 7 dias (%)

*C* – tipo de cimento

*A/C* – relação A/C

*F* – teor de fibra

A Tabela 25 apresenta a análise de variância para variação de massa na idade 28 dias.

Tabela 25 – ANOVA para variação de massa das pastas 28 dias ( $R^2 = 0,986$ )

| Fator       | SS       | df | MS       | F        | p        |
|-------------|----------|----|----------|----------|----------|
| (1) Cimento | 0,004186 | 1  | 0,004186 | 190,4519 | 0,000000 |
| (2) A/C     | 0,010022 | 1  | 0,010022 | 455,9704 | 0,000000 |
| (3) % fibra | 0,000162 | 1  | 0,000162 | 7,3817   | 0,023727 |
| 1 x 2       | 0,000000 | 1  | 0,000000 | 0,0026   | 0,960080 |
| 1 x 3       | 0,000124 | 1  | 0,000124 | 5,6539   | 0,041377 |
| 2 x 3       | 0,000192 | 1  | 0,000192 | 8,7534   | 0,015995 |
| Erro        | 0,000198 | 9  | 0,000022 |          |          |
| Total SS    | 0,014885 | 15 |          |          |          |

Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

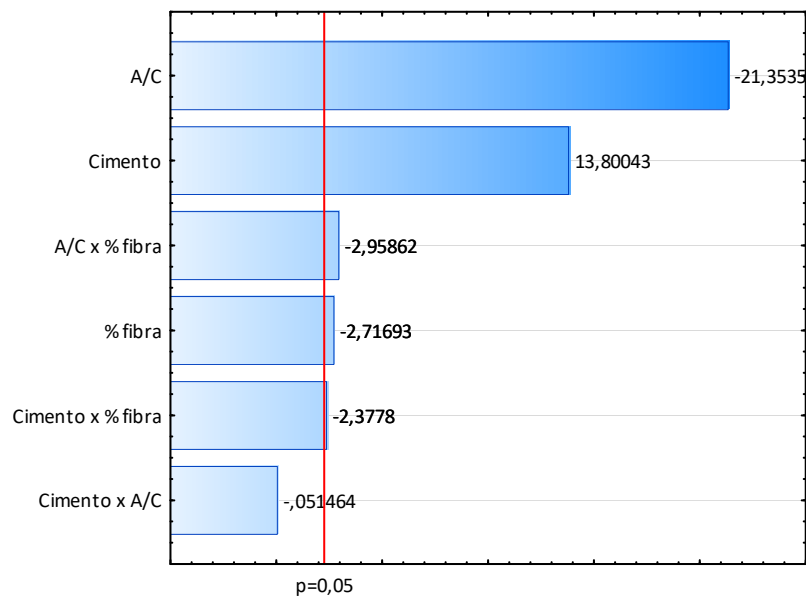
Fonte: Autor (2022).

A ANOVA para a variação de massa aos 28 dias, Tabela 25, é muito similar à idade de 7 dias. Da mesma forma, mostra que todos os fatores e suas interações (exceto entre tipo de cimento vs A/C) apresentam elevada significância estatística ( $p < 0,05$ ). Os fatores tipo de cimento e A/C continuam contribuindo com significância muito próxima a 100%, enquanto o teor de fibra com 97%. As interações entre tipo de

cimento vs teor de fibra, e A/C vs teor de fibra apresentaram p equivalente a 95% e 98% de confiabilidade (respectivamente). Com a evolução da idade de 7 para 28 dias, passados os picos de secagem e reação de hidratação do cimento na idade inicial, as fibras continuam com o efeito junto a esta evolução também.

A análise do diagrama de Pareto para a variação de massa aos 28 dias (Figura 47) ilustra graficamente os fatores que a influenciam.

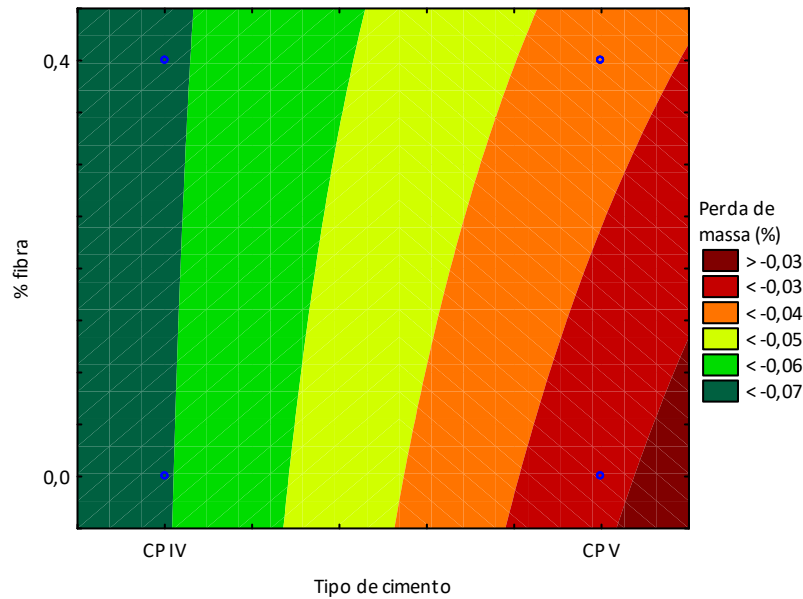
Figura 47 – Diagrama de Pareto aos 28 dias para variação de massa das pastas



Fonte: Autor (2022).

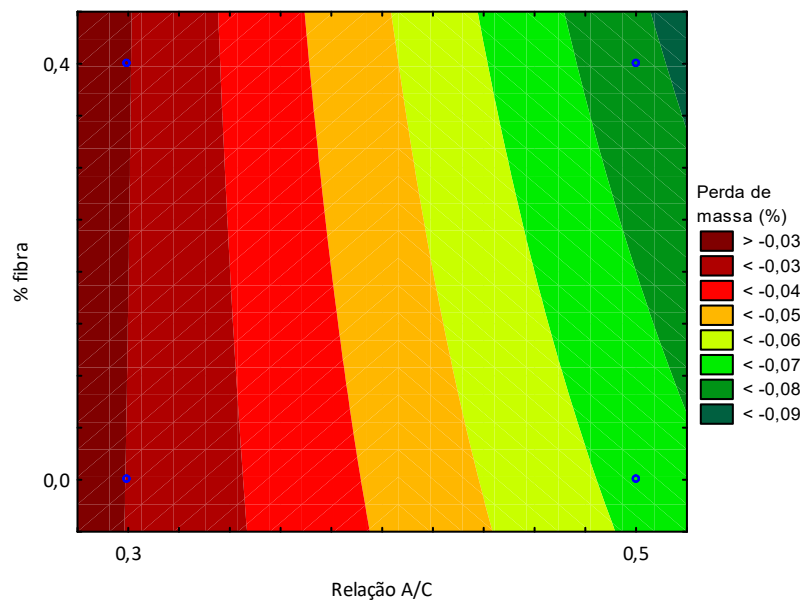
Como a ANOVA aos 28 dias mostrou haver interação entre fatores com significância estatística para a variação de massa, é possível obter os seus gráficos da superfície de resposta, mostrados nas Figuras 48 e 49.

Figura 48 – Superfície de resposta aos 28 dias entre tipo de cimento e teor de fibra na variação de massa das pastas.



Fonte: Autor (2022).

Figura 49 – Superfície de resposta aos 28 dias entre relação água / cimento e teor de fibra na variação de massa das pastas.



Fonte: Autor (2022).

Aos 28 dias, quando combinado com o tipo de cimento, a presença das fibras em teor 0,4% não alterou a perda de massa para o cimento CP IV. Já no CP V as fibras acentuaram a perda de massa em comparação à região do gráfico sem a

presença delas. A presença da fibra não afetou a perda de massa na relação A/C 0,3 quando comparada com a A/C 0,5, em que a inclusão da fibra acentuou a perda de massa na idade de 28 dias.

A Equação 18 mostra o modelo de regressão linear para a variação de massa aos 28 dias, conforme coeficientes do Anexo 12.

$$V.M28. = -0,054 + 0,016 * C - 0,025 * A/C - 0,003 * F - 0,002 * C * F - 0,003 * A/C * F + 0,001 \quad (18)$$

onde:

$V.M28.$  – variação de massa aos 28 dias (%)

$C$  – tipo de cimento

$A/C$  – relação A/C

$F$  – teor de fibra

A partir dos resultados das caracterizações e ensaios das pastas, a formulação A6 (Quadro 04) destacou-se com os melhores resultados (avaliados numericamente) para continuidade dos estudos nas argamassas. Um resumo destes resultados é apresentado no Quadro 05, obtendo uma trabalhabilidade satisfatória (I.C.), altas resistências à compressão e à tração na flexão, densidade de massa e ar incorporado adequados, e menores índices de variação de massa. Assim, esta formulação foi definida como a pasta ótima (P.O.).

Quadro 04 – Formulação A6, pasta ótima (P.O.)

| <b>A6 – Pasta Ótima</b> |      |
|-------------------------|------|
| Cimento                 | CP V |
| Fibra                   | 0,4% |
| A/C                     | 0,3  |

Fonte: Autor (2022).

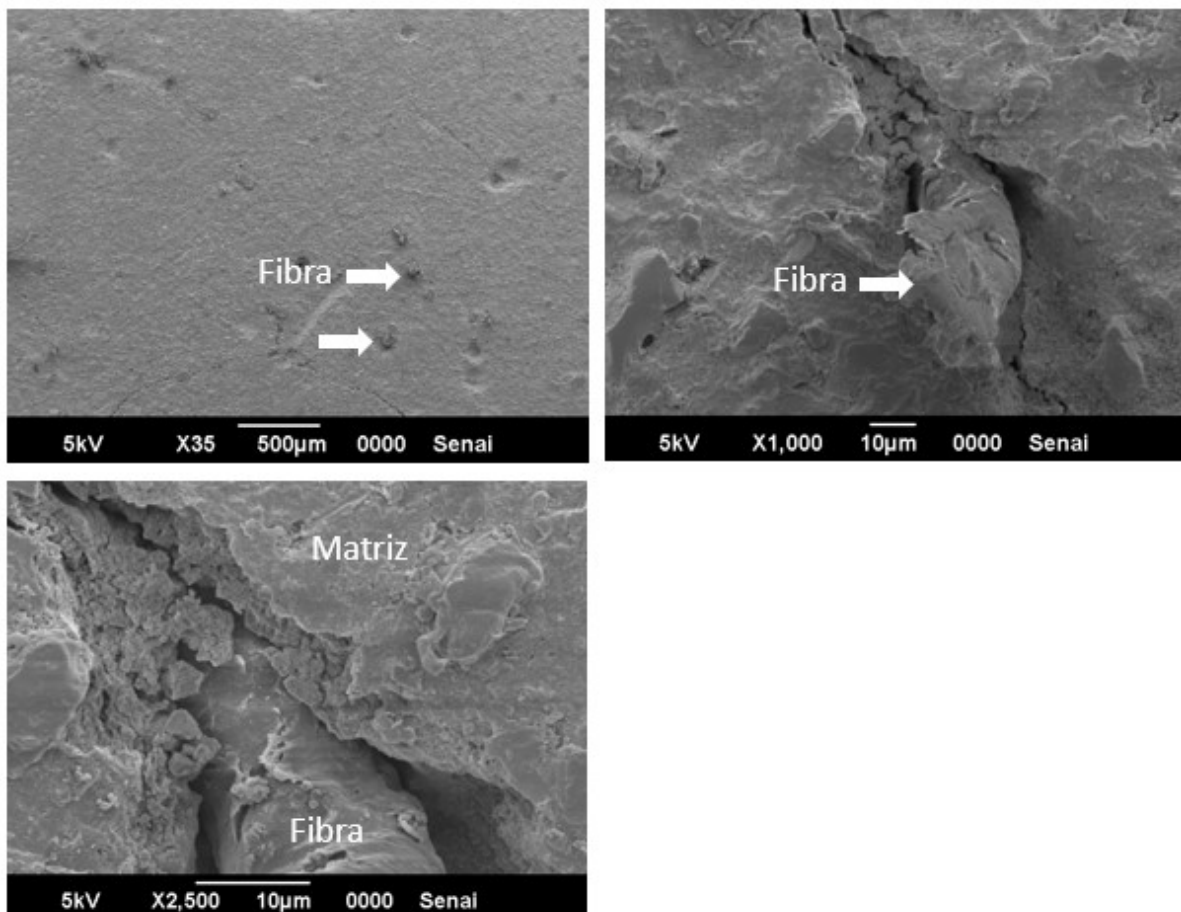
Quadro 05 – Características da pasta ótima (formulação A6)

| Característica                     | Resultado                  |
|------------------------------------|----------------------------|
| Cimento                            | CP V                       |
| A/C                                | 0,3                        |
| % Fibra                            | 0,4%                       |
| Densidade                          | 2,00 g/cm <sup>3</sup>     |
| Ar incorporado                     | 4,19%                      |
| Índice de consistência             | 214 mm                     |
| Resistencia à tração na Flexão     | 15,9 MPa                   |
| Resistencia à compressão axial     | 79,7 MPa                   |
| Variação dimensional 3d / 7d / 28d | -0,93 / -1,34 / -1,76 mm/m |
| Variação de massa 3d / 7d / 28d    | -1,32 / -1,48 / -1,59%     |

Fonte: Autor (2022).

As amostras desta formulação foram submetidas à análise em microscópio eletrônico de varredura (MEV), e são apresentadas na Figura 50.

Figura 50 – Microscopia eletrônica (MEV) de amostras da formulação A6



Fonte: Autor (2022).

### 7.1.2. Argamassa

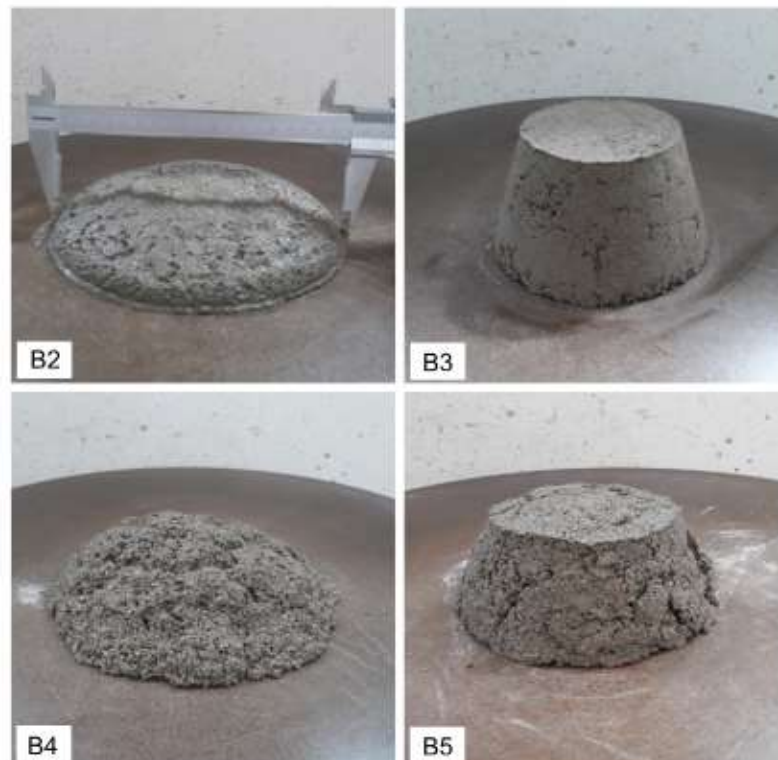
Conforme exposto no item 6.4, a partir da determinação da pasta ótima (P.O.) foram iniciados os ensaios com formulações das argamassas da Tabela 06, sendo que a caracterização no estado fresco mostrou ser necessária uma fase de pré-testes para ajuste de trabalhabilidade das formulações da P.O. A Tabela 26 e a Figura 51 mostram os I.C. obtidos na etapa de pré-testes variando-se a A/C, com destaque para a formulação B3, que mesmo com uma alta relação A/C não foi possível obter a medida do abatimento devido à ausência de trabalhabilidade.

Tabela 26 – Etapa de pré-teste das argamassas, A/C e I.C.

| Combinação | Pasta | Traço Areia | Granulometria Areia | A/C  | I.C. médio (mm) |
|------------|-------|-------------|---------------------|------|-----------------|
| B1         | P.O.  | 1:1         | Fina                | 0,30 | 164             |
| B2         | P.O.  | 1:1         | Grossa              | 0,30 | 194             |
| B3         | P.O.  | 1:5         | Fina                | 0,75 | *               |
| B4         | P.O.  | 1:5         | Grossa              | 0,60 | 184             |
| B5         | P.O.  | 1:3         | Média               | 0,40 | 141             |

Fonte: Autor (2022).

Figura 51 – Índice de consistência das argamassas na etapa de pré-testes



Fonte: Autor (2022).

Tais dificuldades em medir a trabalhabilidade, além de estarem relacionadas com a quantidade de água na mistura, também estão relacionadas com o traço e granulometria do agregado. O aumento do traço fez com que a trabalhabilidade fosse reduzida, enquanto que o aumento da granulometria provocou um aumento da trabalhabilidade. Haddad (2020) verificou o comportamento destes fatores na fluidez da argamassa, cita que o tamanho das partículas e a sua distribuição granulométrica afetam o consumo de água na mistura que lubrifica os contornos de grãos. Assim, um traço com maior quantidade de agregado demanda mais água (visto que possui mais grãos para serem lubrificados), enquanto que uma mistura com agregados de maior tamanho demanda menos água (quantidade menor que contornos de grãos).

Diante da interferência dessas variáveis na trabalhabilidade, foi necessário ajustá-las para ser válido a comparação entre as formulações. A relação A/C foi então fixada em 0,5, valor intermediário que atenderia a todas elas. Para a variável traço, observou-se que as formulações com traço 1:5 apresentaram baixa trabalhabilidade, então foram reduzidas para 1:3. Ajustando o nível maior desta variável, o ponto central conseqüentemente precisou ser reduzido para 1:2. Para a variável granulometria, o nível menor foi ajustado com o grão de tamanho fino como material passante na peneira 0,6 mm e retido na 0,3 mm (ante ao retido na malha 0,15 mm ou 150  $\mu$ m).

Após os ajustes na relação A/C, no traço, e na granulometria, as formulações foram submetidas novamente à avaliação da trabalhabilidade, resultando nos abatimentos do I.C. apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – Índice de consistência das argamassas ajustadas

| Combinação | Pasta | A/C | Traço Areia | Granulometria Areia | Média (mm) | Desvio Padrão |
|------------|-------|-----|-------------|---------------------|------------|---------------|
| B1a        | P.O.  | 0,5 | 1:1         | Fina                | 341        | 8,22          |
| B2a        | P.O.  | 0,5 | 1:1         | Grossa              | 357        | 2,05          |
| B3a        | P.O.  | 0,5 | 1:3         | Fina                | 165        | 1,25          |
| B4a        | P.O.  | 0,5 | 1:3         | Grossa              | 223        | 2,16          |
| B5a        | P.O.  | 0,5 | 1:2         | Média               | 278        | 2,05          |

Fonte: Autor (2022).

Para analisar o efeito do traço e da granulometria do agregado sobre o índice de consistência, foi realizada a análise estatística dos resultados obtidos. A

Tabela 28 apresenta a análise de variância para os resultados do índice de consistência das argamassas.

Tabela 28 – ANOVA para índice de consistência das argamassas ( $R^2 = 0,995$ )

| Fator             | SS       | df | MS       | F        | p        |
|-------------------|----------|----|----------|----------|----------|
| (1) Traço         | 71920,08 | 1  | 71920,08 | 2358,153 | 0,000000 |
| (2) Granulometria | 4144,08  | 1  | 4144,08  | 135,878  | 0,000000 |
| 1 × 2             | 1260,75  | 1  | 1260,75  | 41,338   | 0,000049 |
| Erro              | 335,48   | 11 | 30,50    |          |          |
| Total SS          | 77660,40 | 14 |          |          |          |

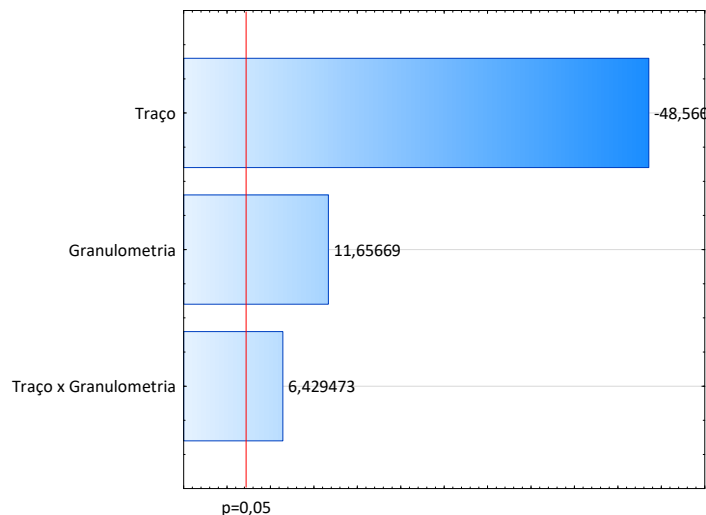
Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

Fonte: Autor (2022).

A análise da ANOVA para o índice da consistência das argamassas, Tabela 28, mostra que ambos os fatores têm elevada significância estatística para os resultados, com um  $p < 0,05$  ( $p = 0,000$ ), o que resulta em uma confiabilidade dos resultados muito próxima a 100%, assim como sua interação. O traço, caracterizado pela proporção de cimento e areia na mistura, atua de forma direta na sua fluidez promovendo o maior ou menor incremento de material sólido nela. A granulometria também apresenta significância a medida em que o seu tamanho de grão altera a reologia da mistura quanto à demanda de água de amassamento.

A análise do diagrama de Pareto para o I.C. (Figura 52) mostra a significância destes fatores, ambos acima de 95%.

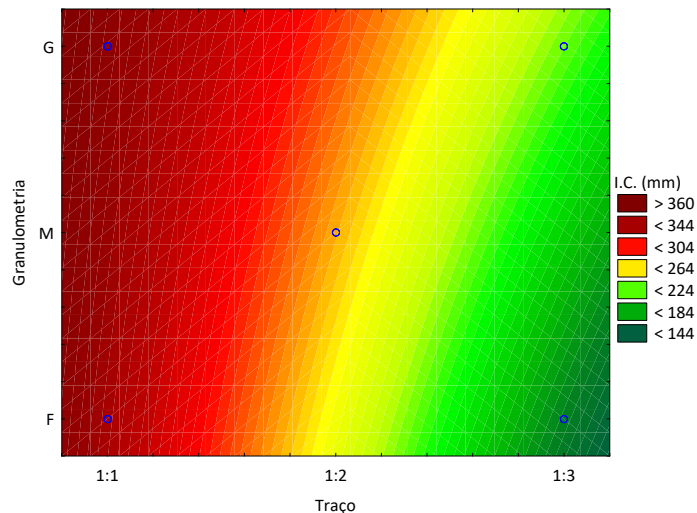
Figura 52 – Diagrama de Pareto para índice de consistência das argamassas



Fonte: Autor (2022).

Como a ANOVA mostrou que a interação tem significância estatística para o índice de consistência, foi possível obter o gráfico da superfície de resposta (Figura 53) para esta variável.

Figura 53 – Superfície de resposta entre o traço e granulometria para índice de consistência das argamassas



Fonte: Autor (2022).

A superfície de resposta da Figura 53 mostra que os maiores índices de consistência ocorrem em traços com menor quantidade de areia em relação ao cimento, principalmente quando aliados a agregado de maior superfície específica. A exemplo, na Figura 53 a combinação do traço 1:1 com agregado de granulometria grossa resultou em I.C. de 360 mm. Traços com maior quantidade de areia em relação ao cimento reduzem o índice de consistência, principalmente quando aliados a agregado de menor superfície específica. A exemplo, na Figura 53 a combinação do traço 1:3 com agregado de granulometria fina resultou em I.C. de 144 mm, inferior à metade do maior I.C. medido (361mm).

O aumento da quantidade de agregados em uma mistura provoca a perda da sua fluidez, visto que a parcela dos agregados passará a apresentar uma maior área superficial. Desta forma a parcela da água e do cimento serão insuficientes para manter a mesma lubrificação e por consequência o índice de consistência.

Em relação à granulometria do agregado, o aumento para granulometria grossa faz com que seja necessária menor quantidade de agregado proporcionalmente ao de granulometria fina ou média na mistura, visto seu maior

volume. Com isso, a parcela dos agregados apresenta menor área superficial e consome menos água, aumentando a fluidez e o índice de consistência da mistura.

A Equação 19 apresenta o modelo de regressão linear para o índice de consistência, conforme coeficientes do Anexo 13.

$$I. C. = 272 - 77 * T + 18 * G + 10 * T * G + 1 \quad (19)$$

onde:

I. C. – índice de consistência (mm)

T – traço

G – granulometria

As densidades de massa das formulações ajustadas das argamassas também foram determinadas, conforme Tabela 29.

Tabela 29 – Densidade de massa das argamassas ajustadas

| Combinação | A/C | Traço Areia | Granulometria Areia | Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) |
|------------|-----|-------------|---------------------|--------------------------------|
| B1a        | 0,5 | 1:1         | Fina                | 2,069                          |
| B2a        | 0,5 | 1:1         | Grossa              | 2,031                          |
| B3a        | 0,5 | 1:3         | Fina                | 2,080                          |
| B4a        | 0,5 | 1:3         | Grossa              | 2,136                          |
| B5a        | 0,5 | 1:2         | Média               | 2,063                          |

Fonte: Autor (2022).

A Tabela 30 mostra a análise de variância para a densidade das argamassas em função da adição de fibra de polipropileno, do traço e da granulometria do agregado.

Tabela 30 – ANOVA para densidade de massa das argamassas (R<sup>2</sup> = 0,966)

| Fator             | SS       | df | MS       | F        | p     |
|-------------------|----------|----|----------|----------|-------|
| (1) Traço         | 3404,376 | 1  | 3404,376 | 17,06783 | 0,151 |
| (2) Granulometria | 73,446   | 1  | 73,446   | 0,36822  | 0,653 |
| 1 × 2             | 2216,223 | 1  | 2216,223 | 11,11103 | 0,186 |
| Erro              | 199,462  | 1  | 199,462  |          |       |
| Total SS          | 5893,507 | 4  |          |          |       |

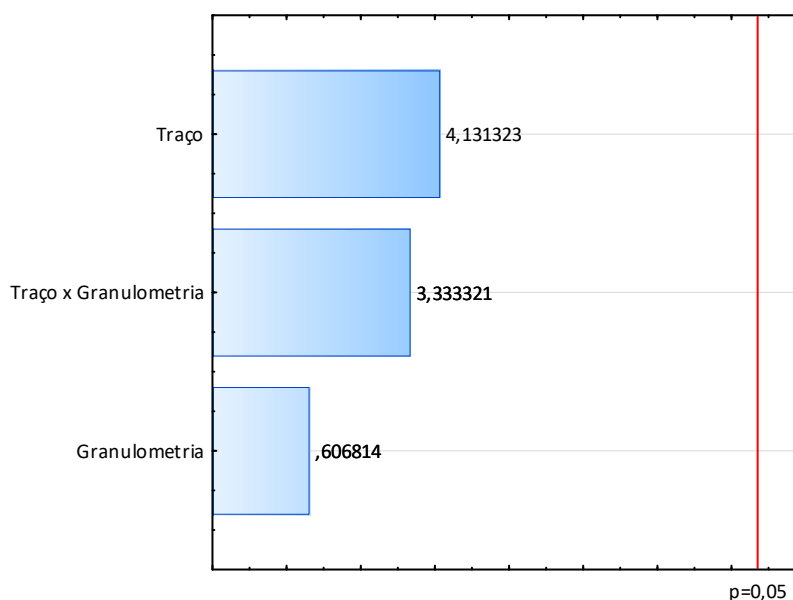
Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

Fonte: Autor (2022).

A ANOVA para a densidade de massa das argamassas, Tabela 30, mostra que ambos os fatores não têm significância estatística a 95%, pois  $p > 0,05$ . O fator traço resulta em  $p = 0,151$ , correspondendo a 84,9%, e o fator granulometria resulta em  $p = 0,653$ , correspondendo a 34,7%, ambos com  $p > 0,05$ , ou seja, sem significância estatística (confiabilidade). Além dos fatores isolados, a interação entre eles também foi não significativa. O motivo está relacionado ao nível de variação destes fatores, não suficientes para provocar alterações de significância.

O diagrama de Pareto para a densidade (Figura 54) mostra a não significância destes fatores, todos inferiores a 95%.

Figura 54 – Diagrama de Pareto para densidade de massa das argamassas



Fonte: Autor (2022).

A ausência de fatores ou interações com significância torna a densidade de massa uma constante não sendo possível apresentar um modelo de regressão linear.

A NBR 13281:2005, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos, traz a classificação das argamassas conforme características e propriedades apresentadas em alguns ensaios. Para a densidade de massa no estado fresco, todas as formulações tiveram densidades acima de  $2,00 \text{ g/cm}^3$ , sendo então enquadradas pela NBR 13281:2005 como classe D6 (maior classe), em uma classificação entre D1 e D6. A variação entre as médias de cada traço foi de apenas de  $0,58 \text{ g/cm}^3$ , ratificando baixa interferência no resultado final.

O teor de ar incorporado das formulações ajustadas das argamassas também foi determinado, conforme Tabela 31.

Tabela 31 – Teor de ar incorporado das argamassas ajustadas

| Combinação | A/C | Traço Areia | Granulometria Areia | Ar incorporado (%) |
|------------|-----|-------------|---------------------|--------------------|
| B1a        | 0,5 | 1:1         | Fina                | 0,00               |
| B2a        | 0,5 | 1:1         | Grossa              | 0,68               |
| B3a        | 0,5 | 1:3         | Fina                | 6,39               |
| B4a        | 0,5 | 1:3         | Grossa              | 3,89               |
| B5a        | 0,5 | 1:2         | Média               | 4,28               |

Fonte: Autor (2022).

A análise de variância para o efeito da adição de fibra de polipropileno, do traço e da granulometria do agregado sobre o ar incorporado nas argamassas é mostrada na Tabela 32.

Tabela 32 – ANOVA para teor de ar incorporado nas argamassas ( $R^2 = 0,843$ )

| Fator             | SS       | df | MS       | F        | p     |
|-------------------|----------|----|----------|----------|-------|
| (1) Traço         | 23,04735 | 1  | 23,04735 | 10,39161 | 0,084 |
| (2) Granulometria | 0,82724  | 1  | 0,82724  | 0,37299  | 0,604 |
| Erro              | 4,43576  | 2  | 2,21788  |          |       |
| Total SS          | 28,31036 | 4  |          |          |       |

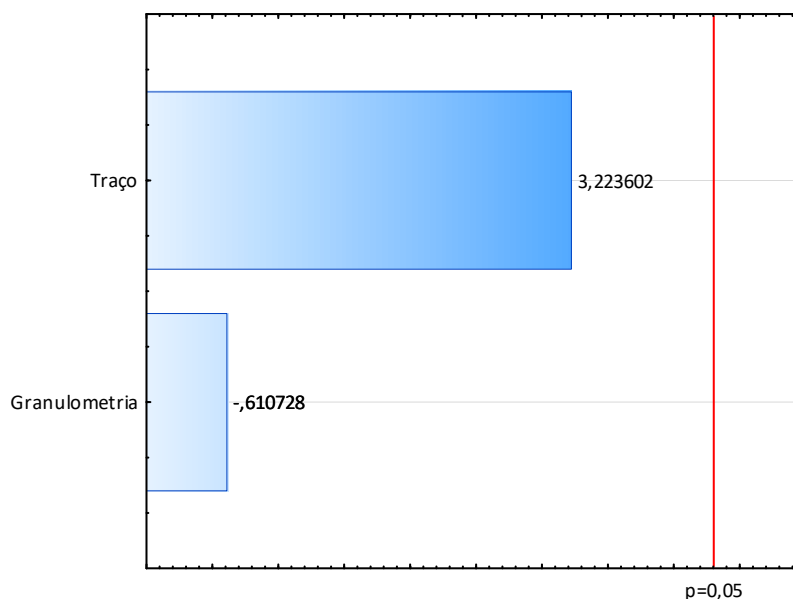
Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

Fonte: Autor (2022).

Novamente, ambos os fatores não apresentaram significância estatística a 95% de confiabilidade, pois  $p > 0,05$ . O fator traço mostra  $p = 0,084$ , correspondendo a 91,6%, e o fator granulometria obteve  $p = 0,604$  correspondendo a 39,6%, ambos com  $p > 0,05$ , e que resultam em uma baixa significância estatística (confiabilidade). Assim como na densidade, o motivo está relacionado ao nível de variação destes fatores, não suficientes para provocar alterações de significância.

O diagrama de Pareto para o ar incorporado (Figura 55) mostra a baixa significância destes fatores, todos inferiores a 95%.

Figura 55 – Diagrama de Pareto para o teor de ar incorporado das argamassas



Fonte: Autor (2022).

A ausência de fatores ou interações com significância torna o teor de ar incorporado uma constante, não sendo possível apresentar um modelo de regressão linear.

Os corpos de prova das argamassas moldadas para as formulações ajustadas foram submetidos na idade de 28 dias ao ensaio de resistência à tração na flexão, cujos resultados são expressos na Tabela 33.

Tabela 33 – Resistência à tração na flexão das argamassas

| Combinação | Pasta | A/C | Traço Areia | Granulometria Areia | Média (MPa) | Desvio Padrão |
|------------|-------|-----|-------------|---------------------|-------------|---------------|
| B1a        | P.O.  | 0,5 | 1:1         | Fina                | 9,11        | 0,67          |
| B2a        | P.O.  | 0,5 | 1:1         | Grossa              | 7,63        | 0,46          |
| B3a        | P.O.  | 0,5 | 1:3         | Fina                | 6,31        | 0,74          |
| B4a        | P.O.  | 0,5 | 1:3         | Grossa              | 7,37        | 1,13          |
| B5a        | P.O.  | 0,5 | 1:2         | Média               | 8,18        | 0,83          |

Fonte: Autor (2022).

A análise de variância para a resistência à tração na flexão das argamassas em função do traço e da granulometria do agregado é mostrada na Tabela 34.

Tabela 34 – ANOVA para resistência à tração na flexão das argamassas ( $R^2 = 0,502$ )

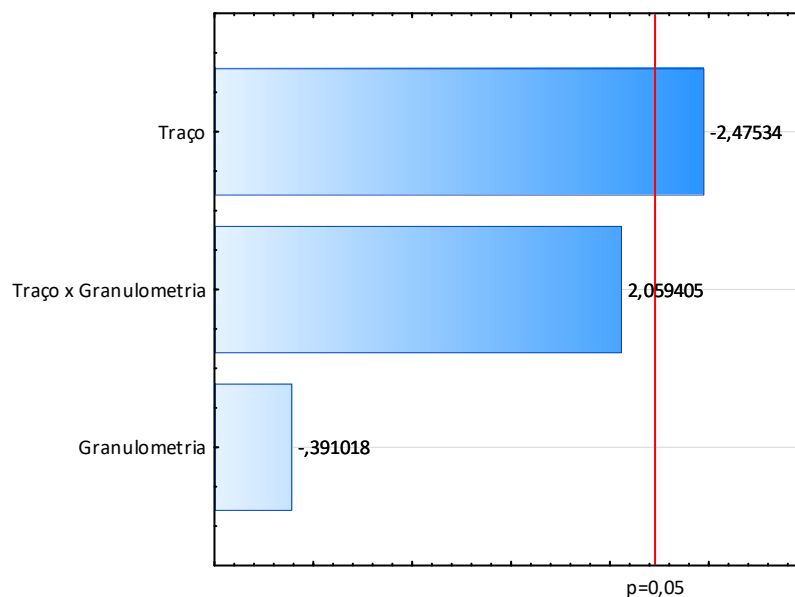
| Fator             | SS       | df | MS       | F        | p     |
|-------------------|----------|----|----------|----------|-------|
| (1) Traço         | 5,98807  | 1  | 5,988069 | 6,127331 | 0,033 |
| (2) Granulometria | 0,14942  | 1  | 0,149420 | 0,152895 | 0,704 |
| 1 x 2             | 4,14476  | 1  | 4,144758 | 4,241151 | 0,066 |
| Erro              | 9,77272  | 10 | 0,977272 |          |       |
| Total SS          | 19,62795 | 13 |          |          |       |

Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

Fonte: Autor (2022).

Apenas o fator traço tem significância estatística acima de 95%, para  $p < 0,05$  ( $p = 0,033$ ), com confiabilidade de 96%, pois ele interfere de forma direta na quantidade de cimento e agregado da mistura. O diagrama de Pareto para a resistência à tração na flexão é mostrado na Figura 56.

Figura 56 – Diagrama de Pareto para resistência à tração na flexão das argamassas

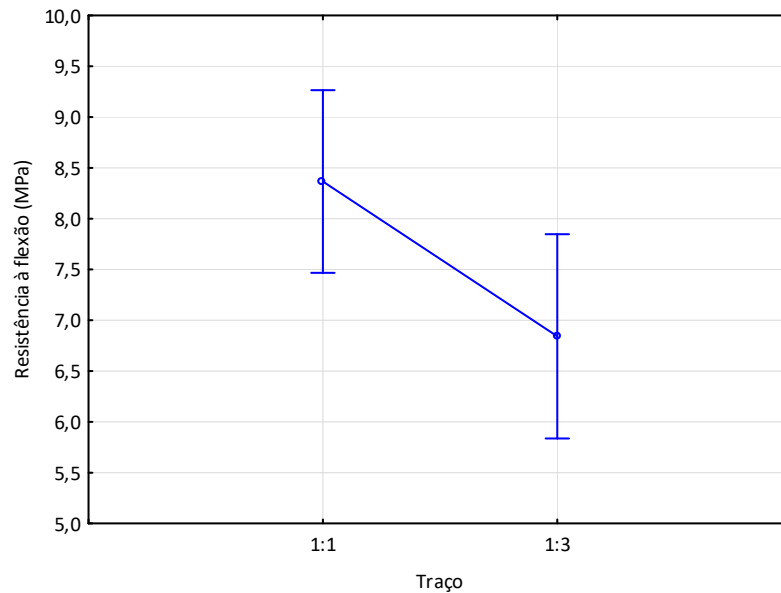


Fonte: Autor (2022).

Como o fator de maior significância foi o traço, o mesmo é mostrado em um gráfico de médias na Figura 57. Avaliando as médias encontradas, o traço 1:1 obteve 1,5 MPa acima da média da resistência à tração na flexão do traço 1:3. Este comportamento é explicado em função da maior quantidade de cimento e da menor

quantidade de agregado presentes no traço 1:1. Enquanto este possui uma parte de cimento para uma parte de agregado, o traço 1:3 possui três partes de agregado, o que reduz a resistência à tração na flexão desta mistura.

Figura 57 – Valores médios para resistência à tração na flexão com a variação do traço das argamassas



Fonte: Autor (2022).

A Equação 20 mostra o modelo de regressão linear para a resistência à tração na flexão, conforme coeficientes do Anexo 14.

$$R. F. = 7,73 - 0,7 * T + 0,3 \quad (20)$$

onde:

R. F. – resistência à tração na flexão (MPa)

T – traço

Segundo a NBR 13281:2005, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos, para a resistência à tração na flexão todas as formulações foram classificadas como R6 (maior classe), que caracteriza resistência superior a 3,5 MPa (em uma classificação entre R1 e R6).

Após o ensaio de resistência à tração na flexão, as metades dos corpos de prova das argamassas foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão, Tabela 35.

Tabela 35 – Resistência à compressão das argamassas

| Combinação | Pasta | A/C | Traço Areia | Granulometria Areia | Média (MPa) | Desvio Padrão |
|------------|-------|-----|-------------|---------------------|-------------|---------------|
| B1a        | P.O.  | 0,5 | 1:1         | Fina                | 26,72       | 1,13          |
| B2a        | P.O.  | 0,5 | 1:1         | Grossa              | 20,81       | 1,12          |
| B3a        | P.O.  | 0,5 | 1:3         | Fina                | 9,58        | 0,98          |
| B4a        | P.O.  | 0,5 | 1:3         | Grossa              | 12,19       | 1,35          |
| B5a        | P.O.  | 0,5 | 1:2         | Média               | 19,83       | 0,34          |

Fonte: Autor (2022).

A análise de variância para a resistência à compressão das argamassas em função do traço e da granulometria do agregado é mostrada na Tabela 36.

Tabela 36 – ANOVA para resistência à compressão das argamassas ( $R^2 = 0,946$ )

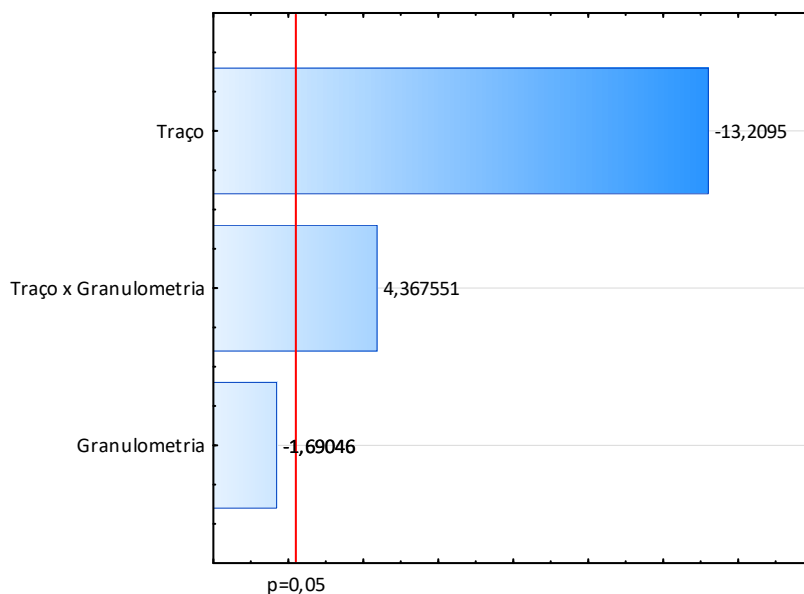
| Fator             | SS       | df | MS       | F        | p     |
|-------------------|----------|----|----------|----------|-------|
| (1) Traço         | 497,9527 | 1  | 497,9527 | 174,4905 | 0,000 |
| (2) Granulometria | 8,1551   | 1  | 8,1551   | 2,8577   | 0,119 |
| 1 x 2             | 54,4368  | 1  | 54,4368  | 19,0755  | 0,001 |
| Erro              | 31,3913  | 11 | 2,8538   |          |       |
| Total SS          | 591,9358 | 14 |          |          |       |

Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

Fonte: Autor (2022).

A ANOVA para a resistência à compressão das argamassas mostra que o fator traço e a interação entre os fatores obtiveram significância estatística, com confiabilidade dos resultados muito próxima a 100%. Da mesma forma que a resistência à tração na flexão, o traço interfere de forma direta na quantidade de cimento na mistura, por isto a sua significância. O diagrama de Pareto para a resistência à compressão é mostrado na Figura 58.

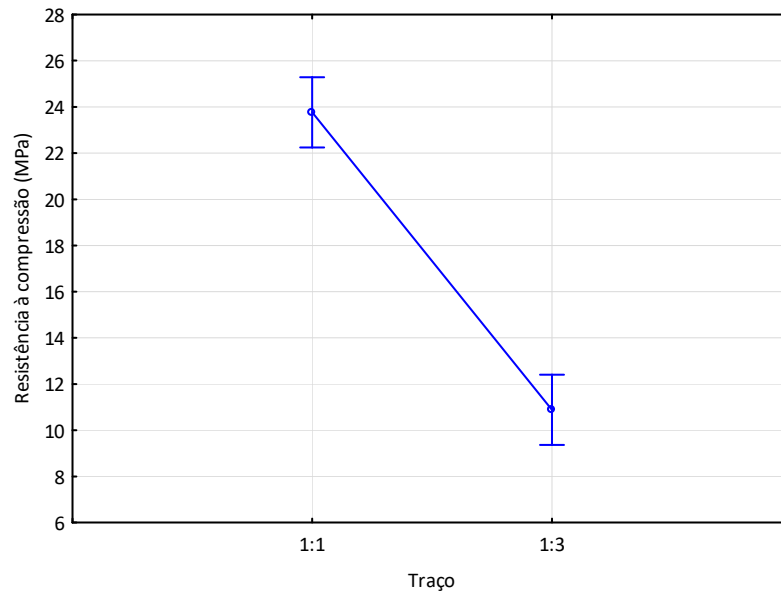
Figura 58 – Diagrama de Pareto para resistência à compressão das argamassas



Fonte: Autor (2022).

Como o fator de maior significância foi o traço, o mesmo é mostrado em um gráfico de médias na Figura 59. Avaliando as médias encontradas, o traço 1:1 tem resistência superior ao dobro da resistência à compressão do traço 1:3. Este comportamento é explicado, assim como na resistência à tração na flexão, em função da maior quantidade de cimento e da menor quantidade de agregado presentes no traço 1:1. Enquanto este possui uma parte de cimento para uma parte de agregado, o traço 1:3 possui três partes de agregado, o que reduz a resistência à compressão desta mistura.

Figura 59 – Valores médios para resistência à compressão com a variação do traço das argamassas



Fonte: Autor (2022).

O modelo de regressão linear para a resistência à compressão é mostrado na Equação 21, conforme coeficientes do Anexo 15.

$$R. C. = 17,82 - 6,4 * T + 0,48 \quad (21)$$

onde:

R. C. – resistência à compressão (MPa)

T – traço

Segundo a NBR 13281:2005, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos, para a resistência à compressão todas as formulações foram classificadas como P6, maior classe, com resistência acima de 8,0 MPa.

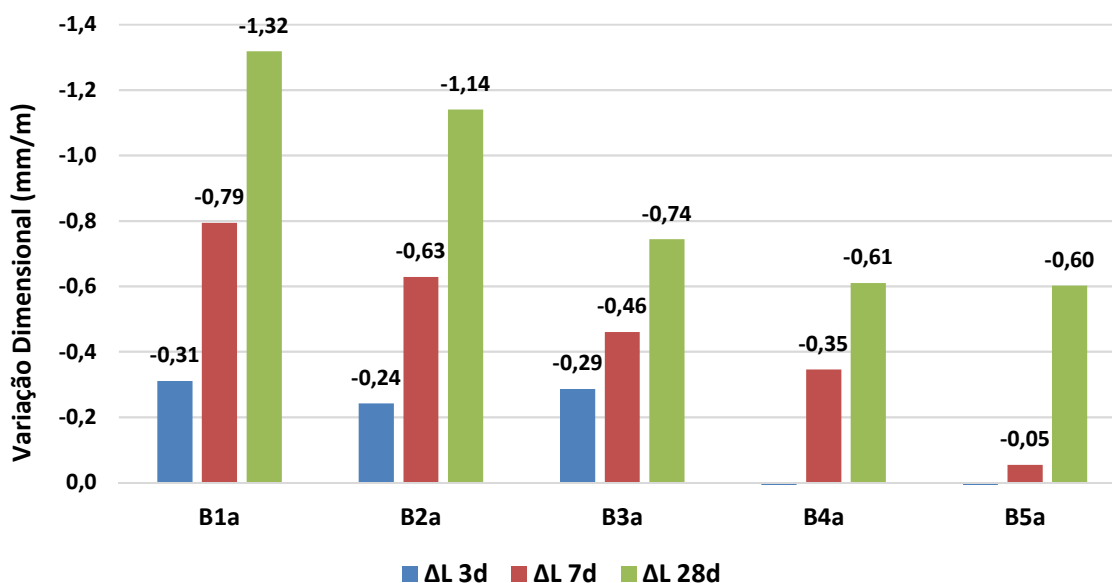
Os corpos de prova das argamassas foram avaliados também quanto à variação dimensional. A Tabela 37 apresenta a variação dimensional de cada corpo de prova em relação à calibração da barra padrão, nas idades de 3d, 7d e 28d, além da leitura inicial após desforma. A variação dimensional (mm/m) em função das idades é apresentada na Figura 60.

Tabela 37 – Variação dimensional das argamassas

| Formul. | CP | Variação dimensional (mm) |       |       |       | Variação dimensional (mm/m) |               |                |
|---------|----|---------------------------|-------|-------|-------|-----------------------------|---------------|----------------|
|         |    | Inicial                   | 3d    | 7d    | 28d   | $\Delta L$ 3d               | $\Delta L$ 7d | $\Delta L$ 28d |
| B1a     | 1  | 2,052                     | 1,961 | 1,856 | 1,722 | -0,36                       | -0,78         | -1,32          |
|         | 2  | 1,965                     | 1,901 | 1,764 | 1,636 | -0,26                       | -0,80         | -1,32          |
| B2a     | 1  | 1,540                     | 1,490 | 1,384 | 1,252 | -0,20                       | -0,62         | -1,15          |
|         | 2  | 1,779                     | 1,708 | 1,621 | 1,497 | -0,28                       | -0,63         | -1,13          |
| B3a     | 1  | 0,803                     | 0,731 | 0,688 | 0,621 | -0,29                       | -0,46         | -0,73          |
|         | 2  | 1,600                     | 1,529 | 1,485 | 1,410 | -0,28                       | -0,46         | -0,76          |
| B4a     | 1  | 1,903                     | 1,873 | 1,821 | 1,758 | -0,12                       | -0,33         | -0,58          |
|         | 2  | 1,833                     | 2,020 | 1,742 | 1,673 | 0,75                        | -0,36         | -0,64          |
| B5a     | 1  | 1,774                     | 1,820 | 1,763 | 1,672 | 0,18                        | -0,04         | -0,41          |
|         | 2  | 1,664                     | 1,744 | 1,648 | 1,465 | 0,32                        | -0,06         | -0,80          |

Fonte: Autor (2022).

Figura 60 – Média da variação dimensional das argamassas



Fonte: Autor (2022).

Para analisar o efeito do traço e da granulometria do agregado sobre a variação dimensional das argamassas foi realizada uma análise de variância em cada idade. A Tabela 38 apresenta a ANOVA para a variação dimensional aos 3 dias. Nenhum fator ou interação apresentou significância estatística mínima de 95% ( $p < 0,05$ ), sendo a maior significância de 85% ( $p > 0,05$ ). Isto é explicado porque a

presença do agregado na argamassa, independente se com traço 1:1 ou traço 1:3, já é suficiente para segurar significativamente a retração dos corpos de prova no processo de secagem, assim como a variação de tamanho do agregado.

Tabela 38 – ANOVA para variação dimensional das argamassas aos 3 dias ( $R^2 = 0,660$ )

| <b>Fator</b>      | <b>SS</b> | <b>df</b> | <b>MS</b> | <b>F</b> | <b>p</b> |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| (1) Traço         | 0,168200  | 1         | 0,168200  | 2,127347 | 0,204    |
| (2) Granulometria | 0,223112  | 1         | 0,223112  | 2,821859 | 0,154    |
| 1 x 2             | 0,141512  | 1         | 0,141512  | 1,789805 | 0,239    |
| Erro              | 0,395328  | 5         | 0,079066  |          |          |
| Total SS          | 1,162854  | 9         |           |          |          |

Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

Fonte: Autor (2022).

A Tabela 39 apresenta a análise de variância para a variação dimensional na idade de 7 dias.

Tabela 39 – ANOVA para variação dimensional das argamassas aos 7 dias ( $R^2 = 0,998$ )

| <b>Fator</b>      | <b>SS</b> | <b>df</b> | <b>MS</b> | <b>F</b> | <b>p</b> |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| (1) Traço         | 0,189728  | 1         | 0,189728  | 878,370  | 0,000001 |
| (2) Granulometria | 0,039200  | 1         | 0,039200  | 181,481  | 0,000040 |
| 1 x 2             | 0,001352  | 1         | 0,001352  | 6,259    | 0,054367 |
| Erro              | 0,001080  | 5         | 0,000216  |          |          |
| Total SS          | 0,636174  | 9         |           |          |          |

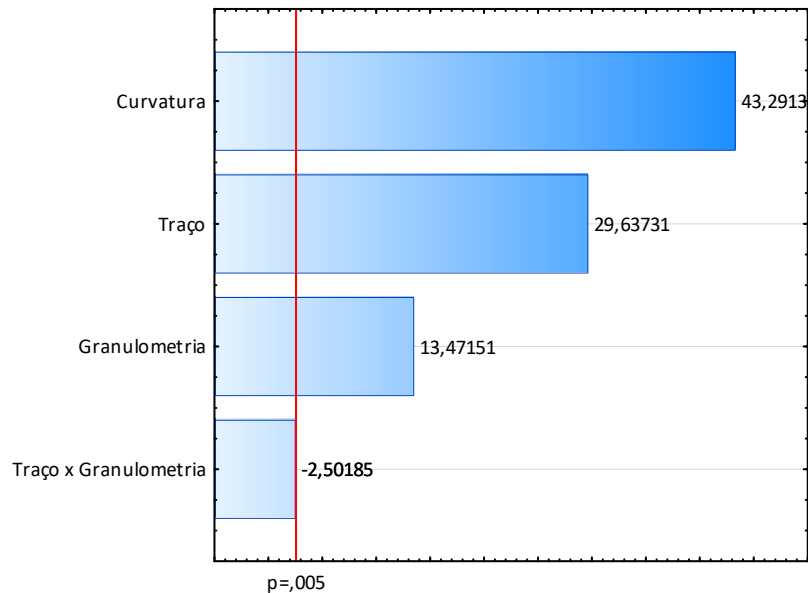
Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

Fonte: Autor (2022).

A ANOVA para a variação dimensional das argamassas aos 7 dias mostra que ambos os fatores principais têm significância estatística muito próxima a 100%,  $p < 0,05$ , além da interação entre o traço e a granulometria, com  $p = 0,054$  (95%). Diferente da idade inicial 3 dias, ambos os fatores já passam a influenciar a variação dimensional porque o pico das reações de hidratação do cimento CP V e acentuado ganho de resistência ocorreu antes deste período.

O diagrama de Pareto para a variação dimensional aos 7 dias (Figura 61) mostra a significância dos fatores e interação, conforme citado.

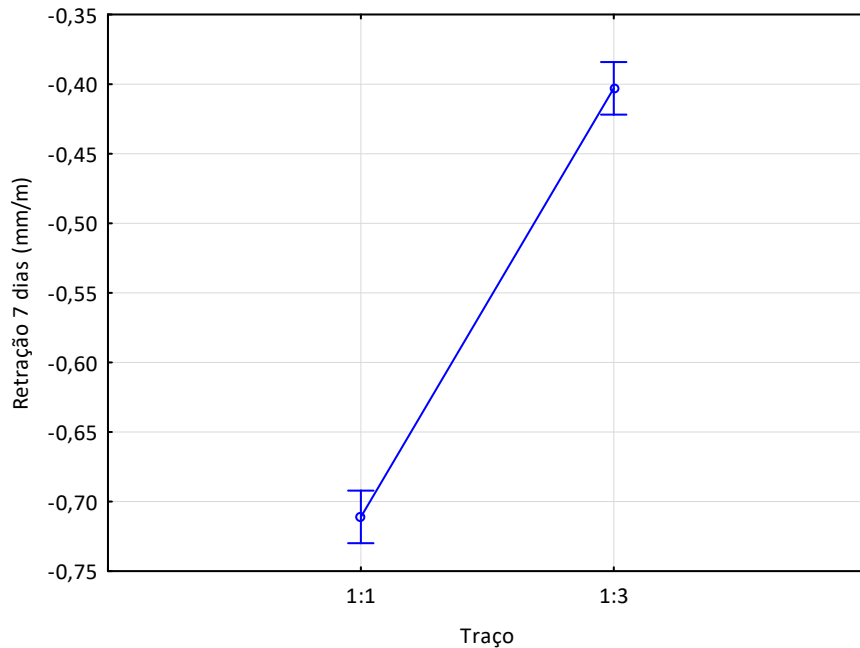
Figura 61 – Diagrama de Pareto aos 7 dias para a variação dimensional das argamassas



Fonte: Autor (2022).

Como os fatores isolados têm significância estatística, os mesmos podem ser mostrados em gráficos de médias. Para o fator traço, a maior retração é obtida para o traço 1:1 (0,71 mm/m), enquanto a menor retração é obtida para o traço 1:3 (0,40 mm/m), conforme mostra a Figura 62. Neste último, a presença de maior quantidade de agregado atua de forma a minimizar o efeito da retração (variação dimensional) reduzindo a quantidade de finos na mistura (cimento). Do contrário, o traço 1:1 apresenta retração acentuada por conter maior quantidade de finos que reagem com a água de amassamento, acelerando o processo de secagem e variação dimensional.

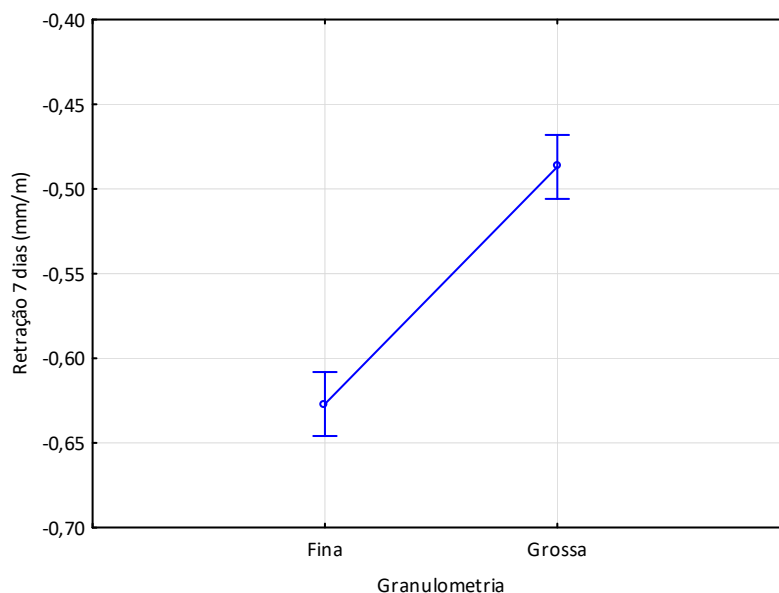
Figura 62 – Valores médios para a variação dimensional em função do traço das argamassas aos 7 dias



Fonte: Autor (2022).

Em relação à granulometria do agregado, a menor retração (0,49 mm/m) ocorre para o de maior granulometria (grosso), enquanto que a maior retração (0,62 mm/m) ocorre para o agregado de menor granulometria (fino), conforme Figura 63. O processo de secagem e perda de água de amassamento também está relacionado com a tamanho de grão. Da mesma forma que ocorre no comparativo dos traços, grãos de maior tamanho seguram a retração atenuando o processo de secagem e consequentemente a variação dimensional.

Figura 63 – Valores médios para a variação dimensional em função da granulometria das argamassas aos 7 dias



Fonte: Autor (2022).

O modelo de regressão linear para a variação dimensional das argamassas aos 7 dias é mostrado na Equação 22, conforme coeficientes do Anexo 16.

$$V.D7. = -0,5 + 0,15 * T + 0,07 * G + 0,05 \quad (22)$$

onde:

V.D7. – variação dimensional na idade de 7 dias (mm/m)

T – traço

G – granulometria

A Tabela 40 apresenta a análise de variância para a variação dimensional na idade de 28 dias.

Tabela 40 – ANOVA para a variação dimensional das argamassas aos 28 dias ( $R^2 = 0,849$ )

| <b>Fator</b>      | <b>SS</b> | <b>df</b> | <b>MS</b> | <b>F</b> | <b>p</b> |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| (1) Traço         | 0,609408  | 1         | 0,609408  | 39,12481 | 0,001531 |
| (2) Granulometria | 0,048672  | 1         | 0,048672  | 3,12481  | 0,137352 |
| 1 × 2             | 0,000968  | 1         | 0,000968  | 0,06215  | 0,813051 |
| Erro              | 0,077880  | 5         | 0,015576  |          |          |
| Total SS          | 0,934050  | 9         |           |          |          |

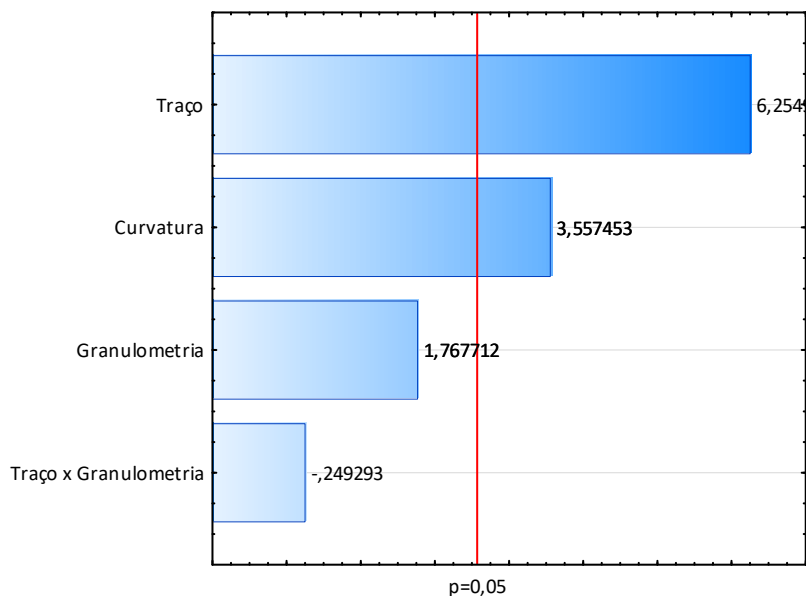
Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

Fonte: Autor (2022).

A ANOVA para a variação dimensional na idade de 28 dias das argamassas mostra que o traço tem significância estatística com  $p = 0,001$  (confiabilidade > 95%). Para a granulometria obteve-se  $p = 0,137$  ( $p > 0,05$ ), ou seja, sem significância estatística aos 28 dias. Isto demonstra que a variação da granulometria do agregado não teve mais ação nesta idade, sendo sua interferência restrita apenas na idade intermediária de 7 dias.

O diagrama de Pareto para a variação dimensional aos 28 dias (Figura 64) mostra a significância dos fatores. Junto a ele também é indicado o fator da 'curvatura', o qual aponta graficamente que a passagem dos resultados do nível inferior para o nível superior não é uma linha reta e sim uma curva. Nela está o ponto central, objeto de formação da curvatura a qual é indicada na análise de variância.

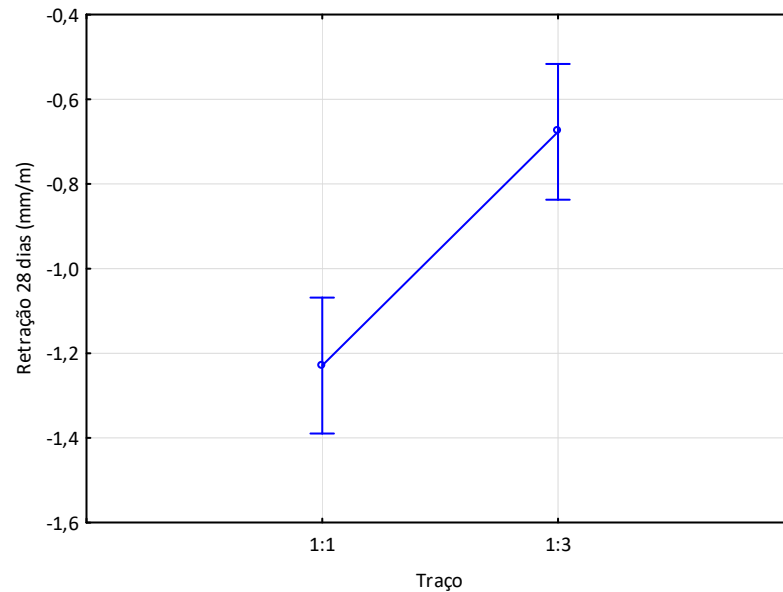
Figura 64 – Diagrama de Pareto aos 28 dias para a variação dimensional das argamassas



Fonte: Autor (2022).

A Figura 65 mostra o gráfico de médias para a variação dimensional aos 28 dias. Para o traço 1:1 a retração foi de 1,23 mm/m, superior ao traço 1:3, com retração de 0,68 mm. Este comportamento teve continuidade perante ao observado na idade de 7 dias, ou seja, o traço 1:1 que contém quantidade de cimento maior que o traço 1:3 continuou com uma retração mais intensa ao final do período observado de 28 dias. Nesta idade, a maior quantidade de agregado no traço 1:3 ocasionou uma redução na retração de 80,88% frente ao traço 1:1.

Figura 65 – Valores médios para a variação dimensional em função do traço das argamassas aos 28 dias



Fonte: Autor (2022).

A Equação 23 mostra o modelo de regressão linear para a variação dimensional aos 28 dias, conforme coeficientes do Anexo 17

$$V. D28. = -0,95 + 0,27 * T + 0,04 \quad (23)$$

onde:

V. D28. – variação dimensional na idade 28 dias (mm/m)

T – traço

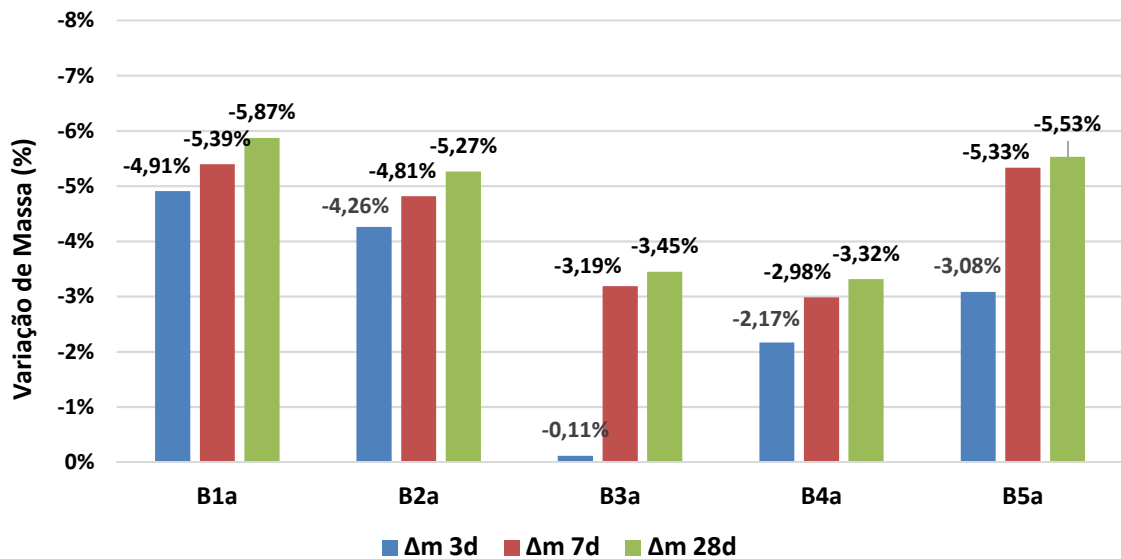
As argamassas também foram avaliadas quanto à variação de massa em função do tempo. A Tabela 41 mostra esta variação nas idades de 3d, 7d e 28d, além da massa inicial após desforma. As médias da variação de massa são mostradas graficamente na Figura 66.

Tabela 41 – Variação de massa das argamassas

| Formul. | Corpo de Prova | Leitura da massa (g) |        |        |        | Variação de massa (%) |               |                |
|---------|----------------|----------------------|--------|--------|--------|-----------------------|---------------|----------------|
|         |                | Inicial              | 3d     | 7d     | 28d    | $\Delta m$ 3d         | $\Delta m$ 7d | $\Delta m$ 28d |
| B1a     | 1              | 380,80               | 360,96 | 359,35 | 357,88 | -5,21%                | -5,63%        | -6,02%         |
|         | 2              | 378,40               | 360,97 | 358,89 | 356,74 | -4,61%                | -5,16%        | -5,72%         |
| B2a     | 1              | 388,70               | 371,59 | 369,41 | 367,64 | -4,40%                | -4,96%        | -5,42%         |
|         | 2              | 383,60               | 367,81 | 365,70 | 363,99 | -4,12%                | -4,67%        | -5,11%         |
| B3a     | 1              | 386,70               | 389,31 | 374,38 | 373,33 | 0,67%                 | -3,19%        | -3,46%         |
|         | 2              | 390,00               | 386,48 | 377,55 | 376,57 | -0,90%                | -3,19%        | -3,44%         |
| B4a     | 1              | 398,50               | 389,31 | 386,48 | 385,32 | -2,31%                | -3,02%        | -3,31%         |
|         | 2              | 394,50               | 386,48 | 382,86 | 381,38 | -2,03%                | -2,95%        | -3,33%         |
| B5a     | 1              | 387,00               | 376,62 | 367,16 | 366,13 | -2,68%                | -5,13%        | -5,39%         |
|         | 2              | 400,30               | 386,35 | 378,14 | 377,63 | -3,48%                | -5,54%        | -5,66%         |

Fonte: Autor (2022).

Figura 66 – Média da variação de massa das argamassas



Fonte: Autor (2022).

A análise de variância para a variação de massa na idade 3 dias em função do traço e da granulometria das argamassas é mostrada na Tabela 42.

Tabela 42 – ANOVA para a variação de massa das argamassas aos 3 dias ( $R^2 = 0,937$ )

| Fator             | SS       | df | MS       | F        | p        |
|-------------------|----------|----|----------|----------|----------|
| (1) Traço         | 0,002369 | 1  | 0,002369 | 74,62934 | 0,000133 |
| (2) Granulometria | 0,000099 | 1  | 0,000099 | 3,11610  | 0,127963 |
| 1 x 2             | 0,000366 | 1  | 0,000366 | 11,52203 | 0,014596 |
| Erro              | 0,000190 | 6  | 0,000032 |          |          |
| Total SS          | 0,003025 | 9  |          |          |          |

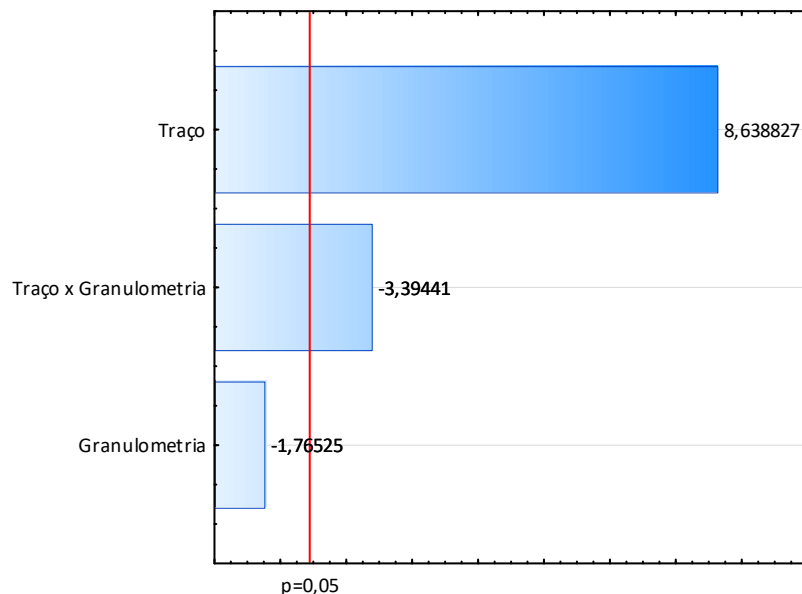
Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

Fonte: Autor (2022).

Apenas o traço tem significância estatística como fator isolado, com  $p = 0,000133$ , ou seja, confiabilidade muito próxima a 100%. Isto é explicado pelas diferentes quantidades de cimento presentes nos traços analisados. A granulometria não apresenta significância estatística na idade de 3 dias ( $p > 0,05$ ), mas a interação entre traço e granulometria é significativa, com  $p = 0,0145$  (98%).

O diagrama de Pareto para a variação de massa aos 3 dias (Figura 67) mostra graficamente a significância dos fatores e interação.

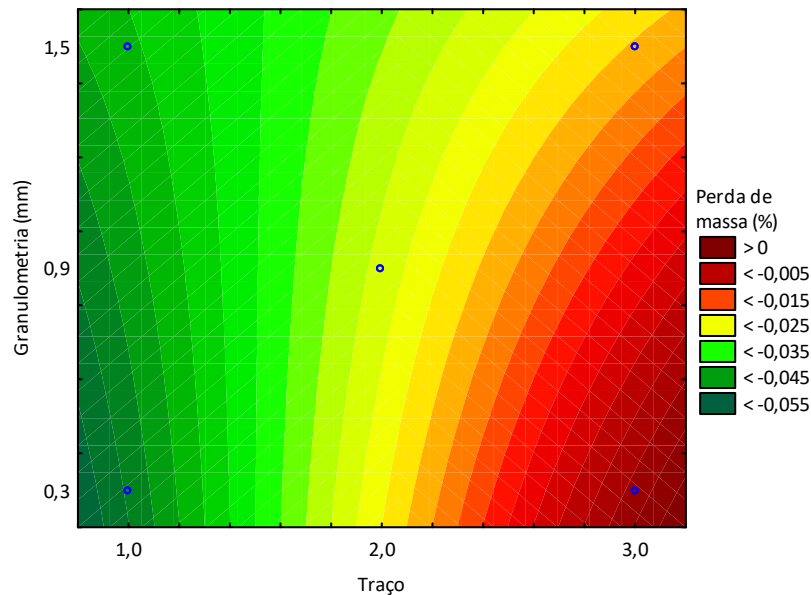
Figura 67 – Diagrama de Pareto aos 3 dias para a variação de massa das argamassas



Fonte: Autor (2022).

Como a ANOVA mostrou que a interação tem significância estatística para a perda de massa, o gráfico da superfície de resposta para a interação entre o traço e granulometria é mostrado na Figura 68.

Figura 68 – Superfície de resposta para a perda de massa em função da interação entre o traço e a granulometria aos 3 dias



Fonte: Autor (2022).

A maior perda de massa é registrada para a combinação de traço 1:1 com agregado de granulometria fina (0,3 mm no gráfico). A menor perda de massa é registrada para a combinação de traço 1:3 também para o agregado fino. Com isso, em idade inicial a variação das granulometrias média e grossa não tem influência sobre a perda de massa. Apenas a presença da maior quantidade de agregados no traço 1:3 já é suficiente para segurar a perda de água na mistura, visto que possui uma quantidade menor de cimento para ser hidratada.

A Equação 24 mostra o modelo de regressão linear para a variação de massa aos 3 dias, conforme coeficientes do Anexo 18.

$$V.M3. = -0,03 + 0,01 * T - 0,06 * T * G + 0,002 \quad (24)$$

onde:

$V.M3.$  – variação de massa na idade de 3 dias (%)

$T$  – traço

$G$  – granulometria

A Tabela 43 mostra a análise de variância para variação de massa na idade de 7 dias.

Tabela 43 – ANOVA para a variação de massa das argamassas aos 7 dias ( $R^2 = 0,760$ )

| Fator             | SS       | df | MS       | F        | p        |
|-------------------|----------|----|----------|----------|----------|
| (1) Traço         | 0,000815 | 1  | 0,000815 | 18,18746 | 0,005294 |
| (2) Granulometria | 0,000031 | 1  | 0,000031 | 0,68892  | 0,438304 |
| 1 x 2             | 0,000007 | 1  | 0,000007 | 0,15633  | 0,706236 |
| Erro              | 0,000269 | 6  | 0,000045 |          |          |
| Total SS          | 0,001121 | 9  |          |          |          |

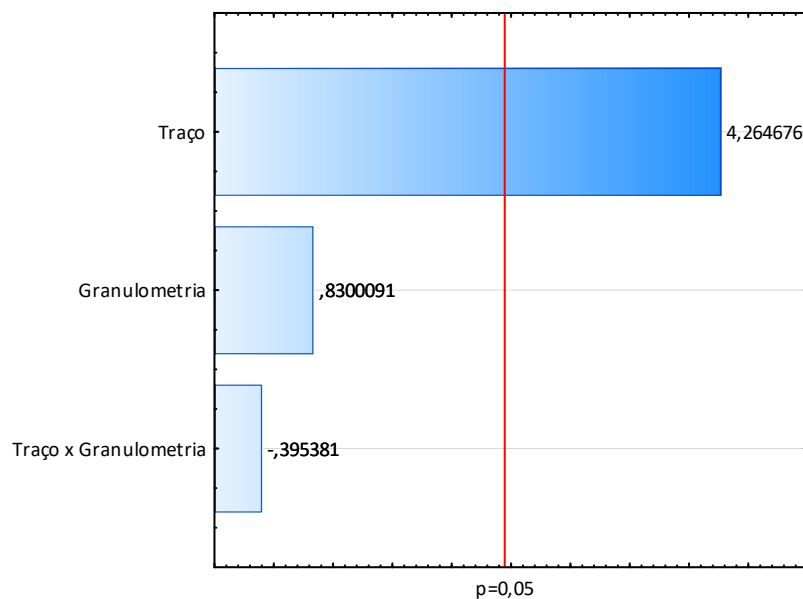
Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

Fonte: Autor (2022).

Aos 7 dias apenas o fator traço tem significância estatística para a variação de massa, com  $p = 0,005$ , ou seja, uma confiabilidade dos resultados muito próxima a 100%, da mesma forma que sua atuação aos 3 dias.

O diagrama de Pareto para a variação de massa aos 7 dias é mostrado na Figura 69.

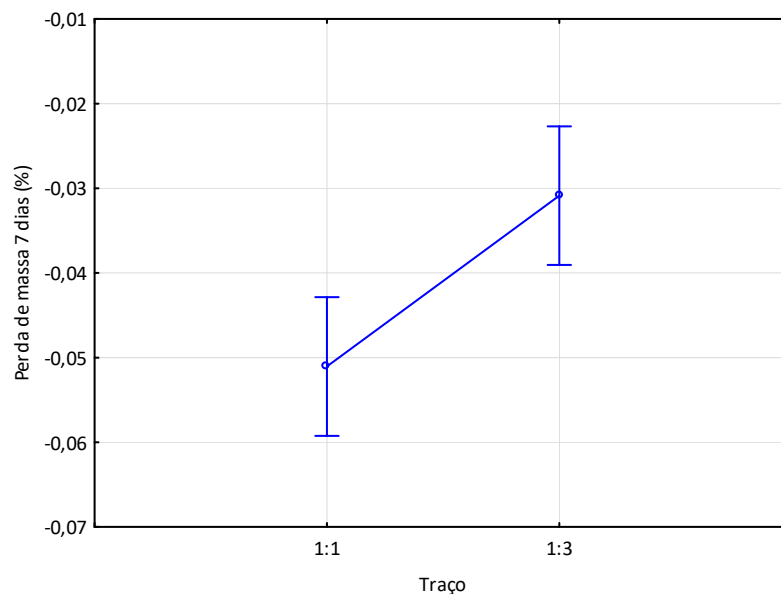
Figura 69 – Diagrama de Pareto aos 7 dias para a variação de massa das argamassas



Fonte: Autor (2022).

O gráfico de médias para a variação de massa em função do traço é mostrado na Figura 70. Para o traço 1:1 há maior perda de massa (5,1%) em relação ao traço 1:3 (3,1%) na idade 7 dias. Tal comportamento idem a idade 3 dias, é explicado pelas diferenças entre quantidades de agregado e cimento em cada um. O traço 1:3 por conter maior quantidade de agregado, tem uma perda de água mais lenta, impactando na perda de massa da mistura.

Figura 70 – Valores médios para a variação de massa em função do traço das argamassas aos 7 dias



Fonte: Autor (2022).

A Equação 25 mostra o modelo de regressão linear para a variação de massa da argamassa aos 7 dias, conforme coeficientes do Anexo 19.

$$V.M7. = -0,04 + 0,01 * T + 0,002 \quad (25)$$

onde:

$V.M7.$  – variação de massa na idade de 7 dias (%)

$T$  – traço

A Tabela 44 mostra a análise de variância para variação de massa na idade de 28 dias.

Tabela 44 – ANOVA para a variação de massa das argamassas aos 28 dias ( $R^2 = 0,989$ )

| <b>Fator</b>      | <b>SS</b> | <b>df</b> | <b>MS</b> | <b>F</b> | <b>p</b> |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| (1) Traço         | 0,000955  | 1         | 0,000955  | 375,5156 | 0,000007 |
| (2) Granulometria | 0,000027  | 1         | 0,000027  | 10,7816  | 0,021869 |
| 1 x 2             | 0,000011  | 1         | 0,000011  | 4,3905   | 0,090286 |
| Erro              | 0,000013  | 5         | 0,000003  |          |          |
| Total SS          | 0,001183  | 9         |           |          |          |

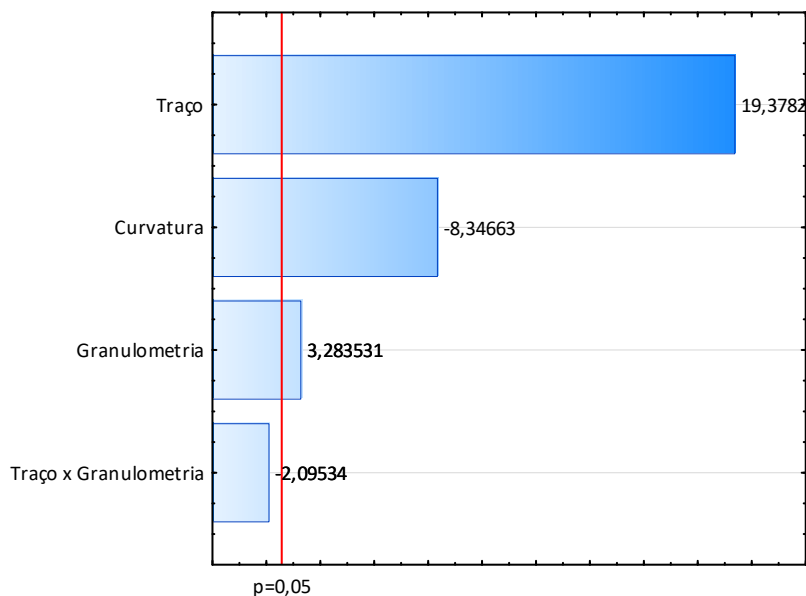
Onde: SS = soma dos quadrados, df = graus de liberdade, MS = médias quadráticas.

Fonte: Autor (2022).

Aos 28 dias a ANOVA para as argamassas mostra que ambos os fatores traço e granulometria têm significância estatística para os resultados, com  $p < 0,05$ . O traço continua interferindo através da quantidade de cimento presente, e com significância estatística (confiabilidade) muito próxima a 100%. A granulometria passa a apresentar significância nesta idade com 97%, em que as diferenças de tamanho de grão causam efeito na perda de massa na argamassa.

O diagrama de Pareto para a variação de massa aos 28 dias é mostrado na Figura 71. Junto a ele é indicado o fator da 'curvatura', o qual aponta graficamente que a passagem dos resultados do nível inferior para o nível superior não é uma linha reta e sim uma curva. Nela está o ponto central, objeto de formação desta curvatura a qual é indicada na análise de variância. Este efeito também é observado nos resultados da variação dimensional na mesma idade

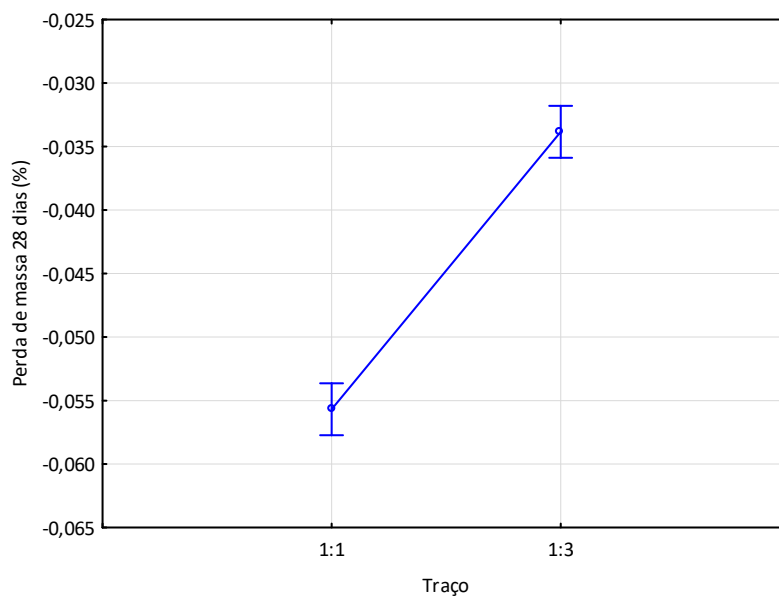
Figura 71 – Diagrama de Pareto aos 28 dias para a variação de massa das argamassas



Fonte: Autor (2022).

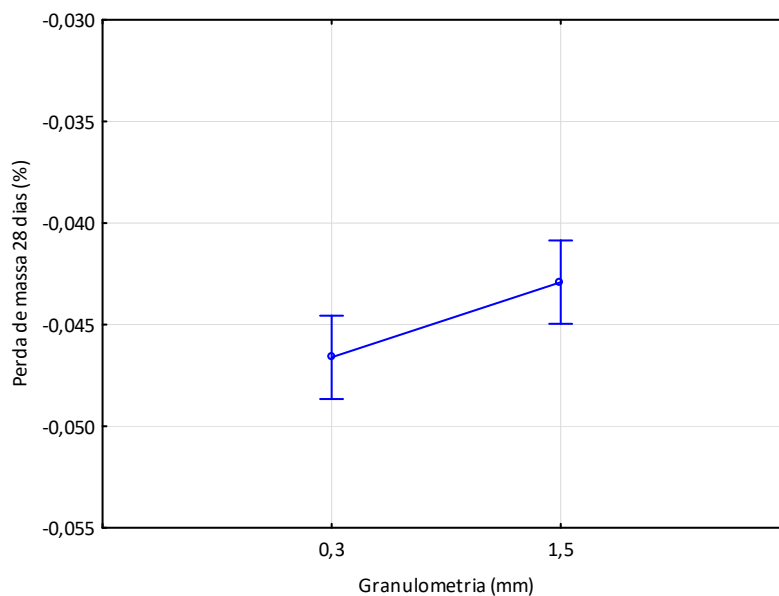
Os gráficos de médias para o traço e a granulometria são mostrados nas Figuras 72 e 73, respectivamente. O efeito da variação do traço seguiu a mesma lógica das idades 3 e 7 dias, em que a maior perda de massa ocorreu para o traço 1:1 (5,57%), e para o traço 1:3 a perda de massa foi menor (3,38%). Em relação à granulometria, a maior perda de massa ocorreu para o agregado fino (0,3 mm), com 4,66%, enquanto para o agregado grosso (1,5 mm) a perda de massa foi de 4,29%. Embora seja sutil a diferença entre os percentuais para a granulometria fina e grossa, o efeito segue o esperado.

Figura 72 – Valores médios para a variação de massa em função do traço das argamassas aos 28 dias



Fonte: Autor (2022).

Figura 73 – Valores médios para a variação de massa em função da granulometria das argamassas aos 28 dias



Fonte: Autor (2022).

A Equação 26 mostra o modelo de regressão linear para a variação de massa da argamassa aos 7 dias, conforme coeficientes do Anexo 20.

$$V.M28. = -0,04 + 0,01 * T + 0,001 * G \quad (26)$$

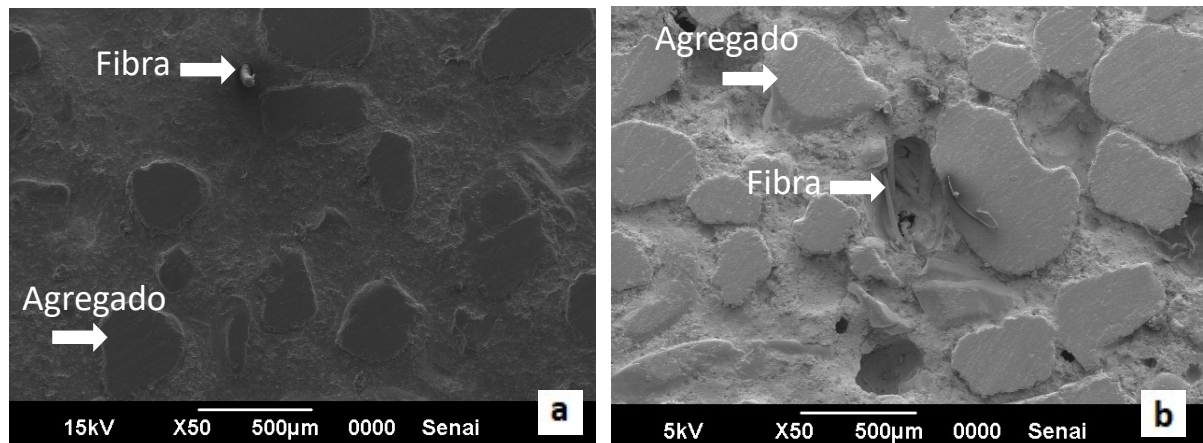
onde:

$V.M28.$  – variação de massa na idade de 28 dias (%)

$T$  – traço

A Figura 74 mostra a microscopia eletrônica de corpos de prova de argamassa das formulações B1 com traço 1:1 (a) e B3 com traço 1:3 (b), ambos com agregado de mesma granulometria (fino). A maior quantidade de agregado presente na B3 e conseqüentemente menor quantidade de cimento, explica a variação dos resultados nas propriedades as quais o fator traço apresentou alta significância (índice de consistência, resistências à compressão e tração na flexão, variação dimensional aos 7 e 28 dias e variação de massa em todas as idades).

Figura 74 – Microscopia eletrônica (MEV) de amostras de argamassa B1 e B3

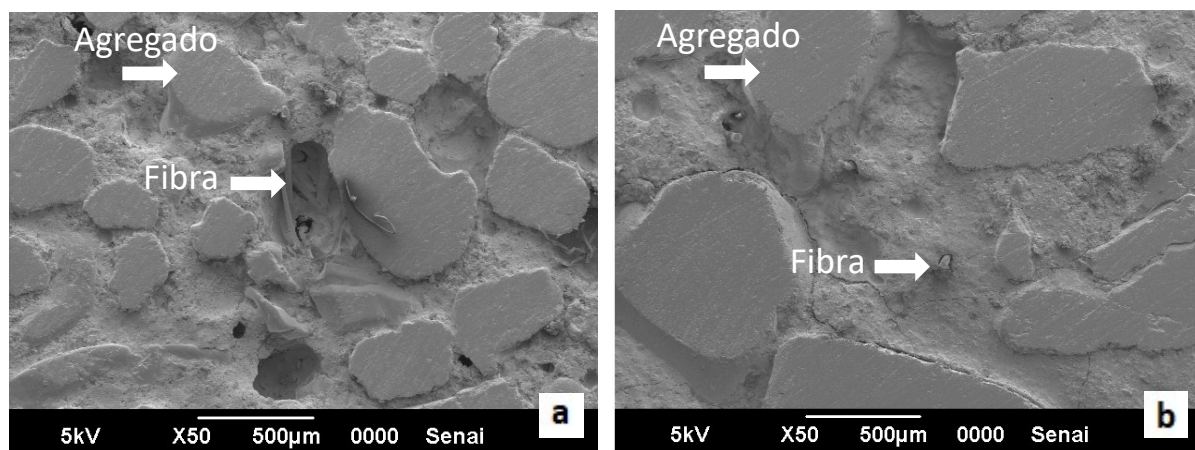


Fonte: Autor (2022).

A Figura 75 mostra a microscopia eletrônica de corpos de prova de argamassa das formulações B3 com agregado de granulometria fina (a) e B4 com agregado de granulometria grossa (b), ambos com mesmo traço 1:5. A redução no tamanho dos agregados da formulação B3 aumenta o contorno dos grãos que necessitam de água em maior quantidade para sua lubrificação, influenciando

diretamente nas propriedades em que a ANOVA mostrou significância acima de 95% (a exemplo do índice de consistência).

Figura 75 – Microscopia eletrônica (MEV) de amostras de argamassa B3 e B4



Fonte: Autor (2022).

## 8. CONCLUSÕES

A análise de variância (ANOVA) mostra a quão significativa para as propriedades finais das pastas e argamassas é a dosagem da água na mistura. A relação água / cimento apresenta maior significância que a definição do tipo de cimento, interferindo na variação dos resultados da maioria das propriedades analisadas. O estudo mostrou que a melhor relação A/C para as pastas com incorporação das fibras de polipropileno é diferente para as argamassas, em que a adição do agregado miúdo altera a reologia da mistura, ocorrendo uma demanda maior de água. Para as pastas a relação A/C 0,3 mostrou-se com bons resultados, enquanto nas argamassas esta relação A/C aumentou para 0,5. Visto a importância da relação A/C, para as formulações das pastas a análise de variância mostrou confiabilidade acima de 95% deste fator para quase todas as propriedades medidas, como índice de consistência (I.C.), densidade de massa, teor de ar incorporado, resistência à tração na flexão, resistência à compressão, e variação de massa.

Os tipos de cimento analisados (CP IV e CP V), embora componham o mesmo fator, menos significativos que a relação A/C, também trazem diferenças em certas propriedades medidas. Nas propriedades envolvendo resistência mecânica final não apresentam diferenças significantes, devido serem de mesma classe. Apresentam então variações nos resultados de densidade de massa, variação dimensional e variação de massa das pastas, agindo de forma diferente conforme as idades.

A incorporação das fibras de polipropileno no teor aplicado de 0,4% mostrou benefícios significativos para a variação de massa, atuando em um processo de secagem mais lento que mantém a hidratação dos corpos de prova por um período maior. Desta forma, sugere-se como continuação da pesquisa uma análise e investigação do processo de fissuração que pode ser afetado benéficamente pela presença das fibras. Como elas são de natureza não-estrutural, a análise de variância não mostrou significância para as propriedades estruturais das pastas e argamassas, não afetando de forma significativa as resistências mecânicas.

A quantidade de fibra de polipropileno utilizada não influenciou no processo de variação dimensional, caracterizado pela retração dos corpos de prova. É necessário aumentar o teor aplicado para visualizar este benefício das fibras, o qual

também sugere-se para continuação da pesquisa, bem como aplicação da argamassa em substratos simulando condição real de uso.

A análise de variância das argamassas mostrou a significância estatística do traço sobre suas propriedades finais na presença das fibras. Apresentou elevada confiabilidade principalmente nas propriedades de variação dimensional e de massa, além das resistências mecânicas e na fluidez.

Diante aos objetivos propostos pela pesquisa, avalia-se que os mesmos foram alcançados mediante as análises no seu decorrer, e demonstram a importância dos fatores estudados para um melhor desempenho das argamassas com adições de fibra de polipropileno, haja vista também da influência destes fatores na variação dos resultados ainda nas pastas.

## REFERÊNCIAS

AHMADI, Mohsen *et al.* Mechanical properties of the concrete containing recycled fibers and aggregates. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 144, p. 392-398, jul. 2017. Elsevier. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.215>. Acesso em: 18 jan. 2020.

ALSADEY, Salahaldeen. Effect of polypropylene fiber on properties of mortar. **International Journal of Energy Science and Engineering**, [s.l.], v. 2, p. 8-12, jul. 2016. American Institute of Science. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/336319167>. Acesso em: 15 dez. 2021.

AMERICAN STANDARD TEST METHOD. **ASTM C144**: Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar: ASTM, 2017.

AMERICAN STANDARD TEST METHOD. **ASTM C305**: Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency: ASTM, 2020.

AMERICAN STANDARD TEST METHOD. **ASTM C270**: Mortar for unit masonry. Philadelphia: ASTM, 2008.

AMERICAN STANDARD TEST METHOD. **ASTM C1437**: Standard test method for flow of hydraulic cement mortar. Philadelphia: ASTM, 2015.

ANTUNES, Giselle; MASUERO, Angela. Flexural tensile strength in mortar coating reinforced with different types of metal mesh: A statistical comparison. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 121, p. 559-568, jun. 2016. Elsevier. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.033>. Acesso em: 11 abr. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **História do Cimento**. [São Paulo]: 2019. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento/historia>. Acesso em: 08 fev. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. 3 ed. Rio de Janeiro, 2018. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - especificação. 3 ed. Rio de Janeiro, 2009. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935**: Agregados - Terminologia. 3 ed. Rio de Janeiro, 2011. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. 2 ed. Rio de Janeiro, 2008. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. 3 ed. Rio de Janeiro, 2016. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. 2 ed. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. 2 ed. Rio de Janeiro, 2005. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. 1 ed. Rio de Janeiro, 2005. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15261**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). 2 ed. Rio de Janeiro, 2005. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para realização de ensaios. 1 ed. Rio de Janeiro, 2016. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-10**: Água para amassamento do concreto. Parte 10 - Análise química: determinação de nitrato solúvel em água. 1 ed. Rio de Janeiro, 2009. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. 1 ed. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. 2 ed. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. **Fibre reinforced cementitious composites**. 2th ed. United Kingdom: Cromwell Press, 2007.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. Cimento Portland. *In*: **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011.

CANOVA, José Aparecido. **Estudo e análise das propriedades da argamassa de cal e areia suprimida a água da mistura após maturação**. 2002. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

CHAN, Yin-Wen; LI, Victor C. Effects of transition zone densification on fiber/cement paste bond strength improvement. **Advanced Cement Based Materials**, [s.l.], v. 5, p. 8-17, jan. 97. Elsevier. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(97\)90010-9](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)90010-9). Acesso em: 24 jul. 2020.

CIMENTO.ORG. **O cimento no mundo**. Brasília: 2014. Disponível em: <https://cimento.org/cimento-no-mundo-2013/>. Acesso em: 07 mar. 2020.

GAO, Yun; SCHUTTER, Geert De; YE, Guang; TAN, Zhijun. The ITZ microstructure, thickness and porosity in blended cementitious composite: effects of curing age, water to binder ratio and aggregate content. **Composites: Part B**, [s.l.], v. 60, p. 1-13, dec. 13. Elsevier. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.12.021>. Acesso em: 17 jul. 2020.

GOMES, Marco de Moura; SANTOS, Maria Luiz Queiroz; NOGUEIRA, Jacqueline Andrade. Análise da produção de cimento Portland. **Revista Pensar**, Belo Horizonte, v. 5, n. 1, jan. 2017. Disponível em: <http://revistapensar.com.br/engenharia/artigo/no=a196.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2020.

HABIB, Ahsan; BEGUM, Razia; ALAM, Mohammad Mydul. Mechanical properties of synthetic fibers reinforced mortars. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, [s.l.], v. 4, p. 923-927, apr. 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/235936125>. Acesso em: 08 mar. 2020.

HADDAD, Lucimar; et al. Influence of particle shape and size distribution on coating mortar properties. **Journal of Materials Research and Technology**, [s.l.], v. 4, p. 9299-9314, jul. 2020. Elsevier. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.068>. Acesso em: 10 jan. 2022.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1993.

KARAHAN, Okan; ATIS, Cengiz Duran. The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. **Materials and Design**, [s.l.], v. 32, p. 1044-1049, feb. 2011. Elsevier. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.07.011>. Acesso em: 17 jan. 2020.

KIHARA, Yushiro; CENTURIONE, Sérgio Luiz. Cimento Portland. *In: Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005.

LIMA, André Barbosa. **O processo produtivo do cimento Portland**. 2011. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerai) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MARTINS, Paulo Benjamim Moraes. **Influência da granulometria do agregado miúdo na trabalhabilidade do concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2008.

MEHTA, Povindar K.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 3th ed. Califórnia - EUA: McGraw-Hill, 2006.

MERLI, Robert *et al.* Recycled fibers in reinforced concrete: a systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 248, p. 1044-1049, nov. 19. Elsevier. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119207>. Acesso em: 06 mar. 2020.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and analysis of experiments**. 10th ed. Arizona - EUA: Courier Westford, 2018.

PALOMAR, Irene; BARLUENGA, Gonzalo; PUENTES, Javier. Lime-cement mortars for coating with improved thermal and acoustic performance. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 75, p. 306-314, jan. 15. Elsevier. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.012>. Acesso em: 18 jan. 2020.

ROCHA, Aretuza Karla Araújo. **Incorporação de resíduo de caulim em argamassa de alvenaria**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

SANTOS, Alailson. **Estudo das propriedades físicas e químicas de um novo cimento selador endodôntico**. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2004.

SARZALEJO, Antonio Gallovich et al. **Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto: manual técnico**. Maccaferri do Brasil Ltda, São Paulo, 2014.

SAVASTANO, Holmer Jr.; AGOPYAN, Vahan. Transition zone studies of vegetable fibre-cement paste composites. **Cement & Concrete Composites**, [s.l.], v. 21, p. 49-57, jan. 99. Elsevier. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(98\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00038-9). Acesso em: 24 jul. 2020.

SCHANKOSKI, Rudiele Aparecida. **Influência do tipo de argamassa nas propriedades mecânicas de alvenarias estruturais de blocos de concreto de alta resistência**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

SCRIVENER, Karen L.; CRUMBIE Alison K.; LAUGESSEN, Peter. The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concreto. **Interface Science**, [s.l.], v. 12, p. 411-421, oct. 04. Kluwer Academic Publishers. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/B:INTS.0000042339.92990.4c>. Acesso em: 02 ago. 2020.

SILVA, Rosiany da Paixão. **Argamassas com adição de fibra de polipropileno - estudo do comportamento reológico e mecânico**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **História do cimento**. Rio de Janeiro: 2015. Disponível em: [http://snic.org.br/assets/doc/historia\\_do\\_cimento\\_no\\_brasil.pdf](http://snic.org.br/assets/doc/historia_do_cimento_no_brasil.pdf). Acesso em: 18 jan. 2020.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Relatório anual 2013**. Rio de Janeiro: 2013. Disponível em: [http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio\\_anual/rel\\_anual\\_2013.pdf](http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2013.pdf). Acesso em: 07 mar. 2020.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Relatório anual 2020**. Rio de Janeiro: 2020. Disponível em: [http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio\\_anual/rel\\_anual\\_2020.pdf](http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2020.pdf). Acesso em: 17 dez. 2021.

SIQUEIRA, José Eduardo Lobato. **Utilização de fibras naturais e sintéticas em argamassas de revestimento: estudo comparativo de desempenho**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SOUZA, Aline Ferreira. **Otimização do uso de aditivo estabilizador de hidratação do cimento em água de lavagem dos caminhões-betoneira para produção de concreto**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SPADEA, Saverio *et al.* Recycled nylon fibers as cement mortar reinforcement. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 80, p. 200-209, apr. 15. Elsevier. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.075>. Acesso em: 14 dez. 2019.

SZELAG, Maciej. Evaluation of cracking patterns of cement paste containing polypropylene fibers. **Composite Structures**, [s.l.], v. 220, p. 402-411, jul. 19. Elsevier. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.04.038>. Acesso em: 07 mar. 2020.

THE INTERNATIONAL BUREAU FOR STANDARDISATION OF MAN-MADE FIBRES - BISFA. **Generic fibre names**. Local: Belgium: 2020. Disponível em: <https://bisfa.org/generic-fibre-names/.html>. Acesso em: 07 jul. 2020.

VAN VLACK, Lawrence H. **Princípios de ciência dos materiais**. 13. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Processo de fabricação do cimento**. Local: São Paulo: 2016. Disponível em: [https://www.votorantimcimentos.com.br/htmsptb/Produtos/Cimento\\_procFabricacao.html](https://www.votorantimcimentos.com.br/htmsptb/Produtos/Cimento_procFabricacao.html). Acesso em: 07 mar. 2020.

XU, Lihua; DENG, Fangqian; CHI, Yin. Nano-mechanical behavior of the interfacial transition zone between steel-polypropylene fiber and cement paste. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 145, p. 619-638, apv. 17. Elsevier. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.035>. Acesso em: 03 jul. 2020.

## ANEXOS

### Anexo 01 – Laudo de produção do lote de cimento CP IV fornecido pelo fabricante.

| Ensaio           | Químicos   |      |                 |       | Físicos e mecânicos |      |                      |             |              |           |             |                            |        |        |                 |
|------------------|------------|------|-----------------|-------|---------------------|------|----------------------|-------------|--------------|-----------|-------------|----------------------------|--------|--------|-----------------|
|                  | Teores (%) |      |                 |       | Finura(%)           |      | Blaine               | Água de     | Tempo Pega   |           | Expansib. a | Resist. à Compressão (MPa) |        |        |                 |
|                  | PF         | MgO  | SO <sub>3</sub> | RI    | #200                | #325 | (cm <sup>2</sup> /g) | consist.(%) | Início (min) | Fim (min) | quente (mm) | 1 Dia                      | 3 Dias | 7 Dias | 28 Dias         |
| Limites de Norma | ≤ 6,5      | N/A  | ≤ 4,5           | N/A   | ≤ 8,0               | N/A  | N/A                  | N/A         | ≥ 60         | ≤ 600     | ≤ 5,0       | N/A                        | ≥ 10,0 | ≥ 20,0 | ≥ 32,0 ; ≤ 49,0 |
| 02/10/2020       | 3,7        | 5,2  | 2,3             | 28,4  | 0,3                 | 2,0  | 4620                 | 31,0        | 260          | 330       | 0,0         | 13,6                       | 23,6   | 29,5   |                 |
| 03/10/2020       | 3,8        | 4,7  | 2,4             | 30,6  | 0,5                 | 3,6  | 4660                 | 30,8        | 245          | 315       | 0,0         | 13,1                       | 22,3   | 26,1   |                 |
| 07/10/2020       | 4,2        | 4,8  | 2,4             | 28,0  | 0,6                 | 3,9  | 4750                 | 31,2        | 255          | 330       | 0,0         | 13,6                       | 21,7   | 28,1   |                 |
| 09/10/2020       | 4,2        | 4,5  | 2,5             | 32,0  | 0,6                 | 3,7  | 4970                 | 31,4        | 250          | 320       | 0,0         | 12,0                       | 20,9   |        |                 |
| 10/10/2020       | 4,0        | 5,0  | 2,2             | 27,4  | 0,4                 | 3,0  | 4490                 | 30,8        | 240          | 305       | 0,5         | 14,3                       | 22,8   | 28,5   |                 |
| 15/10/2020       | 4,2        | 5,2  | 2,4             | 28,3  | 0,6                 | 3,0  | 4690                 | 30,7        | 250          | 320       | 0,0         | 13,0                       | 22,5   | 27,7   |                 |
| 16/10/2020       | 4,1        | 5,2  | 2,3             | 27,2  | 0,6                 | 3,3  | 4550                 | 31,0        | 240          | 310       | 0,0         | 13,7                       | 24,4   | 27,6   |                 |
| 17/10/2020       | 4,3        | 5,0  | 2,4             | 27,1  | 0,3                 | 2,6  | 4890                 | 30,6        | 250          | 320       | 0,0         | 12,1                       | 24,0   |        |                 |
| 18/10/2020       | 4,3        | 4,8  | 2,4             | 29,2  | 0,5                 | 2,9  | 4820                 | 30,4        | 250          | 320       | 0,0         | 13,4                       | 21,6   |        |                 |
| 21/10/2020       | 4,2        | 5,2  | 2,4             | 28,8  | 0,5                 | 3,0  | 4950                 | 30,2        | 255          | 330       | 0,0         | 13,5                       |        |        |                 |
| 22/10/2020       | 4,3        | 4,9  | 2,4             | 26,8  | 0,5                 | 3,1  | 4860                 | 30,6        | 250          | 320       | 0,0         | 13,5                       |        |        |                 |
| 23/10/2020       | 4,3        | 4,9  | 2,4             | 28,9  | 0,5                 | 3,2  | 4690                 |             |              |           |             |                            |        |        |                 |
| Média            | 4,13       | 4,95 | 2,38            | 28,39 | 0,49                | 3,11 | 4745,00              | 30,79       | 249,55       | 320,00    | 0,05        | 13,25                      | 22,64  | 27,92  | #DIV/0!         |
| Desvio Padrão    | 0,18       | 0,23 | 0,06            | 1,64  | 0,11                | 0,51 | 155,07               | 0,35        | 6,11         | 8,06      | 0,15        | 0,68                       | 1,17   | 1,13   | #DIV/0!         |
| Mínimo           | 3,74       | 4,49 | 2,25            | 26,40 | 0,30                | 2,00 | 4490,00              | 30,20       | 240,00       | 305,00    | 0,00        | 12,00                      | 20,90  | 26,10  | 0,00            |
| Máximo           | 4,29       | 5,21 | 2,46            | 32,00 | 0,60                | 3,90 | 4970,00              | 31,40       | 260,00       | 330,00    | 0,50        | 14,30                      | 24,40  | 29,50  | 0,00            |

Fonte: Votorantim Cimentos (2020).

### Anexo 02 – Laudo de produção do lote de cimento CP V fornecido pelo fabricante.

| Ensaio           | Químicos   |     |                 |      | Físicos e mecânicos |      |                      |             |              |           |             |                            |        |        |         |
|------------------|------------|-----|-----------------|------|---------------------|------|----------------------|-------------|--------------|-----------|-------------|----------------------------|--------|--------|---------|
|                  | Teores (%) |     |                 |      | Finura(%)           |      | Blaine               | Água de     | Tempo Pega   |           | Expansib. a | Resist. à Compressão (MPa) |        |        |         |
|                  | PF         | MgO | SO <sub>3</sub> | RI   | #200                | #400 | (cm <sup>2</sup> /g) | consist.(%) | Início (min) | Fim (min) | quente (mm) | 1 Dia                      | 3 Dias | 7 Dias | 28 Dias |
| Limites de Norma | ≤ 6,5      | N/A | ≤ 4,5           | N/A  | N/A                 | N/A  | N/A                  | N/A         | ≥ 60         | ≤ 600     | N/A         | ≥ 14,0                     | ≥ 24,0 | ≥ 34,0 | N/A     |
| 01/10/2020       | 4,3        | 6,5 | 3,2             | 11,7 | 0,0                 | 0,7  | 4960                 | 29,4        | 220          | 260       | -           | 23,6                       | 36,0   | 41,9   | 49,9    |
| 02/10/2020       | 4,7        | 6,6 | 3,0             | 11,1 | 0,0                 | 0,6  | 5080                 | 29,7        | 235          | 275       | -           | 23,2                       | 35,2   | 39,3   | 48,4    |
| 05/10/2020       | 4,9        | 6,6 | 2,9             | 11,4 | 0,0                 | 0,5  | 5080                 | 29,9        | 235          | 275       | -           | 23,8                       | 35,9   | 40,5   | 47,8    |
| 06/10/2020       | 4,8        | 6,5 | 3,0             | 11,2 | 0,0                 | 0,6  | 5160                 | 30,0        | 215          | 255       | 0,0         | 23,3                       | 36,2   | 41,4   | 49,6    |
| 07/10/2020       | 4,8        | 6,6 | 3,0             | 10,8 | 0,0                 | 0,5  | 5190                 | 30,8        | 210          | 250       | -           | 24,4                       | 36,1   | 40,1   | 48,0    |
| 08/10/2020       | 5,0        | 6,5 | 3,1             | 11,1 | 0,0                 | 0,6  | 5160                 | 30,7        | 220          | 260       | -           | 25,8                       | 37,0   | 41,7   |         |
| 09/10/2020       | 4,6        | 6,5 | 3,1             | 11,1 | 0,0                 | 0,5  | 5170                 | 30,8        | 225          | 265       | -           | 25,1                       | 36,8   | 40,8   |         |
| 13/10/2020       | 5,0        | 6,5 | 3,1             | 11,2 | 0,0                 | 0,6  | 5000                 | 30,0        | 250          | 290       | -           | 24,3                       | 35,9   | 40,7   |         |
| 14/10/2020       | 4,7        | 6,3 | 3,1             | 11,4 | 0,0                 | 0,4  | 5120                 | 30,4        | 230          | 270       | -           | 24,3                       | 35,1   | 40,6   |         |
| 15/10/2020       | 4,8        | 6,6 | 2,9             | 10,9 | 0,0                 | 0,5  | 5110                 | 30,2        | 220          | 260       | -           | 23,4                       | 36,3   | 40,3   |         |
| 16/10/2020       | 4,5        | 6,7 | 3,0             | 10,8 | 0,0                 | 0,5  | 5120                 | 30,2        | 225          | 265       | -           | 24,8                       | 37,1   | 41,1   |         |
| 19/10/2020       | 5,0        | 6,5 | 3,0             | 11,0 | 0,0                 | 0,5  | 5190                 | 30,5        | 240          | 280       | -           | 23,4                       | 36,9   | 41,5   |         |
| 20/10/2020       | 4,2        | 6,4 | 3,1             | 12,0 | 0,0                 | 0,4  | 5160                 | 30,1        | 250          | 290       | -           | 24,7                       | 37,6   | 41,5   |         |
| 21/10/2020       | 4,7        | 6,4 | 3,1             | 12,0 | 0,0                 | 0,3  | 5190                 | 29,8        | 245          | 285       | 0,0         | 23,9                       | 36,2   | 39,7   |         |
| 22/10/2020       | 5,2        | 6,4 | 3,0             | 11,5 | 0,0                 | 0,3  | 5190                 | 30,0        | 240          | 280       | -           | 23,6                       | 36,5   | 40,0   |         |
| 27/10/2020       | 4,6        | 6,4 | 2,9             | 11,9 | 0,0                 | 1,1  | 5160                 | 30,3        | 220          | 260       | -           | 24,3                       | 35,3   | 40,1   |         |
| 28/10/2020       | 4,6        | 6,2 | 2,9             | 11,8 | 0,0                 | 0,3  | 5160                 | 30,0        | 230          | 270       | -           | 23,7                       | 35,9   | 39,5   |         |
| 29/10/2020       | 4,8        | 6,2 | 2,9             | 11,3 | 0,0                 | 0,3  | 5050                 | 30,2        | 230          | 270       | -           | 22,1                       |        |        |         |
| 30/10/2020       | 5,4        | 6,4 | 2,9             | 11,4 | 0,0                 | 0,6  | 5110                 | 30,2        | 225          | 265       | -           | 22,0                       |        |        |         |
| Média            | 4,8        | 6,5 | 3,0             | 11,3 | 0,0                 | 0,5  | 5124                 | 30,17       | 230          | 270       | 0,0         | 23,9                       | 36,2   | 40,6   | 48,7    |
| Desvio Padrão    | 0,3        | 0,1 | 0,1             | 0,4  | 0,0                 | 0,2  | 66                   | 0,4         | 11           | 11        | 0,0         | 0,9                        | 0,7    | 0,8    | 1,0     |
| Mínimo           | 4,2        | 6,2 | 2,9             | 10,8 | 0,0                 | 0,3  | 4960                 | 29,4        | 210          | 250       | 0,0         | 22,0                       | 35,1   | 39,3   | 47,8    |
| Máximo           | 5,4        | 6,7 | 3,2             | 12,0 | 0,0                 | 1,1  | 5190                 | 30,8        | 250          | 290       | 0,0         | 25,8                       | 37,6   | 41,9   | 49,9    |

Fonte: Votorantim Cimentos (2020).

Anexo 03 – Tabela dos coeficientes para regressão linear do índice de consistência das pastas.

| Fator            | Efeito   | Erro Padrão | t        | p        | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) | Coefic   | Erro Padrão<br>(Coef.) | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) |
|------------------|----------|-------------|----------|----------|----------------------|----------------------|----------|------------------------|----------------------|----------------------|
| Principal        | 290,8148 | 5,97150     | 48,70049 | 0,000421 | 265,1215             | 316,5081             | 290,8148 | 5,971497               | 265,1215             | 316,5081             |
| (1) Tipo Cimento | -15,1667 | 12,66746    | -1,19729 | 0,353853 | -69,6703             | 39,3370              | -7,5833  | 6,333729               | -34,8352             | 19,6685              |
| (2) A/C          | 134,5000 | 12,66746    | 10,61776 | 0,008754 | 79,9963              | 189,0037             | 67,2500  | 6,333729               | 39,9982              | 94,5018              |
| (3) % Fibra      | -2,5000  | 12,66746    | -0,19736 | 0,861788 | -57,0037             | 52,0037              | -1,2500  | 6,333729               | -28,5018             | 26,0018              |
| 1 x 2            | 10,3333  | 12,66746    | 0,81574  | 0,500348 | -44,1703             | 64,8370              | 5,1667   | 6,333729               | -22,0852             | 32,4185              |
| 1 x 3            | 9,0000   | 12,66746    | 0,71048  | 0,551081 | -45,5037             | 63,5037              | 4,5000   | 6,333729               | -22,7518             | 31,7518              |
| 2 x 3            | -1,6667  | 12,66746    | -0,13157 | 0,907365 | -56,1703             | 52,8370              | -0,8333  | 6,333729               | -28,0852             | 26,4185              |

Fonte: Autor (2022).

Anexo 04 – Tabela dos coeficientes para regressão linear da densidade de massa das pastas.

| Fator            | Efeito   | Erro Padrão | t        | p        | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) | Coefic   | Erro Padrão<br>(Coef.) | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) |
|------------------|----------|-------------|----------|----------|----------------------|----------------------|----------|------------------------|----------------------|----------------------|
| Principal        | 1865,983 | 4,501399    | 414,5341 | 0,000006 | 1846,615             | 1885,351             | 1865,983 | 4,501399               | 1846,615             | 1885,351             |
| (1) Tipo Cimento | 75,898   | 9,548908    | 7,9484   | 0,015463 | 34,812               | 116,984              | 37,949   | 4,774454               | 17,406               | 58,492               |
| (2) A/C          | -198,697 | 9,548908    | -20,8083 | 0,002302 | -239,783             | -157,611             | -99,348  | 4,774454               | -119,891             | -78,806              |
| (3) % Fibra      | 2,289    | 9,548908    | 0,2397   | 0,832862 | -38,796              | 43,375               | 1,145    | 4,774454               | -19,398              | 21,687               |
| 1 x 2            | -13,794  | 9,548908    | -1,4446  | 0,285419 | -54,880              | 27,291               | -6,897   | 4,774454               | -27,440              | 13,646               |
| 1 x 3            | -17,551  | 9,548908    | -1,8380  | 0,207450 | -58,637              | 23,535               | -8,776   | 4,774454               | -29,318              | 11,767               |
| 2 x 3            | -13,207  | 9,548908    | -1,3831  | 0,300795 | -54,293              | 27,878               | -6,604   | 4,774454               | -27,146              | 13,939               |

Fonte: Autor (2022).

Anexo 05 – Tabela dos coeficientes para regressão linear do teor de ar incorporado das pastas.

| Fator       | Efeito   | Erro Padrão | t        | p        | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) | Coefic   | Erro Padrão<br>(Coef.) | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) |
|-------------|----------|-------------|----------|----------|----------------------|----------------------|----------|------------------------|----------------------|----------------------|
| Principal   | 2,66376  | 0,306633    | 8,68713  | 0,000334 | 1,87554              | 3,451991             | 2,66376  | 0,306633               | 1,87554              | 3,451991             |
| (2) A/C     | -2,33988 | 0,650468    | -3,59722 | 0,015589 | -4,01196             | -0,667795            | -1,16994 | 0,325234               | -2,00598             | -0,333898            |
| (3) % Fibra | -0,29686 | 0,650468    | -0,45638 | 0,667260 | -1,96894             | 1,375223             | -0,14843 | 0,325234               | -0,98447             | 0,687611             |
| 2 x 3       | 0,70395  | 0,650468    | 1,08221  | 0,328566 | -0,96813             | 2,376025             | 0,35197  | 0,325234               | -0,48407             | 1,188013             |

Fonte: Autor (2022).

Anexo 06 – Tabela dos coeficientes para regressão linear da resistência à tração na flexão das pastas.

| Fator            | Efeito   | Erro Padrão | t        | P        | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) | Coefic   | Erro Padrão<br>(Coef.) | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) |
|------------------|----------|-------------|----------|----------|----------------------|----------------------|----------|------------------------|----------------------|----------------------|
| Principal        | 9,99973  | 0,099554    | 100,4454 | 0,000099 | 9,57139              | 10,42808             | 9,99973  | 0,099554               | 9,57139              | 10,42808             |
| (1) Tipo Cimento | 0,72560  | 0,211186    | 3,4359   | 0,075270 | -0,18305             | 1,63426              | 0,36280  | 0,105593               | -0,09153             | 0,81713              |
| (2) A/C          | -6,91786 | 0,211186    | -32,7572 | 0,000931 | -7,82652             | -6,00921             | -3,45893 | 0,105593               | -3,91326             | -3,00460             |
| (3) % Fibra      | -0,15557 | 0,211186    | -0,7367  | 0,538022 | -1,06423             | 0,75309              | -0,07779 | 0,105593               | -0,53212             | 0,37654              |
| 1 x 2            | -3,31547 | 0,211186    | -15,6993 | 0,004033 | -4,22413             | -2,40681             | -1,65773 | 0,105593               | -2,11206             | -1,20341             |
| 1 x 3            | 1,34224  | 0,211186    | 6,3557   | 0,023873 | 0,43358              | 2,25090              | 0,67112  | 0,105593               | 0,21679              | 1,12545              |
| 2 x 3            | 0,20117  | 0,211186    | 0,9526   | 0,441346 | -0,70749             | 1,10983              | 0,10058  | 0,105593               | -0,35375             | 0,55491              |

Fonte: Autor (2022).

Anexo 07 – Tabela dos coeficientes para regressão linear da resistência à compressão das pastas.

| Fator            | Efeito   | Erro Padrão | t        | P        | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) | Coefic   | Erro Padrão<br>(Coef.) | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) |
|------------------|----------|-------------|----------|----------|----------------------|----------------------|----------|------------------------|----------------------|----------------------|
| Principal        | 52,2161  | 3,763411    | 13,87468 | 0,000810 | 40,2392              | 64,1930              | 52,2161  | 3,763411               | 40,2392              | 64,19295             |
| (1) Tipo Cimento | 7,1027   | 7,983399    | 0,88968  | 0,439178 | -18,3041             | 32,5094              | 3,5513   | 3,991700               | -9,1520              | 16,25471             |
| (2) A/C          | -38,8507 | 7,983399    | -4,86643 | 0,016575 | -64,2574             | -13,4439             | -19,4253 | 3,991700               | -32,1287             | -6,72197             |
| (3) % Fibra      | -1,2820  | 7,983399    | -0,16059 | 0,882624 | -26,6888             | 24,1247              | -0,6410  | 3,991700               | -13,3444             | 12,06236             |
| 1 x 2            | -3,8542  | 7,983399    | -0,48278 | 0,662291 | -29,2610             | 21,5525              | -1,9271  | 3,991700               | -14,6305             | 10,77626             |
| 1 x 3            | 2,2596   | 7,983399    | 0,28304  | 0,795554 | -23,1471             | 27,6664              | 1,1298   | 3,991700               | -11,5736             | 13,83318             |

Fonte: Autor (2022).

Anexo 08 – Tabela dos coeficientes para regressão linear da variação dimensional aos 3 dias das pastas.

| Fator            | Efeito    | Erro Padrão | t        | P        | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) | Coefic    | Erro Padrão<br>(Coef.) | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) |
|------------------|-----------|-------------|----------|----------|----------------------|----------------------|-----------|------------------------|----------------------|----------------------|
| Principal        | -0,552250 | 0,068659    | -8,04342 | 0,000021 | -0,707567            | -0,396933            | -0,552250 | 0,068659               | -0,707567            | -0,396933            |
| (1) Tipo Cimento | -0,443500 | 0,137317    | -3,22975 | 0,010327 | -0,754133            | -0,132867            | -0,221750 | 0,068659               | -0,377067            | -0,066433            |
| (2) A/C          | 0,215500  | 0,137317    | 1,56936  | 0,151011 | -0,095133            | 0,526133             | 0,107750  | 0,068659               | -0,047567            | 0,263067             |
| (3) % Fibra      | 0,198500  | 0,137317    | 1,44556  | 0,182206 | -0,112133            | 0,509133             | 0,099250  | 0,068659               | -0,056067            | 0,254567             |
| 1 x 2            | -0,115500 | 0,137317    | -0,84112 | 0,422066 | -0,426133            | 0,195133             | -0,057750 | 0,068659               | -0,213067            | 0,097567             |
| 1 x 3            | 0,063500  | 0,137317    | 0,46243  | 0,654747 | -0,247133            | 0,374133             | 0,031750  | 0,068659               | -0,123567            | 0,187067             |
| 2 x 3            | 0,160500  | 0,137317    | 1,16883  | 0,272499 | -0,150133            | 0,471133             | 0,080250  | 0,068659               | -0,075067            | 0,235567             |

Fonte: Autor (2022).

Anexo 09 – Tabela dos coeficientes para regressão linear da variação dimensional aos 7 dias das pastas.

| Fator            | Efeito   | Erro Padrão | t        | p        | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) | Coefic   | Erro Padrão<br>(Coef.) | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) |
|------------------|----------|-------------|----------|----------|----------------------|----------------------|----------|------------------------|----------------------|----------------------|
| Principal        | -1,09225 | 0,061102    | -17,8760 | 0,000000 | -1,23047             | -0,954029            | -1,09225 | 0,061102               | -1,23047             | -0,954029            |
| (1) Tipo Cimento | -0,46450 | 0,122203    | -3,8011  | 0,004211 | -0,74094             | -0,188058            | -0,23225 | 0,061102               | -0,37047             | -0,094029            |
| (2) A/C          | 0,08850  | 0,122203    | 0,7242   | 0,487338 | -0,18794             | 0,364942             | 0,04425  | 0,061102               | -0,09397             | 0,182471             |
| (3) % Fibra      | 0,16450  | 0,122203    | 1,3461   | 0,211187 | -0,11194             | 0,440942             | 0,08225  | 0,061102               | -0,05597             | 0,220471             |
| 1 x 2            | -0,30550 | 0,122203    | -2,4999  | 0,033865 | -0,58194             | -0,029058            | -0,15275 | 0,061102               | -0,29097             | -0,014529            |
| 1 x 3            | -0,22950 | 0,122203    | -1,8780  | 0,093100 | -0,50594             | 0,046942             | -0,11475 | 0,061102               | -0,25297             | 0,023471             |
| 2 x 3            | 0,10750  | 0,122203    | 0,8797   | 0,401908 | -0,16894             | 0,383942             | 0,05375  | 0,061102               | -0,08447             | 0,191971             |

Fonte: Autor (2022).

Anexo 10 – Tabela dos coeficientes para regressão linear da variação de massa aos 3 dias das pastas.

| Fator            | Efeito    | Erro Padrão | t        | p        | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) | Coefic    | Erro Padrão<br>(Coef.) | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) |
|------------------|-----------|-------------|----------|----------|----------------------|----------------------|-----------|------------------------|----------------------|----------------------|
| Principal        | -0,032739 | 0,001590    | -20,5905 | 0,000000 | -0,036336            | -0,029142            | -0,032739 | 0,001590               | -0,036336            | -0,029142            |
| (1) Tipo Cimento | 0,015354  | 0,003180    | 4,8283   | 0,000936 | 0,008160             | 0,022547             | 0,007677  | 0,001590               | 0,004080             | 0,011274             |
| (2) A/C          | -0,021464 | 0,003180    | -6,7498  | 0,000084 | -0,028658            | -0,014271            | -0,010732 | 0,001590               | -0,014329            | -0,007135            |
| (3) % Fibra      | -0,001523 | 0,003180    | -0,4790  | 0,643384 | -0,008717            | 0,005671             | -0,000762 | 0,001590               | -0,004358            | 0,002835             |
| 1 x 2            | 0,000557  | 0,003180    | 0,1751   | 0,864891 | -0,006637            | 0,007750             | 0,000278  | 0,001590               | -0,003318            | 0,003875             |
| 1 x 3            | -0,002250 | 0,003180    | -0,7074  | 0,497214 | -0,009443            | 0,004944             | -0,001125 | 0,001590               | -0,004722            | 0,002472             |
| 2 x 3            | -0,005771 | 0,003180    | -1,8148  | 0,102949 | -0,012965            | 0,001423             | -0,002886 | 0,001590               | -0,006482            | 0,000711             |

Fonte: Autor (2022).

Anexo 11 – Tabela dos coeficientes para regressão linear da variação de massa aos 7 dias das pastas.

| Fator            | Efeito    | Erro Padrão | t        | p        | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) | Coefic    | Erro Padrão<br>(Coef.) | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) |
|------------------|-----------|-------------|----------|----------|----------------------|----------------------|-----------|------------------------|----------------------|----------------------|
| Principal        | -0,042265 | 0,001163    | -36,3369 | 0,000000 | -0,044896            | -0,039634            | -0,042265 | 0,001163               | -0,044896            | -0,039634            |
| (1) Tipo Cimento | 0,022330  | 0,002326    | 9,5988   | 0,000005 | 0,017067             | 0,027592             | 0,011165  | 0,001163               | 0,008534             | 0,013796             |
| (2) A/C          | -0,032909 | 0,002326    | -14,1465 | 0,000000 | -0,038172            | -0,027647            | -0,016455 | 0,001163               | -0,019086            | -0,013823            |
| (3) % Fibra      | -0,007078 | 0,002326    | -3,0424  | 0,013964 | -0,012340            | -0,001815            | -0,003539 | 0,001163               | -0,006170            | -0,000908            |
| 1 x 2            | -0,004495 | 0,002326    | -1,9322  | 0,085374 | -0,009757            | 0,000768             | -0,002247 | 0,001163               | -0,004879            | 0,000384             |
| 1 x 3            | -0,008285 | 0,002326    | -3,5614  | 0,006105 | -0,013547            | -0,003023            | -0,004142 | 0,001163               | -0,006774            | -0,001511            |
| 2 x 3            | -0,008811 | 0,002326    | -3,7875  | 0,004299 | -0,014073            | -0,003548            | -0,004405 | 0,001163               | -0,007037            | -0,001774            |

Fonte: Autor (2022).

Anexo 12 – Tabela dos coeficientes para regressão linear da variação de massa aos 28 dias das pastas.

| Fator            | Efeito    | Erro Padrão | t        | p        | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) | Coefic    | Erro Padrão<br>(Coef.) | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) |
|------------------|-----------|-------------|----------|----------|----------------------|----------------------|-----------|------------------------|----------------------|----------------------|
| Principal        | -0,054983 | 0,001172    | -46,9107 | 0,000000 | -0,057635            | -0,052332            | -0,054983 | 0,001172               | -0,057635            | -0,052332            |
| (1) Tipo Cimento | 0,032350  | 0,002344    | 13,8004  | 0,000000 | 0,027048             | 0,037653             | 0,016175  | 0,001172               | 0,013524             | 0,018827             |
| (2) A/C          | -0,050056 | 0,002344    | -21,3535 | 0,000000 | -0,055359            | -0,044753            | -0,025028 | 0,001172               | -0,027679            | -0,022377            |
| (3) % Fibra      | -0,006369 | 0,002344    | -2,7169  | 0,023727 | -0,011672            | -0,001066            | -0,003184 | 0,001172               | -0,005836            | -0,000533            |
| 1 x 2            | -0,000121 | 0,002344    | -0,0515  | 0,960080 | -0,005424            | 0,005182             | -0,000060 | 0,001172               | -0,002712            | 0,002591             |
| 1 x 3            | -0,005574 | 0,002344    | -2,3778  | 0,041377 | -0,010877            | -0,000271            | -0,002787 | 0,001172               | -0,005438            | -0,000136            |
| 2 x 3            | -0,006935 | 0,002344    | -2,9586  | 0,015995 | -0,012238            | -0,001633            | -0,003468 | 0,001172               | -0,006119            | -0,000816            |

Fonte: Autor (2022).

Anexo 13 – Tabela dos coeficientes para regressão linear do índice de consistência das argamassas.

| Fator           | Efeito   | Erro Padrão | t        | p        | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) | Coefic   | Erro Padrão<br>(Coef.) | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) |
|-----------------|----------|-------------|----------|----------|----------------------|----------------------|----------|------------------------|----------------------|----------------------|
| Principal       | 272,800  | 1,425915    | 191,3158 | 0,000000 | 269,662              | 275,938              | 272,8000 | 1,425915               | 269,6616             | 275,9384             |
| (1) Traço       | -154,833 | 3,188442    | -48,5608 | 0,000000 | -161,851             | -147,816             | -77,4167 | 1,594221               | -80,9255             | -73,9078             |
| (2) Granul.     | 37,167   | 3,188442    | 11,6567  | 0,000000 | 30,149               | 44,184               | 18,5833  | 1,594221               | 15,0745              | 22,0922              |
| Traço x Granul. | 20,500   | 3,188442    | 6,4295   | 0,000049 | 13,482               | 27,518               | 10,2500  | 1,594221               | 6,7411               | 13,7589              |

Fonte: Autor (2022).

Anexo 14 – Tabela dos coeficientes para regressão linear da resistência à tração na flexão das argamassas.

| Fator           | Efeito   | Erro Padrão | t        | p        | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) | Coefic    | Erro Padrão<br>(Coef.) | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) |
|-----------------|----------|-------------|----------|----------|----------------------|----------------------|-----------|------------------------|----------------------|----------------------|
| Principal       | 7,73010  | 0,267409    | 28,90739 | 0,000000 | 7,13428              | 8,325929             | 7,730104  | 0,267409               | 7,13428              | 8,325929             |
| (1) Traço       | -1,49648 | 0,604553    | -2,47534 | 0,032803 | -2,84350             | -0,149449            | -0,748238 | 0,302276               | -1,42175             | -0,074724            |
| (2) Granul.     | -0,23639 | 0,604553    | -0,39102 | 0,703985 | -1,58342             | 1,110636             | -0,118196 | 0,302276               | -0,79171             | 0,555318             |
| Traço x Granul. | 1,24502  | 0,604553    | 2,05941  | 0,066453 | -0,10201             | 2,592046             | 0,622509  | 0,302276               | -0,05100             | 1,296023             |

Fonte: Autor (2022).

Anexo 15 – Tabela dos coeficientes para regressão linear da resistência à compressão das argamassas.

| Fator           | Efeito   | Erro Padrão | t        | p        | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) | Coefic   | Erro Padrão<br>(Coef.) | -95,%,<br>(Cnf.Limt) | +95,%,<br>(Cnf.Limt) |
|-----------------|----------|-------------|----------|----------|----------------------|----------------------|----------|------------------------|----------------------|----------------------|
| Principal       | 17,8264  | 0,436177    | 40,8698  | 0,000000 | 16,8664              | 18,7865              | 17,82645 | 0,436177               | 16,86643             | 18,78647             |
| (1) Traço       | -12,8835 | 0,975321    | -13,2095 | 0,000000 | -15,0302             | -10,7368             | -6,44174 | 0,487660               | -7,51508             | -5,36841             |
| (2) Granul.     | -1,6487  | 0,975321    | -1,6905  | 0,119045 | -3,7954              | 0,4979               | -0,82437 | 0,487660               | -1,89770             | 0,24896              |
| Traço x Granul. | 4,2598   | 0,975321    | 4,3676   | 0,001122 | 2,1131               | 6,4064               | 2,12988  | 0,487660               | 1,05655              | 3,20322              |

Fonte: Autor (2022).

Anexo 16 – Tabela dos coeficientes para regressão linear da variação dimensional aos 7 dias das argamassas.

| Fator           | Efeito    | Erro Padrão | t        | p        | -95,<br>(Cnf.Limt) | +95,<br>(Cnf.Limt) | Coefic    | Erro Padrão (Coef.) | -95,<br>(Cnf.Limt) | +95,<br>(Cnf.Limt) |
|-----------------|-----------|-------------|----------|----------|--------------------|--------------------|-----------|---------------------|--------------------|--------------------|
| Principal       | -0,557000 | 0,005196    | -107,195 | 0,000000 | -0,570357          | -0,543643          | -0,557000 | 0,005196            | -0,570357          | -0,543643          |
| Curvatura       | 1,006000  | 0,023238    | 43,291   | 0,000000 | 0,946265           | 1,065735           | 0,503000  | 0,011619            | 0,473133           | 0,532867           |
| (1) Traço       | 0,308000  | 0,010392    | 29,637   | 0,000001 | 0,281286           | 0,334714           | 0,154000  | 0,005196            | 0,140643           | 0,167357           |
| (2) Granul.     | 0,140000  | 0,010392    | 13,472   | 0,000040 | 0,113286           | 0,166714           | 0,070000  | 0,005196            | 0,056643           | 0,083357           |
| Traço x Granul. | -0,026000 | 0,010392    | -2,502   | 0,054367 | -0,052714          | 0,000714           | -0,013000 | 0,005196            | -0,026357          | 0,000357           |

Fonte: Autor (2022).

Anexo 17 – Tabela dos coeficientes para regressão linear da variação dimensional aos 28 dias das argamassas.

| Fator           | Efeito    | Erro Padrão | t        | p        | -95,<br>(Cnf.Limt) | +95,<br>(Cnf.Limt) | Coefic    | Erro Padrão (Coef.) | -95,<br>(Cnf.Limt) | +95,<br>(Cnf.Limt) |
|-----------------|-----------|-------------|----------|----------|--------------------|--------------------|-----------|---------------------|--------------------|--------------------|
| Principal       | -0,953000 | 0,044125    | -21,5978 | 0,000004 | -1,06643           | -0,839574          | -0,953000 | 0,044125            | -1,06643           | -0,839574          |
| Curvatura       | 0,702000  | 0,197332    | 3,5575   | 0,016258 | 0,19474            | 1,209259           | 0,351000  | 0,098666            | 0,09737            | 0,604629           |
| (1) Traço       | 0,552000  | 0,088250    | 6,2550   | 0,001531 | 0,32515            | 0,778853           | 0,276000  | 0,044125            | 0,16257            | 0,389426           |
| (2) Granul.     | 0,156000  | 0,088250    | 1,7677   | 0,137352 | -0,07085           | 0,382853           | 0,078000  | 0,044125            | -0,03543           | 0,191426           |
| Traço x Granul. | -0,022000 | 0,088250    | -0,2493  | 0,813051 | -0,24885           | 0,204853           | -0,011000 | 0,044125            | -0,12443           | 0,102426           |

Fonte: Autor (2022).

Anexo 18 – Tabela dos coeficientes para regressão linear da variação de massa aos 3 dias das argamassas.

| Fator           | Efeito    | Erro Padrão | t        | p        | -95,<br>(Cnf.Limt) | +95,<br>(Cnf.Limt) | Coefic    | Erro Padrão (Coef.) | -95,<br>(Cnf.Limt) | +95,<br>(Cnf.Limt) |
|-----------------|-----------|-------------|----------|----------|--------------------|--------------------|-----------|---------------------|--------------------|--------------------|
| Principal       | -0,029068 | 0,001782    | -16,3138 | 0,000003 | -0,033428          | -0,024708          | -0,029068 | 0,001782            | -0,033428          | -0,024708          |
| (1) Traço       | 0,034419  | 0,003984    | 8,6388   | 0,000133 | 0,024670           | 0,044168           | 0,017210  | 0,001992            | 0,012335           | 0,022084           |
| (2) Granul.     | -0,007033 | 0,003984    | -1,7652  | 0,127963 | -0,016782          | 0,002716           | -0,003517 | 0,001992            | -0,008391          | 0,001358           |
| Traço x Granul. | -0,013524 | 0,003984    | -3,3944  | 0,014596 | -0,023273          | -0,003775          | -0,006762 | 0,001992            | -0,011637          | -0,001888          |

Fonte: Autor (2022).

Anexo 19 – Tabela dos coeficientes para regressão linear da variação de massa aos 7 dias das argamassas.

| Fator           | Efeito    | Erro Padrão | t        | p        | -95,<br>(Cnf.Limt) | +95,<br>(Cnf.Limt) | Coefic    | Erro Padrão (Coef.) | -95,<br>(Cnf.Limt) | +95,<br>(Cnf.Limt) |
|-----------------|-----------|-------------|----------|----------|--------------------|--------------------|-----------|---------------------|--------------------|--------------------|
| Principal       | -0,043425 | 0,002116    | -20,5190 | 0,000001 | -0,048604          | -0,038247          | -0,043425 | 0,002116            | -0,048604          | -0,038247          |
| (1) Traço       | 0,020182  | 0,004732    | 4,2647   | 0,005294 | 0,008602           | 0,031761           | 0,010091  | 0,002366            | 0,004301           | 0,015881           |
| (2) Granul.     | 0,003928  | 0,004732    | 0,8300   | 0,438304 | -0,007652          | 0,015507           | 0,001964  | 0,002366            | -0,003826          | 0,007754           |
| Traço x Granul. | -0,001871 | 0,004732    | -0,3954  | 0,706236 | -0,013451          | 0,009708           | -0,000936 | 0,002366            | -0,006725          | 0,004854           |

Fonte: Autor (2022).

Anexo 20 – Tabela dos coeficientes para regressão linear da variação de massa aos 28 dias das argamassas.

| Fator           | Efeito    | Erro Padrão | t        | p        | -95,%<br>(Cnf.Limt) | +95,%<br>(Cnf.Limt) | Coefic    | Erro Padrão<br>(Coef.) | -95,%<br>(Cnf.Limt) | +95,%<br>(Cnf.Limt) |
|-----------------|-----------|-------------|----------|----------|---------------------|---------------------|-----------|------------------------|---------------------|---------------------|
| Principal       | -0,044759 | 0,000564    | -79,4009 | 0,000000 | -0,046208           | -0,043310           | -0,044759 | 0,000564               | -0,046208           | -0,043310           |
| Curvatura       | -0,021042 | 0,002521    | -8,3466  | 0,000404 | -0,027522           | -0,014561           | -0,010521 | 0,001260               | -0,013761           | -0,007281           |
| (1) Traço       | 0,021847  | 0,001127    | 19,3782  | 0,000007 | 0,018949            | 0,024746            | 0,010924  | 0,000564               | 0,009475            | 0,012373            |
| (2) Granul.     | 0,003702  | 0,001127    | 3,2835   | 0,021869 | 0,000804            | 0,006600            | 0,001851  | 0,000564               | 0,000402            | 0,003300            |
| Traço x Granul. | -0,002362 | 0,001127    | -2,0953  | 0,090286 | -0,005260           | 0,000536            | -0,001181 | 0,000564               | -0,002630           | 0,000268            |

Fonte: Autor (2022).