



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**ARGAMASSAS DE PROJEÇÃO PARA REPARO SUPERFICIAL DE
ESTRUTURAS HIDRÁULICAS DE CONCRETO: AVALIAÇÃO DE
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS**

TAMARA DAIANA URIBE GILARDONI

Foz do Iguaçu
2023



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO
(ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**ARGAMASSAS DE PROJEÇÃO PARA REPARO SUPERFICIAL DE ESTRUTURAS
HIDRÁULICAS DE CONCRETO: AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICO-
MECÂNICAS**

TAMARA DAIANA URIBE GILARDONI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. César Winter de Mello
Coorientadora: Profa. Dra. Edna Possan

Foz do Iguaçu
2023

TAMARA DAIANA URIBE GILARDONI

**ARGAMASSAS DE PROJEÇÃO PARA REPARO SUPERFICIAL DE ESTRUTURAS
HIDRÁULICAS DE CONCRETO: AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICO-
MECÂNICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. César Winter de Mello
UNILA

Coorientadora: Profa. Dra. Edna Possan
UNILA

Profa. Dra. Ana Carolina Parapinski dos Santos
UNILA

Profa. Dra. Giovanna Patrícia Gava Oyamada
UNIOESTE

Prof. Dr. Jairo José de Oliveira Andrade
PUC-RS

Foz do Iguaçu, 13 de julho de 2023

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

G463a

Gilardoni, Tamara Daiana Uribe.

Argamassas de projeção para reparo superficial de estruturas hidráulicas de concreto: avaliação de propriedades físico-mecânicas / Tamara Daiana Uribe Gilardoni. - Foz do Iguaçu, 2023.
108 fls.: il.

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: César Winter de Mello.

Coorientador: Edna Possan.

1. Argamassa. 2. Estruturas hidráulicas - Manutenção e reparos. 3. Reologia. I. Mello, César Winter de. II. Possan, Edna. III. Título.

CDU 719

AGRADECIMENTOS

À minha família pelo apoio incondicional, amor e compreensão durante todo este tempo.

Aos meus professores orientadores, o Prof. Cesar e a Prof. Edna, muito obrigada por confiar em mim e me guiar em cada passo, adorei ter vocês como professores nas disciplinas do mestrado e na dissertação, admiro muito vocês.

À Prof. Ana, quem além de formar parte da banca foi professora de disciplinas do mestrado, agradeço pelas conversas, contribuições ao trabalho e ajudas na aula e no laboratório.

À Prof. Giovanna e ao Prof. Jairo, membros da banca, suas contribuições ao trabalho foram essenciais para conseguir a qualidade desejada.

Aos demais professores do PPGECI, Prof. Katia, Prof. Alex, Prof. Egon, Prof. Helenice, Prof. Dan, Prof. Liliane e o Prof. André, apesar de não ter tido oportunidade de conhecer todos pessoalmente conseguiram me transmitir os valiosos conhecimentos e me formaram.

Aos colegas do laboratório, em especial ao Cristiano, Rafaela, Amanda, Dalila, Eduardo, Gabriela, Aleksey, Rolando e Christian pelos conhecimentos trocados, o apoio nos ensaios e momentos de descontração.

À Daiane, muito obrigada pela ajuda e dicas nos inícios da pesquisa.

Às colegas do mestrado de turmas anteriores, Sheila, Raquel e Isadora pela ajuda brindada, agradeço muito a troca de conhecimentos.

Aos técnicos do Laboratório Setor Sul da UNILA, Paula, Wagner P., Caio, Andrey, Luciano e Wagner F. pelo auxílio no desenvolvimento da pesquisa.

Aos alunos de graduação que ajudaram de maneira voluntária nos ensaios, Alejandro, Sergio, Gloria e Julio, sem vocês não conseguiria terminar alguns ensaios no tempo estabelecido.

Aos colegas das disciplinas, especialmente à Melissa, Renata, Gustavo, Beatrice e Marcos pela troca de conhecimentos e experiências.

Ao Carlos Rampanelli pela ajuda e o apoio para continuar com as pesquisas do trabalho iniciado por ele.

Ao Prof. Formagini pelas permissões para a utilização do *software* MECFOR.

Ao Eng. Kirke Moreira e à MC-Bauchemie pelo fornecimento do aditivo superplastificante utilizado na pesquisa.

Ao Prof. Ricardo pelas permissões para a utilização das instalações do Laboratório de Pavimentos.

À Districal, pelo fornecimento de materiais, de equipamentos e de espaço para os ensaios de projeção. Especialmente à Aline, Felipe, Fernando, Fabricio, Jackson e Elias.

À Mineromix, pelo fornecimento do concreto e do espaço para a elaboração das placas, agradeço especialmente ao Ivandro, Mayara e Marquinho.

Ao Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu Binacional, em especial aos Engenheiros Fernando, Ricardo, Fabio e Mauricio, e ao Técnico Hugo pelo apoio e ajuda nos ensaios mecânicos e de desgaste por abrasão hidráulica.

Ao Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens do Parque Tecnológico da Itaipu Binacional (PTI/CEASB), em especial à Alexandra, Luan e Luis pelo apoio e coordenação para o empréstimo dos equipamentos de abrasão hidráulica.

Ao Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia da UNIOESTE, especialmente à Prof. Giovanna e ao Técnico Maxer pelo recebimento e o auxílio no desenvolvimento do ensaio.

Aos colegas e alunos da *Universidad Católica – Campus Alto Paraná*, que confiaram em mim e me deram a flexibilidade de horários para cumprir com todas as responsabilidades. Ao Técnico Jorge, que me auxiliou nas fôrmas e concretagem das placas e na projeção das argamassas.

À todas as outras pessoas que contribuíram de alguma maneira para que este trabalho tenha sido realizado.

RESUMO

Estruturas hidráulicas de concreto podem sofrer danos superficiais ao longo do tempo devido à ação da água na sua superfície e, para o reparo destas, podem ser utilizadas argamassas cimentícias. As argamassas de reparo devem possuir a compatibilidade dimensional e apresentar aderência adequada com o substrato, além de suportar o desgaste gerado pela água. Para alcançar estas propriedades, argamassas de projeção podem ser uma opção viável do ponto de vista técnico. Para isso, faz-se necessário a criteriosa seleção de materiais constituintes além de um adequado proporcionamento e controle das propriedades, especialmente no que se refere às propriedades mecânicas, à reologia e à compatibilidade dimensional com o substrato. O proporcionamento de argamassas por métodos de empacotamento de partículas pode contribuir à obtenção de uma argamassa de projeção que apresente boas propriedades mecânicas com baixo consumo de pasta, mas com a coesão e fluidez necessárias para ser bombeada e projetada. Neste contexto, o objetivo geral da pesquisa foi avaliar as principais propriedades físicas e mecânicas associadas ao comportamento em uso de argamassas de projeção cimentícias para reparo superficial de estruturas hidráulicas de concreto erodidas, proporcionadas por meio de um método de empacotamento de partículas. As argamassas foram compostas de cimento portland, sílica ativa, fíler calcário, areia natural, microfibras de polipropileno, aditivo retentor de água e aditivo superplastificante. O proporcionamento foi realizado pelo Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) com teores de excesso de pasta em relação aos vazios do agregado de 5%, 7% e 9%, relação água/aglomerante de 0,50 e relação água/finos de 0,39. Assim, considerando também a argamassa de referência, o programa experimental foi composto de 4 argamassas, nas quais foram avaliadas as seguintes propriedades: índice de consistência, densidade de massa, ar incorporado, retenção de água, penetração de cone, resistência à compressão e à tração na flexão, módulo de elasticidade estático e dinâmico, capacidade de bombeamento e de projeção, massa específica, índice de vazios, absorção de água, resistência de aderência à tração e perda de massa por abrasão hidráulica. Os resultados indicaram que as argamassas estudadas cumprem com os requisitos para serem utilizadas como argamassas de reparo. Todas as argamassas conseguiram ser bombeadas e na projeção dificultou-se a adesão ao substrato quando inclinado, recomendando-se o ajuste do teor de aditivo superplastificante ou a utilização de aditivo acelerador de pega na ponta do bico de projeção. Porém, podem ser utilizadas em estruturas com superfícies horizontais ou pouco inclinadas. A argamassa com o melhor comportamento do ponto de vista técnico tanto como material de reparo quanto como argamassa de projeção foi a argamassa com 9% de excesso de pasta. A utilização do MEC para o proporcionamento de argamassas de projeção para reparo demonstrou ser viável do ponto de vista técnico, pois foram conseguidas argamassas capazes de serem bombeadas e projetadas tendo pequenos conteúdos de excesso de pasta como consequência da otimização da mistura granular, apesar de conterem fibras, baixa relação água/aglomerante e elevado teor de finos.

Palavras-chave: Argamassa. Argamassa de projeção. Reparo de estruturas. Reparo de estruturas hidráulicas. Reologia. Modelo de Empacotamento Compressível (MEC).

ABSTRACT

Hydraulic concrete structures can suffer superficial damage over time due to the action of water on their surface and, for their repair, cementitious mortars can be used. Repair mortars must achieve dimensional compatibility and have adequate adhesion to the substrate, in addition to withstanding the wear generated by water. To achieve these properties, the sprayed mortar could be a viable option from a technical point of view. For this, it is necessary the careful selection of constituent materials in addition to an adequate mix design and with control of properties, especially with regard to mechanical properties, rheology and dimensional compatibility with the substrate. The mixed design of mortars by particle packing methods could contribute to obtaining a sprayed mortar with good mechanical properties with low content of paste, but with the necessary cohesion and fluidity to be pumped and projected. In this context, research's general objective was to evaluate the main physical and mechanical properties associated with the behavior in use of sprayed mortars for superficial repair of eroded hydraulic concrete structures, proportioned by a particle packing method. The mortars were composed of portland cement, silica fume, limestone filler, natural sand, polypropylene microfibers, water-retaining additive, and superplasticizer additive. Proportioning was carried out using the Compressible Packing Model (CPM) with excess paste contents in relation to the aggregate voids of 5%, 7% and 9%, water/binder ratio of 0,50 and water/fines ratio of 0,39. Thus, also considering the reference mortar, the experimental program was composed of 4 mortars, in which the following properties were evaluated: consistency index, specific gravity, air-entrained content, water retentivity, cone penetration, compressive and flexural strength, static and dynamic elasticity modulus, pumping and projection capacity, voids index, water absorption, tensile bond strength, and mass loss by hydraulic abrasion. The results indicated that the studied mortars meet the requirements to be used as repair mortars. All the mortars were able to be pumped and, in the projection it was difficult to adhere to the substrate when tilted, recommending the adjustment of the superplasticizer additive content or the use of a setting accelerator additive at the tip of the projection nozzle. However, they can be used in structures with horizontal or slightly tilted surfaces. The mortar with the best behavior from a technical point of view, both as a repair material and as a sprayed mortar was the mortar with 9% excess paste. The use of CPM for proportioning sprayed mortars for repair proved to be feasible from a technical point of view, as mortars capable of being pumped and projected were achieved with small contents of excess paste as a result of the optimization of the granular mixture, despite containing fibers, low water/binder ratio and high content of fines.

Key words: Mortar. Sprayed mortar. Repair of structures. Repair of hydraulic structures. Rheology. Compressible Packing Model (CPM).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Fatores que afetam à durabilidade do sistema de reparo..... | 25 |
| Figura 2 - Fluxograma do programa experimental..... | 42 |
| Figura 3 - Determinação do teor de sólidos do aditivo superplastificante..... | 43 |
| Figura 4 - Curvas granulométricas do cimento e das adições..... | 45 |
| Figura 5 - Curvas de ponto de saturação do aditivo nas pastas de cimento e das adições..... | 45 |
| Figura 6 - Curva granulométrica da areia natural..... | 47 |
| Figura 7 - Armazenamento ao ar das placas após o desgaste por jato de areia..... | 51 |
| Figura 8 - Idade aproximada das placas nos distintos ensaios..... | 52 |
| Figura 9 - Ensaios no estado fresco das argamassas elaboradas no laboratório..... | 55 |
| Figura 10 – Equipamento de ensaio de módulo de elasticidade dinâmico..... | 56 |
| Figura 11 - Procedimentos utilizados no ensaio de massa específica, índice de vazios e absorção de água..... | 57 |
| Figura 12 - Procedimentos empregados na mistura, ensacado e armazenamento dos sacos de argamassa..... | 57 |
| Figura 13 - Equipamentos de mistura, de bombeamento e de projeção..... | 58 |
| Figura 14 - Procedimentos empregados na projeção e cura das placas e testemunhos..... | 59 |
| Figura 15 - Extração de testemunhos, corte e retífica..... | 60 |
| Figura 16 - Procedimentos empregados para o ensaio de resistência de aderência à tração..... | 61 |
| Figura 17 - Procedimentos empregados no ensaio de perda de massa por abrasão hidráulica..... | 62 |
| Figura 18 - Resultados de (a) Evolução das resistências à compressão e à tração na flexão aos 7, 14 e 28 dias, (b) Evolução dos módulos de elasticidade dinâmico aos 14 e 28 dias e (c) Resistências à compressão e à tração na flexão e módulos de elasticidade estático e dinâmico aos 28 dias..... | 65 |
| Figura 19 - Diagramas de caixa de (a) Resistência à compressão aos 28 dias, (b) Resistência à tração na flexão aos 28 dias, (c) Módulo de elasticidade estático aos 28 dias e (d) Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias..... | 66 |
| Figura 20 - Resultados da massa específica, índice de vazios e absorção de água aos 28 dias das argamassas elaboradas no laboratório..... | 68 |
| Figura 21 - Diagramas de caixa de (a) Massa específica aos 28 dias, (b) Índice de vazios aos 28 dias, (c) Absorção de água aos 28 dias. Argamassas elaboradas no laboratório..... | 69 |
| Figura 22 - (a) Resultados da resistência à compressão aos 28 dias, (b) Diagramas de caixa da resistência à compressão. Argamassas elaboradas no campo..... | 71 |
| Figura 23 - Resultados da massa específica, índice de vazios e absorção de água aos 28 dias das argamassas elaboradas no campo..... | 72 |

| | |
|--|-----|
| Figura 24 - Diagramas de caixa de (a) Massa específica aos 28 dias, (b) Índice de vazios aos 28 dias, (c) Absorção de água aos 28 dias. Argamassas elaboradas no campo..... | 73 |
| Figura 25 - (a) Resultados da resistência de aderência à tração, (b) Diagramas de caixa da resistência de aderência à tração..... | 74 |
| Figura 26 - Resultados da perda de massa por abrasão hidráulica..... | 76 |
| Figura 27 - Módulos do MECFOR..... | 103 |
| Figura 28 - Caixa de diálogo para entrada ao MECFOR..... | 104 |
| Figura 29 - Exemplo de arquivo de entrada ao MECFOR..... | 105 |
| Figura 30 - Variáveis principais e variáveis lógicas..... | 105 |
| Figura 31 - Propriedades dos materiais..... | 106 |
| Figura 32 - Diâmetro das classes e granulometria de cada material..... | 106 |
| Figura 33 - Frações volumétricas de cada material..... | 107 |
| Figura 34 - Tela de saída do MECFOR..... | 107 |
| Figura 35 - Mistura otimizada..... | 108 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Principais fatores e propriedades que influenciam o sucesso do reparo com base em dados experimentais ¹ e informações da literatura ² | 26 |
| Tabela 2 - Materiais, quantidades por m ³ e propriedades conferidas às argamassas de projeção..... | 34 |
| Tabela 3 - Valores usuais de propriedades em estado endurecido das argamassas de projeção por via úmida..... | 35 |
| Tabela 4 - Exemplos de utilização do modelo de empacotamento compressível para proporcionamento de pastas, argamassas e concretos nos últimos anos.. | 38 |
| Tabela 5 - Principais propriedades físicas e mecânicas desejadas nas argamassas de projeção para reparo superficial de estruturas hidráulicas de concreto erodidas..... | 39 |
| Tabela 6 - Massa específica e superfície específica do cimento e das adições..... | 44 |
| Tabela 7 - Espectrometria de fluorescência de raios X do cimento, das adições e da areia natural..... | 44 |
| Tabela 8 - Teor de material pulverulento, densidade e capacidade de absorção da areia natural..... | 46 |
| Tabela 9 - Propriedades da fibra e do aditivo retentor de água..... | 48 |
| Tabela 10 - Proporcionamento da mistura para o teste piloto..... | 48 |
| Tabela 11 - Índice de consistência e resistência à compressão aos 28 dias das argamassas do teste piloto..... | 49 |
| Tabela 12 - Fatores cumpridos simultaneamente no proporcionamento das argamassas..... | 52 |
| Tabela 13 - Misturas proporcionadas no trabalho..... | 53 |
| Tabela 14 - Ensaio e normas para a caracterização no estado fresco das argamassas elaboradas no laboratório..... | 54 |
| Tabela 15 - Ensaio, normas, idades e CP para a caracterização das argamassas no estado endurecido elaboradas no laboratório..... | 55 |
| Tabela 16 - Ensaio, normas, idades e CP para a caracterização das argamassas elaboradas no campo..... | 60 |
| Tabela 17 - Propriedades no estado fresco das argamassas elaboradas no laboratório..... | 63 |
| Tabela 18 - Consumo de materiais nas argamassas elaboradas no laboratório..... | 63 |
| Tabela 19 - Resistência à compressão das argamassas elaboradas no laboratório..... | 65 |
| Tabela 20 - Capacidade de bombeabilidade e de projetabilidade das argamassas..... | 70 |
| Tabela 21 - Tipos de falhas por aderência à tração nas argamassas elaboradas no campo..... | 75 |
| Tabela 22 - Resumo dos resultados das propriedades estudadas..... | 77 |
| Tabela 23 - Diâmetros de espalhamento do ensaio de ponto de saturação do aditivo superplastificante nas pastas de cimento e das adições..... | 91 |
| Tabela 24 - Resultados de resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas elaboradas no laboratório..... | 92 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 25 – Resultados de massa específica, índice de vazios e absorção de água das argamassas elaboradas no laboratório..... | 93 |
| Tabela 26 – Resultados de resistência à compressão, massa específica, índice de vazios e absorção de água das argamassas elaboradas no campo..... | 94 |
| Tabela 27 – Resultados de resistência de aderência à tração das argamassas elaboradas no campo..... | 95 |
| Tabela 28 – Resultados de perda de massa por abrasão hidráulica das argamassas elaboradas no campo..... | 95 |
| Tabela 29 – Análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias das argamassas elaboradas no laboratório..... | 96 |
| Tabela 30 – Análise estatística da resistência à tração na flexão aos 28 dias das argamassas elaboradas no laboratório..... | 96 |
| Tabela 31 – Análise estatística do módulo de elasticidade estático aos 28 dias das argamassas elaboradas no laboratório..... | 97 |
| Tabela 32 – Análise estatística do módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias das argamassas elaboradas no laboratório..... | 97 |
| Tabela 33 – Análise estatística da massa específica aos 28 dias das argamassas elaboradas no laboratório..... | 98 |
| Tabela 34 – Análise estatística do índice de vazios aos 28 dias das argamassas elaboradas no laboratório..... | 98 |
| Tabela 35 – Análise estatística da absorção de água aos 28 dias das argamassas elaboradas no laboratório..... | 99 |
| Tabela 36 – Análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias das argamassas elaboradas no campo..... | 99 |
| Tabela 37 – Análise estatística da massa específica aos 28 dias das argamassas elaboradas no campo..... | 100 |
| Tabela 38 – Análise estatística do índice de vazios aos 28 dias das argamassas elaboradas no campo..... | 100 |
| Tabela 39 – Análise estatística da absorção de água aos 28 dias das argamassas elaboradas no campo..... | 101 |
| Tabela 40 – Análise estatística da resistência de aderência à tração aos 28 dias das argamassas elaboradas no campo..... | 101 |

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------------------------|---|
| \pm | Mais/menos |
| % | Porcentagem |
| ” | Polegada |
| ° | Grau sexagesimal |
| | |
| a/agl | Relação água/aglomerante |
| a/c | Relação água/cimento |
| a/s | Relação água/sólidos |
| a _{ij} | Coefficiente de interação devido ao efeito afastamento |
| b _{ij} | Coefficiente de interação devido ao efeito parede |
| C | Compacidade real |
| d _i | Diâmetro das partículas da classe i |
| d _j | Diâmetro das partículas da classe j |
| <i>d_{max}</i> | Diâmetro máximo |
| <i>d_{med}</i> | Diâmetro médio experimental |
| D _{med} | Diâmetro médio de espalhamento |
| <i>d_{min}</i> | Diâmetro mínimo |
| E _c | Módulo de elasticidade estático |
| E _d | Módulo de elasticidade dinâmico |
| E _p | Excesso de volume de pasta em relação aos vazios da areia em estado solto |
| E _v | Volume de vazios da areia em estado solto |
| f _c | Resistência à compressão simples |
| f _t | Resistência à tração na flexão |
| m _e | Massa específica |
| K | Índice de compactação, protocolo de empacotamento |
| M | Número de materiais |
| N | Número de classes |
| N | Velocidade de rotação |
| <i>ρ_m</i> | Fração volumétrica |
| T | Torque |
| V _a | Volume de água |
| V _c | Volume de cimento |
| V _f | Volume de fíler calcário |
| V _p | Volume de pasta |
| V _s | Volume de sílica ativa |
| y _j | Fração volumétrica da classe i |
| <i>y_{mn}</i> | Fração volumétrica de cada classe |
| | |
| α _t | Densidade de empacotamento do conjunto de partículas |
| β _i | Densidade de empacotamento virtual da classe i |
| γ | Densidade de empacotamento virtual do conjunto de partículas |

| | |
|--------------------------------|--|
| γ | Taxa de cisalhamento |
| γ_i | Densidade de empacotamento virtual do conjunto quando a classe i é dominante |
| Φ | Diâmetro |
| μ_p | Viscosidade plástica |
| τ | Tensão de cisalhamento |
| τ_0 | Tensão de escoamento |
| $^{\circ}\text{C}$ | Graus Celsius |
| <LQ | Abaixo do limite quantificável |
| 350P0 | Argamassa com 350 kg/m ³ de cimento |
| 400P0 | Argamassa com 400 kg/m ³ de cimento |
| A5 | Argamassa com 5% de excesso de pasta |
| A7 | Argamassa com 7% de excesso de pasta |
| A9 | Argamassa com 9% de excesso de pasta |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ACI | <i>American Concrete Institute</i> |
| Al ₂ O ₃ | Óxido de alumínio |
| ANOVA | Análise de variância |
| ASA | <i>American Shotcrete Association</i> |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| BET | <i>Brunauer, Emmett and Teller</i> |
| BS | <i>British Standard</i> |
| CaO | Óxido de cálcio |
| cm | Centímetro |
| CO ₂ | Dióxido de carbono |
| CP | Corpo de prova |
| CP II F | Cimento portland tipo II composto com filler calcário |
| CP V ARI | Cimento portland de alta resistência inicial |
| CPM | <i>Compressible Packing Model</i> |
| d | Dias |
| DNIT | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes |
| EN | <i>European Standard</i> |
| f _{ck} | Resistência característica à compressão |
| Fe ₂ O ₃ | Óxido de ferro |
| FORTTRAN | <i>Formula Translating System</i> |
| FRX | Fluorescência de raios X |
| g | Grama |
| g/cm ³ | Grama por centímetro cúbico |
| GPa | Giga Pascal |
| h | Horas |
| IC | Índice de consistência |
| ISO | <i>International Organization for Standardization</i> |
| K ₂ O | Óxido de potássio |

| | |
|-------------------------------|--|
| kg | Quilograma |
| kg/m ³ | Quilograma por metro cúbico |
| LADEMA | Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais |
| LEME | Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia |
| m ² /kg | Metro quadrado por quilograma |
| m ³ | Metro cúbico |
| MEC | Modelo de Empacotamento Compressível |
| MgO | Óxido de magnésio |
| min | Minutos |
| mm | Milímetro |
| MnO | Óxido de manganês |
| MPa | Mega Pascal |
| mPa.s | Mili Pascal segundo |
| Na ₂ O | Óxido de sódio |
| NBR | Norma Brasileira |
| NM | <i>Norma Mercosur</i> |
| P ₂ O ₅ | Óxido de fósforo |
| Pa | Pascal |
| Pa.s | Pascal segundo |
| P.F. | Perda ao fogo |
| Polip. | Polipropileno |
| psi | Libra por polegada quadrada |
| R | Reparo |
| REF | Argamassa de referência |
| S | Substrato |
| s ⁻¹ | Segundos à menos um |
| SiO ₂ | Dióxido de silício |
| SO ₃ | Óxido de enxofre |
| solSP | Porcentagem de massa de sólidos do aditivo superplastificante em relação à massa do material |
| superp. | Aditivo superplastificante |
| TiO ₂ | Óxido de Titânio |
| TG | Termogravimetria |
| UNILA | Universidade Federal da Integração Latino-Americana |
| UNIOESTE | Universidade Estadual do Oeste do Paraná |
| μm | Micrômetro |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA DE PESQUISA | 18 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA | 20 |
| 1.3 PERGUNTA DA PESQUISA E HIPÓTESE | 21 |
| 1.4 OBJETIVOS | 21 |
| 1.5 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA..... | 22 |
| 1.6 ESTRUTURA DA PESQUISA | 22 |
| 2 DESGASTE E REPARO DE SUPERFÍCIES DE CONCRETO ERODIDAS | 23 |
| 2.1 MECANISMOS DE DESGASTE SUPERFICIAL DE ESTRUTURAS HIDRÁULICAS DE CONCRETO | 24 |
| 2.2 REPAROS SUPERFICIAIS | 24 |
| 2.3 ARGAMASSA DE PROJEÇÃO | 30 |
| 2.3.1 Reologia das argamassas..... | 31 |
| 2.4 MODELO DE EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL DE PARTÍCULAS | 35 |
| 2.4.1 Aplicação do modelo em pastas, argamassas e concretos..... | 37 |
| 2.5 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DESEJADAS EM ARGAMASSAS DE PROJEÇÃO PARA O REPARO DE ESTRUTURAS HIDRÁULICAS ERODIDAS | 39 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 41 |
| 3.1 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA | 41 |
| 3.2 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS | 43 |
| 3.2.1 Aditivo superplastificante..... | 43 |
| 3.2.2 Cimento e adições minerais..... | 43 |
| 3.2.3 Areia natural..... | 46 |
| 3.2.4 Fibra e aditivo retentor de água | 47 |
| 3.3 TESTE PILOTO | 48 |
| 3.4 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO | 50 |
| 3.5 PROPORCIONAMENTO DAS ARGAMASSAS DE PROJEÇÃO..... | 52 |
| 3.6 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS DE REPARO | 53 |
| 3.6.1 Mistura das argamassas no laboratório | 54 |
| 3.6.2 Ensaio no estado fresco das argamassas elaboradas no laboratório ... | 54 |
| 3.6.3 Ensaio no estado endurecido das argamassas elaboradas no laboratório | 55 |
| 3.6.3.1 Ensaio de resistência mecânica e módulo de elasticidade estático | 56 |
| 3.6.3.2 Módulo de elasticidade dinâmico..... | 56 |
| 3.6.3.3 Massa específica, índice de vazios e absorção de água..... | 56 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.6.4 | Mistura das argamassas e projeção no campo..... | 57 |
| 3.6.5 | Ensaio nas argamassas elaboradas no campo..... | 59 |
| 3.6.5.1 | <i>Ensaio de resistência à compressão, massa específica, índice de vazios e absorção de água.....</i> | <i>60</i> |
| 3.6.5.2 | <i>Resistência de aderência à tração.....</i> | <i>61</i> |
| 3.6.5.3 | <i>Abrasão hidráulica.....</i> | <i>61</i> |
| 3.7 | ANÁLISE ESTATÍSTICA..... | 62 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 63 |
| 4.1 | ENSAIOS NO ESTADO FRESCO DAS ARGAMASSAS ELABORADAS NO LABORATÓRIO..... | 63 |
| 4.1.1 | Índice de consistência, densidade de massa, ar incorporado, retenção de água e penetração de cone..... | 63 |
| 4.2 | ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO NAS ARGAMASSAS ELABORADAS NO LABORATÓRIO..... | 64 |
| 4.2.1 | Resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico..... | 64 |
| 4.2.2 | Massa específica, índice de vazios e absorção de água..... | 68 |
| 4.3 | ENSAIOS NAS ARGAMASSAS ELABORADAS NO CAMPO..... | 70 |
| 4.3.1 | Bombeabilidade e projetabilidade..... | 70 |
| 4.3.2 | Resistência à compressão..... | 71 |
| 4.3.3 | Massa específica, índice de vazios e absorção de água..... | 72 |
| 4.3.4 | Resistência de aderência à tração..... | 74 |
| 4.3.5 | Abrasão hidráulica..... | 75 |
| 4.4 | AVALIAÇÃO GERAL DAS ARGAMASSAS..... | 77 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 79 |
| 5.1 | CONCLUSÕES..... | 79 |
| 5.2 | SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 80 |
| | REFERÊNCIAS..... | 81 |
| | APÊNDICES..... | 90 |
| | APÊNDICE A – RESULTADOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL..... | 91 |
| | APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA..... | 96 |
| | ANEXOS..... | 102 |
| | ANEXO A – DOSAGEM POR MEIO DO MECFOR..... | 103 |
| A.1 | SIMULADOR MECFOR..... | 103 |
| A.1.1 | Entrada e saída de dados do <i>software</i> MECFOR..... | 104 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA DE PESQUISA

O concreto é um dos materiais de construção mais utilizados devido a seu baixo custo e alta resistência à compressão (JIANG et al., 2017), sendo empregado há mais de um século no ambiente construído. Devido à degradação do material, inúmeras estruturas no mundo precisam de reparo para devolver suas características originais e/ou de reforço para suportar maiores esforços (BISSONNETTE et al., 2013), sendo estes um dos maiores desafios que os engenheiros deverão enfrentar nos próximos anos (COURARD et al., 2018).

Estruturas hidráulicas de concreto, como revestimentos de canais, calhas de vertedouros, barragens, pilares de pontes e tubulações de concreto para transporte de água e esgoto, podem sofrer ao longo do seu uso degradação devido ao processo de erosão (MEHTA; MONTEIRO, 2014; SANTOS, B.; AMORIM JUNIOR; RIBEIRO, 2021). A água que escorre na superfície das obras hidráulicas pode conter partículas sólidas que causam erosão significativa (BERTOLINI, 2010).

Uma abordagem sistemática do problema é necessária para tomar decisões e soluções de durabilidade (EMMONS; VAYSBURD, 1996), pois o reparo dessas estruturas é um trabalho de engenharia complexo (VAYSBURD, 2006). Este serviço deve ser considerado como um sistema composto formado pelo substrato e o material de reparo (EMMONS; VAYSBURD, 1994).

O sucesso de um reparo depende de propriedades como resistência, módulo de elasticidade, retração por secagem e permeabilidade do material (GOODIER; AUSTIN; ROBINS, 2008). Sendo assim, a compatibilidade do material de reparo com o substrato e sua durabilidade são muito importantes (EMMONS; VAYSBURD, 1994). As argamassas são alternativas para reparos de estruturas hidráulicas de concreto erodidas que apresentam estes requisitos. Por conta da grande extensão de reparo, alguns fatores podem influenciar sua eficiência, tais como: espessura da camada, necessidade de compatibilidade dimensional com o substrato e desgaste devido à ação da água.

De acordo com Emmons e Vaysburd (1994), para que um sistema de reparo funcione adequadamente deve-se considerar não apenas a seleção dos materiais, mas também o método de aplicação, o preparo do substrato, as práticas construtivas e a inspeção. Quando a espessura do reparo é pequena, o material pode ser aplicado

manualmente ou por projeção, sem a necessidade de utilizar fôrmas (BERTOLINI, 2010).

Os concretos ou argamassas de projeção (HUANG; PONS; ALBAREDA, 2020) são técnicas rápidas de execução utilizadas em obras de engenharia (CHEN et al., 2019), como por exemplo: tuneis, reparação de estruturas de concreto, suporte de rochas e estabilização de taludes (GALAN et al., 2019). As propriedades reológicas são importantes para a avaliação da bombeabilidade e da projetabilidade (YUN et al., 2022). Nestes processos é fundamental que as argamassas possuam adequada fluidez, viscosidade e consistência (LIU et al., 2020). Quando a aplicação das argamassas de projeção ocorre em camadas delgadas, as mesmas requerem boa aderência, bombeabilidade, projetabilidade, pouca segregação e baixa reflexão (BOHAC et al., 2021). Além das propriedades em estado fresco, as propriedades em estado endurecido das argamassas de projeção também são importantes para obter um reparo durável (GOODIER; AUSTIN; ROBINS, 2008).

Para obter uma argamassa de reparo que cumpra com os requisitos descritos, em especial a resistência mecânica e os parâmetros de bombeabilidade e de projetabilidade, pode-se propor o método de proporcionamento baseado em empacotamento de partículas. No campo dos materiais de partículas compostas a teoria do empacotamento de partículas é amplamente utilizada (PENG et al., 2021), sendo a densidade de empacotamento dos materiais granulares de muito interesse para as indústrias (BALA; ZENTAR; BOUSTINGORRY, 2020). O empacotamento de partículas é um processo de otimização que baseia-se na minimização dos vazios por meio da proporção adequada das partículas (PRADHAN; KUMAR; BARAI, 2017).

Para obter uma densidade de empacotamento elevada devem ser utilizadas diferentes dimensões e proporções dos materiais granulares de modo que os vazios sejam ocupados por partículas cada vez menores (ROQUIER, 2019), requerendo, assim, menor quantidade de pasta para encher os vazios (KARADUMPA; PANCHARATHI, 2021a) e resultando em uma maior resistência (FENNIS; WALRAVEN; DEN UIJL, 2013a). Além disso, para conseguir a bombeabilidade das argamassas de projeção é necessário um conteúdo mínimo de pasta, que pode ser otimizada por meio da redução dos vazios da estrutura granular (JOLIN; BEAUPRÉ, 2003).

1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA

As estruturas hidráulicas de concreto são altamente solicitadas ao desgaste, gerando erosão na sua superfície. Devido à importância econômica e valor estratégico das estruturas hidrotécnicas, a durabilidade delas é muito importante (HORSZCZARUK, 2005). Uma vez que a estrutura apresentar danos deve ser, necessariamente, reparada.

As argamassas cimentícias podem ser utilizadas para o reparo destas estruturas, porém devem ser cuidadosamente estudadas. Uma seleção incorreta dos materiais para o reparo em relação às suas especificações para uso em determinado ambiente pode resultar em fissuras e delaminações do reparo (EMMONS; VAYSBURD, 1994). Normalmente, para o reparo de estruturas de concreto não é utilizado o mesmo material do substrato, pois, de acordo a Bissonnette et al. (2013), por mais que o substrato e o reparo tenham a mesma composição, eles não terão o mesmo comportamento com o passar do tempo.

Para alcançar as propriedades descritas, a argamassa de projeção pode ser uma opção viável do ponto de vista técnico. A projeção de argamassas deve satisfazer os requisitos de bombeabilidade e projetabilidade (LIU et al., 2020). Porém, a utilização de métodos de proporcionamento clássicos de argamassas ou concretos pode resultar em um material que não atenda esses requisitos devido à falta de consideração do empacotamento dos agregados, dificultando assim o bombeamento (JOLIN; BEAUPRÉ, 2003). Para isso, os métodos baseados no empacotamento de partículas podem ser aplicáveis às argamassas de projeção com baixo conteúdo de pasta, atendendo a fluidez suficiente para ser bombeado e aplicado ao substrato.

Os agregados com maior densidade de empacotamento tem menor quantidade de vazios, o que diminui o volume de material lubrificante para preenchê-los (MEHDIPOUR; KHAYAT, 2018). Também, a densidade de empacotamento influencia na resistência (FENNIS; WALRAVEN; DEN UIJL, 2013b). Para conseguir bombear a argamassa de projeção com o mínimo de pasta, a opção de diminuir os vazios quando comparada à opção de aumentar o conteúdo de pasta é mais benéfica, pois diminui os custos dos materiais e apresenta melhoras na retração, na durabilidade, e nas propriedades mecânicas (JOLIN; BEAUPRÉ, 2003). As misturas dosadas com estes métodos podem ajudar a conseguir um material de reparo satisfatório.

Neste contexto, pretende-se avaliar as principais propriedades físico-mecânicas de argamassas de projeção cimentícias dosadas por meio de um método de empacotamento de partículas, buscando garantir o seu adequado comportamento em uso como material de reparo superficial de estruturas hidráulicas de concreto erodidas.

1.3 PERGUNTA DA PESQUISA E HIPÓTESE

A pergunta principal que esta pesquisa pretende responder é: as argamassas cimentícias proporcionadas por meio de um método de empacotamento de partículas podem ser aplicadas por projeção para o reparo de estruturas hidráulicas de concreto erodidas, atendendo as principais propriedades físico-mecânicas?

A hipótese principal da pesquisa é: podem ser utilizadas argamassas de projeção cimentícias, proporcionadas por meio de um método de empacotamento de partículas, que atendam as principais propriedades físico-mecânicas requeridas para sua utilização como material de reparo de estruturas hidráulicas erodidas.

1.4 OBJETIVOS

Este estudo visa avaliar as principais propriedades físicas e mecânicas associadas ao comportamento em uso de argamassas de projeção cimentícias para reparo superficial de estruturas hidráulicas de concreto erodidas, proporcionadas por meio de um método de empacotamento de partículas.

Os objetivos específicos consistem em:

- a) Avaliar a influência da variação de excesso de volume de pasta nas principais propriedades físicas e mecânicas em estado fresco e endurecido das argamassas de projeção como material de reparo de estruturas hidráulicas de concreto erodidas;
- b) Avaliar as argamassas de projeção proporcionadas em relação às capacidades de bombeabilidade e projetabilidade no substrato;
- c) Validar a aplicabilidade do método de empacotamento de partículas utilizado no trabalho em função da capacidade de bombeamento e projeção das argamassas.

1.5 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

As delimitações desta pesquisa são:

- a) O programa experimental foi desenvolvido em ambiente de laboratório e em ambiente industrial (ensaios de campo).
- b) As argamassas desenvolvidas na pesquisa foram avaliadas apenas do ponto de vista técnico.
- c) O substrato de concreto utilizado foi feito com uma mistura genérica aplicável às estruturas hidráulicas.
- d) Em relação às propriedades que afetam à compatibilidade dimensional entre o material de reparo e o substrato, foi avaliado apenas o módulo de elasticidade.
- e) Foi avaliada apenas a abrasão hidráulica e não outros tipos de danos que podem sofrer as estruturas hidráulicas como a erosão, cavitação, impacto, etc.

1.6 ESTRUTURA DA PESQUISA

O trabalho está dividido em cinco capítulos. O capítulo 1 apresenta uma introdução à pesquisa, mostrando o contexto, a justificativa, a pergunta de pesquisa e a hipótese, os objetivos e finalmente, as delimitações da pesquisa.

No capítulo 2, é abordada a revisão bibliográfica em relação ao desgaste e reparo de superfícies de concreto erodidas, no qual são abordados os tópicos de: mecanismos de desgaste superficial, reparos superficiais, argamassas de projeção, reologia das argamassas e o modelo de empacotamento compressível de partículas.

O capítulo 3 refere-se aos materiais e métodos do programa experimental. Já no capítulo 4, são descritos os resultados e discussões. No capítulo 5, são apresentadas as conclusões e sugestão para trabalhos futuros.

Nos apêndices A e B são apresentados os resultados dos ensaios e da análise estatística, respectivamente. Finalmente, no Anexo A é descrito o proporcionamento das argamassas pelo *software* utilizado no trabalho.

2 DESGASTE E REPARO DE SUPERFÍCIES DE CONCRETO ERODIDAS

A importante função que cumprem as estruturas hidráulicas e o grau de exposição resultam em condições extraordinárias (MÜLLER et al., 2013), e com o passar do tempo e do uso, o concreto destas estruturas é deteriorado (SKOMINAS et al., 2017). Após 10 a 20 anos de uso a maioria das estruturas de concreto armado em um ambiente agressivo mostram severos defeitos e, para repará-los podem ser utilizados vários métodos e materiais, dependendo do tipo de estrutura, a causa do dano, entre outros (SKOMINAS et al., 2017).

Para garantir que a estrutura hidráulica atinja a vida útil projetada, é necessário realizar inspeções periódicas e os reparos necessários para reestabelecer o desempenho quando for o caso (MÜLLER et al., 2013). Hoje em dia há uma grande demanda de materiais de reparo que possuam alto desempenho mecânico (JIANG et al., 2017). Os problemas que derivam na reparação do concreto são diversos, o que faz que cada condição de deterioração precise de um entendimento profundo para saber o que se espera do reparo (EMMONS; VAYSBURD, 1994).

O conhecimento da real função do reparo é de fundamental importância, visto que, só assim, se terá condições de especificar corretamente o material a ser empregado (EMMONS; VAYSBURD, 1994). Nesse sentido, Vaysburd (2006) explica que os problemas da maioria dos reparos de concreto são complexos e requerem uma abordagem o mais sistemática possível. Já Müller et al. (2013) especificam que as estruturas hidráulicas necessitam um entendimento correto do sistema de reparo junto com materiais de reparo eficientes. Para o ACI Committee 546 (2014), o sucesso do reparo de uma estrutura de concreto depende da seleção e aplicação correta dos materiais de reparo.

Tendo em vista que é necessário compreender as causas de deterioração das estruturas hidráulicas e as propriedades dos materiais de reparo para assim resolver o problema com um enfoque holístico para o projeto e aplicação, serão abordados a seguir os mecanismos de desgaste superficial e o reparo do concreto danificado.

2.1 MECANISMOS DE DESGASTE SUPERFICIAL DE ESTRUTURAS HIDRÁULICAS DE CONCRETO

Os mecanismos que atuam em estruturas hidráulicas de concreto devido ao fluxo de água de alta velocidade são a erosão, a abrasão e a cavitação (MOMBER; KOVACEVIC, 1994; HORSZCZARUK, 2005). Estes mecanismos causam danos superficiais (HORSZCZARUK, 2005) consumindo o concreto desde a superfície (BERTOLINI, 2010) e provocando perdas progressivas de massa nas estruturas de concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

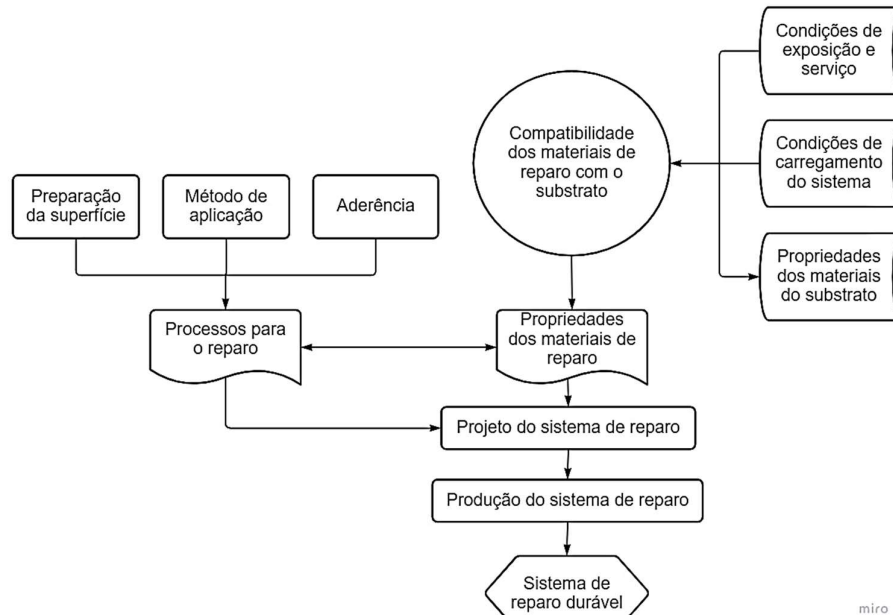
A erosão ocorre pela ação direta do fluxo de água de alta velocidade (MOMBER; KOVACEVIC, 1994) e provoca o desgaste superficial do concreto (PINHO et al., 2007). Por outro lado, a abrasão é a ação das partículas sólidas suspensas na água que se movimentam a grande velocidade (MOMBER; KOVACEVIC, 1994; PINHO et al., 2007). O escorregamento, rolamento ou a colisão contra o concreto das partículas sólidas suspensas num fluido produz desgaste da superfície do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Já a cavitação é a ação de bolhas de ar que implodem num fluxo de alta velocidade (MOMBER; KOVACEVIC, 1994) em regiões onde a pressão é menor que a pressão de vapor da água (PINHO et al., 2007) provocando perda de massa (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.2 REPAROS SUPERFICIAIS

O reparo de estruturas de concreto requer da integração do substrato com o material de reparo formando um sistema que possa suportar cargas e diversas condições ambientais (LUKOVIĆ et al., 2016). Os projetos nos quais uma abordagem holística do sistema não é considerada, dificilmente poderão atingir reparos úteis e duráveis para cumprir com as necessidades desejadas (VAYSBURD, 2006). Sendo assim, o sistema de reparo de concreto consiste em três subsistemas que são: o substrato existente, o material de reparo e a zona de transição (VAYSBURD, 2006; RASHID et al., 2020).

Para que o reparo seja durável, é importante conhecer o comportamento do sistema (LUKOVIĆ et al., 2014). Na Figura 1 (EMMONS; VAYSBURD, 1994, 1996) são mostrados os fatores críticos que afetam a durabilidade do sistema de reparo.

Figura 1 – Fatores que afetam à durabilidade do sistema de reparo



Fonte: Emmons e Vaysburd (1994, 1996).

Para desenvolver um reparo efetivo, é necessário determinar a condição atual da estrutura por meio de análises (MÜLLER et al., 2013), além de ser consideradas a compatibilidade entre o substrato e o reparo, o preparo da superfície e as condições ambientais (BISSONNETTE et al., 2013).

A compatibilidade pode ser definida como o equilíbrio entre as propriedades físicas, químicas, eletroquímicas e dimensionais do material de reparo e do substrato para que o sistema possa suportar todos os efeitos que pode estar submetido durante um período de tempo definido num ambiente determinado sem apresentar uma deterioração prematura (EMMONS; VAYSBURD, 1994).

Uma causa de muitas falhas nos sistemas de reparo é a falta de entendimento da natureza do sistema, particularmente, da compatibilidade dimensional (VAYSBURD, 2006). De acordo com Emmons e Vaysburd (1994, 1996), os fatores que afetam a compatibilidade dimensional entre o material de reparo e o substrato são: a retração por secagem, a expansão térmica, a fluência e o módulo de elasticidade.

Os sistemas de reparo de concreto possuem uma zona de transição específica (GARBAZ et al., 2017), onde o bom comportamento do reparo depende do desenvolvimento e manutenção de uma aderência perfeita entre o substrato e o reparo (FATHY; ZHU; KOHAIL, 2022), ocorrendo uma ancoragem mecânica entre eles além das forças químicas de adesão (RASHID et al., 2020). As propriedades do reparo na zona de

transição afetarão o comportamento do sistema e determinarão o seu padrão de falha potencial (LUKOVIĆ et al., 2014).

Para cada condição, propósito e ambiente existem diferentes materiais de reparo que são os mais adequados, não existindo um único material que seja o melhor para todos os casos (EMMONS; VAYSBURD, 1994), mas a grande variedade de opções aumenta o risco de selecionar os materiais inadequados (ACI COMMITTEE 546, 2014) se o conhecimento da suas propriedades é escasso.

Alguns fatores e propriedades baseados em dados experimentais e informações da literatura que influenciam o sucesso do reparo em relação à compatibilidade dimensional do sistema, à aderência entre o substrato e o reparo, e às propriedades dos materiais de reparo são elencados na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais fatores e propriedades que influenciam o sucesso do reparo com base em dados experimentais¹ e informações da literatura²

| Fator/propriedade | Autores |
|--|---|
| Resistência à compressão e à tração do reparo | Emmons e Vaysburd (1994, 1996) ² ; Horszczaruk (2005) ¹ ; Goodier, Austin e Robins (2008) ¹ ; Bertolini (2010) ² ; Bissonnette et al. (2013) ² ; Müller et al. (2013) ² ; Jiang et al. (2016) ¹ ; Liu et al. (2016) ¹ ; Garbacz et al. (2017) ¹ ; Jiang et al. (2017) ¹ ; Skominas et al. (2017) ¹ ; Esinovskii et al. (2019) ^{1,2} ; Rashid et al. (2020) ¹ ; Záleská et al. (2021) ¹ ; Fathy, Zhu e Kohail (2022) ² |
| Aderência entre o substrato e o reparo | Emmons e Vaysburd (1994, 1996) ² ; Pinho et al. (2007) ¹ ; Goodier, Austin e Robins (2008) ¹ ; Bertolini (2010) ² ; Bissonnette et al. (2013) ² ; Müller et al. (2013) ² ; Baroghel-Bouny, Capra e Laurens (2014) ² ; Jiang et al. (2016) ¹ ; Luković et al. (2016) ² ; Garbacz et al. (2017) ¹ ; Jiang et al. (2017) ¹ ; Skominas et al. (2017) ¹ ; Rashid et al. (2020) ¹ ; Zhou, Jin e Wang (2020) ¹ ; Fathy, Zhu e Kohail (2022) ² |
| Retração do reparo | Emmons e Vaysburd (1994, 1996) ² ; Vaysburd (2006) ² ; Goodier, Austin e Robins (2008) ¹ ; Müller et al. (2013) ² ; Jiang et al. (2016) ¹ ; Luković et al. (2016) ² ; Skominas et al. (2017) ¹ ; Esinovskii et al. (2019) ^{1,2} ; Zhou, Jin e Wang (2020) ¹ ; Fathy, Zhu e Kohail (2022) ² |
| Módulo de elasticidade compatível entre o substrato e o reparo | Emmons e Vaysburd (1994, 1996) ² ; Horszczaruk (2005) ¹ ; Vaysburd (2006) ² ; Goodier, Austin e Robins (2008) ¹ ; Bertolini (2010) ² ; Müller et al. (2013) ² ; Liu et al. (2016) ¹ |
| Resistência à abrasão do reparo | Horszczaruk (2005) ¹ ; Pinho et al. (2007) ¹ ; Müller et al. (2013) ² ; Jiang et al. (2016) ¹ ; Jiang et al. (2017) ¹ |
| Variações dimensionais térmicas compatíveis entre o substrato e o reparo | Emmons e Vaysburd (1994, 1996) ² ; Vaysburd (2006) ² ; Bertolini (2010) ² ; Sun et al. (2021) ¹ |
| Permeabilidade do reparo | Goodier, Austin e Robins (2008) ¹ ; Müller et al. (2013) ² ; Jiang et al. (2016) ¹ ; Esinovskii et al. (2019) ^{1,2} ; Záleská et al. (2021) ¹ |
| Rugosidade do substrato | Garbacz et al. (2017) ¹ ; Skominas et al. (2017) ¹ ; Rashid et al. (2020) ¹ ; Zhou, Jin e Wang (2020) ¹ ; Fathy, Zhu e Kohail (2022) ² |
| Resistência aos ciclos de gelo-desgelo do reparo | Müller et al. (2013) ² ; Jiang et al. (2016) ¹ ; Skominas et al. (2017) ¹ ; Esinovskii et al. (2019) ^{1,2} |
| Umidade do substrato | Bissonnette et al. (2013) ² ; Lukovic e Ye (2016) ¹ ; Courard et al. (2018) ^{1,2} ; Fathy, Zhu e Kohail (2022) ² |
| Limpeza da interface | Bissonnette et al. (2013) ² ; Courard et al. (2018) ^{1,2} ; Fathy, Zhu e Kohail (2022) ² |
| Densidade de microfissuras no substrato e/ou no reparo | Bissonnette et al. (2013) ² ; Garbacz et al. (2017) ¹ ; Skominas et al. (2017) ¹ |
| Compactação do reparo | Emmons e Vaysburd (1994) ² ; Bissonnette et al. (2013) ² |
| Cura do reparo | Bissonnette et al. (2013) ² ; Sun et al. (2021) ¹ |

Da Tabela 1 pode-se observar que a resistência à compressão e à tração do material de reparo junto com a aderência do reparo ao substrato são os fatores predominantes, seguindo-os a retração, o módulo de elasticidade, a resistência à abrasão e, em menor medida, os outros fatores.

No reparo de estruturas hidráulicas de concreto, para desenvolver uma adequada aderência e assim garantir a durabilidade do sistema, o reparo deve se adaptar às propriedades mecânicas do concreto do substrato em relação à resistência à compressão, resistência à tração e o módulo de elasticidade (MÜLLER et al., 2013).

O módulo de elasticidade do substrato e do reparo devem ser similares para que os materiais do sistema tenham um comportamento semelhante ao da estrutura antes da deterioração (ACI COMMITTEE 546, 2014). Diferenças nos módulos de elasticidade resultam em tensões na zona de transição (VAYSBURD, 2006). Em consequência aparecerão fissurações nessa zona devido que ela normalmente é a parte mais fraca do sistema. Porém, se o sistema possui uma alta aderência, as fissuras aparecerão no material com o módulo de elasticidade maior (EMMONS; VAYSBURD, 1994).

A retração por secagem é a mais importante dentre os fatores que afetam a compatibilidade dimensional do sistema (EMMONS; VAYSBURD, 1994). No material de reparo, esta retração deve ser baixa (MÜLLER et al., 2013; ACI COMMITTEE 546, 2014) para evitar o aparecimento de fissuras e a diminuição da aderência.

A aderência ente o substrato e o reparo dependem da preparação da superfície, das propriedades do material de reparo e da compactação durante sua aplicação (BERTOLINI, 2010). A norma EN 1504-3 (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005) estabelece uma resistência de aderência à tração mínima de 0,8 MPa para reparos não estruturais.

O preparo adequado da superfície do substrato para receber o reparo é fundamental (PINHO et al., 2007; BISSONETTE et al., 2013), devendo a superfície estar limpa, sã e rugosa (ACI COMMITTEE 546, 2014). Normalmente para este tipo de reparo o substrato deve estar em estado saturado superfície seca (BISSONETTE et al., 2013).

As microfissuras na zona de transição podem resultar em uma resistência de aderência à tração baixa; portanto, para evitar a aparição de microfissuras, a remoção do substrato danificado e a limpeza devem ser feitos por métodos adequados (COURARD et al., 2018). A remoção do concreto danificado normalmente é feita com martelões elétricos ou pneumáticos ou por meio da hidrodemolição, sendo esta última sugerida para

realizar a remoção em grandes áreas além de afetar em menor medida ao concreto em relação às microfissurações (BERTOLINI, 2010).

A resistência à abrasão é um dos principais requisitos para as estruturas hidráulicas (JIANG et al., 2016; SKOMINAS et al., 2017). De acordo com Horszczaruk (2005), os fatores que podem afetar a resistência à abrasão do concreto são: as condições do ambiente, o proporcionamento dos agregados, a resistência do concreto, o uso de materiais cimentícios suplementares, a adição de fibras, o acabamento superficial e as condições de cura; sendo a resistência à compressão um dos fatores mais importantes. Alguns fatores que definem a taxa de abrasão são: a porosidade do concreto, a resistência do concreto, a quantidade, tamanho, forma, dureza, densidade e velocidade das partículas suspensas no fluido (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A norma DNIT 090 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006) recomenda que o concreto destinado para estruturas hidráulicas submetidas à abrasão esteja composto de agregados de alta dureza, a resistência à compressão do concreto aos 28 dias seja de 40 MPa e que seja curado adequadamente. Já para a recuperação das superfícies erodidas, a norma recomenda utilizar concreto projetado de alta dureza, baixa relação água/cimento e resistência à compressão aos 28 dias no mínimo de 40 MPa.

Frequentemente, são utilizadas camadas de reparo (*overlays*) para o reparo superficial de estruturas de concreto (ZHOU; JIN; WANG, 2020) sendo especialmente indicado para grandes áreas (BISSONNETTE et al., 2013). Estas camadas de reparo possuem uma espessura de no mínimo 6 mm e comumente são utilizados concretos, argamassas cimentícias ou outro composto cimentício, sempre que seja compatível com o substrato (ACI COMMITTEE 546, 2014).

Para que o material de reparo proporcione adequada aderência e compatibilidade com o substrato, além de durabilidade e resistências mecânicas (BISSONNETTE et al., 2013), os materiais de reparo são compostos de cimento, materiais cimentícios suplementares, aditivos, fibras (ACI COMMITTEE 546, 2014) sendo que a relação água/cimento deve ser o mais baixa possível (BERTOLINI, 2010; BISSONNETTE et al., 2013), observando os requisitos de aplicabilidade necessários.

O material de reparo deve possuir uma adequada quantidade de aglomerante (EMMONS; VAYSBURD, 1994), devendo ser trabalhável, bombeável e compactável, apresentando alta coesão (MÜLLER et al., 2013). Para obter a consistência requerida, comumente são utilizados aditivos superplasticantes (BERTOLINI, 2010).

Ademais, os agregados influenciam na durabilidade do reparo e contribuem à resistência mecânica, massa específica e resistência à retração por secagem (EMMONS; VAYSBURD, 1994). Utilizar uma granulometria melhorada dos agregados pode resultar em menor requerimento de pasta (BISSONNETTE et al., 2013).

As fibras sintéticas podem ser utilizadas para controlar a fissuração por retração (BISSONNETTE et al., 2013), contribuir para obter um comportamento tixotrópico (BERTOLINI, 2010), entre outras propriedades.

Jiang et al. (2016) estudaram o efeito da adição de fibras de polipropileno e de basalto em seis argamassas de reparo para estruturas hidráulicas. Eles concluíram que as fibras melhoraram a aderência, a resistência à flexão e à abrasão hidráulica. Além disso, estas argamassas mostraram menor retração por secagem e maior impermeabilidade, embora não foi observada uma melhoria na resistência à compressão nos corpos de prova moldados. No entanto, na pesquisa de Skominas et al. (2017), as fibras de polipropileno mostraram incremento na resistência à compressão nas argamassas testadas, diminuíram a retração, incrementaram a aderência entre as argamassas e o concreto do substrato, além de diminuir as microfissuras por retração. Já o Horszczaruk (2005) avaliou o desgaste por abrasão hidráulica levando em consideração a resistência à compressão, módulo de elasticidade e o tipo e dimensão das fibras em nove misturas de concreto contendo sílica ativa, fibras metálicas e poliméricas, e modificando alguns dos concretos com látex. O concreto com fibras poliméricas foi o concreto que apresentou as maiores resistências ao desgaste por abrasão.

A sílica ativa aumenta a resistência à compressão, diminui a permeabilidade e a exsudação (MEHTA; MONTEIRO, 2014), melhora a aderência e a resistência à abrasão, proporcionam maior coesão tendo menor tendência à segregação, sendo utilizada normalmente em teores de 5% até 15% da massa do cimento (ACI COMMITTEE 546, 2014).

Rashid et al. (2020) encontraram que a resistência à compressão e à tração indireta do material de reparo foi maior que do substrato devido à utilização da sílica ativa. Na pesquisa de Pinho et al. (2007), a argamassa com sílica ativa apresentou o menor desgaste por abrasão hidráulica, sendo 52 vezes mais resistente ao desgaste que o concreto de referência. Jiang et al. (2017) pesquisaram o uso de sílica ativa e polímero em argamassas de reparo de estruturas hidráulicas, concluindo que o uso destes materiais é ideal para o reparo deste tipo de estruturas devido que a resistência à compressão, à tração indireta, à aderência e à abrasão dos corpos de prova moldados mostraram melhorias em

relação à argamassa padrão.

Rampanelli (2021) estudou nove argamassas de reparo para estruturas hidráulicas empregando sílica ativa, fíler calcário, fibras de polipropileno e em algumas das argamassas adicionou polímero EVA. Os resultados indicaram que as argamassas com menor consumo de cimento tiveram menor retração por secagem e que a argamassa com o consumo de cimento mais baixo apresentou resistências mecânicas, aderência ao concreto do substrato e resistência à perda de massa por abrasão hidráulica satisfatórias em relação à argamassa de referência. Entanto que as argamassas com adição de polímeros não tiveram desempenho geral satisfatório.

Goodier, Austin e Robins (2008) estudaram dez argamassas de projeção para reparo de estruturas, nove delas projetadas por via úmida e uma delas por via seca. Utilizaram sílica ativa, aditivos superplastificantes e incorporador de ar, fibras de aço e de polipropileno. Analisaram a resistência à compressão, tração na flexão, aderência à tração, módulo de elasticidade, retração por secagem, entre outros. Os ensaios foram realizados em corpos de prova moldados, corpos de prova projetados e testemunhos extraídos de placas de projeção. Com o estudo mostraram que podem ser obtidos materiais de reparo efetivos com propriedades adequadas utilizando a projeção por via úmida.

Existem diversos materiais para reparo superficial de estruturas de concreto como as pastas, as argamassas e os concretos. Alguns destes materiais podem ser cimentícios ou poliméricos além que podem ser aplicados de forma manual ou por projeção. Este estudo abordará as argamassas de projeção cimentícias.

2.3 ARGAMASSA DE PROJEÇÃO

A argamassa de projeção é um material transportado por bombeamento através de um mangote e aplicada sobre o substrato mediante projeção pneumática a grande velocidade (AUSTIN; ROBINS; GOODIER, 1999). São aplicadas tipicamente em obras onde se dificulta a utilização de fôrmas, áreas de trabalho de difícil acesso, ou quando é preciso uma camada com pouca espessura (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Há mais de 100 anos que a argamassa de projeção é lançada manualmente, mas na atualidade existe a possibilidade de ser lançada com braços mecânicos (ASA UNDERGROUND COMMITTEE, 2020).

Existem dois métodos de projeção, por via úmida e por via seca (ACI COMMITTEE 506, 2005; LIU et al., 2020). No método de projeção por via úmida, todos os materiais constituintes da argamassa são primeiramente misturados para logo serem bombeados através do mangote até o bico, onde finalmente é injetado ar comprimido para projetar a argamassa a grande velocidade no substrato (ACI COMMITTEE 506, 2005; GOODIER; AUSTIN; ROBINS, 2008; GALAN et al., 2019). No método por via seca, os materiais secos são misturados e bombeados através do mangote até o bico, onde a água é injetada sob pressão misturando-a com os materiais secos, e imediatamente é projetada a argamassa a grande velocidade (AUSTIN; ROBINS; GOODIER, 1999; ACI COMMITTEE 506, 2005).

Algumas vantagens do método por via úmida em comparação ao método por via seca são: menor produção de pó, melhor controle da quantidade de água da mistura, a composição da argamassa de projeção sofre menos variações e menor desperdício da argamassa (ACI COMMITTEE 506, 2005; GALAN et al., 2019). No que diz respeito às propriedades da argamassa de projeção por via úmida, o parâmetro que governa suas propriedades é a relação água/aglomerante (a/agl); por exemplo, reduzindo a relação a/agl pode-se melhorar a resistência, a permeabilidade e a durabilidade (ACI COMMITTEE 506, 2005).

De acordo com Bohac et al. (2021), a composição da argamassa de projeção deve atender os requisitos de bombeabilidade e de projetabilidade. A bombeabilidade é a capacidade do material de fluir sob pressão dentro do mangote e a projetabilidade é sua capacidade de ser lançado. O primeiro está relacionado à resistência ao fluxo e o segundo à espessura da camada projetada, à reflexão, entre outros (CHEN et al., 2019). No caso das argamassas de projeção por via úmida, as propriedades reológicas são importantes desde o processo de mistura até o lançamento no substrato (AUSTIN; ROBINS; GOODIER, 1999).

2.3.1 Reologia das argamassas

A reologia estuda a deformação e o fluxo do material (STOLZ; MASUERO, 2018). A reologia das argamassas pode ser caracterizada por ensaios monopontos e polipontos, os primeiros avaliam uma propriedade reológica sob uma única taxa de cisalhamento e os segundos podem determinar os parâmetros reológicos do material ao submetê-lo a diferentes taxas de cisalhamento, sendo que os ensaios monopontos ainda

são amplamente utilizados devido ao baixo custo e simplicidade de uso (SIQUEIRA et al., 2021).

Um dos ensaios monoponto mais utilizado é a mesa de consistência (*flow table*), onde o espalhamento pode ser correlacionado à viscosidade e à fluidez das argamassas, além de que pode ser avaliada qualitativamente a tendência de segregação (SIQUEIRA et al., 2021). Outro ensaio monoponto para avaliação de argamassas é o ensaio de penetração do cone, muito interessante para o controle *in-situ* por conta da sua facilidade de uso em obra, que permite detectar alterações na consistência de forma mais eficiente do que a mesa de consistência devido a sua sensibilidade às variações do teor água nas misturas (CARASEK, 2017).

Com os ensaios polipontos é possível determinar os parâmetros reológicos de viscosidade e tensão de escoamento, e definir o comportamento reológico do material. Os métodos mais utilizados são a reometria e o *squeeze-flow* (SIQUEIRA et al., 2021). De acordo com Ferraris (1999), as propriedades do fluxo de uma suspensão como o concreto ou a argamassa podem ser descritas utilizando o modelo de Bingham. Nos últimos anos vários trabalhos utilizaram o modelo de Bingham para estudar a reologia de argamassas e concretos de projeção (YUN; CHOI; YEON, 2015; CHOI; YUN; YEON, 2017; CHEN et al., 2019; PAN et al., 2019; BOHAC et al., 2021; YUN et al., 2022) entre outros.

De acordo com Senff et al. (2009), o modelo de Bingham é descrito na equação (2.1).

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma \quad (2.1)$$

Onde τ (Pa) é a tensão de cisalhamento, τ_0 (Pa) é a tensão de escoamento, μ_p (Pa.s) é a viscosidade plástica e γ (s^{-1}) é a taxa de cisalhamento.

Ferraris (1999) enfatiza que é importante utilizar métodos que possam determinar os dois parâmetros. Nesse sentido, o uso de um reômetro rotacional permite a determinação destes parâmetros de uma maneira mais precisa (SEFFF et al., 2009).

Os reômetros são equipamentos que podem avaliar as propriedades reológicas de diferentes fluidos, entre eles as argamassas e concretos (CARDOSO, 2009). O tipo de reômetro mais utilizado é o baseado em cilindros coaxiais (FERRARIS, 1999; LIU et al., 2020). Para este tipo de reômetros, Austin, Robins e Goodier (1999) explicam que a argamassa é colocada num recipiente cilíndrico que é montado no reômetro, logo é inserido o cilindro ou paleta coaxial dentro da argamassa que tem sua velocidade de rotação programada. Os autores afirmam, ainda, que todas as leituras de torque, velocidade, temperatura e tempo são armazenados no computador durante a duração do ensaio para

logo poder obter as curvas de fluxo.

Os valores medidos com o reômetro não permitem a determinação da viscosidade e a tensão de escoamento de maneira direta (FERRARIS, 1999; LIU et al., 2020). Nesse sentido, Cardoso (2009) explica que as taxas de cisalhamento impostas à argamassa durante o ensaio retornam a tensão de cisalhamento que é correlacionada com a viscosidade da argamassa. Para realizar estas correlações, Sneff et al. (2009) explicam que o modelo de Bingham pode ser representado pela equação (2.2).

$$T = g + hN \quad (2.2)$$

Onde T é o torque, N é a velocidade de rotação, e g e h são diretamente proporcionais à tensão de escoamento e a viscosidade plástica respectivamente.

Outro ponto importante é que a rotina de ensaio no reômetro tem grande influência nos resultados, de modo que não podem ser comparados diretamente os resultados de rotinas distintas ou com reômetros diferentes, além que deve ser escolhida a rotina que mais se adapte ao material (SIQUEIRA et al., 2021).

A tensão de escoamento é a tensão a partir da qual o material flui e a viscosidade plástica é uma medida da facilidade com que o material flui uma vez que a tensão de escoamento é atingida (CARASEK, 2017). De acordo com Liu et al. (2020), uma viscosidade elevada é boa para a projetabilidade, porque devido à coesão gerada se tem maior capacidade de espessura da camada projetada, mas para o bombeamento se dificulta o processo porque aumenta a fricção entre o material e o mangote. Além disso, uma alta tensão de escoamento melhora a aderência inicial do material ao substrato, mas pode gerar uma maior resistência no mangote. Continuam explicando que para verificar a bombeabilidade pode ser feito um teste em escala real, mas o método é custoso e complexo; já para avaliar a projetabilidade, os parâmetros de reflexão e espessura da camada de projeção são importantes.

Beaupré (1994) indica que encontrar o equilíbrio entre os requerimentos de bombeabilidade e projetabilidade é um dilema comum nas argamassas de projeção, e para isso o proporcionamento das argamassas deve ser ajustado. Podem ser utilizadas argamassas convencionais, aditivadas, contendo adições, fibras, etc. (ROBERTSON, 2015). Uma argamassa de projeção de alto desempenho é aquela que pode possuir alta resistência à compressão, baixa permeabilidade, elevada durabilidade, elevada resistência química ou à altas temperaturas (ACI COMMITTEE 506, 2005).

Na dosagem de misturas cimentícias existem diversos métodos, cada um com suas vantagens e limitações, sendo alguns deles os empíricos, os baseados na

resistência à compressão, no empacotamento de partículas, na reologia exclusivamente, e os que utilizam um delineamento estatístico de experimentos (SANTANA et al., 2021).

Alguns materiais normalmente utilizados na dosagem de argamassas de projeção junto com as quantidades usuais estão elencados na Tabela 2.

Tabela 2 – Materiais, quantidades por m³ e propriedades conferidas às argamassas de projeção

| Material | Quantidade por m³ | Propriedades conferidas/Observações |
|----------------------------|-------------------------------------|---|
| Cimento | 400-450 kg | Menores quantidades produzem argamassas difíceis de bombear e tem maior reflexão. Maiores quantidades podem aumentar o risco de fissuras por retração. |
| a/c | 0,35-0,50 | Menores relações podem ser utilizadas para argamassas de alto desempenho. |
| Agregado miúdo | ~1000 kg | Se será utilizado também agregado graúdo é recomendado até 600 kg/m ³ . |
| Aditivo superplastificante | variável | Confere a consistência adequada. Adicionado na mistura dos materiais. |
| Aditivo incorporador de ar | variável | Confere a consistência adequada. Se dosado corretamente, a argamassa perde o conteúdo de ar incorporado durante o bombeamento e a projeção. Adicionado na mistura dos materiais. |
| Aditivo acelerador de pega | variável | Para melhorar a capacidade de espessura da camada projetada ou o desenvolvimento de resistências em curtas idades. Adicionado na saída do bico de projeção. |
| Sílica ativa | 7,5-12% | No estado fresco ajuda na coesão reduzindo a exsudação, o risco de bloqueio no mangote e a reflexão, e aumenta a espessura da camada projetada. No estado endurecido reduz a permeabilidade, melhora a aderência na zona de transição, e aumenta as resistências mecânicas. |
| Fibras | ~0,8% em volume | Melhoram a coesão e reduzem a retração, além de possibilitarem melhorias das propriedades mecânicas. |

Fonte: Beaupré (1994).

Para conseguir a trabalhabilidade adequada, não só os vazios entre os agregados devem ser enchidos com pasta, mas também deve existir um excesso dela (JOLIN; BEAUPRÉ, 2003). Chapdelaine e Beaupré (2002 apud JOLIN; BEAUPRÉ, 2003)¹ sugerem um excesso de 6% de pasta em relação aos vazios dos agregados para se conseguir uma bombeabilidade adequada das argamassas, embora esse valor seja adotado pelas boas práticas e deve ser ajustado para cada caso.

Enquanto à consistência, Beaupré (1994) indica que com valores de *slump* entre 50-80 mm na maioria dos casos é possível bombear e projetar as argamassas. Já o ACI Committee 506 (2005), especifica valores de *slump* entre 40-75 mm. Por outro lado, Mello (2018) encontrou que a faixa de índice de consistência entre 260 ± 15 mm é apropriada em argamassas de projeção para revestimentos.

Os ensaios que podem ser feitos para a avaliação das argamassas de projeção no estado endurecido são os mesmos que para outras argamassas e concretos (BEAUPRÉ, 1994). A extração de testemunhos de placas onde foi projetada a argamassa

¹CHAPDELAINE, F.; BEAUPRÉ, D., Le volume de pâte de liant: une condition nécessaire au pompage du béton, progrès dans le domaine du béton. **ACI section du québec et de l'est de l'ontario**, Ottawa, 2002.

normalmente é feita para a caracterização das argamassas de projeção em estado endurecido (ACI COMMITTEE 506, 2005), evitando assim a influência do molde durante a projeção ou a variação da compacidade no processo de moldagem.

Na Tabela 3 são elencados alguns valores usuais de propriedades em estado endurecido das argamassas de projeção por via úmida.

Tabela 3 – Valores usuais de propriedades em estado endurecido das argamassas de projeção por via úmida

| Propriedade | Valores |
|--------------------------|---------------------------------|
| Resistência à compressão | 30-50 MPa |
| Aderência à tração | $\geq 0,7$ MPa; $\geq 1,0$ MPa* |
| Poros permeáveis | 14-17% |
| Densidade | 2230-2390 kg/m ³ |
| Módulo de elasticidade | 17-40 GPa |

*Se a colocação da argamassa e preparação do substrato foram feitas adequadamente.

Fonte: ACI Committee 506 (2005).

Nesta seção sobre argamassas de projeção foi constatado que é necessário ajustar o proporcionamento dos materiais na dosagem tendo em conta a bombeabilidade, a projetabilidade e as propriedades desejadas em estado endurecido, existindo diversos métodos para realizar a dosagem. Para isso, na próxima seção será abordado brevemente o modelo de empacotamento compressível de partículas.

2.4 MODELO DE EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL DE PARTÍCULAS

O empacotamento de partículas atrai pesquisadores de diversas áreas da tecnologia, por exemplo as áreas das cerâmicas, metalurgia dos pós, asfalto, tecnologia de concreto (PRADHAN; KUMAR; BARAI, 2017), ciências da terra e indústria química devido à ampla faixa de aplicações (ROQUIER, 2019). O empacotamento de partículas consegue otimizar a estrutura granular ao preencher os vazios entre as partículas maiores utilizando as partículas menores para obter a densidade de empacotamento máxima possível (PRADHAN; KUMAR; BARAI, 2017). A densidade de empacotamento pode ser definida como a quantidade total de sólidos contidos num volume determinado (KARADUMPA; PANCHARATHI, 2021a).

De acordo com Roquier (2019), os modelos de empacotamentos de partículas podem ser classificados em: modelos de distribuição espacial, modelos

geométricos, modelos analíticos e modelos combinados. O modelo de empacotamento compressível pertence ao grupo dos modelos analíticos.

Os modelos analíticos utilizam equações matemáticas para determinar a interação geométrica de cada classe com as outras, e também para determinar como suas densidades de empacotamento e frações volumétricas impactam no resultado (ROQUIER, 2019). Além disso, o modelo de empacotamento compressível é um modelo discreto, porque está baseado na suposição de que cada classe contribui com as outras para atingir a densidade de empacotamento máxima possível (PRADHAN; KUMAR; BARAI, 2017).

Os efeitos de afastamento, parede e cunha, conhecidos como efeitos de interação entre as partículas, reduzem a densidade de empacotamento do sistema de partículas. O modelo de empacotamento compressível proposto por De Larrard (1999) considera além dos efeitos de afastamento e parede, o índice de compactação K que está relacionado ao processo de compactação, o que resulta em valores mais realistas quando comparado a outros modelos (KARADUMPA; PANCHARATHI, 2021a).

O índice de compactação é utilizado para calcular densidade de empacotamento real a partir da densidade de empacotamento virtual (PRADHAN; KUMAR; BARAI, 2017). A densidade de empacotamento real é a obtida para um empacotamento adensado aleatoriamente (ROQUIER, 2017), e a densidade de empacotamento virtual corresponde à densidade de empacotamento se todas as partículas tivessem sido colocadas uma a uma de tal forma que utilizem o menor espaço possível (PRADHAN; KUMAR; BARAI, 2017).

No modelo desenvolvido por De Larrard (1999), para o cálculo da densidade de empacotamento virtual de um conjunto de partículas são utilizadas as equações (2.3) e (2.4).

$$\gamma = \text{Min}(\gamma_i) \quad (2.3)$$

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[1 - \beta_i + b_{ij}\beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] y_j - \sum_{j=i+1}^n \left[1 - a_{ij} \frac{\beta_i}{\beta_j} \right] y_j} \quad (2.4)$$

Onde, γ é a densidade de empacotamento virtual do conjunto de partículas, γ_i é a densidade de empacotamento virtual do conjunto quando a classe i é dominante, β_i é a densidade de empacotamento virtual da classe i , y_j é a fração volumétrica da classe i , a_{ij} é o coeficiente de interação devido ao efeito afastamento, e b_{ij} é o coeficiente devido ao efeito parede. Para calcular estes coeficientes são utilizadas as equações (2.5) e (2.6).

$$a_{ij} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i}\right)^{1,02}} \quad (2.5)$$

$$b_{ij} = 1 - \left(1 - \frac{d_i}{d_j}\right)^{1,50} \quad (2.6)$$

Onde, d_i e d_j são os diâmetros das partículas das classes i e j respectivamente. Finalmente, a densidade de empacotamento do conjunto de partículas (α_t) pode ser determinada indiretamente da equação (2.7).

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{y_i/\beta_i}{1/\alpha_t - 1/\gamma_i} \quad (2.7)$$

2.4.1 Aplicação do modelo em pastas, argamassas e concretos

Com um empacotamento altamente eficiente do concreto, são reduzidos os vazios intergranulares da pasta ao combinar vários tamanhos de materiais finos (CAMPOS; KLEIN; MARQUES FILHO, 2020). Ao aumentar a densidade de empacotamento dos agregados diminuem os vazios, e em consequência são necessárias menores quantidades de aglomerante e água para enchê-los (PRADHAN; KUMAR; BARAI, 2017) resultando em uma microestrutura mais densa (FENNIS; WALRAVEN; DEN UIJL, 2013b). Para conseguir uma trabalhabilidade adequada são utilizados aditivos superplastificantes que dispersam as partículas (DE CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

O tamanho das partículas que compõem o material cimentício é importante porque impacta no empacotamento, na reologia e no caso de materiais reativos, como o cimento e materiais pozolânicos, na sua reatividade (SANTOS; NETO; RIBEIRO, 2021). Em relação aos materiais cimentícios suplementares, a utilização de um filer inerte ajuda na redução dos vazios entre as partículas de cimento e no seu consumo (CAMPOS; KLEIN; MARQUES FILHO, 2020) como também o uso de sílica ativa, melhorando o empacotamento da mistura (JIANG et al., 2017).

O conceito de volume ideal de pasta adotado por Campos, Klein e Marques Filho (2020) na dosagem de concretos consiste em determinar o menor volume necessário para encher os vazios dos agregados empacotados adicionando ademais um excesso de pasta, conseguindo assim a trabalhabilidade necessária e a maior eficiência em relação às emissões de CO₂/MPa aos 28 dias. Para isso, eles iniciaram com um excesso de pasta de 2% em volume e testaram os concretos variando o excesso de pasta a cada 2%, chegando

até 8%. Eles encontraram que o concreto com excesso de 6% de pasta em volume resultou com as menores emissões de CO₂/MPa aos 28 dias, as maiores resistências à compressão e uma alta trabalhabilidade.

Em relação ao concreto, a determinação da densidade de empacotamento dos agregados pode ser obtida a partir do índice de vazios, mas para os materiais finos não é recomendada a utilização deste método devido a sua sensibilidade à presença de água e aditivos, e à energia de compactação (CAMPOS; KLEIN; MARQUES FILHO, 2020).

As partículas com dimensões menores que 125 µm tendem-se a aglomerar, devido às forças de Van der Waals e forças eletrostáticas que são mais dominantes do que as forças gravitacionais (FENNIS; WALRAVEN; DEN UIJL, 2013a; VAN DER PUTTEN et al., 2017; MEHDIPOUR; KHAYAT, 2018), o que diminui sua densidade de empacotamento (MEHDIPOUR; KHAYAT, 2018). Neste sentido por exemplo, Wong e Kwan (2008) desenvolveram o método de empacotamento úmido (*wet packing method*) que permite determinar a densidade de empacotamento de materiais finos. Outro método é o desenvolvido por De Larrard (1999) denominado demanda de água, que consiste em determinar a quantidade de água necessária para encher os vazios do material granular mais um excesso de água para produzir um leve afastamento entre os grãos, tornando-a fluida (FORMAGINI, 2005).

Na Tabela 4, pode-se observar a utilização do modelo de empacotamento compressível de partículas em trabalhos para o proporcionamento de pastas, argamassas e concretos nos últimos anos.

Tabela 4 – Exemplos de utilização do modelo de empacotamento compressível para proporcionamento de pastas, argamassas e concretos nos últimos anos

| Autor | Aplicação |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| Amario et al. (2017) | Concreto com agregados reciclados |
| Pradhan, Kumar e Barai (2017) | Concreto com agregados reciclados |
| Van Der Putten et al. (2017) | Concreto de ultra alto desempenho |
| Arora et al. (2019) | Concreto de ultra alto desempenho |
| Campos et al. (2019) | Pasta |
| Hettiarachchi e Mamppearachchi (2019) | Concreto para paver |
| Campos, Klein e Marques Filho (2020) | Concreto de alta resistência |
| Marchetti et al. (2020) | Pasta e argamassa |
| Puente de Andrade et al. (2020) | Concreto com agregados reciclados |
| Guo et al. (2021) | Pasta de rejeito superfino |
| Karadumpa e Pancharathi (2021a) | Argamassa |
| Karadumpa e Pancharathi (2021b) | Concreto de compósitos cimentícios |
| Li, Huang L. e Huang S. (2021) | Concreto de ultra alto desempenho |
| Peng et al. (2021) | Pasta |
| Rampanelli (2021) | Argamassa de reparo |
| Wei et al. (2021) | Compósito cimentício leve |

O empacotamento de partículas, e especificamente o modelo de empacotamento compressível está sendo utilizado nos últimos anos em pastas, argamassas e concretos para melhorar as propriedades deles ou para desenvolver materiais mais ecológicos, o que traz benefícios econômicos ao diminuir a quantidade de pasta e em consequência a quantidade de aglomerante.

2.5 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DESEJADAS EM ARGAMASSAS DE PROJEÇÃO PARA O REPARO DE ESTRUTURAS HIDRÁULICAS ERODIDAS

Na Tabela 5 foram resumidas, com base na revisão bibliográfica apresentada, as principais propriedades físicas e mecânicas que as argamassas de projeção cimentícias destinadas ao reparo superficial de estruturas hidráulicas de concreto erodidas devem cumprir para se comportar satisfatoriamente na fase de uso.

Tabela 5 – Principais propriedades físicas e mecânicas desejadas nas argamassas de projeção para reparo superficial de estruturas hidráulicas de concreto erodidas

| Propriedade | Requisito |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Resistência à compressão | $R \geq S$ $\geq 40 \text{ MPa}$ |
| Resistência à tração | $R \geq S$ |
| Resistência de aderência à tração | $R > S$ $\geq 1,0 \text{ MPa}$ |
| Retração | $R < S$ |
| Módulo de elasticidade | $R \approx S$ |
| Resistência à abrasão hidráulica | $R > S$ |
| Variações dimensionais térmicas | $R \approx S$ |
| Trabalhabilidade do reparo | 50-80 mm* |
| | 40-70 mm* |
| | $260 \pm 15 \text{ mm}^{**}$ |
| Bombeabilidade do reparo | Elevada coesão |
| | Fluidez adequada |
| Projetabilidade do reparo | Adesão ao substrato |
| | Espessura da camada |
| | Baixa reflexão |

R: Reparo; S: Substrato; *Slump; **Índice de consistência.

A partir do exposto no capítulo, pode-se concluir que existem lacunas em relação às argamassas de projeção dosadas pelo modelo de empacotamento compressível e utilizadas para reparo superficial de estruturas hidráulicas de concreto erodidas. Na

argamassa de projeção as propriedades reológicas para o bombeamento e a projeção são muito importantes e para sua utilização como material de reparo devem cumprir ademais com alguns requisitos específicos, por exemplo: baixa retração, elevada aderência ao substrato e alta resistência ao desgaste. Para isso, o proporcionamento pelo método de empacotamento compressível se mostra promissor, pois se conseguem argamassas com baixo conteúdo de aglomerante e com alta compacidade sem perder a trabalhabilidade necessária. No seguinte capítulo serão abordados os materiais e métodos utilizados na pesquisa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas as variáveis de resposta incluindo as etapas do programa experimental, os materiais que foram empregados e suas caracterizações, bem como os equipamentos utilizados. Além disso, são descritos: o teste piloto, a caracterização e a preparação do substrato, o proporcionamento das argamassas, a caracterização das argamassas de projeção, e finalmente, a análise estatística.

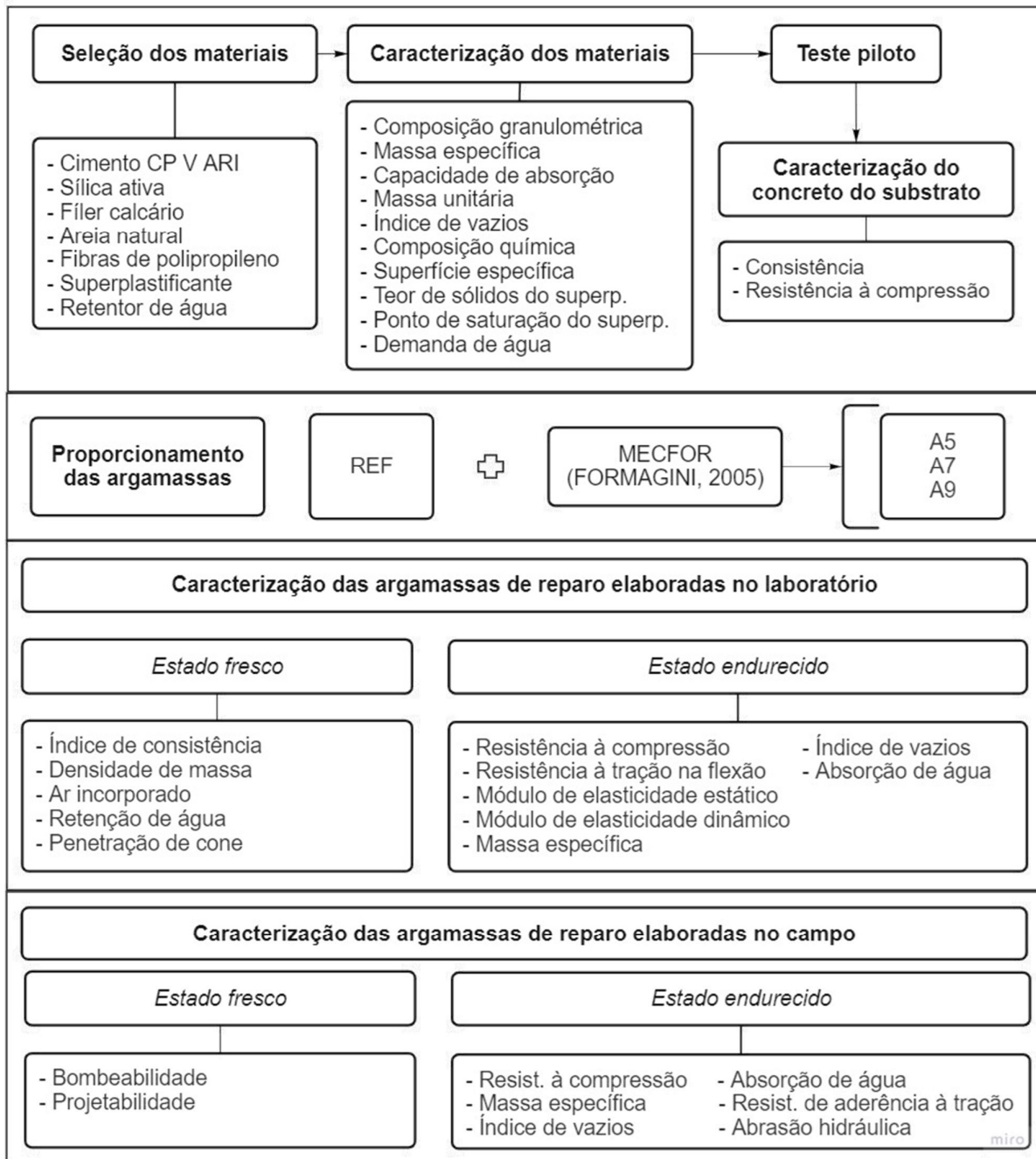
3.1 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA

As variáveis de resposta da pesquisa são os parâmetros de bombeabilidade e de projetabilidade das argamassas de projeção, e as principais propriedades físicas e mecânicas das argamassas para reparo superficial de estruturas hidráulicas de concreto erodidas.

A bombeabilidade e a projetabilidade foram avaliadas de maneira qualitativa em um teste de campo nas instalações de uma indústria. Já a caracterização das argamassas de reparo foi efetuada quantitativamente em argamassas feitas tanto em laboratório quanto em campo. Deste modo, o fator controlável que compõe o programa experimental da pesquisa é o teor de excesso de volume de pasta em relação aos vazios do agregado em estado solto.

Em atendimento às variáveis de resposta, o programa experimental está composto das etapas mostradas no fluxograma da Figura 2. A primeira etapa corresponde aos processos para a seleção e a caracterização dos materiais, o teste piloto, como também a caracterização do substrato. Já na segunda etapa trata-se do proporcionamento das argamassas, na terceira etapa é efetuada a caracterização das argamassas de reparo elaboradas no laboratório e na quarta etapa é tratada a caracterização das argamassas de reparo elaboradas no campo.

Figura 2 – Fluxograma do programa experimental



Fonte: A autora.

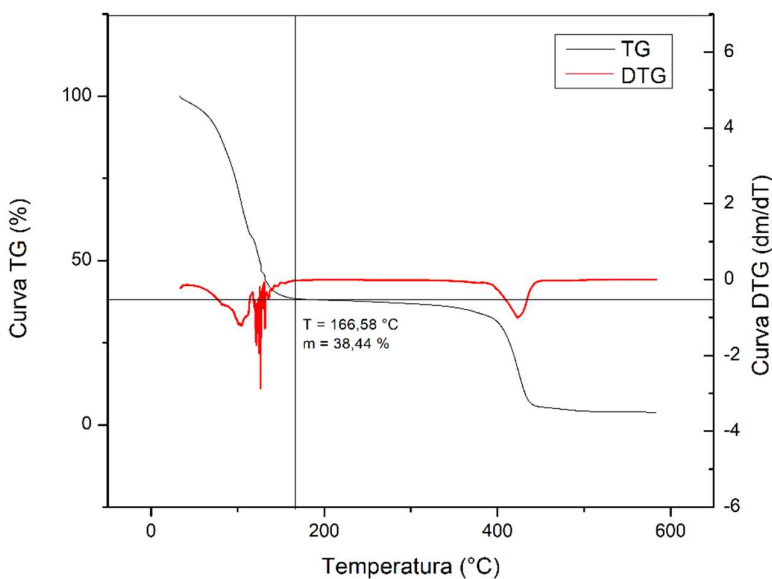
3.2 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesta seção, são descritos os materiais utilizados e sua caracterização para o proporcionamento pelo método de empacotamento compressível de partículas.

3.2.1 Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante utilizado foi um aditivo redutor de água tipo 2 – RA2 de alto desempenho à base de policarboxilatos, com massa específica de $1,09 \text{ g/cm}^3$ (MC-BAUCHEMIE, 2022). O teor de sólidos do aditivo superplastificante foi determinado através de análise termogravimétrica desenvolvida no equipamento Percking Elmer – STA 8000. Conforme a Figura 3, a primeira perda de massa é de aproximadamente 62%, que corresponde à volatilização da parte líquida do aditivo, sendo 38% aproximadamente o teor de sólidos do aditivo superplastificante. Este dado foi utilizado para determinar o ponto de saturação do aditivo para os distintos materiais finos.

Figura 3 – Determinação do teor de sólidos do aditivo superplastificante



3.2.2 Cimento e adições minerais

O cimento utilizado foi o CP V ARI em conformidade à NBR 16697 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018b). Ele foi escolhido por

apresentar a menor quantidade de adições. As adições utilizadas nas argamassas foram o fíler calcário e a sílica ativa. Estas adições foram escolhidas para diminuir a quantidade de cimento e atingir uma maior densidade de empacotamento dos finos, além de proporcionar maior coesão para ajudar nos processos de bombeamento e de projeção. Para todos estes materiais foi determinada a massa específica pela NBR 16605 (ABNT, 2017) e a superfície específica BET pela ISO 9277 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2010), este último ensaio foi feito em um equipamento da marca Quantachrome, modelo NOVA 3200e, os resultados dos dois ensaios podem ser observados na Tabela 6. Já na Tabela 7 encontra-se a composição química destes materiais que foi feita por espectrometria de fluorescência de Raios X (FRX).

Tabela 6 – Massa específica e superfície específica do cimento e das adições

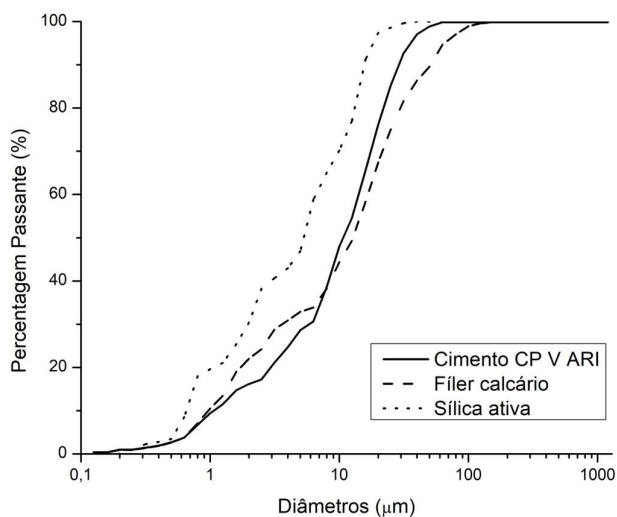
| Propriedade | | CP V ARI | Fíler calcário | Sílica ativa |
|-----------------------------|--------------------|----------|----------------|--------------|
| Massa específica | g/cm ³ | 3,11 | 2,77 | 2,24 |
| Superfície específica (BET) | m ² /kg | 3263 | 3593 | 18342 |

Tabela 7 – Espectrometria de fluorescência de Raios X do cimento, das adições e da areia natural

| Óxidos (%) | CPV ARI | Fíler calcário | Sílica ativa | Areia natural |
|--------------------------------|---------|----------------|--------------|---------------|
| CaO | 59,12 | 45,67 | 1,53 | <LQ |
| SiO ₂ | 18,18 | 6,71 | 92,50 | 97,91 |
| MgO | 5,94 | 4,53 | 0,59 | <LQ |
| Al ₂ O ₃ | 4,38 | 1,50 | 0,31 | <LQ |
| SO ₃ | 2,24 | 0,15 | 0,19 | 0,23 |
| Fe ₂ O ₃ | 2,19 | 0,44 | 0,19 | 0,75 |
| K ₂ O | 0,87 | 0,26 | 1,91 | 0,59 |
| TiO ₂ | 0,31 | <LQ | - | 0,14 |
| Na ₂ O | 0,15 | <LQ | 0,33 | 0,13 |
| MnO | <LQ | <LQ | 0,06 | <LQ |
| P ₂ O ₅ | <LQ | <LQ | 0,21 | <LQ |
| P.F. | 6,51 | 40,62 | 1,98 | 0,25 |
| Soma | 99,90 | 99,88 | 99,80 | 100,00 |

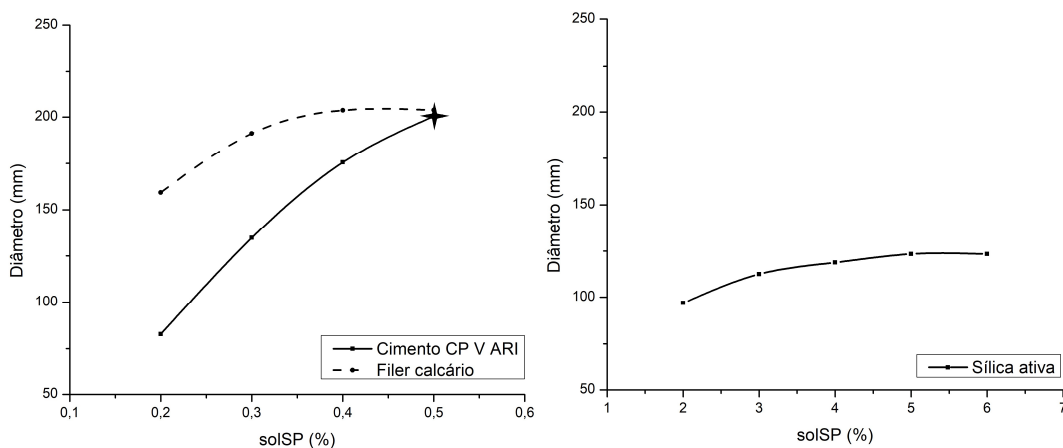
P.F. = Perda ao fogo; (<LQ) = Abaixo do limite quantificável.

As composições granulométricas destes materiais foram determinadas por granulometria por difração à laser pela ISO 13320 (ISO, 2020), no equipamento CILAS 1190, em meio líquido com previa dispersão no ultrassom do equipamento por 60 s. Tendo em vista a tendência de aglomeração da sílica ativa, antes do ensaio de granulometria a amostra foi submetida a um banho de ultrassom por 6 h. Os diâmetros correspondentes ao 50% da curva foram 11,71 µm para o cimento, 13,25 µm para o fíler calcário e 3,01 µm para a sílica ativa, como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Curvas granulométricas do cimento e das adições

Fonte: A autora.

Antes de realizar o ensaio de demanda de água, foi determinado o ponto de saturação do aditivo superplastificante nas pastas de cimento, filer calcário e sílica ativa conforme o método de Kantro (1980) e os valores de água/material sólido foram selecionados conforme Formagini (2005). As curvas estão apresentadas na Figura 5, enquanto as quantidades de cada material com os diâmetros medidos, encontram-se na Tabela 23 do Apêndice A.

Figura 5 – Curvas de ponto de saturação do aditivo nas pastas de cimento e das adições

★ 0,5% de solSP provocou exsudação na pasta de cimento.

Fonte: A autora.

O ponto de saturação do aditivo corresponde ao teor de aditivo para o qual o espalhamento da pasta deixa de aumentar de diâmetro ou apresenta exsudação para um teor maior. Para as pastas de cimento e de fíler calcário, o ponto de saturação correspondeu uma dosagem de 0,4% de teor de sólidos do aditivo em relação à massa do material, sendo que uma dosagem maior de aditivo nas pastas de fíler calcário não promoveu mudanças no diâmetro e nas pastas de cimento provocou exsudação. Para a pasta de sílica ativa o ponto de saturação foi de 5,0%. Estes valores foram semelhantes aos obtidos por Formagini (2005) e Rampanelli (2021).

Com os valores dos teores de saturação do aditivo foram determinadas as compacidades reais de cada material pelo método de demanda de água desenvolvido por De Larrard (1999) para um índice de compactação $K=6,7$ e seguindo o protocolo de mistura descrito em Formagini (2005) em um misturador de bancada. A compacidades reais do cimento, fíler calcário e sílica ativa resultaram em 0,596; 0,658 e 0,374, respectivamente.

3.2.3 Areia natural

A areia natural empregada nesta pesquisa foi de jazidas do Rio Paraná, da região do município de Santa Terezinha de Itaipu, sendo ela de origem quartzosa. Com o intuito de caracterizá-la e de obter os dados para o proporcionamento pelo método de empacotamento compressível, foi determinado o teor de material pulverulento pela NBR 16973 (ABNT, 2021e), e a densidade e a capacidade de absorção pela NBR 16916 (ABNT, 2021c), cujos resultados estão apresentados na Tabela 8. Também foi determinada a composição química por espectrometria de fluorescência de Raios X (FRX) que pode ser observada na Tabela 6.

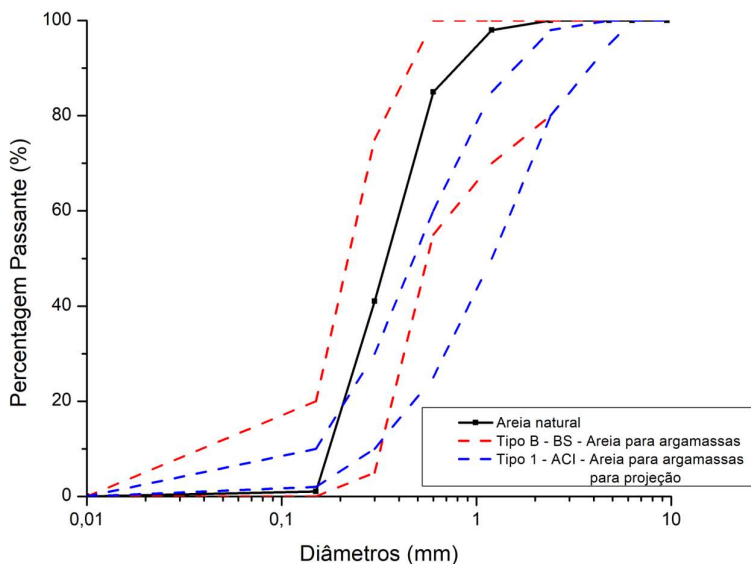
Tabela 8 – Teor de material pulverulento, densidade e capacidade de absorção da areia natural

| Material | Teor de material pulverulento (%) | Densidade (g/cm³) | Capacidade de absorção (%) |
|-----------------|--|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Areia natural | 0,3 | 2,65 | 0,1 |

A composição granulométrica da areia foi determinada pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). Na Figura 6 foram colocadas além da curva granulométrica da areia natural, as curvas da faixa B da norma BS 1199 (BRITISH STANDARD, 1976) para agregado de argamassas e a faixa da graduação 1 da ACI Committee 506 (2005) para argamassas de

projeção. Pode-se observar que a granulometria da areia natural se ajusta perfeitamente à faixa tipo B da norma BS 1199 (BS, 1976) e parcialmente à faixa tipo 1 da ACI Committee 506 (2005), tendo uma dimensão máxima característica de 1,18 mm e módulo de finura de 1,75.

Figura 6 – Curva granulométrica da areia natural



Fonte: A autora.

Por outro lado, foram determinadas a massa unitária e o índice de vazios no estado solto pela NBR 16972 (ABNT, 2021d) que resultaram em 1530 kg/m^3 e 42%, respectivamente. Com o valor do índice de vazios pode ser calculada a compacidade real, que corresponde ao complemento do índice de vazios para um volume determinado. Desse modo, a compacidade real da areia no estado solto resultou em 0,577 para um índice de compactação $K = 4,1$ correspondente ao lançamento simples do agregado. Já para o índice de compactação $K = 9$, foi adotada a compacidade utilizada por Rampanelli (2021) correspondente a 0,627 devido à falta dos equipamentos necessários para determinar a compacidade real para esse índice de compactação.

3.2.4 Fibra e aditivo retentor de água

As fibras utilizadas na pesquisa foram microfibras de polipropileno de 12mm de comprimento e o aditivo retentor de água foi um aditivo à base de hidroxietil metil celulose. A fibra foi utilizada principalmente para ajudar no controle da fissuração pela

retração plástica e o retentor de água para manter a coesão durante o bombeamento e a projeção. Na Tabela 9 são apresentadas as propriedades destes materiais.

Tabela 9 – Propriedades da fibra e do aditivo retentor de água

| Fibra de polipropileno¹ | |
|---|---------------------------|
| Composição | Polipropileno 100% virgem |
| Densidade (kg/m ³) | 0,91 |
| Tipo de fibra | Monofilamento |
| Ponto de fulgor (°C) | 330 |
| Condutividade térmica e elétrica | Baixa |
| Absorção de água | Desprezível |
| Resistência aos álcalis e ácidos | Excelente |
| Cor | Branca |
| Aditivo retentor de água² | |
| Forma e cor | Pó branco |
| Solubilidade | Solúvel em água |
| Viscosidade (mPa.s) | 50000 |
| pH | Neutro |
| Umidade (%) | Máximo 7% |

Fontes: ¹(VIAPOL, 2016); ²(DOW CHEMICAL COMPANY, 2020).

3.3 TESTE PILOTO

No teste piloto foi utilizada como mistura de referência a 350P0 desenvolvida por Rampanelli (2021), a qual possui o proporcionamento mostrado na Tabela 10. Esta mistura de argamassa foi dosada por meio da teoria de empacotamento de partículas, para sua utilização como reparo superficial de estruturas hidráulicas erodidas, e com aplicação manual ao substrato. Esta argamassa foi escolhida para utilizar como argamassa de referência pelos resultados satisfatórios obtidos na pesquisa do autor e pelo baixo conteúdo de cimento.

Tabela 10 – Proporcionamento da mistura para o teste piloto

| Mistura | Cimento CPV ARI (kg/m ³) | Sílica ativa (kg/m ³) | Fíler calcário (kg/m ³) | Areia natural (kg/m ³) | Água (kg/m ³) | Fibras Polipropileno (kg/m ³) |
|---------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|---|
| 350P0 | 350 | 70 | 128 | 1570 | 211 | 1,40 |

Fonte: Rampanelli (2021).

O objetivo inicial deste teste piloto foi o de variar o conteúdo de aditivo superplastificante para obter três argamassas que fiquem dentro da faixa do índice de consistência de 260 ± 15 mm utilizada por Mello (2018) para argamassas de projeção, uma

delas perto do limite inferior, outra do meio e a última perto do limite superior, para posteriormente determinar a resistência à compressão aos 28 dias em cada uma das três argamassas e compará-las com os resultados obtidos pelo autor para a mesma argamassa onde foi adotado um índice de consistência de 240 ± 10 mm.

A argamassa foi misturada em um misturador de bancada, conforme o procedimento de mistura utilizado por Yu et al. (2014), cujo mesmo consiste em colocar no recipiente do misturador todos os finos junto com a areia e misturá-los por 30 segundos em rotação lenta; após isso, agregar aproximadamente 80% da água de mistura e misturá-los por 90 segundos em rotação lenta e logo desligar o misturador por 30 segundos; depois, adicionar o restante de água junto com o aditivo superplastificante e as fibras, e misturá-los primeiramente por 180 segundos em rotação lenta e logo 120 segundos em rotação rápida.

Após a mistura da argamassa, foi determinado o índice de consistência pela NBR 13276 (ABNT, 2016). Cabe ressaltar que os materiais utilizados não foram os definitivos da pesquisa. A areia utilizada inicialmente foi muito fina, tendo um módulo de finura de 1,43 e dimensão máxima de 1,18 mm, o que não permitiu atingir os índices de consistência desejados nem com o máximo teor de aditivo especificado pelo fabricante. Então, procedeu-se à composição da areia natural de maneira que tenha o mesmo módulo de finura e dimensão máxima da areia utilizada por Rampanelli (2021), que resultaram em 2,11 e 2,4 mm, respectivamente. Desse modo, foram repetidos os ensaios conseguindo assim os índices de consistência desejados.

Na sequência, foram moldados 4 corpos de prova de $\Phi 50 \times 100$ mm para a argamassa com areia natural com o máximo teor de aditivo, e para as três consistências com a areia composta. Os corpos de prova foram ensaiados à compressão simples conforme prescrito pela NBR 5739 (ABNT, 2018a) aos 28 dias após ficar em cura por imersão até a idade de ensaio.

Na Tabela 11 podem ser visualizados os índices de consistência (IC) e as resistências à compressão (fc) para cada argamassa testada.

Tabela 11 – Índice de consistência e resistência à compressão aos 28 dias das argamassas do teste piloto

| Mistura | Areia utilizada | Módulo de finura | Consumo de aditivo superplastificante* (%) | IC (mm) | fc aos 28 dias (MPa) | |
|---------|------------------------|------------------|--|---------|----------------------|--------|
| | | | | | Média | Desvio |
| 350P0 | Granulometria original | 1,43 | 5,0 | 230 | 49,2 | 1,65 |
| | Granulometria composta | | 1,9 | 246 | 59,7 | 2,89 |
| | Granulometria composta | 2,11 | 2,2 | 264 | 64,7 | 1,32 |
| | Granulometria composta | | 3,0 | 272 | 55,6 | 1,26 |

* Sobre a massa do aglomerante; IC: índice de consistência; fc: resistência à compressão simples.

As argamassas com o índice de consistência de 230 mm e 246 mm ficaram dentro da faixa de consistência utilizada por Rampanelli (2021) que foi de 240 ± 10 mm. Com o índice de consistência de 242 mm o autor atingiu 57,2 MPa aos 28 dias de idade para esta mistura e comparado aos resultados obtidos para as argamassas neste teste piloto dentro da mesma faixa, os resultados ficaram próximos.

Como pode ser observado na Tabela 11, a finura da areia é um fator que influencia na consistência, no consumo de aditivo e na resistência à compressão, demonstrando a necessidade de combinar distintos tamanhos de grãos de agregados para melhorar sua estrutura granular e assim atingir argamassas com a consistência desejada sem utilizar uma quantidade excessiva de aditivo e, além disso, aumentar a resistência à compressão.

Por outro lado, a mistura utilizada no teste piloto indicou, pela dificuldade em atingir o índice de consistência desejado, que possivelmente não seria possível efetuar a projeção da argamassa, provavelmente devido ao pouco conteúdo de pasta, que ficou em torno ao 0% de excesso de volume em relação ao volume de vazios dos agregados em estado solto, calculado de forma teórica com os dados referenciais. Conclui-se que para a mistura de referência na pesquisa terá que ser utilizada uma mistura com maior excesso de volume de pasta.

Nesse sentido, foi selecionada como mistura de referência a 400P0 de Rampanelli (2021), que possui aproximadamente 4% de excesso de volume de pasta com os materiais da pesquisa atual.

3.4 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO

Nesta seção apresentam-se a preparação das placas de concreto do substrato para a aplicação das argamassas de reparo e sua caracterização em estado fresco e endurecido.

O substrato foi feito com uma mistura de concreto convencional dosado em uma central dosadora de concreto, com resistência à compressão de 40 MPa aos 28 dias ($f_{ck} = 30$ MPa) e desvio padrão de 3,5 MPa de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018a), e abatimento de 200 ± 10 mm conforme a NBR 16889 (ABNT, 2020). Os materiais componentes do concreto foram cimento CP II F - 40, areia natural, pó de pedra, brita 1, brita 0, aditivo superplastificante e água. A resistência à compressão deste concreto foi selecionada com base na norma NBR 6118 (ABNT, 2014) para concreto armado e classe

de agressividade ambiental III (forte) com risco grande de deterioração da estrutura.

Para a aplicação das argamassas no substrato, foram confeccionadas placas retangulares com dimensões de 350 x 450 x 90 mm e placas circulares de 300 mm de diâmetro e 80 mm de altura. A totalidade das placas foram moldadas em uma camada e em dois dias distintos por conta quantidade de fôrmas, permaneceram nas fôrmas as primeiras 24 h com exposição ao ar, cobertas e protegidas com plástico. Após o desmolde, foram conduzidas à cura por imersão em água durante 28 dias.

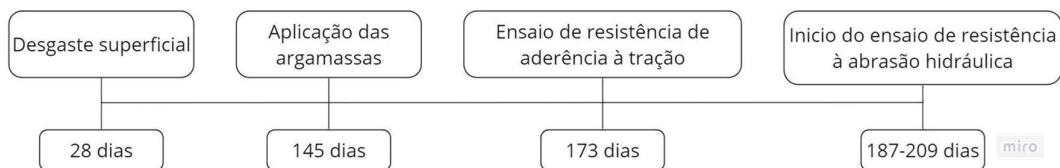
Aos 28 dias foi executado o desgaste superficial por meio de jato de areia para simular uma estrutura hidráulica erodida, ficando armazenadas ao ar sob teto (Figura 7) até 72 h antes da aplicação das argamassas. Após, foram imersas em água para conseguir saturá-las. No dia da aplicação das argamassas, elas foram limpas com água e escova de aço, colocadas nos moldes novamente e deixadas em estado saturado superfície seca para receber as argamassas.

Figura 7 – Armazenamento ao ar das placas após o desgaste por jato de areia



Fonte: A autora.

Após o desgaste com jato de areia, as placas ficaram com dimensões aproximadas de 350 x 450 x 80 mm (retangulares) e $\Phi 300$ x 70 mm (circulares). As placas retangulares serviram para executar o ensaio de resistência de aderência à tração e as placas circulares ao ensaio de perda de massa por abrasão hidráulica, dimensões similares às utilizadas por Rampanelli (2021) para ditos ensaios. Na Figura 8, são apresentadas as idades aproximadas das placas nos distintos ensaios.

Figura 8 – Idade aproximada das placas nos distintos ensaios

Fonte: A autora.

3.5 PROPORCIONAMENTO DAS ARGAMASSAS DE PROJEÇÃO

As misturas proporcionadas neste trabalho foram feitas por meio do simulador MECFOR desenvolvido por Formagini (2005). No Anexo A podem ser conferidos os passos para inserir os parâmetros de entrada para a obtenção da mistura otimizada. Várias misturas foram feitas no simulador até conseguir que sejam cumpridos simultaneamente os fatores da Tabela 12.

Tabela 12 – Fatores cumpridos simultaneamente no proporcionamento das argamassas

| Fator | Valor | Justificativa |
|-----------------------------|----------------------------|---|
| Relação água/aglomerante | 0,50 em massa | Iguais às utilizadas por Rampanelli (2021) |
| Relação água/finos | 0,39 em massa | |
| Cimento | 400-450 kg/m ³ | Faixa recomendada na Tabela 2 |
| Silica ativa | 10-20% da massa do cimento | Similar às faixas obtidas por Rampanelli (2021) |
| Fíler calcário | 30-40% da massa do cimento | |
| Volumes de excesso de pasta | 5%, 7% e 9% | Para ficar perto de 6% e ir aumentando a cada 2%, de acordo com a revisão bibliográfica |

Deste modo, foram proporcionadas as argamassas A5, A7 e A9 contendo 5%, 7% e 9% de excesso de volume de pasta em relação ao volume de vazios da areia em estado solto, respectivamente.

Para o cálculo do excesso de volume de pasta determinou-se primeiramente o volume absoluto de pasta com a equação (3.1).

$$V_p = V_c + V_s + V_f + V_a \quad (3.1)$$

Onde, V_p é o volume de pasta em m³, V_c é o volume de cimento em m³, V_s é o volume de sílica ativa em m³, V_f é o volume de fíler calcário em m³ e V_a é o volume de água em m³.

Seguidamente, foi calculado o excesso de volume de pasta em relação ao volume de vazios da areia em estado solto com a equação (3.2).

$$E_p = \frac{V_p - E_v}{E_v} \times 100 \quad (3.2)$$

Onde, E_p é o excesso de volume de pasta em relação aos vazios da areia em estado solto em %, V_p é o volume de pasta em m^3 e E_v é o volume de vazios da areia em estado solto em m^3 .

Além disso, nestas misturas, o índice de consistência adotado foi de 260 ± 15 mm utilizado por Mello (2018) para as argamassas de projeção e para a argamassa de referência foi mantido o índice de consistência de 240 ± 10 mm adotado por Rampanelli (2021) para aplicação manual. O teor de fibras foi mantido em 0,4% da massa do cimento, que foi o teor utilizado por Rampanelli (2021) na argamassa 400P0. Por último, o teor de aditivo retentor de água foi de 0,05% da massa do aglomerante para as argamassas de projeção, valor obtido logo de realizar testes de espalhamento pelo método de Kantro (1980) em pastas de cimento contendo aditivo superplastificante no teor de saturação.

Na Tabela 13 podem-se observar as misturas proporcionadas pelo MECFOR atendendo os requisitos descritos e a mistura de referência REF.

Tabela 13 – Misturas proporcionadas no trabalho

| Misturas | Excesso de pasta (%) | Cimento (kg/m ³) | Silica (kg/m ³) | Filer (kg/m ³) | Areia (kg/m ³) | Água (kg/m ³) | Fibras (kg/m ³) | Aditivo ³ (%) | Aglomerantes (kg/m ³) | Finos (kg/m ³) | Compacidade |
|--------------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------------|----------------------------|--------------------|
| REF (400P0) ¹ | 4 ² | 400 | 59 | 139 | 1525 | 231 | 1,60 | 0,4 | 459 | 598 | 0,765 ¹ |
| A5 | 5 | 416 | 54 | 133 | 1533 | 235 | 1,66 | 0,8 | 470 | 603 | 0,762 |
| A7 | 7 | 414 | 66 | 132 | 1511 | 239 | 1,66 | 0,8 | 480 | 612 | 0,758 |
| A9 | 9 | 411 | 78 | 132 | 1488 | 243 | 1,64 | 0,7 | 489 | 621 | 0,754 |

¹Rampanelli (2021); ²Com os materiais da pesquisa atual; ³(massa de sólidos do aditivo superplastificante/massa do aglomerante)x100; REF: Argamassa de referência; A5: Argamassa com 5% de excesso de volume de pasta; A7: Argamassa com 7% de excesso de volume de pasta; A9: Argamassa com 9% de excesso de volume de pasta.

3.6 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS DE REPARO

De acordo com a revisão bibliográfica, conseguiu-se constatar que a resistência à compressão, a resistência à tração, o módulo de elasticidade estático, a resistência à aderência à tração e a resistência à abrasão hidráulica são propriedades importantes para garantir o bom desempenho do material de reparo. Nesse sentido, foram avaliadas estas propriedades nas argamassas estudadas. Além disso, foi identificado que

devem ser controladas as propriedades em estado fresco das argamassas de projeção para conseguir o seu bombeamento e projeção no substrato. Para isso, foi avaliada quantitativamente a propriedade de consistência pelo índice de consistência e pela penetração do cone nas argamassas produzidas em laboratório, e qualitativamente as capacidades de bombeamento e de projetabilidade das argamassas.

Outras propriedades que foram avaliadas na argamassa de referência e nas dosadas no trabalho são: densidade de massa, ar incorporado e retenção de água no estado fresco, e módulo de elasticidade dinâmico, massa específica, índice de vazios e conteúdo de ar no estado endurecido.

3.6.1 Mistura das argamassas no laboratório

As bateladas de argamassa produzidas no laboratório tiveram sempre o mesmo volume, as condições ambientais de laboratório foram mantidas constantes dentro do possível, e o protocolo de mistura foi o mesmo utilizado no teste piloto em um misturador de bancada. Imediatamente após a mistura, foram efetuados os ensaios em estado fresco das argamassas e moldados os corpos de prova para os ensaios em estado endurecido.

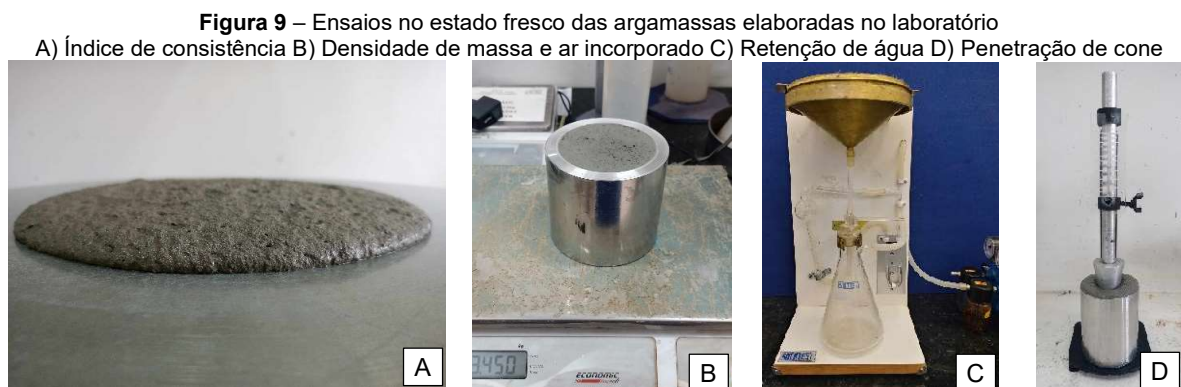
3.6.2 Ensaios no estado fresco das argamassas elaboradas no laboratório

Os ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco elaboradas no laboratório seguem os procedimentos das Normas Brasileiras da ABNT e das Normas Americanas ASTM. Na Tabela 14 podem ser visualizados os ensaios com as normas correspondentes.

Tabela 14 – Ensaios e normas para a caracterização no estado fresco das argamassas elaboradas no laboratório

| Ensaio | Norma |
|-------------------------------------|-------------------------|
| Índice de consistência | NBR 13276 (ABNT, 2016) |
| Densidade de massa e ar incorporado | NBR 13278 (ABNT, 2005c) |
| Retenção de água | NBR 13277 (ABNT, 2005b) |
| Penetração de cone | ASTM C780 (ASTM, 2020) |

Todos os ensaios em estado fresco foram realizados no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) da UNILA com exceção do ensaio de retenção de água que foi executado no Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia (LEME) da UNIOESTE (Figura 9).



Fonte: A autora.

3.6.3 Ensaios no estado endurecido das argamassas elaboradas no laboratório

Na Tabela 15 podem ser visualizados os ensaios com as normas correspondentes ou adaptações destas para a caracterização de todas as argamassas no estado endurecido elaboradas no laboratório, além das idades e quantidades de corpos de prova que foram moldados.

Tabela 15 – Ensaios, normas, idades e CP para a caracterização das argamassas no estado endurecido elaboradas no laboratório

| Ensaio | Norma | Idades (días) | Quantidade de CP por mistura (mm) | Quantidade de CP por ensaio (mm) |
|---|----------------------------|---------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Resistência à tração na flexão e à compressão | NBR 13279 (ABNT, 2005d) | 7, 14 e 28 | 9 CP - 40x40x160 | 36 CP - 40x40x160 |
| Módulo de elasticidade estático | NBR 8522 - 1 (ABNT, 2021a) | 28 | 3 CP - Φ 50x100 | 12 CP - Φ 50x100 |
| Módulo de elasticidade dinâmico | ASTM E1876 (ASTM, 2015) | 14 e 28 | 3 CP - 40x40x160 | 12 CP - 40x40x160 |
| Massa específica, índice de vazios e absorção de água | NBR 9778 (ABNT, 2005a) | 28 | 3 CP - Φ 50x100 | 12 CP - Φ 50x100 |

3.6.3.1 Ensaios de resistência mecânica e módulo de elasticidade estático

Os ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão, e o módulo de elasticidade estático foram feitos no Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu Binacional conforme as normas da Tabela 15.

3.6.3.2 Módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio foi realizado no equipamento da *Sonelastic* do LADEMA da UNILA e seguindo as indicações da norma ASTM E1876 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2015). Quanto à condição de umidade, os três corpos de prova moldados por mistura permaneceram em cura por imersão até 24 horas antes do ensaio aos 14 dias de idade, onde ficaram no ambiente do laboratório até o momento do ensaio (Figura 10), logo eles voltaram à cura por imersão após a medição. O processo foi repetido para a medição aos 28 dias de idade.

Figura 10 – Equipamento de ensaio de módulo de elasticidade dinâmico

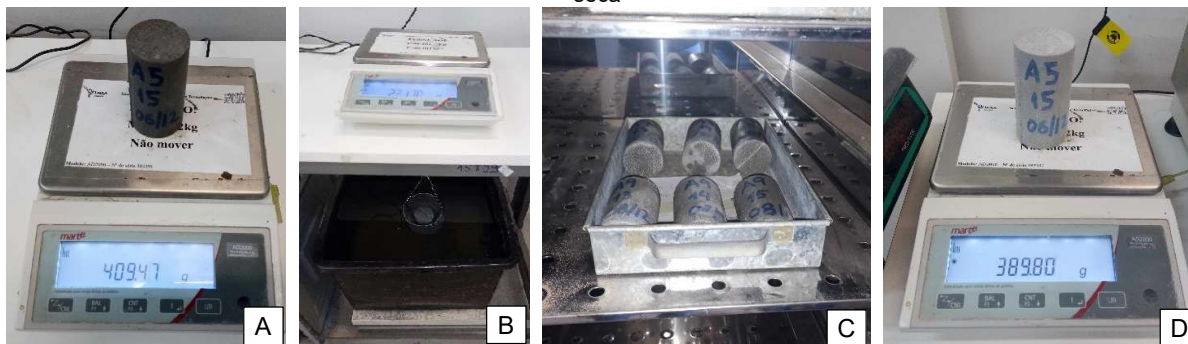


Fonte: A autora.

3.6.3.3 Massa específica, índice de vazios e absorção de água

Os ensaios de massa específica, índice de vazios e absorção de água foram realizados no LADEMA da UNILA. Os corpos de prova foram retirados da cura por imersão para serem determinadas as massas em estado saturado superfície seca e as massas imersas na água, posteriormente foram colocados na estufa à temperatura de 105 ± 5 °C durante 72 h para logo serem medidas as massas secas (Figura 11).

Figura 11 – Procedimentos utilizados no ensaio de massa específica, índice de vazios e absorção de água
 A) Massa saturada superfície seca B) Massa imersa em água C) Secagem dos corpos de prova na estufa D) Massa seca



Fonte: A autora.

3.6.4 Mistura das argamassas e projeção no campo

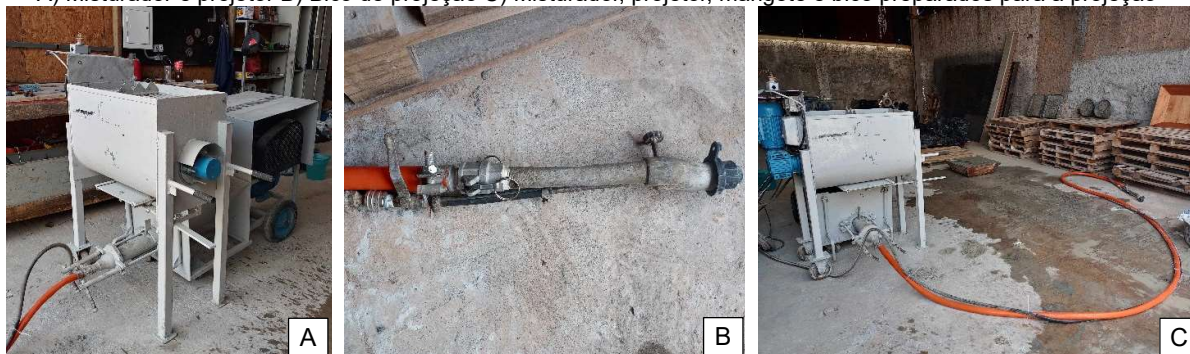
Primeiramente, os materiais secos foram misturados no laboratório em uma betoneira de 400 litros com tampa durante 20 min para logo serem ensacados em sacos de 10 kg (Figura 12). Uma vez transportados às instalações industriais, no dia da projeção foram misturados em cada batelada 6 ou 12 sacos junto com os materiais líquidos por 10 min aproximadamente. O equipamento de mistura e de projeção (Figura 13) foi da marca AnviJet, de eixo helicoidal para projeção por via úmida, com um mangote de 1" (25,4 mm) de diâmetro, bico projetor, e pressão de projeção constante de 50 psi (0,345 MPa ou 3,45 bar).

Figura 12 – Procedimentos empregados na mistura, ensacado e armazenamento dos sacos de argamassa
 A) Preparação de materiais para a mistura B) Colocação dos materiais na betoneira C) Argamassa seca após a mistura D) Armazenamento dos sacos



Fonte: A autora.

Figura 13 – Equipamentos de mistura, de bombeamento e de projeção
 A) Misturador e projetor B) Bico de projeção C) Misturador, projetor, mangote e bico preparados para a projeção



Fonte: A autora.

Antes da projeção no substrato, o mangote foi lubrificado internamente com nata de cimento CPV ARI e projetadas as argamassas numa parede de prova até conseguir um fluxo uniforme. Para cada mistura primeiramente foi testada a projeção nas placas inclinadas 70° aproximadamente com a horizontal à uma altura de 60 cm aproximadamente do chão, dita inclinação foi selecionada com base na norma NBR 13070 (ABNT, 2021b). No caso que a argamassa não ficou aderida ao substrato, as placas foram colocadas na horizontal sobre de pallets e prosseguiu-se com a projeção. Para a argamassa de referência, as placas foram colocadas horizontais sobre pallets e a argamassa foi colocada manualmente.

As argamassas também foram projetadas em fôrmas de madeira confeccionadas de acordo com a NBR 13070 (ABNT, 2021b), colocadas da mesma maneira que as placas de substrato, para a obtenção de placas de argamassa nas quais foram extraídos testemunhos para os ensaios no estado endurecido. Para a argamassa de referência foram confeccionados corpos de prova de $\Phi 50 \times 100$ mm para sua caracterização.

Em todos os casos o bico de projeção ficou perpendicular às placas e às fôrmas, com uma distância à superfície entre 10-20 cm e o sentido de projeção foi da esquerda para direita e de cima para baixo. A aplicação das argamassas no substrato foi em uma camada, com espessuras de aproximadamente 15 mm para as placas retangulares e de 30 mm para as placas circulares após o acabamento. Após a projeção nas placas de substrato e o enchimento das fôrmas para extração de testemunhos, as superfícies foram regularizadas com uma régua metálica para simular o acabamento superficial feito em um reparo superficial de estruturas hidráulicas erodidas, de modo que resista à abrasão hidráulica ao evitar que a água que escorra deslague ou desgaste excessivamente a camada de reparo ao colidir pelas irregularidades da superfície.

Uma vez regularizadas as superfícies, as placas e as fôrmas foram cobertas com plástico por 24 h. Logo, as placas de substrato foram desmoldadas e colocadas em cura por imersão até os 28 dias de idade. Após 72 h do enchimento das fôrmas para a obtenção das placas de argamassa, foram extraídos os testemunhos de argamassas e colocados em cura por imersão até os 28 dias de idade. Na Figura 14 pode-se observar o processo de projeção e de cura.

Figura 14 – Procedimentos empregados na projeção e cura das placas e testemunhos

A) Preparação do substrato e das fôrmas B) Projeção da argamassa no substrato C) Projeção da argamassa nas fôrmas D) Argamassa recém projetada E) Proteção das placas e fôrmas com plástico F) Cura das placas projetadas e os testemunhos



Fonte: A autora.

3.6.5 Ensaio nas argamassas elaboradas no campo

Nas argamassas elaboradas no campo, no estado fresco foram avaliadas a bombeabilidade e a projetabilidade de maneira qualitativa, verificando visualmente se as argamassas não apresentavam segregação durante o bombeamento e se foi possível a adesão ao substrato durante a projeção nas placas inclinadas, dita avaliação visual da adesão inicial foi similar à realizada por Zanelatto et al. (2013). Na Tabela 16 estão elencados os ensaios no estado endurecido com as normas correspondentes, além das idades e quantidades de corpos de prova moldados.

Tabela 16 – Ensaio, normas, idades e CP para a caracterização das argamassas elaboradas no campo

| Ensaio | Norma | Idades (dias) | Quantidade de CP por mistura (mm) | Quantidade de CP por ensaio (mm) |
|---|----------------------------|---------------|---|---|
| Resistência à compressão | NBR 5739 (ABNT, 2018a) | 28 | 6 CP - Φ 50x100* | 6 CP - Φ 50x100* |
| Resistência à compressão em testemunhos | NBR 7680-1 (ABNT, 2015) | 28 | 3 CP - Φ 57x110** | 9 CP - Φ 57x110** |
| Massa específica, índice de vazios e absorção de água | NBR 9778 (ABNT, 2005a) | 28 | 3 CP - Φ 50x100* 3 CP - Φ 57x110** | 3 CP - Φ 50x100* 9 CP - Φ 57x110** |
| Resistência de aderência à tração | NBR 13528 - 2 (ABNT, 2019) | 28 | 22 CP - Φ 50 | 88 CP - Φ 50 |
| Abrasão hidráulica | ASTM C1138 (ASTM, 2019) | 35 e 55 | 2 CP - Φ 300x100 | 8 CP - Φ 300x100 |

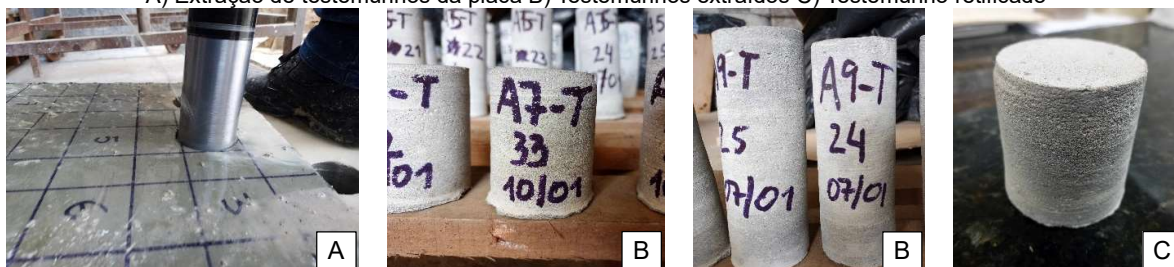
*CP moldados para a argamassa de referência REF; **testemunhos de argamassa projetada, para a argamassa A7 as alturas foram de 70 mm por conta da falta de material para encher as fôrmas.

3.6.5.1 Ensaio de resistência à compressão, massa específica, índice de vazios e absorção de água

Os corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão, massa específica, índice de vazios e absorção de água foram testemunhos extraídos das placas de argamassa de projeção obtidas do enchimento das fôrmas, estes testemunhos foram submetidos ao corte das bases com disco diamantado e posterior retifica (Figura 15). As bases dos corpos de prova moldados para a argamassa de referência foram previamente retificadas antes dos ensaios. O ensaio de resistência à compressão foi executado no Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu Binacional. Já os ensaios de massa específica, índice de vazios e absorção de água foram realizados no LADEMA da UNILA, seguindo os mesmos procedimentos descritos para as argamassas elaboradas no laboratório.

Figura 15 – Extração de testemunhos, corte e retifica

A) Extração de testemunhos da placa B) Testemunhos extraídos C) Testemunho retificado



Fonte: A autora.

3.6.5.2 Resistência de aderência à tração

Para a realização do ensaio de resistência de aderência à tração, de cada placa retangular do substrato foram extraídos 11 corpos de prova perfurados com serra copo aos 28 dias de idade aproximadamente da aplicação das argamassas seguindo as indicações da NBR 13528 - 2 (ABNT, 2019), sendo utilizadas duas placas retangulares para cada mistura estudada (Figura 16) totalizando assim 22 corpos de prova para cada argamassa.

Figura 16 – Procedimentos empregados para o ensaio de resistência de aderência à tração
A) Colagem das pastilhas B) Execução do ensaio C) Placa após o ensaio



Fonte: A autora.

3.6.5.3 Abrasão hidráulica

O ensaio de abrasão hidráulica foi conduzido de acordo com a norma ASTM C1138 (ASTM, 2019) nas placas circulares. Para cada mistura em estudo, foram confeccionados dois corpos de prova, sendo ensaiado um corpo de prova à idade de 35 dias e u outro à idade de 55 dias aproximadamente, e comparados com a argamassa de referência ensaiada à idade de 48 dias. A seleção de duas idades para o ensaio nas argamassas de projeção foi com o intuito de observar se existiu diferença na resistência à abrasão hidráulica com o aumento da idade das argamassas. Foram utilizados três equipamentos distintos e feitas as leituras de perda de massa a cada 24 h durante 72 h (Figura 17).

Figura 17 – Procedimentos empregados no ensaio de perda de massa por abrasão hidráulica
A) Placa circular B) Equipamento de abrasão C) Placa no equipamento antes do ensaio
D) Placa com as esferas no equipamento após o ensaio E) Placa no equipamento após o ensaio
F) Pesagem da placa em estado saturado superfície seca



Fonte: A autora.

3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística foi por meio da análise de variância (ANOVA), empregando o *software R Studio*. O teste de normalidade foi feito pelo teste de Shapiro-Wilk e a comparação entre médias pelo teste de Tukey. O nível de confiabilidade estatística foi de 95%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados e as discussões referentes aos ensaios nas argamassas em estado fresco e endurecido, tanto as elaboradas no laboratório bem como as elaboradas nos ensaios de campo. As tabelas de resultados dos ensaios e da análise estatística encontram-se nos Apêndices A e B respectivamente.

4.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO DAS ARGAMASSAS ELABORADAS NO LABORATÓRIO

4.1.1 Índice de consistência, densidade de massa, ar incorporado, retenção de água e penetração de cone

Na Tabela 17 são apresentados os resultados dos ensaios em estado fresco das argamassas elaboradas no laboratório antes da projeção. Com os resultados de densidade de massa foram obtidos os consumos de materiais para cada argamassa elaborada no laboratório (Tabela 18).

Tabela 17 – Propriedades no estado fresco das argamassas elaboradas no laboratório

| Argamassas | Índice de consistência (mm) | Densidade de massa (kg/m ³) | Ar incorporado (%) | Retenção de água (%) | Penetração de cone (mm) |
|------------|-----------------------------|---|--------------------|----------------------|-------------------------|
| REF | 232 | 2093 | 10 | 95 | 27 |
| A5 | 250 | 2151 | 7 | 96 | 46 |
| A7 | 254 | 2153 | 7 | 96 | 46 |
| A9 | 251 | 2120 | 8 | 96 | 42 |

Tabela 18 – Consumo de materiais nas argamassas elaboradas no laboratório

| Argamassas | Consumo de aditivo superp. (%) [*] | Cimento CPV ARI (kg/m ³) | Silica ativa (kg/m ³) | Filer calcário (kg/m ³) | Areia natural (kg/m ³) | Água (kg/m ³) | Fibras de polip. (kg/m ³) |
|------------|---|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| REF | 0,45 | 355 | 53 | 124 | 1353 | 206 | 1,42 |
| A5 | 0,89 | 376 | 49 | 120 | 1387 | 211 | 1,50 |
| A7 | 0,88 | 376 | 60 | 120 | 1372 | 218 | 1,50 |
| A9 | 0,78 | 369 | 70 | 118 | 1336 | 218 | 1,48 |

^{*}(massa de sólidos do aditivo superplastificante/massa do aglomerante)x100.

Nos resultados é observado que o consumo de aditivo superplastificante é maior para as argamassas de projeção em relação à argamassa de referência devido ao maior índice de consistência requerido. Entre as argamassas de projeção, à medida que aumenta o conteúdo de pasta é requerida menor quantidade de aditivo superplastificante para um índice de consistência determinado, evidenciando que, neste caso, quanto maior o conteúdo de pasta promove menor resistência ao fluxo da argamassa.

Em relação à densidade de massa e ao consumo dos materiais da argamassa de referência existe diferença com os valores obtidos por Rampanelli (2021), fato que pode ser causado pela utilização de materiais de diferentes lotes e/ou região aos utilizados pelo autor.

Aumentando-se os consumos de sílica ativa e de água diminuem as densidades de massa, como pode ser observado na argamassa A9 em relação às outras argamassas de projeção. Além disso, entre às argamassas de referência e às de projeção, pode-se observar que quanto maior o teor de aditivo superplastificante maior a penetração de cone e menor a percentagem de ar incorporado, podendo-se inferir que o aditivo ajuda na trabalhabilidade melhorando a compactação da argamassa e diminui a tensão de escoamento, de modo que o cone penetra com maior facilidade nas argamassas. Finalmente, a retenção de água nas argamassas manteve-se quase constante.

4.2 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO NAS ARGAMASSAS ELABORADAS NO LABORATÓRIO

4.2.1 Resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados da resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias das argamassas elaboradas no laboratório podem ser observados na Tabela 19. Os resultados individuais das resistências à compressão e as resistências à tração na flexão aos 7, 14 e 28 dias, o módulo de elasticidade estático aos 28 dias e os módulos de elasticidade dinâmicos aos 14 e 28 dias encontram-se na Tabela 24 do Apêndice A.

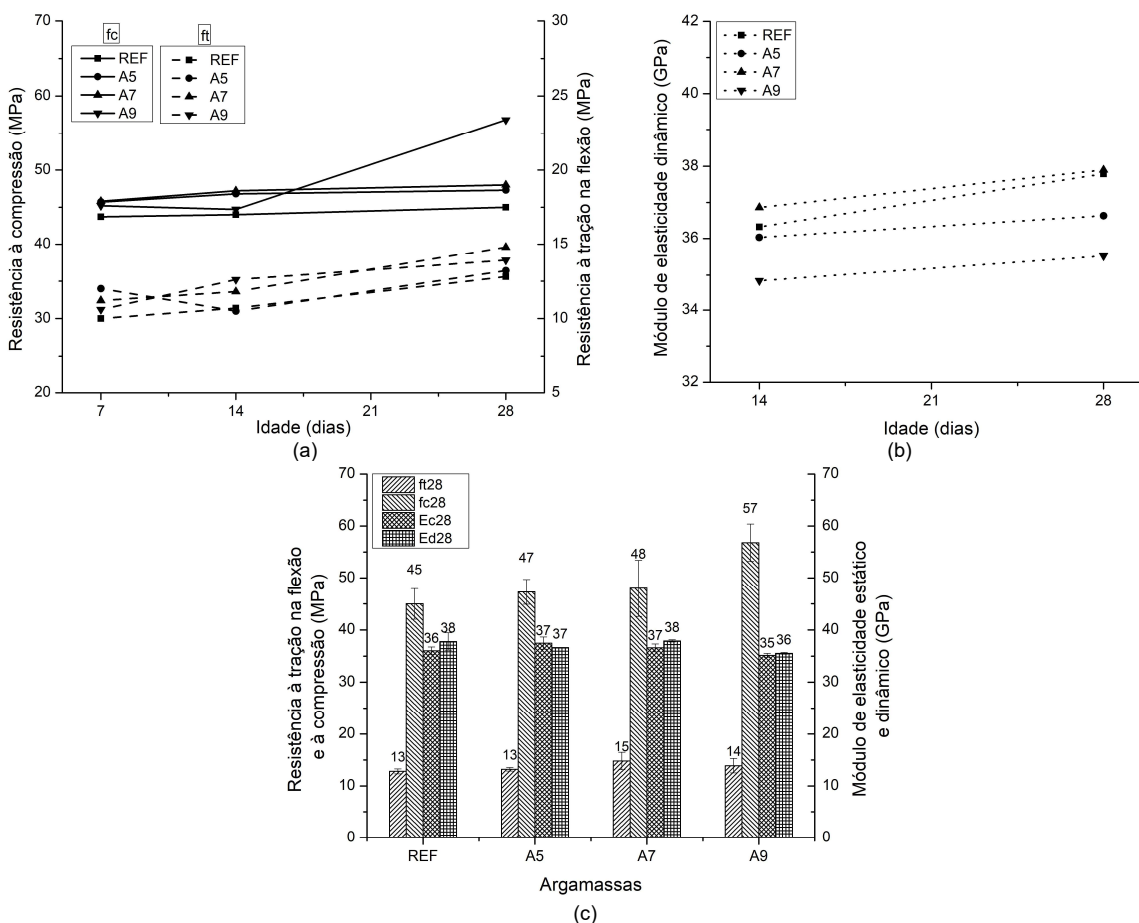
Tabela 19 – Resistência à compressão das argamassas elaboradas no laboratório

| Argamassas | Resistência à compressão (MPa) | | | | | |
|------------|--------------------------------|--------|---------|--------|---------|--------|
| | 7 dias | | 14 dias | | 28 dias | |
| | fc | Desvio | fc | Desvio | fc | Desvio |
| REF | 43,7 | 1,39 | 44,0 | 1,91 | 45,0 | 2,95 |
| A5 | 45,7 | 1,39 | 46,8 | 2,68 | 47,3 | 2,39 |
| A7 | 45,8 | 1,91 | 47,2 | 9,13 | 48,0 | 5,42 |
| A9 | 45,2 | 1,83 | 44,7 | 3,62 | 56,8 | 3,60 |

fc: resistência à compressão simples.

Na Figura 18 (a) é mostrada a evolução das resistências à compressão e à tração na flexão aos 7, 14 e 28 dias. Na Figura 18 (b) é apresentada a evolução dos módulos de elasticidade dinâmico aos 14 e 28 dias, e na Figura 18 (c) podem-se visualizar as resistências à compressão e à tração na flexão, e os módulos de elasticidade estático e dinâmico aos 28 dias para cada argamassa.

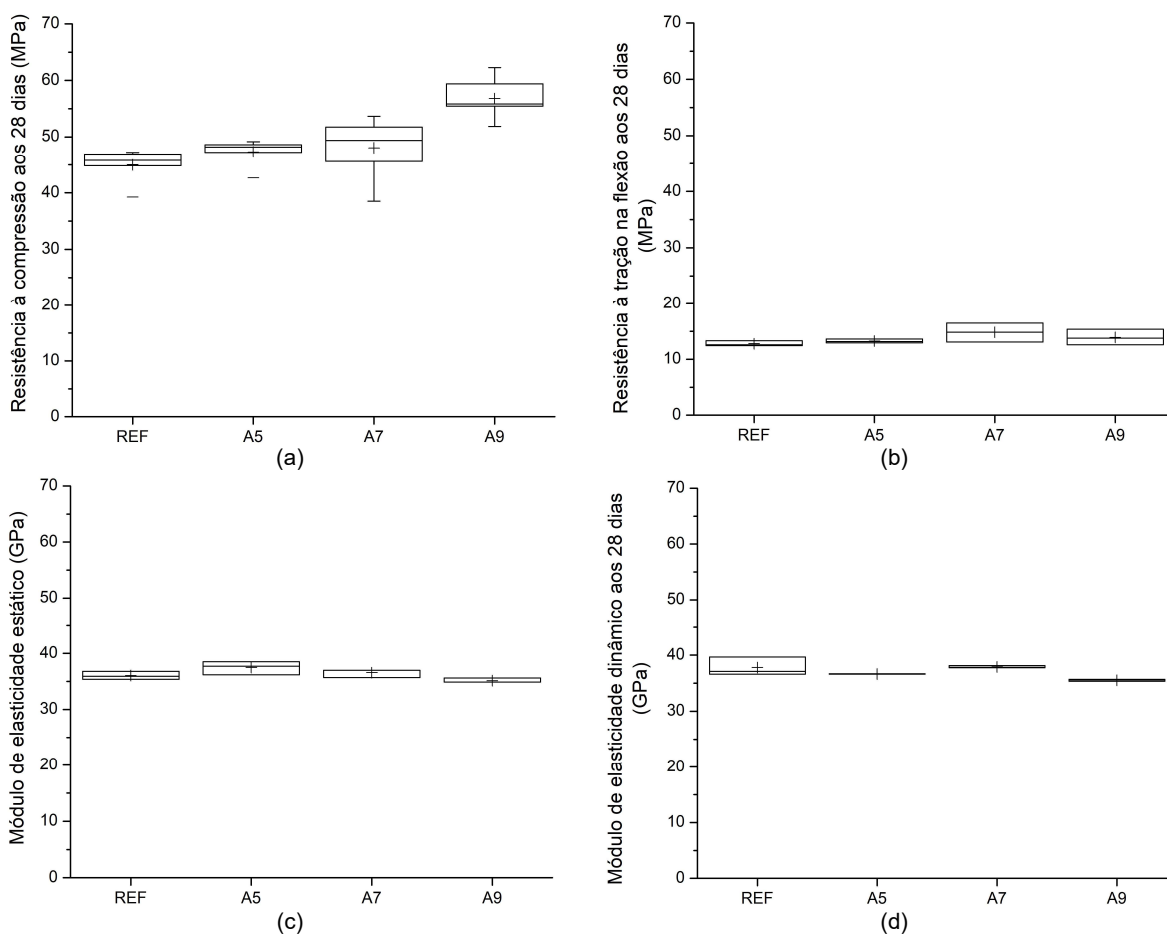
Figura 18– Resultados de (a) Evolução das resistências à compressão e à tração na flexão aos 7, 14 e 28 dias, (b) Evolução dos módulos de elasticidade dinâmico aos 14 e 28 dias e (c) Resistências à compressão e à tração na flexão e módulos de elasticidade estático e dinâmico aos 28 dias



Fonte: A autora.

Os diagramas de caixas correspondentes à análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias, a resistência à tração na flexão aos 28 dias, o módulo de elasticidade estático aos 28 dias e o módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias são mostrados nas Figuras 19 (a), (b), (c) e (d), respectivamente. Os resultados destas análises estatísticas podem ser conferidos nas Tabelas 29, 30, 31 e 32 do Apêndice B.

Figura 19 – Diagramas de caixa de (a) Resistência à compressão aos 28 dias, (b) Resistência à tração na flexão aos 28 dias, (c) Módulo de elasticidade estático aos 28 dias e (d) Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias



Fonte: A autora.

Da Tabela 19 e da Figura 18 (a) pode ser observado que à medida que aumenta o conteúdo de excesso de pasta, aumenta a resistência à compressão para todas as idades, o que pode ser pelo maior conteúdo de aglomerantes nas argamassas, onde se tem um maior conteúdo de sílica ativa ao ir aumentado o excesso de pasta (Tabela 18), a qual por ser um material cimentício suplementar com atividade pozolânica e com efeito filer, ajuda desenvolver maiores resistências mecânicas com o passar do tempo. Aos 28 dias, as argamassas A5, A7 e A9 apresentaram resistências superiores à argamassa REF em

5,11%, 6,67% e 26,2%, respectivamente. A análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias mostrou diferenças significativas somente para a argamassa A9 em relação às outras; já entre as argamassas REF, A5 e A7 não foi encontrada diferença estatística como pode ser observado na Figura 19 (a). Goodier, Austin e Robins (2008) encontraram também resistências à compressão aos 28 dias nos corpos de prova moldados das suas dez argamassas de projeção para reparo estudadas valores superiores a 40 MPa.

A resistência à tração na flexão mostra evoluções semelhantes para todas as argamassas (Figura 18 (a)), tendo as argamassas A5, A7 e A9 em relação à REF valores superiores aos 28 dias de 3,1%, 15,6% e 8,6%, respectivamente. Na análise estatística realizada não foi encontrada diferença estatística entre as médias aos 28 dias, demonstrando que os excessos de pasta estudados não influenciaram de maneira significativa nesta propriedade. Aos 28 dias, as resistências à tração na flexão de cada argamassa em relação às respectivas resistências à compressão foram de 28,4% (REF), 27,9% (A5), 30,8% (A7) e 24,5% (A9), o que pode-se considerar satisfatório sendo que a resistência à tração é importante para suportar possíveis fissurações decorrentes de incompatibilidades dimensionais entre o reparo e o substrato.

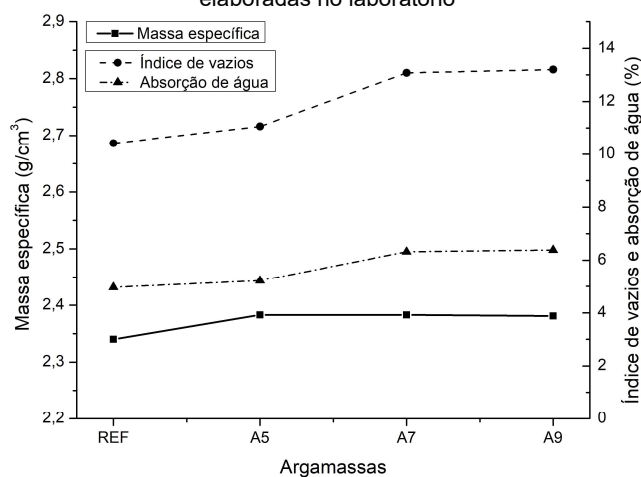
O módulo de elasticidade estático (Figura 18(c)) apresenta valores semelhantes aos comumente encontrados no concreto. Da Figura 19 (c), pode-se observar que à medida que aumenta o conteúdo de pasta diminui o módulo de elasticidade estático com exceção da argamassa REF que mostra valores menores que a A5, mas estatisticamente só há diferença entre as argamassas A5 e A9. O módulo de elasticidade estático da argamassa A5 resultou 4,0% maior que a REF, porém a A7 foi 1,5% menor e a A9 um 2,5% menor que a REF.

Em relação ao módulo de elasticidade dinâmico, a Figura 18 (b) mostra que a velocidade de evolução dos módulos de elasticidade dinâmico entre os 14 e 28 dias é similar para as argamassas A5, A7 e A9, no entanto a argamassa REF mostra uma evolução mais rápida. Aos 28 dias, os módulos de elasticidade dinâmicos maiores foram para as argamassas A7 e REF, seguido das argamassas A5 e a A9, constatando-se um comportamento oposto ao referido por Mello (2018), a maior relação agregado/aglomerante corresponde menor módulo de elasticidade dinâmico. O módulo da argamassa A7 foi 0,3% maior do que o módulo da argamassa REF, já as argamassas A5 e A9 foram menores que a argamassa REF em 3,1% e 6,0%, respectivamente. A análise estatística determinou que existe diferença significativa entre a argamassa A9 em relação às argamassas A7 e REF.

4.2.2 Massa específica, índice de vazios e absorção de água

Na Figura 20 são apresentados os resultados de massa específica, índice de vazios e absorção de água das argamassas elaboradas no laboratório em estado endurecido. Já na Figura 21 estão os diagramas de caixas de cada uma destas propriedades. Na Tabela 25 do Apêndice A encontram-se os resultados individuais e nas Tabelas 33, 34 e 35 do Apêndice B as análises estatísticas.

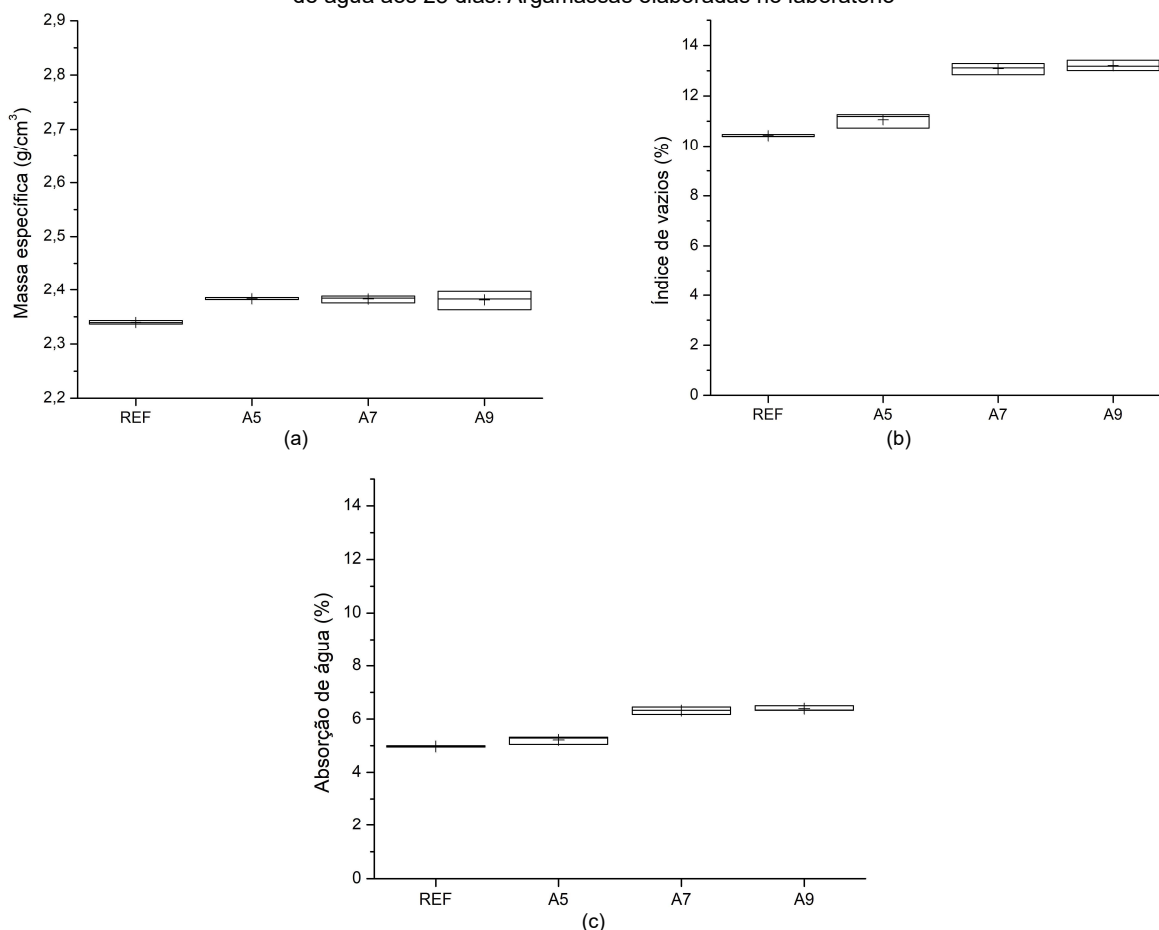
Figura 20 – Resultados da massa específica, índice de vazios e absorção de água aos 28 dias das argamassas elaboradas no laboratório



Fonte: A autora.

A massa específica das argamassas de projeção permanece quase constante para os excessos de pasta estudados (Figura 20), sendo elas maiores do que a argamassa de referência em 1,8%. Estatisticamente, a argamassa de referência é diferente das outras como pode ser constatado na Figura 21 (a). Esta tendência já foi observada no estado fresco e foi atribuído à melhor compactação conseguida pelo maior consumo de superplastificante e pela maior quantidade de pasta.

Figura 21 – Diagramas de caixa de (a) Massa específica aos 28 dias, (b) Índice de vazios aos 28 dias, (c) Absorção de água aos 28 dias. Argamassas elaboradas no laboratório



Fonte: A autora.

Na Figura 20 é observado que o índice de vazios aumenta ao aumentar o excesso de pasta e, como é esperado, a absorção de água tem o mesmo comportamento. Os índices de vazios das argamassas A5, A7 e A9 são maiores da argamassa REF em 6,1%, 25,5% e 26,7%, respectivamente e a absorção de água em 5,0%, 27,1% e 28,6%, respectivamente. Em relação ao índice de vazios, só as argamassas A7 e A9 não apresentam diferenças estatísticas entre elas. No caso da absorção de água, as argamassas REF e A5 apresentam médias estatisticamente iguais e ocorre o mesmo para as argamassas A7 e A9. Os maiores índices de vazios e absorções de água nas argamassas com maior excesso de pasta podem ocorrer pela maior quantidade de água nestas misturas e pela menor compactidade das misturas granulares à medida que aumenta o teor de excesso de pasta.

4.3 ENSAIOS NAS ARGAMASSAS ELABORADAS NO CAMPO

4.3.1 Bombeabilidade e projetabilidade

A bombeabilidade e a projetabilidade foram avaliadas qualitativamente como foi descrito no capítulo anterior, os resultados das observações estão na Tabela 20.

Tabela 20 – Capacidade de bombeabilidade e de projetabilidade das argamassas

| Argamassas | Bombeabilidade | Projetabilidade substrato horizontal | Projetabilidade substrato inclinado | Falha |
|------------|----------------|--------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| REF | Não | Não | Não | Entupimento do mangote |
| A5 | Sim | Sim | Não | Falta de adesão ao substrato |
| A7 | Sim | Sim | Não | Falta de adesão ao substrato |
| A9 | Sim | Sim | Não | Falta de adesão ao substrato |

De acordo com a Tabela 20 conseguiu-se a bombeabilidade para todas as argamassas de projeção proporcionadas no trabalho. A argamassa de referência também foi testada, mas não foi possível bombear pois ocorreu o entupimento do mangote. No processo de bombeamento foi possível perceber visualmente que quanto maior conteúdo de excesso de pasta resulta em maior facilidade de bombeamento sem ocorrer segregação e nem exsudação em nenhum caso.

Em relação à projetabilidade, para todas as argamassas não foi possível a projeção nas placas colocadas de maneira inclinada porque as argamassas escorregavam do substrato. Ao projetar nas placas colocadas horizontalmente percebeu-se que a espessura da camada era de 4 cm aproximadamente e que não apresentava segregação e nem exsudação, indicando uma elevada coesão.

Com base nestes resultados, pode-se afirmar que os finos, especialmente a sílica ativa, junto com as fibras e o aditivo retentor de água ajudaram a manter a coesão e a viscosidade apropriada para o bombeamento e projeção. Os excessos de pasta estudados junto com os teores de aditivo superplastificante proporcionaram a fluidez necessária para conseguir o bombeamento, mas durante a projeção não foi possível conseguir que as argamassas ficassem aderidas às placas de substrato quando inclinadas, indicando que possivelmente a tensão de escoamento foi baixa.

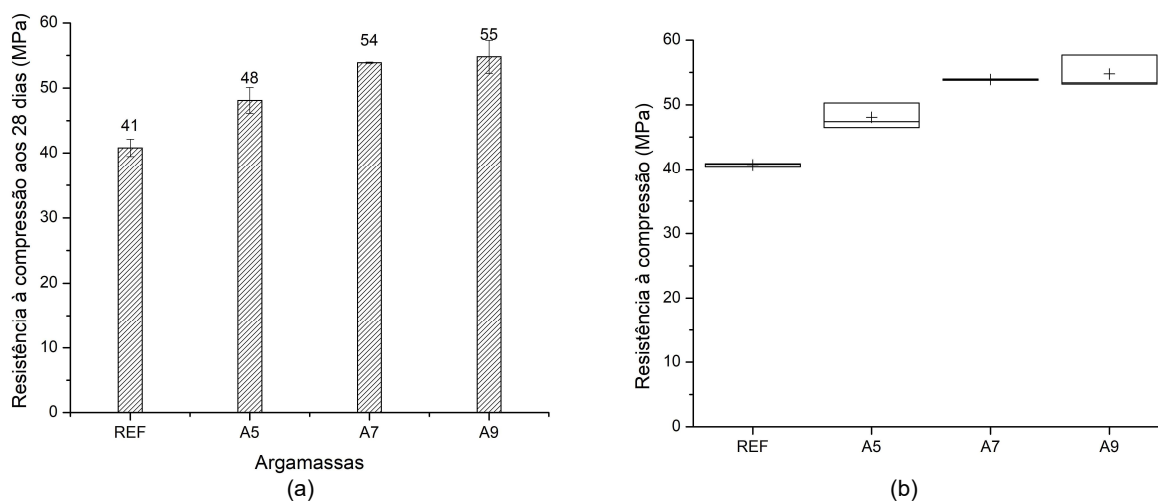
Em relação à baixa tensão de escoamento, Yun, Choi e Yeon (2015) ao estudar argamassas de projeção de alto desempenho encontraram que o superplastificante

tem um efeito mais pronunciado na redução da tensão de escoamento em comparação ao aditivo incorporador de ar e que o aditivo retentor de água também mostra uma tendência em reduzir a tensão de escoamento. Pan et al. (2019) também determinaram que o aditivo superplastificante diminui a tensão de escoamento, mas o aditivo retentor de água a aumenta.

4.3.2 Resistência à compressão

Na Figura 22 (a) podem-se observar os resultados da resistência à compressão dos testemunhos extraídos das placas de argamassas projetadas e dos corpos de prova da argamassa de referência moldados no local de projeção. Na Figura 22 (b) encontram-se os diagramas de caixa desta propriedade. Na Tabela 26 do Apêndice A estão os resultados individuais das resistências à compressão e na Tabela 36 do Apêndice B, a análise estatística.

Figura 22 – (a) Resultados da resistência à compressão aos 28 dias, (b) Diagramas de caixa da resistência à compressão. Argamassas elaboradas no campo



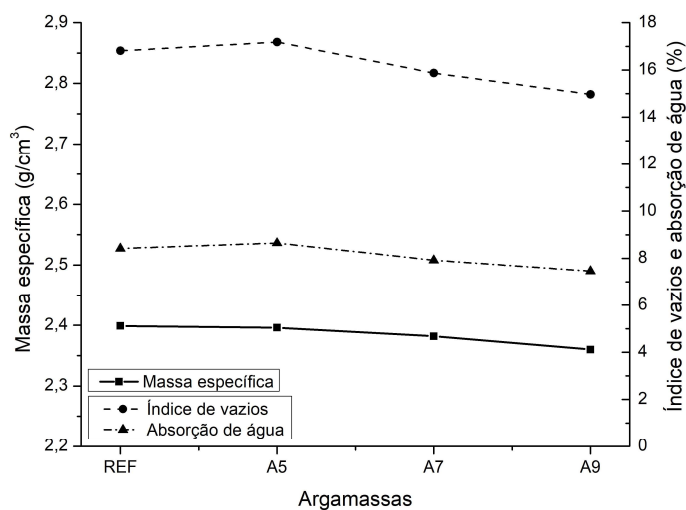
Fonte: A autora.

Da Figura 22 (a) pode-se perceber que à medida que aumentaram os conteúdos de excesso de pasta aumentaram as resistências à compressão, pois o excesso de pasta ajudou na compactação além que ao aumentar o excesso de pasta tem-se maior consumo de aglomerantes. As resistências à compressão das argamassas A5, A7 e A9 em relação à argamassa de referência são maiores em 17,9%, 32,1% e 34,3%, respectivamente. Estatisticamente, todas as argamassas são diferentes com exceção das argamassas A7 e A9 onde as médias não apresentam diferenças estatísticas.

4.3.3 Massa específica, índice de vazios e absorção de água

Na Figura 23 são apresentados os resultados de massa específica, índice de vazios e absorção de água das argamassas projetadas em estado endurecido. Já na Figura 24 são mostrados os diagramas de caixas de cada uma destas propriedades. Na Tabela 26 do Apêndice A encontram-se os resultados individuais e nas Tabelas 37, 38 e 39 do Apêndice B as análises estatísticas.

Figura 23 – Resultados da massa específica, índice de vazios e absorção de água aos 28 dias das argamassas elaboradas no campo

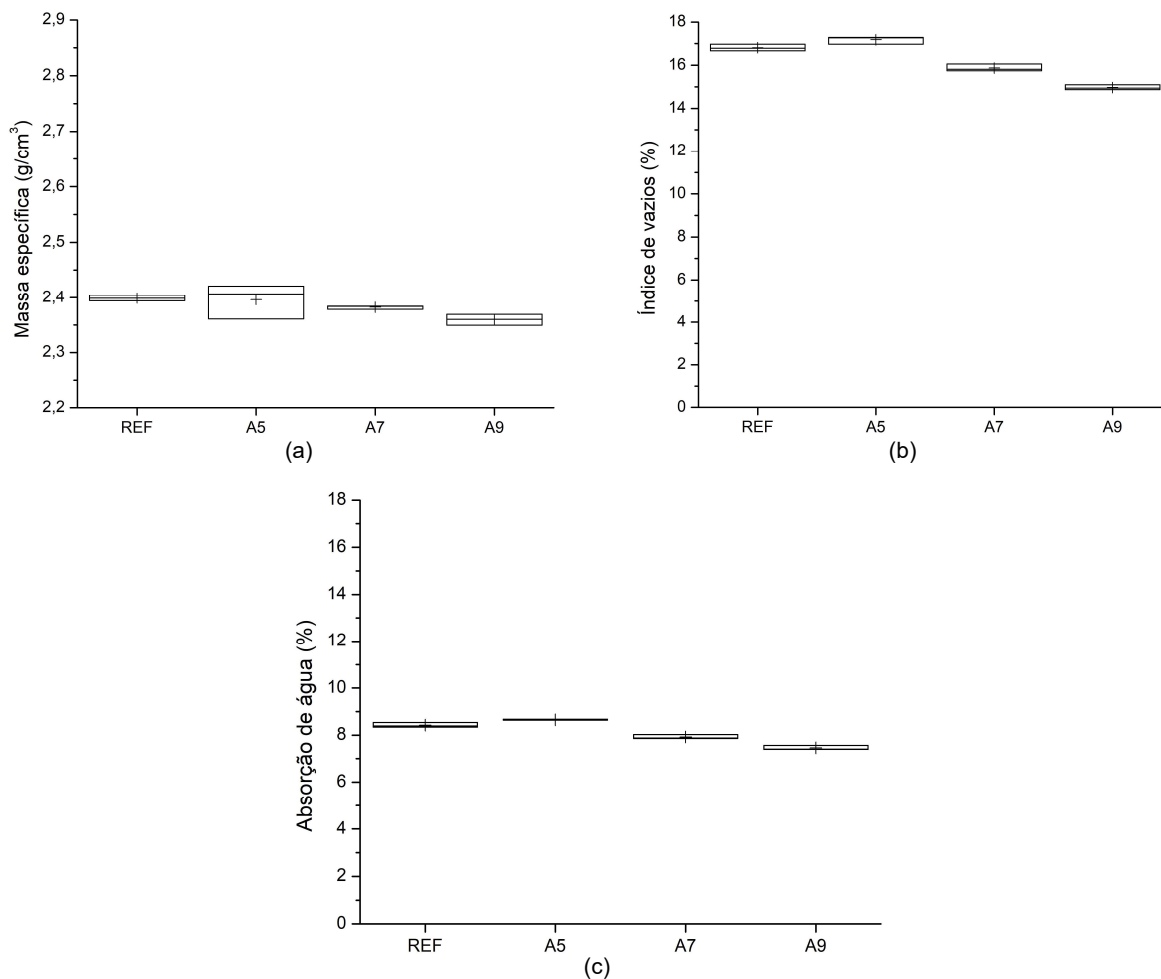


Fonte: A autora.

A massa específica dos testemunhos das argamassas projetadas apresenta uma leve diminuição ao aumentar o conteúdo de excesso de pasta, mas estatisticamente estas diferenças não são significativas.

Os índices de vazios e de absorção de água das argamassas projetadas mostram uma diminuição ao aumentar o excesso de pasta. O índice de vazios da argamassa A5 é 2,2% maior do que a argamassa de referência, já as argamassas A7 e A9 são menores em 5,6% e 10,9%, respectivamente. Estatisticamente, só entre as argamassas REF e A5 não existe diferença na propriedade de índice de vazios. Em relação à absorção de água, a argamassa A5 é 2,7% maior do que a argamassa REF, as argamassas A7 e A9 são 5,9% e 11,4% menores, respectivamente. A análise estatística para esta propriedade resultou em diferenças entre todas as argamassas.

Figura 24 – Diagramas de caixa de (a) Massa específica aos 28 dias, (b) Índice de vazios aos 28 dias, (c) Absorção de água aos 28 dias. Argamassas elaboradas no campo



Fonte: A autora.

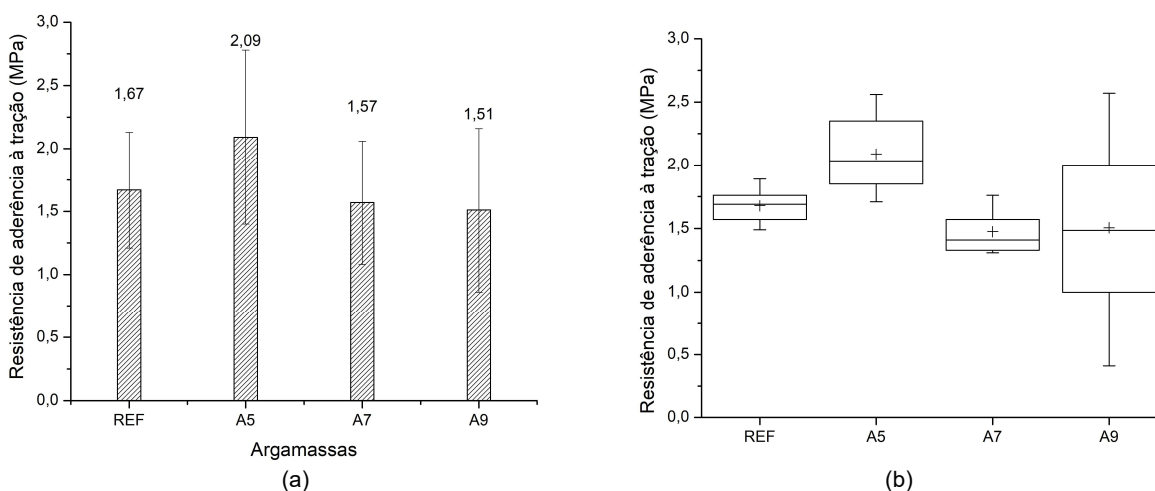
A tendência observada no índice de vazios e na absorção de água das argamassas projetadas pode ser causada por vários motivos. Um deles pode ser que a energia de projeção foi insuficiente causando que as argamassas que apresentaram menor conteúdo de excesso de pasta fiquem com menor grau de compactação devido à maior resistência ao fluxo, precisando assim de maior energia de projeção para conseguir o mesmo grau de compactação e em consequência de índice de vazios. Nesse sentido, Beaupré (1994) indica que a capacidade insuficiente de ar comprimido no bico pode resultar em uma compactação baixa e alta reflexão. Outro motivo, pode ser que o processo de projeção desempacotou as argamassas, em vista que os índices de vazios e as absorções de água das argamassas projetadas foram menores nas argamassas com menores compacidade da mistura granular e maiores nas argamassas com maiores compacidade, fato relacionado também ao excesso de pasta onde as argamassas com maiores excessos

de pasta possuíram as menores compacidades e resultaram em menores índices de vazios.

4.3.4 Resistência de aderência à tração

Na Figura 25 (a) e (b) são mostrados os resultados das resistências de aderência à tração e os diagramas de caixas das argamassas aplicadas às placas de concreto respectivamente. Os resultados individuais podem ser conferidos na Tabela 27 do Apêndice A e a análise estatística na Tabela 40 do Apêndice B.

Figura 25 – (a) Resultados da resistência de aderência à tração, (b) Diagramas de caixa da resistência de aderência à tração



Fonte: A autora.

A argamassa A5 apresentou a maior resistência de aderência à tração, já a argamassa A9 foi a que apresentou os menores resultados. Se a resistência de aderência à tração é comparada com a resistência à compressão, as argamassas com maiores resistências à compressão apresentaram as menores resistências de aderência à tração, resultados que foram opostos aos obtidos por Rampanelli (2021).

Em relação à argamassa de referência, que foi aplicada manualmente ao substrato, a argamassa A5 é 25,1% maior e as argamassas A7 e A9 são 6,0% e 9,6% menores, respectivamente. Estatisticamente, só a argamassa A5 é diferente das argamassas REF, A7 e A9.

O ensaio apresenta coeficientes de variação de 27,4% para a argamassa de referência e de entre 31,5% e 43,2% para as argamassas projetadas. Devido que esta propriedade é influenciada por diversos fatores altamente variáveis é encontrada uma alta

dispersão nos resultados, apresentando normalmente coeficientes de variação de 10% a 35% podendo chegar inclusive até 60% (CARASEK, 2017). Argamassas de projeção estudadas por Zanelatto et al. (2013) apresentaram maiores resistências de aderência à tração e maiores variações nos resultados quando comparadas com argamassas aplicadas manualmente.

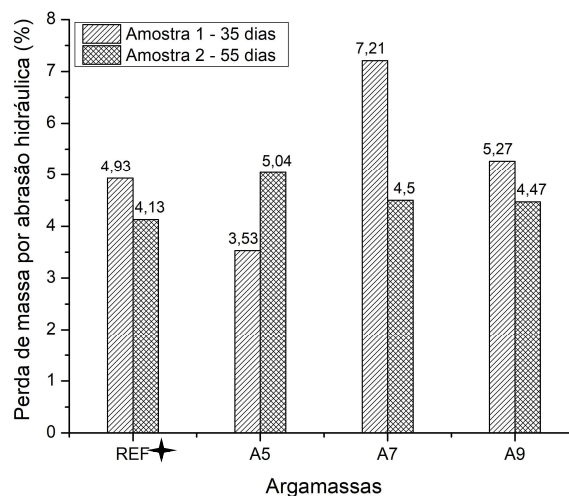
Na Tabela 21 são apresentados os tipos de falhas obtidos na maioria dos casos para cada argamassa estudada. Pode-se observar que a projeção melhorou a aderência entre argamassas e o substrato, pois nas argamassas de projeção as rupturas foram nas argamassas de reparo (Tipo C) e não na zona de transição do sistema como ocorreu em alguns corpos de prova da argamassa de referência (Tipo B). A preparação da superfície da argamassa A9 e/ou a homogeneização dos componentes da cola para a colagem das pastilhas provavelmente não foram bem feitos dando como resultado falhas destes tipos.

Tabela 21 – Tipos de falhas por aderência à tração nas argamassas elaboradas no campo

| Argamassas | Tipo de falha | Ruptura | Observação |
|------------|---------------|-------------------------------|---------------------------|
| REF | Tipo B | Interface substrato/argamassa | - |
| | Tipo C | Argamassa | - |
| A5 | Tipo C | Argamassa | - |
| A7 | | | |
| A9 | Tipo D | Interface argamassa/cola | - |
| | Tipo E | Interface pastilha/cola | Descartado para a análise |

4.3.5 Abrasão hidráulica

Na Figura 26 são apresentados os resultados da percentagem de perda de massa por abrasão hidráulica dos dois corpos de prova de cada argamassa ensaiados em idades distintas cada um deles. Na Tabela 28 do Apêndice A são mostrados os resultados individuais.

Figura 26 – Resultados da perda de massa por abrasão hidráulica

✦ As duas amostras ensaiadas à idade de 48 dias.

Fonte: A autora.

Os resultados à idade de 35 dias não apresentam uma tendência clara, sendo que essa variabilidade nos resultados pode ser causada pela utilização de diferentes equipamentos. De modo geral, é observado que na idade de 35 dias a perda de massa é maior em comparação à idade de 55 dias, isso é dado por conta do desenvolvimento de maiores resistências com o passar do tempo.

Na idade de 55 dias é observada uma menor perda de massa à medida que os índices de vazios das argamassas projetadas diminuem (Figura 23), resultado que demonstra que uma menor porosidade junto com as resistências à compressão (Figura 22(a)) ajudam obter maiores resistências à abrasão.

Além disso, é observado que ao aumentar o conteúdo de pasta, principalmente a sílica ativa, diminui o desgaste por abrasão na idade de 55 dias. Kormann (2002), Pinho et al. (2007) e Jiang et al. (2017) encontraram que as argamassas com sílica ativa tiveram melhores desempenhos em relação ao desgaste por abrasão hidráulica quando comparadas com argamassas sem sílica ativa.

Comparando as argamassas de projeção com a argamassa de referência não é observada uma grande diferença na idade de 55 dias. Em comparação à argamassa de referência, a argamassa A5 é 22,1% menor na idade de 35 dias e 11,3% maior na idade de 55 dias, enquanto que a argamassa A7 é 59,2% maior na idade de 35 dias e 0,7% menor na idade de 55 dias. Já a argamassa A9 é 16,3% maior na idade de 35 dias e 1,3% menor na idade de 55 dias.

4.4 AVALIAÇÃO GERAL DAS ARGAMASSAS

Em esta seção é realizada uma avaliação das propriedades das argamassas estudadas visando uma abordagem geral como argamassas de projeção para reparo superficial de estruturas hidráulicas de concreto erodidas. Na Tabela 22 é apresentado o resumo dos resultados das propriedades estudadas.

Tabela 22 – Resumo dos resultados das propriedades estudadas

| Local de elaboração das argamassas | Propriedade | Argamassas | | | |
|---|---|------------|-------|-------|-------|
| | | REF | A5 | A7 | A9 |
| Laboratório | Índice de consistência (mm) | 232 | 250 | 254 | 251 |
| | Densidade de massa (kg/m ³) | 2093 | 2151 | 2153 | 2120 |
| | Ar incorporado (%) | 10 | 7 | 7 | 8 |
| | Retenção de água (%) | 95 | 96 | 96 | 96 |
| | Penetração de cone (mm) | 27 | 46 | 46 | 42 |
| | fc28 (MPa) | 45,0 | 47,3 | 48,0 | 56,8 |
| | ft28 (MPa) | 12,8 | 13,2 | 14,8 | 13,9 |
| | Ec28 (GPa) | 36,0 | 37,5 | 36,6 | 35,1 |
| | Ed28 (GPa) | 37,8 | 36,6 | 37,9 | 35,5 |
| | Massa específica (kg/m ³) | 2340 | 2383 | 2383 | 2381 |
| | Índice de vazios (%) | 10,42 | 11,06 | 13,08 | 13,20 |
| | Absorção de água (%) | 4,97 | 5,22 | 6,32 | 6,39 |
| Campo | Bombeabilidade | Não | Sim | Sim | Sim |
| | Projetabilidade - substrato horizontal | Não | Sim | Sim | Sim |
| | Projetabilidade - substrato inclinado | Não | Não | Não | Não |
| | fc28 (MPa) | 40,8 | 48,1 | 53,9 | 54,8 |
| | Massa específica (kg/m ³) | 2399 | 2396 | 2382 | 2360 |
| | Índice de vazios (%) | 16,81 | 17,18 | 15,87 | 14,97 |
| | Absorção de água (%) | 8,42 | 8,65 | 7,92 | 7,46 |
| | Resistência de aderência à tração (MPa) | 1,67 | 2,09 | 1,57 | 1,51 |
| Perda de massa por abrasão hidráulica aos 55 dias (%) | 4,53* | 5,04 | 4,50 | 4,47 | |

*Média das duas amostras aos 48 dias.

Em relação à resistência à compressão, todas as argamassas cumprem com o requisito, estabelecido na revisão bibliográfica, de serem utilizadas como argamassas de reparo, dando como resultado resistências superiores a 40 MPa aos 28 dias.

As resistências à tração na flexão também foram adequadas para argamassas de reparo, tendo em consideração que esta propriedade é importante para suportar os possíveis esforços gerados por incompatibilidades dimensionais geradas por retração e/ou variações térmicas.

Ademais, os valores obtidos para o módulo de elasticidade foram compatíveis com estruturas de concreto o que ajuda a suportar as possíveis incompatibilidades dimensionais ao ter comportamentos elásticos similares.

Quando comparados os resultados dos índices de vazios e das absorções de água das argamassas elaboradas no laboratório com as argamassas elaboradas no campo são observados valores maiores para as últimas. Essas diferenças podem ser pelos diferentes equipamentos de mistura e protocolos adotados, os distintos volumes nas bateladas para cada equipamento, além dos distintos processos de adensamento. Mas de modo geral, os valores estão dentro do esperado para argamassas de projeção de acordo com a revisão bibliográfica.

Enquanto à capacidade de serem bombeadas e projetadas, as argamassas estudadas mostraram em geral uma excelente capacidade de bombeamento. Entretanto, que a capacidade de projeção mostrou uma necessidade de ajustar o conteúdo de aditivo superplastificante e/ou de adicionar um aditivo acelerador de pega na ponta do bico de projeção para conseguir diminuir a tensão de escoamento e assim lograr a adesão das argamassas ao substrato quando ele estiver inclinado. Contudo, as argamassas de projeção estudadas podem ser utilizadas em reparos superficiais de estruturas hidráulicas de concreto erodidas cujas superfícies sejam horizontais ou pouco inclinadas.

A resistência de aderência à tração cumpriu com os requerimentos tanto para argamassas de reparo quanto para argamassas de projeção, sendo em todos os casos maior a 1 MPa, requisito solicitado de acordo com a revisão bibliográfica. Destaque para a argamassa A5, a qual apresentou a maior resistência.

A resistência à abrasão em maiores idades foi similar para todas as argamassas projetadas, obtendo-se melhores resultados nas argamassas que contêm maior quantidade de pasta, maior resistência à compressão e menor porosidade.

A utilização de um equipamento com maior energia de projeção pode resultar em uma capacidade de adesão ao substrato maior, menores índices de vazios e maiores resistências à compressão, de aderência à tração e à abrasão.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

De acordo ao objetivo geral do trabalho foram avaliadas as principais propriedades físicas e mecânicas associadas ao comportamento em uso de argamassas de projeção cimentícias para reparo superficial de estruturas hidráulicas de concreto erodidas, proporcionadas por meio de um método de empacotamento de partículas. Mediante o programa experimental desenvolvido foi possível obter as seguintes conclusões:

- Para os excessos de pasta estudados, todas as argamassas cumpriram com os requisitos de argamassas de reparo no que se refere às principais propriedades físicas e mecânicas. A argamassa com o melhor comportamento do ponto de vista técnico tanto como material de reparo quanto como argamassa de projeção foi a argamassa com 9% de excesso de pasta, pois possui menor conteúdo de cimento, menor teor de aditivo superplastificante para a consistência desejada, maior facilidade de bombeamento e de projeção, maiores resistências à compressão e à tração na flexão, menores módulos de elasticidade, menor massa específica e menor porosidade após projetar, menores perdas por abrasão hidráulica em maiores idades e aderência à tração satisfatória;
- Em relação à bombeabilidade e projetabilidade, foi possível o bombeamento em todos os casos, porém na projeção dificultou-se a adesão ao substrato quando inclinado. Contudo, as argamassas de projeção estudadas podem ser utilizadas em reparos superficiais de estruturas hidráulicas de concreto erodidas cujas superfícies sejam horizontais ou pouco inclinadas. Para melhorar a adesão ao substrato inclinado no momento da projeção, pode-se recomendar um ajuste do teor do aditivo superplastificante para diminuição da faixa de índice de consistência das argamassas ensaiadas no laboratório, ou o ajuste pode ser feito pelo ensaio de penetração de cone visto que mostrou ser sensível à utilização de aditivos superplastificantes. Outra opção pode ser adicionar aditivo acelerador de pega na ponta do bico de projeção;

- O uso de um método de empacotamento de partículas para o proporcionamento de argamassas de projeção para reparo demonstrou ser viável do ponto de vista técnico, pois foram conseguidas argamassas capazes de serem bombeadas e projetadas tendo pequenos conteúdos de excesso de pasta como consequência da otimização da mistura granular, apesar de conterem fibras, baixa relação água/aglomerante e uma elevada quantidade de finos.

5.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

No desenvolvimento do trabalho foi percebida a necessidade de aprofundar nos seguintes temas:

- Avaliar por ensaios de reometria rotacional, a tensão de escoamento e a viscosidade tanto em laboratório quanto em campo;
- Ajustar a faixa do índice de consistência ou determinar faixas de penetração de cone para as argamassas estudadas;
- Estudar as argamassas utilizando aditivo acelerador de pega na ponta do bico de projeção para conseguir projetar as argamassas em substratos inclinados;
- Estudar percentagens maiores de excesso de pasta para determinar qual a percentagem máxima a partir da qual a argamassa não é viável tecnicamente;
- Estudar as argamassas com equipamentos de projeção que possuam maiores energia de projeção;
- Estudar as argamassas utilizando cimento CP II F - 40 devido que é o cimento mais utilizado atualmente pelas centrais dosadoras de concreto;
- Estudar as argamassas também do ponto de vista econômico e de sustentabilidade;
- Estudar a influência da cura química na retração por secagem, na aderência e no desgaste por abrasão hidráulica tendo em vista que é o tipo de cura mais apropriado para este tipo de estruturas em escala real.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT. **ABNT NBR 7680-1**: Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT. **ABNT NBR 8522 – 1**: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT. **ABNT NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. **ABNT NBR 13070**: Moldagem de placas para ensaio de argamassa e concreto projetados. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT. **ABNT NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. **ABNT NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. **ABNT NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. **ABNT NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. **ABNT NBR 13528 – 2**: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Parte 2: Aderência ao substrato. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT. **ABNT NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT. **ABNT NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT. **ABNT NBR 16916**: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT. **ABNT NBR 16972**: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT. **ABNT NBR 16973**: Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT. **ABNT NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ACI COMMITTEE 506. **Guide to shotcrete (ACI 506R-05)**. USA, 2005.

ACI COMMITTEE 546. **Guide to concrete repair (ACI 546R-14)**. USA, 2014.

AMARIO, M. et al. Optimization of normal and high strength recycled aggregate concrete mixtures by using packing model. **Cement and Concrete Composites**, v. 84, p. 83–92, 2017. DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2017.08.016](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.08.016).

ARORA, A. et al. Material design of economical ultra-high performance concrete (UHPC) and evaluation of their properties. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, 2019. DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2019.103346](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103346).

ASA UNDERGROUND COMMITTEE. Mechanical application of shotcrete in underground construction. **Shotcrete**, v. 22, n. 4, 2020. DOI: [10.1097/NHH.0000000000000285](https://doi.org/10.1097/NHH.0000000000000285).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C780**: Standard test method for preconstruction and construction evaluation of mortars for plain and reinforced unit masonry. West Conshohocken, 2020.

ASTM. **ASTM C1138**: Standard test method for abrasion resistance of concrete (underwater method). West Conshohocken, 2020.

ASTM. **ASTM E1876**: Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. West Conshohocken, 2015.

AUSTIN, S. A.; ROBINS, P. J.; GOODIER, C. I. The rheological performance of wet-process sprayed mortars. **Magazine of Concrete Research**, v. 51, p. 341-352, 1999. DOI: [10.1680/mac.1999.51.5.341](https://doi.org/10.1680/mac.1999.51.5.341).

BALA, M.; ZENTAR, R.; BOUSTINGORRY, P. Parameter determination of the Compressible Packing Model (CPM) for concrete application. **Powder Technology**, v. 367, p. 56–66, 2020. DOI: [10.1016/j.powtec.2019.11.085](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.085).

BAROGHEL-BOUNY, V.; CAPRA, B.; LAURENS, S. A durabilidade das armaduras e do concreto do cobrimento. In: OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. **Durabilidade do concreto**: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. Editores da tradução: Oswaldo Cascudo e Helena Carasek. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. cap. 9, p.255-326.

BEAUPRÉ, D. **Rheology of high performance shotcrete**. 1994. Thesis (Doctor of Philosophy) – The University of British Columbia, Vancouver, 1994. Disponível em: <https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/ubctheses/831/items/1.0050424>.

Acesso em: 30 jun. 2023.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção: Patologia, reabilitação, prevenção**. Tradução: Leda Maria Marques Días Beck. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

BISSONNETTE, B. et al. Recommendations for the repair, the lining or the strengthening of concrete slabs or pavements with bonded cement-based material overlays. **Materials and Structures**, v. 46, n. 3, p. 481–494, 2013. DOI: [10.1617/s11527-012-9929-8](https://doi.org/10.1617/s11527-012-9929-8).

BOHAC, M. et al. The role of SCM's on rheology of sprayed mortar. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1039, n. 1, 2021. DOI: [10.1088/1757-899X/1039/1/012001](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1039/1/012001).

BRITISH STANDARD. **BS 1199: Specifications for building sands from natural sources – Sands for external renderings and internal plastering with lime and portland cement**. London, 1976.

CAMPOS, H. F. et al. Determination of the optimal replacement content of Portland cement by stone powder using particle packing methods and analysis of the influence of the excess water on the consistency of pastes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 2, p. 221–232, 2019. DOI: [10.1590/s1983-41952019000200002](https://doi.org/10.1590/s1983-41952019000200002).

CAMPOS, H. F.; KLEIN, N. S.; MARQUES FILHO, J. Proposed mix design method for sustainable high-strength concrete using particle packing optimization. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, 2020. DOI: [10.1016/j.jclepro.2020.121907](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121907).

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais**. 3. ed., v. 2. São Paulo: IBRACON, 2017. cap. 28, p.922-969.

CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-21122009-125012/pt-br.php>. Acesso em: 30 jun. 2023.

CASTRO, A. L. DE; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, n. 333, p. 18–32, 2009. DOI: [10.1590/s0366-69132009000100003](https://doi.org/10.1590/s0366-69132009000100003).

CHEN, L. et al. Effect of pumping and spraying processes on the rheological properties and air content of wet-mix shotcrete with various admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 311–323, 2019. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2019.07.104](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.104).

CHOI, P.; YUN, K.-K.; YEON, J. H. Effects of mineral admixtures and steel fiber on rheology, strength, and chloride ion penetration resistance characteristics of wet-mix shotcrete mixtures containing crushed aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 142, p. 376–384, 2017. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2017.03.093](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.093).

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 1504-3**: Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity – Part 3: Structural and non-structural repair. Brussels, 2005.

COURARD, L. et al. Guidelines for concrete surface preparation: 10 years research and experience. In: **MATEC Web of Conferences**, v. 199, 2018. DOI: [10.1051/mateconf/201819908004](https://doi.org/10.1051/mateconf/201819908004).

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning**: a scientific approach. E & FN Spon Press, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 090**: Patologias do concreto – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

DOW CHEMICAL COMPANY. **Walocel MKX 60000 PF 01**. Ficha técnica, 2020. Disponível em: <https://www.dow.com/pt-br/pdp.walocel-mkx-60000-pf-1-01-cellulose-ether.112028z.html?productCatalogFlag=1#tech-content>. Acesso em: 30 jun. 2023.

EMMONS, P. H.; VAYSBURD, A. M. Factors affecting the durability of concrete repair: the contractor's viewpoint. **Construction and Building Materials**, v. 8, n. 1, p. 5–16, 1994. DOI: [10.1016/0950-0618\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0950-0618(94)90003-5).

EMMONS, P. H.; VAYSBURD, A. M. System concept in design and construction of durable concrete repairs. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 1, p. 69–75, 1996. DOI: [10.1016/0950-0618\(95\)00065-8](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00065-8).

ESINOVSKII, V. A. et al. Experience of using innovative materials for repairing locks of the White Sea-Baltic Canal. **Power Technology and Engineering**, v. 52, n. 5, p. 506–511, 2019. DOI: [10.1007/s10749-019-00989-y](https://doi.org/10.1007/s10749-019-00989-y).

FATHY, A.; ZHU, H.; KOHAIL, M. Factors affecting the fresh-to-hardened concrete repair system. **Construction and Building Materials**, v. 320, 2022. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2021.126279](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126279).

FENNIS, S. A. A. M.; WALRAVEN, J. C.; DEN UIJL, J. A. Compaction-interaction packing model: regarding the effect of fillers in concrete mixture design. **Materials and Structures**, v. 46, n. 3, p. 463–478, 2013a. DOI: [10.1617/s11527-012-9910-6](https://doi.org/10.1617/s11527-012-9910-6).

FENNIS, S. A. A. M.; WALRAVEN, J. C.; DEN UIJL, J. A. Defined-performance design of ecological concrete. **Materials and Structures**, v. 46, n. 4, p. 639–650, 2013b. DOI: [10.1617/s11527-012-9922-2](https://doi.org/10.1617/s11527-012-9922-2).

FERRARIS, C. F. Measurement of the rheological properties of high performance concrete: State of the art report. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, v. 104, n. 5, p. 461–478, 1999. DOI: [10.6028/jres.104.028](https://doi.org/10.6028/jres.104.028).

FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/149-2005/1041-sidiclei-formagini?tmpl=component&print=1>. Acesso em: 30 jun. 2023.

GALAN, I. et al. Durability of shotcrete for underground support– Review and update. **Construction and Building Materials**, v. 202, p. 465–493, 2019. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2018.12.151](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.151).

GARBACZ, A. et al. On the evaluation of interface quality in concrete repair system by means of impact-echo signal analysis. **Construction and Building Materials**, v. 134, p. 311–323, 2017. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2016.12.064](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.064).

GOODIER, C. I.; AUSTIN, S. A.; ROBINS, P. J. Low-volume wet-process sprayed concrete: Hardened properties. **Materials and Structures**, v. 41, n. 1, p. 99–111, 2008. DOI: [10.1617/s11527-007-9222-4](https://doi.org/10.1617/s11527-007-9222-4).

GUO, Z. et al. Improving the performance of superfine-tailings cemented paste backfill with a new blended binder. **Powder Technology**, v. 394, p. 149–160, 2021. DOI: [10.1016/j.powtec.2021.08.029](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.029).

HETTIARACHCHI, H. A. C. K.; MAMPEARACHCHI, W. K. Validity of aggregate packing models in mixture design of interlocking concrete block pavers (ICBP). **Road Materials and Pavement Design**, v. 20, n. 2, p. 462–474, 2019. DOI: [10.1080/14680629.2017.1393001](https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1393001).

HORSZCZARUK, E. Abrasion resistance of high-strength concrete in hydraulic structures. **Wear**, v. 259, n. 1–6, p. 62–69, 2005. DOI: [10.1016/j.wear.2005.02.079](https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.02.079).

HUANG, D.; PONS, O.; ALBAREDA, A. Bond strength tests under pure shear and tension between masonry and sprayed mortar. **Materials**, v. 13, n. 9, 2020. DOI: [10.3390/ma13092183](https://doi.org/10.3390/ma13092183).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9277**: Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption – BET method. Genebra, 2010.

ISO. **ISO 13320**: Particle size analysis – Laser diffraction methods. Genebra, 2020.

JIANG, C. et al. Effect of polypropylene and basalt fiber on the behavior of mortars for repair applications. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2016, 2016. DOI: [10.1155/2016/5927609](https://doi.org/10.1155/2016/5927609).

JIANG, C. H. et al. Influence of polyacrylic ester and silica fume on the mechanical properties of mortar for repair application. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 9, n. 1, 2017. DOI: [10.1177/1687814016683856](https://doi.org/10.1177/1687814016683856).

JOLIN, M.; BEAUPRÉ, D. Understanding wet-mix shotcrete: mix design, specifications and placement. **Shotcrete**, 2003. Disponível em: https://shotcrete.org/wp-content/uploads/2020/01/2003Sum_jolinbeaupre.pdf. Acesso em: 30 jun. 2023.

KANTRO, D. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – a miniature slump test. **Cement, Concrete and Aggregates**, ASTM International, v. 2, n. 2, p. 95-102, 1980.

KARADUMPA, C. S.; PANCHARATHI, R. K. Developing a novel mix design methodology for slow hardening composite cement concretes through packing density approach. **Construction and Building Materials**, v. 303, 2021a. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2021.124391](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124391).

KARADUMPA, C. S.; PANCHARATHI, R. K. Influence of particle packing theories on strength and microstructure properties of composite cement-based mortars. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 10, 2021b. DOI: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003848](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003848).

LI, J.; HUANG, L.; HUANG, S. Optimisation of aggregate gradation of ultra-high-performance concrete based on the modified compressible packing model. **Magazine of Concrete Research**, v. 73, n. 20, p. 1025–1032, 2021. DOI: [10.1680/jmacr.19.00559](https://doi.org/10.1680/jmacr.19.00559).

LIU, G. et al. Rheological properties of fresh concrete and its application on shotcrete. **Construction and Building Materials**, v. 243, 2020. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2020.118180](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118180).

LIU, Y. et al. Compatibility of repair materials with substrate low-modulus cement and asphalt mortar (CA mortar). **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 304–312, 2016. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2016.08.142](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.142).

LUKOVIĆ, M. et al. A 3D lattice modelling study of drying shrinkage damage in concrete repair systems. **Materials**, v. 9, n. 7, 2016. DOI: [10.3390/MA9070575](https://doi.org/10.3390/MA9070575).

LUKOVIĆ, M. et al. Micromechanical study of the interface properties in concrete repair systems. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 12, n. 9, p. 320–339, 2014. DOI: [10.3151/jact.12.320](https://doi.org/10.3151/jact.12.320).

LUKOVIC, M.; YE, G. Effect of moisture exchange on interface formation in the repair system studied by X-ray absorption. **Materials**, v. 9, 2016. DOI: [10.3390/ma9010002](https://doi.org/10.3390/ma9010002).

MARCHETTI, G. et al. Assessment of packing, flowability, hydration kinetics, and strength of blended cements with illitic calcined shale. **Construction and Building Materials**, v. 254, 2020. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2020.119042](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119042).

MC-BAUCHEMIE. **MC-PowerFlow 1180**. Ficha técnica, Brasil, 2022. Disponível em: https://www.mc-bauchemie.com.br/assets/downloads/products/pt-BR/fichas_tecnicas/MC-PowerFlow%201180.pdf. Acesso em: 30 jun. 2023.

MEHDIPOUR, I.; KHAYAT, K. H. Understanding the role of particle packing characteristics in rheo-physical properties of cementitious suspensions: A literature review. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 340–353, 2018. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2017.11.147](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.147).

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: Microestrutura, propriedades e materiais. Coordenadora e editora: Nicole Pagan Hasparyk. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELLO, C. W. **Influência dos prâmetros de forma do agregado na formulação de argamassas de projeção**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/200556>. Acesso em: 30 jun. 2023.

MOMBER, A; KOVACEVIC, R. Fundamental investigations on concrete wear by high velocity water flow. **Wear**, v. 177, p. 55–62, 1994. DOI: [10.1016/0043-1648\(94\)90117-1](https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)90117-1).

MÜLLER, H. S. et al. Innovative solutions for the construction and the repair of hydraulic structures. **Procedia Engineering**, v. 54, p. 22–38, 2013. DOI: [10.1016/j.proeng.2013.03.004](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.004).

PAN, G. et al. A study of the effect of rheological properties of fresh concrete on shotcrete-rebound based on different additive components. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 1069–1080, 2019. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2019.07.060](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.060).

PENG, Y. et al. Effect of packing density according to CPM on the rheology of cement-fly ash-slag paste. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 8, 2021. DOI: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003823](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003823).

PINHO, J. R. S. et al. Avaliação de sistemas de reparo de superfícies de concreto úmidas de uhe's submetidas à erosão por abrasão hidráulica. In: **XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens**, Belém, 2007. Disponível em: <https://dynamistechne.files.wordpress.com/2018/07/2007-cbdb-avaliacao-de-sistemas-de-reparo-de-superficies-de-concreto-umidas-de-uhe-s-submetidas-a-erosao-por-abrasao-hidraulica.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2023.

PRADHAN, S.; KUMAR, S.; BARAI, S. V. Recycled aggregate concrete: Particle Packing Method (PPM) of mix design approach. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 269–284, 2017. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2017.06.171](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.171).

PUENTE DE ANDRADE, G. et al. Design of structural concrete mixtures containing fine recycled concrete aggregate using packing model. **Construction and Building Materials**, v. 252, 2020. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2020.119091](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119091).

RAMPANELLI, C. H. O. **Proporcionamento de materiais cimentícios para reparo de estruturas hidráulicas empregando modelo de empacotamento de partículas**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/6441;jsessionid=CD5F52E831C1623EAC922BD1C76312BF>. Acesso em: 30 jun. 2023.

RASHID, K. et al. Experimental investigation of the bond strength between new to old concrete using different adhesive layers. **Construction and Building Materials**, v. 249, 2020. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2020.118798](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118798).

ROBERTSON, K. The use of shotcrete as a repair process for structural concrete repair. **Concrete Repair Bulletin**, v. 28, n. 5, 2015. Disponível em: https://cdn.ymaws.com/www.icri.org/resource/resmgr/crb/2015septoct/CRBSeptOct15_Robertson.pdf. Acesso em: 30 jun. 2023.

ROQUIER, G. The 4-parameter Compressible Packing Model (CPM) including a critical cavity size ratio. In: **EPJ Web of Conferences**, v. 140, 2017. DOI: [10.1051/epjconf/201714002009](https://doi.org/10.1051/epjconf/201714002009).

ROQUIER, G. A Theoretical Packing Density Model (TPDM) for ordered and disordered packings. **Powder Technology**, v. 344, p. 343–362, 2019. DOI: [10.1016/j.powtec.2018.12.033](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.033).

SANTANA, H. et al. Métodos de dosagem de matrizes cimentícias. In: RIBEIRO, D. et al. **Princípios da ciência dos materiais cimentícios: Produção, reações, aplicações e avanços tecnológicos**. 1. ed. Curitiba: Appris, 2021. cap. 8, p.369-440.

SANTOS, B.; AMORIM JUNIOR, N.; RIBEIRO, D. Degradação das matrizes cimentícias. In: RIBEIRO, D. et al. **Princípios da ciência dos materiais cimentícios: Produção, reações, aplicações e avanços tecnológicos**. 1. ed. Curitiba: Appris, 2021. cap. 9, p.441-520.

SANTOS, T.; NETO, J.; RIBEIRO, D. Técnicas de caracterização de matrizes cimentícias. In: RIBEIRO, D. et al. **Princípios da ciência dos materiais cimentícios: Produção, reações, aplicações e avanços tecnológicos**. 1. ed. Curitiba: Appris, 2021. cap. 5, p.185-268.

SEFF, L. et al. Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 7, p. 2487–2491, 2009. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2009.02.005](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.005).

SIQUEIRA, T. et al. Reologia das matrizes cimentícias. In: RIBEIRO, D. et al. **Princípios da ciência dos materiais cimentícios: Produção, reações, aplicações e avanços tecnológicos**. 1. ed. Curitiba: Appris, 2021. cap. 6, p.269-306.

SKOMINAS, R. et al. Evaluation of cement mortar suitability for repairing concrete in hydraulic structures. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 21, n. 7, p. 2814–2820, 2017. DOI: [10.1007/s12205-017-1066-z](https://doi.org/10.1007/s12205-017-1066-z).

SLOVINSKI, I. G. **Determinação das emissões de CO₂ e energia incorporada de argamassas de revestimento na fase de execução: estudo de caso de Foz do Iguaçu**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/6621>. Acesso em: 30 jun. 2023.

STOLZ, C. M.; MASUERO, A. B. Influence of grains distribution on the rheological behavior of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 177, p. 261–271, 2018. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2018.05.131](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.131).

SUN, Y. et al. Experimental study on thermal expansion property of epoxy mortar in hydraulic structure repairing. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 636, 2021. DOI: [10.1088/1755-1315/636/1/012009](https://doi.org/10.1088/1755-1315/636/1/012009).

VAN DER PUTTEN, J. et al. Determination of packing profiles for the verification of the compressible packing model in case of UHPC pastes. **Materials and Structures**, v. 50, n. 2, p. 1–14, 2017. DOI: [10.1617/s11527-016-0986-2](https://doi.org/10.1617/s11527-016-0986-2).

VAYSBURD, A. M. Holistic system approach to design and implementation of concrete repair. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 8, p. 671–678, 2006. DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2006.05.008](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.05.008).

VIAPOL. **Fiberstrand**. Ficha técnica, Brasil, 2016. Disponível em: <https://www.viapol.com.br/media/146736/ft-fiberstrand-13-05-2016.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2023.

WEI, L. et al. Rational design of lightweight cementitious composites with reinforced mechanical property and thermal insulation: Particle packing, hot pressing method, and microstructural mechanisms. **Composites Part B: Engineering**, v. 226, 2021. DOI: [10.1016/j.compositesb.2021.109333](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109333).

WONG, H. H. C.; KWAN, A. K. H. Packing density of cementitious materials: Part 1- measurement using a wet packing method. **Materials and Structures**, v. 41, n. 4, p. 689–701, 2008. DOI: [10.1617/s11527-007-9274-5](https://doi.org/10.1617/s11527-007-9274-5).

YUN, K.-K.; CHOI, S.-Y.; YEON, J. H. Effects of admixtures on the rheological properties of high-performance wet-mix shotcrete mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 194–202, 2015. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2014.12.117](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.117).

YUN, K. K. et al. Rheological behavior of high-performance shotcrete mixtures containing colloidal silica and silica fume using the Bingham model. **Materials**, v. 15, n. 2, 2022. DOI: [10.3390/ma15020428](https://doi.org/10.3390/ma15020428).

ZÁLESKÁ, M. et al. Effect of aggregate and binder type on the functional and durability parameters of lightweight repair mortars. **Sustainability**, v. 13, n. 21, p. 1–17, 2021. DOI: [10.3390/su132111780](https://doi.org/10.3390/su132111780).

ZANELATTO, K. et al. Avaliação da influência da técnica de execução no comportamento de revestimento de argamassa aplicado com projeção mecânica contínua. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 2, p. 87-109, 2013. DOI: [10.1590/S1678-86212013000200008](https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000200008).

ZHOU, Y.; JIN, H.; WANG, B. Drying shrinkage crack simulation and meso-scale model of concrete repair systems. **Construction and Building Materials**, v. 247, 2020. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2020.118566](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118566).

APÊNDICES

APÊNDICE A – RESULTADOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Tabela 23 – Diâmetros de espalhamento do ensaio de ponto de saturação do aditivo superplastificante nas pastas de cimento e das adições

| Pasta de cimento CPV ARI | | | | | |
|---------------------------------|------------|--------------------|-----------------|--------------------|------------------|
| soISP (%)* | a/s | Aditivo (g) | Água (g) | Cimento (g) | Dmed (mm) |
| 0,20 | 0,30 | 1,69 | 97,00 | 322,00 | 82,80 |
| 0,30 | 0,30 | 2,54 | 97,00 | 322,00 | 134,71 |
| 0,40 | 0,30 | 3,39 | 97,00 | 322,00 | 175,48 |
| 0,50 | 0,30 | 4,24 | 97,00 | 322,00 | 200,40 |
| Pasta de fíler calcário | | | | | |
| soISP (%)* | a/s | Aditivo (g) | Água (g) | Fíler (g) | Dmed (mm) |
| 0,20 | 0,30 | 1,59 | 91,00 | 303,00 | 159,31 |
| 0,30 | 0,30 | 2,39 | 91,00 | 303,00 | 191,17 |
| 0,40 | 0,30 | 3,19 | 91,00 | 303,00 | 203,61 |
| 0,50 | 0,30 | 3,99 | 91,00 | 303,00 | 203,71 |
| Pasta de sílica ativa | | | | | |
| soISP (%)* | a/s | Aditivo (g) | Água (g) | Sílica (g) | Dmed (mm) |
| 2,00 | 1,10 | 6,79 | 142,00 | 129,00 | 96,84 |
| 3,00 | 1,10 | 10,18 | 142,00 | 129,00 | 112,50 |
| 4,00 | 1,10 | 13,58 | 142,00 | 129,00 | 118,85 |
| 5,00 | 1,10 | 16,97 | 142,00 | 129,00 | 123,41 |
| 6,00 | 1,10 | 20,37 | 142,00 | 129,00 | 123,38 |

* $(\text{massa de sólidos do aditivo superplastificante}/\text{massa do material}) \times 100$; a/s: água/sólidos; Dmed: diâmetro médio de espalhamento.

Tabela 24 – Resultados de resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico das argamassas elaboradas no laboratório

| Arga massa | CP | Compressão (MPa) | | | Tração na flexão (MPa) | | | Módulo Estático (GPa) | Módulo Dinâmico (GPa) | |
|---------------|--------------|------------------|-------------|-------------|------------------------|-------------|-------------|-----------------------|-----------------------|-------------|
| | | 7d | 14d | 28d | 7d | 14d | 28d | 28d | 14d | 28d |
| REF | CP1 | 46,1 | 46,8 | 46,9 | 10,2 | 11,9 | 12,6 | 35,9 | 36,6 | 37,1 |
| | CP2 | 43,9 | 44,9 | 46,3 | 9,2 | 10,2 | 13,3 | 36,8 | 36,2 | 39,7 |
| | CP3 | 42,5 | 43,9 | 44,8 | 10,6 | 9,9 | 12,4 | 35,4 | 36,2 | 36,6 |
| | CP4 | 43,9 | 41,9 | 47,3 | - | - | - | - | - | - |
| | CP5 | 43,8 | 41,9 | 39,3 | - | - | - | - | - | - |
| | CP6 | 42,1 | 44,7 | 45,3 | - | - | - | - | - | - |
| | Média | 43,7 | 44,0 | 45,0 | 10,0 | 10,7 | 12,8 | 36,0 | 36,3 | 37,8 |
| Desvio | 1,39 | 1,91 | 2,95 | 0,71 | 1,10 | 0,48 | 0,71 | 0,21 | 1,65 | |
| A5 | CP1 | 44,1 | 45,0 | 47,2 | 10,8 | 10,1 | 13,2 | 38,5 | 35,9 | 36,7 |
| | CP2 | 46,0 | 46,1 | 42,6 | 13,2 | 13,1 | 13,6 | 37,7 | 36,1 | 36,6 |
| | CP3 | 44,0 | 49,1 | 49,2 | 11,9 | 8,4 | 13,0 | 36,2 | 36,1 | 36,6 |
| | CP4 | 47,0 | 50,8 | 47,8 | - | - | - | - | - | - |
| | CP5 | 47,1 | 46,6 | 48,6 | - | - | - | - | - | - |
| | CP6 | 46,1 | 43,4 | 48,6 | - | - | - | - | - | - |
| | Média | 45,7 | 46,8 | 47,3 | 12,0 | 10,5 | 13,2 | 37,5 | 36,0 | 36,6 |
| Desvio | 1,39 | 2,68 | 2,39 | 1,21 | 2,39 | 0,34 | 1,17 | 0,09 | 0,05 | |
| A7 | CP1 | 45,4 | 46,5 | 45,6 | 11,2 | 12,8 | 16,5 | 37,0 | 36,9 | 38,1 |
| | CP2 | 49,2 | 38,4 | 38,5 | 11,1 | 13,0 | 14,9 | 35,7 | 36,9 | 37,8 |
| | CP3 | 46,4 | 35,4 | 50,2 | 11,4 | 9,6 | 13,1 | 37,0 | 36,8 | 37,8 |
| | CP4 | 45,7 | 54,7 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| | CP5 | 43,5 | 59,0 | 51,8 | - | - | - | - | - | - |
| | CP6 | 44,9 | 49,6 | 53,7 | - | - | - | - | - | - |
| | Média | 45,8 | 47,2 | 48,0 | 11,2 | 11,8 | 14,8 | 36,6 | 36,9 | 37,9 |
| Desvio | 1,91 | 9,13 | 5,42 | 0,15 | 1,87 | 1,69 | 0,75 | 0,07 | 0,21 | |
| A9 | CP1 | 45,1 | 41,7 | 51,9 | 11,2 | 13,0 | 15,4 | 35,6 | 35,1 | 35,6 |
| | CP2 | 45,3 | 44,3 | 62,3 | 11,0 | 13,3 | 13,8 | 34,9 | 34,7 | 35,3 |
| | CP3 | 43,8 | 39,4 | 56,1 | 9,6 | 11,5 | 12,6 | 34,9 | 34,7 | 35,7 |
| | CP4 | 48,5 | 48,9 | 55,6 | - | - | - | - | - | - |
| | CP5 | 43,3 | 47,5 | 55,5 | - | - | - | - | - | - |
| | CP6 | 45,1 | 46,3 | 59,4 | - | - | - | - | - | - |
| | Média | 45,2 | 44,7 | 56,8 | 10,6 | 12,6 | 13,9 | 35,1 | 34,8 | 35,5 |
| Desvio | 1,83 | 3,62 | 3,60 | 0,88 | 0,97 | 1,41 | 0,40 | 0,19 | 0,18 | |

Tabela 25 – Resultados de massa específica, índice de vazios e absorção de água das argamassas elaboradas no laboratório

| Argamassa | CP | Massa específica (g/cm ³) | Índice de vazios (%) | Absorção de água (%) |
|-----------|---------------|---------------------------------------|----------------------|----------------------|
| REF | CP1 | 2,339 | 10,48 | 5,00 |
| | CP2 | 2,343 | 10,40 | 4,95 |
| | CP3 | 2,337 | 10,39 | 4,96 |
| | Média | 2,340 | 10,42 | 4,97 |
| | Desvio | 0,003 | 0,047 | 0,026 |
| A5 | CP1 | 2,386 | 11,26 | 5,32 |
| | CP2 | 2,382 | 11,19 | 5,29 |
| | CP3 | 2,382 | 10,73 | 5,05 |
| | Média | 2,383 | 11,06 | 5,22 |
| | Desvio | 0,002 | 0,286 | 0,149 |
| A7 | CP1 | 2,376 | 13,29 | 6,45 |
| | CP2 | 2,384 | 13,11 | 6,33 |
| | CP3 | 2,388 | 12,84 | 6,17 |
| | Média | 2,383 | 13,08 | 6,32 |
| | Desvio | 0,007 | 0,224 | 0,141 |
| A9 | CP1 | 2,383 | 13,41 | 6,50 |
| | CP2 | 2,397 | 13,18 | 6,33 |
| | CP3 | 2,363 | 13,00 | 6,33 |
| | Média | 2,381 | 13,20 | 6,39 |
| | Desvio | 0,017 | 0,205 | 0,099 |

Tabela 26 – Resultados de resistência à compressão, massa específica, índice de vazios e absorção de água das argamassas elaboradas no campo

| Argamassa | CP | Resistência à compressão (MPa) | Massa específica (g/cm ³) | Índice de vazios (%) | Absorção de água (%) |
|---------------|---------------|--------------------------------|---------------------------------------|----------------------|----------------------|
| REF | CP1 | 38,5 | 2,404 | 16,79 | 8,39 |
| | CP2 | 41,4 | 2,394 | 16,97 | 8,54 |
| | CP3 | 40,8 | 2,399 | 16,67 | 8,34 |
| | CP4 | 40,9 | - | - | - |
| | CP5 | 40,5 | - | - | - |
| | CP6 | 42,6 | - | - | - |
| | Média | 40,8 | 2,399 | 16,81 | 8,42 |
| Desvio | 1,34 | 0,005 | 0,149 | 0,101 | |
| A5 | CP1 | 47,4 | 2,361 | 16,97 | 8,66 |
| | CP2 | 50,3 | 2,421 | 17,29 | 8,64 |
| | CP3 | 46,5 | 2,407 | 17,27 | 8,67 |
| | Média | 48,1 | 2,396 | 17,18 | 8,65 |
| | Desvio | 1,99 | 0,031 | 0,178 | 0,018 |
| A7 | CP1 | 53,8 | 2,379 | 15,74 | 7,86 |
| | CP2 | 53,9 | 2,384 | 16,06 | 8,02 |
| | CP3 | 54,0 | 2,384 | 15,82 | 7,88 |
| | Média | 53,9 | 2,382 | 15,87 | 7,92 |
| | Desvio | 0,10 | 0,003 | 0,165 | 0,091 |
| A9 | CP1 | 57,7 | 2,350 | 15,09 | 7,57 |
| | CP2 | 53,4 | 2,369 | 14,94 | 7,41 |
| | CP3 | 53,2 | 2,360 | 14,87 | 7,40 |
| | Média | 54,8 | 2,360 | 14,97 | 7,46 |
| | Desvio | 2,54 | 0,010 | 0,115 | 0,093 |

Tabela 27 – Resultados de resistência de aderência à tração das argamassas elaboradas no campo

| CP | Resistência de aderência à tração (MPa) | | | |
|---------------|---|-------------|-------------|-------------|
| | REF | A5 | A7 | A9 |
| CP1 | 1,71 | 1,44 | 2,04 | 1,93 |
| CP2 | 1,07 | 0,89 | 1,38 | 1,16 |
| CP3 | 1,89 | 1,85 | 2,55 | 1,00 |
| CP4 | 2,29 | 2,59 | 0,70 | 0,41 |
| CP5 | 1,18 | 3,02 | 2,06 | 1,69 |
| CP6 | 1,44 | 2,44 | 1,96 | 1,28 |
| CP7 | 1,49 | 1,91 | 2,04 | 0,95 |
| CP8 | 1,74 | 1,52 | 1,33 | 2,06 |
| CP9 | 1,90 | 1,83 | 1,74 | 2,00 |
| CP10 | 1,81 | 1,71 | 1,42 | 2,57 |
| CP11 | 1,90 | 3,51 | 1,52 | - |
| CP12 | 1,76 | 2,56 | 0,58 | - |
| CP13 | 2,08 | 2,15 | 2,23 | - |
| CP14 | 1,06 | 2,16 | 1,31 | - |
| CP15 | 0,58 | 1,92 | 1,02 | - |
| CP16 | 1,49 | 3,52 | 1,96 | - |
| CP17 | 1,57 | 2,35 | 1,40 | - |
| CP18 | 1,44 | 1,45 | 1,31 | - |
| CP19 | 1,97 | 1,47 | 1,32 | - |
| CP20 | 1,65 | 1,59 | 1,76 | - |
| CP21 | 2,74 | - | 1,31 | - |
| CP22 | 1,92 | - | - | - |
| Média | 1,67 | 2,09 | 1,57 | 1,51 |
| Desvio | 0,46 | 0,69 | 0,49 | 0,65 |

Tabela 28 – Resultados de perda de massa por abrasão hidráulica das argamassas elaboradas no campo

| Amostra/Idades | Perdas de massa por abrasão hidráulica (%) | | | |
|----------------------------|--|------|------|------|
| | REF* | A5 | A7 | A9 |
| Amostra 1 – 35 dias | 4,93 | 3,53 | 7,21 | 5,27 |
| Amostra 2 – 55 dias | 4,13 | 5,04 | 4,50 | 4,47 |

*As duas amostras à mesma idade de 48 dias.

APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA

Tabela 29 – Análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias das argamassas elaboradas no laboratório

| Variável de resposta: Resistência à compressão aos 28 dias – Argamassas Laboratório | | | | | |
|--|------------|---------------|----------------|----------------|-------------------|
| Variável controlada: Argamassas | | | | | |
| ANOVA | | | | | |
| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr (>F) |
| Argamassas | 3 | 481 | 160,3 | 11,29 | 0,00015 |
| Resíduo | 20 | 284 | 14,2 | - | - |
| Teste de Tukey (p-value) | | | | | |
| Argamassas | REF | A5 | A7 | A9 | |
| REF | - | 0,7034491 | 0,5077190 | 0,0001416 | |
| A5 | 0,7034491 | - | 0,9875474 | 0,0016496 | |
| A7 | 0,5077190 | 0,9875474 | - | 0,0034764 | |
| A9 | 0,0001416 | 0,0016496 | 0,0034764 | - | |

Tabela 30 – Análise estatística da resistência à tração na flexão aos 28 dias das argamassas elaboradas no laboratório

| Variável de resposta: Resistência à tração na flexão aos 28 dias – Argamassas Laboratório | | | | | |
|--|------------|---------------|----------------|----------------|-------------------|
| Variável controlada: Argamassas | | | | | |
| ANOVA | | | | | |
| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr (>F) |
| Argamassas | 3 | 7,027 | 2,342 | 1,811 | 0,223 |
| Resíduo | 8 | 10,348 | 1,294 | - | - |
| Teste de Tukey (p-value) | | | | | |
| Argamassas | REF | A5 | A7 | A9 | |
| REF | - | 0,9562028 | 0,2046266 | 0,6341719 | |
| A5 | 0,9562028 | - | 0,3872515 | 0,8887010 | |
| A7 | 0,2046266 | 0,3872515 | - | 0,7663297 | |
| A9 | 0,6341719 | 0,8887010 | 0,7663297 | - | |

Tabela 31 – Análise estatística do módulo de elasticidade estático aos 28 dias das argamassas elaboradas no laboratório

| Variável de resposta: Módulo de elasticidade estático aos 28 dias – Argamassas Laboratório | | | | | |
|---|------------|---------------|----------------|----------------|-------------------|
| Variável controlada: Argamassas | | | | | |
| ANOVA | | | | | |
| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr (>F) |
| Argamassas | 3 | 8,593 | 2,8644 | 4,418 | 0,0413 |
| Resíduo | 8 | 5,187 | 0,6483 | - | - |
| Teste de Tukey (p-value) | | | | | |
| Argamassas | REF | A5 | A7 | A9 | |
| REF | - | 0,2082457 | 0,8475922 | 0,5497436 | |
| A5 | 0,2082457 | - | 0,5497436 | 0,0308012 | |
| A7 | 0,8475922 | 0,5497436 | - | 0,2082457 | |
| A9 | 0,5497436 | 0,0308012 | 0,2082457 | - | |

Tabela 32 – Análise estatística do módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias das argamassas elaboradas no laboratório

| Variável de resposta: Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias – Argamassas Laboratório | | | | | |
|---|------------|---------------|----------------|----------------|-------------------|
| Variável controlada: Argamassas | | | | | |
| ANOVA | | | | | |
| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr (>F) |
| Argamassas | 3 | 11,187 | 3,729 | 5,351 | 0,0258 |
| Resíduo | 8 | 5,575 | 0,697 | - | - |
| Teste de Tukey (p-value) | | | | | |
| Argamassas | REF | A5 | A7 | A9 | |
| REF | - | 0,3864384 | 0,9982482 | 0,0425958 | |
| A5 | 0,3864384 | - | 0,3162145 | 0,4183766 | |
| A7 | 0,9982482 | 0,3162145 | - | 0,0338076 | |
| A9 | 0,0425958 | 0,4183766 | 0,0338076 | - | |

Tabela 33 – Análise estatística da massa específica aos 28 dias das argamassas elaboradas no laboratório**Variável de resposta:** Massa específica aos 28 dias – Argamassas Laboratório**Variável controlada:** Argamassas

| ANOVA | | | | | |
|---------------------------------|------------|---------------|----------------|----------------|-------------------|
| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr (>F) |
| Argamassas | 3 | 0,004107 | 0,0013691 | 15,52 | 0,00107 |
| Resíduo | 8 | 0,000706 | 0,0000882 | - | - |
| Teste de Tukey (p-value) | | | | | |
| Argamassas | REF | A5 | A7 | A9 | |
| REF | - | 0,0020619 | 0,0022328 | 0,0028998 | |
| A5 | 0,0020619 | - | 0,9998661 | 0,9902780 | |
| A7 | 0,0022328 | 0,9998661 | - | 0,9955891 | |
| A9 | 0,0028998 | 0,9902780 | 0,9955891 | - | |

Tabela 34 – Análise estatística do índice de vazios aos 28 dias das argamassas elaboradas no laboratório**Variável de resposta:** Índice de vazios aos 28 dias – Argamassas Laboratório**Variável controlada:** Argamassas

| ANOVA | | | | | |
|---------------------------------|------------|---------------|----------------|----------------|-----------------------|
| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr (>F) |
| Argamassas | 3 | 17,887 | 5,962 | 135 | 3,44.10 ⁻⁷ |
| Resíduo | 8 | 0,353 | 0,044 | - | - |
| Teste de Tukey (p-value) | | | | | |
| Argamassas | REF | A5 | A7 | A9 | |
| REF | - | 0,0247105 | 0,0000015 | 0,0000010 | |
| A5 | 0,0247105 | - | 0,0000116 | 0,0000075 | |
| A7 | 0,0000015 | 0,0000116 | - | 0,8951137 | |
| A9 | 0,0000010 | 0,0000075 | 0,8951137 | - | |

Tabela 35 – Análise estatística da absorção de água aos 28 dias das argamassas elaboradas no laboratório**Variável de resposta:** Absorção de água aos 28 dias – Argamassas Laboratório**Variável controlada:** Argamassas

| ANOVA | | | | | |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|
| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr (>F) |
| Argamassas | 3 | 4,829 | 1,6096 | 122,4 | 5,04.10 ⁻⁷ |
| Resíduo | 8 | 0,105 | 0,0131 | - | - |
| Teste de Tukey (p-value) | | | | | |
| Argamassas | REF | A5 | A7 | A9 | |
| REF | - | 0,1150852 | 0,0000026 | 0,0000018 | |
| A5 | 0,1150852 | - | 0,0000120 | 0,0000075 | |
| A7 | 0,0000026 | 0,0000120 | - | 0,8710994 | |
| A9 | 0,0000018 | 0,0000075 | 0,8710994 | - | |

Tabela 36 – Análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias das argamassas elaboradas no campo**Variável de resposta:** Resistência à compressão aos 28 dias – Argamassas Campo***Variável controlada:** Argamassas

| ANOVA | | | | | |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------|
| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr (>F) |
| Argamassas | 3 | 379,4 | 126,45 | 48,36 | 1,8.10 ⁻⁵ |
| Resíduo | 8 | 20,9 | 2,62 | - | - |
| Teste de Tukey (p-value) | | | | | |
| Argamassas | REF | A5 | A7 | A9 | |
| REF | - | 0,0023376 | 0,0000397 | 0,0000247 | |
| A5 | 0,0023376 | - | 0,0096039 | 0,0042250 | |
| A7 | 0,0000397 | 0,0096039 | - | 0,9103931 | |
| A9 | 0,0000247 | 0,0042250 | 0,9103931 | - | |

*Foram selecionados três corpos de prova da argamassa REF com o critério de aceitar aqueles corpos de prova que difiram até $\pm 0,4$ vezes o desvio padrão, de modo que todos os grupos tenham a mesma quantidade de amostras.

Tabela 37 – Análise estatística da massa específica aos 28 dias das argamassas elaboradas no campo

| Variável de resposta: Massa específica aos 28 dias – Argamassas Campo | | | | | |
|--|------------|---------------|----------------|----------------|-------------------|
| Variável controlada: Argamassas | | | | | |
| ANOVA | | | | | |
| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr (>F) |
| Argamassas | 3 | 0,002910 | 0,0009700 | 3,47 | 0,0708 |
| Resíduo | 8 | 0,002236 | 0,0002795 | - | - |
| Teste de Tukey (p-value) | | | | | |
| Argamassas | REF | A5 | A7 | A9 | |
| REF | - | 0,9971566 | 0,6326413 | 0,0789090 | |
| A5 | 0,9971566 | - | 0,7406045 | 0,1038709 | |
| A7 | 0,6326413 | 0,7406045 | - | 0,4016430 | |
| A9 | 0,0789090 | 0,1038709 | 0,4016430 | - | |

Tabela 38 – Análise estatística do índice de vazios aos 28 dias das argamassas elaboradas no campo

| Variável de resposta: Índice de vazios aos 28 dias – Argamassas Campo | | | | | |
|--|------------|---------------|----------------|----------------|-----------------------|
| Variável controlada: Argamassas | | | | | |
| ANOVA | | | | | |
| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr (>F) |
| Argamassas | 3 | 8,872 | 2,9574 | 125,1 | 4,63.10 ⁻⁷ |
| Resíduo | 8 | 0,189 | 0,0236 | - | - |
| Teste de Tukey (p-value) | | | | | |
| Argamassas | REF | A5 | A7 | A9 | |
| REF | - | 0,0754620 | 0,0003234 | 0,0000022 | |
| A5 | 0,0754620 | - | 0,0000297 | 0,0000005 | |
| A7 | 0,0003234 | 0,0000297 | - | 0,0004152 | |
| A9 | 0,0000022 | 0,0000005 | 0,0004152 | - | |

Tabela 39 – Análise estatística da absorção de água aos 28 dias das argamassas elaboradas no campo

| Variável de resposta: Absorção de água aos 28 dias – Argamassas Campo | | | | | |
|--|------------|---------------|----------------|----------------|-----------------------|
| Variável controlada: Argamassas | | | | | |
| ANOVA | | | | | |
| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr (>F) |
| Argamassas | 3 | 2,5660 | 0,8553 | 125,2 | 4,61.10 ⁻⁷ |
| Resíduo | 8 | 0,0546 | 0,0068 | - | - |
| Teste de Tukey (p-value) | | | | | |
| Argamassas | REF | A5 | A7 | A9 | |
| REF | - | 0,0369463 | 0,0003247 | 0,0000027 | |
| A5 | 0,0369463 | - | 0,0000209 | 0,0000005 | |
| A7 | 0,0003247 | 0,0000209 | - | 0,0006115 | |
| A9 | 0,0000027 | 0,0000005 | 0,0006115 | - | |

Tabela 40 – Análise estatística da resistência de aderência à tração aos 28 dias das argamassas elaboradas no campo

| Variável de resposta: Resistência de aderência à tração aos 28 dias – Argamassas Campo* | | | | | |
|--|------------|---------------|----------------|----------------|-------------------|
| Variável controlada: Argamassas | | | | | |
| ANOVA | | | | | |
| | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr (>F) |
| Argamassas | 3 | 2,392 | 0,7973 | 5,753 | 0,00254 |
| Resíduo | 36 | 4,990 | 0,1386 | - | - |
| Teste de Tukey (p-value) | | | | | |
| Argamassas | REF | A5 | A7 | A9 | |
| REF | - | 0,0833899 | 0,6166878 | 0,7278651 | |
| A5 | 0,0833899 | - | 0,0039830 | 0,0065759 | |
| A7 | 0,6166878 | 0,0039830 | - | 0,9977550 | |
| A9 | 0,7278651 | 0,0065759 | 0,9977550 | - | |

*Foram selecionados dez corpos de prova para cada argamassa devido que a A9 possui só essa quantidade de leituras válidas. O critério de aceitação para a REF foi de até $\pm 0,49$ vezes o desvio padrão, para a A5 foi de até $\pm 0,70$ vezes o desvio padrão e para a A7 foi de até $\pm 0,53$ vezes o desvio padrão, de modo que todos os grupos tenham a mesma quantidade de amostras.

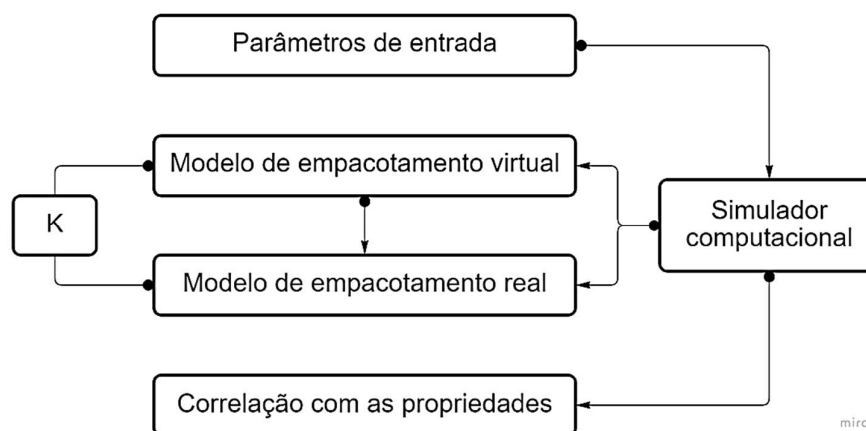
ANEXOS

ANEXO A – DOSAGEM POR MEIO DO MECFOR

A.1 SIMULADOR MECFOR

A explicação do funcionamento do simulador bem como a entrada e saída dos dados no MECFOR é descrito com base ao trabalho do autor (FORMAGINI, 2005). O *software* MECFOR foi desenvolvido por Formagini (2005) para a dosagem de materiais cimentícios. Este simulador computacional é baseado na teoria do Modelo de Empacotamento Compressível e está escrito em linguagem FORTRAN. Na Figura 27 podem-se observar os módulos do MECFOR.

Figura 27 – Módulos do MECFOR



Fonte: Formagini (2005).

De acordo com o autor, o primeiro módulo faz a leitura dos parâmetros de entrada, os quais são: o número de materiais M , o número de classes N , a massa específica m_e , compacidade real C , protocolo de empacotamento K , diâmetro médio experimental $d_{med}^{experimental}$, diâmetro máximo d_{max} , diâmetro mínimo d_{min} e a fração volumétrica de cada classe y_{mn} . Com esses dados, o simulador ordena primeiramente de maior a menor os diâmetros médios, $d_{med} = \sqrt{d_{min} \times d_{max}}$, dos materiais e das classes para logo calcular os efeitos de afastamento a_{ij} e de parede b_{ij} entre as classes, descritas nas equações (2.5) e (2.6), respectivamente.

A partir da compacidade real C de cada material, o MECFOR adota a hipótese que todas as classes N do material possuem a mesma compacidade virtual β . Assim, a compacidade virtual da mistura γ e a compacidade real da mistura α_r contendo os M materiais de N classes podem ser calculadas com as equações (2.4) e (2.7).

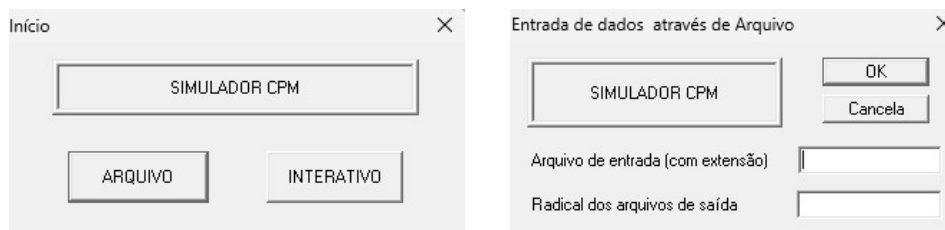
O *software* permite a configuração manual das frações volumétricas p_m de cada material, podendo também ser otimizadas dentre valores de uma faixa em função da maximização por iteração da compacidade real α_t da mistura seca, tendo em consideração que a soma das frações volumétricas de todos os materiais é igual a 1 e que a fração volumétrica de cada classe não é alterada para não modificar a granulometria de cada material.

Uma vez obtida a compacidade real da mistura α_t no MECFOR pode-se fazer a predição de algumas propriedades do material nos estados frescos e endurecidos por meio de formulações teóricas.

A.1.1 Entrada e saída de dados do *software* MECFOR

A entrada de dados é através de um arquivo de texto com extensão “.txt”. Ao executar o MECFOR é aberta uma caixa de diálogo (Figura 28) onde deve ser informado o nome do arquivo de entrada de dados e o nome do arquivo de saída.

Figura 28 – Caixa de diálogo para entrada ao MECFOR



Fonte: Adaptado de Formagini (2005).

Na Figura 29 é mostrado um exemplo de arquivo de entrada ao MECFOR.

Figura 29 – Exemplo de arquivo de entrada ao MECFOR

```

5 5 0 0

t t t

R05      3 1000 0.594 9.0 2 1 0.60
R1       3 1000 0.613 9.0 2 1 1.10
R2       3 1000 0.620 9.0 2 1 2.20
R4       3 1000 0.629 9.0 2 1 4.45
R8       3 1000 0.632 9.0 2 1 8.90

0.50 0.63 100.00 0.00 0.00 0.00 0.00
1.00 1.25 0.00 100.00 0.00 0.00 0.00
2.00 2.50 0.00 0.00 100.00 0.00 0.00
4.00 5.00 0.00 0.00 0.00 100.00 0.00
8.00 10.00 0.00 0.00 0.00 0.00 100.00

0.05 0.95 0.20
0.05 0.95 0.20
0.05 0.95 0.20
0.05 0.95 0.20
0.05 0.95 0.20

6.7 9.0 1.0 1.1 40 180 2

3

20.0 20.0 20.0 20.0 20.0
6.7 9.0 1.0 1.1 40 180 2

20.0 0.0 0.0 0.0 80.0
6.7 9.0 1.0 1.1 40 180 2

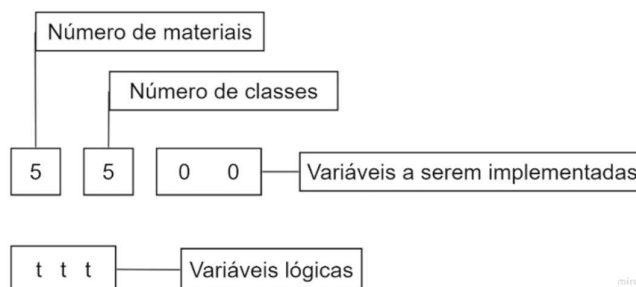
40.0 0.0 0.0 0.0 60.0
6.7 9.0 1.0 1.1 40 180 2

```

Fonte: Adaptado de Formagini (2005).

A primeira parte corresponde ao número de materiais e número de classes denominando-as variáveis principais e a continuação encontram-se as variáveis lógicas do tipo “true” ou “false” que estão ligadas sub-rotinas (Figura 30).

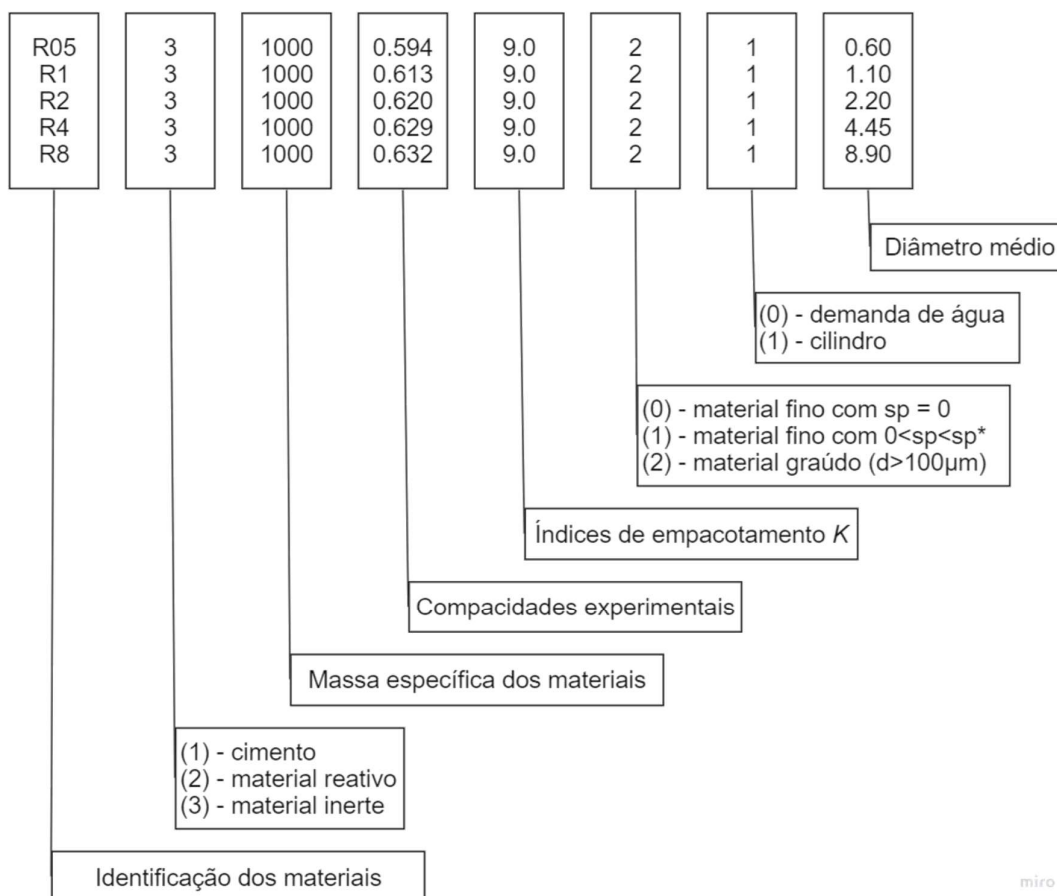
Figura 30 – Variáveis principais e variáveis lógicas



Fonte: Formagini (2005).

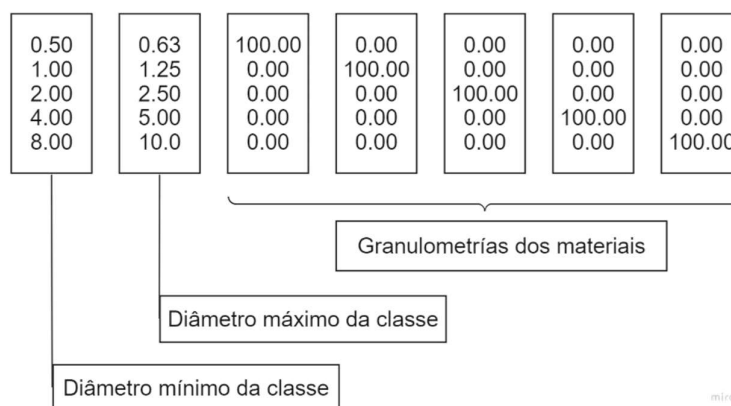
Logo são colocadas as propriedades dos materiais da mistura conforme a Figura 31. Enquanto que na Figura 32 estão os retidos acumulados de cada material e as colunas correspondentes aos diâmetros mínimo e máximos de cada classe.

Figura 31 – Propriedades dos materiais



Fonte: Formagini (2005).

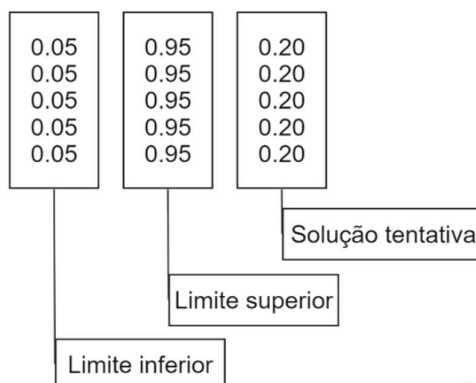
Figura 32 – Diâmetro das classes e granulometria de cada material



Fonte: Formagini (2005).

As frações volumétricas de cada material podem ser configuradas nas colunas da Figura 33, onde na primeira coluna pode-se estabelecer o limite inferior, na segunda coluna o limite superior e na terceira pode-se indicar um valor aproximado para cada fração.

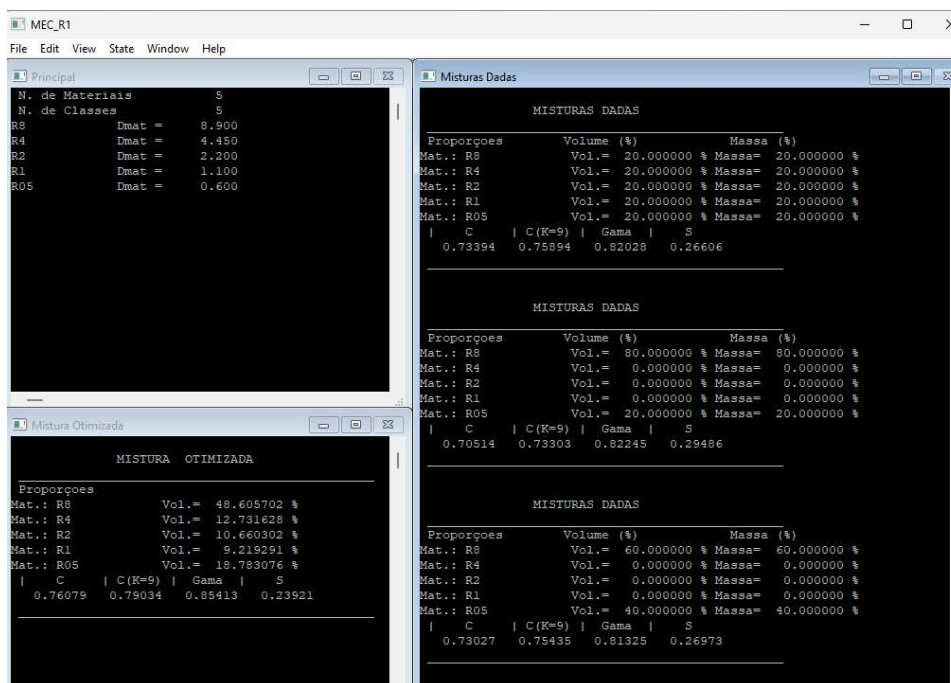
Figura 33 – Frações volumétricas de cada material



Fonte: Formagini (2005).

Os outros valores apresentados na Figura 29 correspondem a misturas de interesse, onde o MECFOR calcula as compacidades dessas misturas e as apresenta junto com a mistura otimizada na tela de saída do MECFOR (Figura 34) no caso que seja de interesse a comparação entre elas.

Figura 34 – Tela de saída do MECFOR



Fonte: Adaptado de Formagini (2005).

Finalmente, na Figura 35 é mostrada a mistura otimizada, onde são dados os volumes de cada material e a compacidade da mistura.

Figura 35 – Mistura otimizada



```
MISTURA OTIMIZADA
```

Proporções

| | | |
|-----------|-------|-------------|
| Mat.: R8 | Vol.= | 48.605702 % |
| Mat.: R4 | Vol.= | 12.731628 % |
| Mat.: R2 | Vol.= | 10.660302 % |
| Mat.: R1 | Vol.= | 9.219291 % |
| Mat.: R05 | Vol.= | 18.783076 % |

| C | C (K=9) | Gama | S |
|---------|---------|---------|---------|
| 0.76079 | 0.79034 | 0.85413 | 0.23921 |

Fonte: Adaptado de Formagini (2005).