



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

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPGECI)**

**PROPORCIONAMENTO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS PARA
REPARO DE ESTRUTURAS HIDRÁULICAS EMPREGANDO MODELO
DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS**

CARLOS HENRIQUE OLIVEIRA RAMPANELLI

Foz do Iguaçu

2021



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

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPGECI)**

**PROPORCIONAMENTO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS PARA
REPARO DE ESTRUTURAS HIDRÁULICAS EMPREGANDO MODELO
DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS**

CARLOS HENRIQUE OLIVEIRA RAMPANELLI

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.

Orientadora: Profa. Dra. Edna Possan
Coorientadores: Prof. Dr. Rogério Luis Rizzi e
Profa. Dra. Giovanna Patrícia Gava Oyamada

Foz do Iguaçu

2021

CARLOS HENRIQUE OLIVEIRA RAMPANELLI

**PROPORCIONAMENTO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS PARA
REPARO DE ESTRUTURAS HIDRÁULICAS EMPREGANDO MODELO
DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS**

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

Orientadora: Prof. Dra. Edna Possan
UNILA

Coorientador: Prof. Dr. Rogério Luis Rizzi
UNIOESTE

Coorientadora: Prof. Dra. Giovanna Patrícia Gava
Oyamada
UNIOESTE

Prof. Dr. Oswaldo Cascudo Matos
UFG

Prof. Dr. Sidiclei Formagini
UFMS

Foz do Iguaçu, 3 de setembro de 2021

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

R177

Rampanelli, Carlos Henrique Oliveira.

Proporcionamento de materiais cimentícios para reparo de estruturas hidráulicas empregando modelo de empacotamento de partículas / Carlos Henrique Oliveira Rampanelli. - Foz do Iguaçu-PR, 2021.

121 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Foz do Iguaçu-PR, 2021.

Orientador: Edna Possan.

Coorientador: Rogério Luis Rizzi.

Coorientador: Giovanna Patrícia Gava Oyamada.

1. Reparo superficial. 2. Critérios de desempenho. 3. Compatibilidade dimensional. 4. Compacidade. 5. Consumo de cimento. I. Possan, Edna. II. Rizzi, Rogério Luis. III. Oyamada, Giovanna Patrícia Gava. IV. Título.

CDU 69.059.2

*À todos que contribuíram com
a realização deste trabalho.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me inspirar o amor, a fé e a busca pelo aperfeiçoamento moral, pela oportunidade da vida e pelo suporte em momentos turbulentos que são naturais à jornada nesse mundo.

Aos meu pais Claudir e minha mãe Clarice, pelo esforço e apoio incondicionais em todas as minhas escolhas, pelo amor e ensinamentos transmitidos pelas atitudes de humildade, trabalho duro e respeito. Agradeço também à minha irmã Carla, pelo carinho, admiração, paciência e por me defender mesmo quando estou errado. Enfim, tudo o que eu sou de bom eu devo a vocês.

Aos meus queridos orientadores que eu admiro muito. Agradeço, com muito carinho, por confiarem em mim e por toda a paciência, amizade, profissionalismo e dedicação à execução deste trabalho. Sendo grato à Professora Edna pelo característico alto astral, ideias inovadoras, bons conselhos e pelo esmero na condução deste trabalho. Ao Professor Rogério, também orientador nos projetos de pesquisa, por ensinar a importância do conhecimento fora da “caixa preta”, pelas proveitosas e enriquecedoras conversas durante as várias viagens e também por sempre estar disposto a me auxiliar com quaisquer tipos de problemas. À Professora Giovanna, também orientadora na graduação, pelo apoio de sempre na solução de dúvidas inerentes ao laboratório e à Tecnologia do Concreto, motivando a busca pelo contínuo aprendizado nessa área.

Aos Professores Sidiclei Formagini e Oswaldo Cascudo por aceitarem contribuir com a melhoria do presente trabalho. Agradeço a disponibilidade do Professor Sidiclei em me receber gentilmente em sua casa, me apresentar a Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS) e prestar valioso auxílio no estudo do empacotamento de partículas para a execução do proporcionamento das argamassas de reparo.

Aos colegas Leandro Reginato e Rafaela G. G. Oliveira que agora considero grandes amigos, que trabalharam muito nas principais atividades experimentais desse trabalho. Além da dedicação e competência, vocês tornaram as atividades em laboratório mais alegres e descontraídas, sem vocês o programa experimental proposto não seria realizado.

Ao Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens (PTI/Ceasb) e a Fundação Parque Tecnológico Itaipu pela coordenação do projeto de pesquisa relacionado à este trabalho e pelo financiamento das bolsas de ITI, DTI e de mestrado. Agradecendo especialmente ao Christian W. Santos pela supervisão das atividades, pela amizade e disposição em sempre ajudar em problemas de qualquer natureza. Ao Christiano W. Santos, pelas boas conversas, treinos e corridas durante o período de *home-office* que ajudaram a dar ânimo para a continuidade das tarefas da pesquisa. Aos demais integrantes do Ceasb pela amizade e boa companhia durante o dia a dia de atividades.

À todos os profissionais integrantes do Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu (LTCl), em especial ao Professor Fábio Willrich e João Bernardino que sempre contribuíram com ideias, sugestões técnicas, dados dos concretos do vertedouro e argamassas de reparo, assim como pelo auxílio na execução de ensaios no LTCl.

À Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA) e aos professores Ana C. Parapinski dos Santos, André J. Torii, César W. Mello, Dan e Kátia R. G. Punhagui do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECI) pela contribuição na minha formação. Ao Eduardo Rigo e à Dalila N. Sella, pelo auxílio e orientação durante as atividades experimentais no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) da UNILA. Aos colegas mestrandos do PPGECI por enriquecerem os momentos compartilhados durante as aulas e demais atividades do programa.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) e ao Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia (LEME) pelo espaço para execução da maioria dos ensaios experimentais, e, ao Maxer Rosa pelo apoio e boa vontade em contribuir na execução dos experimentos no LEME. Ao Fabrício M. Denes pela amizade e auxílio com as configurações do *LaTeX*. Ao amigo Pablo Chang pelo entusiasmo em ajudar no uso do *R studio*.

À Coneresuper, principalmente em nome de Maykel Rohde, Marco A. Kava e Lucas Campiol, pela troca de conhecimento, empréstimo de equipamentos, doação de insumos e fornecimento de dados para a execução do trabalho.

À Votorantim cimentos e MC-Bauchemie pela doação de materiais empregados na produção das argamassas.

*“Ainda que eu falasse as línguas dos homens e dos anjos,
e não tivesse amor, seria como o metal que soa ou como
o sino que tine.*

*E ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse
todos os mistérios e toda a ciência, e ainda que tivesse
toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes,
e não tivesse amor, nada seria”.*

(Paulo de Tarso)

RESUMO

As preocupações atuais com o desenvolvimento sustentável recomendam à reabilitação ou reparo em detrimento à demolição e reconstrução de uma estrutura em concreto. Contudo, para que esta abordagem seja eficiente faz-se necessário o uso de materiais de reparo que atendam o desempenho requerido. O comportamento em uso do sistema reparado, as características, o ambiente de exposição e as solicitações relacionadas à estrutura devem ser consideradas no projeto de reparação. No caso de estruturas sujeitas a erosão hidráulica, requer-se materiais de reparo que possuem boa aderência, adequada resistência ao desgaste superficial e principalmente reduzida variação dimensional. Um dos meios para minimizar as variações dimensionais é a redução do volume de pasta, que pode ser alcançada pelo aumento da densidade de empacotamento granular do material de reparo e pela redução do consumo de cimento. Neste sentido, a dosagem ou o proporcionamento de materiais cimentícios com métodos de empacotamento de partículas pode ser uma alternativa para a obtenção de materiais de reparo compatíveis com a estrutura a ser reparada. À vista disso, neste trabalho foram proporcionados materiais de reparo a base de cimento para emprego em estruturas hidráulicas com aplicação das concepções teóricas do empacotamento de partículas visando o comportamento em uso. O proporcionamento foi realizado a partir de um material cimentício composto por cimento Portland, sílica ativa, areia natural, aditivo superplastificante e fibra de polipropileno, contendo 548 kg/m^3 de cimento (argamassa de referência). Utilizando o Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) foram obtidas outras proporções com adição de fíler calcário, para consumos de cimento: 350, 400, 450 e 500 kg/m^3 e relação água/ligante de 0,50. Nas misturas com consumos de 350 e 548 kg/m^3 de cimento foi empregado um polímero EVA nos teores de 0,0% e 1,5%, e, 0,0%, 1,5 e 3,0% para o consumo de 450 kg/m^3 . O programa experimental foi composto por 9 misturas de materiais cimentícios com as seguintes propriedades avaliadas: índice de consistência; massa específica; resistência à tração, compressão e de aderência; módulo de elasticidade estático; dilatação térmica linear e retração por secagem; perda de massa por abrasão e erosão hidráulica. Os ensaios indicaram que as misturas dosadas por meio do MEC com menor consumo de cimento apresentam menor retração por secagem. As argamassas com 350 kg/m^3 apresentaram desempenho satisfatório para a resistência mecânica, de aderência e ao desgaste superficial em relação à argamassa de referência. A adição de polímeros não foi benéfica para o desempenho geral das argamassas. O custo e as emissões de CO_2 foram menores para as argamassas com menor consumo de cimento e sem adição de polímeros. O proporcionamento de materiais de reparo cimentícios por meio do MEC, considerando uma abordagem sistêmica, pode ser uma alternativa de interesse para o alcance de materiais de reparos de estruturas hidráulicas duráveis, com redução de custos e emissão de CO_2 , visto que as argamassas com menor consumo de cimento apresentaram valores satisfatórios frente aos critérios de desempenho da literatura.

Palavras-chaves: Reparo superficial; Critérios de desempenho; Compatibilidade dimensional; Compacidade; Consumo de cimento.

ABSTRACT

Current concerns about sustainable development recommend rehabilitation or repair rather than demolition and reconstruction of a concrete structure. However, for this approach to be efficient, it is necessary to use repair materials that meet the required performance. The behavior in the use of the repaired system, the characteristics, the exposure environment and the requests related to the structure must be considered in the repair project. In the case of structures subject to hydraulic erosion, repair materials that have good adhesion, adequate resistance to surface wear and especially reduced dimensional variation are required. One of the ways to minimize dimensional variations is to reduce the volume of paste, which can be achieved by increasing the granular packing density of the repair material and by reducing cement content. In this sense, the mix design or proportioning of cementitious materials with particle packing methods can be an alternative to obtaining repair materials compatible with the structure to be repaired. In view of that, in this work, cement-based repair materials were provided for use in hydraulic structures with the application of theoretical concepts of particle packing aiming at behavior in use. The mix design was carried out from a cementitious material composed of Portland cement, silica fume, natural sand, superplasticizer additive and polypropylene fiber, containing 548 kg/m³ of cement (reference mortar). Using the Compressible Packing Model (CPM) other proportions were obtained with the addition of limestone filler, for cement content: 350, 400, 450 and 500 kg/m³ and with a water/binder ratio kept at 0.50. In the mixtures with the content of 350 and 548 kg/m³ of cement, an EVA polymer was used in the contents of 1.5, and 1.5 and 3.0% for the content of 450 kg/m³. The experimental program consisted of 9 mixtures of cementitious materials with the following properties evaluated: consistency index; specific mass; tensile, compression and bond strength; static modulus of elasticity; linear thermal expansion and drying shrinkage; loss of mass due to abrasion and hydraulic erosion. The tests indicated that the mixtures dosed through the CPM with less cement content present less shrinkage by drying. The mortars with 350 kg/m³ showed satisfactory performance for mechanical, adhesion and surface wear resistance in relation to the reference mortar. The addition of polymers was not beneficial to the overall performance of the mortars. The cost and CO₂ emissions were lower for mortars with less cement content and without the addition of polymers. The mix design of cementitious repair materials through the CPM, considering a systemic approach, can be an interesting alternative for achieving repair materials for durable hydraulic structures with reduced costs and CO₂ emissions, since mortars with lower cement content presented satisfactory values in relation to the literature performance criteria.

Keywords: *Overlay; Performance criteria; Dimensional compatibility; Packing density; Cement content.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de falha no reparo superficial aplicado ao substrato.	26
Figura 2 – Sistema composto de um reparo superficial.	27
Figura 3 – Fatores que influenciam na durabilidade do sistema de reparo.	28
Figura 4 – Fatores de compatibilidade.	29
Figura 5 – Condições de umidade do substrato.	31
Figura 6 – Fator de empacotamento atômico.	35
Figura 7 – Efeitos de interação geométrica.	36
Figura 8 – Função $f(\phi)$ para uma mistura binária sem os efeitos a_{ij} e b_{ij}	41
Figura 9 – Índice de ligantes.	48
Figura 10 – Fluxograma do programa experimental.	50
Figura 11 – Regiões de estudo à execução de reparos.	52
Figura 12 – Determinação do teor de sólidos do aditivo.	54
Figura 13 – Determinação do ponto de saturação do aditivo nas pastas.	56
Figura 14 – Granulometria do cimento, adições minerais e areia natural.	57
Figura 15 – Ensaios realizados em máquina universal de ensaio.	61
Figura 16 – Procedimentos empregados no ensaio de resistência de aderência.	62
Figura 17 – Procedimentos empregados no ensaio de coeficiente de dilatação térmica linear.	62
Figura 18 – Aparato com relógio comparador e os corpos de prova do ensaio.	63
Figura 19 – Aparato de abrasão hidráulica e algumas fases do ensaio abrasivo.	64
Figura 20 – Esquema do corpo de prova com camada de reparo, para o ensaio de abrasão hidráulica.	64
Figura 21 – Aparato de erosão hidráulica e algumas fases do ensaio erosivo.	65
Figura 22 – Resultados de (a) resistência à compressão, (b) resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático.	69
Figura 23 – Dados de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático, assim como o teste de teste de Tukey para as argamassas de reparo.	70
Figura 24 – Dados de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático em função do consumo de cimento e do teor de polímero.	71
Figura 25 – Resistência à compressão em relação ao (a) volume de pasta e (b) Índice de ligantes.	72
Figura 26 – Confronto de resultados mecânicos entre as argamassas e o substrato: (a) resistência à compressão; (b) módulo de elasticidade.	73
Figura 27 – Resultados do ensaio de abrasão hidráulica após 72 horas.	74
Figura 28 – Resultados do ensaio de erosão hidráulica após 120 minutos.	74
Figura 29 – Curvas de perda de massa para o desgaste (a) abrasivo e (b) erosivo.	75

Figura 30 – Influência do consumo de cimento na perda de massa por abrasão hidráulica.	76
Figura 31 – Influência do consumo de cimento na perda de massa por erosão hidráulica.	76
Figura 32 – Relação da resistência à compressão e a perda de massa (a) por abrasão e (b) erosão hidráulica.	77
Figura 33 – Influência do teor de polímero na perda de massa por abrasão hidráulica.	77
Figura 34 – Influência do teor de polímero na perda de massa por erosão hidráulica.	78
Figura 35 – Confronto de resultados de perda de massa entre as argamassas e o substrato: (a) abrasão hidráulica e (b) erosão hidráulica.	78
Figura 36 – Resultados do (a) ensaio de aderência à tração e do (b) teste de Tukey.	79
Figura 37 – Resistência de aderência à tração para o consumo de cimento.	80
Figura 38 – Resistência de aderência à tração para o teor de polímero.	80
Figura 39 – Verificação do requisito para a resistência de aderência à tração.	81
Figura 40 – Resultado do ensaio de retração por secagem.	82
Figura 41 – Resultados de (a) retração por secagem aos 150 dias e (b) teste de Tukey.	83
Figura 42 – Verificação do requisito para a retração por secagem.	83
Figura 43 – Resultados de retração em função do (a) consumo de cimento e do (b) teor de polímero.	84
Figura 44 – Comparação da retração por secagem com o volume de (a) material reativo e (b) inerte.	85
Figura 45 – Valores experimentais para o (a) coeficiente de dilatação térmica linear e (b) teste de Tukey.	86
Figura 46 – Coeficiente de dilatação térmica linear em função do consumo de cimento.	87
Figura 47 – Coeficiente de dilatação térmica linear em função do teor de polímero EVA.	87
Figura 48 – Verificação do requisito para o coeficiente de dilatação térmica linear.	88
Figura 49 – Custos e emissões de CO ₂ por (a) m ³ e por (b) MPa.	88
Figura 50 – Banco de dados do MECFOR.	103
Figura 51 – Dosagem por meio do simulador MECFOR.	115
Figura 52 – Entrada simulador MECFOR.	117
Figura 53 – Exemplo de arquivo de entrada no MECFOR.	117
Figura 54 – Variáveis principais e variáveis lógicas.	118
Figura 55 – Propriedades dos materiais.	118
Figura 56 – Frações volumétricas de cada classe, y_m , delimitadas pelos diâmetros mínimo e máximo.	119
Figura 57 – Faixa das frações volumétricas, p_m , de cada material.	119
Figura 58 – Exemplo de arquivo de saída “.pro” no MECFOR.	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos gerais para o sistema de reparo.	32
Tabela 2 – Critérios de desempenho para materiais de reparo.	33
Tabela 3 – Valores do índice K	40
Tabela 4 – Variáveis de entrada dos modelos de empacotamento.	42
Tabela 5 – Modelos aplicados a dados de empacotamento experimentais de misturas binárias.	44
Tabela 6 – Trabalhos que empregaram modelos de empacotamento de partículas para dosagem de materiais a base de cimento.	45
Tabela 7 – Ações para a busca do atendimento de critérios para a durabilidade do reparo.	51
Tabela 8 – Propriedades dos concretos substrato.	52
Tabela 9 – Dados de perda de massa dos concretos substrato.	53
Tabela 10 – Proporcionamento da argamassa de reparo denominada de referência.	53
Tabela 11 – Espectrometria de fluorescência de raios X do cimento e das adições minerais.	55
Tabela 12 – Características dos materiais.	57
Tabela 13 – Especificações técnicas da fibra de polipropileno e polímero EVA.	58
Tabela 14 – Proporcionamento das misturas cimentícias em kg/m^3	59
Tabela 15 – Proporcionamento das misturas cimentícias, em massa.	59
Tabela 16 – Ensaios e normas para a avaliação das misturas dosadas.	60
Tabela 17 – Composição do substrato da placa para ensaio de aderência.	61
Tabela 18 – Custo por metro cúbico dos insumos das argamassas.	66
Tabela 19 – Emissões de CO_2 para os materiais.	67
Tabela 20 – Propriedades das argamassas de reparo no estado fresco.	68
Tabela 21 – Equações de perda de massa escritas com os valores dos parâmetros a e b ajustados.	75
Tabela 22 – Avaliação do desempenho geral dos materiais de reparo.	89
Tabela 23 – Frações volumétricas, p_m dos constituintes da mistura.	102
Tabela 24 – Proporcionamento das misturas cimentícias em quilograma por m^3 e em massa.	104
Tabela 25 – Quantidade em massa (g) para 1,5 litros da mistura.	104
Tabela 26 – Resultados no estado fresco das misturas testes.	104
Tabela 27 – Resultados no estado endurecido das misturas testes.	105
Tabela 28 – Determinação do ponto de saturação do aditivo nas pastas.	106
Tabela 29 – Resistência à compressão, tração na flexão e módulo de elasticidade estático.	107
Tabela 30 – Perda de massa (g) no ensaio de abrasão e erosão hidráulica.	108
Tabela 31 – Resistência de aderência à tração (MPa) para as argamassas de reparo.	109
Tabela 32 – Retração por secagem para as argamassas de reparo.	110
Tabela 33 – Coeficiente de dilatação térmica linear ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).	111
Tabela 34 – ANOVA para os ensaios experimentais.	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3-PPM	<i>3-parameter Particle Packing Model</i>
350P0	Argamassa com 350 kg/m ³ de cimento sem adição de polímero EVA
350P15	Argamassa com 450 kg/m ³ de cimento com 1,5% de adição de polímero EVA
4-PPM	<i>4-parameter Particle Packing Model</i>
400P0	Argamassa com 400 kg/m ³ de cimento sem adição de polímero EVA
450P0	Argamassa com 450 kg/m ³ de cimento sem adição de polímero EVA
450P15	Argamassa com 450 kg/m ³ de cimento com 1,5% de adição de polímero EVA
450P30	Argamassa com 450 kg/m ³ de cimento com 3,0% de adição de polímero EVA
500P0	Argamassa com 500 kg/m ³ de cimento sem adição de polímero EVA
548P0	Argamassa com 548 kg/m ³ de cimento sem adição de polímero EVA
548P15	Argamassa com 548 kg/m ³ de cimento com 1,5% de adição de polímero EVA
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BET	Método Brunauer, Emmett, Teller
BS	<i>British Standard</i>
CAD	Concreto de alto desempenho
CaO	Óxido de cálcio
CCC	Estrutura cristalina Cúbica de Corpo Centrado
Ceasb	Centro de estudos avançados em segurança de barragens
Cl	Cloro
CO ₂	Dióxido de carbono
CP	Cimento Portland
CP I	Cimento Portland comum
CP V	Cimento Portland de alta resistência inicial
CPs	Corpos de prova
CFC	Estrutura cristalina Cúbica de Face Centrada
CPM	<i>Compressible Packing Model</i>
CUAD	Concreto de ultra alto desempenho

CuO	Óxido de cobre
DTI	Desenvolvimento Tecnológico e Inovação
DTG	<i>Derivative thermogravimetry</i>
EN	<i>European Standard</i>
EVA	<i>Ethylene vinyl acetate</i>
Fck	Resistência característica à compressão
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
FR-X	Fluorescência de Raios-X
IC	Índice de consistência
IL	Índice de ligantes
ITI	Iniciação Tecnológica e Inovação
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
K ₂ O	Óxido de potássio
LADEMA	Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais
LEME	Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia
LI	Limite inferior
LPDM	<i>Linear Packing Density Model</i>
LS	Limite superior
LTCI	Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu
M1	Mistura 1
M2	Mistura 2
MEC	Modelo de Empacotamento Compressível
MgO	Óxido de magnésio
MnO	Óxido de manganês
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
Na ₂ O	Óxido de sódio
NBR	Norma Brasileira Registrada
NiO	Óxido de níquel
NM	<i>Norma Mercosur</i>
P ₂ O ₅	Pentóxido de difósforo
pH	Potencial de hidrogênio
PTI	Parque Tecnológico Itaipu
R	Reparo
R1, ..., R6	Repetições dos experimentos

Rb ₂ O	Óxido de rubídio
RCA	<i>Recycled concrete aggregate</i>
REF	Referência
S	Substrato
SA	Substrato A
SB	Substrato B
SiO ₂	Dióxido de silício
SO ₃	Óxido sulfúrico
SrO	Óxido de estrôncio
TG	Termogravimetria
TiO ₂	Dióxido de Titânio
TPDM	<i>Theoretical Packing Density Model</i>
UFMS	Universidade Federal do Mato Grosso do Sul
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino Americana
UNIOESTE	Universidade Estadual do Oeste do Paraná
USP	Universidade de São Paulo
V ₂ O ₅	Pentóxido de vanádio
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development Cement Sustainability</i>
ZnO	Óxido de zinco
ZrO ₂	Dióxido de zircônio

LISTA DE SÍMBOLOS

$\%C_c$	Consumo de cimento para produzir um metro cúbico de argamassa de reparo
$*SP$	Ponto de saturação do aditivo superplastificante
a	Parâmetro de ajuste do modelo de Sitnik-Horszczaruk
a/c	Fator água/cimento
a/l	Fator água/ligante
$a/pulv$	Relação água/materiais pulverulentos
a/s	Relação água/materiais sólidos
a_i	Volume aparente da monodispersão da i -ésima classe
a_{ij}	Coeficiente do efeito de afastamento
α	Parâmetro de ajuste da resistência à compressão da matriz
b	Parâmetro de ajuste do modelo de Sitnik-Horszczaruk
b_{ij}	Coeficiente do efeito de parede
β	Compacidade virtual
β_{cim}	Compacidade virtual do cimento
$\beta_{cim,i}$	Compacidade virtual da classe i do cimento
β_m	Compacidade virtual do material m
$\beta_{m,i}$	Compacidade virtual da classe i do material m
c_1	Parâmetro de ajuste da resistência à compressão da matriz
C	Compacidade real
C_m	Compacidade real do material m
$CPFT$	Porcentagem acumulada da partícula com diâmetro D
D	Diâmetro da partícula
D_{ag}	Máxima dimensão do agregado
D_e	Diâmetro de espalhamento
d_i	Diâmetro da classe i
d_j	Diâmetro da classe j
D_L	Diâmetro da maior partícula
d_{max}	Diâmetro máximo do material
d_{med}	Diâmetro médio do material
d_{min}	Diâmetro mínimo do material
D_S	Diâmetro da menor partícula

E	Módulo de elasticidade do concreto
E_g	Módulo de elasticidade do agregado
E_m	Módulo de elasticidade da matriz
Em_{areia}	Emissão para a produção do agregado natural
Em_{arg}	Emissão para a produção do fíler calcário
Em_c	Emissão para a produção do cimento em toneladas
Em_{cim}	Emissão para a produção do cimento por metro cúbico
Em_{clin}	Emissão para a produção do clínquer
Em_{ee}	Emissão para a produção de energia elétrica
Em_{fil}	Emissão para a produção do fíler calcário
f_c	Resistência à compressão do concreto aos 28 dias
f_{c_g}	Resistência à compressão do agregado
f_{cm}	Resistência à compressão da matriz cimentícia aos 28 dias
f_e	Fator de emissão de energia elétrica
g	Volume de agregados em um volume unitário de concreto
g^*	Compacidade real dos agregados para um $K=9$
γ	Compacidade virtual da mistura
γ^i	Compacidade virtual da mistura com a classe i dominante
$\gamma^{m,i}$	compacidade virtual da mistura composta por M materiais compostos por N classes
γ_{esp}	Massa específica no estado fresco
K	Índice de compactação
M, m	Número de materiais
$M(t)$	Perda de massa média no tempo
MEP	Distância média entre os agregados imersos na matriz
N, n	Número de classes dimensionais
ν_{ar}	Volume de ar aprisionado presente em um volume unitário de pasta
ν_c	Volume de cimento presente em um volume unitário de pasta
ν_w	Volume de água presente em um volume unitário de pasta
p	Constante dada de acordo com o tipo dos agregados
p_k	Fração volumétrica do material k
ϕ	Compacidade real (volume de sólidos)
ϕ_i	Volume de sólidos que a classe i ocupa
ϕ_i^*	Máximo volume que a classe i pode ocupar

ϕ_{exp}^*	Densidade de empacotamento experimental
ϕ_{theo}^*	Densidade de empacotamento teórica
q	Constante dada de acordo com o tipo dos agregados
Q_{areia}	Consumo de areia natural
Q_{cim}	Consumo de cimento
$Q_{fíler}$	Consumo de fíler calcário
r	Razão volumétrica entre peneira
r_c	Coeficiente de correlação
R^2	Coeficiente de determinação
R_c	Resistência à compressão do cimento
SP	Teor de aditivo superplastificante
t	Tempo
V_{ai}	Volume aparante da classe dimensional
ξ	Erro absoluto
x_0	<i>critical cavity size ratio</i>
x_i	Fração de volume da i -ésima classe
y_i	Fração volumétrica da classe i
y_m	Fração volumétrica do material m
y_{kj}	Fração volumétrica da classe j do material k

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivos da pesquisa	23
1.2	Pergunta da pesquisa	23
1.3	Limitações da pesquisa	23
1.4	Estrutura da dissertação	24
2	REPARO DE SUPERFÍCIES HIDRÁULICAS ERODIDAS	25
2.1	Reparos superficiais - <i>Overlays</i>	26
2.2	Reparo - Um sistema composto	27
2.3	Compatibilidade do sistema	28
2.3.1	Compatibilidade dimensional	29
2.3.2	Aderência ao substrato	30
2.4	Critérios para a seleção e dosagem de materiais para reparo	32
3	EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS	34
3.1	Desenvolvimento técnico-histórico	35
3.2	Modelos de empacotamento de partículas	37
3.2.1	Modelos analíticos	37
3.2.2	Modelos combinados	38
3.2.2.1	Modelo de Empacotamento Compressível	39
3.2.2.2	Outros modelos geométricos	41
3.2.3	Parâmetros dos modelos de empacotamento	42
3.2.4	Aplicações dos modelos de empacotamento	44
4	MATERIAIS E MÉTODOS	50
4.1	Propriedades desejadas e critérios de dosagem	51
4.1.1	Concretos de substrato	51
4.1.2	Argamassa de reparo de referência	53
4.2	Seleção e caracterização dos materiais	53
4.2.1	Aditivo redutor de água	54
4.2.2	Cimento, adições minerais e areia natural	54
4.2.3	Fibra e polímero	58
4.3	Proporcionamento dos materiais de reparo	58
4.4	Ensaio para avaliação das propriedades dos materiais de reparo	60
4.4.1	Ensaio no estado fresco	60
4.4.2	Ensaio mecânicos	61
4.4.3	Ensaio de resistência de aderência à tração	61
4.4.4	Coeficiente de dilatação térmica linear	62
4.4.5	Retração por secagem	63

4.4.6	Ensaio de abrasão hidráulica	63
4.4.7	Ensaio de erosão hidráulica	64
4.5	Custo e emissões de CO ₂	65
4.6	Análise estatística e ajuste de modelo	67
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
5.1	Propriedades no estado fresco	68
5.2	Propriedades mecânicas	69
5.3	Desgaste superficial	74
5.4	Resistência de aderência à tração	79
5.5	Retração por secagem	81
5.6	Coeficiente de dilatação térmica linear	85
5.7	Custo e emissão de CO ₂	88
5.8	Desempenho geral dos materiais de reparo	89
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
 REFERÊNCIAS		 93
 Apêndices		 101
APÊNDICE A	Dosagem teste	102
APÊNDICE B	Tabelas de resultados dos experimentos	106
APÊNDICE C	Análise de variância	112
 Anexos		 114
ANEXO A	Dosagem por meio do MEC	115
A.1	Simulador MECFOR	115
A.1.1	Entrada e saída de dados do MECFOR	116
A.2	Correlação do MEC com as propriedades no estado endurecido	120
A.2.1	Resistência à compressão	120
A.2.2	Módulo de elasticidade	121

1 INTRODUÇÃO

A partir da metade do século XX, houve um crescimento exponencial na construção de grandes barragens hidroelétricas no mundo (OLIVEIRA, 2018). O concreto presente nestas estruturas, sobretudo aquele exposto a agentes deteriorantes, possui cerca de 50 anos e em alguns casos pode não apresentar mais as características iniciais de projeto (VAYSBURD *et al.*, 2014). Esse cenário requer que a equipe técnica da barragem desenvolva planos de manutenção e de reparo nessas estruturas. Entretanto, existe o desafio de selecionar ou proporcionar um material adequado para as atividades de reparação, visto que as estruturas hidráulicas possuem demanda de procedimentos específicos quando comparados com o reparo de obras convencionais (SANDSTRÖM, 2010).

Muitos reparos em estruturas de concreto foram realizados por meio de projetos do *Bureau of Reclamation*, que é a segunda maior produtora de energia dos Estados Unidos, desde as suas primeiras concretagens em 1903. Apesar do uso das melhores técnicas e materiais disponíveis, muitos sistemas de reparo falharam desde as primeiras reparações executadas nas estruturas hidráulicas da Agência Americana (FAY, 2015). No trabalho de Tilly (2011) foi discutido um total de 230 casos que foram avaliados quanto ao desempenho de reparos executados em estruturas como barragens, edifícios e outras menos comuns buscando identificar os modos de falhas prematuras e suas causas. Tal estudo concluiu que na maioria dos reparos a causa de falha foi a incorreta seleção de materiais de reparo, sendo observado uma ênfase na resistência à compressão desses e atenção inadequada à ductilidade, o que pode indicar a falta de uma escolha baseada no comportamento em uso da estrutura reparada.

Ao considerar as condições de operação de barragens hidroelétricas, sobretudo àquelas que demandam o uso de um vertedouro, sabe-se que as suas calhas apresentam desgastes erosivos pontuais devido à massiva carga hidráulica que esta estrutura de concreto é submetida ao longo do seu ciclo de vida (KORMANN *et al.*, 2003; SANDSTRÖM, 2010), de modo que o fluxo de água pode promover erosões em uma área relativamente grande. Por conseguinte, os materiais cimentícios aplicados como reparo dessas áreas tendem a apresentar contração volumétrica, por retração plástica e por secagem, mais acentuada em função da superfície disponível para perda de água, o que resulta na fissuração precoce do reparo executado (EMMONS; VAYSBURD, 1995).

A resistência mecânica dos materiais de reparo necessária para abrandar a perda de massa no processo erosivo (KORMANN *et al.*, 2003; HORSZCZARUK, 2008), geralmente é obtida com um elevado consumo de cimento (VAYSBURD *et al.*, 2014). Esse panorama pode ser consequência do enfoque na resistência abrasivo-erosiva em detrimento de outras propriedades de projeto. Em alternativa, a palavra chave para aumentar a probabilidade de sucesso de um reparo é o emprego de uma abordagem sistêmica em seu projeto (FAY, 2015), buscando a compatibilidade entre o reparo e o substrato. A compatibilidade física ou dimensional, pode ser conferida por meio da redução da retração e do módulo de elasticidade do material de reparo, assim como o controle

da sua expansão térmica (EMMONS; VAYSBURD, 1995; VAYSBURD *et al.*, 2014), de modo que as tensões oriundas de variações volumétricas do substrato sejam dissipadas pelo material de reparo.

Assim sendo, diante da peculiaridade de uma estrutura hidráulica e da carência de materiais adequados para o seu reparo, a reparação de suas manifestações patológicas pode ser encontrada na tecnologia dos materiais de construção, especificamente em técnicas de dosagem de materiais cimentícios. Adicionalmente, as questões atuais de sustentabilidade estão imprimindo novos paradigmas de projeto, entre eles, o proporcionamento de materiais ou produtos baseado no desempenho, ou seja, no comportamento em uso, visando a obtenção de misturas duráveis, viáveis economicamente e menos emissivas. No caso de materiais a base de cimento para aplicação como reparo em estruturas erodidas, o desempenho desejado está atrelado às propriedades de compatibilidade dimensional (VAYSBURD *et al.*, 2014; BISSONNETTE *et al.*, 2018), resistência de aderência (SILFWERBRAND *et al.*, 2011; LUKOVIC *et al.*, 2012; BISSONNETTE *et al.*, 2014) e adequada resistência ao desgaste abrasivo-erosivo (HORSZCZARUK; BRZOZOWSKI, 2017).

Para obter tais características pode ser relevante o emprego do proporcionamento do material cimentício com base no empacotamento de partículas. Tal metodologia começou a ser estudada no final do século XIX e é normalmente empregada na dosagem de concretos de alto desempenho (CAD) (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009) e concretos sustentáveis (CAMPOS *et al.*, 2020). A aplicação de métodos de empacotamento promove o aumento da compacidade da mistura cimentícia por meio da combinação de diferentes granulometrias, de modo que os agregados mais finos preencham os vazios originados do contato entre agregados maiores (FURNAS, 1931; ROQUIER, 2019; CAMPOS *et al.*, 2020). Diferentemente dos métodos de dosagem de concretos convencionais, os métodos de empacotamento viabilizam a inserção de quaisquer materiais particulados à mistura (FORMAGINI, 2005), inclusive resíduos (CAMPOS *et al.*, 2020). Até o momento não foram encontrados na literatura estudos que aplicam os conceitos de empacotamento de partículas no proporcionamento de materiais para o reparo de estruturas sujeitas ao desgaste abrasivo-erosivo.

No estado endurecido o aumento da densidade de empacotamento confere o acréscimo da resistência mecânica do concreto para um consumo de cimento fixo (DAMINELI *et al.*, 2017). Em consequência disso, pode-se fixar a resistência à compressão e reduzir a quantidade de cimento (FILHO *et al.*, 2012), implicando em um menor volume de pasta, que proporciona a redução da retração inerente da hidratação e da secagem do material (WONG *et al.*, 2013; CHAN; KWAN, 2014; VAYSBURD *et al.*, 2014), contribuindo para o controle dimensional, mesmo com a manutenção da resistência mecânica, que são características desejáveis em materiais de reparo.

Neste contexto, este trabalho visa o proporcionamento de materiais a base de cimento para o reparo de superfícies de concreto erodidas por meio do empacotamento de partículas, considerando uma abordagem sistêmica para buscar atender as demandas necessárias para o adequado desempenho do reparo executado.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Neste trabalho, tem-se como objetivo geral, proporcionar materiais à base de cimento Portland para o reparo de estruturas de concreto sujeitas à degradação por abrasão e erosão hidráulica visando o comportamento em uso. Os objetivos específicos são:

- a) Avaliar as propriedades mecânicas dos materiais de reparo proporcionados;
- b) Avaliar a influência do proporcionamento dos materiais de reparos no seu desempenho quando aplicados em estruturas erodidas;
- c) Avaliar a influência da modificação por polímeros EVA no desempenho dos materiais de reparo;
- d) Avaliar os custos e emissões de CO₂ associados à produção dos materiais de reparo proporcionados;
- e) Analisar os diferentes proporcionamentos em relação aos critérios e requisitos de desempenho indicados na literatura.

1.2 PERGUNTA DA PESQUISA

Esta pesquisa busca responder “Se o proporcionamento de materiais de reparo por meio de um método de empacotamento de partículas resulta em misturas a base de cimento compatíveis com superfícies erodidas em estruturas de concreto?”

Com base na questão acima, originam-se as seguintes hipóteses:

- a) O proporcionamento de materiais de reparo a base de cimento, por meio do emprego de um modelo de empacotamento de partículas, é viável do ponto de vista técnico-econômico, com mitigação das emissões de CO₂ associadas à produção;
- b) A redução do consumo de cimento obtida com o maior empacotamento viabiliza a produção de materiais de reparo sem perda significativa do desempenho do reparo a ser executado.

1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa limita-se ao estudo do proporcionamento de materiais de reparo a base de cimento por meio do Modelo de Empacotamento Compressível de maneira adaptada, pois não foram realizados os procedimentos necessários à calibração de parâmetros p e q e coeficientes pozolânicos¹. Como alternativa, foi realizada uma dosagem teste com uso adaptado deste método de empacotamento para predição da resistência à compressão.

¹Parâmetros calibrados por meio das resistências à compressão aos 7 e 28 dias de duas misturas de concreto, uma convencional e outra com alto desempenho, produzidas com os insumos considerados na dosagem (GOMES; BARROS, 2009).

Os ensaios para verificação do atendimento dos critérios de desempenho de materiais de reparo demandam o máximo de controle do ambiente e dos equipamentos empregados em sua execução. No entanto, a presente pesquisa limitou-se a realizar os ensaios de retração por secagem de maneira adaptada, sem o controle da umidade da sala de ensaio, devido às condições da restrição do uso de laboratórios em função da pandemia da covid-19.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho foi constituído por meio de 6 capítulos. O Capítulo 1 contextualiza os tópicos abordados na pesquisa. O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica a respeito da reparação de superfícies de concreto erodidas, bem como de critérios e requisitos para a durabilidade do sistema reparo-substrato. No Capítulo 3 foram abordados os modelos de empacotamento de partículas com enfoque na aplicabilidade destes no proporcionamento de materiais cimentícios. No Capítulo 4 são apresentados os materiais e métodos empregados no proporcionamento de argamassas de reparo a base de cimento, sendo tratados os critérios de dosagem, ensaios experimentais e as análises de custo, emissões de CO₂ e estatística. No Capítulo 5 são apresentados os resultados e discussões referentes à avaliação das argamassas propostas, sendo as conclusões obtidas sumarizadas no Capítulo 6. O Apêndice A, apresenta um estudo preliminar de dosagem de argamassas de reparo a base de cimento com um modelo de empacotamento de partículas. No Apêndice B, estão documentadas as tabelas com os resultados dos experimentos realizados na pesquisa, assim como a tabela das análises de variância está disposta no Apêndice C. Por fim, o Anexo A discorre sobre o proporcionamento de materiais cimentícios por meio do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC).

2 REPARO DE SUPERFÍCIES HIDRÁULICAS ERODIDAS

O concreto tem sido usado na construção civil há mais de um século e muitas estruturas existentes apresentam falhas ou perda de desempenho ao longo de sua vida útil (VAYSBURD *et al.*, 2014). O número dessas estruturas de concreto continua crescendo e, portanto, as necessidades de reparo ou modernização aumentarão de maneira proporcional (BISSONNETTE *et al.*, 2011; VAYSBURD *et al.*, 2014; ZHOU *et al.*, 2016). As preocupações atuais com o desenvolvimento sustentável favorecem à reabilitação e reparo ao invés de demolir e construir uma nova infraestrutura (BISSONNETTE *et al.*, 2011; VAYSBURD *et al.*, 2014). Esta abordagem mitiga o consumo de recursos naturais e a geração de resíduos da construção e demolição.

O concreto de estruturas hidráulicas assim como os reparos executados na sua superfície, estão sujeitos aos desgastes superficiais devido à ação do fluxo de água, que poderá causar erosões e lixiviação (SANDSTRÖM, 2010). Este tipo de deterioração é frequente em vertedouros de usinas hidroelétricas (FAY, 2015; KORMANN *et al.*, 2003). Nesse sentido, os materiais para o reparo desse tipo de estrutura devem possuir elevada resistência ao desgaste superficial (SANDSTRÖM, 2010).

Erosões na superfície de estruturas de concreto podem ocorrer devido à remoção e carreamento de partículas desse material por meio da passagem da água (MOMBER, 2014). Tal fenômeno pode ser entendido como a perda de massa ocasionada na superfície do concreto pela ação do fluxo de água em alta velocidade (MOMBER; KOVACEVIC, 1994; GALVÃO *et al.*, 2011; GALVÃO *et al.*, 2012). A degradação da superfície submetida à ação da água pode ser produzida por três mecanismos, sendo a abrasão, erosão e cavitação (MOMBER; KOVACEVIC, 1994; MOMBER *et al.*, 1995). A abrasão refere-se à ação de partículas sólidas suspensas no fluido que, ao colidirem no concreto em alta velocidade, desgastam a superfície do material (KORMANN *et al.*, 2003; HORSZCZARUK, 2008; HORSZCZARUK; BRZOSOWSKI, 2017). A erosão trata da ação direta das partículas de água no fluxo em alta velocidade (MOMBER; KOVACEVIC, 1994). Já a cavitação está relacionada à ação de bolhas de gases geradas por meio da redução da pressão em escoamentos turbulentos (FAY, 2015). O dano por cavitação ocorre quando as bolhas de vapor implodem próximas à superfície do material, sendo que o choque mecânico causado, proporciona o surgimento de microfissuras no material (GRAHAM *et al.*, 1987).

Para a recuperação superficial de concretos erodidos, frequentemente aplica-se o material para reparo na configuração de uma camada, também nominado de “*overlay*”, sobre o substrato. Independente da origem do dano, é comum adotar esta técnica de reparo em estruturas hidráulicas (SANDSTRÖM, 2010).

2.1 REPAROS SUPERFICIAIS - OVERLAYS

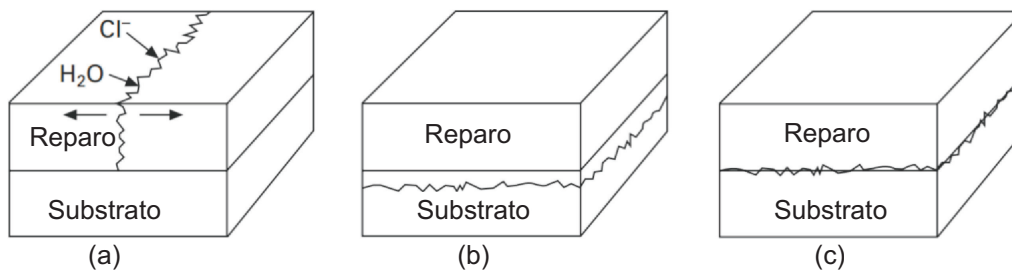
O reparo superficial é um método frequentemente mais econômico no âmbito das metodologias disponíveis para o reparo e reabilitação do concreto. Esta técnica é particularmente adequada para estruturas com grandes lajes, podendo também ser aplicada no reparo de pisos industriais, pavimentos, tabuleiro de pontes, paredes e túneis (BISSONNETTE *et al.*, 2011). O objetivo principal de reparos superficiais é o prolongamento da vida útil das estruturas de concreto (KIM *et al.*, 2011). Pode ser aplicado na restauração estética de uma superfície ou de seu desempenho inicial, bem como na melhora da capacidade de carga por um aumento de espessura (FOWLER; TREVIÑO, 2011).

A espessura da camada do reparo superficial depende de fatores como o tipo de material de reparo, o tipo de estrutura a ser reparada e a profundidade do dano. Por exemplo, no emprego do concreto como reparo superficial, Kim *et al.* (2011) recomenda espessuras de 50 à 100 mm. No caso de argamassas de reparo, Junior e Selmo (2007) limita a altura da camada em 50 mm. Quanto à profundidade, Souza e Ripper (2009) sugere a aplicação de argamassas de cimento e areia em reparações de até 50 mm para áreas de até 10 cm² e 25 mm para até 1 m².

Problemas com a durabilidade do reparo superficial ainda preocupam a comunidade técnica devido a problemas de aderência encontrados em vários casos (BISSONNETTE *et al.*, 2011). Nesses eventos, o deslocamento é geralmente iniciado nas extremidades, juntas e rachaduras da camada. A exposição à ações do ambiente e da operação da estrutura, promove propagação dessa fissuração e o avanço do deslocamento (SANDSTRÖM, 2010), o que acelera a perda de vida útil, demandando novos serviços de reparo (BISSONNETTE *et al.*, 2011).

A durabilidade do reparo superficial executado dependerá parcialmente de quão bem o material de reparo está aderido ao substrato (SANDSTRÖM, 2010). A baixa resistência inicial de aderência aumenta a probabilidade de falha na interface ao longo do tempo. A perda de desempenho de sistemas reparados se manifesta na fissuração, deslocamento e perda de resistência (CUSSON, 2009). Os tipos de falhas frequentes em reparos superficiais são: fissuras por tração ao longo da espessura do reparo (Figura 1(a)); cisalhamento do concreto abaixo da interface (Figura 1(b)); falha na interface de ligação (Figura 1(c)).

Figura 1 – Tipos de falha no reparo superficial aplicado ao substrato.



Fonte: Cusson (2009).

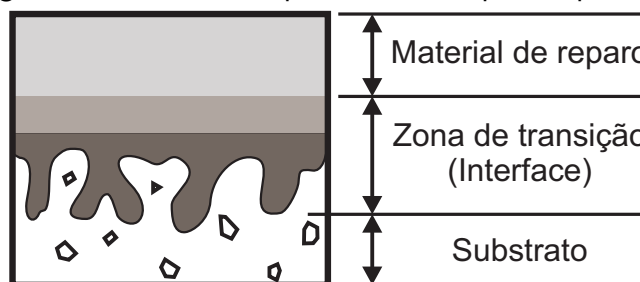
As fissuras ao longo da espessura do reparo ocorrem provavelmente quando a resistência à tração do material de reparo é menor que a resistência de aderência na interface. O cisalhamento do concreto se manifesta quando a resistência de cisalhamento do substrato é menor que a resistência de aderência do reparo. A falha na interface, ocorre quando a resistência de aderência da interface de ligação é menor que a resistência do concreto base e do material de reparo (CUSSON, 2009; VAYSBURD *et al.*, 2014).

Os problemas de durabilidade que se manifestam na estrutura podem ter múltiplas causas (FAY, 2015). Muitos fatores que causam a perda de durabilidade estão inter-relacionados, o que torna difícil a discretização/discriminação das causas. Geralmente, a combinação dos mecanismos é a principal razão para a manifestação do dano e portanto, deve também ser considerado no projeto de reparo (VAYSBURD, 2006).

2.2 REPARO - UM SISTEMA COMPOSTO

O reparo do concreto não é um “*band-aid*” para uma estrutura de concreto com manifestações patológicas, ao invés disso é uma tarefa complexa de engenharia (VAYSBURD *et al.*, 2014). Essa tarefa pode ser melhor solucionada por meio de uma abordagem holística ou sistêmica no projeto de serviços de reparo (VAYSBURD, 2006; CUSSON, 2009). Nesse sentido, a estrutura de concreto reparada deve ser entendida como um sistema composto. Este sistema é representado estruturalmente por três fases ou subsistemas básicos (EMMONS; VAYSBURD, 1995; VAYSBURD *et al.*, 2014), como indicado na Figura 2.

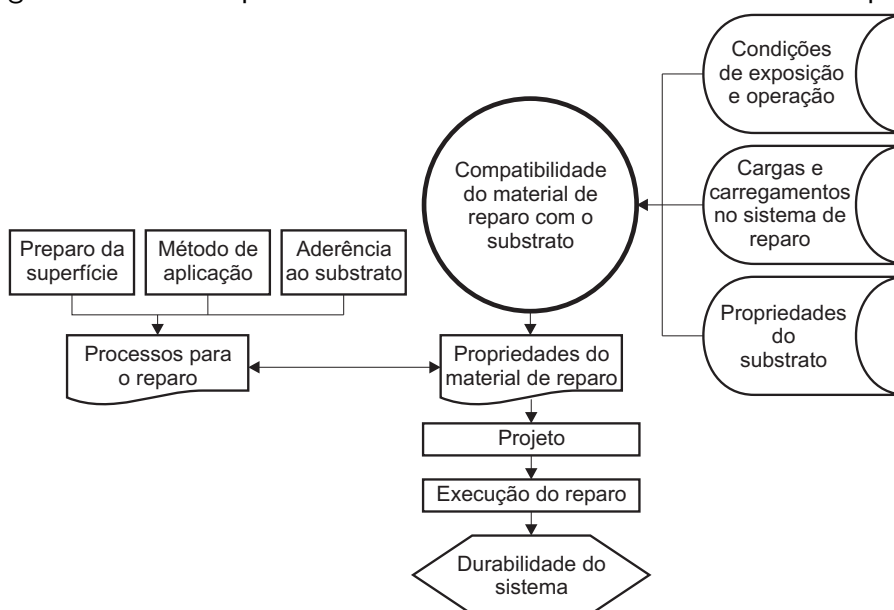
Figura 2 – Sistema composto de um reparo superficial.



Fonte: Emmons e Vaysburd (1995);Vaysburd (2006).

O objetivo de um reparo é produzir uma estrutura reparada durável com um grau de alteração limitado e previsível, sem deterioração ou danos ao longo de sua vida útil (EMMONS; VAYSBURD, 1995; VAYSBURD *et al.*, 2014). Para atingir este propósito, um projeto de reparo deve considerar os requisitos ou propriedades necessárias para a obtenção de durabilidade. No entanto, estas propriedades isoladas, precisam ser consideradas em conjunto, como um sistema composto, como na Figura 3. De acordo com Vaysburd *et al.* (2014) somente uma abordagem sistêmica resolveria os problemas de durabilidade.

Figura 3 – Fatores que influenciam na durabilidade do sistema de reparo.



Fonte: Emmons e Vaysburd (1995).

As diferenças entre o material de reparo e o substrato frequentemente irão existir (VAYSBURD *et al.*, 2014). Até mesmo no uso do concreto como material de reparo, será impossível combinar todas as propriedades ao substrato, pois no momento da aplicação do reparo, uma grande porcentagem da retração do concreto da estrutura a ser reparada já ocorreu (EMMONS; VAYSBURD, 1995). A perfeita semelhança das propriedades do reparo ao substrato não evitará sua falha. O critério real é que o material de reparo tenha propriedades e dimensões que o tornem compatível com o substrato para a aplicação em questão (EMMONS; VAYSBURD, 1995; BISSONNETTE *et al.*, 2011), ou seja, que se considere a compatibilidade do sistema.

2.3 COMPATIBILIDADE DO SISTEMA

Os materiais cimentícios para reparo de concreto devem ter requisitos exclusivos que, em alguns aspectos, são diferentes das misturas de concreto desenvolvidas para o concreto estrutural. Um dos requisitos aplicáveis é a compatibilidade com o substrato existente (VAYSBURD, 2005). Sem o controle dimensional adequado, a aderência do reparo é afetada pela fissuração por variações volumétricas (VAYSBURD *et al.*, 2014).

De acordo com Emmons e Vaysburd (1995) a definição de compatibilidade equivale ao balanço das propriedades físicas, químicas, eletroquímicas e dimensionais entre o reparo e o substrato existente de um sistema de reparo. Este balanço garante que o reparo executado resista a todas as tensões previstas induzidas por alterações de volume, efeitos químicos e eletroquímicos sem danos e deterioração ao longo de um período previsto em projeto (VAYSBURD, 2006).

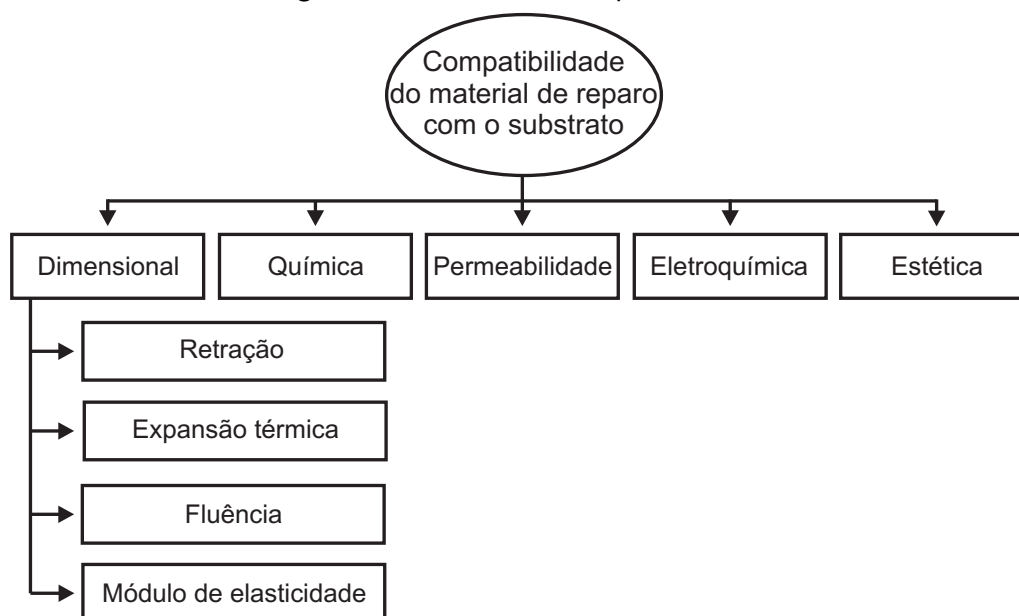
As mudanças volumétricas relativas geram tensões internas entre o reparo e o substrato. Elevadas tensões internas promovem a fissuração, deslocamento, perda de capacidade de carga e deterioração. O requisito para a durabilidade do sistema reparado é a escolha de materiais

que tenham propriedades dimensionalmente compatíveis com o substrato a tal ponto que a tensão induzida na interface e no reparo, não exceda a resistência à tração do material de reparo (EMMONS; VAYSBURD, 1995).

2.3.1 Compatibilidade dimensional

Dentre os critérios mais significativos para a compatibilidade geral e o desempenho do reparo executado, destaca-se a compatibilidade dimensional (LUKOVIC *et al.*, 2012; VAYSBURD *et al.*, 2014), a qual engloba a retração por secagem, expansão térmica, fluência e módulo de elasticidade (LUKOVIC *et al.*, 2012). Na Figura 4 pode-se visualizar as propriedades inerentes à compatibilidade dimensional.

Figura 4 – Fatores de compatibilidade.



Fonte: Emmons e Vaysburd (1995); Vaysburd *et al.* (2014).

Um material de reparo adequado precisa de estabilidade de volume para obter uma boa compatibilidade de deformação volumétrica frente ao substrato (FENG *et al.*, 2020). Nesse contexto, Cusson (2009) recomenda a busca por um material para reparo com baixa retração, pois nos resultados de seus experimentos, uma elevada retração levou a fissuração inicial do reparo, resultando em perda de desempenho frente as condições de uso. Esse tipo de problema ocorre após a aplicação do reparo, em que a retração do material é restringida pelo substrato, o que geralmente promove tensões de tração e de cisalhamento no sistema de reparo, podendo causar a perda de aderência e o deslocamento (GRAHAM *et al.*, 1987; ZHOU *et al.*, 2016).

O conceito de “extensibilidade do material” está diretamente relacionado à compatibilidade dimensional, em que a deformação por retração é o fator principal, mas não o único (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A extensibilidade também depende das restrições volumétricas, módulo de elasticidade, fluência e resistência à tração. As restrições favorecem à concentração de tensões (ACI546R, 2004). Um menor módulo de elasticidade promove menores tensões impostas

por alterações volumétricas (VAYSBURD, 2005). Quanto maior a fluência, maior é a relaxação do material e menor quantidade de tensões. E por fim, quanto maior a resistência à tração do material, menor é risco que tensões de tração excedem à capacidade do material (VAYSBURD *et al.*, 2014).

Quando ocorrem mudanças significativas na temperatura, uma diferença considerável no coeficiente de dilatação linear entre o material de reparo e o substrato produz diferentes mudanças dimensionais entre eles (ACI546R, 2004; VAYSBURD *et al.*, 2014). A movimentação térmica diferente acarreta no acréscimo de tensões na interface do reparo (CUSSON, 2009). Dessa forma, é importante usar um material de reparo com um coeficiente de expansão semelhante ao do concreto existente no substrato (ACI546R, 2004). Em reparos superficiais de grandes áreas, a equivalência entre os coeficientes de dilatação ameniza as falhas por fissuração, uma vez que a incompatibilidade térmica entre os materiais pode ocasionar danos na interface ou no material de menor resistência mecânica (CUSSON, 2009).

Para reparos em concreto, o módulo de elasticidade está relacionado com a capacidade de acomodação das tensões no sistema de reparo, assim como a tolerância à mudança de volume do material devido à retração ou movimentações térmicas (VAYSBURD *et al.*, 2014). Em estruturas reparadas sujeitas à ação de carregamentos externos, o módulo de elasticidade do reparo deve ser semelhante ao módulo do substrato (ACI546R, 2004; CUSSON, 2009). Em reparos superficiais, recomenda-se que módulo de elasticidade do material aplicado não seja superior a 24 GPa (VAYSBURD *et al.*, 1999; ACI546R, 2004).

2.3.2 Aderência ao substrato

Garantir uma boa qualidade para a aderência entre o material de reparo e o substrato é requisito importante para a eficiência do reparo executado (LUKOVIC *et al.*, 2012; COURARD *et al.*, 2014). Caso o material de reparo e o substrato possuam uma adequada combinação de propriedades deformacionais, uma melhora na resistência à aderência significa o aumento da durabilidade do sistema (CUSSON, 2009; VAYSBURD *et al.*, 2014). A aderência é a propriedade responsável pela transferência efetiva de tensões originadas por deformações volumétricas e de carregamentos inerentes ao ambiente no qual exerce sua funcionalidade (JUNIOR; SELMO, 2007).

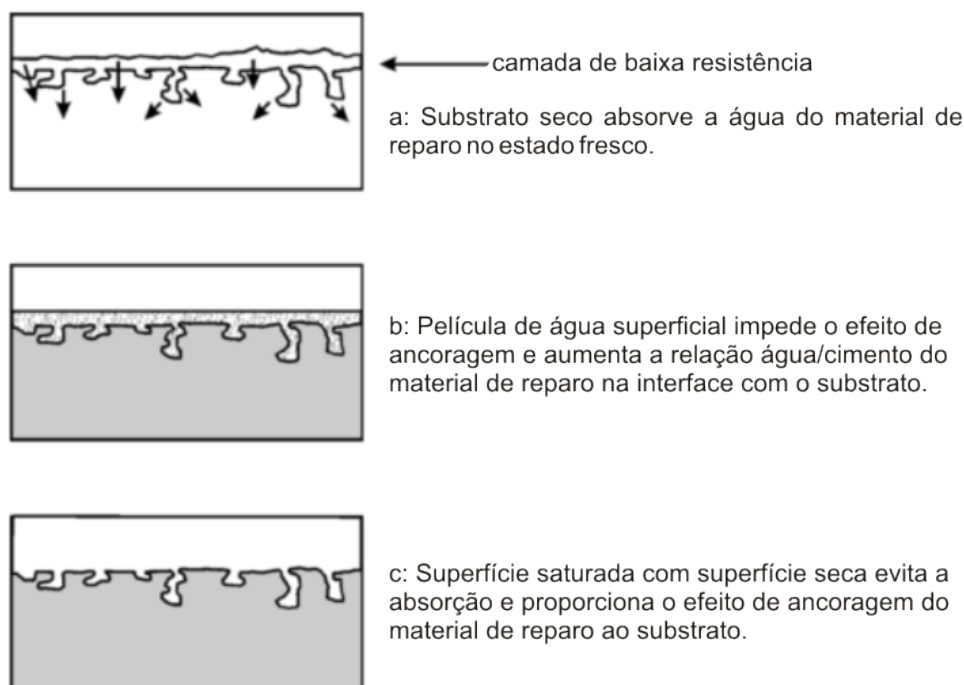
A aderência do material de reparo ao substrato é um fenômeno complexo que envolve diferentes tipos de ligação: a química, a mecânica e a física (COURARD, 1999 apud BISSONNETTE *et al.*, 2018)¹. A ligação mecânica inicia-se no estado fresco com a deposição de produtos de hidratação nos poros do substrato, exercendo a ação de ancoragem do material de reparo à base (BISSONNETTE *et al.*, 2018). Já os fenômenos físico-químicos envolvidos na adesão podem ser associados às forças intermoleculares que surgem na interação. Sendo as forças de London, Van der Waals, eletrostáticas e outras (JUNIOR; SELMO, 2007).

¹COURARD, L. **Contribution á l'analyse des paramètres influençant la création de l'interface entre un béton et un système de réparation**. Tese (Doutorado) — Université de Liege, Faculte des sciences appliquees, 1999.

A resistência de aderência na interface pode ser influenciada pelas propriedades do substrato e sua superfície (rugosidade, limpeza e estado de cura), pelas propriedades do material de reparo, incluindo a absorção e sua capacidade de aderir ao substrato e pelas condições de exposição ao ambiente (CUSSON, 2009). Silfwerbrand e Paulsson (1998 apud SANDSTRÖM, 2010)² afirmam que um substrato de concreto adequadamente preparado a ponto de promover uma reparação livre de fissuras, pode favorecer o desenvolvimento de uma resistência de aderência até duas vezes maior. As operações de preparação e limpeza da superfície do substrato, tal como a remoção de todo o concreto deteriorado e contaminantes, oportunizam a penetração máxima do material de reparo no substrato de concreto (SILFWERBRAND et al, 2011; BISSONETE et al, 2016). Isso é essencial para o desenvolvimento da ancoragem e adesão necessárias para uma ligação forte e duradoura.

A absorção capilar desempenha um papel importante no efeito de ancoragem, pois atrai a pasta do material de reparo para os poros abertos e para as pequenas cavidades do substrato (VAYSBURD *et al.*, 2014). Uma superfície muito seca pode absorver a água do material de reparo no estado fresco, oportunizando a formação de uma zona porosa heterogênea perto da interface (Figura 5a). Se a superfície estiver muito úmida, uma zona de transição com alta relação água/cimento se desenvolverá perto da interface, o que levará a uma redução local na resistência do reparo (Figura 5b), ou seja a água livre na superfície pode prejudicar significativamente a aderência (SILFWERBRAND *et al.*, 2011).

Figura 5 – Condições de umidade do substrato.



Fonte: Vaysburd *et al.* (2014).

²SILFWERBRAND, J.; PAULSSON, J. Better bonding of bridge deck overlays. **Concrete International**, v. 20, n. 10, p. 56–61, 1998.

Muitos estudos buscaram avaliar o teor ideal de umidade do substrato para melhores resultados de resistência de aderência (SILFWERBRAND *et al.*, 2011; VAYSBURD *et al.*, 2014). No entanto, os experimentos não tiveram sucesso em obter uma faixa de umidade ótima antes da aplicação do reparo (SANDSTRÖM, 2010). Existem divergências a respeito da umidade, porém, o consenso entre os pesquisadores é a recomendação de aplicação do material de reparo em um substrato saturado com superfície seca (Figura 5c) (VAYSBURD *et al.*, 2014).

2.4 CRITÉRIOS PARA A SELEÇÃO E DOSAGEM DE MATERIAIS PARA REPARO

A combinação de propriedades desejáveis para redução da fissuração no reparo executado pode ser traduzida pela extensibilidade. Diz-se que um material tem um alto grau de extensibilidade quando pode ser submetido a deformações com pouca fissuração. Um material de reparo com adequada resistência à fissuração deve apresentar não apenas um menor grau de retração, mas também um grau de extensibilidade relativamente alto para materiais cimentícios, baixo módulo de elasticidade, alta fluência, etc (VAYSBURD *et al.*, 2014). A Tabela 1 apresenta as propriedades desejáveis para a compatibilidade e a durabilidade do sistema de reparo, conforme encontrado na bibliografia.

Tabela 1 – Requisitos gerais para o sistema de reparo.

Propriedade	Relação entre o reparo (R) e o substrato (S)
Resistência à compressão e a tração	$R > S$
Módulo de elasticidade	$R \approx S$
Coefficiente de Poisson	Depende do módulo e do tipo de reparo
Coefficiente de expansão térmica	$R < S$
Resistência à aderência	$R > S$
Retração à curto e a longo prazo	$R < S$
Capacidade de deformação	$R > S$
Fluência	Depende se a fluência causa efeitos desejáveis ou indesejáveis
Desempenho à fadiga	$R > S$
Reatividade química	Não deve promover a reação de álcali-agregado, ataque de sulfatos ou corrosão da armadura no S
Estabilidade eletroquímica	Depende da permeabilidade do R e do conteúdo de íons cloreto de S

Fonte: Cusson (2009); Sandström (2010); Lukovic *et al.* (2012); Vaysburd *et al.* (2014).

É complicado ou até impossível proporcionar um material cimentício com baixa retração e alta extensibilidade. Muitos fatores que reduzem a retração por secagem também tendem a reduzir a extensibilidade. Por exemplo, um aumento no consumo de agregado graúdo reduzirá a retração por secagem, mas, ao mesmo tempo, reduzirá a fluência, o relaxamento das tensões e a extensibilidade. Este exemplo demonstra a complexidade de soluções práticas, em comparação com soluções puramente teóricas, para compor um material de reparo extensível (VAYSBURD *et al.*, 2014).

As pesquisas sobre os critérios necessários para a durabilidade dos materiais de reparo geralmente são conduzidas com foco em apenas uma propriedade (VAYSBURD *et al.*, 2014), tal como a resistência à compressão. A falta de mais detalhes prejudica a obtenção de respostas mais completas (TILLY, 2011). Por outro lado, Vaysburd *et al.* (1999) avaliaram a existência de correlação entre os ensaios de campo e de laboratório para levantamento de critérios de desempenho para o material de reparo. O estudo desenvolveu critérios de desempenho para a seleção e especificação de materiais de reparo à base de cimento dimensionalmente compatíveis, dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Critérios de desempenho para materiais de reparo.

Propriedade	Critério
Resistência à tração (28 dias)	2,8 MPa
Resistência à tração na flexão	10% da Fc*
Módulo de elasticidade	24 GPa
Coeficiente de expansão térmica	Compatível com o substrato
Retração por secagem (28 dias)	0,04%
Retração por secagem (1 ano)	0,10%
Retração restringida	Sem fissuração (14 dias)

(*) Resistência à compressão do material de reparo.

Fonte: Vaysburd *et al.* (2014).

No estudo de Vaysburd *et al.* (2014) não foi observado uma correlação entre o desempenho no campo e no laboratório. No entanto, segundo os autores, é possível prever o desempenho operacional com a combinação de propriedades relacionadas à durabilidade determinadas em laboratório. Neste contexto, Burke *et al.* (2006 apud VAYSBURD *et al.*, 2014)³ realizaram uma revisão bibliográfica, que aliada ao conhecimento prático, originou algumas regras para a seleção de materiais de reparo que sejam menos susceptíveis à fissuração no campo. Os autores recomendam a realização de um projeto de dosagem que considere um baixo módulo de elasticidade, o emprego de pozolanas e a redução do volume de pasta.

³BURKE, D.; BROWN, C.; VAYSBURD, A.; BISSONNETTE, B. Roadmap for improvement of crack resistance of repair materials. In: **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting**, Alexander, M., Beushausen, H.D., Dehn, F., Moyo, P. London: Taylor e Francis Group., 2006. v. 371.

3 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

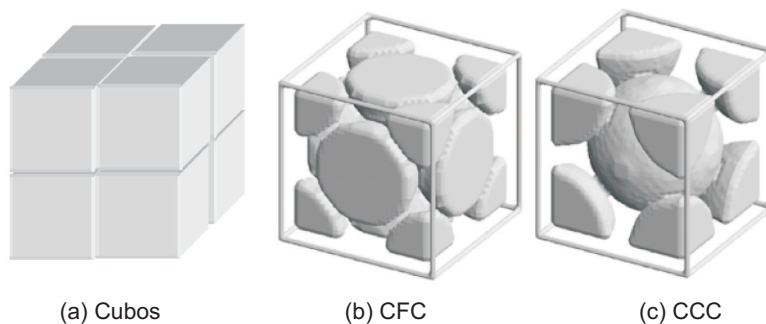
Dentre as metodologias difundidas e empregadas na produção de concreto, pode-se apontar os métodos de dosagem fundamentados por meio de abordagens empíricas e experimentais. Destes, normalmente destacam-se no Brasil os métodos ABCP, IPT, INT e outros (HELENE; TUTIKIAN, 2005). As curvas tradicionais de fator água/cimento e resistência mecânica, empregadas nestes métodos, foram construídas por meio de ensaios em concretos sem aditivos químicos e minerais e podem não ser adequados aos concretos que exigem alto desempenho (FORMAGINI, 2005; REBMANN, 2016).

Uma alternativa ao uso dos métodos tradicionais é o emprego de metodologias que aplicam modelos de empacotamento de partículas para o proporcionamento de cada componente particulado do concreto. Este tipo de abordagem foi desenvolvida com o intuito de alcançar misturas granulométricas densas (DE LARRARD; SEDRAN, 2002). As formulações e técnicas de empacotamento têm como concepção básica o preenchimento de espaços vazios por meio da inserção de materiais particulados cada vez menores nos vazios deixados pela interação dos agregados maiores (DAMINELI *et al.*, 2017; ROQUIER, 2019).

A metodologia do empacotamento de partículas, aliada ao proporcionamento do concreto, pode ser entendida como a combinação de diferentes materiais particulados, de modo que o teor de vazios da matriz granulométrica seja reduzido (DAMINELI *et al.*, 2017). Teoricamente, o número de vazios originado do contato de agregados graúdos é preenchido por grãos menores, e assim sucessivamente, até a eliminação total da porosidade da mistura (FURNAS, 1931; FORMAGINI, 2005; ROQUIER, 2019).

A redução da porosidade intergranular também pode ser entendida como o aumento da densidade de empacotamento, ou seja, a máxima redução dos vazios origina um sistema com densidade máxima de empacotamento. Este último parâmetro também é traduzido como a compacidade, β , da matriz. Por exemplo, se um volume cúbico for preenchido por vários cubículos infinitesimais a compacidade deste volume será máxima, ou seja, $\beta = 1$ (Figura 6(a)). Analogamente, a compacidade pode ser comparada com o fator de empacotamento atômico de células unitárias em que a disposição atômica determina a compactação. Na estrutura Cúbica de Corpo Centrado (CCC) a compacidade é $\beta = 0,68$ (Figura 6(b)) e na Cúbica de Face Centrada (CFC), $\beta = 0,74$, tal como na Figura 6(c) (FORMAGINI, 2005).

Figura 6 – Fator de empacotamento atômico.



Fonte: Formagini (2005).

O interesse em conceitos de empacotamento de partículas abrange uma ampla faixa de aplicações na ciência e tecnologia dos materiais. Setores como a indústria da cerâmica, do concreto e outros utilizam tal abordagem para o aprimoramento de seus manufaturados (ROQUIER, 2017). No processo de produção de cerâmicas, a densidade de empacotamento entre as partículas tem influência nas propriedades finais do produto (ROQUIER, 2019). Na tecnologia do concreto estas concepções foram aplicadas no proporcionamento do arranjo granulométrico entre os constituintes da mistura cimentícia, pois um dos desafios a ser encarado na dosagem do concreto é o empacotamento dos agregados (DE LARRARD, 1999).

3.1 DESENVOLVIMENTO TÉCNICO-HISTÓRICO

O empacotamento de partículas foi primeiramente abordado no trabalho de Féret em 1892, que apresentou uma relação entre a porosidade do concreto e a resistência à compressão (BREWE; MYERS, 2005; CASTRO; PANDOLFELLI, 2009), indicando que a resistência é diretamente proporcional à densidade de empacotamento. A partir disso, autores como Fuller em 1907, Abrams em 1918, Talbot em 1923 e outros, desenvolveram formulações empíricas para o proporcionamento de misturas granulares para a constituição do concreto (ROQUIER, 2019). Por outro lado, os trabalhos de Furnas (1931) e Westman e Hugill (1930) foram os primeiros a empregar uma abordagem analítica para a diminuição dos vazios da matriz granulométrica.

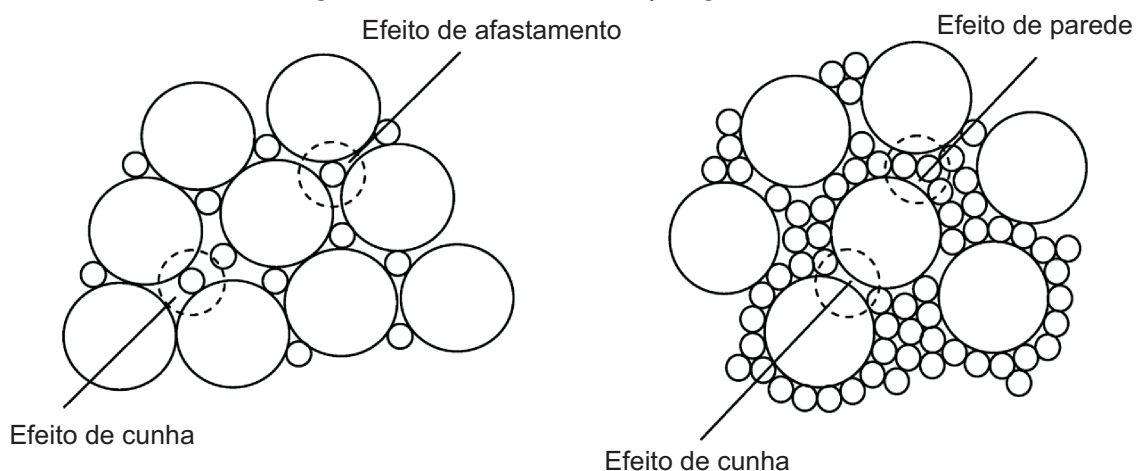
Com o aumento do interesse técnico-científico e industrial no empacotamento de partículas, alguns pesquisadores passaram a investigar os efeitos da interação geométrica entre os agregados. Em 1933, Weimouth estudou o efeito de interferência entre as partículas grosseiras e as mais finas, que dependendo da proporcionalidade entre estas, pode promover o aumento dos vazios na mistura (POWERS, 1968 apud ROQUIER, 2019)¹. Aim e Goff (1968) demonstraram o efeito de parede por meio do cálculo da porosidade local de uma camada de grãos finos adjacentes à superfície de grão maior. No trabalho de Stovall *et al.* (1986), foi desenvolvido um modelo linear (*Linear Packing Density Model* - LPDM) envolvendo o efeito de parede (*wall effect*) quando da dominância volumétrica das partículas finas, e o efeito de afastamento (*loosening effect*) quando os grãos maiores predominam na granulometria da matriz.

¹POWERS, T. C. **Properties of Fresh Concrete**. Inc., New York: John Wiley and Sons, 1968. 301 p.

Como indicado, tais efeitos dependem de uma condição de dominância entre classes da mistura. Diz-se que uma determinada classe de partículas é dominante sobre as demais quando esta garante a continuidade volumétrica do esqueleto granular (FORMAGINI, 2005). Nesse contexto, o efeito de parede corresponde à porosidade suplementar na interface de uma partícula grossa cercada por partículas menores. O efeito de afastamento ocorre quando uma partícula fina não é suficientemente pequena para ser inserida na cavidade criada pelo contato entre as partículas maiores (DE LARRARD, 1999; FORMAGINI, 2005; KWAN *et al.*, 2013b; ROQUIER, 2017; ROQUIER, 2019).

Em adição aos dois últimos efeitos de perturbação do empacotamento de partículas granulares dispersas, existe o efeito de cunha (*wedging effect*). Tal fenômeno, estudado por Kwan *et al.* (2013b), ocorre em ambos os casos de dominância em uma mistura binária (Figura 7). Quando os agregados maiores são dominantes, o efeito de cunha ocorre quando algumas partículas finas isoladas perturbam o empacotamento das partículas grossas, “encunhando-se” entre os vazios resultantes. Na dominância das partículas finas, o efeito de cunha ocorre quando alguns particulados maiores estão excepcionalmente uns perto dos outros, impedido a formação de camadas completas de partículas finas na interface de contato (KWAN *et al.*, 2013b; CHAN; KWAN, 2014; ROQUIER, 2019).

Figura 7 – Efeitos de interação geométrica.



Fonte: Chan e Kwan (2014).

Além dos efeitos de interação geométrica, ilustrados na Figura 7, também foi considerada a influência do protocolo de compactação da mistura, representado pelo índice de empacotamento (*packing index*) ou índice K (DE LARRARD, 1999; FORMAGINI, 2005; ROQUIER, 2019). Diferentemente dos efeitos de interação geométrica, o índice K representa a eficiência do processo de empacotamento (ROQUIER, 2019). Tal parâmetro correlaciona a compacidade real com a compacidade virtual, sendo esta última a compacidade resultante de um empacotamento idealizado, como se cada grão fosse alocado um a um (DE LARRARD, 1999; FORMAGINI, 2005; ROQUIER, 2017). Quando o processo de compactação for o mais eficiente possível, a densidade de empacotamento real e virtual alcançam um valor máximo.

Em busca do aprimoramento da acurácia da previsão da densidade de empacotamento, Roquier (2016) introduziu o denominado *critical cavity size ratio*. Ao levar tal parâmetro em consideração, o autor conseguiu corrigir alguns casos de superestimação da compacidade quando comparada com os dados de compacidade experimental, que segundo ele, tal fato tem origem no efeito de interferência apresentado por Weimouth. De uma forma simplificada, pode-se dizer que o *cavity size ratio* indica se uma partícula fina pode ser inserida em um interstício sem perturbar o empacotamento da matriz granular (ROQUIER, 2019).

3.2 MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Entre os modelos de empacotamento de partículas encontrados na bibliografia, pode-se destacar os analíticos. Estes modelos empregam formulações matemáticas para determinar como a fração volumétrica de cada classe de partícula e como sua granulometria influencia no empacotamento geral da mistura (ROQUIER, 2019) e podem abordar as distribuições granulométricas contínua ou discreta, considerando estas distribuições obtidas de peneiras consecutivas (BREWE; MYERS, 2005).

Os modelos de empacotamento combinados são assim denominados por abordarem o cálculo da densidade da mistura de maneira analítica e por adicionarem efeitos de interação geométrica entre partículas (ROQUIER, 2019). Estes efeitos geométricos se manifestam a partir de um tipo de dominância da classe granular. Quando as partículas mais finas são dominantes, ocorre o efeito de parede, assim como quando os agregados mais grosseiros são predominantes, observa-se o efeito de afastamento entre os grãos (DE LARRARD; SEDRAN, 2002; FORMAGINI, 2005; CHATEAU, 2012; KWAN *et al.*, 2013b).

3.2.1 Modelos analíticos

No trabalho de Furnas (1931) foi proposto um modelo analítico, que consiste em uma formulação para atingir uma maior densidade de empacotamento por meio de granulometrias discretas. O modelo teve como pressuposto inicial a hipótese de que em uma mistura composta por duas granulometrias com dimensões diferentes, os grãos com granulometria mais fina preenchem os vazios deixados por grãos mais grosseiros sem alterar o volume total da amostra.

Furnas (1931) estendeu essa hipótese para um sistema de vários componentes com granulometrias diferentes, assumindo que cada um deles completará perfeitamente os vazios originados por uma granulometria imediatamente maior. Além disso, aplicou uma progressão geométrica para descrever o diâmetro das partículas de uma mistura granular hipoteticamente empacotada, desde que a razão de massa ou volume entre peneiras consecutivas seja constante (BREWE; MYERS, 2005). O modelo de Furnas é descrito tal como na Equação (3.1).

$$CPFT(\%) = 100 \left(\frac{D^{\log r} - D_S^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_S^{\log r}} \right) \quad (3.1)$$

em que $CPFT$ é a porcentagem acumulada da partícula com diâmetro D , D_S é o diâmetro do menor agregado, sendo D_L o diâmetro da maior partícula do agregado da mistura e r a razão volumétrica entre o agregado acumulado na peneira referente ao agregado analisado e o valor acumulado de uma peneira consecutivamente inferior.

Andreasen (1930) desenvolveu uma lei de potência para descrever um empacotamento em que duas partículas com diferentes tamanhos possuam uma condição similaridade granulométrica constante em seu entorno (FUNK; DINGER, 1994). Para satisfazer esta condição, a granulometria dos agregados foi tratada como contínua, sendo considerado que todas as quaisquer dimensões de partícula estão disponíveis para o empacotamento (BREWE; MYERS, 2005). A equação do modelo de Andreasen é apresentada na Equação (3.2).

$$CPFT(\%) = 100 \left(\frac{D}{D_L} \right)^q \quad (3.2)$$

em que q é o coeficiente de distribuição.

Westman e Hugill (1930) apresentaram um algoritmo baseado na teoria do empacotamento de partículas discreto. O volume aparente de cada classe dimensional da distribuição granulométrica, V_{ai} , da mistura com n classes é calculado conforme as Equações (3.3) a (3.7).

$$V_{a1} = a_1 x_1 \quad (3.3)$$

$$V_{a2} = a_2 x_2 + x_1 \quad (3.4)$$

$$V_{a3} = a_3 x_3 + x_1 + x_2 \quad (3.5)$$

$$V_{ai} = a_i x_i + \sum_{j=1}^{i-1} x_j \quad (3.6)$$

$$V_{an} = a_n x_n + \sum_{j=1}^{n-1} x_j \quad (3.7)$$

em que a_i é o volume aparente da monodispersão da i -ésima classe, x_i é fração de volume da i -ésima classe e n é o número de classes.

Funk e Dinger (1994) estudaram os modelos de Furnas e Andreasen mostrando que tais formulações convergiam para o mesmo resultado (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009). Dessa forma, modificaram a equação de Andreasen e adicionaram o conceito de menor dimensão de partícula, D_s (BREWE; MYERS, 2005). A formulação derivada desta abordagem é descrita como na Equação (3.8).

$$CPFT(\%) = 100 \left(\frac{D^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \quad (3.8)$$

o modelo desenvolvido por Funk e Dinger (1994) também é conhecido como modelo de Alfred ou Andreasen-modificado.

3.2.2 Modelos combinados

Neste subitem serão apresentados os modelos de empacotamento que consideram perturbações na compacidade da mistura granular por interações geométricas entre as partículas.

3.2.2.1 Modelo de Empacotamento Compressível

O Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), desenvolvido por de Larrard (1999), considera uma abordagem discreta e interações geométricas entre diferentes dimensões de partículas (CHATEAU, 2012). A partir de um índice de compactação, K , que está relacionado com os diferentes meios de compactação, combinado à compacidade virtual, pode-se realizar o cálculo da compacidade real da mistura (ROQUIER, 2017). Para o caso de uma mistura polidispersa, ou seja, uma matriz granular com i classes dimensionais, a máxima densidade de empacotamento, $\gamma^{(i)}$, quando a classe i é dominante, é dada como na Equação (3.9).

$$\gamma^{(i)} = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[1 - \beta_i + b_{ij}\beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] y_j - \sum_{j=i+1}^n \left[1 - \frac{a_{ij}\beta_i}{\beta_j} \right] y_j} \quad (3.9)$$

em que β_i é a máxima densidade de empacotamento virtual da classe i e y_j é a fração volumétrica da classe j . A parametrização dos efeitos oriundos da interação granulométrica foi realizada por meio do ajuste numérico dos parâmetros relacionados ao efeito de parede e afastamento. Como resultado, o cálculo dos efeitos de parede, a_{ij} , e de afastamento, b_{ij} , estão dispostas respectivamente nas equações (3.10) e (3.11).

$$a_{ij} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i} \right)^{1,02}} \quad (3.10)$$

$$b_{ij} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_i}{d_j} \right)^3} \quad (3.11)$$

em que d_i é o diâmetro da partícula considerada e d_j é o diâmetro da partícula que está ocasionando a interferência.

O índice K , que é uma característica do protocolo experimental de empacotamento (DE LARRARD, 1999), é dado em função da contribuição individual de cada classe de grãos ao empacotamento total, conforme a Equação (3.12)

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\phi_i/\phi_i^*}{1 - \phi_i/\phi_i^*} \right] \quad (3.12)$$

em que ϕ_i é o volume de sólidos que a classe i ocupa, enquanto que ϕ_i^* é o máximo volume que a classe i pode ocupar com a presença de outras classes, sendo determinado pela Equação (3.13).

$$\phi_i^* = \beta_i \left\{ 1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[1 - b_{ij} \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] \phi_j - \sum_{j=i+1}^n \left(\frac{a_{ij}}{\beta_j} \right) \phi_j \right\} \quad (3.13)$$

Adotando-se uma mistura sem interação, em que $a_{ij}=b_{ij}=0$. Escreve-se a Equação (3.13) como a Equação (3.14).

$$\phi_i^* = \beta_i \left[1 - \sum_{j=1}^{i-1} \phi_j \right] \quad (3.14)$$

A Equação (3.14) indica que os grãos da classe i irão ocupar ao máximo os espaços deixados pelos grãos de diâmetros maiores, sem que haja a interferência dos grãos de diâmetros menores. A expressão para o índice de empacotamento é dada como na Equação (3.15).

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \left[\frac{y_i/\beta_i}{1/\phi - 1/\gamma^{(i)}} \right] \quad (3.15)$$

Os valores de K para os diversos protocolos experimentais de empacotamento de materiais granulares foram determinados por de Larrard (1999) e são apresentados na Tabela 3, de onde ressalta-se que o empacotamento virtual corresponde a um valor de $K=\infty$.

Tabela 3 – Valores do índice K .

Protocolo de empacotamento	K
Lançamento simples (sem adensamento)	4,1
Lançamento simples + pilonamento	4,5
Vibração	4,75
Demanda de água(*)	6,7
Vibração + compactação de 10 kPa	9
Empacotamento virtual	∞

Fonte: Formagini (2005).

(*) Recomendado para materiais granulares com dimensão inferior a 0,075 mm.

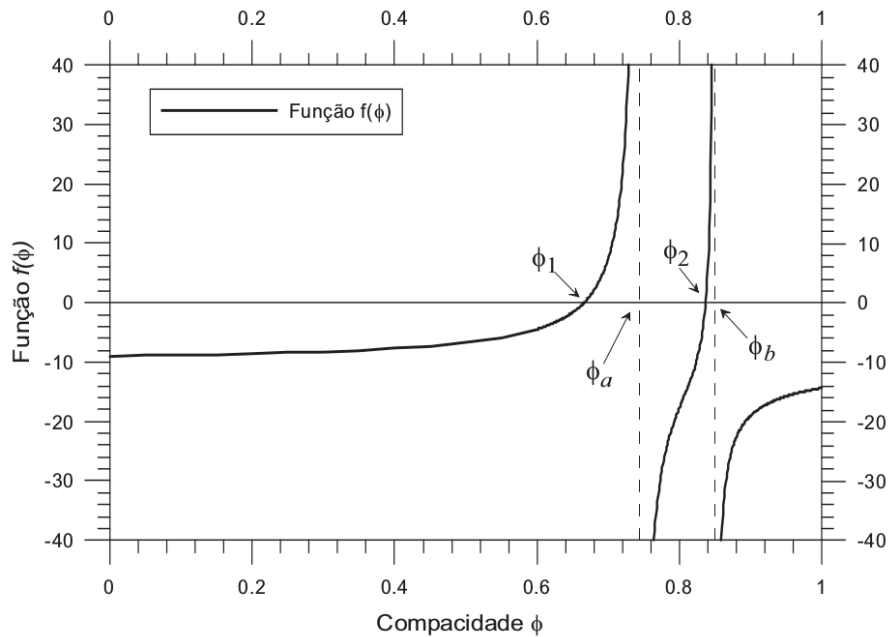
Os valores da Tabela 3 são úteis para a determinação da compacidade real, ϕ_i , e virtual, β_i , de empacotamento para uma determinada classe granular i . O cálculo é realizado por meio da Equação (3.16), porém previamente ao cálculo, é necessário realizar a determinação da compacidade real (ϕ), mediante um protocolo de empacotamento K .

$$\beta = \frac{1 + K}{K} \phi \quad (3.16)$$

Formagini (2005) apresentou um exemplo para a solução da Equação (3.15), para o caso de uma mistura binária, que posteriormente foi generalizada para uma mistura polidispersa. Assim sendo, inicialmente o autor reescreveu a Equação (3.15) de forma implícita, $f(\phi)=0$, obtendo-se a Equação (3.17).

$$f(\phi) = \frac{y_1/\beta_1}{1/\phi - 1/\gamma^{(1)}} + \frac{y_2/\beta_2}{1/\phi - 1/\gamma^{(2)}} - K = 0 \quad (3.17)$$

Assim, a Equação (3.17) foi aplicada para o caso de uma mistura binária com esferas de diâmetro, $d_1=10$ e $d_2=1$, compacidades virtuais iguais de $\beta_1=\beta_2= 0,74$, frações volumétricas $y_1=0,8$ e $y_2=0,2$, bem como um protocolo de empacotamento igual a $K=9$. A solução deste caso pode ser visualizada na Figura 8, em que se procurou o valor de ϕ que torna a função $f(\phi)$ igual a zero.

Figura 8 – Função $f(\phi)$ para uma mistura binária sem os efeitos a_{ij} e b_{ij} .

Fonte: Formagini (2005).

Como resultado, a Figura 8 mostra que ϕ_1 e ϕ_2 são raízes de $f(\phi)$. Além disso, ϕ_a e ϕ_b correspondem às descontinuidades de $f(\phi)$, já que Equação (3.15) não é definida para $1/\phi = 1/\gamma^1$ e $1/\phi = 1/\gamma^2$, o que leva para a conclusão que $\phi_a = \gamma^{(1)}$ e $\phi_b = \gamma^{(2)}$.

Como a Equação (3.17) está arranjada de forma implícita, esta deve ser resolvida por meio de um processo iterativo. O domínio da solução pode ser restringido para $0 < \phi < \gamma$, uma vez que, por definição, a compacidade real sempre será menor que a virtual. Como resultado da delimitação, a raiz de $f(\phi)$ correspondente à compacidade real é igual a ϕ_1 (FORMAGINI, 2005).

3.2.2.2 Outros modelos geométricos

Além do MEC, existem outras abordagens à previsão da densidade de empacotamento (ROQUIER, 2017). Uma delas consiste na consideração dos efeitos geométricos de afastamento, parede e cunha, mas não leva em conta a influência do processo de empacotamento. Tal abordagem é recorrente ao modelo de Kwan *et al.* (2013b). Essa modelagem decorre da percepção de que o LPDM (*Linear Packing Density Model*) normalmente superestima os valores da compacidade quando as frações volumétricas dos grãos correspondem à máxima densidade de empacotamento (CHAN; KWAN, 2014). Para corrigir esta discrepância, Kwan *et al.* (2013b) introduziram o efeito de cunha e realizaram uma nova dedução para os parâmetros a_{ij} e b_{ij} . Como resultado, foi desenvolvido o modelo de três parâmetros denominado 3-PPM (*3-parameter Particle Packing Model*) (ROQUIER, 2019).

A segunda abordagem também considera os parâmetros a_{ij} e b_{ij} no contexto da densidade de empacotamento virtual. Além destes, assim como no MEC, usa-se o índice K para realizar a conversão entre a compacidade real e a virtual (ROQUIER, 2017). A novidade está na

inclusão do *critical cavity size ratio*, x_0 por Roquier (2016). Com esse parâmetro pode-se levar em conta a forma das partículas e sua rugosidade superficial (ROQUIER, 2017; ROQUIER, 2019), que viabilizam uma melhor fidedignidade no uso de agregados angulares. Dessa forma, foi desenvolvido o modelo combinado de quatro parâmetros, 4-PPM (*4-parameter Particle Packing Model*), que posteriormente foi denominado de TPDM (*Theoretical Packing Density Model*) (ROQUIER, 2019).

3.2.3 Parâmetros dos modelos de empacotamento

Os modelos de empacotamento apresentados nos itens 3.2.1 e 3.2.2 foram deduzidos por meio de abordagens diferentes, tais como a consideração de distribuições granulométricas discretas ou contínuas. Alguns parâmetros de entrada, dispostos na Tabela 4, são comuns entre as formulações, pois os modelos analíticos e combinados objetivam o mesmo resultado, que é a redução dos vazios na mistura granulométrica.

Tabela 4 – Variáveis de entrada dos modelos de empacotamento.

Modelos	Parâmetros														
	Diâmetro/diâmetro médio	Diâmetro da menor partícula	Diâmetro da maior partícula	Razão entre peneiras/diâmetros	Número de classes	Volume aparente da classe	Fração volumétrica da classe	Índice de distribuição	Índice de compactação	Compacidade virtual	Compacidade real	Efeito de afastamento	Efeito de parede	Efeito de cunha	Cavity size ratio
Furnas	X	X	X	X	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-
Andersen	X	-	X	-	X	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-
Westmann e Hugil	-	-	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-
Funk e Dinger	X	X	X	-	X	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-
MEC	*	X	X	*	X	-	X	-	X	X	X	X	X	-	-
3-PPM	*	X	X	*	X	-	X	-	-	X	-	X	X	X	-
TPDM	*	X	X	*	X	-	X	-	X	X	X	X	X	-	X

Fonte: O autor.

Legenda: X fator contemplado; * fator considerado indiretamente; - fator não considerado.

Apesar dos diferentes caminhos e concepções físicas, todos os modelos utilizam a “fração volumétrica” das classes dos agregados. O emprego deste parâmetro facilita a separação do volume sólido do volume de vazios na fase da dedução das formulações matemáticas no MEC por exemplo. Com esse parâmetro, nos modelos analíticos, pode-se construir a curva granulométrica do esqueleto granular para efeito de comparação e dosagem de misturas cimentícias. Assim sendo, a fração volumétrica é o fator mais “próximo” ao projetista da mistura, pois refere-se ao volume ou à massa, que deve ser dosado antes do preparo da mistura em laboratório ou na obra.

Nos modelos analíticos e combinados, pode-se observar que ambos abordam parâmetros dimensionais das partículas. Os modelos analíticos trazem este parâmetro diretamente

relacionado à fração volumétrica. Já nos modelos combinados, a dimensão das partículas ocasiona os parâmetros de interação geométrica. Na fase de dedução dos modelos, o diâmetro da partículas foi considerado igual a de uma esfera, análogo à teoria *Apollonian packing*. Tal concepção simplificou os cálculos, mas deveria ser substituída por outra mais acurada, já que os agregados utilizados no concreto não possuem um formato perfeitamente esférico.

O uso dos diâmetros como parâmetros de entrada não restringe o número de materiais particulados a serem adicionados no projeto granular do concreto. Diferentemente dos métodos convencionais, que normalmente limitam-se ao uso de cimento, areia e brita (FORMAGINI, 2005), nos modelos de empacotamento em geral, as equações permitem o emprego de qualquer material particulado. Assim, pode-se projetar a mistura granular com diferentes materiais particulados, tais como fíleres, pozolanas e agregados reciclados. Essa flexibilidade oportuniza a aplicação de tais metodologias na produção de concretos especiais, que normalmente possuem adições minerais que não são consideradas nos métodos usuais de dosagem.

A “razão entre peneiras” e o “índice de distribuição” são parâmetros que regem a razão dimensional entre as partículas empregadas na dosagem, sendo abordados nos modelos de Furnas (1931), Andreasen (1930) e Funk e Dinger (1994). No caso do modelo Furnas, esta razão é calculada em função das peneiras utilizadas, o que exige que o usuário do modelo tenha experiência na escolha das dimensões das peneiras que promovam um melhor empacotamento. No modelo de Andreasen (1930), este parâmetro foi determinado por ensaios experimentais e no modelo de Funk e Dinger (1994), simulações computacionais apontaram que “índice de distribuição” deve ser igual 0,37 para o alcance da maior densidade de empacotamento (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

No MEC “a compacidade virtual” é caracterizada como a compacidade máxima do arranjo granulométrico, sendo demonstrada por meio de um arranjo com duas classes de grãos (DE LARRARD, 1999). Este conceito foi idealizado para o cálculo da “compacidade real” de cada classe, que depende de um ensaio experimental sob um valor do “índice de compactação”. O último foi determinado por de Larrard (1999) em função do protocolo de compactação utilizado no ensaio. Por exemplo, o ensaio de compacidade pode ser realizado por vibração ou apiloamento, que correspondem respectivamente a um índice de compactação igual 4,75 e 4,50.

O cálculo da compacidade real da mistura é realizado mediante a determinação da compacidade real de cada classe. Além disso, resgata-se a formulação do “índice de empacotamento” escrita de maneira implícita. Para misturas com mais de duas classes de agregados, este cálculo é feito por meio de um processo iterativo. O emprego desta abordagem promove uma melhor robustez do algoritmo de cálculo, que depende da delimitação das compacidades virtuais em um intervalo entre 0 e 1 (FORMAGINI, 2005).

Os parâmetros de interação geométrica, que são os “efeitos de parede” e “afastamento” que complementam a teoria analítica dos modelos combinados, logicamente não foram tratados nos modelos analíticos. Estes parâmetros trazem maior representatividade física para a teoria do empacotamento de partículas em relação aos modelos analíticos. Além disso, de Larrard (1999)

desenvolveu as formulações de a_{ij} , e b_{ij} por meio de ajustes destas aos dados de experimentais de compacidade de agregados arredondados e também os britados.

Os últimos modelos desenvolvidos, 3-PPM e o TPDM, tiveram a adição de mais dois parâmetros, efeito de cunha e *cavity size ratio* respectivamente. Os modelos foram aplicados a 334 dados experimentais de empacotamento de misturas binárias esféricas disponíveis na literatura, tal como indicado na Tabela 5. Três indicadores estatísticos foram empregados na avaliação da precisão dos modelos, sendo a curva de regressão teórica ϕ_{theo}^* , experimental ϕ_{exp}^* , erro absoluto ξ , e o coeficiente de correlação r_c .

Tabela 5 – Modelos aplicados a dados de empacotamento experimentais de misturas binárias.

Autores:	MEC	3PPM	TPDM
Sedran <i>et al.</i> (1994): 98 resultados	$\Phi_{theo}^* = 0,757$	$\Phi_{theo}^* = 0,697$	$\Phi_{theo}^* = 0,924$
	$\Phi_{exp}^* + 0,146$	$\Phi_{exp}^* + 0,176$	$\Phi_{exp}^* + 0,045$
	$\xi = 0,016$	$\xi = 0,016$	$\xi = 0,012$
	$r_c = 0,9555$	$r_c = 0,9700$	$r_c = 0,9690$
Lecomte <i>et al.</i> (1997): 99 resultados	$\Phi_{theo}^* = 0,933$	$\Phi_{theo}^* = 0,843$	$\Phi_{theo}^* = 0,926$
	$\Phi_{exp}^* + 0,042$	$\Phi_{exp}^* + 0,080$	$\Phi_{exp}^* + 0,040$
	$\xi = 0,009$	$\xi = 0,017$	$\xi = 0,008$
	$r_c = 0,9611$	$r_c = 0,9670$	$r_c = 0,9724$
Hanini (2012): 56 resultados	$\Phi_{theo}^* = 1,186$	$\Phi_{theo}^* = 0,938$	$\Phi_{theo}^* = 0,951$
	$\Phi_{exp}^* - 0,097$	$\Phi_{exp}^* + 0,031$	$\Phi_{exp}^* + 0,030$
	$\xi = 0,016$	$\xi = 0,010$	$\xi = 0,010$
	$r_c = 0,9563$	$r_c = 0,9183$	$r_c = 0,9325$
Kwan <i>et al.</i> (2015): 81 resultados	$\Phi_{theo}^* = 0,955$	$\Phi_{theo}^* = 1,027$	$\Phi_{theo}^* = 0,968$
	$\Phi_{exp}^* + 0,035$	$\Phi_{exp}^* - 0,016$	$\Phi_{exp}^* + 0,023$
	$\xi = 0,012$	$\xi = 0,006$	$\xi = 0,007$
	$r_c = 0,9501$	$r_c = 0,9853$	$r_c = 0,9777$
Balanço geral: 334 resultados	$\Phi_{theo}^* = 0,870$	$\Phi_{theo}^* = 0,796$	$\Phi_{theo}^* = 0,934$
	$\Phi_{exp}^* + 0,084$	$\Phi_{exp}^* + 0,116$	$\Phi_{exp}^* + 0,042$
	$\xi = 0,013$	$\xi = 0,013$	$\xi = 0,009$
	$r_c = 0,9408$	$r_c = 0,9455$	$r_c = 0,9665$

Fonte: Roquier (2017).

Por meio de tais métricas, Roquier (2017) constatou que o seu modelo de quatro parâmetros (TPDM) é mais preciso que os demais. No entanto, os resultados apresentados pelo modelo de quatro parâmetros aparentemente não trouxeram uma expressiva melhora na acurácia da predição das densidades de empacotamento.

3.2.4 Aplicações dos modelos de empacotamento

A possibilidade de previsão e cálculo da distribuição granulométrica de maior compacidade motivou muitos pesquisadores da tecnologia do concreto a empregarem modelos de empacotamento. Os principais resultados encontrados com a aplicação de diferentes modelos de partículas aos materiais cimentícios podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6 – Trabalhos que empregaram modelos de empacotamento de partículas para dosagem de materiais a base de cimento.

Autor	Modelo	Aplicação	Resultados
Brewe e Myers (2005)	Funk e Dinger	Concreto convencional	Redução do consumo de cimento e ganho de resistência mecânica
Formagini (2005)	MEC	Dosagem científica do CAD	Otimização da resistência mecânica
Kwan e Fung (2009)	MEC	Dosagem de argamassa	Método de medida da densidade de empacotamento
Filho <i>et al.</i> (2012)	MEC	CUAD	Aumento da resistência mecânica e da ductilidade
Alkaysi <i>et al.</i> (2016)	Funk e Dinger	CUAD	Aumento da resistência ao ataque de cloretos e da perda de massa por gelo-degelo
Rebmann (2016)	Westann + MEC	Concreto convencional	Redução do consumo de cimento para um concreto de 50 MPa
Mehdipour e Khayat (2017)	Funk e Dinger	Distribuição granulométrica de ligantes	Aumento da densidade de empacotamento de pastas de concreto
Amario <i>et al.</i> (2017)	MEC	Concretos com agregados reciclados	Manutenção das propriedades mecânicas com a inclusão do RCA
Damineli <i>et al.</i> (2017)	Westman + Funk e Dinger	Concretos convencionais	Melhora da eficiência do ligante
Pyo <i>et al.</i> (2017)	Funk e Dinger	CUAD	Emprego de fíleres mais grossos sem perda de resistência mecânica.
Oliveira (2018)	Funk e Dinger	CAD	Aumento da resistência mecânica e redução do índice de ligante
Zuo <i>et al.</i> (2018)	Funk e Dinger, MEC e 3-PPM	Concreto autoadensável	Desenvolvimento de método multiescala para otimização da densidade da matriz granulométrica
Sun <i>et al.</i> (2018)	TPDM	CAD	A maior compacidade gerou melhores resultados nos ensaios de durabilidade
Carvalho (2019)	Funk e Dinger	Compósitos cimentícios ecoeficientes	Matrizes cimentícias com baixo consumo de água e maior resistência à compressão
Campos <i>et al.</i> (2020)	MEC	CAD	Redução do consumo de cimento, aumento da trabalhabilidade e da durabilidade

Fonte: O autor.

Legenda: CAD=Concreto de alto desempenho; CUAD=Concreto de ultra alto desempenho;

RCA=Recycled concrete aggregate.

Os trabalhos científicos que empregaram métodos de empacotamento na dosagem de materiais cimentícios indicam que os autores visaram principalmente ao ganho de resistência mecânica do material, assim como a redução do consumo de cimento. Para atingir esses objetivos os trabalhos empregaram principalmente os modelos analítico de Funk e Dinger (1994) e o modelo combinado MEC.

De maneira geral, a otimização da resistência do material foi aplicada nos trabalhos que dosam os CAD e CUAD. Para a obtenção de sucesso na dosagem destes tipos de concretos de elevado desempenho, constatou-se que foi necessário o emprego de materiais cimentícios suplementares como a sílica ativa. O cálculo da proporção adequada desses materiais finos no empacotamento da mistura foi alcançado por meio da abordagem analítica dos modelos, visto que no emprego dos métodos analíticos e combinados não há restrição no número de diferentes tipos de materiais particulados, como os de maior finura.

Concretos com resistência mecânica elevada podem ser alcançados por meio do aumento da densidade de empacotamento de sua matriz granulométrica (FILHO *et al.*, 2012; AL-KAYSI *et al.*, 2016), obtida tanto pelo efeito da adição de novos particulados e da possibilidade de gestão de “n” materiais por meio dos conceitos e modelos de empacotamento (FORMAGINI, 2005). O termo alto desempenho normalmente está relacionado a resistência mecânica, porém, no caso destes concretos otimizados há também ganho na durabilidade. A significativa redução do fator água/cimento e a alta compactidade resultantes do empacotamento, aumentam a durabilidade do concreto perante o ataque de cloretos, a difusão de CO₂ e a ação do gelo-degelo (WONG *et al.*, 2013).

A otimização da distribuição granulométrica do esqueleto granular do concreto promove a alteração de algumas de suas características, tanto no estado fresco quanto no endurecido (CHAN; KWAN, 2014; MEHDIPOUR; KHAYAT, 2017). Pode-se destacar os efeitos causados pelo empacotamento das partículas da pasta de cimento por meio da inserção de fileres inertes ou reativos, assim como o empacotamento dos agregados graúdos pelo proporcionamento adequado da fração volumétrica de materiais quartzosos e basálticos de diferentes dimensões (REBMANN, 2016).

Quando a densidade de empacotamento de um esqueleto granular com partículas que constituirão a pasta é aumentada, significa que os vazios deste foi reduzido. A adição de água à essa matriz granular a tornará uma suspensão que, por possuir menos vazios, irá demandar menor quantidade de água para preencher os interstícios, afastar as partículas e gerar fluidez no sistema. A água que ocuparia os interstícios de um esqueleto granular com menor compactidade pode ser descartada, resultando na redução da relação água/cimento que reflete diretamente no aumento da resistência mecânica (REBMANN, 2016; DAMINELI *et al.*, 2017; SUN *et al.*, 2018).

Similarmente para uma escala maior, o aumento da densidade de empacotamento entre os agregados miúdos e graúdos melhora as características reológicas do concreto devido à diminuição da demanda de pasta que ocupa os poros e envolve estes agregados. A pasta que ocuparia os vazios de uma mistura granular de menor compactidade torna-se disponível para promover a fluidez do concreto (DAMINELI *et al.*, 2017; MEHDIPOUR; KHAYAT, 2017; SUN *et al.*, 2018).

Em casos em que a mistura granular otimizada não demanda elevada fluidez pode-se melhorar a estabilidade dimensional do concreto. Tal como exposto no parágrafo anterior, um sistema compacto exige um menor volume de pasta e, conseqüentemente, de cimento. A possibilidade de reduzir a quantidade de cimento promove a redução das variações dimensionais originadas da

hidratação do clínquer, uma vez que a diminuição do consumo de cimento junto à pasta leva a atenuação do calor de hidratação e da retração autógena nas primeiras idades (WONG *et al.*, 2013). Além disso, o estudo de Kwan *et al.* (2013a) mostrou que a redução de até 12% do volume da pasta de cimento promoveu um decréscimo de 28% na retração por secagem do concreto.

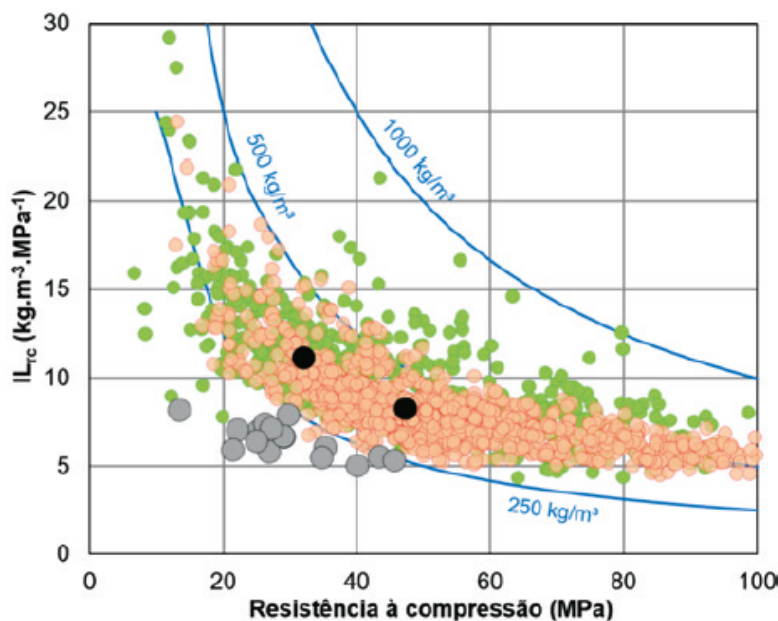
A otimização do arranjo granulométrico confere maior compactidade ao concreto. Quando mais compacto menor será o índice de vazios e menor será o consumo de água, até um certo limite, para garantir uma determinada trabalhabilidade (DAMINELI *et al.*, 2017). A diminuição do volume de água reduz o fator água/cimento da mistura, promovendo o aumento da resistência mecânica para um fixo consumo de cimento. Por outro lado, caso a resistência à compressão seja fixada na dosagem, é possível reduzir o consumo de cimento do concreto, podendo assim diminuir a pegada de carbono na cadeia produtiva deste material (FILHO *et al.*, 2012; DAMINELI *et al.*, 2017; ROQUIER, 2019).

Ademais da dosagem dos concretos de elevado desempenho, destaca-se a aplicação da metodologia de empacotamento na produção de concretos convencionais. Nesta prática, o cálculo da proporção dos agregados é planejado com o intuito de reduzir o consumo de cimento do concreto sem perda de resistência. Como resultado, alguns autores utilizaram o conceito de índice de ligante, introduzido por Daminieli *et al.* (2010), fixando a resistência mecânica e com a aplicação do método de empacotamento reduziram as quantidades de cimento e, assim, otimizaram a eficiência do cimento como ligante.

A preocupação com a elevada emissão de CO₂ na produção de cimento motivou a aplicação dos métodos de empacotamento de partículas na redução do consumo de cimento do concreto (ROQUIER, 2019). A manutenção da resistência mecânica proveniente do aumento da compactidade para um menor consumo de cimento indica o aumento da eficiência do cimento como ligante. A otimização do uso de cimento proporcionado pelo empacotamento é uma boa estratégia para mitigação da emissão do CO₂. Com a melhora da eficiência do ligante, a dosagem para uma resistência fixa permite a redução significativa do consumo de cimento (DAMINELI *et al.*, 2017), o que leva a mitigação da emissão de CO₂ na cadeia do concreto.

A Figura 9 ilustra a comparação do índice de ligantes de concretos produzidos no Brasil (pontos verdes) e dos produzidos no mundo (pontos vermelhos). Os pontos em preto e em cinza representam os concretos estudados no trabalho de Daminieli *et al.* (2017), sendo que os de cor preta são concretos de referência e os de cor cinza representam concretos dosados por meio de métodos de empacotamento e dispersão de partículas. A posição destes últimos no gráfico indica que eles possuem os menores índice de ligantes (IL) (consumo de cimento por resistência à compressão), o que permite concluir que o tipo de dosagem empregado melhorou a eficiência do cimento como ligante em relação aos demais concretos do *benchmark*.

Figura 9 – Índice de ligantes.



Fonte: Daminelli (2017).

De acordo com a revisão bibliográfica realizada, identificou-se que os materiais cimentícios convencionais e especiais podem ser dosados por meio de modelos de empacotamento de partículas analíticos e combinados (Tabela 6). Ademais, a diferença entre estes dois últimos está no tratamento geométrico em que os modelos combinados adicionaram à abordagem analítica de modelagem.

Os modelos analíticos estudados, de Andreasen (1930) e de Funk e Dinger (1994), apresentaram parâmetros relacionados à dimensão das partículas, tais como o diâmetro da menor e da maior partícula a ser empregada no empacotamento. Estes parâmetros proporcionam relativa facilidade na determinação da curva granulométrica empacotada, uma vez que para o cálculo da fração volumétrica de cada tipo de material particulado presente, são considerados apenas estes parâmetros dimensionais.

Em contrapartida, os modelos combinados exigem um maior número de parâmetros para a otimização da densidade de empacotamento quando comparados com os modelos analíticos. Os efeitos geométricos considerados, tais como o efeito de parede e de afastamento, necessitam ser ajustados em função da razão dimensional entre os agregados. Além disso, a determinação da compacidade real da mistura, necessita do cálculo prévio das compacidades virtuais e reais de cada classe de agregado, sendo que a solução da compacidade virtual é feita por meio de cálculo numérico. No entanto, a maior robustez nos cálculos confirma a maior precisão e confiança do empacotamento realizado pelos modelos combinados, pois consideram parâmetros que não são abordados nos métodos analíticos.

Os últimos parâmetros adicionados à modelagem clássica do LPDM e do MEC proporcionaram a predição de valores mais precisos da densidade de empacotamento. O efeito de cunha e o “*cavity size ratio*” buscaram suavizar os valores de compacidade que geralmente eram superes-

timados na zona em que as frações volumétricas produzem o empacotamento máximo. No entanto, tais modelos não apresentaram uma previsão muito maior que a modelagem clássica, carecendo de mais estudos para comprovar sua aplicabilidade. Ainda vale ressaltar a inclusão do parâmetro *cavity size ratio* pode promover maior fidedignidade no cálculo da compacidade de partículas angulares, tais como os agregados britados e os reciclados.

Dentre os trabalhos que aplicaram métodos de empacotamento de partículas na dosagem de materiais cimentícios (Tabela 6), verificou-se que os modelos mais utilizados foram os modelos de Funk e Dinger (1994) e o MEC, sendo que estes foram aplicados com o intuito de otimizar as características mecânicas e reduzir do consumo de cimento destes materiais. Dessa forma, nos trabalhos em que se buscou o ganho de resistência, os métodos de empacotamento foram aplicados na dosagem do CAD e CUAD, proporcionando um gerenciamento adequado dos fíleres utilizados nestes concretos. De maneira semelhante, quando o intuito foi a redução do consumo de cimento, os pesquisadores aplicaram o empacotamento de partículas para a produção de concretos convencionais, de modo que, para uma mesma resistência mecânica o índice de ligante foi otimizado, melhorando a eficiência do cimento.

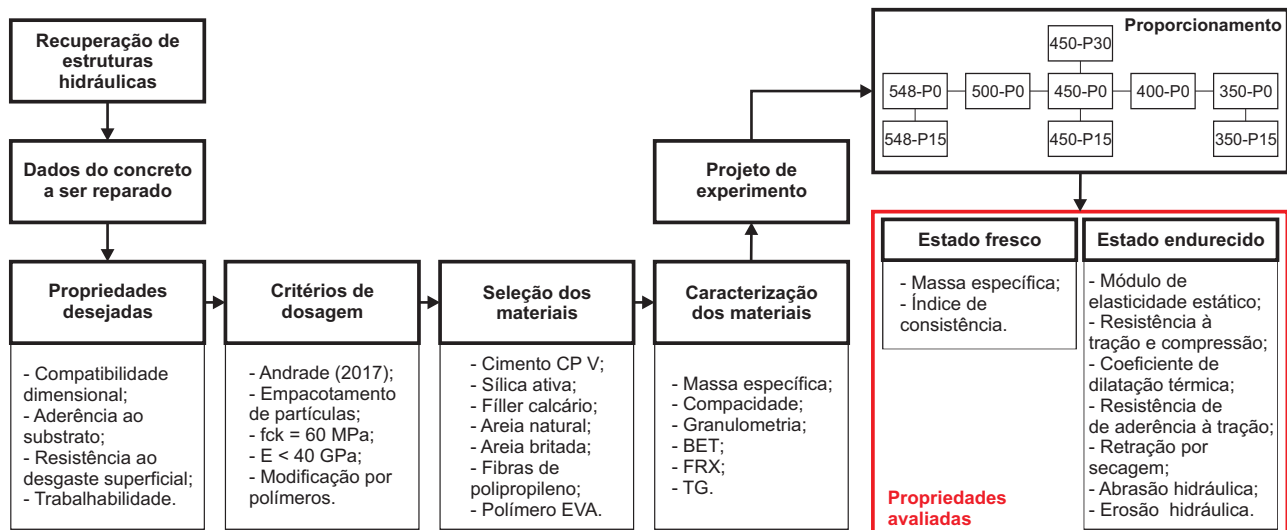
Dentro deste contexto, este estudo aplica o MEC para o proporcionamento de materiais cimentícios para o reparo de estruturas erodidas, visto que este contempla a dosagem de misturas cimentícias por meio do conceito de densidade de empacotamento, além de possibilitar a previsão da compacidade da mistura granular seca e a correlação desta, quando da adição de água, com as propriedades do material cimentício dosado. Com o emprego da metodologia de empacotamento de partículas deseja-se reduzir o consumo de cimento da argamassa de reparo mantendo sua resistência mecânica e melhorar o controle dimensional com ênfase no comportamento em uso. Em resumo, deseja-se mitigar a retração do material de reparo e melhorar seu controle dimensional, assim como manter a resistência ao desgaste abrasivo-erosivo, que são requisitos para o desempenho de um reparo .

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta as considerações empregadas no proporcionamento dos materiais para reparo de superfícies hidráulicas, bem como os materiais e ensaios de caracterização necessários para executar a dosagem por meio do MEC (Anexo A). Além disso, nos últimos subitens, são retratados os experimentos para estudo e verificação do desempenho dos materiais proporcionados, o custo e emissões de CO₂, o modelo de Sitnik-Horszczaruk e a análise estatística.

Conforme o objetivo geral da pesquisa que é o proporcionamento de um material para reparo de estruturas hidráulicas erodidas, bem como em respeito aos objetivos específicos, foi proposto o delineamento experimental da Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma do programa experimental.



Fonte: O autor.

No projeto experimental delineado, foram consideradas as recomendações das bibliografias apresentadas no Capítulo 2, sobretudo aquelas que dissertam sobre os critérios e requisitos para a durabilidade (Tabela 1). No entanto, nem sempre as decisões no proporcionamento levam ao atendimento simultâneo de dois ou mais critérios, pois geralmente resultam em efeitos antagonistas entre si. Por exemplo, a escolha pela redução do consumo de cimento pode abrandar a retração do material cimentício, indo ao encontro com o desejável controle dimensional do sistema reparo-substrato, mas, essa decisão pode contribuir para a perda de resistência erosiva e de aderência do sistema. Portanto, dentro de uma abordagem sistêmica como preconizado na literatura, o proporcionamento dos materiais de reparo foi guiado pela busca do equilíbrio entre as propriedades desejadas para a durabilidade do reparo executado.

4.1 PROPRIEDADES DESEJADAS E CRITÉRIOS DE DOSAGEM

Na revisão de literatura identificou-se que a resistência à tração, resistência de aderência ao substrato, a compatibilidade dimensional e a resistência ao desgaste superficial são alguns dos principais critérios de desempenho de um material para reparo de superfícies hidráulicas. Para atender tais critérios no proporcionamento desses materiais, o MEC foi aplicado como método de dosagem adaptado, bem como foram escolhidos materiais propícios ao modelo e aos requisitos elencados. A Tabela 7 apresenta as medidas consideradas para a obtenção de propriedades que resultem na durabilidade do sistema reparo-substrato.

Tabela 7 – Ações para a busca do atendimento de critérios para a durabilidade do reparo.

	Propriedades	Requisitos	Ação
Compatibilidade dimensional	Módulo de elasticidade estático	$R \leq S$	Adição de fibras de polipropileno e redução do consumo de cimento.
	Retração	$R < S$	Redução do consumo de cimento, adição de sílica ativa e adição de fibras de polipropileno
	Coefficiente de expansão térmica	$R < S$	-
Aderência	Resistência de aderência	$R > S$	Adição de sílica ativa e adição de polímero EVA
	Resistência à compressão e à tração	$R > S$	MEC (manutenção do desempenho)
Resistência ao desgaste superficial	Resistência ao desgaste abrasivo-erosivo	$R > S$	MEC (manutenção do desempenho)
Trabalhabilidade	Índice de Consistência	240 ± 10 mm	Adição de aditivo superplastificante

Legenda: R = Reparo; S = Substrato.

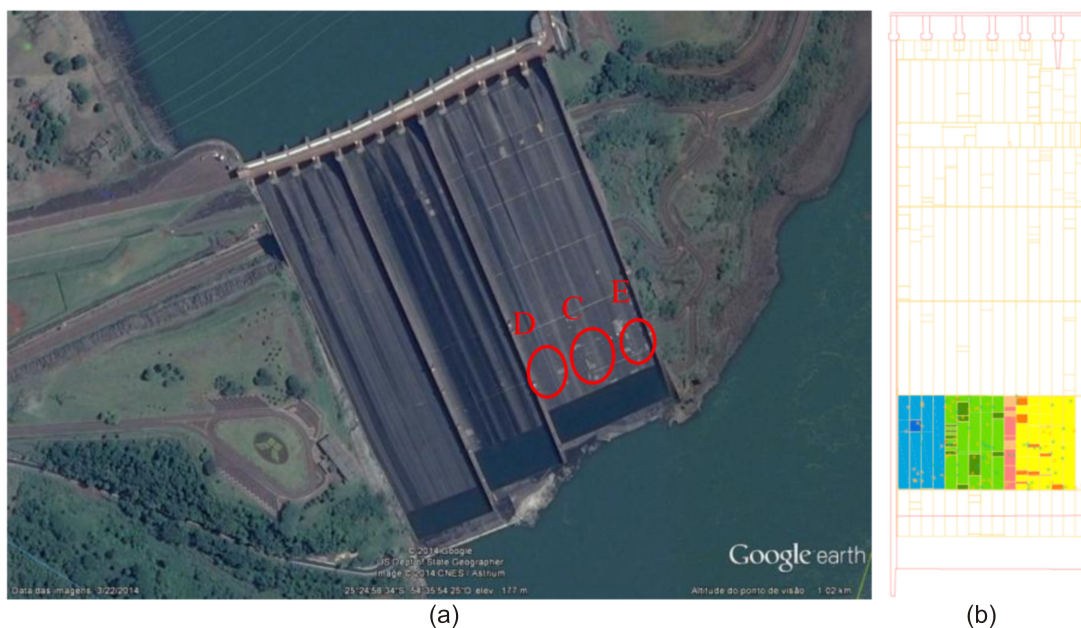
A maioria dos requisitos, dispostos de maneira qualitativa na comparação entre reparo e substrato na Tabela 7, possuem valores quantitativos que também podem contribuir para o proporcionamento de um reparo durável. Alguns destes critérios quantitativos foram estudados no trabalho de Vaysburd *et al.* (1999) e mostrados na Tabela 2, porém os autores não levantaram um valor quantitativo para a resistência ao desgaste abrasivo-erosivo e à compressão, por exemplo. Diante disso, a presente pesquisa utilizará os resultados de estudos anteriores a respeito dos concretos substratos e da argamassa de reparo desenvolvida pelo Engenheiro Walton Pacelli de Andrade¹.

4.1.1 Concretos de substrato

Neste trabalho o proporcionamento das argamassas objetiva o reparo de concretos da calha esquerda do vertedouro da Usina Hidroelétrica de Itaipu (UHI) que são predominantes em regiões (Figura 11(a)) que apresentam pequenas erosões superficiais (MACCAGNAN, 2011).

¹As proporções da argamassa de reparo se encontram no relatório técnico denominado “Procedimento de reparos de concreto”, o qual foi cedido pelo autor para a realização de pesquisas.

Figura 11 – Regiões de estudo à execução de reparos.



Fonte: (a) Willrich *et al.* (2015) (b) Maccagnan (2011).

As cores apresentadas na Figura 11(b) tem a função de diferenciar os proporcionamentos de concreto aplicados nas regiões destacadas. A cor amarela corresponde à um concreto denominado de substrato A, a cor verde ao substrato B e a cor azul corresponde à um concreto com características mecânicas semelhantes ao substrato A. Estes concretos foram estudados pelo Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu (LTCI) que os caracterizaram (Tabela 8) por meio da extração de testemunhos e remoldagens. Por exemplo, a determinação da resistência à tração foi realizada diretamente na calha do vertedouro da UHI.

Tabela 8 – Propriedades dos concretos substrato.

Concreto	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração - pull out (MPa)	Coefficiente de dilatação térmica linear (°C ⁻¹)
Substrato A	58,7	40,4	3,8	8,42×10 ⁻⁶ (*)
Substrato B	50,5	31,2	3,5	-

Fonte: Escobar Neto (2015).

(*) Faria *et al.* (2017)

Além dos estudos realizados pelo LTCI, o projeto “Simulação dos efeitos erosivos no vertedouro da UHI”² avaliou a resistência abrasivo-erosiva dos concretos referentes ao substrato A e B. Os experimentos realizados foram o ensaio de abrasão (*underwater method*) conforme a ASTM C1138M (ASTM, 2019) e o ensaio erosivo por hidrojateamento, sendo este último executado com auxílio de um aparato desenvolvido pela equipe do projeto. Estes dois testes levantaram resultados para a perda de massa, apresentados na Tabela 9.

²Projeto de pesquisa coordenado pelo Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens (PTI/CEASB) e desenvolvido pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná com parceria com Itaipu Binacional, com vigência entre 2013 a 2017.

Tabela 9 – Dados de perda de massa dos concretos substrato.

Concreto	Perda de massa abrasão (g)	Perda de massa erosão (g)
Substrato A	600,0	4,88
Substrato B	1246,7	4,45

Fonte: Rizzi *et al.* (2015).

4.1.2 Argamassa de reparo de referência

Perante a falta de métodos específicos para a dosagem de materiais de reparo, o proporcionamento realizado neste trabalho teve como modelo uma argamassa de reparo (Tabela 10) que já foi empregada em reparos de várias usinas hidrelétricas (ANDRADE, 2017). As propriedades da argamassa de Andrade (2017), denominada de referência, serão confrontadas com as demais argamassas de reparos proporcionadas.

Tabela 10 – Proporcionamento da argamassa de reparo denominada de referência.

Descrição	Quantidade
Cimento CP I (kg/m ³)	548
Sílica Ativa (kg/m ³)	69
Areia Natural (kg/m ³)	1234
Aditivo Superplastificante (%)	1 a 3
Polímero Acrílico ⁽¹⁾ (%)	1
Fibra de Polipropileno ⁽¹⁾ (kg/m ³)	0,9
Água (ajustar) (kg/m ³)	242

Fonte: Andrade (2017).

(1) No caso de grandes áreas.

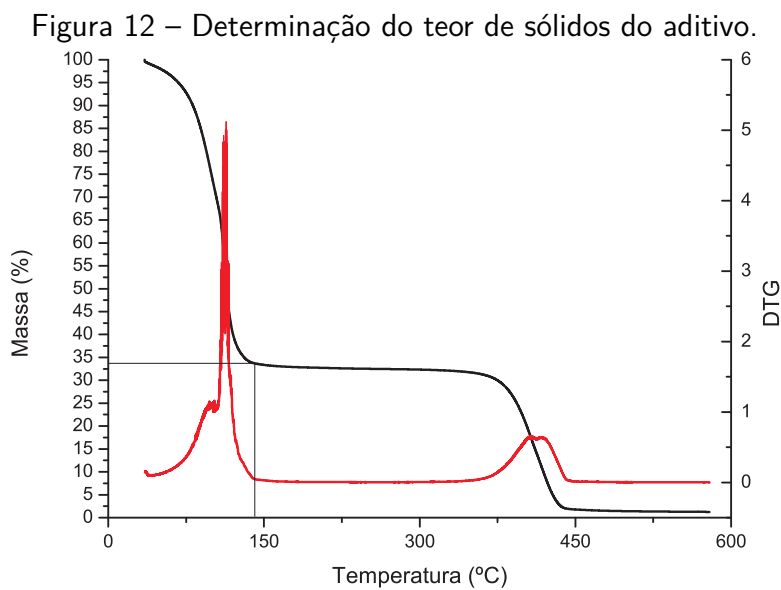
Como pode ser deduzido a partir da Tabela 10, o material de reparo desenvolvido por Andrade trata-se de uma argamassa cimentícia com sílica ativa, fibras de polipropileno e modificada com polímero. Além disso, conforme o documento “Procedimento de reparos em concreto” este material pode ser aplicado por projeção por meio de via úmida, com posterior execução de cura química após o acabamento superficial, conforme recomendado por Andrade (2017).

4.2 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Este subitem apresenta os materiais empregados no proporcionamento dos materiais de reparo. A escolha foi realizada conforme as informações da argamassa de referência com suporte das características dos concretos dos substrato. Além disso, são apresentados os ensaios de caracterização necessários para a construção do banco de dados para entrada no modelo de empacotamento.

4.2.1 Aditivo redutor de água

Nesta pesquisa empregou-se do aditivo superplastificante de alto desempenho MC-PowerFlow 1102 da MC-Bauchemie. A massa específica do produto equivale a $1,07 \text{ g/cm}^3$ (MC-BAUCHEMIE, 2017). A caracterização do teor de sólidos do aditivo foi realizada por meio de análise termogravimétrica. Por se tratar de um material polimérico a base de éter policarboxilato a amostra foi aquecida até uma temperatura de aproximadamente 600°C , como ilustrado na Figura 12.



Na Figura 12, verifica-se que a partir dos 100°C inicia a primeira inclinação brusca de perda de massa. Isso corresponde à fração líquida do aditivo. A estabilização da curva e o pico da DTG indicam o fim da volatilização do líquido após uma perda de massa de 67%, indicando que o aditivo possui um teor de sólidos de aproximadamente 33% em relação a sua massa total. Tal dado foi empregado no ensaio de saturação do aditivo e na compacidade do cimento e adições minerais.

4.2.2 Cimento, adições minerais e areia natural

O cimento selecionado para produção do material para reparo foi o CP V ARI pela característica de apresentar o menor teor de adições dentre os cimentos disponíveis, com resistência à compressão de $47,9 \text{ MPa}$ aos 28 dias, segundo o boletim técnico do fabricante. Este material possui uma área superficial específica BET de $868,5 \text{ m}^2/\text{kg}$, que foi determinada conforme a ISO 9277 (ISO, 2009) em um equipamento da marca Quantachrome, modelo NOVA 3200e. A sílica ativa, possui superfície específica BET de $19000 \text{ m}^2/\text{kg}$, conforme o fabricante. O fíler calcário calcítico foi escolhido para aumentar as possibilidades de redução de consumo de cimento na aplicação do modelo de empacotamento. A areia natural selecionada é de origem mineralógica quartzosa extraída de jazidas do rio Paraná.

A composição química do cimento, sílica ativa, fíler calcário e areia natural foi determinada por análise química semiquantitativa total por espectrometria de fluorescência de raios X. Tal procedimento foi executado por meio do método do pó prensado e o resultados estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11 – Espectrometria de fluorescência de raios X do cimento e das adições minerais.

Amostra	Cimento	Sílica ativa	Fíler calcário ⁽¹⁾	Areia natural
CaO (%)	60,60	1,53	46,30	0,18
SiO ₂ (%)	16,20	92,50	5,00	94,40
Al ₂ O ₃ (%)	4,24	0,31	1,30	1,45
Fe ₂ O ₃ (%)	4,22	0,19	0,80	1,60
SO ₃ (%)	4,14	0,19	0,10	0,03
MgO (%)	3,73	0,59	5,50	0,06
K ₂ O (%)	1,41	1,91	0,30	1,14
TiO ₂ (%)	0,64	-	0,10	0,48
Na ₂ O (%)	0,40	0,33	-	0,12
P ₂ O ₅ (%)	0,19	0,21	<0,01	0,05
SrO (%)	0,10	0,01	<0,01	<0,01
MnO (%)	0,08	0,06	<0,01	0,02
V ₂ O ₅ (%)	0,05	-	-	-
Cl (%)	0,03	0,15	-	0,01
ZnO (%)	0,04	0,01	-	-
ZrO ₂ (%)	0,02	-	-	0,02
NiO (%)	0,01	-	-	-
CuO (%)	0,01	0,01	-	-
Rb ₂ O (%)	0,01	<0,01	-	-
P.F. (%)	3,86	1,98	46,30	0,40

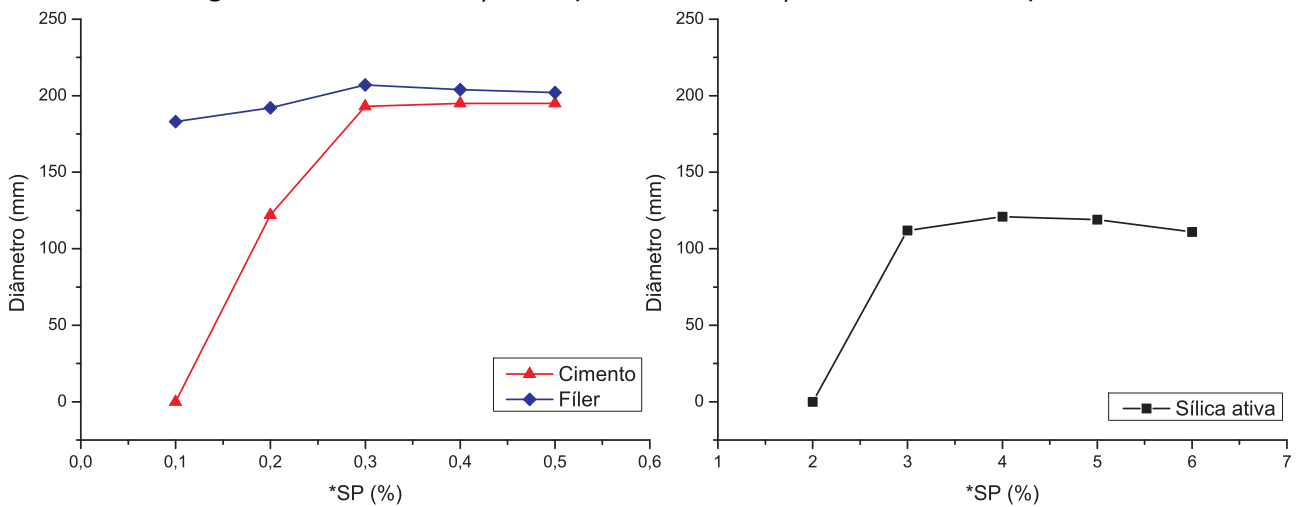
Fonte: USP, 2020 e UFPR, 2019⁽¹⁾.

Legenda: P.F. = Perda ao fogo.

De acordo com o resultado da análise, percebe-se que o fíler possui o teor de MgO dentro da faixa de classificação correspondente ao fíler calcário calcítico. Porcentagens mais elevadas, tais como as presentes no calcário dolomítico, não são interessantes para o emprego em materiais cimentícios, visto que esse composto pode apresentar expansão em idades tardias. Nota-se que a areia natural é composta basicamente por sílica (SiO₂), destacando-se também as quantidades de alumina (Al₂O₃) em 1,45% e de hematita (Fe₂O₃) em 1,60%.

Como pré-requisito à realização do ensaio de demanda de água, o ponto de saturação (Figura 13) do aditivo nas pastas de cimento, sílica ativa e fíler foi determinado conforme a metodologia de Kantro (1980). Os valores de água/material sólido, *a/s*, considerados estão de acordo com o trabalho de Formagini (2005). Os diâmetros de espalhamento, *D_e*, estão indicados na Tabela 28 do Apêndice B.

Figura 13 – Determinação do ponto de saturação do aditivo nas pastas.



Fonte: O autor.

$$*SP = \left(\frac{\text{massa de sólidos do SP}}{\text{massa do material}} \right) \times 100.$$

O teor de saturação foi definido a partir do ponto em que o volume de partículas do material particulado não tem mais capacidade de absorver a quantidade de aditivo inserida. A partir disso, o diâmetro do espalhamento no ensaio de Kantro (1980) deixa de aumentar com o incremento do aditivo. Assim, o ponto de saturação do aditivo para as pastas de cimento e de fíler equivalem a uma dosagem de 0,3% de teor de sólidos do aditivo pela massa de material. O aditivo apresentou elevado ponto de saturação para a pasta com sílica, correspondendo a 4,0%. Os resultados obtidos foram semelhantes aos expostos em Formagini (2005).

Os valores para a massa específica do cimento, sílica ativa e fíler calcário foram determinados conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017) e o da areia natural por meio do processo do picnômetro. O resultado dos ensaios está indicado na Tabela 12. A compactidade real do cimento e das adições foi determinada por meio do ensaio de demanda de água (FORMAGINI, 2005). Tal ensaio corresponde à energia de compactação ou índice de empacotamento $K=6,7$ (Tabela 3). O procedimento experimental foi realizado em um misturador mecânico de bancada. Formagini (2005) aplicou um protocolo equivalente a $K=9$ para a determinação da compactidade dos agregados. Pela falta dos mesmos equipamentos que viabilizam tal protocolo, nesta pesquisa empregou-se um índice de compactação $K=4,1$ que equivale ao lançamento simples do agregado, tal como no ensaio de massa unitária.

Posto isso, foi executado o ensaio para a determinação da massa unitária no estado solto conforme a NBR NM45 (ABNT, 2006), correspondente ao protocolo $K=4,1$, com o auxílio de um recipiente cilíndrico de 10 L e posteriormente calculado o índice de vazios do agregado miúdo. Segundo a definição de compactidade por de Larrard (1999), pode-se entender que os vazios da mistura granular equivalem ao complemento da compactidade experimental. Assim, conhecendo o índice de vazios, foi obtida a compactidade experimental da areia natural, disposta na Tabela 12.

Tabela 12 – Características dos materiais.

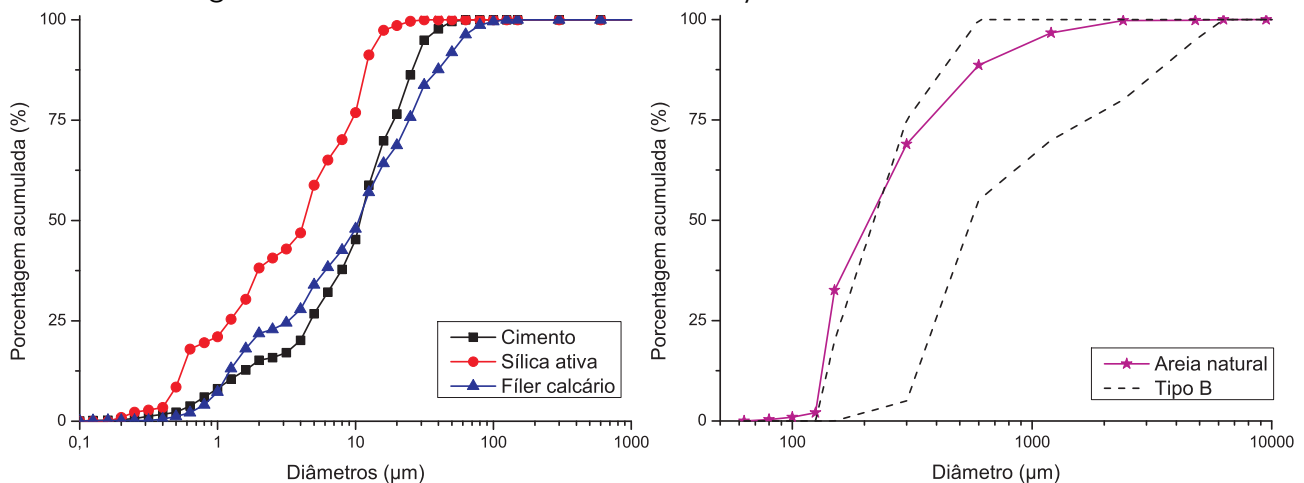
		Cimento	Sílica ativa	Fíler calcário	Areia natural*
Massa específica	g/cm ³	2,97	2,20	2,71	2,65
Massa unitária	g/cm ³	-	-	-	1,72
Índice de vazios	%	-	-	-	41,55
Compacidade real	K=6,7	0,616	0,391	0,737	-
Compacidade real	K=4,1	-	-	-	0,585
Compacidade real	K=9,0	-	-	-	0,627

Fonte: O autor.

(*) areia seca em estufa por 24 horas

A curva granulométrica do cimento e das adições foi estabelecida por granulometria por difração à laser em meio aquoso sem dispersante. O equipamento utilizado foi o CILAS 1190, com faixa de leitura de 0,04 à 2500 μm , originando 100 classes dimensionais. A granulometria da areia natural foi determinada mediante o ensaio de peneiramento conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003). O resultado dos experimentos pode ser visualizado na Figura 14.

Figura 14 – Granulometria do cimento, adições minerais e areia natural.



Fonte: O autor.

Nota: Antes do ensaio a sílica ativa foi dispersa durante 6 horas em banho ultrassônico e areia natural seca em estufa.

As curvas granulométricas acumuladas do cimento e fíler calcário apresentaram uma distribuição semelhante. Isso também refletiu no diâmetro médio, pois o cimento apresentou um valor de 12,32 μm para o diâmetro correspondente à 50% da curva e o fíler calcário 11,84 μm . O diâmetro médio da sílica ativa foi caracterizado em 3,01 μm . Conforme a Figura 14 pode-se verificar que a areia natural se enquadra parcialmente nos limites do tipo B da norma britânica BS 1199 (BRITISH STANDARD, 1976). A areia natural apresentou os valores de 2,36 mm e 0,15 mm para a dimensão máxima e mínima característica, respectivamente. O módulo de finura resultante foi de 2,11. O teor de material pulverulento foi caracterizado no percentual de 0,52 e a absorção em 0,28%.

4.2.3 Fibra e polímero

A fibra de polipropileno empregada na pesquisa possui 6 mm de comprimento e é indicada para concretos e argamassas. O polímero utilizado é denominado como copolímero composto de vinil acetado etileno para a modificação de argamassas colantes e de reparo. As propriedades da fibra e do polímero são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Especificações técnicas da fibra de polipropileno e polímero EVA.

Propriedades físicas e mecânicas da fibra		Características físicas do polímero	
Diâmetro (μm)	18	Teor de umidade	Máximo 2,0%
Seção	Circular	Estado físico	Pó
Comprimento (mm)	6	pH solução 1%	5,0 - 9,0
Alongamento (%)	80	Massa específica	0,4 - 0,6 g/cm ³
Peso Específico (g/cm ³)	0,91	Teor de material retido #40	Máximo 10,0%
Temperatura de fusão (°C)	160		
Temperatura de ignição (°C)	365		
Resistência à tração (MPa)	300		
Módulo de Young (MPa)	3000		

Fonte: O fabricante.

4.3 PROPORCIONAMENTO DOS MATERIAIS DE REPARO

O MEC foi aplicado no proporcionamento das argamassas de reparo em estudo, por meio do simulador MECFOR (Anexo A) implementado em Formagini (2005). Preliminarmente, foi realizado um proporcionamento teste de dois de materiais de reparo denominados de M1 e M2, objetivando a verificação do potencial de redução do consumo de cimento pelo MEC, com dados de caracterização de Formagini (2005). Os processos aplicados na dosagem teste e os parâmetros de entrada utilizados podem ser conferidos no Apêndice A.

O proporcionamento dos materiais cimentícios seguiu a mesma estratégia e procedimentos realizados na dosagem teste, no entanto o banco de dados desta etapa foi construído com as caracterizações dos materiais selecionados para esta pesquisa. Assim sendo, objetivou-se o proporcionamento de quatro novas misturas, que somadas à argamassa de referência (Tabela 10) serão modificadas com polímero. Os valores de consumo de cimento foram fixados em 350, 400, 450 e 500 kg/m³, uma vez que este parâmetro é uma variável controlável do estudo. Na Tabela 14 pode-se conferir o resultado do proporcionamento, assim como a Compacidade, ϕ , resistência à compressão, f_{cm} , e módulo de elasticidade, E_m .

Tabela 14 – Proporcionamento das misturas cimentícias em kg/m³.

Consumo de materiais (kg/m ³)					Parâmetros de dosagem					
Cimento	Sílica	Fíler	Areia	Água	a/c	a/l	a/pulv	ϕ	f_{cm} (MPa)	E_m (GPa)
350	70	128	1570	211	0,60	0,50	0,39	0,767	61,7	13,9
400	59	139	1525	231	0,58	0,50	0,39	0,765	61,0	13,8
450	47	149	1466	249	0,55	0,50	0,39	0,762	60,5	13,7
500	26	160	1450	264	0,53	0,50	0,39	0,763	58,9	13,3
548*	69	0	1234	242	0,44	0,39	0,39	-	-	-

Fonte: O autor.

Legenda: a/c = água/cimento; a/l = água/(cimento+sílica); a/pulv = água/(cimento+sílica+fíler).

(*) Mistura de referência.

Foram proporcionados quatro misturas com consumos de cimento diferentes a partir da mistura de referência. Os proporcionamentos com consumos de 350, 450 e 548 kg/m³ foram modificados por polímeros no valor de 1,5%. Além disso, no material com consumo de cimento de 450 kg/m³ também foi adicionado o valor de 3,0% de polímero EVA. Como resultado da dosagem e da adição de polímeros foram originados nove proporcionamentos de materiais para reparo, apresentados na Tabela 15. As misturas proporcionadas³ foram caracterizadas conforme os ensaios apresentados na próxima seção.

Tabela 15 – Proporcionamento das misturas cimentícias, em massa.

	Cimento	Sílica ativa	Fíler calcário	Areia natural	Água	Fibras	Polímero
350P0	1	0,20	0,37	4,49	0,60	0,004	0,000
350P15							0,015
400P0	1	0,15	0,35	3,81	0,58	0,004	0,000
450P0							0,000
450P15	1	0,10	0,33	3,26	0,55	0,004	0,015
450P30							0,030
500P0	1	0,05	0,32	2,90	0,53	0,004	0,000
548P0*							0,000
548P15*	1	0,13	0	2,25	0,44	0,004	0,015

Fonte: O autor.

(*) Materiais de reparo de referência.

Nota: "P" faz referência ao teor de polímero.

O teor de adição de fibras considerado foi de 0,4% de fibras de polipropileno. Estudos anteriores em Rohr *et al.* (2019) com o material de referência, indicam que o referido teor diminuiu o módulo de elasticidade da argamassa de referência e não afetou sua resistência erosiva. Os valores para o estudo da adição polimérica foram definidos em 1,5 e 3,0% estão condizentes com a literatura, uma vez que teores maiores podem ocasionar uma elevada incorporação de ar (BOMEDIANO *et al.*, 2020).

³A nomenclatura proposta na Tabela 15 é formada pela junção do número referente ao consumo de cimento (kg/m³) de cada argamassa e da letra "P" seguida por dois algarismos alusivos ao teor de polímero.

4.4 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE REPARO

Neste item estão apresentados os ensaios relacionados à avaliação do desempenho dos materiais para reparo a base de cimento proporcionados que foram realizados de acordo com suas respectivas normatizações ou adaptações destas (Tabela 16).

Tabela 16 – Ensaios e normas para a avaliação das misturas dosadas.

Ensaio	Norma	Idade (dias)	Amostras (mm)	Total de amostras
Módulo de elasticidade estático	ABNT NBR 8522 (ABNT, 2008)	28	3 CPs 50x100	27
Resistência à compressão	ABNT NBR 5739 (ABNT, 2018b)	7, 28 e 60	6 CPs 50x100	162
Resistência à tração na flexão	ABNT NBR 13279 (ABNT, 2005b)	7 e 28	3 CPs 40x40x160	54
Resistência de aderência à tração	ABNT NBR 13528-3 (ABNT, 2019)	28	21 amostras*	189
Coefficiente de dilatação térmica linear	ABNT NBR 12815 (ABNT, 2012)	28	4 CPs 25x25x285	36
Retração por secagem	ASTM C596 (ASTM, 2018)	32, 39, 46, 53 e 150	6 CPs 25x25x285	54
Abrasão hidráulica	ASTM C1138 (ASTM, 2019)	28	3 CPs 300x100	27
Erosão hidráulica	Não normatizado	28	3 CPs 80x80x30	27
Soma: 576 CPs				

Fonte: O autor.

(*) Pastilhas com 50 mm de diâmetro.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada mediante o preparo das argamassas de reparo em um misturador THB 20 da marca BETOMAQ com capacidade útil de 10 L. Após a imprimação, o processo de mistura deu-se pela adição de toda a água dosada, os materiais pulverulentos e metade do aditivo superplastificante. Após 5 minutos de mistura, foi adicionado a areia natural e o restante do aditivo. Depois da homogeneização, foram inseridos as fibras de polipropileno e o polímero EVA (no caso das argamassas modificadas), sendo então a argamassa misturada por mais 5 minutos. Concluída a mistura, os corpos de prova foram moldados, sendo o desmolde realizado após 24 horas para o início da cura úmida em solução de hidróxido de cálcio até a chegada da próxima etapa experimental para cada propriedade avaliada.

4.4.1 Ensaios no estado fresco

Para avaliação das propriedades no estado fresco foi realizado o ensaio de índice de consistência conforme os procedimentos da NBR 13276 (ABNT, 2016a). Além disso, foi determinada a massa específica conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005a).

4.4.2 Ensaio mecânicos

Os ensaios de caracterização mecânica foram realizados em máquina universal de ensaio MUE-100 da marca EMIC no Laboratório de Estruturas e Materiais de Engenharia (LEME). A Figura 15 mostra o momento da execução dos ensaios.

Figura 15 – Ensaio realizado em máquina universal de ensaio.



Fonte: O autor.

4.4.3 Ensaio de resistência de aderência à tração

Para a realização do ensaio de resistência de aderência à tração foram moldadas 27 placas de concreto, que serviram de substrato para a aplicação dos materiais de reparo, com 360x360x100 mm para possibilitar a obtenção de 21 corpos de prova por material de reparo. A mistura de concreto das placas corresponde a uma das misturas predominantes nas calhas do vertedouro da UHI (substrato A) e seu proporcionamento está disposto na Tabela 17. As superfícies das placas foram desgastadas por jateamento de granalha após 60 dias de cura úmida, para posterior aplicação dos materiais de reparo.

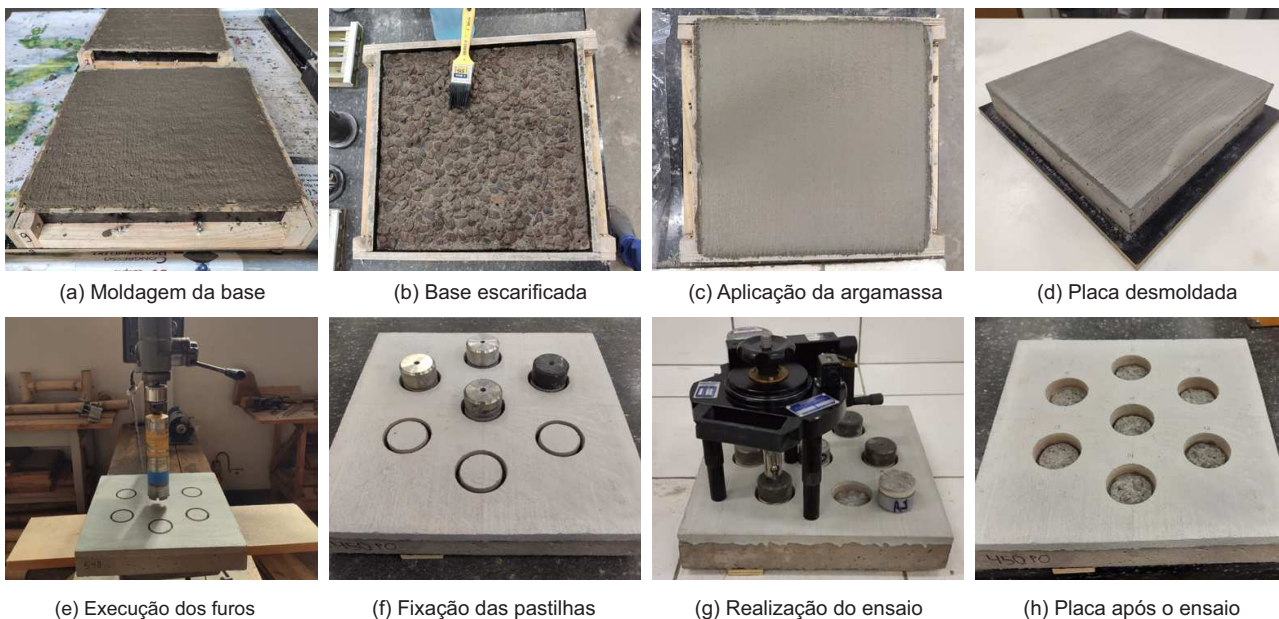
Tabela 17 – Composição do substrato da placa para ensaio de aderência.

	Cimento	Areia natural	Areia britada	Brita 01	Água	Abatimento (mm)
Massa	1	0,62	1,67	3,43	0,42	25±5
kg/m ³	358	93	156	545	150	

Fonte: Willrich *et al.* (2015).

Uma camada de aproximadamente 15 mm de cada argamassa de reparo foi aplicada nos substratos saturados, com superfície limpa e seca após 62 dias da moldagem do concreto da base. Após 28 dias de cura das argamassas, o ensaio de resistência de aderência à tração foi realizado conforme a NBR 13528-3 (ABNT, 2019). No dia do ensaio, o concreto do substrato foi ensaiado à compressão axial com 90 dias, resultando numa tensão de 33,5 MPa. Na Figura 16 pode-se conferir detalhes do ensaio de aderência à tração.

Figura 16 – Procedimentos empregados no ensaio de resistência de aderência.



Fonte: O autor.

4.4.4 Coeficiente de dilatação térmica linear

A condução do experimento foi de maneira adaptada da ABNT NBR 12815 (ABNT, 2012) conforme feito em Faria *et al.* (2017), empregando temperaturas de $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $4^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. No momento das leituras, o ambiente teve a temperatura controlada em 25°C . Os corpos de prova, selados previamente com filme PVC, foram mantidos por pelo menos 48 horas em uma estufa à 50°C e para a temperatura de 4°C os corpos prismáticos foram armazenados em uma geladeira com o controle de temperatura, também por 48 horas.

Figura 17 – Procedimentos empregados no ensaio de coeficiente de dilatação térmica linear.



Fonte: O autor.

O relógio comparador foi instalado próximo à estufa e a geladeira para realizar a leitura no menor tempo possível após a retirada do corpo de prova da estufa e da geladeira. Sendo cada corpo de prova foi medido por pelo menos três vezes até a estabilização do resultado.

4.4.5 Retração por secagem

O ensaio de retração por secagem foi conduzido conforme a ASTM C596 (ASTM, 2018) em seis corpos de prova prismáticos de 25x25x285 mm para cada material de reparo, que foram submetidos à cura úmida por 48 horas após a cura ao ar nas primeiras 24 horas. Após 3 dias da moldagem foi realizada a primeira leitura em antecipação aos 25 dias de secagem previstos em norma, que foi realizada em uma sala semi-climatizada com controle da temperatura em $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$. A norma americana sugere a leitura nos períodos de 4, 11, 18 e 25 dias após os 25 dias de secagem, que correspondem respectivamente às idades de 32, 39, 46 e 53 dias. Além destas, também foi realizada a leitura aos 150 dias após a moldagem. Os corpos de prova e o relógio comparador empregados no ensaio de retração por secagem podem ser visualizados na Figura 18.

Figura 18 – Aparato com relógio comparador e os corpos de prova do ensaio.



Fonte: O autor.

4.4.6 Ensaio de abrasão hidráulica

A perda de massa por abrasão hidráulica foi conduzida conforme a ASTM C1138 (ASTM, 2019). No ensaio, o desgaste abrasivo na superfície do corpo de prova é ocasionado por 70 esferas de aço com diâmetros de 25,3; 19,0 e 12,6 mm. As esferas submersas em água, são rotacionadas por meio de uma pá a 1200 ± 100 rpm. Os ensaios desta pesquisa foram conduzidos em três aparatos simultaneamente. A Figura 19 ilustra o aparato preconizado na norma e a sequência de procedimentos do ensaio.

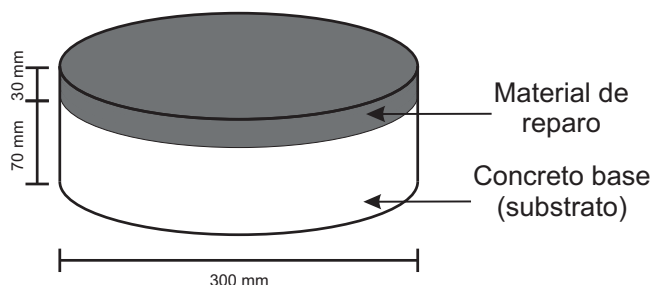
Figura 19 – Aparato de abrasão hidráulica e algumas fases do ensaio abrasivo.



Fonte: O autor.

Assim como no ensaio de resistência de aderência, para o ensaio abrasivo foi confeccionado um corpo de prova base para a aplicação do material de reparo de 300×100 mm. A camada de material de reparo aplicada foi de 30 mm, tal como indicado na Figura 20.

Figura 20 – Esquema do corpo de prova com camada de reparo, para o ensaio de abrasão hidráulica.



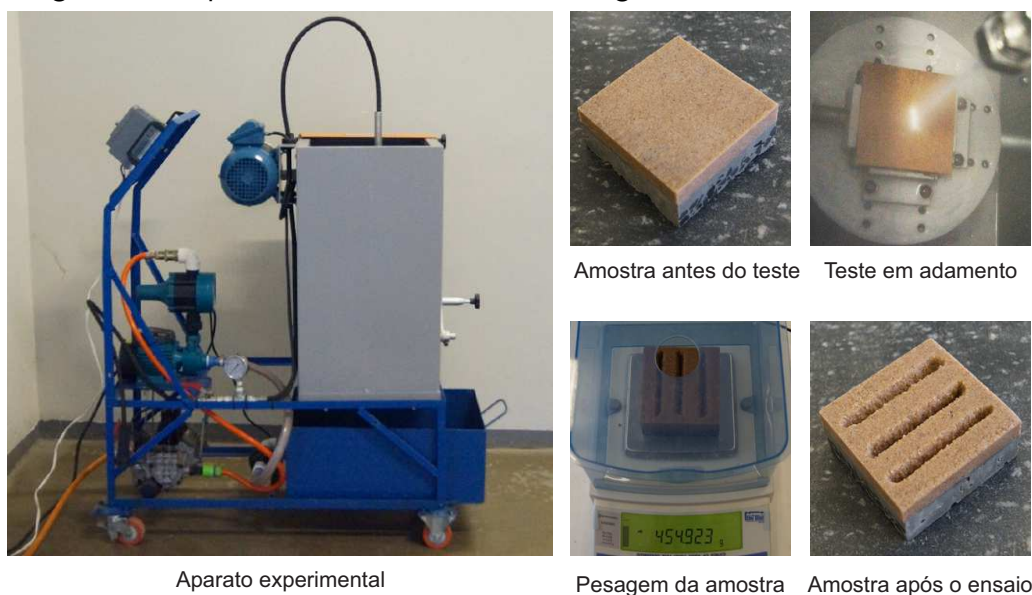
Fonte: O autor.

Os corpos de prova foram submetidos ao desgaste durante 72 horas, em que a cada 12 horas foram realizadas as leituras da perda de massa. Os dados dos ensaios foram aplicados no ajuste do modelo de previsão da perda de massa de Sitnik-Horszczaruk (SITNIK, 2008; HORSZCZARUK, 2008).

4.4.7 Ensaio de erosão hidráulica

Para condução dos estudos do desgaste por erosão hidráulica por hidrojateamento, um aparato (Figura 21) foi construído com inspiração no trabalho de Momber e Kovacevic (1994) durante as atividades do projeto “Simulação dos Efeitos Erosivos do Vertedouro da Usina Hidrelétrica de Itaipu”. A metodologia formulada para o uso do aparato idealizado, consiste na aplicação de um jato de água em alta velocidade durante 120 minutos na superfície do corpo de prova, que promove a perda de massa no material durante o tempo de exposição à carga hidráulica.

Figura 21 – Aparato de erosão hidráulica e algumas fases do ensaio erosivo.



Fonte: O autor.

A pressão do jato é ocasionada por uma bomba regulada em 100 Bar, que combinada à uma abertura do bocal de 1 mm, resulta em uma velocidade do jato de 108,23 m/s, assim como uma vazão de saída de 85,76 mL/s. A distância entre o bocal e o corpo de prova foi fixada em 180 mm, uma vez que ensaios prévios indicaram que esta altura ocasiona a maior perda de massa para o aparato construído. O jato atua em um movimento cíclico unidirecional, que é promovido por meio de um motor elétrico controlado por um inversor de frequência, assim esta ação do jato promove um desgaste com formato linear, como visualizado na amostra desgastada da Figura 21.

No decorrer do ensaio a massa da amostra foi aferida em 18 instantes de tempo. Nos 5 primeiros minutos, a medição ocorreu a cada 1 minuto a partir do tempo 0. A partir do tempo de 10 minutos a leitura da massa foi realizada a cada 10 minutos, até atingir o tempo total de 120 minutos. Por meio da subtração da massa inicial, no tempo 0, das massas após o hidrojateamento, calculou-se a perda de massa acumulada no tempo que também foi empregada no ajuste do modelo de Sitnik-Horszczaruk.

4.5 CUSTO E EMISSÕES DE CO₂

Os custos de produção das argamassas de reparo por m³ foram quantificados a partir do levantamento do custo de cada material (Tabela 18) que as compõe. O consumo (kg/m³) de cada material para 1 m³ de argamassa de reparo foi multiplicado pelo seu respectivo custo e, assim, o somatório dessas multiplicações é igual ao custo para produção de 1 m³ de argamassa.

Tabela 18 – Custo por metro cúbico dos insumos das argamassas.

Materiais	R\$/m³
Cimento	0,57
Sílica ativa	1,00
Fíler calcário	0,34
Areia natural	0,06
Água	0,01
Fibra de polipropileno	20,02
Polímero EVA	14,38
Aditivo Superplastificante	16,19

Fonte: O autor.

Nota: Valores levantados durante a vigência da pesquisa.

As emissões do cimento são compostas pela soma das emissões resultantes da produção de clínquer e do consumo de energia envolvida no processo. As emissões pela produção de clínquer corresponde a soma das emissões relacionados à queima de combustíveis multiplicado pela porcentagem de clínquer no cimento. As emissões da energia elétrica são o consumo de energia vezes um fator de emissão. Assim, as emissões do cimento foram calculados pela Equação (4.1).

$$Em_c = Em_{clin} \times \%_{C_c} + Em_{ee} \times f_e \quad (4.1)$$

em que Em_c é a emissão para a produção do cimento, em KgCO_2/t , Em_{clin} é a emissão para a produção do clínquer, em KgCO_2/t , $\%_{C_c}$ é o consumo de cimento em kg para produzir 1 m^3 , em Kg, Em_{ee} é a emissão para a produção de energia elétrica, em KgCO_2/kWh e f_e fator de emissão de energia elétrica, em KgCO_2/kWh .

A emissão total para produzir 1 m^3 de argamassa de reparo, Em_{arg} em kgCO_2/m^3 , foi calculada para comparação entre as demais argamassas e para verificar a redução de emissões com a redução do consumo de cimento. O cálculo não considerou as emissões da fibra de polipropileno, polímero EVA e aditivo superplastificante, tendo em vista que estes representam em média menos de 1% do volume de argamassa, além disso, não foram encontrados valores confiáveis para as emissões destes materiais. A sílica ativa, por ser resíduo da produção do ferro silício foi considerada com emissão nula (KULAKOWSKI, 2002). Dessa forma a emissão total da argamassa foi calculada por meio da Equação (4.2). Os dados aplicados na quantificação das equações das emissões estão dispostos na Tabela 19.

$$Em_{arg} = Em_{cim} \times Q_{cim} + Em_{fíler} \times Q_{fíler} + Em_{areia} \times Q_{areia} \quad (4.2)$$

em que Em_{cim} é a emissão para a produção do cimento, em kgCO_2/m^3 , $Em_{fíler}$ é a emissão para a produção do fíler calcário, em kgCO_2/m^3 , Em_{areia} é a emissão para a produção do agregado natural, em kgCO_2/m^3 , Q_{cim} é o consumo de cimento em kg para 1 m^3 de argamassa, $Q_{fíler}$ é o consumo de fíler calcário em kg para produzir 1 m^3 de argamassa e Q_{areia} é o consumo de areia em kg para produzir 1 m^3 de argamassa.

Tabela 19 – Emissões de CO₂ para os materiais.

Material	Processo	Descrição	Emissão	Referência
Cimento	Produção de clínquer	Emissões por calcinação e queima de combustíveis (KgCO ₂ /t _{clínquer})	866	(WBCDS, 2016)
		Porcentagem no CP V (%)	95	NBR 16697 (ABNT, 2018a)
	Energia elétrica	Consumo na planta (kWh/t)	109	(WBCDS, 2016)
		Fator de Emissão (KgCO ₂ /kWh)	0,08	(MCTIC, 2018)
Fíler Calcário	Produção	Emissão (KgCO ₂ /t)	8	(MILLER <i>et al.</i> , 2018)
Areia	Produção	Emissão (KgCO ₂ /t)	48	(RIGO, 2019)

Fonte: O autor.

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA E AJUSTE DE MODELO

A análise estatística dos resultados foi realizada por meio da análise de variância (ANOVA) no *software* R studio. As pressuposições para aplicação da ANOVA foram verificadas pelos testes de normalidade dos erros de Shapiro-Wilk, homogeneidade de variâncias de Bartlett e independência dos erros de Durbin-Watson. A comparação entre médias foi realizada pelo teste de Tukey. O nível de significância considerado nos testes foi de 5%.

O modelo de Sitnik-Horszczaruk (Equação (4.3)) foi ajustado ao dados de perda dos ensaios abrasivos e erosivos. Tal modelo foi desenvolvido por Sitnik (2008) e aplicado por Horszczaruk (2008) para a predição da perda de massa do concreto.

$$M(t) = a[\ln(t + 1)]^b \quad (4.3)$$

em que $M(t)$ é a massa média em gramas das partículas extraídas no tempo t (min) e a e b são parâmetros ajustáveis.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados dos experimentos propostos para a avaliação das argamassas do estudo. As tabelas com os dados experimentais bem como os valores calculados para as análises de variância estão apresentadas nos Apêndices.

5.1 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

Os ensaios de índice de consistência e massa específica foram realizados imediatamente após o preparo das argamassas. Na Tabela 20 são apresentados os valores obtidos nesses ensaios. Com os resultados de massa específica no estado fresco foi possível verificar o consumo de materiais nas argamassas após a mistura em laboratório.

Tabela 20 – Propriedades das argamassas de reparo no estado fresco.

Argamassas	Aditivo %	IC mm	γ_{esp}	Cimento	Sílica	Fíler	kg/m ³			
							Areia	Água	Fibra	Polímero
350P0	0,87	242,05	2355	353	71	131	1584	212	1,4	-
350P15	0,84	237,65	2339	350	70	129	1570	210	1,4	5,2
400P0	0,55	240,95	2330	395	59	138	1505	229	1,6	-
450P0	0,22	243,74	2343	447	45	147	1456	246	1,8	-
450P15	0,22	237,77	2264	430	43	142	1403	237	1,7	6,5
450P30	0,23	240,36	2267	430	43	142	1401	236	1,7	12,9
500P0	0,19	283,29	2333	485	24	155	1407	257	1,9	-
548P0	0,19	245,10	2332	609	79	0	1371	268	2,4	-
548P15	0,21	243,62	2274	592	77	0	1332	260	2,4	8,9

Fonte: O autor.

Legenda: IC = Índice de consistência; γ_{esp} = massa específica no estado fresco.

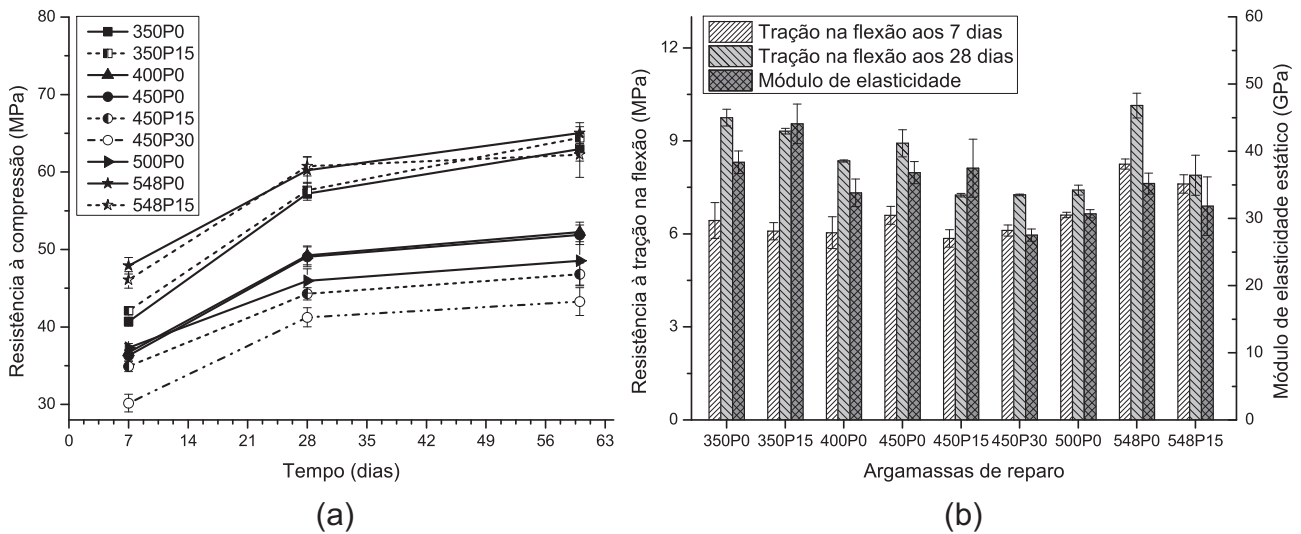
Os ensaios no estado fresco mostram o aumento da demanda de aditivo com a redução do consumo de cimento nas argamassas para atingir a consistência de 240 mm. Isso decorre do menor volume de água e maior consumo de sílica para manter os valores de água/ligante em 0,50 nas argamassas proporcionadas. Nota-se, também, que os menores valores de massa específica pertencem às argamassas com adição de polímero, o que já era esperado, pois este material promove a incorporação de ar em materiais cimentícios (BOMEDIANO *et al.*, 2020).

Conforme a Tabela 20, verifica-se que as argamassas com adição polímero apresentaram menor consumo de cimento em relação ao valor dosado, uma vez que esta adição não foi considerada na dosagem pelo MEC. Destaca-se, também, o aumento do consumo de cimento e dos demais insumos para as argamassas de referência 548P0 e 548P15, pois estes valores diferem do consumo dos materiais apresentados na Tabela 10. Tal fato pode ser decorrente do uso de cimento, sílica ativa e areia natural de época e região diferentes dos considerados no relatório de Andrade (2017).

5.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

O resultados dos ensaios de compressão axial aos 7, 28 e 60 dias estão dispostos na Figura 22(a), na qual pode-se verificar o ganho de resistência à compressão ao longo do tempo. A resistência à tração na flexão aos 7 e 28 dias e o módulo de elasticidade estático aos 28 dias, estão apresentados na Figura 22(b). Os valores numéricos podem ser conferidos no Apêndice B.

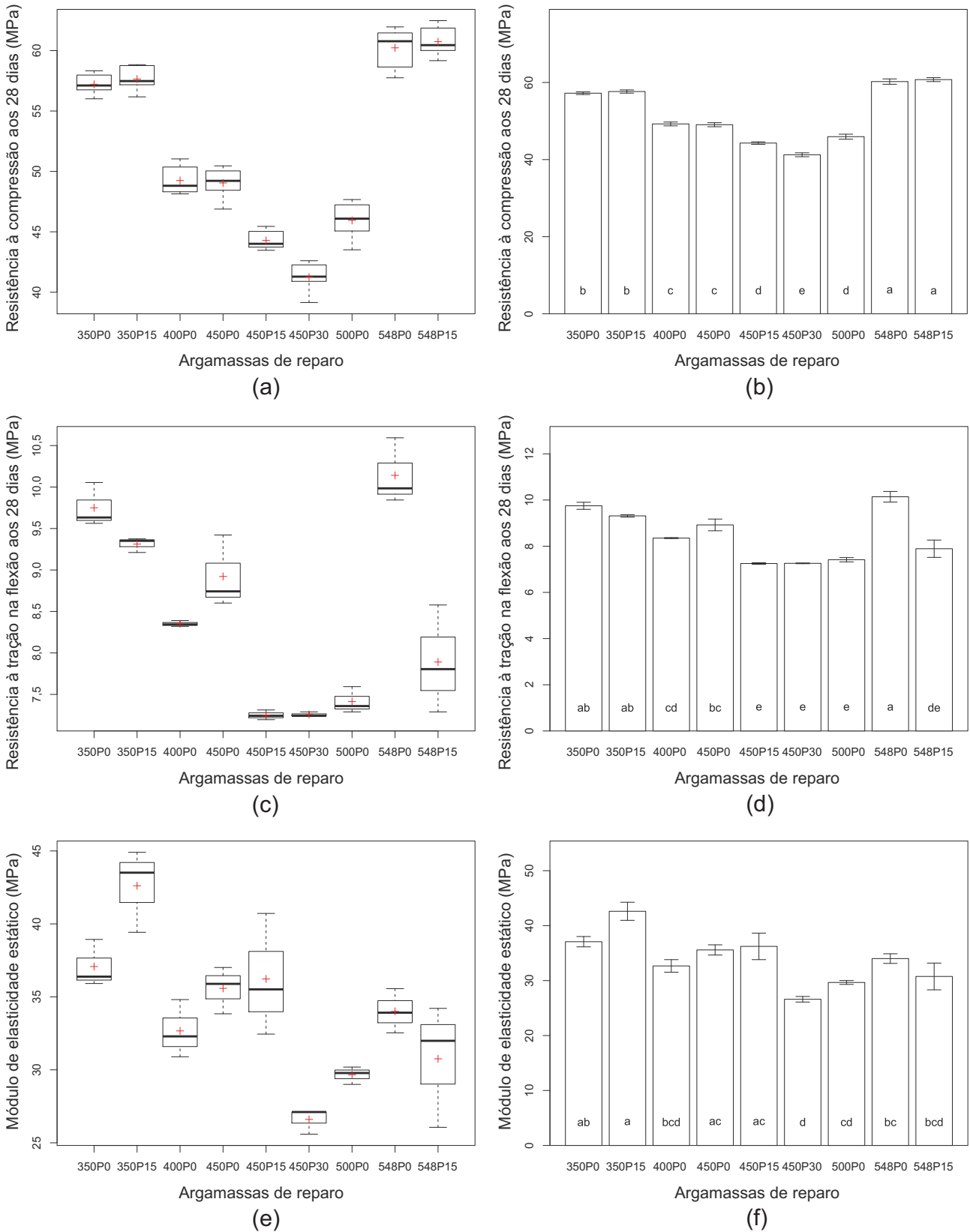
Figura 22 – Resultados de (a) resistência à compressão, (b) resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático.



Fonte: O autor.

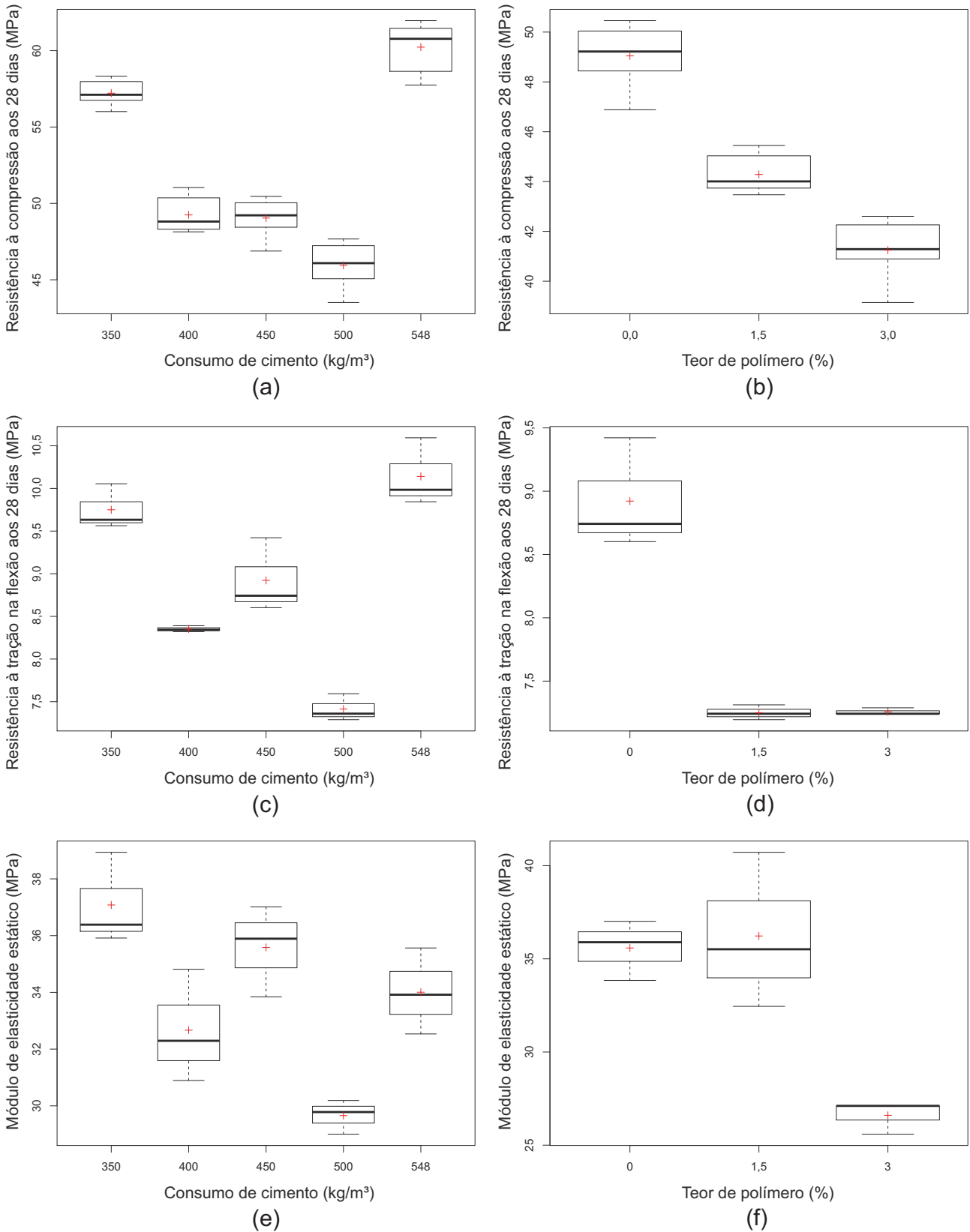
A análise estatística foi realizada aos 28 dias para a resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático (Apêndice C), a qual indicou diferença significativa entre as argamassas para as três propriedades analisadas. O teste de Tukey indicou quais argamassas diferiam entre si, como pode ser verificado nas figuras 23(b), 23(d) e 23(f). Além disso, a ANOVA também indicou significância estatística na variação do consumo de cimento, sendo observado, de maneira geral, o aumento da resistência à compressão, da resistência à tração e do módulo de elasticidade com a redução do consumo de cimento nas argamassas de reparo proporcionadas pelo MEC, sendo que apenas as argamassas 350P0 e 350P15 obtiveram resultados próximos das argamassas 548P0 e 548P15, como pode ser verificado nas figuras 24(a), 24(c) e 24(e). Os resultados dos ensaios mecânicos das argamassas de referência foram semelhantes ao estudo de Rohr *et al.* (2019).

Figura 23 – Dados de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático, assim como o teste de teste de Tukey para as argamassas de reparo.



Fonte: O autor.

Figura 24 – Dados de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático em função do consumo de cimento e do teor de polímero.

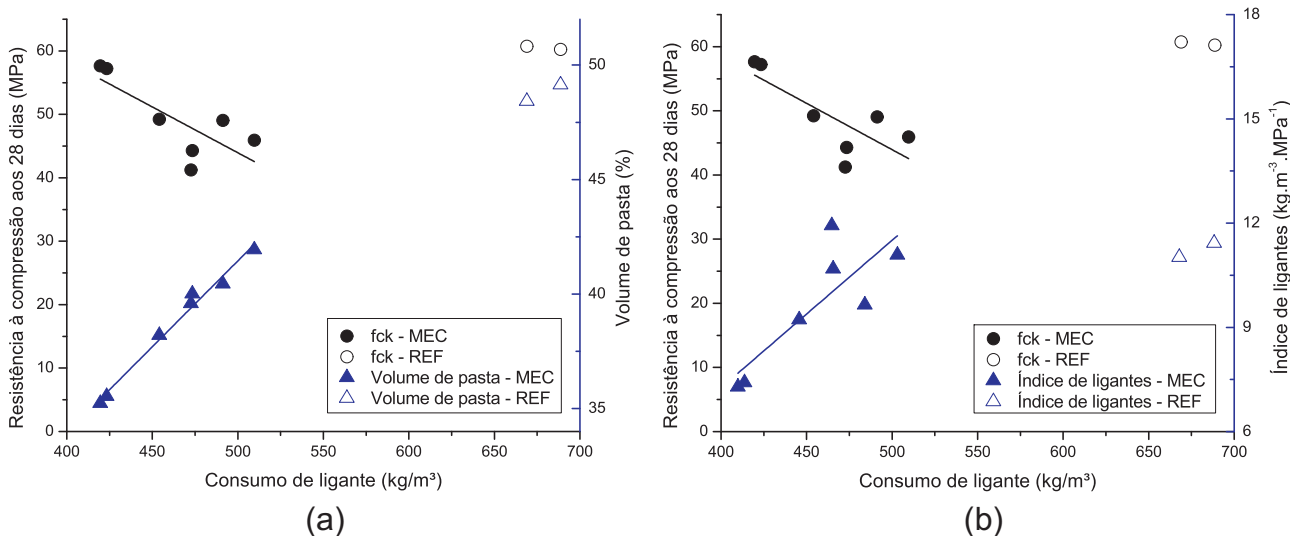


Fonte: O autor.

O aumento dos valores nas propriedades mecânicas pode estar relacionado com o aumento do consumo de sílica ativa para manutenção da relação água/ligante em 0,50, pois o incremento de sílica ativa melhora a matriz cimentícia por meio da reação pozolânica e do efeito fíler. Apesar da argamassa de reparo com 350 kg/m³ de cimento possuir maior relação água/ligante (0,50) que a argamassa de referência (0,39) com 548kg/m³ de cimento, o desempenho mecânico da argamassa 350P0 pode ser consequência do menor consumo de água em relação aos demais materiais de reparo (Figura 25(a)). Tal como o volume de água está ligado à distância de afastamento entre os grãos anidros de cimento na pasta (AÏTCIN; FLATT, 2015), o mesmo pode ocorrer no caso da argamassa, em que o maior volume de pasta promove o afastamento entre os agregados miúdos na argamassa. Assim, o menor consumo de pasta pode configurar um maior empacotamento granular úmido e, conseqüentemente, conferir aumento de resistência mecânica.

Em relação a resistência à compressão prevista na dosagem, apenas as argamassas com 350 kg/m³ de cimento e 20% de sílica ativa em relação à massa de cimento atingiram um valor próximo do esperado. Desse modo, recomenda-se a investigação do emprego de maneira adaptada dos parâmetros *p* e *q* necessários para aplicação da fórmula de resistência à compressão com a presença de agregados graúdos, (Equação (A.5)) para buscar uma maior precisão. Os valores de módulo de elasticidade calculados na dosagem não foram condizentes com o observado nos ensaios. O índice de ligantes (Figura 25(b)) indica que as argamassas com menor consumo de ligantes apresentaram os melhores resultados, na casa dos 7 kg.m⁻³.MPa⁻¹, apesar de possuírem uma relação água/ligante de 0,50. As argamassas 548P0 e 548P15 apresentaram valores próximos a 12 kg.m⁻³.MPa⁻¹ mesmo possuindo um fator água/ligante de 0,39 e os maiores consumos de sílica ativa por metro cúbico.

Figura 25 – Resistência à compressão em relação ao (a) volume de pasta e (b) Índice de ligantes.



Fonte: O autor.

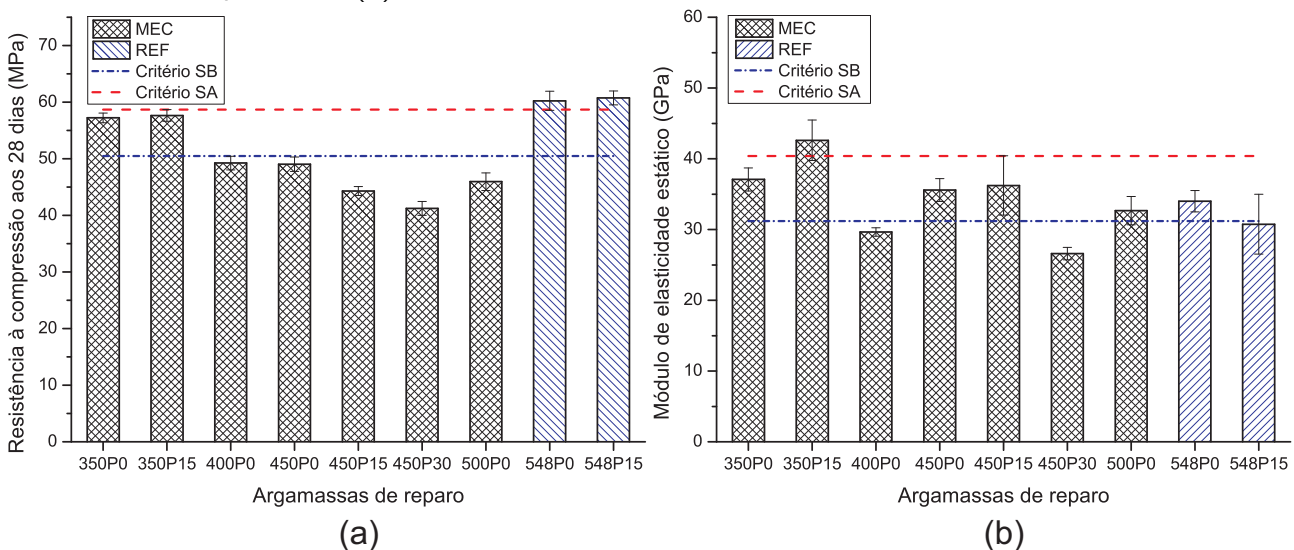
Nota: Pasta = cimento + sílica ativa + água.

A variação do teor de polímero na argamassa 450 kg/m³ também apresentou significância estatística na análise de variância para a resistência à compressão, resistência à tração na

flexão e módulo de elasticidade estático, sendo geralmente observado a redução destas propriedades com o aumento da adição de polímero EVA (figuras 24(a), 24(c) e 24(e)). O teste de Tukey indica diferença estatística significativa para os três teores. O acréscimo de 1,5% e 3,0% de polímero EVA reduziu em 9,71% e 15,90% a resistência à compressão aos 28 dias, respectivamente. A redução da resistência à tração na flexão foi semelhante para os teores de adição, sendo de 18,74% e 18,65% para 1,5% e 3,0% de polímero, respectivamente. O módulo de elasticidade apresentou redução de 25,23% para o teor de 3,0% de polímero. A redução nos valores das propriedades mecânicas pode estar relacionada à incorporação de ar inerente à ação surfactante do polímero EVA (BOMEDIANO *et al.*, 2020). No caso do módulo de elasticidade, a redução também pode ser justificada pelo reduzido módulo do polímero EVA.

A verificação dos requisitos de desempenho em relação à resistência à compressão e módulo de elasticidade podem ser conferidas na Figura 26.

Figura 26 – Confronto de resultados mecânicos entre as argamassas e o substrato: (a) resistência à compressão; (b) módulo de elasticidade.



Fonte: O autor.

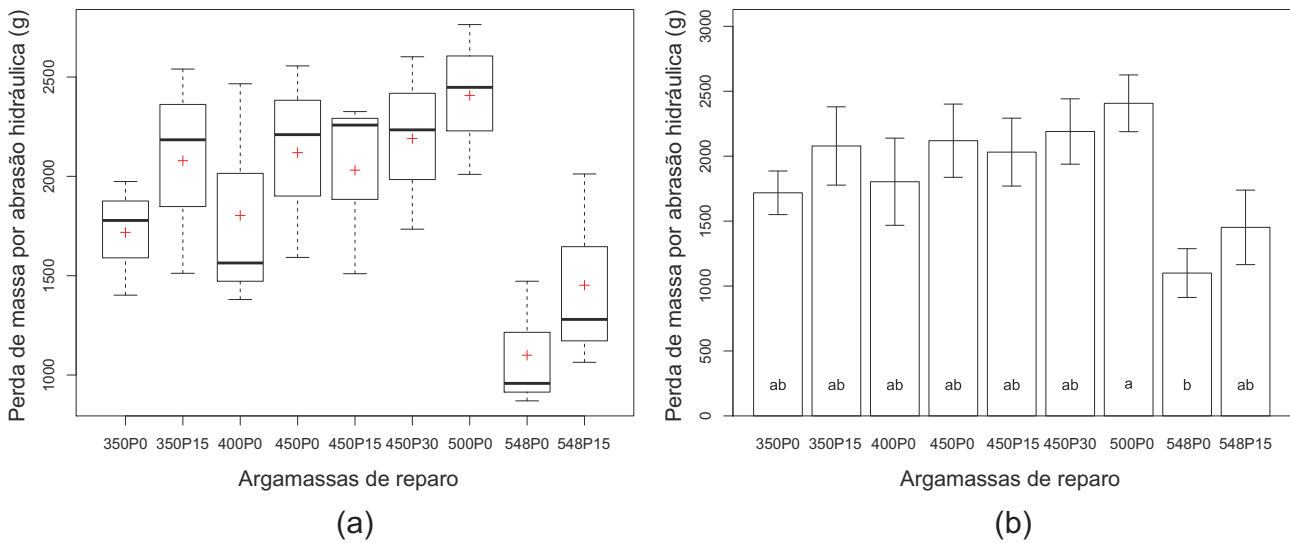
Legenda: SA = substrato A; SB = substrato B.

Conforme a Figura 26(a), verifica-se que em relação ao concreto substrato A apenas as argamassas 350P0, 350P15 e as argamassas de referência cumprem com o critério para a resistência à compressão. Estas também atendem o requisito em relação ao substrato B, seguidas das misturas 450P0 e 450P15. Da mesma forma, a Figura 26(b) indica que os módulos de elasticidade das argamassas em relação ao substrato A estão em conformidade com o requisito da Tabela 1, em que o módulo do material de reparo deve ser similar ou menor que o concreto substrato (VAYSBURD *et al.*, 2014). Para o substrato B, as misturas 350P0, 350P15, 450P0 e 450P15 se distanciam da recomendação do requisito. Já os valores de resistência à tração na flexão para todas as argamassas atendem ao critério de Vaysburd *et al.* (1999), que recomendam valores maiores que 10% da resistência à compressão.

5.3 DESGASTE SUPERFICIAL

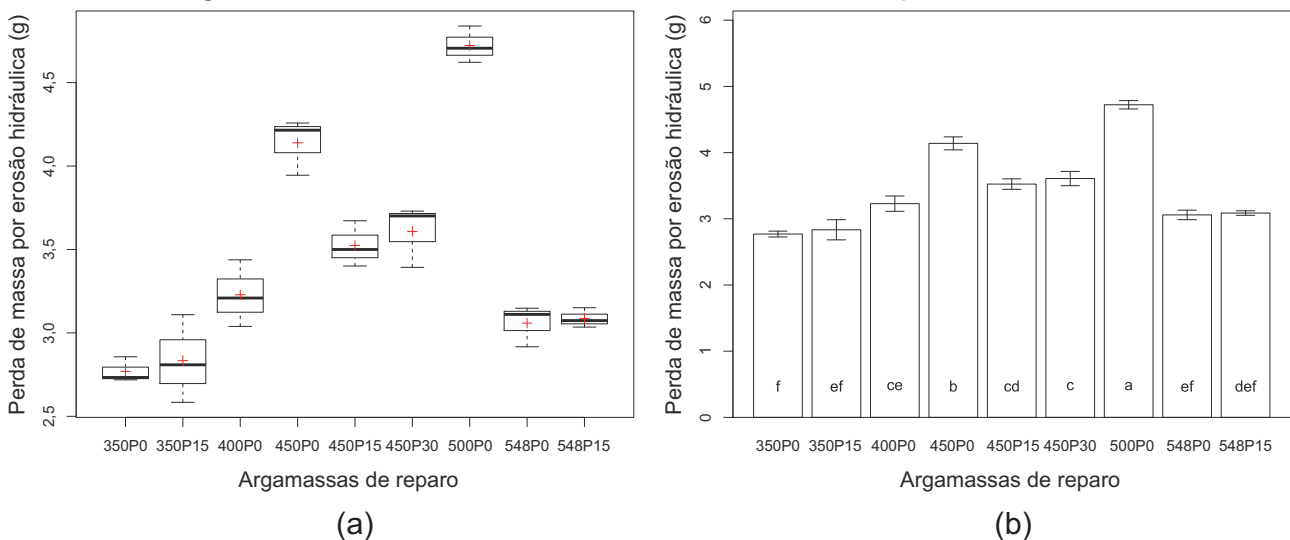
Mediante a realização dos ensaios de abrasão pela ASTM C1138 (ASTM, 2019) e de erosão hidráulica por hidrojateamento foram construídos os gráficos de perda de massa para cada ensaio, ilustrados respectivamente nas figuras 27 e 28. Os valores obtidos nos ensaios estão dispostos no Apêndice B. A maior variabilidade observada no ensaio abrasivo pode ser explicada pelo uso de três aparatos abrasivos independentes nos experimentos.

Figura 27 – Resultados do ensaio de abrasão hidráulica após 72 horas.



Fonte: O autor.

Figura 28 – Resultados do ensaio de erosão hidráulica após 120 minutos.



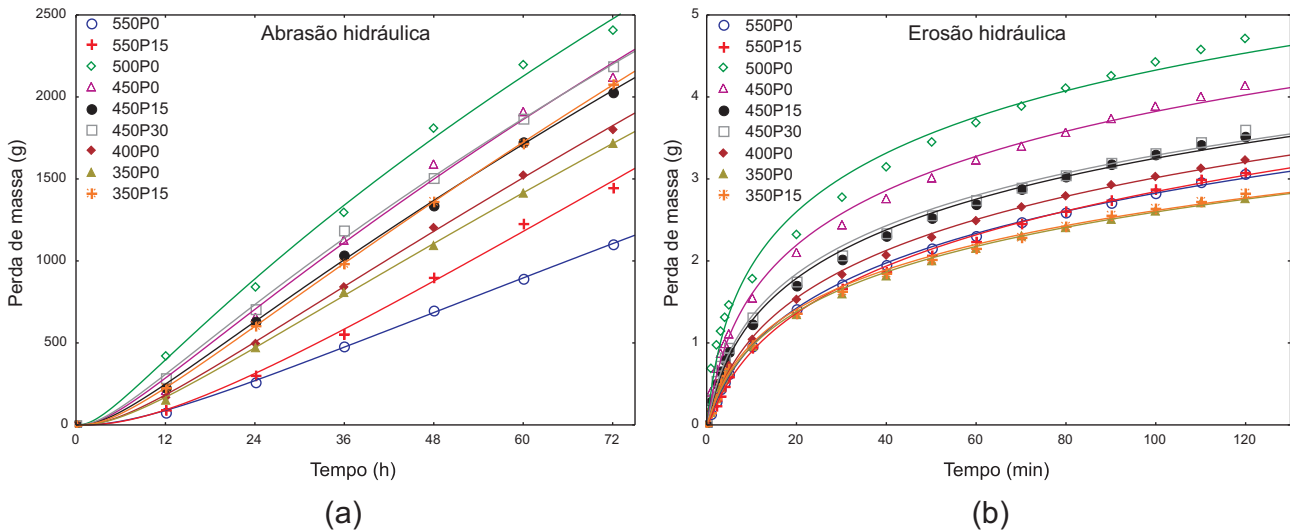
Fonte: O autor.

Conforme pode ser conferido na Figura 27(a), ao se comparar os valores de perda de massa média após 72 horas de ensaio, percebe-se que as argamassas 548P0 e 548P15 apresentaram a menor perda de massa no ensaio abrasivo, seguidas da argamassa 350P0 e 400P0. No ensaio erosivo, as argamassas 350P0 e 350P15 foram as que perderam a menor quantidade de massa

(Figura 28(a)). Tais afirmações foram corroboradas pelo teste de Tukey aplicados aos resultados dos ensaios de abrasão e erosão, indicados respectivamente nas figuras 27(b) e 28(b).

O avanço da perda de massa dos ensaios pode ser visualizado na Figura 29, a qual ilustra o ajuste do modelo de Sitnik-Horszczaruk aos dados de perda de massa no ensaio abrasivo e erosivo. Constata-se a qualidade da predição da perda de massa pelo modelo no coeficiente de determinação que foi próximo de 1 para todas as argamassas, conforme indicado na Tabela 21.

Figura 29 – Curvas de perda de massa para o desgaste (a) abrasivo e (b) erosivo.



Fonte: O autor.

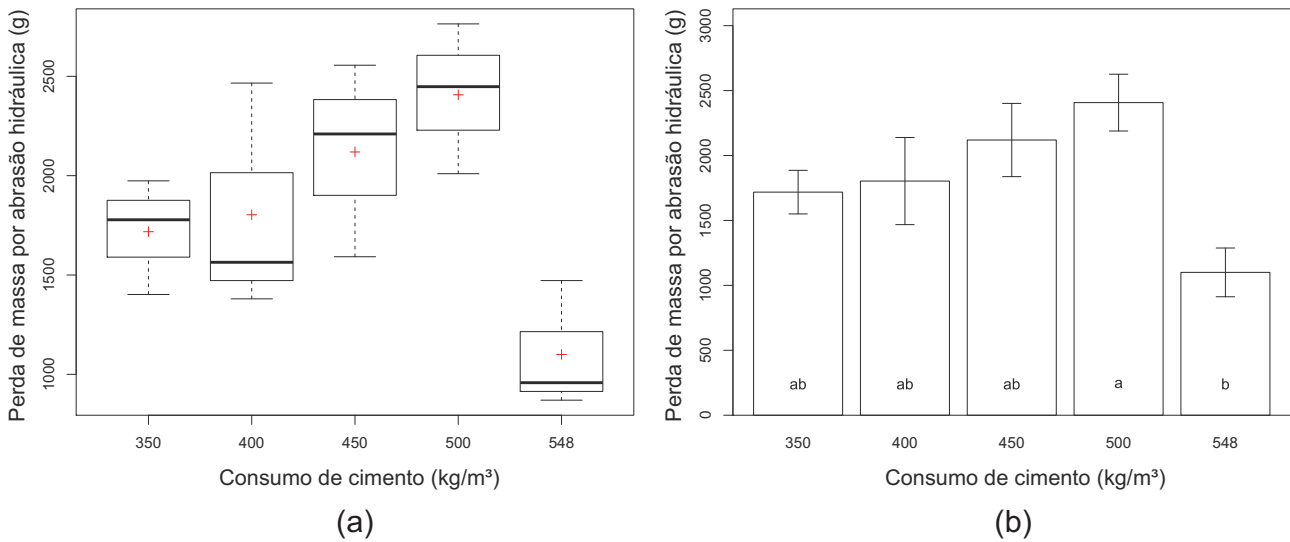
Tabela 21 – Equações de perda de massa escritas com os valores dos parâmetros *a* e *b* ajustados.

Argamassas	Erosão por hidrojetamento		Abrasão (ASTM, 2019)	
	Parâmetros	<i>R</i> ²	Parâmetros	<i>R</i> ²
350P0	$0,252(\log(t+1))^{1,523}$	0,9991	$2,434(\log(t+1))^{4,503}$	0,9997
350P15	$0,270(\log(t+1))^{1,486}$	0,9983	$3,905(\log(t+1))^{4,308}$	0,9999
400P0	$0,260(\log(t+1))^{1,602}$	0,9992	$2,728(\log(t+1))^{4,467}$	0,9993
450P0	$0,495(\log(t+1))^{1,337}$	0,9964	$6,770(\log(t+1))^{3,974}$	0,9936
450P15	$0,360(\log(t+1))^{1,439}$	0,9965	$5,293(\log(t+1))^{4,088}$	0,9993
450P30	$0,391(\log(t+1))^{1,392}$	0,9958	$8,456(\log(t+1))^{3,818}$	0,9992
500P0	$0,665(\log(t+1))^{1,225}$	0,9886	$13,882(\log(t+1))^{3,559}$	0,9963
548P0	$0,227(\log(t+1))^{1,648}$	0,9994	$0,874(\log(t+1))^{4,904}$	0,9992
548P15	$0,190(\log(t+1))^{1,770}$	0,9984	$0,558(\log(t+1))^{5,416}$	0,9974

Fonte: O autor.

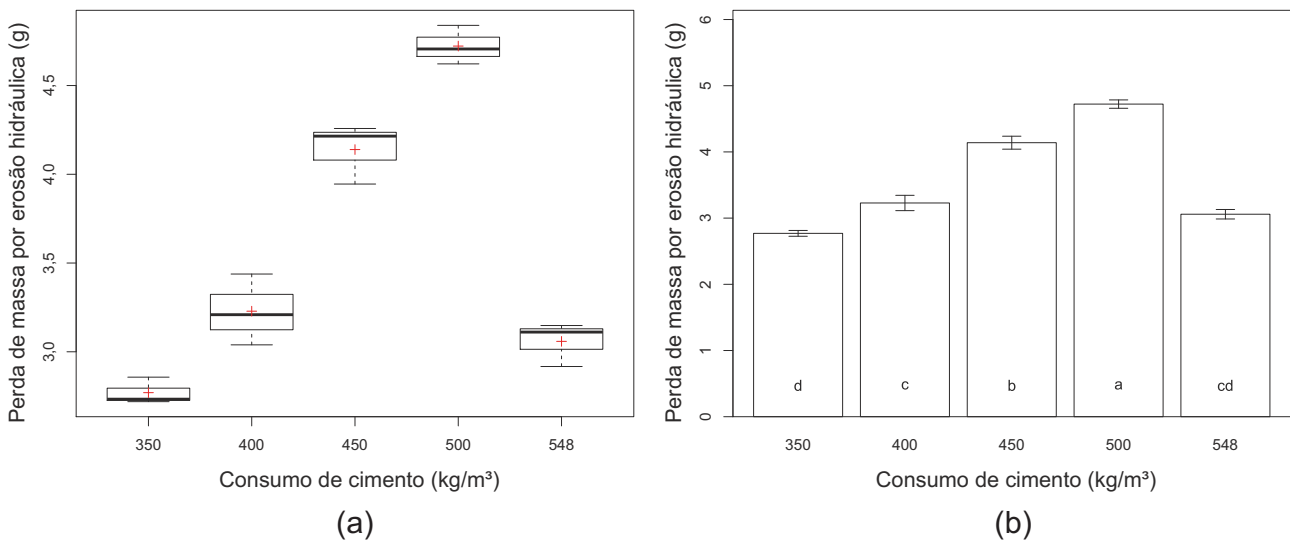
A variação do consumo de cimento apresentou significância estatística na perda de massa para o ensaio abrasivo e o erosivo. Verifica-se nas figuras 30 e 31 que os valores de perda de massa apresentaram uma tendência de diminuir com a redução do consumo de cimento, com exceção das argamassas de referência 548P0 e 548P15. O aumento da resistência à perda de massa é devido à maior demanda de sílica ativa para manter a relação água/ligante em 0,50 para as argamassas com menos cimento. Um resultado semelhante foi constatado em Horszczaruk e Brzozowski (2017), que obtiveram a maior resistência abrasiva no concreto com um teor 30% de substituição de cimento por sílica ativa.

Figura 30 – Influência do consumo de cimento na perda de massa por abrasão hidráulica.



Fonte: O autor.

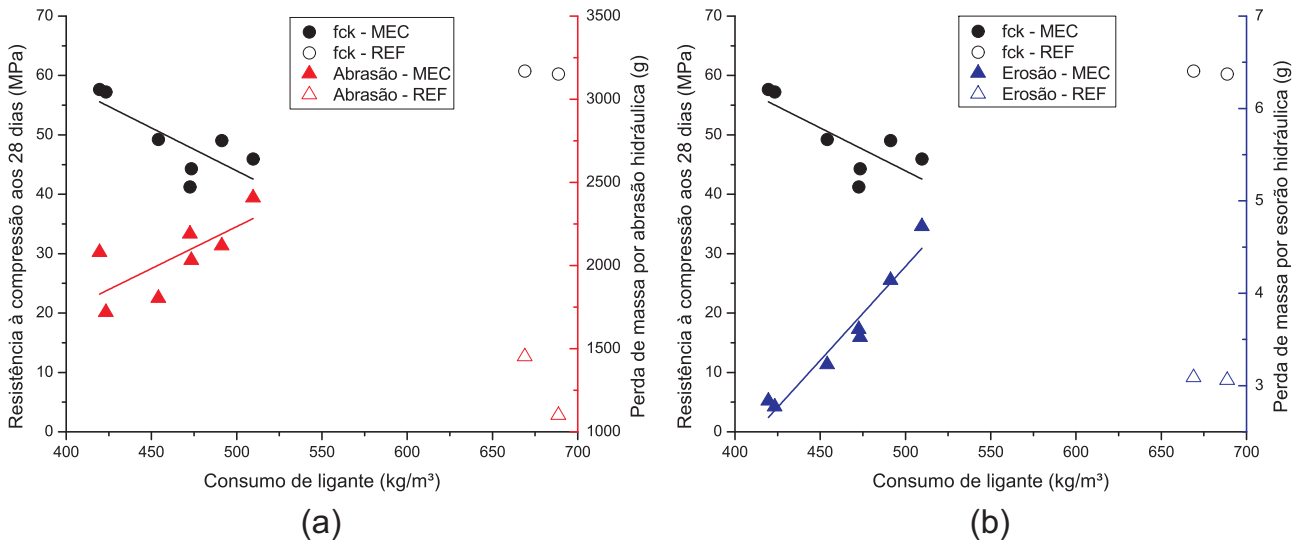
Figura 31 – Influência do consumo de cimento na perda de massa por erosão hidráulica.



Fonte: O autor.

A menor perda de massa pelo desgaste hidráulico foi observada nas argamassas com maior resistência à compressão (Figura 32). Tal fato também foi constatado em Galvão *et al.* (2012), que afirmam que há uma relação entre a resistência abrasiva e a resistência à compressão no caso das argamassas. Yen *et al.* (2007) obtiveram resultados semelhantes no estudo da resistência abrasiva de concretos. No caso do ensaio erosivo por hidrojateamento, Momber e Kovacevic (1994) e Momber *et al.* (1995) afirmam que a resistência à compressão não tem relação direta com a perda de massa por erosão de concretos, no entanto, em estudos anteriores para o caso de argamassas de reparo, Rampanelli *et al.* (2018) observaram que os materiais com maior resistência mecânica apresentaram a maior resistência à perda de massa por hidrojateamento.

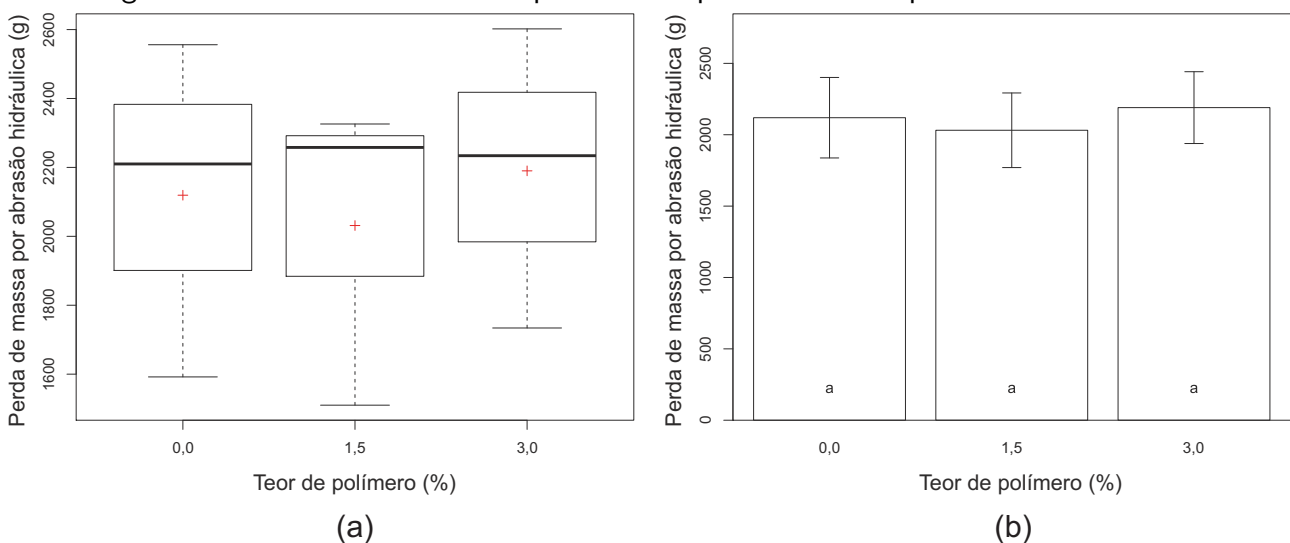
Figura 32 – Relação da resistência à compressão e a perda de massa (a) por abrasão e (b) erosão hidráulica.



Fonte: O autor.

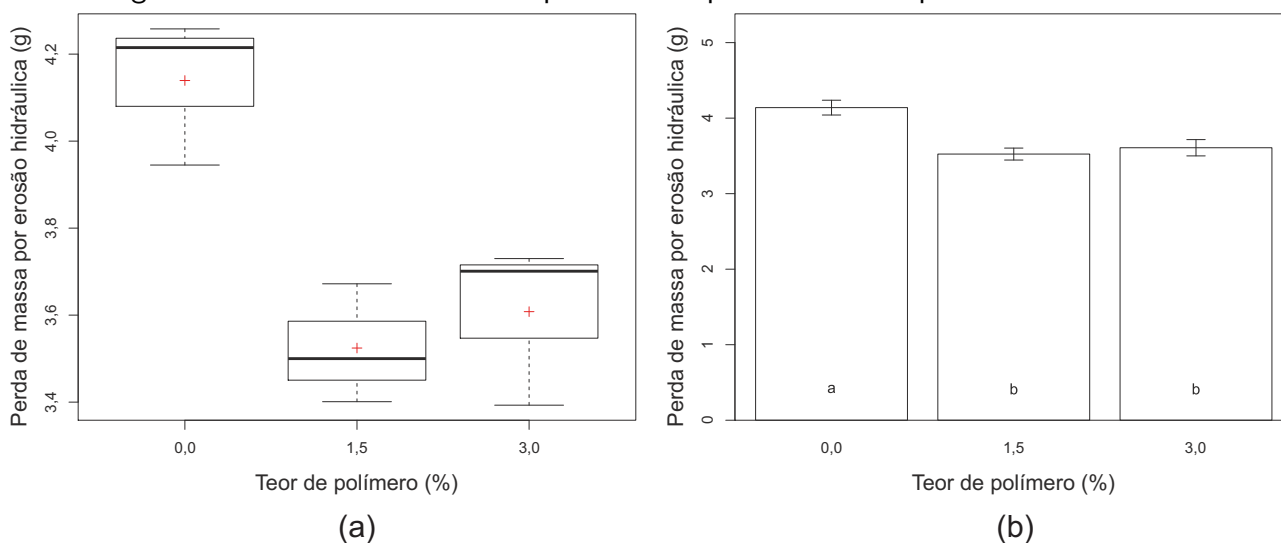
A variação do teor de polímero nas misturas com 450 kg/m³ não teve influência significativa na perda de massa por abrasão hidráulica (Figura 33). No entanto, no ensaio erosivo a adição de polímero apresentou significância estatística, em que a presença do polímero diminuiu a resistência ao desgaste por hidrojateamento. Tal constatação foi corroborada pelo teste de Tukey (Figura 34(b)). O aumento da perda de massa no ensaio erosivo pode estar relacionado ao aumento de ar incorporado que geralmente é conferido pela presença do polímero EVA, pois a porosidade é um fator negativo na resistência ao desgaste superficial (MOMBER; KOVACEVIC, 1994; MOMBER *et al.*, 1995).

Figura 33 – Influência do teor de polímero na perda de massa por abrasão hidráulica.



Fonte: O autor.

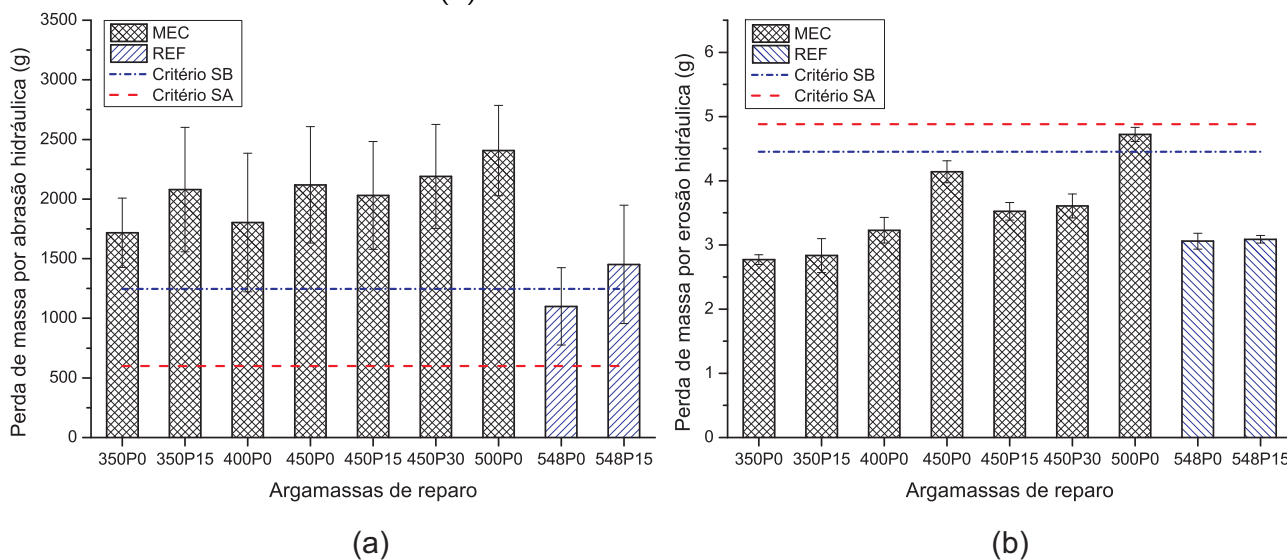
Figura 34 – Influência do teor de polímero na perda de massa por erosão hidráulica.



Fonte: O autor.

O requisito de durabilidade do sistema reparado em relação à perda de massa pode ser interpretado de duas maneiras. Primeiramente, recomenda-se uma perda de massa menor ou resistência ao desgaste superior que o substrato, o que em teoria promoveria aumento da vida útil. Por segundo, é aconselhado o emprego de um material de reparo com perda de massa equivalente ao substrato, para evitar a formação de ressaltos na superfície da estrutura, que são potenciais causadores de cavitação (KORMANN *et al.*, 2003; GALVÃO *et al.*, 2012). A verificação do requisito de desempenho frente ao desgaste abrasivo e erosivo pode ser conferida na Figura 35.

Figura 35 – Confronto de resultados de perda de massa entre as argamassas e o substrato: (a) abrasão hidráulica e (b) erosão hidráulica.



Fonte: O autor.

Legenda: SA = substrato A; SB = substrato B.

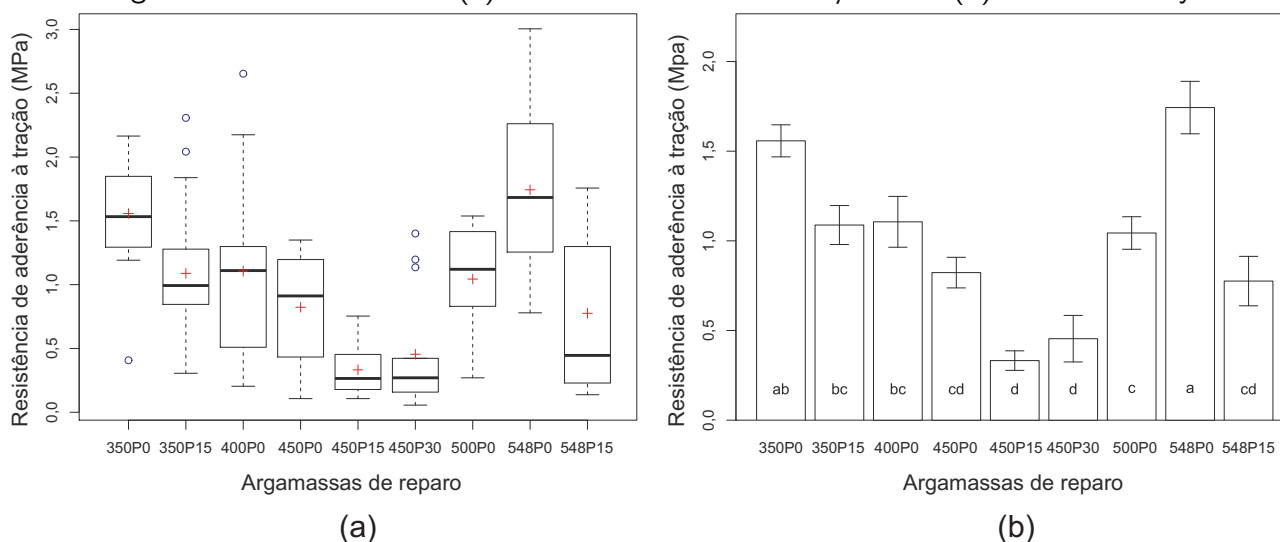
Para a perda de massa por abrasão na Figura 35(a), verifica-se que as perdas de massa dos concretos dos substratos são menores que as argamassas, não cumprindo o requisito,

com exceção da argamassa de referência 548P0 em relação ao critério SB. A maior resistência ao desgaste abrasivo apresentado pelos concretos pode estar condicionada ao fato destes possuírem agregados graúdos basálticos (RIZZI *et al.*, 2015). Quanto à perda de massa por erosão hidráulica, a Figura 35(b) mostra que, de maneira geral, as argamassas possuem desempenho semelhante em relação aos substratos A e B, estando em conformidade com o requisito de desempenho.

5.4 RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

A Figura 36(a) apresenta os resultados dos ensaios de aderência à tração para as argamassas de reparo. Os valores obtidos no ensaio estão dispostos no Apêndice B.

Figura 36 – Resultados do (a) ensaio de aderência à tração e do (b) teste de Tukey.



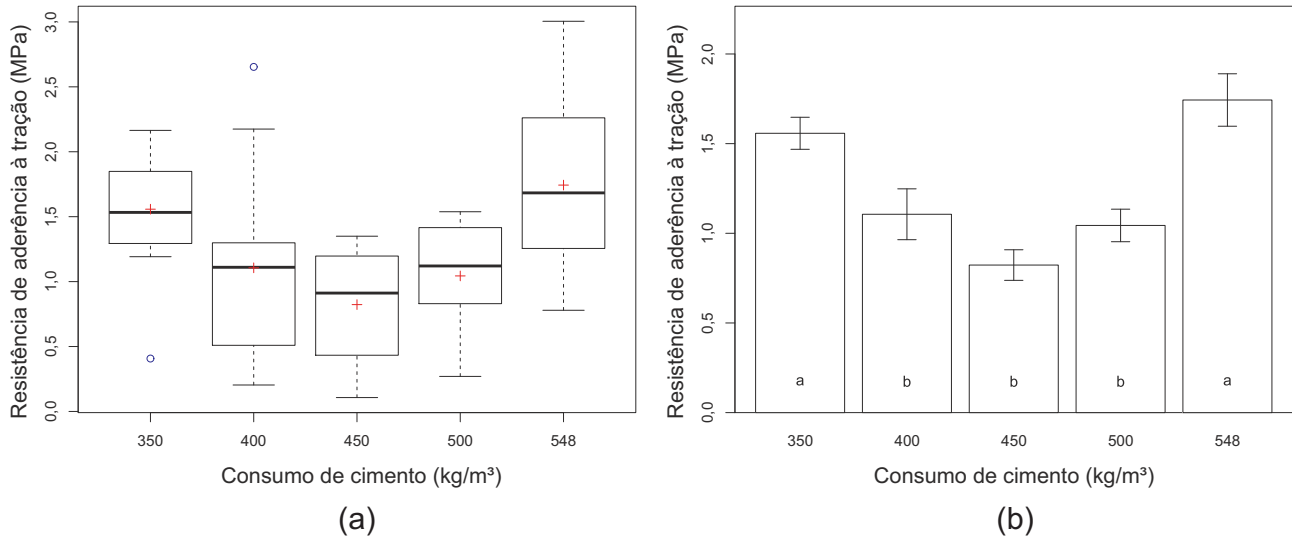
Fonte: O autor.

A análise de variância constatou a diferença significativa entre as resistências de aderência (Apêndice C) e o teste de Tukey (Figura 36(b)) possibilitou a distinção entre os materiais de reparo. De maneira similar ao desgaste superficial, as argamassas 548P0 e 350P0 apresentaram respectivamente os maiores valores, 1,74 MPa e 1,56 MPa, seguidos das argamassas 350P15, 400P0 e 500P0 com 1,09 MPa, 1,11 MPa e 1,04 MPa. Os menores valores foram observados nas argamassas com 450 kg/m³, com o menor resultado para a argamassa 450P15. Os resultados foram semelhantes ao estudo de Nunes *et al.* (2019) que avaliou a resistência de aderência de argamassas de reparo com valores de resistência à compressão de 50 MPa.

A redução do consumo de cimento, apesar da manutenção da relação água/ligante (aumento de sílica ativa), apresentou diferença significativa no ensaio de aderência. As argamassas com 548 e 350 kg/m³ mostraram valores de resistência de aderência maiores que as demais conforme o teste de Tukey (Figura 37(b)). Percebe-se, de maneira geral, que as argamassas de maior resistência à compressão tiveram o melhor comportamento frente ao ensaio de aderência, no entanto Silfwerbrand *et al.* (2011) afirmam que normalmente a resistência à compressão não exerce influência significativa na resistência de aderência em sistemas reparados. A explicação para

o resultado das argamassas 350P0 e 548P0 pode estar condicionado ao fato de estas possuírem o maior consumo de sílica ativa, pois a presença desse material cimentício suplementar pode melhorar a microestrutura da interface entre o reparo e o substrato (VAYSBURD *et al.*, 2014).

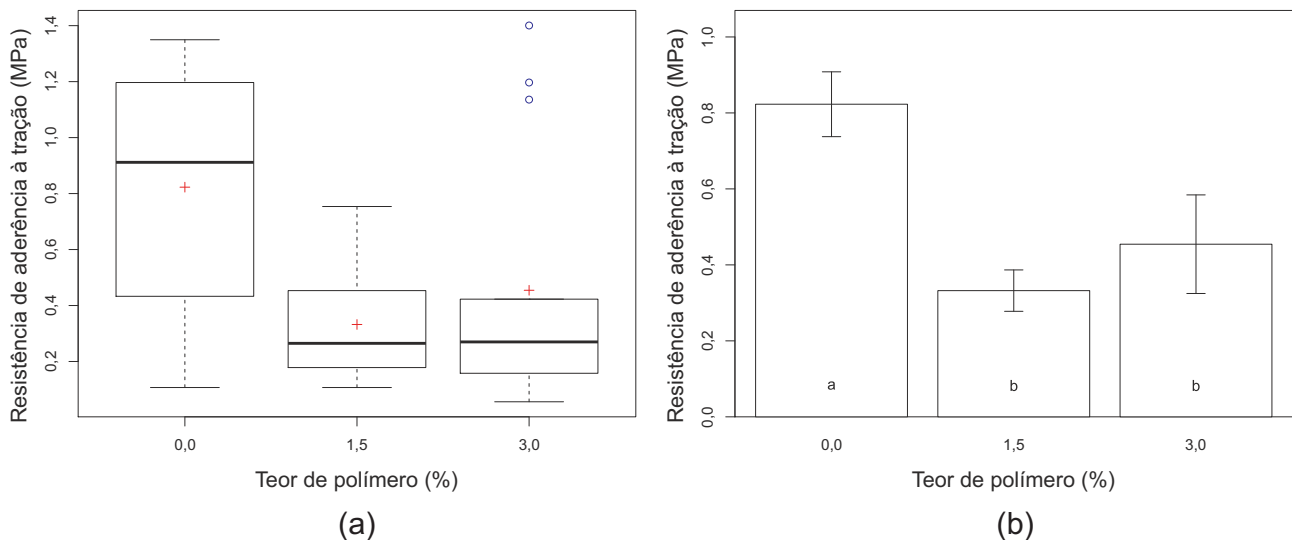
Figura 37 – Resistência de aderência à tração para o consumo de cimento.



Fonte: O autor.

Da mesma maneira, a adição de polímero foi significativa estatisticamente na resistência de aderência. Na Figura 38(b) verifica-se uma tendência à perda de aderência com o aumento do teor nas argamassas de reparo. O mesmo fato também foi constatado por Junior e Selmo (2007), que verificaram a perda no desempenho de aderência em argamassas com adição de 5% e 10% de polímero EVA. Apesar de ser empregada em argamassas colantes, a adição de polímero EVA pode elevar a porosidade (BOMEDIANO *et al.*, 2020) e, conseqüentemente, piorar a qualidade da zona de transição entre o reparo e o substrato, prejudicando a efetividade da ancoragem mecânica do sistema.

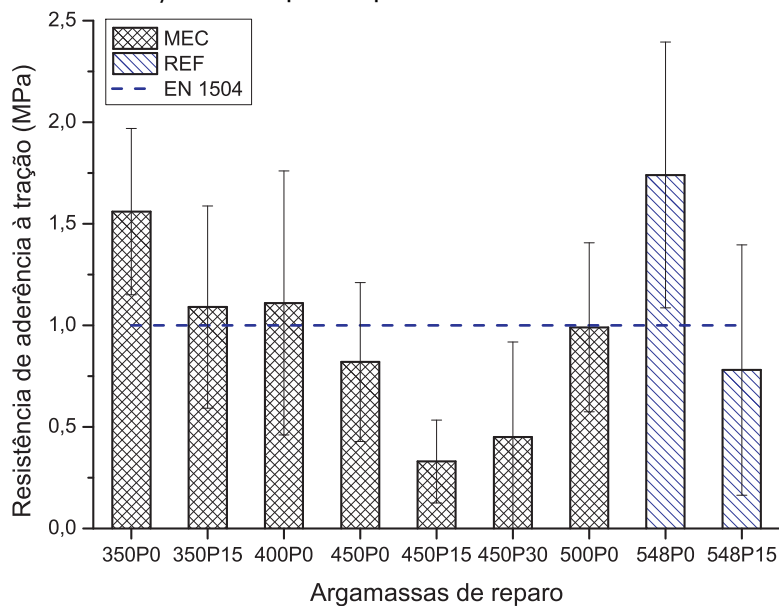
Figura 38 – Resistência de aderência à tração para o teor de polímero.



Fonte: O autor.

Quanto ao atendimento do requisito de desempenho para a resistência de aderência, os dados referentes aos substratos para esta propriedade não podem ser comparados com as argamassas, já que no ensaio de aderência à tração diretamente no substrato (*in loco*) não há uma zona de interface no sistema. Dessa forma, empregou-se o critério estabelecido na EN1504-3 (2005 apud LUKOVIC *et al.*, 2012)¹, que sugere uma resistência de aderência mínima de 1 MPa para reparos não estruturais. Posto o requisito, verifica-se que as argamassas 450P0, 450P15, 450P30 e 548P15 não atingiram o valor médio estabelecido pela norma europeia.

Figura 39 – Verificação do requisito para a resistência de aderência à tração.



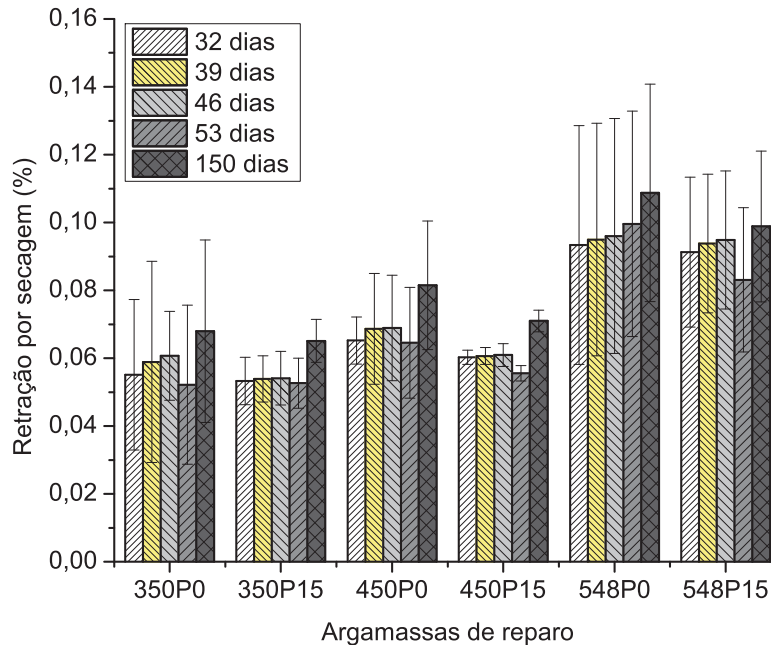
Fonte: O autor.

5.5 RETRAÇÃO POR SECAGEM

O gráfico da Figura 40 ilustra os resultados da retração por secagem para todas as idades de medição das argamassas com 350, 450 e 548 kg/m³. Os valores obtidos no ensaio estão dispostos no Apêndice B. Pode-se verificar que os dados aos 53 dias apresentam valores inconsistentes, pois houve falha do controle de temperatura do ensaio devido à queda de energia. Ademais, houve a perda dos resultados das argamassas 400P0, 450P30 e 500P0 para todas as idades.

¹EN1504-3. **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. 2005.

Figura 40 – Resultado do ensaio de retração por secagem.



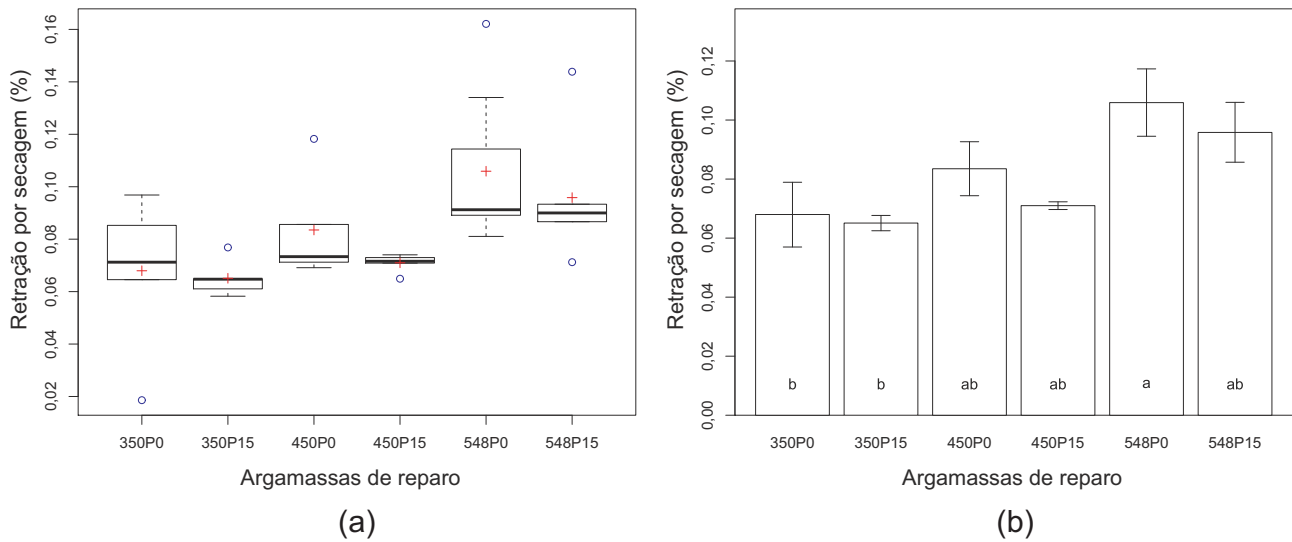
Fonte: O autor.

Nota: Problemas com o controle de temperatura na leitura realizada aos 53 dias.

As argamassas com menor consumo de cimento apresentaram menores valores de retração por secagem em relação as argamassas de referência. Verifica-se também que, aparentemente, a adição de polímeros ocasionou uma leve redução no valor médio da retração. A elevada variabilidade, expressa pelo desvio padrão, pode estar relacionada à falta de recursos para o controle da umidade do ambiente de execução do ensaio.

A diferença entre o desempenho das seis argamassas para a retração foi avaliada por análise de variância (Apêndice C) para os dados aos 150 dias (Figura 41(a)). A ANOVA constatou diferença significativa na retração entre as argamassas e o teste de comparação de médias (Figura 41(b)) as difere em três grupos, com as argamassas 350P0 e 350P15 no grupo com menor retração, a argamassa 548P0 no maior e as demais no grupo com valores intermediários.

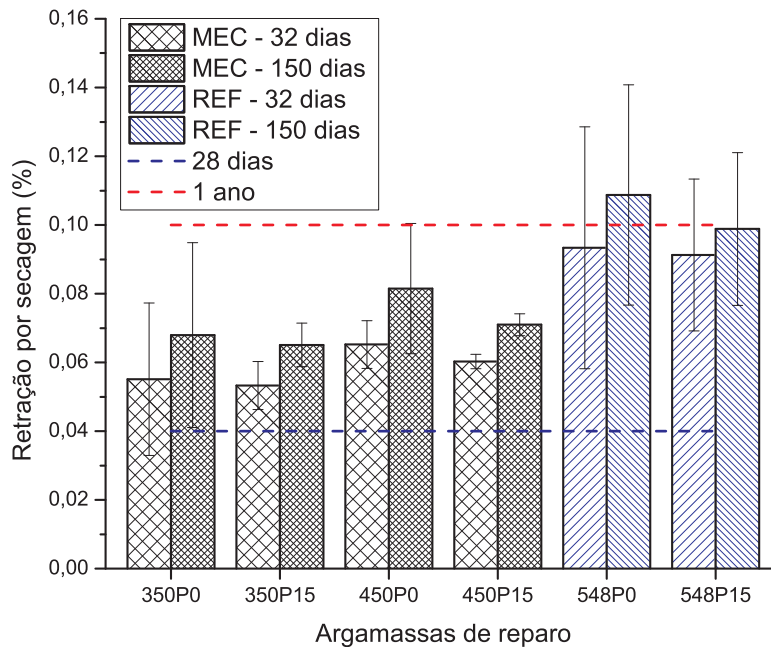
Figura 41 – Resultados de (a) retração por secagem aos 150 dias e (b) teste de Tukey.



Fonte: O autor.

O valor para o requisito de durabilidade frente à retração por secagem foi estudado em Vaysburd *et al.* (1999), os quais recomendam que a retração pela ASTM 157² não ultrapasse um percentual de 0,04 para 28 dias e 0,1 para 1 ano. Assim, para o confronto desses critérios, empregou-se, respectivamente, os valores das leituras obtidas aos 32 e 150 dias, obtidos no ensaio de retração.

Figura 42 – Verificação do requisito para a retração por secagem.



Fonte: O autor.

A Figura 42 indica que nenhuma argamassa atendeu o requisito para a retração, pois os valores de retração por secagem das argamassas ultrapassaram o critério recomendado

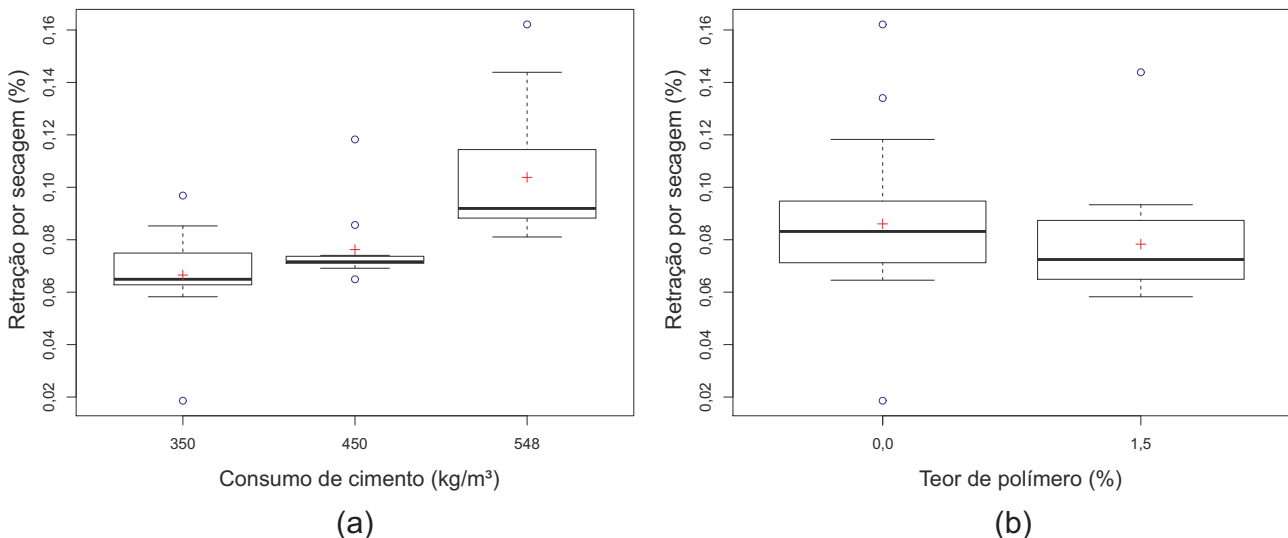
²ASTM. **C157-17. Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete.** West Conshohocken: ASTM internacional, 2017.

para a idade de 28 dias, ressaltando que as argamassas com consumo de cimento de 350 kg/m^3 ficaram mais próximas do valor do critério e as argamassas de referência ficaram mais distantes. Na comparação dos resultados de 150 dias com o critério para 1 ano, tem-se que as argamassas de referência ultrapassaram esse limite, indo contra o requisito, mesmo que a idade de 150 dias realizada esteja temporalmente distante das medições com 1 ano.

O consumo de cimento e a adição de polímero EVA foram analisados por meio de ANOVA fatorial com consumo de cimento em três níveis, 350, 450 e 548 kg/m^3 , assim como a adição de polímero com dois níveis, 0,0 e 1,5%. Como resultado, a variação da consumo de cimento foi significativa estatisticamente, em que a redução desse insumo foi proporcional à redução da retração por secagem (Figura 43(a)). A diminuição em relação à argamassa de referência foi de 37% e de 25% para as argamassas 350P0 e 450P0, respectivamente.

A variação do teor de polímero e a interação entre os tratamentos não apresentaram significância estatística na retração por secagem. Apesar disso, de maneira geral houve uma redução na retração com a adição (Figura 43(b)), pois a presença de polímero reduziu em 4%, 13% e 9% a retração de secagem em relação aos consumos de cimento de 350, 450 e 548 kg/m^3 , respectivamente.

Figura 43 – Resultados de retração em função do (a) consumo de cimento e do (b) teor de polímero.



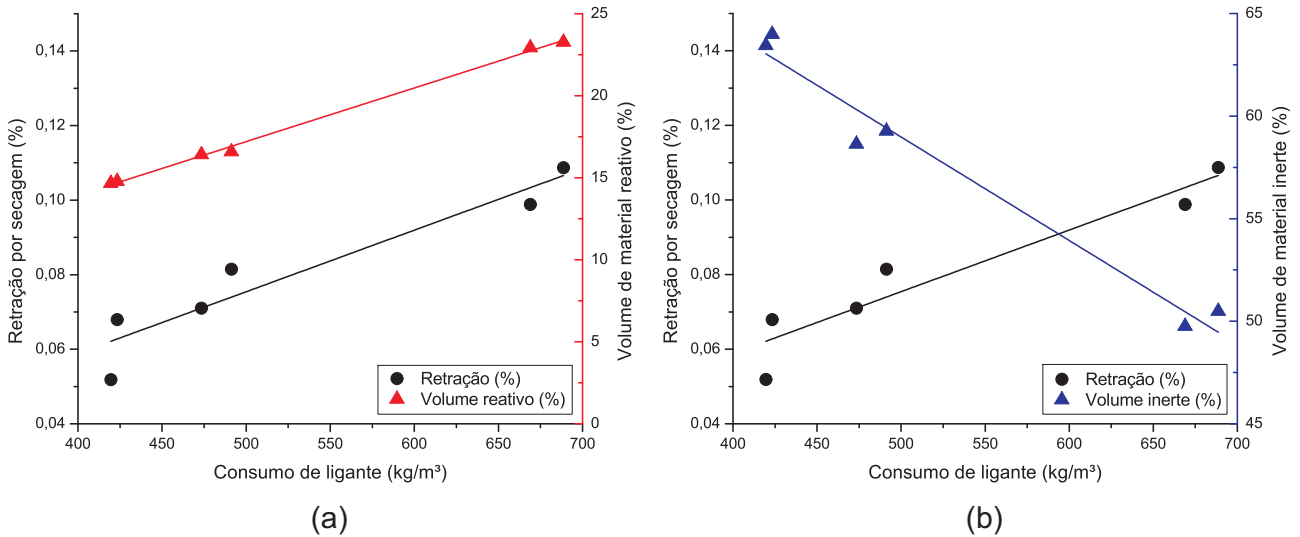
Fonte: O autor.

A redução do consumo de cimento se refletiu diretamente na diminuição do volume de pasta das argamassas de reparo (Figura 44). A argamassa 350P0 tem 13% de volume de pasta a menos que a argamassa 548 P0, o que ocasionou uma retração por secagem 37% menor. Tal fato está de acordo com Bissonnette *et al.* (1999), Kwan *et al.* (2013b) e Ng e Kwan (2016) que afirmam que o volume de pasta é proporcional à retração por secagem. No experimentos de Kwan *et al.* (2013b) uma redução de 8% no volume de pasta diminuiu em 28% a retração por secagem.

Kwan *et al.* (2013b) e Ng e Kwan (2016) indicam que a redução da água/cimento pode mitigar a retração por secagem. No entanto, isso não foi observado nas argamassas de reparo, pois as menores taxas de retração ocorreram nos materiais com maior água/cimento. Essa

discrepância pode ser resultado do menor consumo de água (Figura 44(b)) nas argamassas de maior relação água/cimento, pois, conforme Master Builders Solutions (2016), um consumo de água reduzido ocasiona menores valores de retração. Além disso, Bissonnette *et al.* (1999) afirmam que a relação água/cimento tem uma influência relativamente baixa na retração por secagem.

Figura 44 – Comparação da retração por secagem com o volume de (a) material reativo e (b) inerte.



Fonte: O autor.

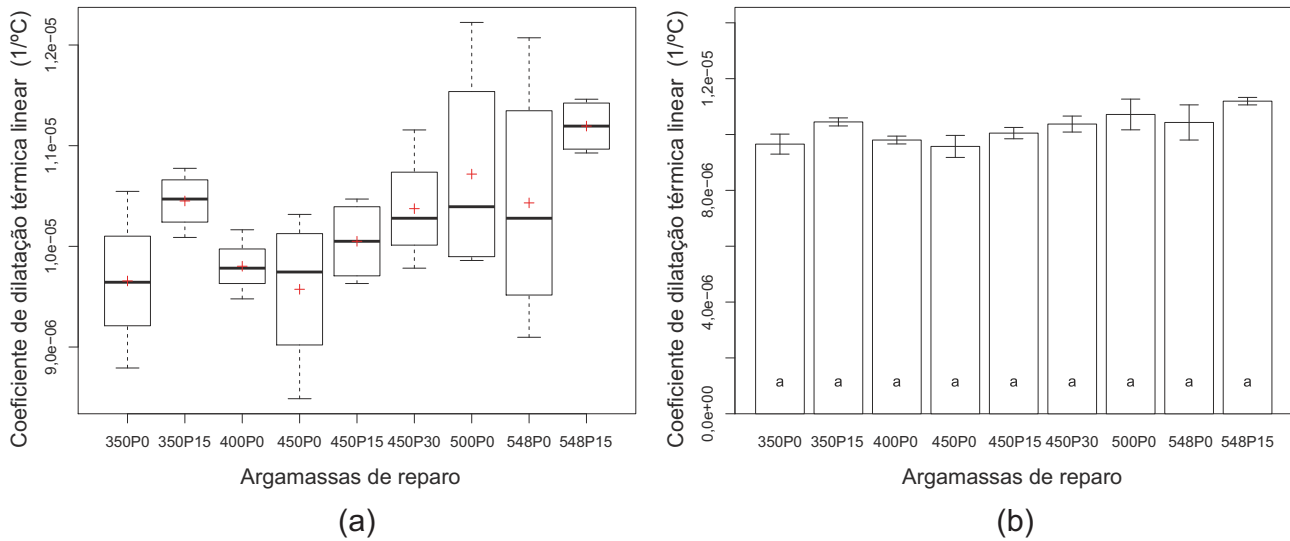
Legenda: Reativo = Cimento + sílica; Inerte = Areia natural + fíler.

A diminuição não significativa na retração por secagem relativa às argamassas com e sem polímero estão em concordância com Weng (2017), que encontrou resultados semelhantes entre a retração de materiais de reparo modificados com polímero EVA e sem adição. Apesar da diferença não ser significativa, os valores médios de retração por secagem foram menores nas argamassas modificadas, que pode ser consequência da atuação do polímero EVA no preenchimento e impermeabilização dos poros capilares, dificultando a mobilidade da água no interior do material cimentício.

5.6 COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA LINEAR

Mediante a realização das leituras de deformação perante o gradiente de temperatura aplicado no experimento, foi calculado o coeficiente de dilatação linear das argamassas do estudo, que podem ser conferidos na Figura 45 e no Apêndice B.

Figura 45 – Valores experimentais para o (a) coeficiente de dilatação térmica linear e (b) teste de Tukey.

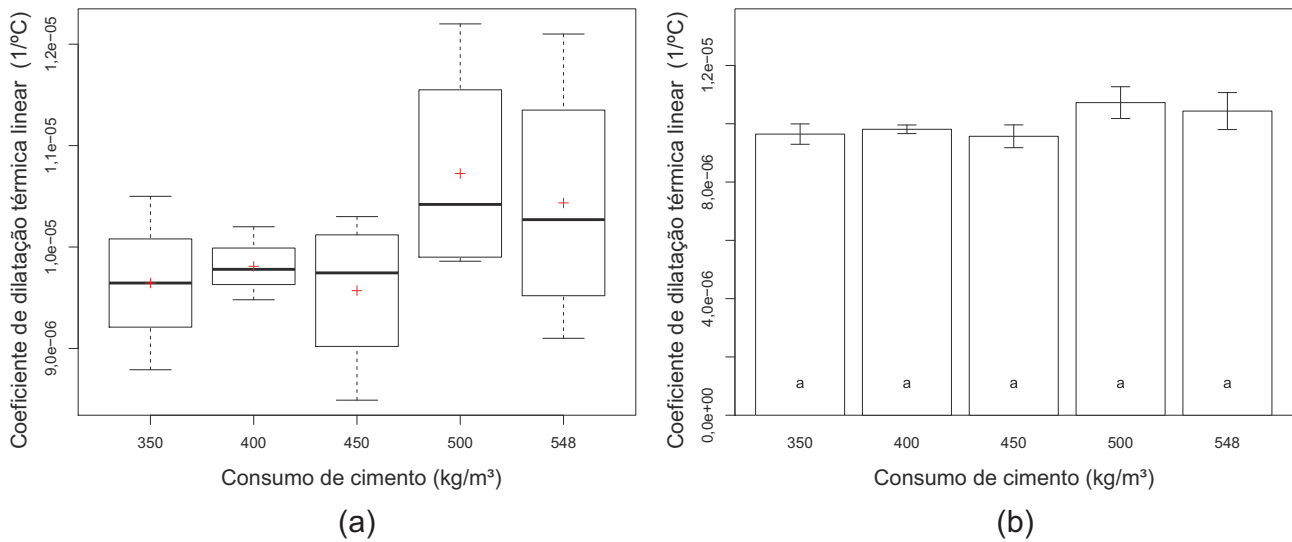


Fonte: O autor.

A análise estatística dos dados não indicou diferença mínima significativa entre os valores de coeficiente de dilatação térmica linear entre as argamassas (Apêndice C). Igualmente, a variação do consumo cimento e do teor de polímero EVA não foram estatisticamente significativos (figuras 46 e 47). No entanto, ao observar os valores médios, identifica-se uma tendência à diminuição do coeficiente nas argamassas com menor consumo cimento, que pode ser resultado do aumento da relação água/cimento em suas proporções, pois seu aumento pode ser inversamente proporcional ao coeficiente de dilatação térmica linear (FURNAS, 1997 apud SOUSA *et al.*, 2014)³. A relação inversamente proporcional entre o consumo de cimento e de areia também é um fator justificativo para a tendência à diminuição do coeficiente nas argamassas com menor cimento, uma vez que os valores médios de expansão térmica das argamassas variam com o tipo de agregado utilizado e a proporção deste no material, tendo a pasta de cimento maiores valores para o coeficiente de dilatação térmica linear do que a areia natural (NEVILLE, 2002; MEHTA; MONTEIRO, 2008). Além disso, as argamassas com menor consumo de cimento obtiveram uma maior proporção em massa de sílica ativa, que reduz a porosidade da matriz por meio da reação pozolânica e do efeito fíler, pois a menor porosidade também contribui para a redução do coeficiente de dilatação térmica (SHUI *et al.*, 2010).

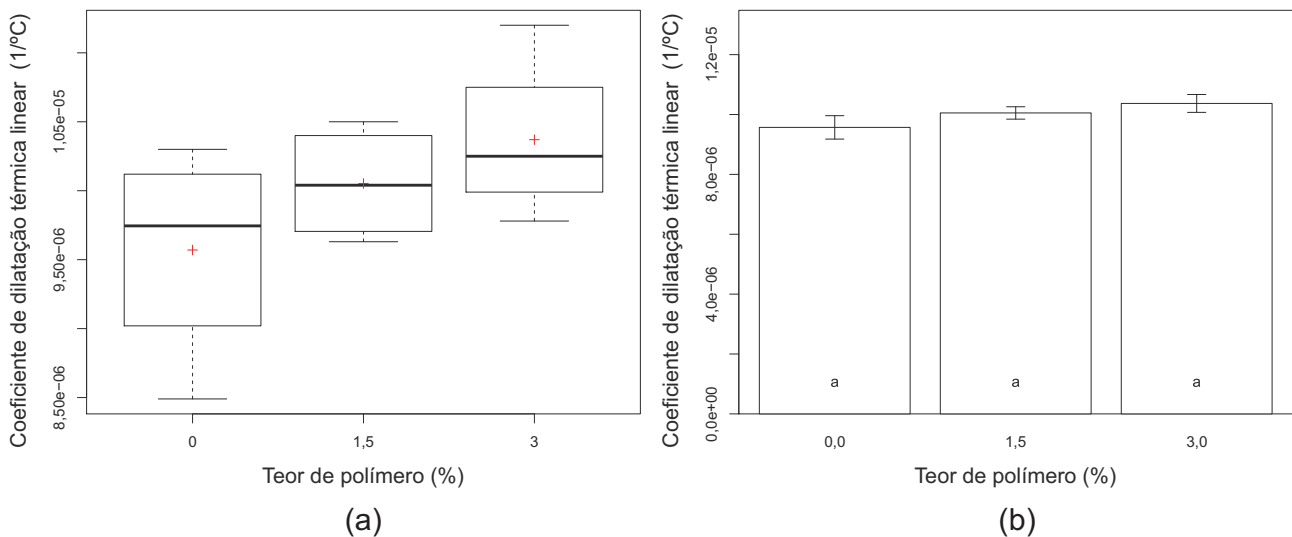
³FURNAS. **Concreto: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo: Editora Pini, 1997.

Figura 46 – Coeficiente de dilatação térmica linear em função do consumo de cimento.



Fonte: O autor.

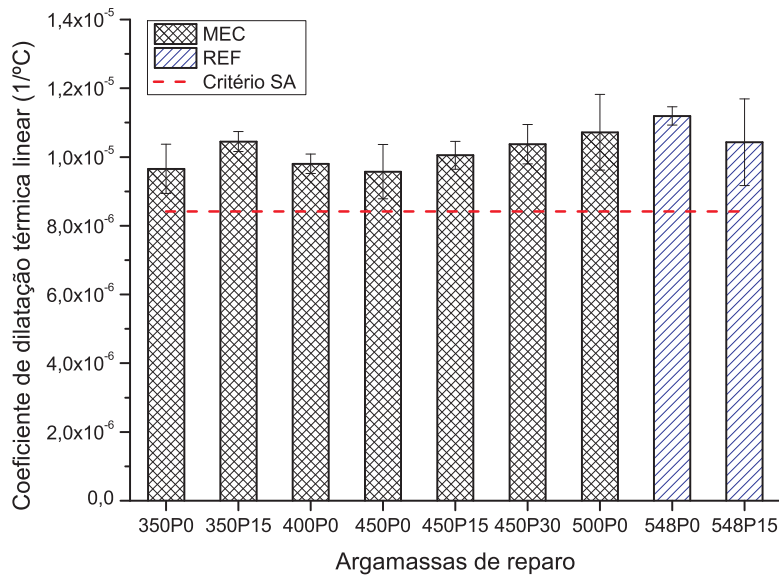
Figura 47 – Coeficiente de dilatação térmica linear em função do teor de polímero EVA.



Fonte: O autor.

A comparação entre os valores experimentais obtidos pelas argamassas de reparo e o substrato A pode ser visualizada na Figura 48, na qual se percebe que os coeficientes de dilatação térmica linear foram maiores que o valor referente ao substrato A. O requisito apresentado na literatura, relativo ao coeficiente de dilatação, recomenda que este seja similar ao concreto a ser reparado, para que o reparo desenvolva variações volumétricas de origem térmica compatíveis com as movimentações do substrato. Apesar dos valores estarem acima do critério estabelecido, ainda permanecem próximos ao coeficiente de dilatação do substrato, e mesmo não atendendo ao requisito, apresentam um desempenho relativamente adequado para o coeficiente de dilatação térmica linear, dentro do contexto da pesquisa.

Figura 48 – Verificação do requisito para o coeficiente de dilatação térmica linear.

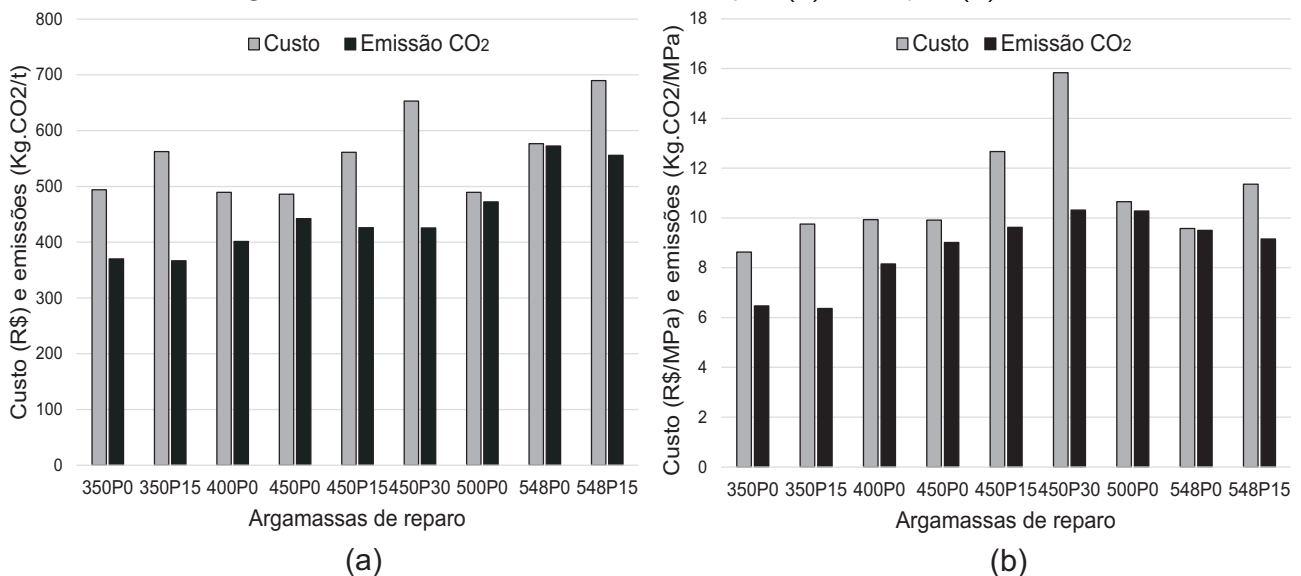


Fonte: O autor.

5.7 CUSTO E EMISSÃO DE CO₂

Os valores calculados para o custo e emissões de CO₂ por m³ dos materiais de reparo, assim como o custo e emissões por MPa estão dispostos respectivamente na Figura 49.

Figura 49 – Custos e emissões de CO₂ por (a) m³ e por (b) MPa.



Fonte: O autor.

Como pode-se verificar na Figura 49(a), as argamassas proporcionadas com o menor consumo de cimento apresentaram o menor valor para o custo em relação às argamassas de referência. No entanto, os valores custo/MPa (Figura 49(b)) mostram que apenas a argamassa 350P0 apresentou um resultado inferior ao da argamassa 548P0, ou seja os demais materiais de reparo são menos eficientes economicamente que o material de referência. Assim, esperava-se que

a argamassa com o menor consumo de cimento apresentasse o menor custo, no entanto a maior demanda de aditivo superplastificante e sílica ativa deixou essa argamassa com o custo próximo das demais. Destaca-se que a modificação com 1,5% e 3,0% de polímero EVA elevou o custo em média de 16,34% e 34,35% respectivamente em relação as argamassas sem a adição.

De maneira semelhante ao custo, as emissões calculadas foram menores para as argamassas com menor consumo de cimento (Figura 49(a)), uma vez que este insumo é o responsável pela maior parte da emissão dos materiais para reparo. Quanto aos valores de emissão por MPa (Figura 49(b)), apenas as argamassas 350P0, 350P15 e 400P0 apresentaram maior eficiência em relação as argamassas com 548 kg/m³.

5.8 DESEMPENHO GERAL DOS MATERIAIS DE REPARO

Mediante os resultados obtidos nos ensaios para a avaliação das propriedades dos materiais de reparo frente aos critérios e requisitos, a Tabela 22 foi construída para a visão geral do desempenho.

Tabela 22 – Avaliação do desempenho geral dos materiais de reparo.

	350P0	350P15	400P0	450P0	450P15	450P30	500P0	548P0	548P15
Resistência à compressão	↑	↑	↔	↔	↓	↓	↓	↑	↑
Resistência à tração	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Módulo de elasticidade	↑	↔	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Abrasão hidráulica	↔	↓	↔	↓	↓	↓	↓	↑	↔
Erosão hidráulica	↑	↑	↑	↔	↔	↔	↔	↑	↑
Aderência	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↓
Retração por secagem	↔	↔	-	↔	↔	-	-	↓	↓
Coef. Dilatação térmica linear	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔
Custo	↔	↓	↔	↔	↓	↓	↓	↔	↓
Emissão de CO ₂	↑	↑	↑	↔	↔	↔	↔	↓	↓

Fonte: O autor.

Desempenho: ↑superior; ↔médio; ↓inferior.

A avaliação das argamassas frente ao desempenho deve ser considerada por meio de um perfil geral das propriedades desejáveis do material de reparo (VAYSBURD *et al.*, 1999; VAYSBURD *et al.*, 2014). Além disso, as características levantadas nos ensaios possuem relevância relativamente maior ou menor entre si. Neste contexto, quanto ao desempenho referente a resistência à compressão, as argamassas com 350 kg/m³ e 548 kg/m³ atendem ao requisito em relação aos dois substratos, no entanto a resistência à compressão não é o principal fator para o adequado comportamento em uso da estrutura reparada, ou seja, as demais argamassas que não atenderam ao requisito estabelecido não são necessariamente inadequadas.

Perante a resistência à tração na flexão todos os materiais de reparo atenderam ao critério de desempenho. Conforme os manuais de reparação, a resistência à tração é um dos principais fatores para a durabilidade do sistema, pois no caso dos materiais cimentícios a fissuração está relacionada à capacidade do reparo suportar aos esforços de tração inerentes à estrutura. Portanto, neste quesito todas as argamassas podem ser consideradas adequadas para a execução de um reparo durável.

As propriedades estudadas inerentes à compatibilidade dimensional são o módulo de elasticidade, retração por secagem e coeficiente de dilatação térmica linear, que estão relacionadas à capacidade do reparo resistir à fissuração por variações volumétricas, que é fundamental para reparos superficiais. As argamassas podem ser consideradas com bom desempenho frente ao módulo de elasticidade estático pois apresentaram valores próximos ou menores que os substratos. De maneira semelhante, para o coeficiente de dilatação térmica linear é desejável que o reparo apresente valores próximos que o substrato, assim as argamassas de reparo podem ser consideradas com um desempenho mediano, uma vez que os valores de coeficiente de dilatação térmica linear são maiores, porém se aproximam do valor do substrato. Em contrapartida, os materiais de reparo não cumpriram com o requisito de desempenho para a retração por secagem, visto que todas apresentaram retração maior que os critérios estabelecidos. Destacando-se que os menores valores de retração foram observados para as argamassas com consumo de cimento de 350 kg/m^3 e 450 kg/m^3 , sendo consideradas com um desempenho médio. Já as argamassas de referência apresentaram um desempenho classificado como inferior, dada a elevada retração por secagem inerente ao elevado consumo de cimento e volume de pasta.

O desempenho frente ao desgaste superficial em reparos de estruturas hidráulicas exige que os materiais de reparação apresentem resistência abrasivo-erosiva semelhante ou menor que o substrato, para evitar o surgimento de desgastes diferenciais no sistema reparado. Assim, as argamassas 350P0, 548P0 e 548P15 apresentaram desempenho adequado no ensaio de abrasão e erosão hidráulica. Ressalta-se que no caso do substrato A, o requisito não foi cumprido, dada a elevada resistência abrasiva conferida pelos agregados basálticos presentes em sua composição. Nesse caso, as argamassas não podem ser consideradas com um desempenho inferior, visto que para elevar a resistência abrasiva das argamassas seria necessário um maior consumo de cimento, que poderia prejudicar a compatibilidade dimensional do reparo quando aplicado.

Para a avaliação do desempenho da resistência de aderência à tração foi aplicado o critério da norma EN 1504, que recomenda que reparos não estruturais possuam pelo menos 1 MPa para esta propriedade. Dessa forma, apenas as argamassas 350P0, 350P15, 400P0 e 548P0 atingiram o valor da norma e foram consideradas com um desempenho superior para a aplicação como reparo superficial de estruturas hidráulicas.

Quanto ao custo, as argamassas proporcionadas sem adição de polímero apresentaram valores menores que as argamassas de referência, pois a adição de polímero EVA elevou os custos das argamassas modificadas. Ao avaliar o custo/MPa, apenas as argamassas com 350 kg/m^3 de cimento foram economicamente mais eficientes que as argamassas de referência, sendo classificadas com o melhor desempenho econômico do estudo. Para as emissões de CO_2 por m^3 e por MPa as argamassas com menor consumo de cimento apresentaram os menores resultados, dado o elevado valor de emissão desse insumo. Os resultados da emissão por MPa também indicam os menores valores para as argamassas com 350 kg/m^3 , consideradas com bom desempenho ecoeficiente em relação às demais argamassas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme os objetivos propostos para a pesquisa, neste trabalho foi realizado o proporcionamento de materiais de reparo de estruturas hidráulicas por meio do Modelo de Empacotamento Compressível visando o comportamento em uso, para atender requisitos e critérios de durabilidade para estruturas reparadas segundo recomendação da literatura. Diante disso, a avaliação do desempenho foi realizada mediante os ensaios experimentais apresentados ao longo do trabalho, que possibilitaram as seguintes constatações:

- O índice de consistência pré-estabelecido em 240 mm foi atingido perante a adição de aditivo superplastificante. A realização do ensaio de massa específica no estado fresco indicou que o consumo de cimento nas argamassas 548P0 e 548P15 foi de aproximadamente 600 kg/m^3 após a mistura. Os valores de massa específica foram menores nas argamassas com adição de polímeros.
- A variação do consumo de cimento e do teor de adição de polímero EVA apresentou significância estatística na análise dos ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático. A diminuição do consumo de cimento promoveu o aumento nos resultados mecânicos para as argamassas proporcionadas pelo MEC, devido à adição de sílica ativa e menor consumo de água. A presença de polímeros EVA promoveu a redução dos valores obtidos nos experimentos indicados. Os requisitos de desempenho para as propriedades mecânicas, conforme apresentados na Tabela 1 foram atendidos pelas argamassas com menor (350P0 e 350P15) e maior (548P0 e 548P15) consumo de cimento, com e sem a presença de polímero EVA.
- Os ensaios para avaliação do desgaste superficial por abrasão hidráulica indicaram que a argamassa 548P0 apresentou a menor perda de massa, enquanto que as argamassas com 350 kg/m^3 e 548 kg/m^3 apresentaram as menores perdas de massa por erosão hidráulica. Os resultados das perdas de massa observados nesses ensaios abrasivo e erosivo foram maiores nas argamassas com menor resistência à compressão axial. A variação do consumo de cimento e teor de polímero EVA apresentaram significância estatística na perda de massa nesses ensaios, em que a redução do consumo de cimento promoveu a diminuição da perda de massa nas argamassas dosadas, enquanto que o aumento da adição de polímero provocou o aumento da perda de massa. As argamassas 350P0 e 548P0 possuem o melhor desempenho perante o respectivo requisito indicado na Tabela 7.
- Os resultados para o ensaio de resistência de aderência apresentaram elevada variabilidade, destacando que os melhores resultados foram para a argamassa de referência 548P0 e para a mistura 350P0. A redução do consumo de cimento apresentou diferença estatística significativa na análise dos resultados de resistência de aderência à tração. Também, foi constatada

diferença estatística significativa na avaliação da adição de polímero nos resultados de resistência de aderência das argamassas cimentícias. A avaliação do desempenho frente ao critério estabelecido foi atendido pelas argamassas 350P0, 350P15, 400P0 e 548P0.

- A redução do consumo de cimento teve influência estatisticamente significativa na atenuação da retração por secagem, em que as misturas com maior consumo de cimento apresentaram maior retração. Quanto à adição de polímero, houve uma tendência de diminuição da retração, mas esta não foi estatisticamente significativa conforme a o resultado obtido pela ANOVA.
- O coeficiente de dilatação térmica linear foi estatisticamente igual para todas as argamassas de reparo estudadas. A variação do consumo de cimento e do teor de polímero EVA não foram estatisticamente significativos. Os valores obtidos foram próximos ao coeficiente de dilatação do substrato A apresentado na Tabela 1, sendo este resultado favorável à compatibilidade do material do reparo com o substrato, conforme o requisito correspondente.
- Considerando-se o cálculo dos valores de custo por m^3 e por MPa, observa-se que apenas as argamassas com consumo de cimento de $350 \text{ kg}/m^3$ apresentaram a melhor eficiência econômica em relação à argamassa de referência. A adição de polímero EVA elevou consideravelmente o custo das argamassas modificadas com esse material. A quantificação das emissões de CO_2 mostram que as argamassas com menor consumo de cimento apresentam as menores emissões.
- A análise do desempenho geral das argamassas indicou que a argamassa de reparo 350P0 é o material melhor avaliado neste trabalho frente as propriedades estudadas. Esse resultado decorre da redução da pasta de cimento e adição de sílica ativa para manutenção da resistência mecânica no processo de dosagem. Este resultado indica que o MEC tem potencial para o proporcionamento de argamassas cimentícias para reparo de estruturas hidráulicas atendendo o comportamento em uso.

Durante a realização deste estudo vislumbrou-se a demanda dos seguintes trabalhos futuros:

- Estudo do comportamento reológico de pastas no proporcionamento de argamassas de reparo por meio de modelos de empacotamento de partículas;
- Estudo da compacidade ou empacotamento úmido de argamassas no estado fresco;
- Estudo da dispersão de materiais pulverulentos no processo de mistura de materiais cimentícios;
- Avaliação do efeito de aditivos redutores de retração nas propriedades de materiais de reparo cimentícios;
- Calibração das equações de correlação das propriedades de dosagem de materiais de reparo a base de cimento.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR NM 248: Agregados–Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2003.
- ABNT. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos-Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2005.
- ABNT. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos-Determinação da resistência à tração na flexão e á compressão**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2005.
- ABNT. **NBR NM 45: Agregados: Determinação da Massa Unitária e do Volume de Vazios**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2006.
- ABNT. **NBR 8522: Concreto-Determinação do módulo estático de elasticidade á compressão**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2008.
- ABNT. **NBR 12815: Concreto endurecido - Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2012.
- ABNT. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos-Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2016.
- ABNT. **NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2016.
- ABNT. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó-Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2017.
- ABNT. **NBR 16697: Cimento Portland-Requisitos**. [S.l.]: ABNT Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT. **NBR 5739: Concreto-Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2018.
- ABNT. **NBR 13528-3: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Parte 3: aderência superficial**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2019.
- ACI546R. **Concrete Repair Guide**. USA: [s.n.], 2004.
- AIM, R. B.; GOFF, P. L. Effet de paroi dans les empilements désordonnés de sphères et application á la porosité de mélanges binaires. **Powder technology**, Elsevier, v. 1, n. 5, p. 281–290, 1968.
- AÏTCIN, P.-C.; FLATT, R. J. **Science and technology of concrete admixtures**. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2015.
- ALKAYSI, M.; EL-TAWIL, S.; LIU, Z.; HANSEN, W. Effects of silica powder and cement type on durability of ultra high performance concrete (uhpc). **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 66, p. 47–56, 2016.

- AMARIO, M.; RANGEL, C. S.; PEPE, M.; FILHO, R. D. T. Optimization of normal and high strength recycled aggregate concrete mixtures by using packing model. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 84, p. 83–92, 2017.
- ANDRADE, W. P. **Procedimento de reparos de concretos**. [S.l.]: Documento cedido pelo autor, 2017.
- ANDREASEN, A. Über die beziehung zwischen kornabstufung und zwischenraum in produkten aus losen körnern (mit einigen experimenten). **Kolloid-Zeitschrift**, Springer, v. 50, n. 3, p. 217–228, 1930.
- ASTM. **E 1876-15: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration**. West Conshohocken: [s.n.], 2015.
- ASTM. **C157-17. Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete**. West Conshohocken: ASTM internacional, 2017.
- ASTM. **C596-18. Standard test method for drying shrinkage of mortar containing hydraulic cement**. West Conshohocken: ASTM internacional, 2018.
- ASTM. **C1138C: Standard test method for abrasion resistance of concrete (underwater method)**. West Conshohocken: [s.n.], 2019.
- BISSONNETTE, B.; COURARD, L.; FOWLER, D. W.; GRANJU, J.-L. **Bonded Cement-based Material Overlays for the Repair, the Lining or the Strengthening of Slabs or Pavements: State-of-the-art Report of the RILEM Technical Committee 193-RLS**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011. v. 3.
- BISSONNETTE, B.; COURARD, L.; GARBACZ, A. **Concrete surface engineering**. [S.l.]: CRC Press, 2018. v. 18.
- BISSONNETTE, B.; COURARD, L.; GARBACZ, A.; VAYSBURD, A.; VONFAY, K. Concrete repair bond: evaluation and factors of influence. In: **Proc. Concrete Solutions-5th Int. Conf. on Concrete Repair**. [S.l.: s.n.], 2014. v. 1, p. 51–57.
- BISSONNETTE, B.; PIERRE, P.; PIGEON, M. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1655–1662, 1999.
- BOMEDIANO, K. S.; GOMES, C. E. M.; FONTANINI, P. S. P. Propriedades da argamassa modificada com polímeros redispersíveis de etileno-acetato de vinila (eva). **Ambiente Construído**, SciELO Brasil, v. 20, n. 3, p. 419–429, 2020.
- BREWE, J. E.; MYERS, J. J. Particle size optimization for reduced cement high strenght concrete. **Powder technology**, NBC, 2005.
- BRITISH STANDARD. **BS 1199: Specifications for building sands from natural sources**. London: [s.n.], 1976.
- CAMPOS, H.; KLEIN, N.; FILHO, J. M. Proposed mix design method for sustainable high-strength concrete using particle packing optimization. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, p. 121907, 2020.

- CARVALHO, J. M. F. d. **Obtention of eco-efficient cement-based composites using industrial waste**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil., 2019.
- CASTRO, A. D.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, SciELO Brasil, v. 55, n. 333, p. 18–32, 2009.
- CHAN, K.; KWAN, A. Evaluation of particle packing models by comparing with published test results. **Particuology**, Elsevier, v. 16, p. 108–115, 2014.
- CHATEAU, X. Particle packing and the rheology of concrete. In: **Understanding the rheology of concrete**. [S.l.]: Elsevier, 2012. p. 117–143.
- COURARD, L.; PIOTROWSKI, T.; GARBACZ, A. Near-to-surface properties affecting bond strength in concrete repair. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 46, p. 73–80, 2014.
- CUSSON, D. Durability of concrete repaired concrete structures. **Failure, Distress and Repair of Concrete Structure**, p. 297–321, 2009.
- DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 32, n. 8, p. 555–562, 2010.
- DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Influence of packing and dispersion of particles on the cement content of concretes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, SciELO Brasil, v. 10, n. 5, p. 998–1024, 2017.
- DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**. [S.l.]: CRC Press, 1999.
- DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. **Cement and concrete research**, Elsevier, v. 32, n. 11, p. 1699–1704, 2002.
- EMMONS, P. H.; VAYSBURD, A. M. **Performance Criteria for Concrete Repair Materials. Phase 1**. [S.l.], 1995.
- ESCOBAR NETO, C. T. M. **Estudo de materiais de reparo para a calha esquerda do vertedouro da usina hidrelétrica de Itaipu**. 44 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.
- FARIA, E. F.; WILLRICH, F. L.; LOPES, J. B. O.; DIAS, C. G. Avaliação térmica de argamassas de reparo para aplicação na calha do vertedouro da barragem de itaipu. In: **XIV Congresso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XVI Congreso de Control de Calidad en la Construcción**. [S.l.: s.n.], 2017.
- FAY, K. F. von. **Guide to Concrete Repair**. [S.l.]: US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, 2015.
- FENG, S.; XIAO, H.; ZHANG, R.; YANG, C. Bond performance between substrate concrete and repair mortar: Effect of carbon fibre and expansive agent. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 250, p. 118830, 2020.
- FILHO, R. D. T.; KOENDERS, E. A. B.; FORMAGINI, S.; FAIRBAIRN, E. M. R. Performance assessment of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites in view of sustainability. **Materials & Design**, Elsevier, v. 36, p. 880–888, 2012.

- FORMAGINI, S. **Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho, 2005**. Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil)—COPPE-Universidade Federal, 2005.
- FOWLER, D.; TREVIÑO, M. Overlay design process. In: **Bonded Cement-Based Material Overlays for the Repair, the Lining or the Strengthening of Slabs or Pavements**. [S.l.]: Springer, 2011. p. 5–16.
- FUNK, J. E.; DINGER, D. R. Fundamentals of particle packing, monodisperse spheres. In: **Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions**. [S.l.]: Springer, 1994. p. 59–73.
- FURNAS, C. Grading aggregates-i.-mathematical relations for beds of broken solids of maximum density. **Industrial & Engineering Chemistry**, ACS Publications, v. 23, n. 9, p. 1052–1058, 1931.
- GALVÃO, J. C. A.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; MENDES, R.; FERREIRA, E. S. Use of waste polymers in concrete for repair of dam hydraulic surfaces. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 25, n. 2, p. 1049–1055, 2011.
- GALVÃO, J. C. A.; PORTELLA, K. F.; KORMANN, A. C. M. Abrasive effects observed in concrete hydraulic surfaces of dams and application of repair materials. **Abrasion Resistance of Materials**, BoD—Books on Demand, p. 19–34, 2012.
- GOMES, P. C. C.; BARROS, A. d. Métodos de dosagem de concreto autoadensável. **São Paulo: PINI**, v. 172, 2009.
- GRAHAM, J. R.; CREEGAN, P. J.; HAMILTON, W. S.; HENDRICKSON, J.; KADEN, R. A.; MCDONALD, J. E.; NOBLE, G. E.; SCHRADER, E. K. Erosion of concrete in hydraulic structures. **ACI Materials Journal**, v. 84, n. 2, p. 136–156, 1987.
- HANINI, W. **Etude de l'incidence de la granularité sur la compacité des mélanges granulaires**. Tese (Doutorado) — University Aboubekr Belkaid, 2012.
- HELENE, P.; TUTIKIAN, B. Dosagem dos concretos de cimento portland. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON**, v. 2, p. 439–471, 2005.
- HORSZCZARUK, E. Mathematical model of abrasive wear of high performance concrete. **Wear**, Elsevier, v. 264, n. 1-2, p. 113–118, 2008.
- HORSZCZARUK, E.; BRZOZOWSKI, P. Effects of fluidal fly ash on abrasion resistance of underwater repair concrete. **Wear**, Elsevier, v. 376, p. 15–21, 2017.
- ISO. **9277: Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption - BET method**. [S.l.]: Genebra, 2009.
- JUNIOR, R. M.; SELMO, S. d. S. Aderência de argamassas de reparo de estruturas de concreto. **Boletim técnico da escola politécnica da USP. São Paulo**, 2007.
- KANTRO, D. L. 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.

- KIM, D. H.; TREVINO, M.; WHITNEY, D. P.; FOWLER, D. W.; FERRON, R. **Materials selection for concrete overlays: information survey review and evaluation of existing concrete overlays in Texas**. [S.l.], 2011.
- KORMANN, A.; PORTELLA, K.; PEREIRA, P.; SANTOS, R. Study of the performance of four repairing material systems for hydraulic structures of concrete dams. **Cerâmica**, SciELO Brasil, v. 49, n. 309, p. 48–54, 2003.
- KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. Tese (Tese de doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2002.
- KWAN, A.; WONG, V.; FUNG, W. A 3-parameter packing density model for angular rock aggregate particles. **Powder technology**, Elsevier, v. 274, p. 154–162, 2015.
- KWAN, A. K.; MCKINLEY, M.; CHEN, J.-J. Adding limestone fines as cement paste replacement to reduce shrinkage of concrete. **Magazine of concrete research**, Thomas Telford Ltd, v. 65, n. 15, p. 942–950, 2013.
- KWAN, A. K. H.; CHAN, K. W.; WONG, V. A 3-parameter particle packing model incorporating the wedging effect. **Powder technology**, Elsevier, v. 237, p. 172–179, 2013.
- KWAN, A. K. H.; FUNG, W. Packing density measurement and modelling of fine aggregate and mortar. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 31, n. 6, p. 349–357, 2009.
- LECOMTE, A.; ZENNIR, A.; LARRARD, F. D. Modèle de suspension solide et formulation de bétons calcaires en lorraine. **BULLETIN-LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES**, p. 41–52, 1997.
- LUKOVIC, M.; YE, G.; BREUGEL, K. V. Reliable concrete repair: A critical review. In: **14th International Conference Structural Faults and Repair, Edinburgh, Scotland, UK, 3-5 July 2012**. [S.l.: s.n.], 2012.
- MACCAGNAN, C. L. **Análise dos traços de concreto usados na concretagem da calha esquerda do vertedouro da Usina Hidrelétrica de Itaipu**. 90 p. Monografia (Trabalho Final de Graduação) — Faculdade Dinâmica das Cataratas, Foz do Iguaçu, 2011.
- MASTER BUILDERS SOLUTIONS. Concrete technology in focus overview: Shrinkage of concrete. In: . [S.l.: s.n.], 2016.
- MC-BAUCHEMIE. **Manual técnico**. [S.l.]: Linha de produtos 2016/17, 2017.
- MCTIC. Secretaria e políticas e programas de pesquisa e desenvolvimento. **3 Comunicação nacional do brasil á convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**, 2018.
- MEHDIPOUR, I.; KHAYAT, K. H. Effect of particle-size distribution and specific surface area of different binder systems on packing density and flow characteristics of cement paste. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 78, p. 120–131, 2017.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. [S.l.]: Ibracon, 2008.
- MILLER, S. A.; JOHN, V. M.; PACCA, S. A.; HORVATH, A. Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 114, p. 115–124, 2018.

- MOMBER, A. Effects of target material properties on solid particle erosion of geomaterials at different impingement velocities. **Wear**, Elsevier, v. 319, n. 1-2, p. 69–83, 2014.
- MOMBER, A.; KOVACEVIC, R. Fundamental investigations on concrete wear by high velocity water flow. **Wear**, Elsevier, v. 177, n. 1, p. 55–62, 1994.
- MOMBER, A.; KOVACEVIC, R.; YE, J. The fracture of concrete due to erosive wear by high velocity water flow. **Tribology transactions**, Taylor & Francis, v. 38, n. 3, p. 686–692, 1995.
- NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. England: Prentice Hall, 2002.
- NG, P.; KWAN, A. K. Strategies for improving dimensional stability of concrete. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 43, n. 10, p. 875–885, 2016.
- NUNES, V. A.; BORGES, P. H.; ZANOTTI, C. Mechanical compatibility and adhesion between alkali-activated repair mortars and portland cement concrete substrate. **Construction and Building Materials**, v. 215, p. 569–581, 2019.
- OLIVEIRA, N. C. C. d. A grande aceleração e a construção de barragens hidrelétricas no brasil. **Varia Historia**, SciELO Brasil, v. 34, n. 65, p. 315–346, 2018.
- PYO, S.; KIM, H.-K.; LEE, B. Y. Effects of coarser fine aggregate on tensile properties of ultra high performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 84, p. 28–35, 2017.
- RAMPANELLI, C. H. O.; ROHR, N. G.; TRENTINI, C. B.; GAVA, G. P.; RIZZI, R. L. Avaliação do desgaste erosivo por hidrojateamento em materiais para reparo de estruturas de concreto. In: **Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto**. [S.l.: s.n.], 2018.
- REBMANN, M. S. **Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland: desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos agregados**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2016.
- RIGO, E. **Avaliação do potencial de captura de CO2 de concretos com resíduos de construção e demolição devido à carbonatação**. 75 p. Dissertação (Dissertação de mestrado) — Programa de Pós-graduação Em Engenharia Civil - Universidade Federal da Integração Latino Americana, Foz do iguaçu, 2019.
- RIZZI, R. L.; PRAMIU, P. V.; AZEVEDO, R. L.; GAVA, G. P. Influência do tamanho do agregado e da relação água/cimento na resistência abrasiva e erosiva de concretos utilizados no vertedouro de itaipu. In: **XXX - Seminário Nacional de Grandes Barragens**. [S.l.: s.n.], 2015.
- ROHR, N. G.; GAVA, G. P.; RIZZI, R. L.; RAMPANELLI, C. H. O.; TRENTINI, C. B. Análise do desempenho de argamassa de reparo com adição de fibra de polipropileno submetida á erosão hidráulica. In: **Anais do 61º Congresso Brasileiro do Concreto**. [S.l.: s.n.], 2019.
- ROQUIER, G. **Etude de la compacité optimale des mélanges granulaires binaires: classe granulaire dominante, effet de paroi, effet de desserrement**. Tese (Doutorado) — Paris Est, 2016.
- ROQUIER, G. The 4-parameter compressible packing model (cpm) for crushed aggregate particles. **Powder technology**, Elsevier, v. 320, p. 133–142, 2017.
- ROQUIER, G. A theoretical packing density model (tpdm) for ordered and disordered packings. **Powder Technology**, Elsevier, v. 344, p. 343–362, 2019.

- SANDSTRÖM, T. **Durability of concrete hydropower structures when repaired with concrete overlays**. Tese (Doutorado) — Luleå tekniska universitet, 2010.
- SEDRAN, T.; LARRARD, F. de; ANGOT, D. Prédiction de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension solide-ii-validation, cas des mélanges confinés. **Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées**, n. 194, 1994.
- SHUI, Z.; ZHANG, R.; CHEN, W.; XUAN, D. Effects of mineral admixtures on the thermal expansion properties of hardened cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 9, p. 1761–1767, 2010.
- SILFWERBRAND, J.; BEUSHAUSEN, H.; COURARD, L. Bond. In: **Bonded Cement-Based Material Overlays for the Repair, the Lining or the Strengthening of Slabs or Pavements**. Dordrecht: Springer, 2011. p. 51–79.
- SITNIK, L. J. Wear kinetics theory and its potential application to assessment of wear of machine parts. **Wear**, Elsevier, v. 265, n. 7-8, p. 1038–1045, 2008.
- SOUSA, A. L. D.; SILVA, I. R. R. D.; CASTRO, P. H. M. D. **Retração térmica e fissuração em concreto por calor de hidratação**. 108 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.
- SOUZA, V. C. d.; RIPPER, T. **Recuperação e Reforço de Estrutura de Concreto**. São Paulo: Pini, 2009. v. 5.
- STOVALL, T.; LARRARD, F. D.; BUIL, M. Linear packing density model of grain mixtures. **Powder technology**, Elsevier, v. 48, n. 1, p. 1–12, 1986.
- SUN, Y.; WANG, Z.; GAO, Q.; LIU, C. A new mixture design methodology based on the packing density theory for high performance concrete in bridge engineering. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 182, p. 80–93, 2018.
- TILLY, G. **Durability of concrete repairs, Concrete repairs, M. Grantham, ed.** Oxford, UK: Taylor and Francis, 2011.
- VAYSBURD, A. M. Repairing concrete: random thoughts on concrete ills and treatment prescriptions. **International Journal of Materials and Product Technology**, Inderscience Publishers, v. 23, n. 3-4, p. 164–176, 2005.
- VAYSBURD, A. M. Holistic system approach to design and implementation of concrete repair. **Cement and Concrete composites**, Elsevier, v. 28, n. 8, p. 671–678, 2006.
- VAYSBURD, A. M.; BISSONNETTE, B.; FAY, K. F. von. **Compatibility issues in design and implementation of concrete repairs and overlays**. [S.l.]: US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service, 2014.
- VAYSBURD, A. M.; EMMONS, P. H.; MCDONALD, J. E.; KESNER, K. E. *et al.* Performance criteria for concrete repair materials. phase ii, summary report. Structures Laboratory (US), 1999.
- WBCDS. Weighted average excluding co2 from on-site power generation grey clinker, 2016b. **GNR Project**, 2016. Disponível em: <<https://www.wbcdcement.org/GNR-2016>>. Acesso em: 30/10/2020.
- WESTMAN, A. R.; HUGILL, H. The packing of particles 1. **Journal of the American Ceramic Society**, Wiley Online Library, v. 13, n. 10, p. 767–779, 1930.

- WILLRICH, F.; NETO, C.; CALEGARI, F.; DALFRÉ, G.; POSSAN, E.; SANTOS, A. C. d. Avaliação da aderência e propriedades mecânicas de argamassas poliméricas para aplicação na manutenção da superfície das calhas da uhe itaipu. In: **Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto**. [S.l.: s.n.], 2015.
- WONG, V.; CHAN, K. W.; KWAN, A. K. H. Applying theories of particle packing and rheology to concrete for sustainable development. **Organization, technology & management in construction: an international journal**, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, v. 5, n. 2, p. 844–851, 2013.
- YEN, T.; HSU, T.-H.; LIU, Y.-W.; CHEN, S.-H. Influence of class f fly ash on the abrasion–erosion resistance of high-strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 2, p. 458–463, 2007.
- ZHOU, J.; YE, G.; BREUGEL, K. van. Cement hydration and microstructure in concrete repairs with cementitious repair materials. **Construction and building materials**, Elsevier, v. 112, p. 765–772, 2016.
- ZUO, W.; LIU, J.; TIAN, Q.; XU, W.; SHE, W.; FENG, P.; MIAO, C. Optimum design of low-binder self-compacting concrete based on particle packing theories. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 163, p. 938–948, 2018.

Apêndices

APÊNDICE A – DOSAGEM TESTE

Os dados de entrada do MEC (Anexo A) neste estudo piloto são oriundos de Formagini (2005), pois o procedimento foi realizado antes da caracterização completa dos materiais escolhidos para a pesquisa. O arquivo de texto usado como entrada no MECFOR pode ser conferido na Figura 50. Como primeiro passo do processo de dosagem, realizou-se a conversão de massa em volume da argamassa de referência, em respeito à massa específica de cada material particulado. Assim, determinou-se a mistura granular unitária relativa à argamassa de Andrade (2017). Tais valores foram adicionados no MECFOR com a primeira substituição de uma fração de 0,100 de cimento por fíler calcário, como mostrado na Tabela 23.

Tabela 23 – Frações volumétricas, p_m dos constituintes da mistura.

Material	LI	LS	Entrada
Cimento	0,001	0,999	0,165
Sílica ativa	0,001	0,999	0,046
Fíler calcário	0,001	0,999	0,100
Areia natural	0,001	0,999	0,689
Volume total			1,000

Fonte: O autor.

Os limites inferior (LI) e superior (LS) observados na Tabela 23 correspondem à faixa de volume unitário, na qual o simulador poderá buscar as respectivas frações volumétricas que promovam a maior densidade de empacotamento conforme os valores de entrada. A cada simulação do MECFOR os limites LI e LS foram ajustados de acordo com as equações de correlação das propriedades no estado endurecido, apresentadas no Anexo A, até o atendimento das propriedades desejadas.

O procedimento de dosagem para a mistura M1 resultou em uma compacidade de $\phi=0,7526$, resistência à compressão de $f_{cm}=61,1$ MPa e módulo de elasticidade $E_m=13,81$ GPa. A mistura M2 apresentou os seguintes valores: $\phi=0,7506$, $f_{cm}=63,1$ MPa e $E_m=14,26$ GPa. Ressalta-se que as equações para o f_{cm} e E_m estão sendo aplicadas de maneira adaptada, uma vez que estão atrelados à matriz cimentícia do concreto e não de um material de reparo. O proporcionamento das duas misturas dosadas estão dispostos na Tabela 24.

Figura 50 – Banco de dados do MECFOR.

Banco de dados.txt - Bloco de notas								
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda								
44.0	10.0	0.0	0.0					
t	t	t						
Sílica_At		1.0	2220	0.430	6.7	1	1.0	1.0
Pozolana		1.0	2970	0.600	6.7	1	1.0	10.0
Cimento_P		1.0	3020	0.605	6.7	1	1.0	20.0
Areia_Fina		3.0	2646	0.647	9.0	2	1.0	150.0
Areia_Media		3.0	2632	0.667	9.0	2	1.0	650.0
0.1	0.1	0.000	0.053	0.000	0.00	0.00	0.00	
0.1	0.2	0.000	1.023	0.000	0.00	0.00	0.00	
0.2	0.2	0.000	2.579	0.000	0.00	0.00	0.00	
0.2	0.3	0.000	2.350	0.000	0.00	0.00	0.00	
0.3	0.3	23.900	3.285	0.000	0.00	0.00	0.00	
0.3	0.4	16.120	2.329	0.300	0.00	0.00	0.00	
0.4	0.5	18.740	2.378	0.500	0.00	0.00	0.00	
0.5	0.6	15.600	1.836	0.800	0.00	0.00	0.00	
0.6	0.8	8.182	0.003	0.500	0.00	0.00	0.00	
0.8	1.0	4.422	0.000	1.100	0.00	0.00	0.00	
1.0	1.3	3.275	0.000	0.900	0.00	0.00	0.00	
1.3	1.6	1.086	0.000	1.700	0.00	0.00	0.00	
1.6	2.0	1.156	0.000	2.100	0.00	0.00	0.00	
2.0	2.5	1.456	1.450	2.200	0.00	0.00	0.00	
2.5	3.2	0.507	3.492	2.900	0.00	0.00	0.00	
3.2	4.0	0.660	5.226	3.200	0.00	0.00	0.00	
4.0	5.0	0.728	6.329	4.200	0.00	0.00	0.00	
5.0	6.3	0.869	6.946	4.600	0.00	0.00	0.00	
6.3	8.0	0.872	7.512	4.600	0.00	0.00	0.00	
8.0	10.0	0.015	7.363	6.200	0.00	0.00	0.00	
10.0	12.5	0.029	6.927	5.600	0.00	0.00	0.00	
12.5	16.0	0.223	6.994	6.500	0.00	0.00	0.00	
16.0	20.0	0.708	6.560	7.300	0.00	0.00	0.00	
20.0	25.0	0.691	5.688	7.300	0.00	0.00	0.00	
25.0	31.5	0.282	5.069	8.000	0.00	0.00	0.00	
31.5	40.0	0.247	4.333	8.400	0.00	0.02	0.00	
40.0	50.0	0.230	3.194	8.300	0.00	0.02	0.00	
50.0	63.0	0.002	1.879	5.800	0.00	0.03	0.00	
63.0	80.0	0.000	2.300	4.091	0.00	0.03	0.00	
80.0	100.0	0.000	0.820	2.109	0.00	1.00	0.00	
100.0	125.0	0.000	0.828	0.800	0.00	1.00	0.00	
125.0	150.0	0.000	0.391	0.000	0.00	1.03	0.00	
150.0	300.0	0.000	0.282	0.000	0.00	24.47	0.00	
300.0	600.0	0.000	0.581	0.000	0.00	53.52	0.00	
600.0	1200.0	0.000	0.000	0.000	0.00	15.53	0.00	
1200.0	2400.0	0.000	0.000	0.000	100.00	2.55	0.00	
2400.0	4800.0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.77	0.00	
4800.0	6300.0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.03	0.00	
6300.0	9500.0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	100.00	
9500.0	12700.0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	
12700.0	19000.0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	
19000.0	25000.0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	
25000.0	31500.0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	
31500.0	37500.0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	

Fonte: Formagini (2005).

Tabela 24 – Proporcionamento das misturas cimentícias em quilograma por m³ e em massa.

	Cimento	Sílica ativa	Fíler calcário	Areia natural	Água
M1	314	119	322	1349	229
	1	0,38	1,03	4,29	0,73
M2	354	100	304	1349	231
	1	0,28	0,86	3,81	0,65

Fonte: O autor.

Para melhor controle e ajuste das futuras dosagens foi proposto a realização da moldagem da misturas M1 e M2. Além disso, objetivou-se o ajuste do consumo de aditivo redutor de água para o índice de consistência requisitado de 240 mm. Os materiais empregados no preparo das misturas correspondem aos caracterizados e apresentados no item 4.2. No entanto, essa caracterização não corresponde ao banco de dados empregado na definição de M1 e M2 por meio do MECFOR. A misturas foram confeccionadas em um misturador mecânico de bancada com volume útil de 1,5 L. Na Tabela 25 estão dispostos os valores de massa dos constituintes utilizados.

Tabela 25 – Quantidade em massa (g) para 1,5 litros da mistura.

	Cimento	Sílica ativa	Fíler calcário	Areia natural	Água	Fibras(*)
M1	471,68	178,11	483,48	2024,09	343,95	1,89
M2	530,53	149,31	456,34	2023,22	346,80	2,12

Fonte: O autor.

(*) 0,4% de fibras em relação à massa de cimento (ROHR *et al.*, 2019).

O procedimento de mistura adotado foi adaptado da NBR 16541 (ABNT, 2016b) e realizado em um misturador de bancada. O passo a passo está descrito na sequência: Adicionar toda a água e toda a quantidade de cimento e adições e misturá-los em rotação lenta por 60 segundos; Colocar metade da quantidade de aditivo prevista e misturar por 60 segundos em rotação lenta; Sem desligar o misturador, colocar toda a areia durante 30 segundos e manter em rotação lenta por 30 segundos; Desligar o misturador por 90 segundos e adicionar a fibra de polipropileno e o restante de aditivo; Misturar por 30 segundos em velocidade lenta e mais 90 segundos em rotação rápida; Misturar por 300 segundos em rotação baixa para abrandar a incorporação de ar.

Após a mistura, o índice de consistência foi ajustado até atingir 240 ± 10 mm no *flow table*, conforme os procedimentos da NBR 13276 (ABNT, 2016a). Além disso, foi determinada a massa específica conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005a). Na Tabela 26 estão dispostos os resultados dos ensaios no estado fresco, bem como o consumo de aditivo em relação à massa de cimento.

Tabela 26 – Resultados no estado fresco das misturas testes.

	Massa de aditivo (g)	Consumo de aditivo (%)	Consistência (mm)	Massa específica (g/cm³)
M1	7,00	1,29	233,91	2,30
M2	4,80	0,90	241,54	2,29

Fonte: O autor.

Após a realização dos ensaios da Tabela 26 foram moldados seis corpos de prova cilíndricos de 50×100 mm, armazenados em cura úmida após a desforma, que foram empregados na realização de ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico. O ensaio de resistência à compressão foi realizado segundo as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018b) e o módulo por meio da ASTM E1876 (ASTM, 2015). Na Tabela 27 pode-se visualizar os resultados dos ensaios citados.

Tabela 27 – Resultados no estado endurecido das misturas testes.

	Resistência à compressão (MPa)		Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
M1	37,0	58,0	13,4	14,2
M2	45,9	64,1	13,6	14,5

Fonte: O autor.

Nota: Resultados expressos pela média.

Conforme observado nos resultados da Tabela 27, verifica-se que a dosagem preliminar se mostrou promissora no proporcionamento de materiais para reparo. Os valores médios de resistência à compressão foram próximos ao esperado apesar da redução de aproximadamente 200 kg/m³ de consumo de cimento. Os valores de módulo de elasticidade dinâmico se mostrou relativamente baixo em relação ao valores das argamassas estudadas em (ROHR *et al.*, 2019). Diante dos resultados o próximo passo foi a realização do proporcionamento final.

APÊNDICE B – TABELAS DE RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

Tabela 28 – Determinação do ponto de saturação do aditivo nas pastas.

Cimento					
*SP(%)	0,10%	0,20%	0,30%	0,40%	0,50%
<i>a/s</i>	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Aditivo (g)	0,46	0,91	1,36	1,82	2,27
Água (g)	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00
Cimento (g)	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00
<i>D</i> (mm)	0,00	122,00	193,00	195,00	196,00
Sílica Ativa					
*SP(%)	2,00%	3,00%	4,00%	5,00%	6,00%
<i>a/s</i>	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
Aditivo (g)	9,09	13,60	18,20	22,70	22,70
Água (g)	165,00	165,00	165,00	165,00	165,00
Sílica (g)	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00
<i>D</i> (mm)	0,00	112,00	121,00	119,00	111,00
Fíler calcário					
*SP(%)	0,10%	0,20%	0,30%	0,40%	0,50%
<i>a/s</i>	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Aditivo (g)	1,08	2,73	3,64	4,55	5,46
Água (g)	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00
Fíler (g)	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00
<i>D</i> (mm)	183,00	192,00	207,00	204,00	202,00

Fonte: O autor.

*SP=(massa de sólidos do SP/massa do material)×100.

Legenda: *a/s* = água/sólidos; *D_e* = diâmetro de espalhamento.

Tabela 29 – Resistência à compressão, tração na flexão e módulo de elasticidade estático.

Argamassas	Amostras	Compressão			Tração na flexão		Módulo
		7	28	60	7	28	28
350P0	R1	41,3	57,3	63,9	6,7	10,1	38,9
	R2	40,7	56,8	63,7	6,8	9,6	36,4
	R3	39,8	56,9	63,3	5,8	9,6	35,9
	R4	40,1	58,3	64,8	-	-	-
	R5	41,1	58,0	61,4	-	-	-
	R6	41,1	56,0	60,7	-	-	-
	Média	40,7	57,2	63,0	6,4	9,8	37,1
350P15	R1	42,4	57,7	61,8	6,2	9,4	39,4
	R2	42,4	57,2	65,1	5,8	9,4	43,5
	R3	41,5	58,8	66,0	6,3	9,2	44,9
	R4	42,6	57,2	64,3	-	-	-
	R5	41,8	56,2	65,0	-	-	-
	R6	41,7	58,8	64,4	-	-	-
	Média	42,1	57,6	64,4	6,1	9,3	42,6
400P0	R1	36,5	51,0	51,4	6,6	8,3	30,9
	R2	37,2	48,1	53,2	5,5	8,4	34,8
	R3	36,7	49,3	53,5	6,0	8,3	32,3
	R4	36,1	48,3	51,1	-	-	-
	R5	36,7	48,3	50,8	-	-	-
	R6	37,0	50,4	53,5	-	-	-
	Média	36,7	49,2	52,3	6,0	8,4	32,7
450P0	R1	37,1	46,9	51,8	6,8	9,4	33,8
	R2	36,2	49,1	53,9	6,7	8,6	37,0
	R3	36,0	50,0	51,7	6,3	8,7	35,9
	R4	37,2	48,4	52,7	-	-	-
	R5	35,9	49,3	50,3	-	-	-
	R6	35,4	50,5	50,9	-	-	-
	Média	36,3	49,0	51,9	6,6	8,9	35,6
450P15	R1	33,9	43,5	44,4	5,8	7,2	32,4
	R2	34,7	45,0	48,3	5,6	7,2	40,7
	R3	34,5	45,4	45,8	6,1	7,3	35,5
	R4	35,2	44,1	47,4	-	-	-
	R5	35,2	43,7	47,0	-	-	-
	R6	35,9	43,9	47,9	-	-	-
	Média	34,9	44,3	46,8	5,9	7,3	36,2
450P30	R1	30,0	40,9	43,5	6,3	7,2	27,1
	R2	28,5	42,3	40,6	6,0	7,3	27,1
	R3	29,5	39,1	43,5	6,1	7,2	25,6
	R4	30,2	41,6	44,4	-	-	-
	R5	31,5	41,0	42,0	-	-	-
	R6	31,3	42,6	45,7	-	-	-
	Média	30,2	41,2	43,3	6,1	7,3	26,6

Argamassas	Amostras	Compressão			Tração na flexão		Módulo 28
		7	28	60	7	28	
500P0	R1	37,2	43,5	48,8	6,6	7,3	30,2
	R2	37,1	45,4	50,5	6,5	7,6	29,8
	R3	37,0	47,2	51,8	6,7	7,4	29,0
	R4	38,4	46,8	49,2	-	-	-
	R5	37,2	45,1	42,8	-	-	-
	R6	36,9	47,7	48,2	-	-	-
	Média		37,3	45,9	48,5	6,6	7,4
548P0	R1	47,3	60,2	67,2	8,3	9,8	35,6
	R2	48,7	62,0	64,3	8,1	10,6	32,5
	R3	49,4	58,6	65,2	8,4	10,0	33,9
	R4	47,7	61,3	63,5	-	-	-
	R5	48,0	57,8	64,1	-	-	-
	R6	46,3	61,5	65,9	-	-	-
	Média		47,9	60,2	65,0	8,3	10,1
548P15	R1	45,2	61,9	63,8	7,9	8,6	32,0
	R2	46,6	59,2	61,9	7,3	7,3	26,1
	R3	44,8	60,0	61,0	7,6	7,8	34,2
	R4	47,4	60,8	63,5	-	-	-
	R5	47,0	62,5	65,8	-	-	-
	R6	45,5	60,1	57,3	-	-	-
	Média		46,1	60,7	62,2	7,6	7,9

Fonte: O autor.

Tabela 30 – Perda de massa (g) no ensaio de abrasão e erosão hidráulica.

	CP	350P0	350P15	400P0	450P0	450P15	450P30	500P0	548P0	548P15
Abrasão hidráulica	R1	1974	2540	2466	1592	2326	2258	2010	958	1280
	R2	1402	1512	1380	2210	1510	2602	2448	870	1064
	R3	1778	2184	1564	2556	2258	1734	2764	1472	2012
	Média	1718	2079	1803	2119	2031	2198	2407	1100	1452
Erosão hidráulica	R1	2,719	2,809	3,039	4,258	3,672	3,701	4,622	2,917	3,074
	R2	2,733	2,584	3,209	4,215	3,500	3,393	4,839	3,111	3,151
	R3	2,857	3,109	3,438	3,945	3,401	3,730	4,706	3,148	3,035
	Média	2,770	2,834	3,229	4,139	3,524	3,608	4,722	3,059	3,087

Fonte: O autor.

Tabela 31 – Resistência de aderência à tração (MPa) para as argamassas de reparo.

Amostras	350P0	350P15	400P0	450P0	450P15	450P30	500P0	548P0	548P15
R1	2,16	0,99	0,48	0,97	0,28	0,06	1,54	1,66	0,24
R2	1,89	1,28	0,66	1,26	0,45	1,40	1,48	2,28	0,25
R3	1,92	2,31	0,41	0,59	0,23	0,42	1,42	1,71	0,14
R4	1,43	0,99	0,42	1,26	0,25	1,14	1,04	2,34	0,31
R5	1,32	0,94	1,11	0,93	0,18	0,24	1,44	3,00	0,52
R6	1,53	0,81	0,24	0,76	0,11	0,27	1,20	2,18	1,76
R7	0,41	0,31	0,20	1,20	0,13	0,41	1,46	1,43	1,70
R8	2,08	0,96	1,07	0,38	0,15	1,20	0,53	2,85	0,33
R9	1,26	1,84	0,93	0,11	0,30	0,08	1,34	2,35	0,37
R10	2,10	1,19	2,65	0,37	0,64	0,16	1,41	2,25	1,10
R11	1,80	1,38	1,84	0,69	0,24	0,08	0,35	1,83	0,21
R12	1,21	0,89	1,12	0,43	0,61	0,28	0,52	1,62	1,76
R13	1,19	2,04	1,25	0,25	0,75	0,18	1,12	1,44	1,56
R14	1,34	1,39	0,51	0,37	-	-	1,18	0,93	1,12
R15	1,85	0,85	1,02	0,83	-	-	0,92	0,81	0,18
R16	1,62	0,59	1,22	0,99	-	-	1,52	1,88	0,22
R17	1,65	0,99	1,47	1,32	-	-	0,92	0,92	1,41
R18	1,85	1,10	1,90	1,35	-	-	0,43	0,78	1,19
R19	1,29	0,89	1,24	1,29	-	-	0,27	1,08	1,00
R20	1,50	0,35	2,17	1,02	-	-	1,01	1,51	0,15
R21	1,29	0,78	1,30	0,91	-	-	0,83	-	-
Média	1,56	1,09	1,11	0,82	0,33	0,45	1,04	1,74	0,78

Fonte: O autor.

Tabela 32 – Retração por secagem para as argamassas de reparo.

Argamassas de reparo	Amostras	Retração (%)				
		32 dias	39 dias	46 dias	53 dias	150 dias
350P0	R1	0,0744	0,0996	0,0695	0,0698	0,0968
	R2	0,0737	0,0730	0,0723	0,0667	0,0853
	R3	0,0628	0,0618	0,0614	0,0586	0,0730
	R4	0,0147	0,0091	0,0361	0,0060	0,0186
	R5	0,0477	0,0519	0,0670	0,0589	0,0646
	R6	0,0572	0,0579	0,0579	0,0530	0,0695
	Média	0,0551	0,0589	0,0607	0,0522	0,0680
350P15	R1	0,0551	0,0516	0,0526	0,0498	0,0646
	R2	0,0488	0,0491	0,0439	0,0516	0,0611
	R3	0,0470	0,0495	0,0502	0,0456	0,0582
	R4	0,0663	0,0663	0,0663	0,0670	0,0768
	R5	0,0526	0,0495	0,0516	0,0519	0,0649
	R6	0,0498	0,0572	0,0600	0,0498	0,0649
	Média	0,0533	0,0539	0,0541	0,0526	0,0651
450P0	R1	0,0716	0,0614	0,0618	0,0572	0,0712
	R2	0,0600	0,0607	0,0611	0,0558	0,0733
	R3	0,0719	0,1007	0,0979	0,0954	0,1182
	R4	0,0593	0,0604	0,0596	0,0551	0,0712
	R5	0,0575	0,0579	0,0575	0,0533	0,0691
	R6	0,0709	0,0709	0,0754	0,0705	0,0856
	Média	0,0652	0,0687	0,0689	0,0646	0,0815
450P15	R1	0,0607	0,0614	0,0632	0,0547	0,0712
	R2	0,0561	0,0558	0,0544	0,0516	0,0649
	R3	0,0614	0,0625	0,0614	0,0572	0,0730
	R4	0,0614	0,0618	0,0635	0,0579	0,0740
	R5	0,0600	0,0604	0,0607	0,0554	0,0709
	R6	0,0618	0,0621	0,0625	0,0565	0,0719
	Média	0,0602	0,0606	0,0609	0,0556	0,0710
548P0	R1	0,0691	0,0716	0,0709	0,1207	0,0947
	R2	0,0719	0,0786	0,0832	0,0779	0,0912
	R3	0,0705	0,0684	0,0677	0,0621	0,0811
	R4	0,0740	0,0786	0,0800	0,0758	0,0891
	R5	0,1228	0,1179	0,1179	0,1116	0,1340
	R6	0,1516	0,1547	0,1565	0,1495	0,1621
	Média	0,0933	0,0950	0,0960	0,0996	0,1087
548P15	R1	0,0779	0,0793	0,0860	0,0737	0,0891
	R2	0,0975	0,0975	0,0951	0,0726	0,0867
	R3	0,1337	0,1333	0,1347	0,1263	0,1439
	R4	0,0814	0,0860	0,0891	0,0765	0,0926
	R5	0,0796	0,0860	0,0870	0,0768	0,0933
	R6	0,0775	0,0807	0,0772	0,0726	0,0874
	Média	0,0913	0,0938	0,0949	0,0831	0,0988

Fonte: O autor.

Tabela 33 – Coeficiente de dilatação térmica linear ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).

	350P0	350P15	400P0	450P0	450P15	450P30	500P0	548P0	548P15
R1	8,79E-06	1,05E-05	1,02E-05	9,55E-06	9,78E-06	1,02E-05	9,86E-06	1,14E-05	9,10E-06
R2	9,66E-06	1,08E-05	9,78E-06	9,94E-06	1,03E-05	9,78E-06	9,94E-06	1,10E-05	1,06E-05
R3	1,05E-05	1,01E-05	9,48E-06	1,03E-05	9,63E-06	1,03E-05	1,09E-05	1,15E-05	1,21E-05
R4	9,63E-06	1,04E-05	9,78E-06	8,49E-06	1,05E-05	1,12E-05	1,22E-05	1,09E-05	9,94E-06
Média	9,66E-06	1,05E-05	9,80E-06	9,57E-06	1,01E-05	1,04E-05	1,07E-05	1,12E-05	1,04E-05

Fonte: O autor.

APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Tabela 34 – ANOVA para os ensaios experimentais.

Variável resposta	Variável controlada	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Resistência à compressão	Argamassas	8	2584,645	323,0806	209,8622	5,39E-33
	Resíduo	45	69,27701	1,539489	NA	NA
	Consumo de cimento	4	884,3225	221,0806	120,8912	5,69E-16
	Resíduo	25	45,71894	1,828758	NA	NA
	Polímero	2	185,3413	92,67064	74,10787	1,68E-08
	Resíduo	15	18,75725	1,250483	NA	NA
Resistência à tração na flexão	Argamassas	8	29,29651	3,662064	37,36719	1,16E-09
	Resíduo	18	1,764038	0,098002	NA	NA
	Consumo de cimento	4	14,30911	3,577277	39,8383	4,1E-06
	Resíduo	10	0,897949	0,089795	NA	NA
	Polímero	2	5,564331	2,782166	42,44227	2,88E-04
	Resíduo	6	0,393311	0,065552	NA	NA
Módulo de elasticidade estático	Argamassas	8	530,8271	66,35339	10,67511	1,94E-05
	Resíduo	18	111,8828	6,215709	NA	NA
	Consumo de cimento	4	97,2389	24,30973	10,26773	0,001445
	Resíduo	10	23,67584	2,367584	NA	NA
	Polímero	2	173,643	86,82148	12,50667	0,007241
	Resíduo	6	41,65208	6,942013	NA	NA
Abrasão hidráulica	Argamassas	8	3952477	494059,7	2,437695	0,055507
	Resíduo	18	3648149	202675	NA	NA
	Consumo de cimento	4	2889546	722386,4	3,969645	0,035048
	Resíduo	10	1819776	181977,6	NA	NA
	Polímero	2	37912,89	18956,44	0,089799	0,91532
	Resíduo	6	1266589	211098,2	NA	NA
Erosão hidráulica	Argamassas	8	9,900813	1,237602	48,734	1,24E-10
	Resíduo	18	0,457111	0,025395	NA	NA
	Consumo de cimento	4	8,00872	2,00218	98,13389	5,56E-08
	Resíduo	10	0,204025	0,020403	NA	NA
	Polímero	2	0,66754	0,33377	12,14156	0,007778
	Resíduo	6	0,164939	0,02749	NA	NA
Resistência de aderência	Argamassas	8	29,521	3,690125	14,39449	8,79E-16
	Resíduo	163	41,78616	0,256357	NA	NA
	Consumo de cimento	4	12,01437	3,003592	11,24675	1,46E-07
	Resíduo	99	26,43925	0,267063	NA	NA
	Polímero	2	2,303236	1,151618	8,324934	0,000839
	Resíduo	45	6,225012	0,138334	NA	NA

Variável resposta	Variável controlada	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Retração	Argamassas	5	0,008791	0,001758	3,743689	0,009422
	Resíduo	30	0,014089	0,00047	NA	NA
	Consumo de cimento	2	0,008962	0,004481	10,12923	0,000435
	Polímero	1	0,000539	0,000539	1,218362	0,278458
	Consumo de cimento*	2	0,000107	5,37E-05	0,121365	0,886143
	Polímero					
	Resíduo	30	0,013272	0,000442	NA	NA
Coeficiente de dilatação linear	Argamassas	8	9E-12	1,12E-12	2,173945	6,29E-02
	Resíduo	27	1,4E-11	5,17E-13	NA	NA
	Consumo de cimento	4	4,22E-12	1,06E-12	1,323276	0,306416
	Resíduo	15	1,2E-11	7,97E-13	NA	NA
	Polímero	2	1,3E-12	6,49E-13	1,707256	0,235184
	Resíduo	9	3,42E-12	3,8E-13	NA	NA

Fonte: O autor.

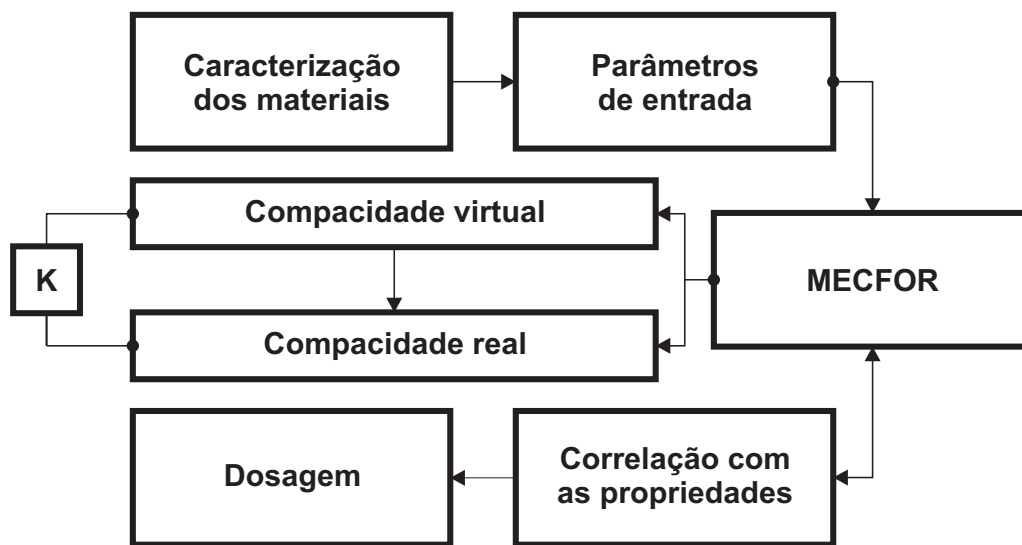
Anexos

ANEXO A – DOSAGEM POR MEIO DO MEC

A.1 SIMULADOR MECFOR

O simulador MECFOR trata-se de um *software* desenvolvido no trabalho de Formagini (2005) com base nas concepções teóricas do MEC. Dessa forma, com o MECFOR pode-se trabalhar em projetos e dosagem de materiais cimentícios, conforme o passo a passo descrito na Figura 51.

Figura 51 – Dosagem por meio do simulador MECFOR.



Fonte: Formagini (2005).

Tal como exposto na Figura 51, para o emprego do simulador MECFOR, deve-se inicialmente realizar a caracterização dos materiais elegidos para a dosagem. Os parâmetros a serem levantados para a entrada no simulador são o número de materiais, M , o número de classes dimensionais, n , de cada M material, os diâmetros mínimo d_{min} e máximo d_{max} das n classes, massa específica, compacidade real, protocolo de empacotamento K , diâmetro médio d_{med} e as frações volumétricas, y_m de cada classe (FORMAGINI, 2005). Com a entrada dos parâmetros o MECFOR organiza os diâmetros médios das classes dos m materiais, $d_{med} = \sqrt{d_{min} \times d_{max}}$ em ordem crescente. A partir disso, são calculados os parâmetros de afastamento, a_{ij} e de parede, b_{ij} .

Conforme as concepções teóricas do MEC, cada classe possui um valor particular para a compacidade virtual $\beta_{m,i}$. No entanto, para a viabilização do emprego do MECFOR, a compacidade virtual β_m , computada a partir da compacidade real, C_m , é generalizada para todas as classes do material. Por exemplo, a compacidade real do cimento que pode resultar num valor de $C_{cim} = 0,600$ no ensaio de demanda de água, vale como compacidade real de todas as n classes dimensionais do cimento, ou seja $\beta_{cim} = \beta_{cim,i}$.

Antes da iteração que busca a menor compacidade, O MECFOR permite a con-

figuração das frações volumétricas de cada material, p_k , havendo a possibilidade de delimitar uma faixa limite para cada p_k . Para a adequada determinação dos limites de variação, pode-se executar as simulações em paralelo com a verificação das propriedades da mistura originada. Esta constatação é feita por meio da correlação da “mistura simulada” com as propriedades no estado fresco ou endurecido.

Durante a execução da simulação, para o caso de uma mistura com M materiais e N classes, o cálculo dos valores de compacidade é executado de maneira iterativa, de modo a satisfazer a Equação (A.1).

$$\gamma^{(m,i)} = \frac{\beta_{mi}}{1 - \sum_{k=1}^M \left[\sum_{j=1}^i \left[1 - \beta_{mi} + b_{ij} \beta_{mi} \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] p_k y_{kj} + \sum_{j=i+1}^N \left[1 - a_{ij} \frac{\beta_{mi}}{\beta_{kj}} \right] p_k y_{kj} \right]} \quad (\text{A.1})$$

em que i é a classe, m é o material granular, $\gamma^{(m,i)}$ é a compacidade virtual a mistura composta por M materiais compostos por N classes cada um β_{mi} é a compacidade virtual da classe i do material m e y_{kj} é a fração volumétrica da classe i do material m . A compacidade real (ϕ) para a mesma condição de um material cimentício com M materiais compostos por N classes é obtida, implicitamente, pela Equação (A.2).

$$f(\phi) = \sum_{i=1}^M \frac{\sum_{m=1}^M \frac{p_m y_{mi}}{\beta_{mi}}}{\frac{1}{\phi} - \frac{1}{\gamma^{(i)}}} - K = 0 \quad (\text{A.2})$$

O MECFOR modifica os valores de p_m dentro da faixa delimitada pelo usuário. Neste processo, as frações volumétricas das n classes dos m materiais, y_{kj} , permanecem fiéis aos seus valores de entrada, pois caso contrário, o simulador estaria alterando a granulometria dos materiais.

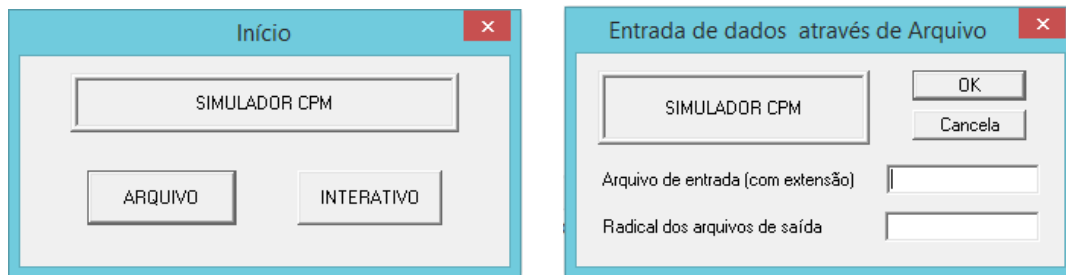
O uso das frações volumétricas (porcentagem retida) fixadas no MECFOR, permite a dosagem de um material cimentício com melhor viabilidade prática em relação às curvas originadas pelos modelos analíticos. O fornecimento da mistura com maior compacidade sem a modificação das frações volumétricas das classes, permite o uso dos materiais sem a necessidade de peneiramentos para ajustes dimensionais no esqueleto granular final.

O algoritmo do MECFOR, que resume a descrição deste subitem, foi implementado em linguagem Fortran para a criação do simulador. As rotinas e subrotinas empregadas na implementação, assim como o passo a passo lógico de cálculo, podem ser conferidos no trabalho de Formagini (2005).

A.1.1 Entrada e saída de dados do MECFOR

O mecanismo de entrada de dados do MECFOR se dá por meio da organização dos parâmetros em um arquivo de texto, de extensão “.txt”. Executando o *software*, este apresenta uma caixa de diálogo na qual deve-se informar o nome do arquivo de texto que contém os parâmetros de entrada. Além disso, deve-se configurar um nome para os arquivos de saída. A inicialização do MECFOR pode está disposto na Figura 52.

Figura 52 – Entrada simulador MECFOR.



Fonte: O autor.

No arquivo de entrada, ilustrado na Figura 53, deve inicialmente configurar as informações referentes ao número de materiais e número de classes granulométricas. Esses valores dependem do tipo de material a ser dosado e também da faixa de leitura no ensaio de granulometria. Formagini (2005) denominou estes parâmetros como variáveis principais, exemplificadas na Figura 54. Da mesma forma, também deve ser informado as variáveis lógicas do tipo “true” of “false”, que estão relacionadas com a execução das subrotinas do algoritmo apresentado em Formagini (2005).

Figura 53 – Exemplo de arquivo de entrada no MECFOR.

```

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
5.0 5.0 0.0 0.0
t t t

Sílica_At 2.0 2200 0.391 6.7 1 1.0 1.0
Filer_calc 3.0 2712 0.737 6.7 1 1.0 10.0
Cimento_P 1.0 2970 0.616 6.7 1 1.0 20.0
Areia_nat 3.0 2663 0.654 9.0 2 1.0 150.0
Areia_brit 3.0 2632 0.667 9.0 2 1.0 650.0

1.000 1.250 100. 0.00 0.00 0.00 0.00
10.00 12.5 0.00 100. 0.00 0.00 0.00
100.0 125.0 0.00 0.00 100. 0.00 0.00
1200.0 2400.0 0.00 0.00 0.00 100. 0.00
2400.0 4800.0 0.00 0.00 0.00 0.00 100.

0.0001 0.9999 0.2000
0.0001 0.9999 0.2000
0.0001 0.9999 0.2000
0.0001 0.9999 0.2000
0.0001 0.9999 0.2000

6.7 9.0 1.0 1.0 47.8 190.0 3.0

2.0

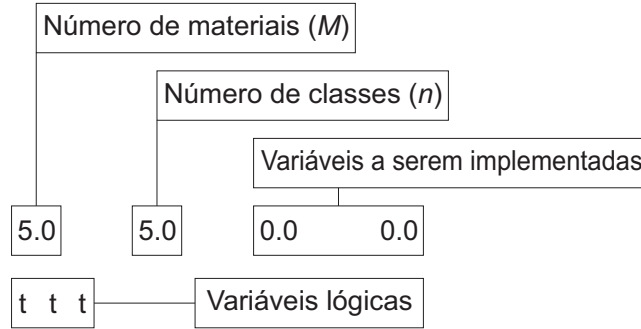
20.0 20.0 20.0 20.0 20.0
7.0 9.0 1.0 1.0 47.8 190.0 3.0

0.0 0.0 20.0 0.0 20.0
7.0 9.0 1.0 1.0 47.8 190.0 3.0

```

Fonte: O autor.

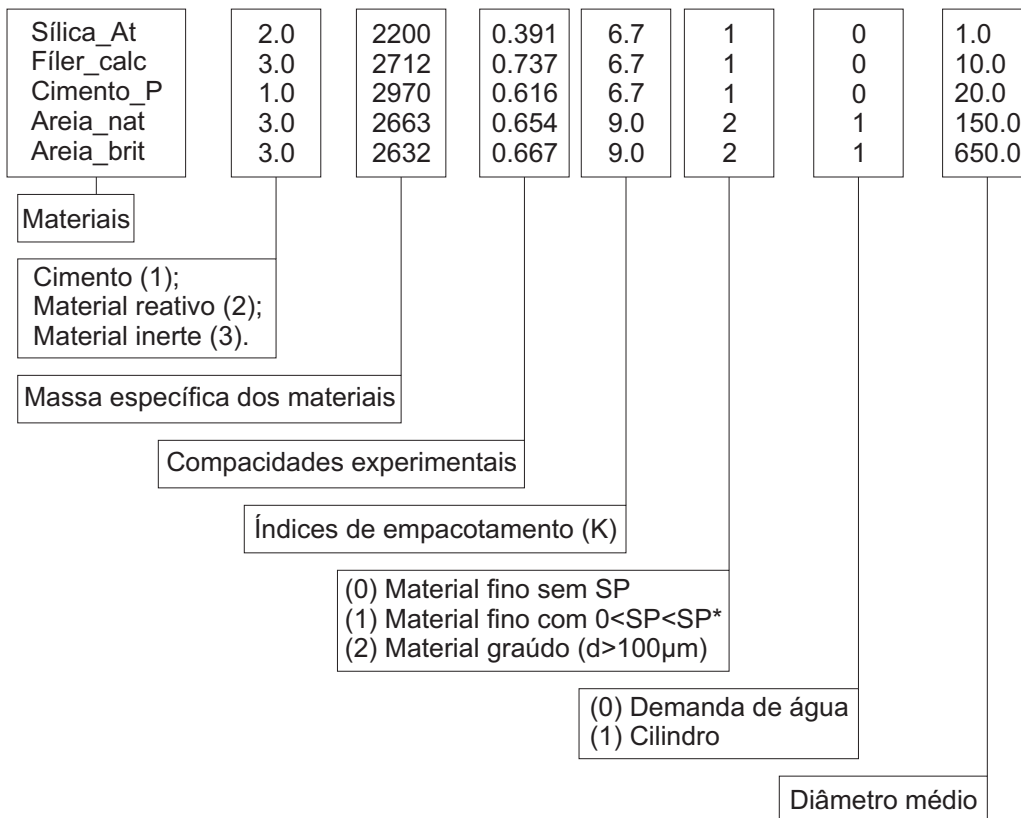
Figura 54 – Variáveis principais e variáveis lógicas.



Fonte: Formagini (2005).

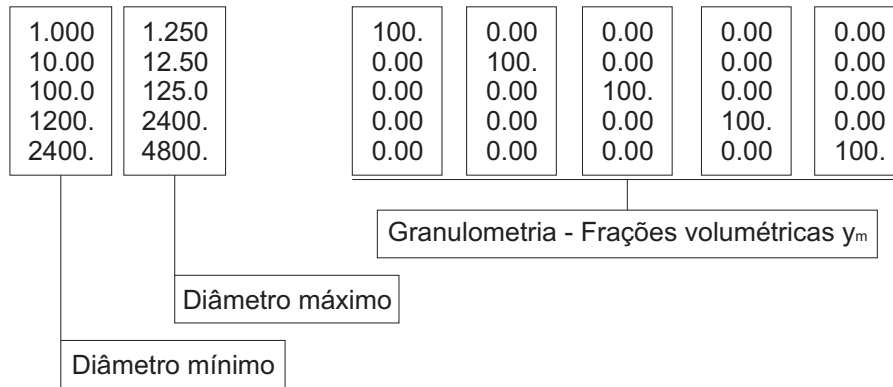
O próximo passo é a inclusão das propriedades dos materiais. No exemplo da Figura 53 foram listados cinco materiais e seus respectivos parâmetros. A Figura 55 mostra a relação de cada coluna do arquivo com a sua correspondente propriedade de entrada. Na Figura 56 estão indicadas as colunas referentes à curva granulométrica dos materiais, com possibilidade de inserção do diâmetro mínimo e máximo bem como a porcentagem retida neste intervalo.

Figura 55 – Propriedades dos materiais.



Fonte: Formagini (2005).

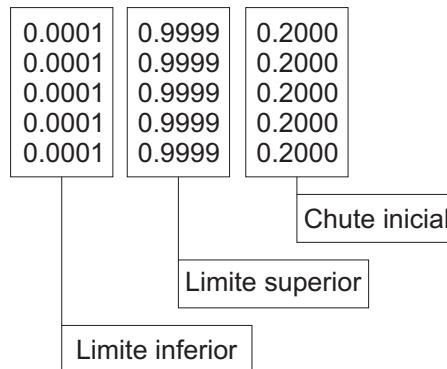
Figura 56 – Frações volumétricas de cada classe, y_m , delimitadas pelos diâmetros mínimo e máximo.



Fonte: Formagini (2005).

A configuração da quantidade volumétrica de cada material, p_m , pode ser realizada por meio das colunas mostradas na Figura 57. Elas dão a possibilidade de trabalhar com um limite inferior (LI) e superior (LS). Com a delimitação dos limites, o simulador busca valores que promovam a máxima compacidade da mistura granular a partir de um valor inicial.

Figura 57 – Faixa das frações volumétricas, p_m , de cada material.




Fonte: Formagini (2005).

Os demais valores apresentados na Figura 53 estão destinados à escrita de misturas de interesse na dosagem. O MECFOR calcula a compacidade dessas misturas, dando ao usuário a possibilidade de comparar os resultados da mistura simulada com estas misturas dadas.

Após a simulação, o MECFOR retorna quatro arquivos de saída. O arquivo com extensão “.dat” contém os cálculos intermediários. O arquivo “.otm” imprime o resultado da mistura simulada, o “.pro” exibe os resultados para as misturas dadas e o “.bin” traz os valores de compacidade das misturas binárias possíveis a partir da combinação dos materiais empregados ((FORMAGINI, 2005)). Um exemplo para o resultado de uma simulação no MECFOR pode ser conferido na Figura 58.

Figura 58 – Exemplo de arquivo de saída “.pro” no MECFOR.



MISTURA OTIMIZADA			
C	C(K=9)	Gama	S
0.75257	0.78979	0.88665	0.24743

Proporções

Mat.: Areia_brit	Vol.=	0.000000
Mat.: Areia_nat	Vol.=	0.658281
Mat.: Cimento_P	Vol.=	0.133000
Mat.: Filer_calc	Vol.=	0.139719
Mat.: Silica_At	Vol.=	0.069000

Fonte: O autor.

A cada simulação resultante, tal como a exibida na Figura 58, deve-se correlacionar o resultado do MECFOR com as propriedades da mistura no estado fresco e endurecido. Dessa forma, o usuário pode buscar o tipo de material cimentício desejado por meio da alteração do LI, LF e os valores iniciais do arquivo de entrada, e da conferência das propriedades resultantes com o emprego das formulações apresentadas no subitem a seguir.

A.2 CORRELAÇÃO DO MEC COM AS PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

O MEC desenvolvido por de Larrard (1999) não traz apenas as formulações para a predição da densidade de empacotamento de misturas secas. Diferentemente dos demais modelos, o MEC é um método de dosagem e não apenas uma formulação para cálculo da compacidade. Assim, esse método também proporciona a correlação das propriedades do material no estado fresco e endurecido.

Na atual pesquisa, por se tratar da dosagem de uma argamassa para reparo, serão apresentadas as formulações para predição da resistência à compressão e módulo de elasticidade. Os demais equacionamentos empíricos para estudo das propriedades do material dosado, podem ser conferidos nos trabalhos de de Larrard (1999), Formagini (2005) e Gomes e Barros (2009).

A.2.1 Resistência à compressão

O volume e a máxima dimensão dos agregados graúdos também afetam a resistência à compressão do concreto. A distância média entre os agregados, MEP , imersos na matriz leva em conta estes dois efeitos. A Equação A.3 indica a formulação da distância média entre os agregados.

$$MEP = D_{ag} \left[\sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right] \quad (A.3)$$

em que D_{ag} é o valor da máxima dimensão do agregado, g é o volume de agregados em um volume unitário de concreto, g^* equivale à compacidade real dos agregados mediante um índice de compactação $K=9$.

Dessa forma, o cálculo da resistência à compressão do concreto aos 28 dias, considerando a resistência à compressão da pasta de cimento, R_c , concentração de cimento na pasta no estado fresco, efeitos da MEP, aderência entre a pasta e o agregado e a resistência do agregado, é dado pelas equações (A.4) e (A.5).

$$f_{cm} = \alpha R_c \left[\frac{\nu_c}{\nu_c + \nu_w \nu_{ar}} \right]^{c_1} MEP^{-0,13} \quad (\text{A.4})$$

$$f_c = \frac{\rho f_{cm}}{q f_{cm} + 1} \quad (\text{A.5})$$

em que $\alpha=11,4$, $c_1=2,85$, f_c é a resistência à compressão do concreto (MPa) aos 28 dias. Já os parâmetros p e q dependem do tipo de agregado e podem ser obtidos de acordo com as equações (A.6) e (A.7).

$$p = \frac{1}{f_{cm} \left(\frac{1}{f_c} - \frac{1}{2,14 f_{c_g}} \right)} \quad (\text{A.6})$$

$$q = \frac{p}{2,14 f_{c_g}} \quad (\text{A.7})$$

em que f_{c_g} corresponde à compressão do agregado.

A.2.2 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do concreto depende diretamente dos módulos de elasticidade dos agregados e da matriz (FORMAGINI, 2005). de Larrard (1999) idealizou o modelo de tríplice-esfera a partir do trabalho de Hashin (1962 apud FORMAGINI, 2005)¹ para o cálculo do módulo de elasticidade tangente, descrito na Equação (A.8).

$$E = \left[1 + 2g \frac{E_g^2 E_m^2}{(g^* - g) E_g + 2(2 - g^*) E_g E_m} + (g^* + g) E_m^2 \right] E_m \quad (\text{A.8})$$

em que E_g é o módulo de elasticidade do agregado, E_m é o módulo de elasticidade da matriz, dado como na Equação (A.9).

$$E_m = 226 f_c \quad (\text{A.9})$$

com desvio médio de 1,4 MPa, segundo de Larrard (1999).

¹HASHIN, Z. The elastic modulus of hetero-homogeneous materials. **J. of App. Mech.**, v. 29, n. 1, p. 143–150, 1962.