



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

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

AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE AUTOCICATRIZAÇÃO DE ARGAMASSAS ESPECIAIS
CONTENDO ADIÇÕES POZOLÂNICAS E AGENTES BIOLÓGICOS INCORPORADOS EM
CASCA DE ARROZ

AMANDA LUIZA ZOTTIS

Foz do Iguaçu

2023



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

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

AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE AUTOCICATRIZAÇÃO EM ARGAMASSAS ESPECIAIS
CONTENDO ADIÇÕES POZOLÂNICAS E AGENTES BIOLÓGICOS INCORPORADOS EM
CASCA DE ARROZ

AMANDA LUIZA ZOTTIS

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 Mestra em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Edna Possan

Orientadora: Prof. Dra. Nicole Hasparyk

Foz do Iguaçu

2023

AMANDA LUIZA ZOTTIS

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE AUTOCICATRIZAÇÃO EM ARGAMASSAS ESPECIAIS
CONTENDO ADIÇÕES POZOLÂNICAS E AGENTES BIOLÓGICOS INCORPORADOS EM
CASCA DE ARROZ**

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 Mestra em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Prof. Dra. Edna Possan
UNILA

Orientadora: Dra. Nicole Pagan Hasparyk
ELETROBRAS Furnas

Prof. Dr. Romildo Toledo Filho
UFRJ

Prof. Dra. Ana Carolina Parapinski dos Santos
UNILA

Foz do Iguaçu, 02 de junho de 2023.

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

Z89

Zottis, Amanda Luiza.

Avaliação da capacidade de autocicatrização de argamassas especiais contendo adições pozolânicas e agentes biológicos incorporados em casca de arroz / Amanda Luiza Zottis. - Foz do Iguaçu, 2023.

129 f.: il., color.

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, 2023.

Orientadoras: Profa. Dra. Edna Possan

Profa. Dra. Nicole Pagan Hasparyk

1. Self-healing. 2. Aditivos Minerais Autocicatrizantes. 3. Bacillus sp. 4. Recuperação de fissuras. 5. Casca de arroz in natura. 6. Resíduos agroindustriais. I. Possan, Profa. Dra. Edna. II. Hasparyk, Profa. Dra. Nicole Pagan. II. Título.

CDU 691

AGRADECIMENTOS

São tantas pessoas e organizações a quem devo agradecer. Primeiramente, quero agradecer a Deus por atender a todas as preces que faço pedindo o discernimento e a coragem de seguir em frente e em novos caminhos. Também por me manter otimista e com saúde para concluir esta caminhada.

Agradeço aos meus amados pais, Marli e Ademir. Mãe, grande parcela do meu otimismo e força vem de você. Obrigada pelo seu amor sem fim, pelo seu apoio, incentivo e por permitir que o canto da mesa da cozinha virasse meu escritório aos finais de semana e às noites. Pai, obrigada por me mostrar que para tudo dá-se um jeito, pelas fôrmas de PVC cortadas, pelo amparo financeiro às minhas idas à Foz e pelas ideias sobre os resíduos agroindustriais que trocamos durante o chimarrão que faz parte de sua vivência na prática. Eu tenho muito orgulho de ser filha de vocês. Vocês são demais! Aqui estendo à minha irmã Gabi e ao meu cunhado Vini. Obrigada pela paciência e apoio. Amo todos vocês.

Às minhas orientadoras brilhantes. Edna, saiba que decidi entrar neste mestrado depois de um curso online que fiz contigo. O conhecimento parece uma diversão advindo de você, você encanta ensinando, é brilhante no que faz e me inspira em ser uma mulher melhor, mais sábia e mais questionadora. Obrigada por todos os conselhos técnicos, pessoais, amorosos e de vida. Nicole, quando soube que seria também minha orientadora, não imaginava a dimensão da profissional que iria me acompanhar. Obrigada pela busca da excelência em cada frase, em cada ideia e conversa. Você é brilhante em suas pesquisas e análises, e passa esse amor pela ciência a nós orientados.

Às minhas amigas do mestrado e da vida, Rafa e Thaís. O mestrado ficou muito mais divertido e leve por ter a cia, os conselhos, os desabafos e apoio de vocês. Também às minhas pupilas Gabi, Natália, Thamires, TÁCila e Juliana por me ajudarem em toda a pesquisa no árduo trabalho de laboratório.

À Solanda Oliveira, Carlos Rampanelli, Rodrigo Melo, Eduardo Rigo, Cristiano Cavalcante, por toda a ajuda, consultorias e ensinamentos passados.

À Sabor Sul por me doar gentilmente 3 sacos de casca de arroz *in natura*. À Coneresuper de Cascavel, por me doar as fibras de polipropileno. À Penetron por me doar o aditivo mineralizante.

Aos técnicos do laboratório da UNILA, Dalila, Wagner Peixoto, Wagner, Luciano, Andrey e Caio. E à UNILA e ao PPGECl pelo auxílio concedido para apoio nas viagens necessárias para realização da pesquisa.

Ao professor Michel que muito gentilmente me ensinou e acompanhou todo o processo de crescimento das bactérias. Também à técnica Gisele e ao Gilson que me ajudaram em todas as dúvidas do laboratório de microbiologia.

À ITAIPU BINACIONAL e à ELETROBRAS Furnas pela colaboração para os ensaios da pesquisa.

Ao Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens (CEASB), à União Dinâmica de Faculdades Cataratas (UDC) e à Universidade Tecnológica do Paraná – Toledo (UTFPR) pelo empréstimo de equipamentos.

A todos, o meu muito obrigada.

*“Conheça todas as teorias,
domine todas as técnicas, mas
ao tocar uma alma humana,
seja apenas outra alma
humana.”*

(Carl Jung)

RESUMO

A autocicatrização se apresenta como uma solução tecnológica inovadora e sustentável em compósitos cimentícios, bem como frente aos processos de fissuração. Ainda que a autocicatrização autógena ocorra naturalmente, uma maneira de aprimorar este processo é adicionando ao proporcionamento materiais minerais, fibras poliméricas ou biomateriais que contribuam para a autocicatrização autônoma de fissuras da matriz cimentícia ao longo do tempo. Neste cenário, a proposta desta pesquisa é avaliar o potencial de autocicatrização de argamassas especiais com e sem a incorporação de agentes biológicos, aditivo autocicatrizante e casca de arroz (CA) *in natura*, para aplicações em reparos superficiais, proteção mecânica em lajes, enchimento, dentre outros. Foi produzida uma argamassa de referência (MR_{EF}) com relação a/c de 0,40, cimento Portland CPV-ARI (400 kg/m³), sílica ativa (10%), cinza volante (25%), areia natural quartzosa, aditivo superplastificante (0,7% em massa de aglomerante) e fibra de polipropileno (1,4 kg/m³). A partir deste, foram proporcionadas quatro misturas, sendo uma com a incorporação de bactérias *Bacillus subtilis* AP91 (MB) e outra com aditivo mineral autocicatrizante (MM_{AD}) disponível no mercado. Duas argamassas foram produzidas bactérias *Bacillus subtilis* AP91 incorporadas à casca de arroz (CA), nos teores de 1% (MB_{RH1}) e 5% (MB_{RH5}) em substituição à areia natural, em volume. O potencial de autocicatrização e o desempenho das argamassas em estudo foram avaliados ao longo do tempo por meio de inspeção visual, ensaios físicos (ultrassom), mecânicos (ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão e análise microscópica de imagem (microscopia óptica), em amostras previamente fissuradas e não fissuradas. Observou-se que os agentes autocicatrizantes, tanto biológicos quanto minerais, possuem atuação positiva na matriz à base de cimento, promovendo o fechamento parcial de fissuras com abertura inferior a 0,25 mm. Ainda, as argamassas com CA obtiveram grande incremento de resistências mecânicas ao longo do tempo, obtendo aos 120 dias resultados semelhantes às demais, sem bio-agregados. O potencial de autocicatrização por agentes biológicos é promissor, ambientalmente correto, sendo necessários estudos complementares que envolvem variáveis de cura, nutrientes, bem como avanços na metodologia de incorporação das bactérias à casca de arroz e matriz cimentícia para que seja possível torná-las práticas na construção.

Palavras-chave: *Self-healing*. Aditivos Minerais Autocicatrizantes. *Bacillus* sp. Recuperação de fissuras. Casca de Arroz *in natura*. Resíduos agroindustriais.

ABSTRACT

Self-healing is an innovative and sustainable technological solution for cementitious composites and cracking processes. Although autogenous self-healing occurs naturally, one way to improve it is by adding mineral materials, polymeric fibers, or biomaterials to the proportioning that may contribute to cracks' autonomous self-healing in the cementitious matrix over time. This study aimed to evaluate the self-healing potential of special mortars with and without incorporating biological agents, self-healing additives, and *in natura* rice husk (RH) for their use in surface repairs, slab mechanical protection, and filling, among others. A reference mortar (MR_{EF}) was produced with a 0.40 w/c ratio, CPV-ARI Portland cement (400 kg/m³), active silica (10%), fly ash (25%), natural quartz sand, superplasticizer additive (0.7% by binder mass) and polypropylene fiber (1.4 kg/m³). Four mortars were produced, one with *Bacillus subtilis* AP91 bacteria (MB), one with a self-curing mineral additive (MM_{AD}) available on the market, and two mortars were produced with *Bacillus subtilis* AP91 bacteria incorporated into rice husk (RH) at 1% (MB_{RH1}) and 5% (MB_{RH5}), replacing natural sand by volume. The self-healing potential and performance of the mortars under study were assessed by visual inspection, physical tests (ultrasound), mechanical tests (flexural and compressive tensile strength tests), and microscopic image analysis (optical microscopy) over time on previously cracked and non-cracked samples. It was noted that the biological and mineral self-curing agents positively affected the cement-based matrix, partially closing the cracks with openings smaller than 0.25 mm. In addition, the mortars with RH significantly increased mechanical strength over time, obtaining results similar to those without bio aggregates at 120 days. The potential for self-healing by biological agents is promising and environmentally friendly. However, further studies on curing variables, nutrients, and advances in the methodology for incorporating bacteria into rice husk and cementitious matrix are needed for its feasibility in construction.

Keywords: Self-healing. Self-healing mineral additives. *Bacillus sp.* Crack recovery. *In natura* rice husk. Agro-industrial waste.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Observação de vazamento de água pelas fissuras durante o teste de permeabilidade à água – (a-c) controle de fissuras não tratadas, (d, e) fissuras tratadas com o sistema de reparo à base de bactérias	8
Figura 2: Tanque de água com 47 metros de comprimento, 5,5 metros de largura e 5 metros de altura, com duas paredes construídas com concreto simples, e duas construídas com a adição do <i>Basilisk Healing Agent</i>	9
Figura 3: Laje de fechamento de um poço de inspeção de drenagem, executada com a aplicação de agentes bacterianos autocicatrizantes, para promover a autocicatrização de fissuras, haja vista a alta condensação de água em sua superfície.	10
Figura 4: Custos e emissões de CO ₂ por (a) m ³ e por (b) MPa.....	13
Figura 5: Retração por secagem dos concretos (valores médios)	22
Figura 6: Microestrutura da CA por elétrons secundários: (a) superficial (b) porção interna	23
Figura 7: Micrografia de fissura em concreto reforçado com fibra polimérica indicando o efeito “ponte” das fibras.....	27
Figura 8: Mecanismos de autorregeneração do concreto (naturais, biológicos e químicos)	33
Figura 9: Evolução da resistência no tempo para diferentes tipos de Cimento Portland, sendo (I) puro, (II) Com escória, pozolana ou cinza volante, (III) Composto com escória de alto-forno, (IV) Composto com pozolanas (V) Resistente a sulfatos	34
Figura 10: Índice de autocicatrização da fissura para concretos com (a) e sem (b) aditivo cristalino, em função da abertura da fissura e do tempo de exposição.....	39
Figura 11: Estrutura das bactérias e mecanismos da autocicatrização (a) estrutura das bactérias (b) células carregadas negativamente (c) produção biomineral pelos íons.....	42
Figura 12: Fluxograma das etapas do programa experimental	45
Figura 13: Granulometria por difração à laser do cimento CPV-ARI, sílica ativa e cinza volante	46
Figura 14: Análise termogravimétrica dos materiais cimento CPV-ARI, sílica ativa e cinza volante das curvas (a) TG e (b) DTG.....	47

Figura 15: Casca de arroz <i>in natura</i> com ampliação em (a) 3x e (b) 5x.....	49
Figura 16: Ensaio de absorção de água do bio-agregado CA composto por a) Conjunto sache + CA b) Conjunto submerso em água c) Conjunto na centrífuga manual para secagem	50
Figura 17: Absorção de água da casca de arroz <i>in natura</i> em função do tempo.....	51
Figura 18: Análise termogravimétrica da Casca de Arroz <i>in natura</i> lavada	51
Figura 19: Reativação de <i>Bacillus subtilis</i> AP91 em estrias de esgotamento no meio ágar- nutriente.....	52
Figura 20: Conjunto de Erlenmeyers com a solução líquida MH para o crescimento das bactérias	53
Figura 21: Visualização da formação de esporos pelo formato e coloração roxa	53
Figura 22: Recipiente contendo: casca de arroz <i>in natura</i> , solução bacteriana e nutrientes EL e LC, após 1 hora de imersão em água.....	54
Figura 23: Caixa de umidade relativa constante para cura úmida	57
Figura 24: (a) Dispositivo de controle de abertura de fissuras em amostras de argamassa (b) posicionado na prensa hidráulica.....	58
Figura 25: Método de fissuração com controle de abertura de fissuras (a) Dispositivo (b) Posicionamento dos apoios direcionados paralelamente ao prisma	58
Figura 26: Amostra fissurada com abertura particionada em trechos de comprimento 5 mm	60
Figura 27: Posicionamento dos transdutores na amostra em posição de transmissão direta de ondas ultrassônicas	61
Figura 28: Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em amostras íntegras e fissuradas com o efeito da adição de (a) agente autocicatrizante e (b) casca de arroz.....	64
Figura 29: Resistência à (a) compressão e à (b) tração na flexão das argamassas especiais íntegras sem <i>Bacillus subtilis</i> AP91 e os nutrientes EL e LC (MR_{EF} e MM_{AD}), com bactérias e nutrientes (MB , MB_{RH1} e MB_{RH5}).....	67
Figura 30: Massa Específica e Índice de Vazios apartir do ensaio NBR 9778:2005	68
Figura 31: Efeito do agente autocicatrizante ao longo do tempo (em dias) na resistência a) à compressão e b) à tração na flexão.....	71

Figura 32: Correlação entre as resistências à compressão (em amostras íntegras) e o módulo de elasticidade dinâmico para as amostras íntegras e fissuradas (a) MR_{EF} , (b) MM_{AD} e (c) MB, ao longo do tempo.....	72
Figura 33: Efeito da casca de arroz (CA), adicionada em substituição ao volume do agregado miúdo, ao longo do tempo na resistência à a) compressão e à b) tração na flexão.....	75
Figura 34: Correlação entre as resistências à compressão (em amostras íntegras) e o módulo de elasticidade dinâmico, ao longo do tempo, para as amostras íntegras e fissuradas (a) MB, (b) MB_{RH1} e (c) MB_{RH5}	77
Figura 35: Fechamentos lineares e pontuais em diferentes trechos da amostra da MM_{AD} , com a idade expressa em dias após à abertura da fissura	80
Figura 36: Fechamentos pontuais em diferentes trechos da amostra da MB, com a idade expressa em dias após à abertura da fissura	81
Figura 37: Imagens de trechos aleatórios das amostras de MR_{ef} , MB_{RH1} e MB_{RH5}	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Cimentos normatizados segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018)	11
Tabela 2: Classificação de Materiais Pozolânicos pela (ABNT, 2014)	14
Tabela 3: Exigências Físicas e Químicas das classes de Material Pozolânico	14
Tabela 4: Propriedades químicas e físicas do cimento e das adições minerais	46
Tabela 5: Propriedades físicas da areia natural.....	48
Tabela 6: Propriedades da fibra de polipropileno	48
Tabela 7: Propriedades do aditivo superplastificante	48
Tabela 8: Propriedades químicas da casca de arroz <i>in natura</i> por FRX	51
Tabela 9: Nomenclatura das argamassas utilizadas.....	55
Tabela 10: Proporcionamento das Argamassas em kg/m ³	56
Tabela 11: Ensaios realizados, formato e quantidade de CPs	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Casca de arroz
CV	Cinza volante
SA	Sílica ativa
a/c	Relação água/cimento
Ca ²⁺	Íons de cálcio
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
CH	Hidróxido de cálcio (Forma abreviada do Ca(OH) ₂)
CP	Cimento Portland
E _d	Módulo de elasticidade dinâmico
EL	Extrato de Levedura
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
LADEMA	Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais
LC	Lactato de Cálcio
LTCI	Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MH	<i>Mueller Hinton</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	4
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
2 ARGAMASSAS ESPECIAIS	6
2.1 TIPOS DE ARGAMASSAS	6
2.2 MATERIAIS EMPREGADOS EM ARGAMASSAS autocicatrizantes	10
2.2.1 Cimento e Materiais Cimentícios Suplementares	10
2.2.2 Agregados	17
2.2.2.1 Minerais e reciclados	17
2.2.2.2 Bio-agregados	19
2.2.2.3 Bio-agregado de Casca de Arroz	20
2.2.3 Fibras Poliméricas	26
2.2.4 Água e Aditivos	28
3 AUTOCICATRIZAÇÃO EM MATERIAIS À BASE DE CIMENTO	32
3.1 PROCESSO AUTÓGENO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS	34
3.2 AUTOCICATRIZAÇÃO POR AGENTES QUÍMICOS	36
3.3 AUTOCICATRIZAÇÃO POR AGENTES BIOLÓGICOS	40
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL	45
4.1 MATERIAIS	45
4.2 PREPARO DOS ESPOROS BACTERIANOS	52
4.3 INCORPORAÇÃO DAS BACTÉRIAS	54
4.4 PREPARO DE ARGAMASSAS	55
4.5 FISSURAÇÃO DAS ARGAMASSAS	57
4.6 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS ESPECIAIS	59

	9
4.6.1 Análise de Imagem do Fechamento das Fissuras	60
4.6.2 Velocidade de propagação de ondas ultrassônica e Módulo de Elasticidade	61
4.6.3 Análise das Propriedades Mecânicas	62
4.7 ANÁLISE ESTaTÍSTICA	63
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
5.1 ANÁLISE DA AUTOCICATRIZAÇÃO PELA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS	64
5.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS	66
5.2.1 Avaliação do Efeito da Adição de Agentes Autocicatrizantes	70
5.1.2 Avaliação do Efeito da Adição de Casca de Arroz	74
5.2 AVALIAÇÃO VISUAL	79
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
6.1 CONCLUSÕES	85
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	87
REFERÊNCIAS	88
APÊNDICES	100
APÊNDICE A – Caracterização de Agregados	100
APÊNDICE B – Caracterização de Aglomerantes e Fibra	102
APÊNDICE C – Resistências Mecânicas	103
APÊNDICE D – Velocidades de Propagação de Ondas e Módulo de Elasticidade Dinâmico	104
APÊNDICE E – Análises Estatísticas	105

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia dos compósitos cimentícios tem evoluído consideravelmente nas últimas décadas, impulsionada pela disponibilidade de novos materiais fornecidos pela indústria da construção, como cimentos, aditivos e fibras. Porém, a busca por alternativas mais atrativas do ponto da sustentabilidade faz-se necessária, e a utilização de materiais locais pode ser uma alternativa para reduzir o impacto ambiental. Além disso, é fundamental que sejam adotadas medidas para garantir a durabilidade desses compósitos a fim de prolongar a vida útil de sistemas construtivos em argamassa e concreto.

Argamassas convencionais ao longo do ciclo de vida podem experimentar problemas de durabilidade, especialmente fissuração, ocasionados por retração hidráulica (BOMEDIANO; GOMES; FONTANINI, 2020), bem como impacto ou carregamento cíclico, carregamento estrutural excessivo por sobrecarga, variação de volume decorrente de gradientes de temperatura e umidade, pressão de cristalização de sais nos poros, e exposição a temperaturas extremas como ciclos de gelo-degelo ou fogo (MEHTA e MONTEIRO, 2014). O concreto, também pode apresentar defeitos e danos decorrentes de carga externa adicional, ambiente de exposição e reações químicas do cimento (POSSAN et al, 2018, SILVA et al., 2021), que aliado à sua baixa resistência à tração, o torna sujeito a fissuras e deterioração ao longo do tempo (ANGLANI; TULLIANI; ANTONACI, 2020), além de deterioração por outros fenômenos patológicos, como as reações expansivas e/ou químicas (HASPARYK; KUPERMAN, 2019). O mecanismo da fissuração é altamente indesejável em materiais a base de cimento visto que facilita a entrada de água e outras substâncias deletérias, levando à corrosão do aço e perda de propriedades mecânicas (KRISHNAPRIYA; VENKATESHBABU; PRINCE ARULRAJ, 2015). Frente a isso, é de suma importância o desenvolvimento de técnicas e materiais que mitiguem os processos degenerativos relacionados à fissuração em sistemas construtivos cimentícios (ROIG-FLORES; FORMAGINI; SERNA, 2021), com capacidade de reestabelecer o desempenho, melhorar a estética e aumentar a durabilidade ao longo dos anos (CAPELESSO, 2023; KUDLANVEC JUNIOR, 2017).

Devido às reações químicas tardias, as adições minerais assim como o cimento Portland têm a capacidade da autocura de microfissuras na matriz endurecida, pelo

fenômeno de autocicatrização autógena (DE BELIE et al., 2018). Dependendo do tipo, pozolanas empregadas em misturas cimentícias possuem reações mais tardias na pasta, visto que a sua interação química envolve alguns dos produtos de hidratação do cimento Portland (MCCARTHY; DYER, 2019). A adição de cinza volante - resíduo de centrais de energia - promove em idades avançadas a redução da permeabilidade e o aumento da resistência da pasta cimentícia, quando comparada à uma pasta de mesma relação a/c com cimento puro, sendo, para tanto, essencial a cura prolongada nessas matrizes. Por sua vez, a adição de sílica ativa – resíduo de indústrias siderúrgicas - melhora a coesão da mistura, reduz a exsudação e a permeabilidade da pasta e a densifica, devido ao seu diâmetro ser 100 vezes inferior ao do cimento Portland (NEVILLE, 2016). Tais características, aliadas à redução da emissão de CO₂ fazem com que essas adições, ao serem incorporadas em substituição ao clínquer, tragam propriedades benéficas à durabilidade de concretos e argamassas (KENAI et al., 2020).

Além do processo intrínseco (autógeno), existem outras maneiras de minimizar e/ou corrigir a fissuração em materiais à base de cimento, garantindo maior durabilidade e resistência aos materiais. Entre elas, Roig-Flores, Formagini, Serna (2021) destacam o uso de polímeros superabsorventes, misturas cristalinas, silicato de sódio microencapsulado, tubos com adesivos e bactérias.

Embora a maioria dos agentes de cura aplicados sejam de base mineral e química (TAKAGI et al., 2018; FERRARA e KRELANI, 2013; ZIEGLER et al., 2020) já existentes no mercado, são crescentes os estudos em cima dos agentes biológicos (KRISHNAPRIYA; VENKATESHBABU; PRINCE ARULRAJ, 2015; BERGH et al., 2020; SCHWANTES-CEZARIO et al., 2022), que promovem a autocicatrização autônoma da matriz cimentícia. Em comparação com técnicas tradicionais de preenchimento de poros e fissuras por CaCO₃ (Krishnapriya et al., 2015), a remediação bacteriana se destaca por ser de base biológica, ecologicamente correta, econômica e durável (SCHWANTES-CEZARIO et al., 2022). Este fenômeno ocorre quando bactérias inseridas no concreto convertem compostos orgânicos em CaCO₃, material de ligação eficiente e compatível com a matriz cimentícia, colmatando as fissuras e reduzindo, assim, a sua permeabilidade (BERGH et al., 2020). A literatura cita casos de sucesso em que soluções de autocicatrização bacteriana foram utilizadas em tanques de tratamento de águas residuais

(LENZ, 2022), em lajes de telhado em um sistema de drenagem na Bélgica (MULLEM et al., 2020), e até mesmo para preenchimento de fissuras em lajes de garagem (WIKTOR; JONKERS, 2015), os quais corroboram com a crescente demanda de aplicação de biomateriais no setor da construção, fomentando a bioeconomia e a sustentabilidade.

Neste contexto, a literatura também apresenta o uso de biomassas vegetais provenientes de resíduos agroindustriais (ANDREOLA, 2022; KENAI et al., 2020) como uma alternativa para reduzir os custos do ciclo de vida e a pegada de carbono de materiais de construção. O uso destas adições, bem como a escolha com base em materiais locais contribui para a sustentabilidade do setor da construção, além de melhorar as propriedades mecânicas do material (BENYAHIA et al., 2017; KENAI et al., 2020). No tocante ao uso de biomassas, destaca-se o uso de resíduos agroindustriais como de grande interesse na indústria da construção. Dentre os potenciais para a produção de biomateriais da construção destaca-se a casca de arroz *in natura* que no Brasil, na safra de 2022/23, produziu-se cerca de 9,88 milhões de toneladas (CONAB, 2023). Embora escassos, os estudos com uso de casca de arroz (CA) *in natura* vêm obtendo resultados satisfatórios para o uso em concretos leves e painéis de fechamento (AMANTINO, 2021; SANTOS, 2020; DE MORAES et al., 2021; MATEUS GONÇALVES DO NASCIMENTO et al., 2021; SILVA et al., 2021), sendo de importância que mais estudos sejam conduzidos a fim de desenvolver novos materiais e fomentar a utilização. A utilização de biomateriais, tais como a casca de arroz, promove o emprego de fontes renováveis e reduz a quantidade de resíduos depositados no ambiente (Amantino (2021), Andreola (2017) e Bezerra et al. (2023)), reduzindo o impacto ambiental.

Fundamentada na redução da pegada de CO₂, a produção de uma argamassa especial com capacidade de autocicatrização leva em consideração a substituição parcial do cimento por adições pozolânicas (KENAI et al., 2020), o emprego de fibras e a incorporação de bactérias precipitadoras de CaCO₃ (GHELLERE, 2021), sendo objeto deste estudo. Dependendo das características mecânicas e desempenho necessários, a argamassa desenvolvida apresenta potencial para ser utilizada em aplicações superficiais, na proteção mecânica de sistemas de impermeabilização, em revestimentos especiais em reservatórios, enchimentos, entre outras aplicações.

Diante do exposto, a fim de desenvolver um compósito cimentício ecoeficiente, esta pesquisa buscou produzir argamassas especiais com potencial de autocicatrização com adições pozolânicas, aditivo mineral e bactérias *Bacillus subtilis AP91* incorporadas na água de amassamento da mistura bem como em partículas de CA – casca de arroz *in natura*. A incorporação da CA como bio-agregado foi feita em substituição ao volume do agregado miúdo em baixos teores, o que promoveu o reaproveitamento desse resíduo agroindustrial. A autocicatrização promovida por agentes biológicos ocorre pelo mecanismo metabólico de bactérias que precipitam CaCO_3 a partir da mudança de pH do meio. As adições pozolânicas contribuem não apenas no efeito pozolânico e refinamento de poros, mas também na redução do consumo de cimento e, conseqüentemente, a quantidade de clínquer utilizado, resultando em uma mitigação da emissão de CO_2 . A sílica ativa e a cinza volante foram empregadas em conjunto com um cimento Portland, do tipo CPV-ARI.

Este estudo faz parte do projeto de P&D da empresa ELETROBRAS Furnas intitulado “Uso de bio-concretos e bio-MMFs de baixo impacto ambiental visando o aumento da eficiência energética de prédios públicos” – PD.0394-1719/2017, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel).

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo é avaliar o potencial de autocicatrização de argamassas especiais ao longo do tempo em misturas ternárias, sem e com agentes biológicos incorporados à mistura, além de aditivo mineral autocicatrizante.

Em decorrência do objetivo principal, tem-se os seguintes objetivos específicos.

- a) Avaliar a autocicatrização promovida pela incorporação de bactérias adicionadas tanto na água de amassamento quanto nas partículas da casca de arroz;
- b) Avaliar o efeito da adição de bio-agregado (tipo casca de arroz) em substituição parcial à areia nas propriedades mecânicas das argamassas ao longo do tempo;

- c) Comparar o efeito da adição de bactérias e de um aditivo mineral autocicatrizante comercial na autocicatrização de argamassas com adições minerais pozolânicas (cinza volante e sílica ativa).

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta pesquisa está estruturada em 5 capítulos. No primeiro são apresentados a introdução, os objetivos gerais e específicos, além da contextualização da pesquisa. O segundo capítulo contempla uma revisão bibliográfica sobre as argamassas especiais existentes no mercado, bem como a sua especificação, os materiais utilizados e o desempenho requerido em seu uso.

No terceiro capítulo é abordada a autocicatrização de argamassas cimentícias, os mecanismos, os agentes provedores da autocicatrização para que ocorra o processo, um breve panorama histórico, além da influência que a autocicatrização biológica pode ter sobre as propriedades dos materiais cimentícios.

No quarto capítulo apresenta-se a metodologia adotada e os materiais utilizados no projeto com seus dados de caracterização.

No capítulo 5 são apresentados todos os resultados obtidos, bem como a discussão acerca deles, baseando-se na literatura. No último capítulo tem-se as considerações finais que contemplam as conclusões do presente trabalho e sugestões para estudos futuros.

2 ARGAMASSAS ESPECIAIS

Argamassas especiais diferem das convencionais (assentamento ou revestimento) uma vez que possuem funções específicas de acordo com a demanda. Dentre elas, destacam-se argamassas de alto desempenho, argamassas de reparo (RAMPANELLI, 2021), argamassas leves (LATROCH et al., 2018), argamassas poliméricas (BOMEDIANO; GOMES; FONTANINI, 2020) e com propriedades autocicatrizantes (SHIELDS et al., 2021). As propriedades de isolamento termoacústico e baixa densidade de matrizes também configuram argamassas especiais (LATROCH et al., 2018), e neste cenário ganham destaque os compósitos cimentícios que utilizam biomateriais em sua composição – tema recente e relevante por envolver desempenho e sustentabilidade (AMZIANE E SONEBI 2016; KENAI et al., 2020; AMANTINO et al., 2022; BEZERRA et al., 2023).

2.1 TIPOS DE ARGAMASSAS

As argamassas leves, especificamente, são compósitos de reduzida massa específica, atribuído pelo uso de agregados leves, incorporadores de ar, e até mesmo biomateriais com baixa densidade (FERRÁNDIZ-MAS et al., 2014; PARRACHA et al., 2023). Seu uso é amplamente utilizado em preenchimento de superfícies para regularização de nível em contrapisos, enchimento de lajes, em alternativas para revestimento de paredes, e preenchimento de painéis leves, por isso o crescente estudo do uso de bio-agregados com esta finalidade (SANTOS, 2020; AMZIANE 2016, BEZERRA 2023). Além da redução do peso global do sistema aplicado, as suas propriedades isolantes tornam o uso do material como uma opção vantajosa. Argamassas com agregados isolantes e leves estudadas por Parracha et al. (2023) apresentaram uma condutividade térmica inferior a $0,2 \text{ W/(m.K)}$, cumprindo assim os requisitos da EN 998-1 para argamassas térmicas. Santos (2020) obteve resultados semelhantes na elaboração de painéis com compósito cimentício com 10% de casca de arroz *in natura* em substituição ao agregado leve. Este proporcionamento reduziu em 50% a condutividade térmica relativa à argamassa de referência.

Quanto ao uso de polímeros, a variedade de argamassas poliméricas encontradas no mercado é vasta, visto que diferentes propriedades são alcançadas com

esses componentes sintéticos como alteração da plasticidade, redução do módulo de deformação, redução da absorção de água e coalescência dos poros. Estas foram as constatações alcançadas nos estudos de Bomediano, Gomes e Fontanini (2020), os quais validaram o uso de redispersíveis à base de etileno-acetato de vinila para verificar a sua influência no estado fresco e endurecido de argamassas e a sua possível aplicação em reparos estruturais.

Argamassas com alto desempenho são materiais com elevada resistência mecânica em conjuntura com a otimização da vida útil do compósito. Sabe-se que uma das técnicas para alcançar o alto desempenho derivam do uso de polímeros como aditivos polifuncionais e fibras poliméricas, os quais possuem a capacidade de aprimorar a performance do material cimentício (RASHID et al., 2015; TOUTANJI, 1999).

Também em busca de um melhor desempenho, e pautado na principal manifestação de deterioração de um material cimentício que é a fissuração, o desenvolvimento de argamassas autocicatrizantes tem crescido nos últimos anos (SCHWANTES-CEZARIO et al., 2022; ISLAM e BHET 2021, GHELLERE 2022, MULLER et al 2022). Embora o fenômeno de autocicatrização de materiais cimentícios seja há muito tempo conhecido e observado, o estado da arte se preocupa em desenvolver materiais com adições poliméricas, minerais ou biológicas com o intuito de promover o processo de autocicatrização autônoma de um concreto ou argamassa (SHIELDS et al., 2021; VAN TITTELBOOM et al., 2013).

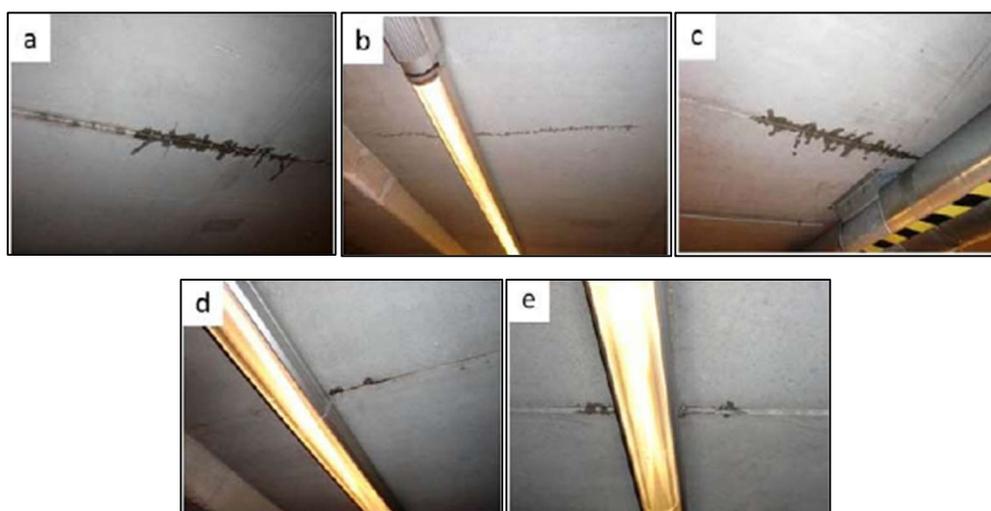
Essas soluções são frequentemente aplicadas em usos especiais, quando se necessita uma proteção contra a entrada ou saída de fluidos (estanqueidade), visto que promovem a redução de poros e o fechamento de eventuais fissuras por retração. Um caso prático foi realizado na execução da nova ponte de integração Brasil-Paraguai, em 2022. Nas emendas das lajes de concreto do tabuleiro era necessária a ausência de fissuras para deixar esta união estanque à umidade e gases da atmosfera. Para tanto, foi aplicada uma camada superficial de argamassa com aditivo mineral autocicatrizante, com cura úmida controlada. De acordo com o fabricante, este aditivo possui uso predominante em tratamentos de impermeabilização de estruturas expostas à umidade como lajes externas e de cobertura.

No entanto, sabe-se também que é possível o uso de soluções biológicas com mecanismos de autocicatrização do compósito cimentício. O emprego de bactérias

com potencial de recuperação de fissuras é uma técnica recente, promissora e, ainda, uma vez viabilizado o seu escalonamento para a indústria da construção civil, torna-se vantajosa frente ao custo elevado de aditivos minerais autocicatrizantes (XU; WANG, 2018, SCHWANTZ-CESÁRIO, 2022, KENAI et al., 2020). De fato, já houve casos de sucesso em que soluções de autocicatrização bacteriana foram utilizadas em estruturas da construção civil, com a finalidade de impedir ou corrigir a abertura de fissuras.

Em um estudo conduzido por Wiktor e Jonkers (2015), fissuras em uma laje de uma garagem de estacionamento na Holanda foram tratadas com uma solução líquida de esporos de uma bactéria alcalifílica produtora de CaCO_3 do gênero *Bacillus*, a fim de diminuir a porosidade do concreto. Foram selecionados seis locais fissurados na estrutura, sendo que três foram tratados com a solução de bactérias e três foram utilizados como controle. Após dois meses, foi realizado o teste de estanqueidade com lâmina d'água, sendo avaliada a permeabilidade de água do pavimento superior ao inferior, e verificou-se que as três lajes sem tratamento tinham elevada percolação ao longo de todo o comprimento (Figura 1). Das regiões tratadas com a solução a base de bactérias, duas exibiram apenas alguns gotejamentos e a terceira foi totalmente recuperada, não tendo sido constatada percolação de água.

Figura 1: Observação de vazamento de água pelas fissuras durante o teste de permeabilidade à água – (a-c) controle de fissuras não tratadas, (d, e) fissuras tratadas com o sistema de reparo à base de bactérias



Fonte: Wiktor e Jonkers (2015)

A empresa Basilisk realizou a aplicação pioneira de agentes bacterianos em um tanque de água (Figura 2) em Rotterdam que apresentava quatro paredes de concreto, sendo que duas delas foram construídas com concreto convencional e as outras duas foram confeccionadas com adição do *Basilisk Healing Agent*, um aditivo contendo bactérias (BASILISK, 2017). A empresa obteve a efetivação da cura das fissuras de percolação, observado pelo estancamento dos vazamentos localizados na parte inferior da estrutura.

Figura 2: Tanque de água com 47 metros de comprimento, 5,5 metros de largura e 5 metros de altura, com duas paredes construídas com concreto simples, e duas construídas com a adição do *Basilisk Healing Agent*



Fonte: Basilisk (2017)

Mullem et al. (2020) realizaram a primeira aplicação bem-sucedida de bactérias em uma construção real na Bélgica. Eles incorporaram as bactérias em uma laje de telhado de um poço de inspeção em um sistema de drenagem, enquanto corpos de prova com a mesma composição foram avaliados em laboratório. Para isso, utilizaram um aditivo comercial não axênico com capacidade de esporulação, MUC+ (Cultura Ureolítica Mista + bactérias anaeróbias), juntamente com ureia e cálcio. Embora a laje ainda não tenha apresentado fissuras e, portanto, os resultados reais ainda não tenham sido avaliados, os experimentos de laboratório demonstraram resultados positivos na autocicatrização e na redução da permeabilidade.

Figura 3: Laje de fechamento de um poço de inspeção de drenagem, executada com a aplicação de agentes bacterianos autocicatrizantes, para promover a autocicatrização de fissuras, haja vista a alta condensação de água em sua superfície.



Fonte: Mullem et al. (2020)

2.2 MATERIAIS EMPREGADOS EM ARGAMASSAS AUTOCICATRIZANTES

Como o intuito deste trabalho é a produção de uma argamassa especial, do tipo autocicatrizante com alto desempenho, deve-se também avaliar os seus componentes que representam materiais aglomerantes – cimento, sílica e pozolanas – agregado miúdo, fibras, bio-agregados, aditivos e água.

2.2.1 Cimento e Materiais Cimentícios Suplementares

A variedade de cimentos disponíveis no mercado nacional (Tabela 1) se traduz em diversas características físico-químicas, além de mecânicas, que resultam no desenvolvimento de comportamentos distintos em compósitos cimentícios.

A escolha do tipo do cimento a ser utilizado em uma argamassa especial depende do conhecimento sobre os tipos disponíveis e da sua funcionalidade, além do ambiente de exposição no qual o compósito será submetido (SOUZA; RIPPER, 1998). Se constituído de cimento Portland com, no máximo, 5% de outro material inorgânico será denominado cimento Portland (NEVILLE, 2016). A norma NBR 16697(ABNT, 2018) estabelece critérios que classificam os tipos de cimento Portland no Brasil, definindo teores

máximos de adições para cada classe de cimento além de atribuir os sufixos RS e BC caso o cimento seja resistente a sulfatos ou apresente baixo calor de hidratação, respectivamente.

Tabela 1: Cimentos normatizados segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018)

Sigla	Designação normalizada (tipo e subtipo)	Sufixo	Limites de composição do cimento			
			C + Sc ¹	EG ²	MP ³	MC ⁴
CPI	Cimento Portland comum – sem adição	Resistente a Sulfatos ou Baixo Calor de hidratação	95 – 100		0 – 5	
CPI-S	Cimento Portland comum – com adição		90 – 94	0	0	6 – 10
CPII-E	Cimento Portland composto – com escória granulada de alto forno		51 – 94	6 – 34	0	0 – 15
CPII-F	Cimento Portland composto – com material carbonático		71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
CPII-Z	Cimento Portland composto – com material pozolânico		75 – 89	0	0	11 – 25
CPIII	Cimento Portland de alto-forno		25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
CPIV	Cimento Portland pozolânico		45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
CPV	Cimento Portland de alta resistência inicial		90 – 100	0	0	0 – 10
CPB	Cimento Portland branco – Estrutural		75 – 100	-	-	0 – 25
CPB	Cimento Portland branco – Não estrutural		-	50 – 74	-	-

¹ Clínquer + sulfatos de cálcio. ² Escória granulada de alto-forno. ³ Material Pozolânico. ⁴ Material Carbonático

Fonte: Adaptado de ABNT (2018)

Argamassas de alto desempenho submetidas a carregamentos em curto espaço de tempo após a sua aplicação demandam um cimento de alta resistência inicial; no caso do Brasil o tipo CPV-ARI. Propriedades mecânicas de longo prazo, como tenacidade, estabilidade de volume e vida útil devem ser levadas em consideração na escolha do cimento para ambientes severos. A exemplo de locais com a presença de sulfatos, cimentos com o sufixo RS da norma brasileira são desejáveis, principalmente o cimento pozolânico, tipo CP-IV, porque podem se apresentar resistentes ao ataque de sulfato além de possuir menor calor de hidratação do que outros tipos de cimentos. O ganho de resistência e o tempo definido podem ser regulados com misturas e proporção de mistura (KIM et al., 2011). Por outro lado, é desejável o uso de um cimento de baixo teor alcalino,

sempre que possível, associado ao emprego de adições minerais pozolânicas em teores previamente testados em laboratório como uma das formas de evitar a reação álcali-sílica (HASPARYK, 1999; 2005), seguindo a normalização brasileira NBR 15577 (ABNT, 2018).

Quanto à relação água/cimento da argamassa, Santana et al. (2018) afirmam que a quantia de água adicionada é ajustada em função da trabalhabilidade necessária para a sua aplicação, devendo ser utilizado aditivo superplastificante caso a trabalhabilidade não seja obtida apenas com a adição de água do proporcionamento, e altos consumos de água são indesejáveis.

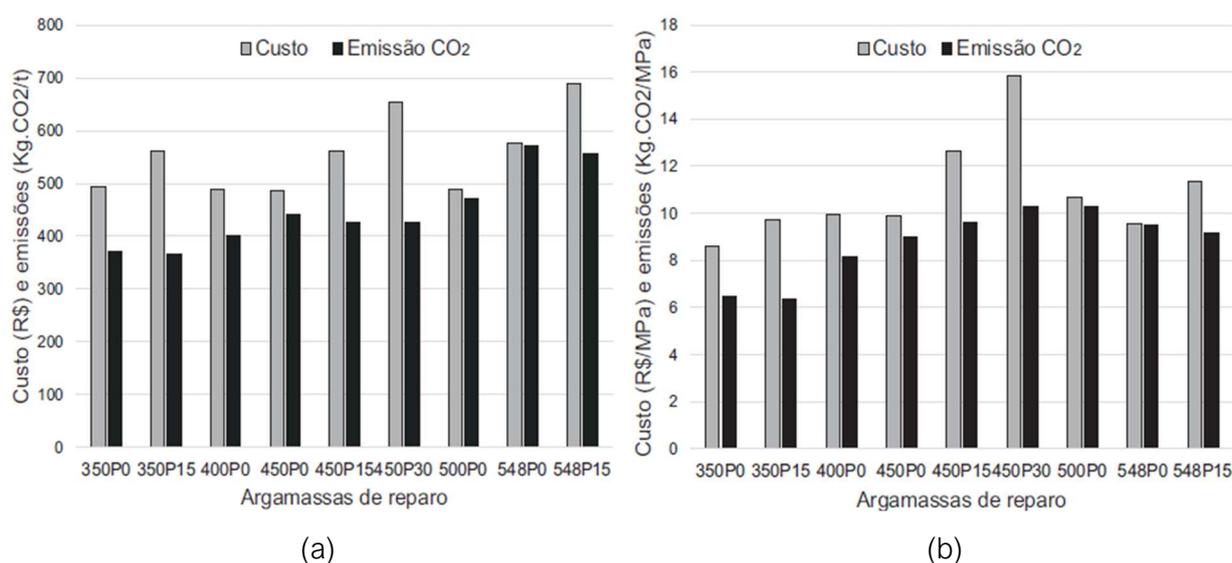
No caso de um reparo de concreto, a pasta de cimento deve ser suficiente para revestir os agregados, ter trabalhabilidade adequada e revestir a zona de transição pasta/agregado (KIM et al., 2011). Para minimizar os efeitos da retração por secagem, valores mais baixos de a/c são frequentemente usados, visto que quanto mais alto o conteúdo de água, maior o potencial de retração à medida que a água evapora. Mas com isso, a falta de água pode dificultar o revestimento dos agregados, em se tratando de concreto, conferir trabalhabilidade insuficiente e dificultar o revestimento da camada de interface (KIM et al., 2011). Sendo assim, uma relação a/c desejável para argamassa de reparo é de 0,40 (SANTANA et al., 2018) .

Rampanelli (2021) proporcionou traços de argamassa de alto desempenho com adições de sílica ativa e filer calcário, com consumos de cimento Portland CPV-ARI de 350, 400, 450, 500 kg/m³ mantendo o consumo de água/ligante de 0,39. Para o menor consumo de cimento Portland (353 kg/m³), o autor incorporou o maior teor de adições, sendo 20% de sílica ativa e 37% de filer calcário em adição à massa de cimento, conferindo um consumo de ligantes total de 424 kg/m³. A partir destes proporcionamento obteve os maiores resultados à compressão, atingindo valores acima de 55 MPa aos 28 dias para a mistura com menor consumo de cimento. Este proporcionamento apresentou resultados de resistências à compressão e à tração na flexão similares à referência, com consumo de cimento de 609 kg/m³ e total de ligantes de 688 kg/m³. O autor atrela este fato à maior adição de sílica ativa, que melhora as propriedades mecânicas da matriz cimentícia devido ao efeito pozolânico e ao empacotamento de partículas, que promove maior densidade à matriz.

A incorporação de adições minerais nas composições de cimento Portland apresenta vantagens não só nas propriedades do material cimentício, mas também

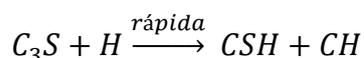
econômicas e ambientais, ao passo que reduz o consumo de clínquer, e por consequência a liberação de CO₂ na atmosfera, e promove a adequada destinação de resíduos de termelétricas e indústrias siderúrgicas (METHA; MONTEIRO, 2014). Rampanelli (2021) avaliou os custos e emissões de CO₂ na atmosfera com a relação custo/MPa dos materiais de reparo. Todas as dosagens com menor consumo de cimento apresentaram menor custo e emissão de CO₂ em relação às argamassas de referência (Figura 4). Por outro lado, apenas a argamassa de 353 kg/m³ de consumo de cimento obteve a relação custo/MPa inferior à argamassa de referência, mostrando que os demais materiais de reparos são menos eficientes economicamente que o material de referência (RAMPANELLI, 2021).

Figura 4: Custos e emissões de CO₂ por (a) m³ e por (b) MPa



Fonte: Rampanelli (2021)

Uma pozolana é definida por Metha e Monteiro (2014) como um material composto por sílica ou sílica-alumina, que por si só possui escassas ou nulas propriedades cimentantes, mas na presença da umidade reage com o hidróxido de cálcio (CH) para formar uma substância com propriedades aglomerantes. Pode-se resumir o efeito da pozolana na mistura cimentícia a partir das equações 1 para Cimento Portland comum e 2 Cimento Portland pozolânico:



De acordo com McCarthy e Dyer (2019), o termo “atividade pozolânica” envolve os parâmetros da quantidade máxima de cal com a qual um material pozolânico pode se combinar e a taxa na qual o processo de combinação ocorre, que serão influenciados pela natureza de cada pozolana. Devido à dificuldade em acompanhar as quantidades de fases ativas de um material pozolânico ao longo do processo de hidratação, o progresso da reação pozolânica pode ser avaliado pela redução de Ca(OH)_2 no sistema (MCCARTHY; DYER, 2019).

A NBR 12653 (ABNT, 2014) classifica os materiais pozolânicos em três classes distintas (Tabela 2) e estabelece critérios físicos e químicos para as classes de pozolanas (Tabela 3).

Tabela 2: Classificação de Materiais Pozolânicos pela (ABNT, 2014)

Classes de Material Pozolânico	Características	Exemplos
Classe N	Pozolanas naturais e artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.	Metacaulim e cinzas vulcânicas naturais
Classe C	Cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termelétricas	Cinzas volantes e cinzas oriundas de usinas termelétricas
Classe E	Qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores	Sílica Ativa

Fonte: Adaptado de ABNT (2014)

Tabela 3: Exigências Físicas e Químicas das classes de Material Pozolânico

Exigência	Propriedade	Classes de Material Pozolânico			
		N	C	E	
Físicas	Retido na peneira 45 μm (% máx)	34	34	34	
	Índice de atividade pozolânica	Com cimento aos 28 dias, em relação ao controle (% mín)	75	75	75
		Com cal aos 7 dias (Mpa)	6,0	6,0	6,0
	Água requerida (% máx)	115	110	110	
Químicas	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}$ (% mín)	70	70	50	
	SO_3 (% máx)	4,0	5,0	5,0	
	Teor de Umidade (% máx)	3,0	3,0	3,0	
	Perda ao Fogo (% máx)	10,0	6,0	6,0	
	Álcalis disponíveis em Na_2O (% máx)	1,5	1,5	1,5	

Fonte: Adaptado de ABNT (2014)

Embora a NBR 12653 (ABNT, 2014) proponha tais classificações, pode-se notar que não existe diferenciação entre a finura e atividade pozolânica entre as classes destes materiais. Por isso, outros autores indicam que seja melhor a classificação de acordo com a origem do material pozolânico, dividindo entre dois grandes grupos: naturais e artificiais (PINHEIRO, 2008), a saber:

- a) **Pozolanas naturais:** geralmente de origem vulcânica ou oriundos de rochas sedimentares ou fósseis, apresentando elevado teor de sílica ($\text{SiO}_2 \geq 65\%$). McCarthy e Dyer (2019) ainda complementam que esta classe não requer nenhum tratamento adicional além da retificação.
- b) **Pozolanas artificiais:** proveniente de processos industriais, como as cinzas volantes, escórias, entre outros materiais, ou alguns tipos de argilas processadas por tratamento térmico. De acordo com McCarthy e Dyer (2019), estas pozolanas resultam de modificações químicas e/ou estruturais de materiais que em sua forma original apresenta pouca ou nenhuma propriedade pozolânica fraca.

Metha e Monteiro (2014) propõem também uma divisão de acordo com a atividade pozolânica ou cimentante. Segundo os autores, existem as adições minerais cimentantes, como a escória moída de alto forno; outros materiais terão atividade pozolânica, se dividindo entre muito elevada (sílica ativa e cinza de casca de arroz amorfa), atividade pozolânica comum (cinza volante com baixo teor de cálcio) e pozolanas pouco reativas (escória granulada resfriada lentamente, por exemplo). Além disso, existem as que apresentam atividade cimentantes e pozolânicas, que é o caso da cinza volante com elevado teor de cálcio.

Da reação pozolânica, três principais aspectos são fundamentais, segundo Metha e Monteiro (2014), sendo por primeiro a reação lenta, a qual promove redução da evolução de calor de hidratação e progressão lenta da resistência. Em segundo lugar, o consumo de hidróxido de cálcio na reação química contribui com a durabilidade do material frente a meios ácidos, e, por fim, ocorre a redução da permeabilidade da pasta endurecida pelo refinamento e preenchimento de poros (METHA; MONTEIRO, 2014; SZEMEREY-KISS; TÖRÖK; SIEGESMUND, 2013).

A sílica ativa é conhecida como uma adição superpozolânica por possuir diâmetro médio da ordem de 0,1 μm (duas ordens de grandeza inferior ao cimento e à própria cinza volante), o que confere uma atividade pozolânica maior do que as demais pozolanas. Por outro lado, essa pozolana aumenta a demanda por água ou aditivo superplastificante (METHA; MONTEIRO, 2014), para conferir trabalhabilidade adequada à matriz cimentícia. Devido à sua elevada superfície específica, a sílica ativa tende a se aglomerar, demandando o emprego de aditivos superplastificante para a garantia de sua dispersão (MCCARTHY; DYER, 2019).

O uso de materiais pozolânicos como a cinza volante em argamassas e concretos já é praticado a tempos, visto os seus comprovados incrementos de resistência mecânica em idades avançadas, melhora da trabalhabilidade, além do aumento da resistência ao ataque ambiental (MALLAT; ALLICHE, 2011; KENAI et al., 2020; KIM et al., 2011). Destaca-se que a adição de pozolanas em materiais de reparos deve levar em consideração o ambiente de exposição ao que a estrutura está submetida. Para ambientes sujeitos a ataques de sulfatos, contato com águas puras, ácidas ou carbônicas, em geral é recomendado um cimento com sufixo RS, e normalmente do tipo CP-IV, com teores de pozolana que variam de 15-50%.

No entanto, deve-se atentar ao fato de que devido a finura das partículas dos materiais pozolânicos, a coesão de uma pasta com essas adições aumenta, o que reduz a exsudação (METHA; MONTEIRO, 2014). Por consequência, com a falta da água de exsudação, aumenta a evaporação na superfície do material durante a secagem, gerando a retração plástica da argamassa. Além disso, devido ao retardo no ganho de resistência da argamassa com adição de pozolanas, as tensões devido à perda de água por evaporação na pasta são superiores à resistência à tração do material, levando-a à fissuração (SIRAJUDDIN; GETTU, 2018).

Vieira (2008) avaliou o comportamento mecânico de diferentes cimentos Portland, a saber, CPII-Z, CPIV-RS, CPV-ARI-RS e CPV-ARI, sob carregamento precoce em cura úmida, e verificou que para uma dada relação a/c, quanto maior o período em câmara úmida, maior a resistência. A autora atribuiu este fato à hidratação das partículas que permanecem anidras no início da hidratação, colmatando poros e fissuras. De acordo com Neville (2016), este processo, já conhecido de longa data, é denominado autocicatrização

autógena, e que ocorre através da hidratação de partículas anidras que ficaram expostas à água após a abertura da fissura, ao longo do tempo. O autor complementa que quanto mais novo o concreto, maior é a recuperação da resistência frente à abertura de fissuras pelo carregamento precoce, devido ao maior número de partículas de materiais cimentícios não hidratados (NEVILLE, 2016), válido para cimentos de alta resistência inicial e para os com adições pozolânicas. O ganho mais expressivo de resistência após a fissuração precoce foi verificado para os cimentos de alta resistência inicial. Vieira (2008) justificou o fato devido à maior finura destes cimentos, o que pode ter gerado uma mudança na morfologia da pasta.

2.2.2 Agregados

2.2.2.1 *Minerais e reciclados*

O agregado miúdo comumente utilizado na construção civil refere-se, na sua maioria, à areia natural, que conforme NBR 7211 (ABNT, 2009) é o material composto de grãos cujas dimensões estarão abaixo da peneira de 4,75 mm. A areia natural pode ser extraída de cavas imersas (através de dragas flutuantes), cavas secas (taludes de solo) e leitos de rio (onde existam depósitos). São empregados também areias de britagem (rochas britadas) e artificiais, sendo estas últimas obtidas a partir de processos industriais. (SBRIGHI NETO, 2011). Souza e Ripper (1998) afirmam que a granulometria e a densidade dos agregados miúdos têm grande influência na qualidade dos materiais cimentícios. De acordo com os autores, apresentar densidade baixa indica que o agregado é poroso e pouco resistente. De forma predominantemente cúbica ou arredondada, devem ser isentos de películas aderentes e substâncias deletérias que diminuem a aderência à pasta do cimento ou que prejudicam o endurecimento do concreto (SANTANA et al., 2018; SOUZA; RIPPER, 1998). Devem também ser tomadas precauções para a prevenção contra a ocorrência de reações expansivas que possam afetar a matriz cimentícia, com atenção, principalmente, à presença de sílica reativa e sulfatos nas areias (HASPARYK; KUPERMAN, 2019).

Dependendo do uso específico, as argamassas especiais podem conter gradações variáveis de agregado miúdos para diferentes profundidades e consistências de aplicação, pois a largura da fissura deve ser grande o suficiente para que a argamassa

preencha a fissura e penetre em sua profundidade (ACI-546R, 2014). *Grouts* e demais argamassas de cimento misturadas com agregados finos normalmente têm proporções de mistura de 1:2 proporções de cimento para areia, em volume (ACI546R, 2014; SANTANA et al., 2018). Em argamassas especiais com adição de sílica ativa, Santana et al. (2018) indicam que nesta proporção estão inclusos 8% de sílica ativa em substituição ao cimento, em volume.

Embora advindos de várias fontes, a escassez dos recursos naturais e o dano ambiental decorrente da extração dos agregados traz um forte apelo para a substituição de agregados por resíduos (AMANTINO, 2021). Neste cenário surgem como alternativas resíduos da construção civil (RCC), resíduos industriais e da agroindústria para a substituição dos agregados nas misturas cimentícias. Por representarem fontes disponíveis abundantes, a biomassa vegetal tem um futuro brilhante na substituição em materiais da construção civil (AMZIANE; SONEBI, 2016).

A indústria da construção civil tem buscado substituir materiais minerais não renováveis por materiais reciclados, e para isso tem utilizado resíduos da própria construção como agregados em concretos (LIMBACHIYA; SEDDIK; OUCHAGOUR, 2012). De acordo com Neville (2016), agregados reciclados são obtidos do processamento de materiais inorgânicos utilizados previamente em outras construções, e são utilizados principalmente em obras de pavimentação e em concretos não estruturais. Deve-se ter o cuidado com seu emprego devido à sua maior porosidade e absorção, além da menor densidade comparado a um agregado novo, decorrentes de sua constituição ser de materiais velhos.

Salles et al. (2021) verificaram que concretos dosados com agregados reciclados compostos por tijolos obtiveram um aumento de 291% na absorção comparado ao concreto com agregado mineral natural. Além disso, os autores obtiveram perda na resistência à compressão para todas as variações de agregados reciclados – tijolos, cimentícios e misto. Por fim, concluíram que não há necessidade da segregação dos resíduos, haja vista as características semelhantes dos concretos moldados com agregados reciclados mistos comparados aos com apenas agregado reciclado cimentício.

2.2.2.2 Bio-agregados

O consumo de energia, a emissão de gases do efeito estufa, o consumo de recursos naturais e a produção de resíduos são as principais questões que levaram pesquisadores de todo o mundo a desenvolverem soluções alternativas aos materiais convencionais nas construções.

Visto o elevado potencial agrícola do Brasil, é inerente ao processo produtivo a ocorrência de grandes quantidades de resíduos agroindustriais que podem acarretar impactos ambientais decorrentes da disposição inadequada. Por esse motivo e aliada à uma flora excepcional com uma grande variedade de fibras disponíveis, a pesquisa no país neste domínio é muito ativa (AMZIANE; SONEBI, 2016). Alguns destes produtos ou resíduos vêm sendo estudado como bio-agregados em matrizes à base de cimento (AMANTINO, 2021; SANTOS, 2020; ANDREOLA et al. 2022). Bio-agregado pode ser definido como um material particulado de origem vegetal (renovável), com potencial de emprego em matrizes à base de cimento em substituição parcial ou total a um agregado mineral.

Já o biomaterial à base de cimento pode ser definido como um compósito que apresenta em sua composição um ou mais compostos de fonte renovável de origem vegetal e/ou biológica, um aglutinante mineral, aditivos e água. Além de possuírem propriedades hidrotérmicas, o que pode aumentar a eficiência energética e a qualidade do ar das edificações, os biomateriais à base de cimento armazenam CO₂, o que também contribui para a redução das mudanças climáticas, sendo, portanto, apontados como soluções bastante atrativas (CALDAS et al., 2022).

Kenai et al. (2020) sustentam que os maiores desafios que envolvem materiais naturais em compósitos são uma boa interação de interface entre a fibra natural e a matriz polimérica e cimentícia. Não obstante, por ser uma temática relativamente nova, a utilização de resíduos vegetais em substituição aos agregados minerais naturais exige mais estudos que mensurem os aspectos relacionados à durabilidade, a longo prazo, bem como a sua interferência na vida útil de compósitos cimentícios (SHAFIGH et al., 2014).

2.2.2.3 Bio-agregado de Casca de Arroz

Devido a sua dureza, fibrosidade e natureza abrasiva, a casca de arroz não apresenta valor comercial, sendo bastante utilizada na geração alternativa de gases quentes para a secagem do próprio arroz nas usinas de beneficiamento, por apresenta um alto poder calorífico (aproximadamente 16720 kJ/kg), ou em camas de aviários (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2005; POUHEY, 2006), ou mesmo como combustível em termoelétricas (G1, 2022). O arroz é o segundo cereal mais produzido no mundo, correspondendo a uma produção total estimada na safra de 2022/23 de 761,55 milhões de toneladas (USDA, 2023), perdendo lugar apenas para o milho. Hoje o continente asiático é o maior produtor deste grão, abrangendo os oito principais países produtores do mundo. O Brasil ocupa o nono lugar no *ranking* mundial de produção do arroz (EMPBRAPA, 2021), produzindo na safra 2022/2023 9,88 milhões de toneladas (CONAB, 2023), representando cerca de 1,3% da produção global.

Vale lembrar que após o beneficiamento do arroz, resta a sua casca que equivale a, aproximadamente, 23% em peso de cada tonelada de arroz durante seu processamento (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2005; ZAREEI et al., 2017; SANTOS, 2020). Para o Brasil, isso implica em uma geração de cerca de 2,3 milhões de toneladas de material por ano, tornando a casca de arroz um resíduo agroindustrial de grande relevância.

O problema gerado ao meio ambiente por este resíduo incide no espaço ocupado e no tempo de degradação. A casca de arroz é um material fibroso, composto principalmente por celulose, lignina e resíduos orgânicos; possui baixa densidade e grande volume, o que demanda grandes áreas quando depositada. Além disso, apresenta lenta biodegradação devido ao alto teor de silicatos, o que faz com que permaneça inalterada aproximadamente por cinco anos (WALTER; ROSSATO, 2010) comprometendo o meio ambiente (BAHRAMI; SCHIERNING; NIELSCH, 2020).

Quanto à composição química, Hwang e Chandra (1996) trazem a proporção dos constituintes da casca de arroz, sendo composta por 40 a 50% de celulose, 25 a 30% de lignina e 20% de matéria inorgânica. Este último contém em sua composição um grande teor de sílica (de 90 a 95%) na forma amorfa hidratada. A casca de arroz é um resíduo não perigoso e não inerte, podendo apresentar propriedades biodegradáveis e combustíveis. Sendo assim, é classificada como um resíduo Classe II-A, segundo a (ABNT,

2004). O seu uso na forma calcinada já vem há tempos sendo realizado em substituição ao clínquer, mas ainda são poucos os estudos com adição da casca de arroz *in natura* em matrizes cimentícias, devido a sua parcela orgânica que pode interferir na vida útil de compósitos cimentícios (SHAFIGH et al., 2014).

Como resultado comum de pesquisas sobre adição deste resíduo como bio-agregado, o incremento de casca de arroz *in natura* em substituição ao agregado miúdo em matrizes cimentícias reduz as propriedades mecânicas do compósito cimentício, por outro lado, pode atribuir melhora em propriedades térmicas e de densidade, o que vai depender do tipo de aplicação, sendo, portanto, um compósito bastante atrativo. (AMANTINO, 2021; CHABANNES et al., 2017; LILGE; HASELEIN; SANTINI, 2021; PRUSTY; PATRO; BASARKAR, 2016; SON et al., 2017). Estes fatores tornam a casca de arroz um bio-agregado vantajoso para a confecção de concretos leves e isolantes.

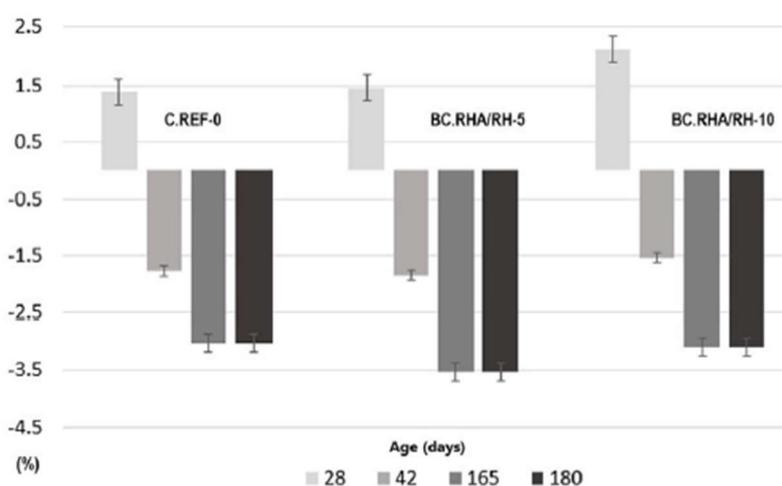
Chabannes et al. (2017), confeccionaram bioconcretos com substituição total dos agregados convencionais por casca de arroz *in natura* e por semente de cânhamo. As misturas com casca de arroz obtiveram o menor desempenho mecânico, por outro lado, os autores observaram que a incorporação deste bio-agregado concedeu ao concreto menores perdas de massa e de porosidade, quando comparado ao bioconcreto com cânhamo.

Sob o ponto de vista mecânico e de isolamento térmico, Santos (2020) afirma que já fora evidenciada a possibilidade de substituição parcial do agregado miúdo por casca de arroz em argamassas para aplicações em vedações. Son et al. (2017) apresentaram resultados vantajosos para este uso com a substituição parcial de 15 e de 20% do agregado convencional por casca de arroz, tendo obtido redução na condutividade térmica, demonstrando a obtenção de um concreto leve e isolante.

Amantino et al. (2022) avaliaram o desempenho da substituição em volume do agregado miúdo por casca de arroz *in natura* em bioconcretos com combinação binária de cimento e 8% de cinza de casca de arroz (em substituição parcial ao cimento). Em seu trabalho foram desenvolvidos três traços, sendo um traço de referência sem casca de arroz, e os demais com substituição em volume de areia em 5% e 10% por casca de arroz em sua forma natural. Os principais resultados indicaram que o aumento do teor de casca de arroz incorporada na mistura promoveu redução tanto da massa específica, quanto do desempenho mecânico (resistência e módulo de elasticidade), da velocidade ultrassônica e

da propriedade condutividade térmica. Para o bioconcreto com 10% de casca de arroz, a sua densidade se aproximou à classificação de um concreto leve, ou seja, 2.000 Kg/m³ (AMANTINO et al., 2022). Os dados de retração por secagem (Figura 5) mostraram que, a partir dos 7 dias, os bioconcretos apresentaram valores menores de retração por secagem em relação ao concreto de referência, demonstrando vantagem no uso de bio-agregados para esta propriedade.

Figura 5: Retração por secagem dos concretos (valores médios)



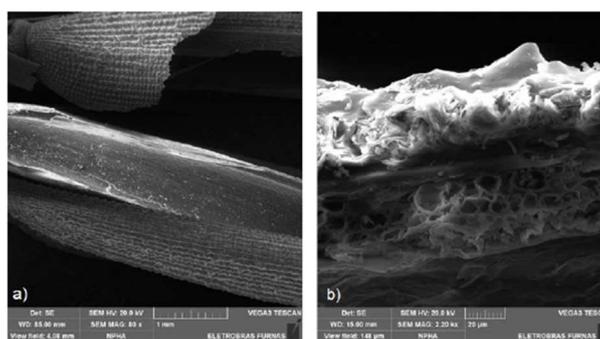
Fonte: (AMANTINO et al., 2022)

Como já apresentado por outros pesquisadores, não só o desempenho mecânico, mas também a densidade e a condutividade térmica são afetadas diretamente pela incorporação de bio-agregado, o que o faz atrativo para determinadas aplicações. Chabannes et al. (2017) descreveram que o ângulo, tamanho, forma e rugosidade do agregado utilizado influenciam em seu desempenho mecânico. Além disso, os autores observaram que existe uma maior fragilidade na zona de transição da matriz cimentícia com a superfície do bio-agregado, resultado em retração dos bio-agregados após a sua secagem, acarretando menores resistências. Santos (2020) afirma que a utilização de bio-agregados afeta, também, a rigidez de compósitos cimentícios, visto que o módulo de elasticidade é inferior ao dos agregados convencionais, o que era esperado. A autora também destaca alterações na reologia das misturas com casca de arroz como bio-agregados, uma vez que contém superfície rugosa e alta porosidade, com capacidade de absorver mais facilmente a água livre na matriz cimentícia (SANTOS, 2020). Estudos mais recentes focados em reologia mostram a necessidade de avaliação desses parâmetros em

combinações ternárias com foco no preparo de bioconcretos com casca de arroz como bio-agregado, conforme Bezerra *et al* (2023). Consoante à Santos (2020), Amantino et al. (2022) destacam a importância em se conhecer a textura superficial do bio-agregado, visto que a rugosidade e porosidade irão interferir na capacidade de adesão à matriz cimentícia. Amantino et al. (2022) constataram que a textura áspera, porosa e tubular da casca de arroz auxiliou na aderência do bio-agregado à matriz cimentícia, sem comprometer o desempenho mecânico, mesmo considerando sua baixa rigidez. Este comportamento também foi melhorado pela remoção de extrativos e o tratamento com hidróxido de cálcio.

Na Figura 6 é apresentada a imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) (sem tratamento) do trabalho de Amantino (2021), sendo possível confirmar a textura rugosa superficial da casca de arroz *in natura*, tanto na porção externa (Figura 6a) quanto na interna (Figura 6b).

Figura 6: Microestrutura da CA por elétrons secundários: (a) superficial (b) porção interna



Fonte: extraído de Amantino (2021)

O autor observou que a alta taxa de absorção da casca de arroz em comparação aos agregados convencionais se dá pela elevada porosidade e estrutura tubular interna do material *in natura* (AMANTINO, 2021), conforme já destacado em pesquisas anteriores, como as de Chabannes et al. (2017) e Son et al. (2017). Uma vez que a CA é um material de elevada taxa de absorção de água, Santos (2020) destaca que, ao ser incorporada em matrizes cimentícias, seja mensurada a capacidade de absorção e adicionada a quantidade de água referente ao que o biomaterial irá absorver – água de compensação. Esta medida deve ser considerada, caso contrário, a mistura “perderá” uma parcela de água da pasta para a CA, reduzindo a relação a/c do proporcionamento ora projetado, e assim, comprometendo o material a ser desenvolvido (SANTOS, 2020). Recentemente foi publicado um protocolo (HASPARYK; DA GLORIA, 2022) que detalha o

procedimento correto para a determinação da água de compensação a ser adicionada à água de mistura na confecção de bioconcretos.

Um ponto de atenção levantado por Pinto (2019) e Ntimugura et al. (2020) é sobre a existência de incompatibilidade química entre a maioria das biomassas vegetais com ligantes inorgânicos. Este fato é proveniente da água de amassamento solubilizar açúcares e outros inibidores que prejudicam a pega do cimento, podendo ser avaliadas através do tempo e da temperatura máxima de hidratação (NTIMUGURA et al., 2020).

Diferentemente dos agregados minerais, como areia e pedra britada, os bio-agregados contêm compostos orgânicos que se dissolvem em água, se tornando quimicamente sensíveis a ambientes aquosos alcalinos e ácidos para interagir com aglutinantes minerais (NTIMUGURA et al., 2020). Eles ainda possuem inibidores presentes em sua superfície, também chamados de extrativos, como avaliado na casca de arroz *in natura* (RIPOLI FILHO, 2019), biomassa de madeira (PINTO, 2019), e em fibras vegetais encontradas na literatura (NTIMUGURA et al., 2020). Estes inibidores são um tipo de reserva de alimento da planta e estão relacionados à densidade, umidade, cor, odor, durabilidade entre outras. Sua composição e quantidade relativa dependem de fatores, como espécie, idade e região de procedência (CASTRO et al., 2014; NTIMUGURA et al., 2020). Eles performam uma incompatibilidade química com os compostos cimentícios, visto que ao serem solubilizados pela água de amassamento, influenciam fortemente a química de fixação, causando retardo da pega do cimento, e conseqüentemente, na resistência final do concreto (NTIMUGURA et al., 2020). No entanto, Ripoli Filho (2019) e Castro et al. (2014) afirmam que é possível reduzir essa incompatibilidade química existente entre o cimento e as biomassas vegetais com tratamentos do bio-agregado, como a lavagem a quente, uso de aceleradores de pega e mineralização da biomassa vegetal. Ademais, a lavagem em água quente melhora a aderência entre a superfície externa ou interna da casca de arroz tratada e a água presente na argamassa, por meio da eliminação da camada de cera repelente ou pela redução da tensão superficial entre a superfície e a água Ripoli Filho (2019).

Santos (2020) realizou ciclos de lavagem da casca de arroz *in natura* em água quente a, aproximadamente, 80°C para remoção dos extrativos. A autora observou

eficácia no tratamento já a partir da primeira lavagem, com uma redução de 75% dos inibidores. Com a terceira lavagem, 94% dos extrativos foram removidos (SANTOS, 2020).

Existe ainda o tratamento térmico utilizado por Wu, Yu e Liu (2021), no qual os bio-agregados de casca de pêssigo e casca de damasco já triturados são submetidos a um processo de encharcamento em água, secagem e depois aquecimento em um forno rotativo a 200°C por cerca de 1 hora, e então a temperatura é aumentada para 350 a 550°C por 4 horas. A intenção desta temperatura final é decompor a lignina, visto que é a temperatura de pirólise deste componente. Os autores encontraram aumento da resistência à compressão e tração, redução da retração por secagem do concreto aos 108 dias e ainda, aumento da resistência aos ciclos de congelamento-degelo, atribuída à redução das microfissuras e da porosidade do concreto (WU; YU; LIU, 2021). Este tratamento, porém, atribui um maior custo de processamento dos materiais ao produto gerado, visto a energia empregada para a alta variação de temperatura.

Outra forma de tratamento é a imersão do bio-agregado de casca de arroz *in natura* em solução com hidróxido de cálcio (BEZERRA *et al.*, 2023; AMANTINO *et al.*, 2022). Salas, Alvarez e Veras (1986) realizaram esta técnica e, posteriormente, produziram concretos variando os teores entre 20 e 100% para CA com e sem tratamento. Os autores obtiveram um aumento de resistência de até duas vezes para os compósitos com os bio-agregados tratados, considerando teores acima de 60% de substituição, contudo, ainda abaixo do concreto referencial em cerca de 30% (SALAS *et al.*, 1986).

Embora a remoção de extrativos de bio-agregados resulta em uma matriz cimentícia com melhor qualidade, vale destacar que ainda estão escassos estudos que mostrem o desempenho da casca de arroz *in natura*, ou mesmo com tratamento, ao longo do tempo dentro de uma matriz cimentícia, para avaliar o efeito da degradação – ou não – de sua matéria orgânica.

Destaca-se que além da produção de bio-agregados, existe a potencial aplicação de resíduos vegetais na forma de biofibras e de pozolana em substituição ao clínquer, após um processo de tratamento térmico. De acordo com Garcia *et al.* (2015), este último reage com o CH, produto formado da hidratação do clínquer, produzindo a partir de uma reação pozolânica um constituinte muito semelhante ao C-S-H. Como exemplo, Amantino (2021) cita cinzas de bagaço de cana de açúcar, de casca de arroz, de serragem

e de casca do coco. Esses aglomerantes possuem como característica o elevado teor de sílica na condição amorfa sendo todos de origem vegetal.

Sua-lam e Makul (2013) testaram as propriedades do concreto autoadensável usando cinza casca de arroz em substituição ao agregado miúdo e pó de calcário. O uso da cinza de casca de arroz, combinada com o pó de calcário neste estudo reduziu o peso unitário, fluidez, porosidade, absorção de água, resistência à compressão, velocidade de pulso ultrassônico e o custo do material.

Além de apresentar vantagens ambientais devido à sua grande disponibilidade e custo reduzido para a sua obtenção, as fibras vegetais são utilizadas na tentativa de melhorar a resistência à tração, a ductilidade e o comportamento pós-fratura de concretos mistos feitos dessa maneira (AMZIANE; SONEBI, 2016).

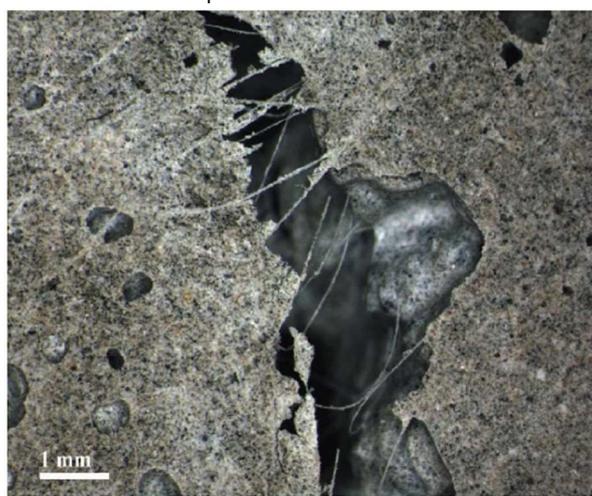
São grandes as fontes de biomateriais renováveis que podem ser utilizados a favor do desempenho requerido nos materiais da construção. Neste cenário destaca-se ainda a técnica de *self-healing* promovida por agentes biológicos introduzidos nas misturas à base de cimento, que promovem o desejado efeito de colmatação de fissuras (BERGH et al., 2020; DE BELIE et al., 2018). Tendo em vista a gama de possibilidades no desenvolvimento de biocompostos, e os benefícios já mencionados frente ao meio ambiente com o seu uso, o desempenho requerido (térmico, de condutividade, mecânico, de durabilidade, químico dentre outros) serão alcançados a partir da correta análise e proporcionamento de cada biomaterial a ser empregado, considerando as suas particularidades.

2.2.3 Fibras Poliméricas

Folliard et al. (2006) afirmam que incorporar fibras em materiais cimentícios pode contribuir com ductilidade e tenacidade à flexão, capacidade de fadiga e resistência à abrasão e ao impacto. Quanto à resistência à compressão, pesquisadores (KIM et al., 2011) destacam que o uso de fibras pode variar de ganhos desprezíveis a aumentos de até 20% da capacidade à compressão do concreto. O motivo pode estar relacionado com a ponte que as fibras realizam em microfissuras existentes no concreto, reforçando assim o compósito contra a ruptura (MALLAT; ALLICHE, 2011).

Abdulhameed, Nassif e Khayat, (2018) destacam o reforço de fibra como uma técnica frequente para melhorar a resistência à tração e flexão enquanto reduz a densidade de fissuras e a abertura de fissuras. Este efeito de ponte foi observado por Mallat e Alliche (2011), conforme micrografia apresentada na Figura 7, obtida por microscópio eletrônico de varredura, na qual pode ser observada uma fissura em concreto de reparo reforçado com fibras de poliacrilonitrilo.

Figura 7: Micrografia de fissura em concreto reforçado com fibra polimérica indicando o efeito “ponte” das fibras



Fonte: Mallat e Alliche (2011)

Em argamassas reforçadas com fibras, essas se distribuem aleatoriamente por todo o compósito e, quando endurecido, o reforço evita que as microfissuras da argamassa se transformem em microfissuras, atuando de forma benéfica ao combate do desenvolvimento de trincas (KIM et al., 2011). As forças de ponte de fissura fornecidas pelas fibras justificam o aumento da resistência à tração da argamassa reforçada com fibra, pois limitam a abertura da fissura e distribuem as tensões para a matriz próxima, aumentando consideravelmente resistência e capacidade de deformação do compósito (MALLAT; ALLICHE, 2011). Além disso, fibras de polímeros podem auxiliar no fechamento de fissuras, uma vez que aproxima as faces das fissuras o suficiente para facilitar a cicatrização autógena (MADDALENA; TAHA; GARDER, 2021).

Cada tipo de fibra possui uma dosagem recomendada pelo fabricante. Quantidades típicas de fibras sintéticas usadas são de pelo menos 0,1% em volume ou cerca de 1,8 g/L. Deve ser ressaltado que a adição de fibras impacta a demanda de água e a trabalhabilidade da mistura, sendo necessários ajustes no consumo de água e/ou aditivos

para uma trabalhabilidade adequada (KIM et al., 2011). Dentre os vários tipos de fibra existentes, a fibra de polietileno apresenta melhoria no desempenho do concreto, e por isso, é amplamente usada na engenharia prática (LIU et al., 2019). Toutanji (1999) afirma que o uso de 5% de sílica ativa combinada com 0,30% de fração volumétrica de fibra de polipropileno resulta em uma mistura ideal para aplicações de reparo, considerando a trabalhabilidade, aderência, resistência e permeabilidade. O autor destaca que a fibra de polipropileno tem mostrado bons resultados na redução de permeabilidade para o concreto (TOUTANJI, 1999). Nesta linha, também Liu, Jia e Wang (2019) avaliaram a durabilidade do concreto em função da resistência à permeabilidade. A partir dos testes de penetração de cloretos, os autores verificaram que com uma fração em volume de 1,5% de fibra de polipropileno, a profundidade de migração do íon cloreto do concreto armado foi reduzida em cerca de 22%. O motivo encontrado pelos autores é que a adição de fibras evita o desenvolvimento de trincas de contração e reduz a porosidade total, o que resulta na melhoria da durabilidade (LIU; JIA; WANG, 2019).

No entanto, Kim et al. (2011) ressaltam que nem sempre se consegue calcular o custo-benefício do uso de fibras, independentemente do tipo, e, portanto, o custo da adição de fibras pode se tornar um efeito negativo deste reforço.

2.2.4 Água e Aditivos

A água utilizada no amassamento de concretos e argamassas é o componente fundamental para que ocorram as reações de hidratação do cimento, e assim desenvolver as suas propriedades aglomerantes, além de conferir a plasticidade aos demais componentes da mistura (METHA; MONTEIRO, 2014). A água pode ser obtida a partir de diversas fontes tais como do abastecimento público, água recuperada de processos de preparação do concreto, água de fontes subterrâneas e água natural de superfície, seja ela proveniente de corpos hídricos, pluvial ou água residual industrial. Destaca-se que, destas fontes citadas, apenas a água potável dispensa ensaios para análise de avaliação preliminar quanto à presença de óleos e gorduras, detergentes, cor, material sólido, odor, ácidos e matéria orgânica (ABNT, 2009). As propriedades químicas também devem ser avaliadas, tais como teores de cloretos, sulfatos, álcalis e outras contaminações prejudiciais que

podem afetar o desempenho do concreto no estado fresco e a durabilidade da estrutura, a saber: açúcares, fosfatos, nitratos, chumbo e zinco (SANTANA et al., 2018).

A norma NBR 15900-1 (ABNT, 2009) prevê estudos comparativos que devem ser realizados com argamassas ou concretos, produzidos com a água em estudo e com água potável de referência, que atenda a todos os requisitos anteriores. São avaliados os tempos de pega, que não devem diferir em 25% do compósito de referência, a resistência à compressão aos 7 e 28 dias, que não deve diferir 10% da resistência à compressão média de corpos de prova preparados com água destilada ou deionizada. Por fim, no intuito de avaliar o concreto ou argamassa no estado fresco, também podem ser utilizadas as técnicas de reometria para comparação dos desempenhos entre a água de ensaio e a água padrão (ABNT, 2009b; SANTANA et al., 2018).

Do ponto de vista estrutural, o cuidado com a qualidade da água de mistura decorre dos sintomas patológicos desenvolvidos na estrutura, caso sejam empregadas águas não potáveis ou com presença de cloretos. Em FURNAS (1997) são descritos os vários inconvenientes do emprego de águas sem controle de qualidade, bem como os riscos de deterioração no concreto. Ainda, de acordo com Souza e Ripper (1998), estes compostos contribuem significativamente para a instalação e o desenvolvimento do processo de corrosão das armaduras. A quantidade de água utilizada na mistura de concretos e argamassas, expressa pelo fator água/cimento, influencia em propriedades tanto no estado fresco, como no estado endurecido, principalmente na resistência final do concreto (METHA; MONTEIRO, 2014; SOUZA; RIPPER, 1998).

Embora não haja uma normativa que estabeleça os requisitos mínimos e máximos da composição da água para argamassas especiais, a NBR 15900 (ABNT, 2009) estabelece os requisitos que devem ser obedecidos para que a água possa ser usada para a preparação do concreto, dentre eles quantidade de cloretos e de sulfatos aceitáveis na água. Quanto ao teor de ácidos, a norma define que a água deve apresentar um pH igual ou superior a 5. Também são indicados teores máximos de álcalis, com o equivalente alcalino de óxido de sódio não podendo exceder 1500 mg/L, exceto se pode atender as exigências da ABNT NBR 15577. Segundo a norma, adotar medidas preventivas à reação álcali-agregado (RAA) pode assegurar maior durabilidade às estruturas de concreto. A

última propriedade química requerida é em relação às contaminações na água de amassamento como açúcares, fosfatos, nitratos, chumbo e zinco, visto que podem alterar os tempos de pega e resistências do concreto (ABNT, 2009).

O controle do pH da água é importante, visto a influência que pode exercer nas reações químicas da microestrutura dos concretos. Metha e Monteiro (2014) afirmam que quando o pH da água é inferior 6,0 em concretos com alta permeabilidade, aumenta a taxa de ataque químico – condição prejudicial ao elemento. A Lei de Abrams demonstra a relação inversa entre a resistência e a relação água/cimento dos concretos. Uma vez que o aumento da relação água/cimento implica no aumento da porosidade da pasta, esta acarreta um progressivo enfraquecimento da matriz cimentícia e da zona de transição com o agregado devido ao excesso de água. Ambas as porosidades (da zona de transição e da matriz) determinam a resistência do compósito. No entanto, a falta de água gera uma hidratação ineficiente dos compósitos do cimento, ocorrendo para relações a/c menores que 0,38 (NEVILLE, 2016). Para equalizar as demandas de trabalhabilidade e hidratação da pasta, são adicionados aditivos.

Já no âmbito dos aditivos, o seu emprego pode conferir consideráveis vantagens físicas e econômicas ao concreto, sendo possível a sua utilização em situações nas quais existiam dificuldades consideráveis ou mesmo insuperáveis (NEVILLE, 2016). Quando se faz necessário o seu uso, seja para alterar, reforçar ou melhorar as propriedades em sua trabalhabilidade, durabilidade, ou ainda, adequar operações de preparo e lançamento da matriz cimentícia, o profissional precisa conhecer os materiais que está utilizando, bem como o comportamento que espera alcançar, além de conhecer os tipos de aditivos existentes no mercado (SOUZA; RIPPER, 1998).

Antes de ser utilizado, o aditivo deve ser submetido à aprovação seguindo os critérios estabelecidos na NBR 11768 (ABNT, 2019a), Partes 1 – Requisitos; 2 – Ensaio de Desempenho e 3 – Ensaio de Caracterização. Dependendo da funcionalidade que a argamassa irá performar e o ambiente de exposição, os aditivos de maior interesse para reparos, reforços e proteção são os aceleradores de pega e endurecimento, os retardadores, os redutores de água/ plastificantes e os expansores (HELENE, 1992).

Ainda, deve ser avaliado o tipo de aplicação que se deseja, se tixotrópica, projetável ou autoadensável. Para elaborar uma argamassa mais fluida, deve-se neste caso

trabalhar com a adição de superplastificante para que a resistência não seja comprometida com o uso excessivo de água. Santana et al. (2018) sugere para estes casos o fator água/cimento não deve exceder 0,40.

3 AUTOCICATRIZAÇÃO EM MATERIAIS À BASE DE CIMENTO

As fissuras que ocorrem nas estruturas de concreto podem ser causadas por carregamentos, alteração volumétrica devido a altas temperaturas, fluência, assentamento plástico, encolhimento ou mecanismos de deterioração, como reação álcali-agregado, ataque por sulfatos e ciclos de congelamento e degelo (KAN et al., 2010; HASPARYK, KUPERMAN, 2019), durante o processo de construção e/ou durante a vida útil. Independente da causa, este mecanismo diminui a durabilidade das estruturas de concreto, por proporcionar caminhos preferenciais para a penetração de agentes potencialmente agressivos que, além de danificar o concreto, podem atacar a armadura (SHIELDS et al., 2021), enfraquecer mecanicamente a estrutura e reduzir a sua rigidez (KAN et al., 2010).

Com as consequências negativas à durabilidade da estrutura trazidas pela fissuração do concreto, variadas tecnologias na área da autocicatrização do concreto vêm sendo desenvolvidas (FERRARA; KRELANI, 2013; JONKERS, 2011; SCHWANTES-CEZARIO et al., 2018; WIKTOR; JONKERS, 2011). O termo autocicatrização é definido por Zhang et al. (2020) como a auto capacidade do concreto de reparar pequenas fissuras, sem qualquer diagnóstico externo ou intervenção humana. A autocicatrização promove o fechamento de fissuras, independentemente de sua origem, melhorando assim a durabilidade e as propriedades mecânicas, o que traz um aumento a vida útil do compósito cimentício (KAN *et al*, 2010). Ainda, esse processo pode reduzir o impacto ambiental, por exemplo, por meio da diminuição da produção de cimento, grande responsável pela emissão de CO₂, e resultar em economia de custos para atividades de manutenção e reparo (SHIELDS et al., 2021).

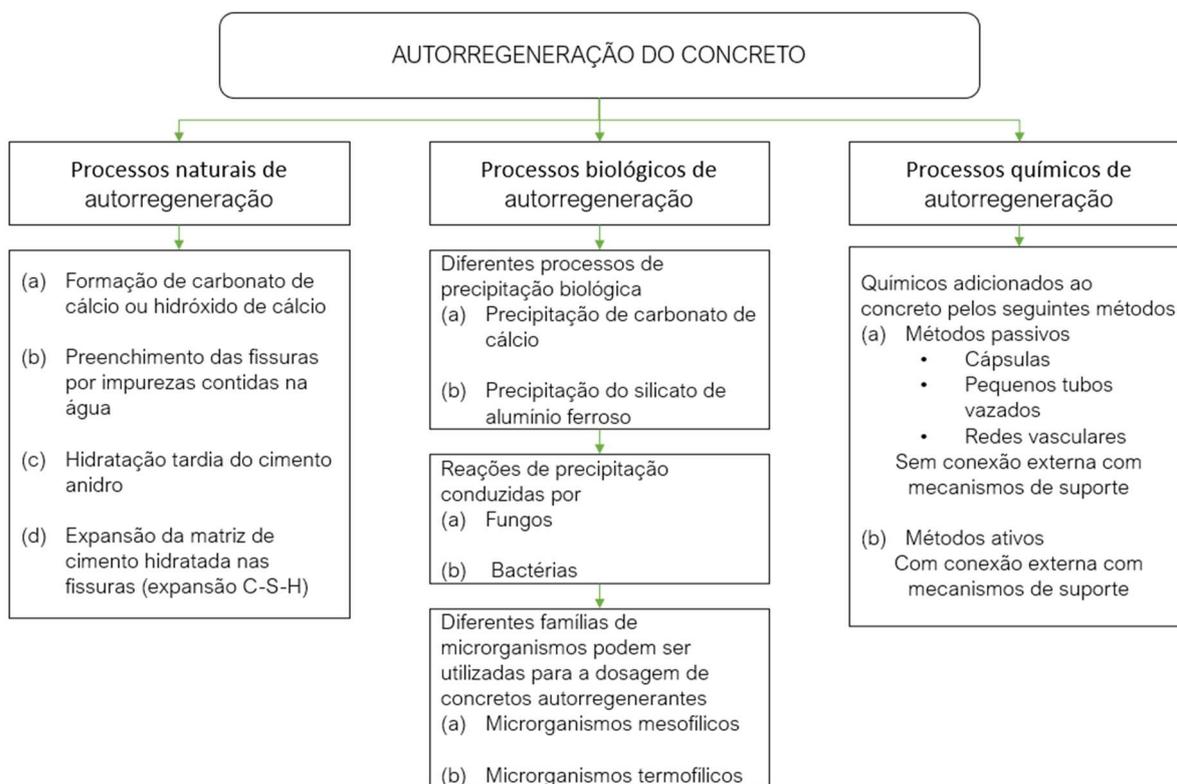
Vale ressaltar que existem duas classificações para a autocura de compósitos cimentícios: a **cicatrização autógena** e a cicatrização autônoma. A primeira é tida como um mecanismo natural, que ocorre ao longo do tempo através de grãos de cimento ainda não hidratados ou por meio de adições pozolânicas não reagidas no interior da matriz. Nesta condição, estes processos ocorrem tardiamente, podendo haver ainda posterior carbonatação do hidróxido de cálcio, preenchendo vazios e reparando eventuais fissuras (VAN TITTELBOOM et al., 2013). Já a **cicatrização autônoma** representa um

processo de adição de materiais não comumente adicionados ao concreto com a finalidade de aumentar a sua capacidade de cicatrização.

Diferentes tipos de agentes autocicatrizantes vêm sendo propostos na literatura, com os respectivos mecanismos e propriedades almeçadas que irão nortear a sua escolha. Van Tittelboom e de Belie (2013) citam os principais agentes provedores da cicatrização de fissuras, de forma autógena e autônoma. No primeiro grupo os autores citam as soluções alcalinas e minerais, cinza volante, escória de alto forno, agentes à base de sulfoaluminato de cálcio e misturas cristalinas. Já no grupo da autocicatrização autônoma, os autores citam os agentes bacterianos e agentes químicos como o cianoacrilato, epóxi, metil metacrilato, silicone etc. Cada um com o seu agente propulsor de ativação, como umidade, calor, O_2 , CO_2 , entre outros (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

Keyvanfar, Shafaghat e Andalib (2014) propõem o fluxograma (Figura 1) contendo os principais mecanismos de autocicatrização de matrizes cimentícias trazidas pela literatura.

Figura 8: Mecanismos de autorregeneração do concreto (naturais, biológicos e químicos)



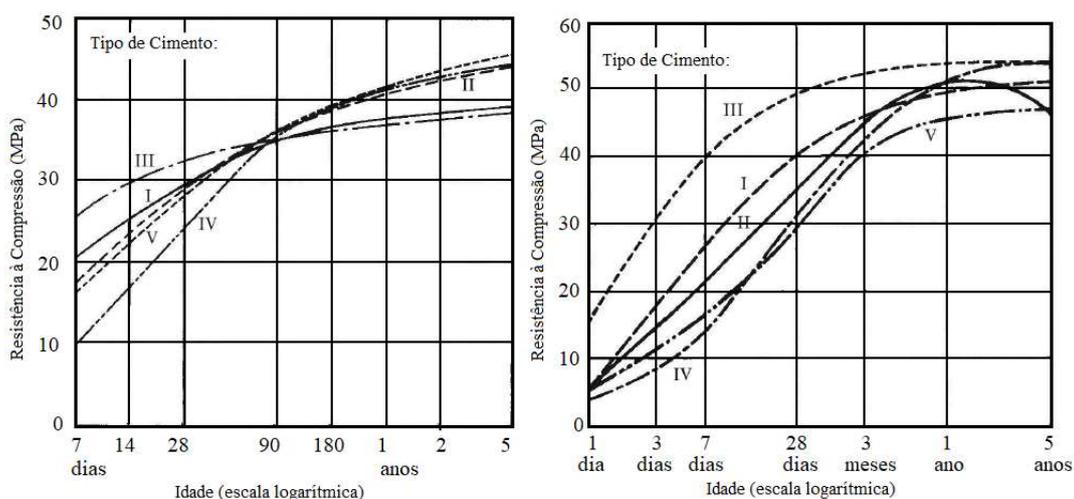
Fonte: traduzido de Keyvanfar, Shafaghat e Andalib (2014)

Pacheco (2020) destaca que independente do mecanismo, vários são os fatores que influenciam no desempenho do fenômeno da autocicatrização, como os constituintes da mistura, presença de água, pressão da água e seu pH, umidade relativa do ar, temperatura, abertura da fissura, atividade da fissura englobando a estabilidade e abertura progressiva, e teor de agente regenerante, quando utilizado.

3.1 PROCESSO AUTÓGENO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

A utilização de pozolanas em substituição ao cimento constitui-se como uma forma de autocicatrização autógena. O fenômeno é associado ao maior tempo necessário para a ocorrência da reação das pozolanas decorrente da necessidade de reação com o CH, que é um produto da hidratação do cimento, para haver, então, a formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (SILVA et al., 2021). De acordo com Neville (2016), nem sempre é possível quantificar a diferença de velocidade de ganho de resistência entre um cimento Portland simples sem adições e um com adições pozolânicas. Contudo, é possível confirmar que até a idade de 28 dias os cimentos que possuem adições pozolânicas como cinza volante e sílica ativa, possuem resistência inferior ao cimento Portland comum (Figura 2).

Figura 9: Evolução da resistência no tempo para diferentes tipos de Cimento Portland, sendo (I) puro, (II) Com escória, pozolana ou cinza volante, (III) Composto com escória de alto-forno, (IV) Composto com pozolanas (V) Resistente a sulfatos



Fonte: Neville (2016)

De acordo com Maddalena, Taha e Garder (2021), existe uma tendência geral, na qual cimentos com menor velocidade de endurecimento tenham uma resistência

final um pouco superior, já que, de acordo com Neville (2016), quanto mais lentamente a estrutura é formada, mais denso será o gel C-S-H e maior a resistência final. A reação tardia decorrente da atividade pozolânica promove a redução de poros da matriz e fechamento de fissuras iniciais de retração, contribuindo com a durabilidade do compósito cimentício (MADDALENA; TAHA; GARDER, 2021).

O mecanismo de autocicatrização autógena irá depender da idade de abertura da fissura no concreto. Considerando que em uma matriz cimentícia confeccionada com um cimento Portland e adições pozolânicas vão existir diferentes fases de hidratação de ligante ao longo do tempo, em idade precoce a hidratação das partículas de cimento anidro são predominantes. Por outro lado, em idades avançadas a autocicatrização é promovida principalmente pela lixiviação de Ca(OH)_2 da matriz, em contato com umidade, e em menor parcela pelos materiais cimentícios suplementares que permaneceram anidros mesmo em idade avançada, promovendo uma hidratação contínua (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013). No entanto, Pacheco (2020) destaca que não se pode atribuir confiabilidade a múltiplos fenômenos de cicatrização, visto que o fenômeno tem dependência da disponibilidade de partículas ainda não hidratadas, sendo essencial uma fonte de umidade.

A autocicatrização autógena foi identificada por Maddalena e Taha, Garder (2021) por meio de ensaios de absorção de água e densidade em amostras danificadas e curadas. As argamassas foram proporcionadas com cimento, areia, água e pozolanas, como a sílica ativa, cinza combustível pulverizada e escória granulada moída de alto forno, substituídas parcialmente ao cimento. Os resultados de absorção mostraram uma recuperação de absorção pós-cura de até 68% em comparação com a mistura apenas com cimento Portland. Também concluíram que a capacidade dos materiais cimentícios suplementares reduziram o tamanho geral dos poros em mais de 88% em comparação com as misturas de cimento, mais comumente chamado de “refinamento dos poros”.

Alyousif (2016) avaliou o efeito da capacidade de autocicatrização em compósitos cimentícios incorporando diferentes misturas minerais, a saber: escória de alto forno e cinza volante com variações de baixo, médio e alto cálcio. Os corpos de prova foram pré-fissurados e submetidos à submersão em água a 20°C por 24 horas, secagem em estufa a 55 °C por 22 horas e resfriamento em ar de laboratório a $21 \pm 1^\circ\text{C}$ por 2 horas para simular ambientes externos cíclicos, como sol e altas temperaturas. Os resultados experimentais

revelaram que em corpos de prova pré-fissurados todas as variações de pozolanas apresentaram recuperação nos resultados de sorptividade da água, principalmente nos primeiros sete dias de cura, mostrando o fenômeno da cicatrização de fissuras pelas reações de hidratação.

Também Hung, Su e Su (2018) desenvolveram misturas de concreto com escória de alto forno e cinza volante, de forma híbrida, para verificar o mecanismo de autocicatrização. De acordo com os autores, mantendo as amostras em atmosfera de umidade elevada, foi possível verificar a formação de produtos de cicatrização aos 28 dias. Nesta idade, as maiores fissuras apresentaram quantidade crescente de CaCO_3 e decrescente de C-S-H (HUNG; SU; SU, 2018).

Pacheco (2020) avaliou a autocicatrização do concreto até a idade de 84 dias, a partir de quatro mecanismos: pela própria capacidade do cimento, pela adição de pozolanas, por soluções químicas e por soluções bacterianas. No que diz respeito às adições minerais, as pozolanas adicionadas foram sílica ativa e cinza volante, sendo observada uma cicatrização média na idade de 84 dias, do tipo contínua, de até 0,53 mm e 0,45 mm para a pontual. Para as amostras apenas com consumo de cimento, os resultados foram mais expressivos, tendo sido obtida uma cicatrização média contínua de até 0,68 mm e pontual de até 1,5 mm. Para as amostras contendo agentes químicos foram obtidos os melhores resultados, apresentando uma cicatrização média de até 1,66 mm para do tipo pontual e 1,48 mm para a cicatrização do tipo contínua, indicando o maior desempenho de autocicatrização em concretos por agentes químicos (PACHECO, 2020).

Os resultados de Pacheco (2020) vão ao encontro aos de Zhang et al. (2020), que afirmam que por meio da associação com aditivos ou agentes de cura, a eficiência da **autocicatrização autógena** pode ser ainda melhorada, transformando-a em **autocicatrização autônoma**.

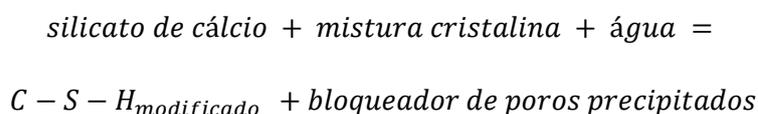
3.2 AUTOCICATRIZAÇÃO POR AGENTES QUÍMICOS

O processo de cicatrização química pode ser obtido por meio da injeção de compostos químicos na região fissurada e pela mistura de reagentes líquidos químicos, semelhantes a uma cola, com concreto fresco (TALAIEKHOZAN et al., 2014). Além disso,

pode-se obter a cicatrização química com aditivos na forma de pó à base de carbonatos, que atuam como um catalisador cristalino com a capacidade de autocicatrização cimentícia em vazios de concreto fissurado, a fim de melhorar a estabilidade química e o tempo de autocura (TAKAGI; LIMA; HELENE, 2012).

De acordo com Ferrara e Krelani (2013), a utilização dos chamados “aditivos cristalinos” já é bem conhecida quando se almeja propriedades de estanqueidade e impermeabilidade dos elementos estruturais, se necessário. Este tipo de aditivo, segundo Takagi et al. (2018), é um material cimentício sintético composto por sílica muito fina e outros produtos químicos ativos, classificados pelo *American Concrete Institute Committee 212* (ACI, 2010) como impermeabilizantes hidrofílicos e aditivos redutores de permeabilidade para condições hidrostáticas (PRAH). Embora exista uma variedade destes aditivos cristalinos comercializados no mercado da construção civil, as suas composições químicas são mantidas em sigilo pelos fabricantes (ZIEGLER et al., 2020).

O mecanismo de atuação destes agentes ocorre pela reação de suas substâncias com o hidrato do cimento, o hidróxido de cálcio, na presença de água, formando C-S-H, que preenchem os poros e as fissuras do compósito cimentício, tornando-o impermeável (ROIG-FLORES; FORMAGINI; SERNA, 2021; TAKAGI et al., 2018). O processo de cicatrização de fissuras pode ocorrer inclusive em idades avançadas, pois de acordo com Ferrara e Krelani (2013), a reação consome a umidade no interior do concreto sempre que o material volta a entrar em contato com a água e/ou umidade do ambiente. Ziegler et al. (2020) apresentam uma reação esquemática que resume o processo de cristalização destes aditivos dentro da matriz cimentícia:

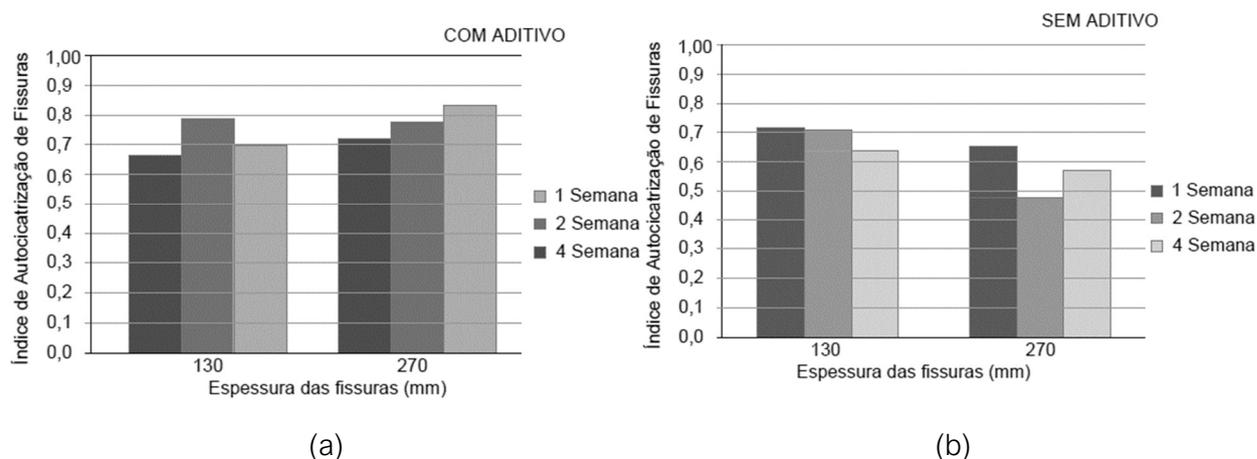


Takagi, Lima e Helene (2012) elaboraram uma mistura padrão de um concreto de alto desempenho com três tipos de cimento, com variações dos teores de escória de alto-forno, com e sem adições de aditivo cristalino (2,5% em relação à massa de cimento) e fibra de vidro. Os cimentos utilizados na pesquisa foram o CPV-ARI (sem adição de escória), CP-III-RS (com cerca de 55% de escória) e o CP-II-E (com aproximadamente 35% de escória). Os pesquisadores relataram que o tipo de cimento, os teores de escória

de alto-forno e os teores de aditivos cristalinos influenciaram o efeito autocicatrizante. Os corpos de prova foram submetidos à fissuração por resistência à compressão aos 28 dias para avaliação da perda de desempenho. Dentre os seis tipos de amostras ensaiadas à resistência à compressão, a amostra que apresentou maior resistência à compressão aos 28 dias foi a de cimento CP-V com o aditivo cristalino. No entanto, a recuperação da resistência após a fissuração promovida pela autocicatrização foi maior quanto maior os teores de escória de alto forno, ou seja, CP-III-RS > CP-II-E > CP-V. Os autores atribuem este efeito à autocicatrização autógena, uma vez que quanto maior o teor de escória de alto forno na matriz, maior é a quantidade de partículas não reagidas disponíveis para a reação tardia, sendo fundamental a cura úmida a longo prazo (após 56 dias). Em relação ao uso de aditivo cristalino, a recuperação da resistência mecânica foi maior para os CPs com o uso deste material (TAKAGI; LIMA; HELENE, 2012).

Ferrara e Krelani (2013) avaliaram a recuperação das propriedades mecânicas e os índices de autocicatrização de concretos proporcionados com e sem aditivos cristalinos. Os corpos de prova foram pré-fissurados e submetidos a ciclos de variação de umidade e aceleração de temperatura, representando as condições de exposição ambiental. A presença do aditivo cristalino como catalisador das reações de autocura melhorou a capacidade de recuperação de carga em função da duração da exposição, e a capacidade de autocicatrização foi maior quanto maior a largura da fissura (Figura 10a) (FERRARA; KRELANI, 2013). Os autores atribuem o fato devido à maior superfície de fissura livre e, portanto, à exposição à umidade do ambiente com maior presença de partículas de cimento anidro e de catalisadores não reagidos. Por outro lado, para misturas sem o catalisador cristalino essa tendência não foi observada visto que a capacidade de recuperação de carga foi reduzindo com o aumento de abertura da fissura (Figura 10b). Quanto ao fechamento de fissuras, a adição dos catalisadores aumentou a capacidade de autocicatrização com mais de 80% de recuperação da abertura de fissura, (Figura 10a).

Figura 10: Índice de autocicatrização da fissura para concretos com (a) e sem (b) aditivo cristalino, em função da abertura da fissura e do tempo de exposição



Fonte: Traduzido de Ferrara e Krelani (2013)

Por sua vez, Ziegler et al. (2020) avaliaram a autocicatrização em fissuras de concreto por meio de três diferentes aditivos cristalizantes disponíveis no mercado à base de óxido de cálcio e dióxido de silício, nomeados pelos autores por “X”, “Y” e “Z”, sendo os corpos de prova submetidos a dois e seis ciclos de umidificação-secagem por períodos de 28 e 84 dias, respectivamente. Com o emprego de análises por microscopia ótica, os autores concluíram que os aditivos não foram eficientes em promover a autocura na superfície das fissuras em nenhum dos três concretos estudados. No entanto, a passagem de cloretos por difusão no concreto reduziu com o emprego dos aditivos cristalinos, indicando uma melhor cicatrização interna desses materiais e, conseqüentemente, maior previsão da vida útil do concreto no que diz respeito à corrosão por cloretos (ZIEGLER et al., 2020).

Embora a maioria dos agentes de cura aplicados sejam de base química (TAKAGI et al., 2018), as pesquisas com aplicação de esporos bacterianos como agentes de autocicatrização vem crescendo na última década, visto o seu potencial comprovado de precipitação de CaCO_3 no interior de fissuras (GHELLERE, 2021; PACHECO, 2020; SCHWANTES-CEZARIO et al., 2022) e seus benefícios ao meio ambiente – base biológica, ecologicamente correta, econômica e durável (KRISHNAPRIYA; VENKATESHBABU; PRINCE ARULRAJ, 2015).

3.3 AUTOCICATRIZAÇÃO POR AGENTES BIOLÓGICOS

A tecnologia mais recente na área de autocicatrização de materiais à base de cimento é a promovida por agentes biológicos como bactérias (TALAIEKHOZAN et al., 2014). Por esta técnica, o fechamento das fissuras do material cimentício ocorre pela precipitação de CaCO_3 metabolizado por bactérias (JONKER, 2011; SCHWANTES, 2017; LENZ et al., 2023) que são adicionadas na água de amassamento, encapsuladas na forma de esporos, e por fim, encapsuladas em agregados graúdos leves ou mesmo aspergidas no concreto endurecido (WANG *et al.*, 2018). Van Tittelboom e de Belie (2013) destacam que esta solução pode ser considerada promissora, principalmente em locais não visíveis e/ou de difícil acesso, ou ainda quando se faz necessário o uso constante que inviabilize a interrupção temporária para serviço de reparo, como pontes, túneis e barragens.

O encapsulamento de bactérias, seja de forma sintética ou feito naturalmente, tem a função de protegê-las contra o pH alcalino da matriz cimentícia, do processo de fissuras por retração ou hidratação tardia de grãos cimentícios anidros, mantendo a sua viabilidade por longo período (JONKERS et al., 2010; WANG et al., 2018). O encapsulamento natural envolve a formação de esporos, enquanto o encapsulamento sintético aborda a incorporação das bactérias em agregados graúdos leves, como já comentado anteriormente, a exemplo na perlita ou em argila expandida (PACHECO, 2020; WIKTOR; JONKERS, 2011). Este último processo ocorre por meio de processos específicos de secagem e saturação dos agregados, seguidos de saturação dos mesmos em solução de lactato de cálcio ou outro nutriente que seja consumido pelas bactérias, com posterior suspensão de esporos bacterianos (PACHECO, 2020).

Van Tittelboom e de Belie (2013) destacam que nas pesquisas iniciais sobre bactérias em matrizes cimentícias, a preocupação era com o período em que as bactérias ficariam ativas. Além disso, as bactérias podem ser danificadas ao longo do tempo, visto que sua atividade metabólica diminui em ambientes com pH acima de 12 (WANG *et al.*, 2012). Isso levou os pesquisadores Jonkers et al. (2010) e Wang, De Belie e Verstraete (2012) a trabalharem com esporos, que são células bacterianas dormentes muito resistentes, capazes de resistir a tensões mecânicas e químicas e permanecerem viáveis durante períodos maiores do que 50 anos na natureza. Este fato acaba sendo uma grande vantagem em relação aos

processos autógenos de autocicatrização promovidos por adições pozolânicas. Enquanto estes são consumidos no processo de hidratação, visto que o próprio agente pozolânico é quem reage, os agentes biológicos se mantêm ativos na matriz cimentícia enquanto houver condições propícias à sua sobrevivência, produzindo carbonatos em seus processos metabólicos, sem serem consumidos neste processo (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

Visto que a seleção da bactéria a ser utilizada deve levar em consideração o ambiente alcalino do concreto, a pré-disposição em formar esporos e, principalmente, não apresentar risco patogênico às pessoas e ao meio ambiente (JONKERS et al., 2010), as bactérias do gênero *Bacillus sp.* São as mais aptas e utilizadas (SCHWANTEZ, 2017). Além disso, são encontrados facilmente no solo, se apresentam como ótimos precipitadores de CaCO_3 , possuem facilidade de adaptação em diferentes condições ambientais e uma vasta diversidade (VALENCIA GONZÁLEZ; SANTANA; CARVALHO, 2014).

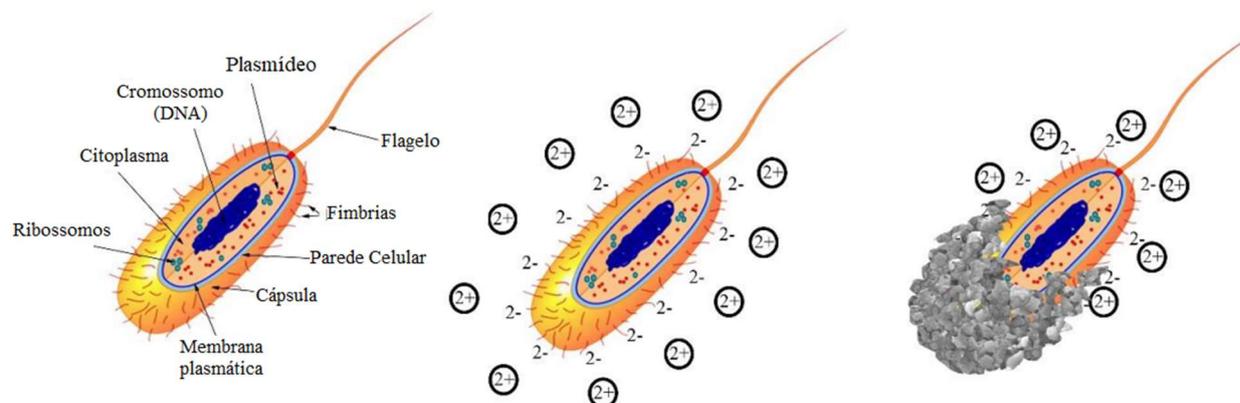
Os agentes biológicos do gênero *Bacillus* têm a capacidade de precipitação de cristais de carbonato de cálcio (CaCO_3) em materiais cimentícios a partir de dois metabolismos principais: hidrólise da ureia ou pela mudança de pH. Se faz necessário, para ambos os processos metabólicos, a existência de uma fonte de gás carbônico (CO_2) e uma de cálcio (Ca) para promover esta precipitação. Os cristais precipitados promovem a autocicatrização de poros e fissuras nos compósitos cimentícios, aumentando a durabilidade do material pelo bloqueio da entrada de agentes agressivos externos, como água, cloretos, ácidos, sulfatos, entre outros (JONKERS et al., 2010).

Ainda que a maioria dos estudos envolvendo a autocicatrização bacteriana utilizem o mecanismo hidrólise da ureia (LIU; JIA; WANG, 2019; WANG; DE BELIE; VERSTRAETE, 2012), este processo pode antecipar a deterioração dos materiais cimentícios, pois para cada íon de carbonato liberado, são produzidos dois íons de amônio, o que irá reduzir a alcalinidade da matriz e prejudicar a durabilidade do compósito. Sendo assim, vem sendo explorado o mecanismo de mudança de pH ocasionada pela produção de biofilme na superfície das bactérias, sem que ocorra o desenvolvimento de um subproduto prejudicial aos materiais cimentícios (SCHWANTEZ, 2017).

O biofilme é formado por íons de cálcio Ca^{2+} que são atraídos à parede celular bacteriana carregada negativamente. Neste processo, o pH do meio é alterado, e o íon carbonato CO_3^{2-} , derivado principalmente do CO_2 produzido na respiração celular, reage

com o Ca^{2+} , ocasionando a precipitação de CaCO_3 (Figura 11) (SCHWANTEZ, 2017; SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2016).

Figura 11: Estrutura das bactérias e mecanismos da autocicatrização (a) estrutura das bactérias (b) células carregadas negativamente (c) produção biomineral pelos íons



Fonte: Traduzido de Seifan, Samani e Berenjian (2016)

Os precipitados de CaCO_3 formados pelo processo metabólico bacteriano podem se apresentar na forma de carbonatos de cálcio que representam, principalmente, os três polimorfos anidros mais conhecidos (calcita, aragonita e vaterita), duas fases cristalinas hidratadas (mono-hidrocalcita e ikaite), e o carbonato de cálcio amorfo (ACC, do inglês *amorphous calcium carbonate*) (DHAMI; REDDY; MUKHERJEE, 2012).

Vale lembrar que para que ocorra o processo metabólico é imprescindível tanto uma fonte de cálcio adicional como uma fonte de nutrientes incorporada na matriz cimentícia, ambos que irão influenciar na quantidade e característica do CaCO_3 formado (GHELLERE, 2021; SCHWANTEZ, 2017). Jonkers et al. (2010) avaliaram a influência de diferentes fontes de cálcio em uma matriz cimentícia com bactérias e concluíram que a adição de lactato de cálcio aumentou em 28% a resistência à compressão em comparação à amostra referência, sendo a melhor fonte de cálcio estudada.

A partir de uma revisão bibliográfica de Schwantez-Cesario (2017) e Ghellere (2021), dentro dos diversos gêneros bacterianos estudados que promovem a autocicatrização de compostos cimentícios, destaca-se a *Bacillus subtilis*, que é estudada na produção de CaCO_3 em meios cimentícios com adição de uma fonte de cálcio.

Schwantez-Cesario (2017) avaliou a eficiência do agente biológico de autocicatrização *Bacillus subtilis* AP91 incorporado em argamassa cimentícia de duas formas: na água de amassamento e aspergido em solução aquosa na superfície do corpo de prova, em uma concentração de 10^5 esporos/ml. Os melhores resultados ocorreram para a condição de adição dos esporos na água de amassamento durante o processo de mistura. Nos resultados de resistência à compressão, obteve-se um incremento de 31,3%, uma redução tanto de absorção de água quanto de índice de vazios de 3,5% e 6,3%, respectivamente, mostrando resultados positivos e promissores para a biocicatrização.

Pacheco (2020) obteve resultados de fechamento pontual de fissuras de até 0,58 mm e do tipo contínuo de até 1,48 mm promovidos por *Bacillus subtilis* na concentração de 3×10^6 , se mostrando mais eficiente que o conjunto de materiais pozolânicos também avaliado.

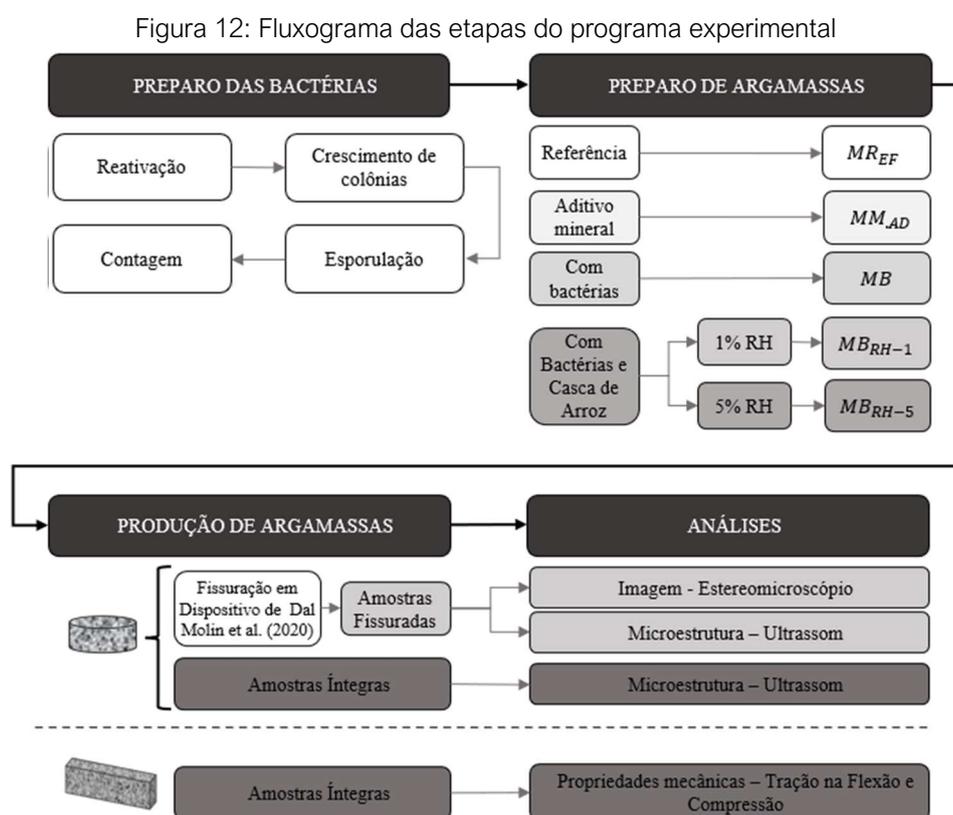
Ghellere (2021) avaliou o potencial de autocicatrização de fissuras por cinco diferentes agentes biológicos produtores de CaCO_3 , todas do gênero *Bacillus* sp., a saber: *Bacillus subtilis* AP91 (referência) como a única espécie conhecida, duas semelhantes à espécie *Bacillus subtilis* e duas semelhantes à espécie *Bacillus cereus*. Suas propriedades foram avaliadas quando submetidas em meio padrão e alcalino e incorporadas à matriz cimentícia por três diferentes formas: na água de mistura, por aspersão no corpo de prova e por estes dois métodos combinados. A escolha por estes tipos de bactérias se deu em virtude da maior produção de CaCO_3 quando comparado com outras espécies, em um estudo preliminar. O melhor potencial de fechamento de fissuras ocorreu por meio da *Bacillus subtilis* AP91, a qual apresentou em 100% das regiões das fissuras a precipitação de carbonato de cálcio. Quanto à resistência à compressão, aos 120 dias as amostras com bactérias *B. subtilis* AP91 e *B. cereus* obtiveram 41,38 MPa e 41,51 MPa, respectivamente, contra 36,94 MPa da amostra referência sem bactérias, mostrando um incremento de, aproximadamente, 11% para os concretos incorporados com os dois agentes biológicos.

Diante do exposto, e apesar de mais recentes as pesquisas nessa área, o potencial de emprego dos agentes biológicos se mostra atrativo, e em especial com o emprego da bactéria da espécie *Bacillus subtilis* sp. Trouxeram interesse para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Aliando esta tecnologia em uma argamassa com o uso de fibras poliméricas, que auxiliam no fechamento de fissuras, e materiais pozolânicos que potencializam a autocicatrização autógena na matriz cimentícia, cria-se uma argamassa especial com potencial de autocicatrização, além de torná-la sustentável. Por fim, nesta mesma vertente, o emprego de biomassas de resíduos agroindustriais em argamassas, sem gasto de energia em seu tratamento, como a casca de arroz em substituição parcial ao volume de agregado miúdo, corrobora com o desenvolvimento de materiais economicamente atrativos e ecologicamente corretos, o que contribui para o desenvolvimento sustentável.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi dividido em etapas e está apresentado no fluxograma da Figura 12. O estudo contou com o preparo de bactérias, o preparo e produção das argamassas em dois formatos (prismático e cilíndrico) e finalizou com as análises visuais, da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e das propriedades mecânicas.



4.1 MATERIAIS

Neste estudo foram desenvolvidas argamassas especiais à base de cimento Portland, com cinza volante e sílica ativa em adição ao cimento nos teores de 10 e 25%, respectivamente, areia natural quartzosa, casca de arroz (CA) *in natura* em substituição ao agregado miúdo natural nos teores de 1 e 5%, fibras de polipropileno, aditivo superplastificante e agentes biológicos (bactérias) incorporados na CA ou inseridos na água de amassamento.

O uso do cimento Portland CPV-ARI foi escolhido devido ser o cimento comercial com maior teor de clínquer. As pozolanas foram empregadas com o intuito de melhorar a capacidade de colmatação de poros e fissuras ao longo do tempo, devido às reações pozolânicas tardias, bem como contribuir com a pegada de carbono, reduzindo a liberação de CO₂ com a produção do clínquer. Utilizou-se casca de arroz (CA) *in natura*, um resíduo agroindustrial, de origem renovável e curto ciclo de vida, com potencial de emprego em matrizes cimentícias como substituto de agregados materiais de fonte não renovável.

A caracterização física dos aglomerantes (cimento e pozolanas) seguiu a NBR 16605 (ABNT, 2017) e a caracterização química ocorreu por ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX) em espectrômetro Rigaku modelo ZSX Primus IV, equipado com tubo de Rh, ambos apresentados na Tabela 4. A granulometria dos aglomerantes foi obtida a partir do ensaio de granulometria por difração a laser (Figura 13), com auxílio do equipamento CILAS 1190, (faixa de leitura de 0,04 a 2500 μm). Por fim, a avaliação do teor de sólidos dos materiais foi obtida por meio da análise termogravimétrica em equipamento da marca PerkinElmer, modelo STA 8000 (Figura 14).

Figura 13: Granulometria por difração à laser do cimento CPV-ARI, sílica ativa e cinza volante

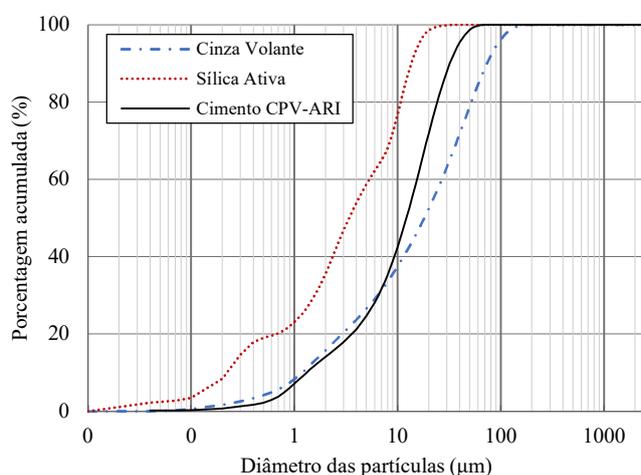


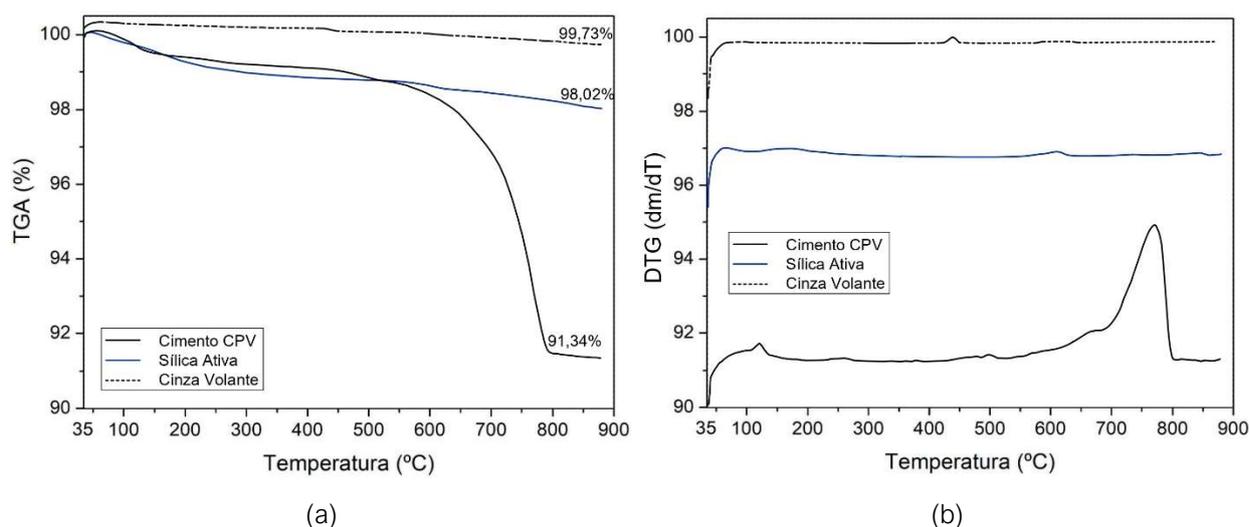
Tabela 4: Propriedades químicas e físicas do cimento e das adições minerais

Óxidos Analisados (%)	Cimento CPV	Sílica Ativa	Cinza Volante
CaO	49,93	1,53	2,66
SiO ₂	25,45	92,5	65,49
Al ₂ O ₃	7,37	0,31	22,10
MgO	5,62	0,59	0,69
SO ₃	2,61	0,19	0,25
Fe ₂ O ₃	2,44	0,19	5,09
K ₂ O	1,32	1,91	1,71
TiO ₂	0,41	-	0,85
Na ₂ O	0,16	0,33	0,31
MnO	<LQ	0,06	<LQ
P ₂ O ₅	<LQ	0,21	0,11
Cl	-	0,15	-
LOI	4,58	1,98	0,73
Soma (%)	99,89	99,95	100,00
Massa Esp.(g/cm ³)	3,07	2,22	2,04
D10 (μm)	1,32	0,27	1,18
D50 (μm)	12,19	3,92	18,04
D90 (μm)	32,09	13,54	73,15

LQ: Limite Quantificável

As curvas granulométricas indicam que, para o diâmetro médio dos aglomerantes (D50), a cinza volante possui diâmetro de 1,5 e 4,6 vezes superior ao cimento e à sílica ativa, condizendo com as médias encontradas na literatura (RAMPANELLI, 2021; METHA E MONTEIRO, 2014).

Figura 14: Análise termogravimétrica dos materiais cimento CPV-ARI, sílica ativa e cinza volante das curvas (a) TG e (b) DTG



Foram identificados três picos de perda de massa no cimento utilizado (Figura 14). O primeiro pico ocorre até 150°C e, segundo Neves Junior (2014), é resultado da desidratação do gesso. O segundo pico ocorre entre 350 e 450°C e está relacionado à decomposição do hidróxido de cálcio. Já o terceiro pico é o mais expressivo e ocorre entre 450 e 700°C, sendo originado da decomposição do CaCO_3 (NEVES JUNIOR, 2014).

Como agregado miúdo foi empregada uma areia natural fina, de origem quartzosa do Rio Paraná, com módulo de finura e dimensão máxima obtidos a partir do método de peneiramento, apresentando na Tabela 5. A massa específica e absorção foram obtidas de acordo com a NBR 16916 (ABNT, 2021), enquanto a massa unitária e o índice de vazios seguiram as diretrizes da NBR 16972 (ABNT, 2021) – método A, dispostos na Tabela 5.

As fibras de polipropileno foram adicionadas com o intuito de auxiliar no processo de indução de fissuras, para que a amostra não se partisse por completo, criando pontes de ligação entre as duas metades. Este material está caracterizado na Tabela 6 e foi adicionado na quantidade de 1,4 kg/m³, conforme indicação do fabricante.

Tabela 5: Propriedades físicas da areia natural

Propriedades	Descrição
Módulo de Finura	1,76
Diâmetro Máximo	1,20 mm
Massa Específica	2,34 g/cm ³
Absorção	1,18
Massa Unitária	1,66 g/cm ³
Índice de Vazios	25%

Fonte: Autora

Tabela 6: Propriedades da fibra de polipropileno

Propriedades	Descrição
Matéria-prima	100% Polipropileno
Diâmetro do Filamento	18 microns
Cor	Branca
Densidade	0,94 g/cm ³
Comprimento	12 mm
Resistência a tração	80 MPa
Alongamento	5 GPa
Resistência a UV	Alta
Incorporação de ar no concreto	Sem efeito

Fonte: Fabricante

Para o proporcionamento das argamassas, a relação água/aglomerantes foi fixada em 0,40, referente à soma dos materiais cimento e pozolanas. Para garantir a trabalhabilidade, incorporou-se à mistura um aditivo superplastificante de base polimérica (Tabela 7), na quantidade de 0,70% em relação à massa de aglomerantes. Como forma de comparar os resultados obtidos da autocicatrização da matriz promovida pelas bactérias *Bacillus subtilis AP91* e pelas adições pozolânicas, será estudado este fenômeno a partir de um aditivo mineral autocicatrizante, fornecido pelo fabricante. A quantidade indicada para a mistura cimentícia é 1,40 kg/m³.

Tabela 7: Propriedades do aditivo superplastificante

Propriedades	Aditivo Superplastificante	Aditivo Mineral
Base química	Lignosulfonatos e aditivos especiais	65 a 80% Cimento Portland
Aspecto	Líquido castanho escuro	Pó cinza claro
Densidade (g/cm ³) ^{1) 2)}	1,187	1,15
pH ^{1) 2)}	5,41187	10 - 13 (10% em solução)
Teor de Sólidos ^{1) 2)}	43,97	-
Ponto de Fusão	-	> 1000°C

¹⁾Fonte: Fabricante e Furnas (2019, apud OLIVEIRA, 2022). ²⁾NBR 10908 (ABNT, 2008)

Destaca-se que o aditivo mineral cristalizante possui base cimentícia contendo adições minerais, porém, a composição na íntegra não é divulgada pelo fabricante. De qualquer forma, este tipo de aditivo se assemelha à mistura ternária empregada na mistura das argamassas, e as suas adições sofrerão reações tardias, colmatando poros e fissuras, fortalecendo, assim, o processo de autocicatrização das

argamassas. Como o aditivo foi adicionado intencionalmente, configura-se a autocicatrização autônoma.

A casca de arroz (CA) utilizada (Figura 15) como bio-agregado em substituição parcial (1 e 5%) do agregado miúdo, foi obtida por doação da indústria de beneficiamento do arroz Sabor Sul, em Itaipulândia – PR. Antes de ser ensaiada, lavou-se a casca de arroz em água à temperatura ambiente por uma hora, conforme ensaiado por Santos (2020), para a remoção dos extrativos. Após a lavagem de toda a CA, as partículas foram secas ao ar e armazenadas em um único recipiente para homogeneização.

Figura 15: Casca de arroz *in natura* com ampliação em (a) 3x e (b) 5x



Trata-se de um resíduo extremamente leve, com massa específica de $0,396 \text{ g/cm}^3$ NBR 16916 (ABNT, 2021) e massa unitária de $0,133 \text{ g/cm}^3$ (NBR 16972 – Método A (ABNT, 2021)). Sabe-se que por ser um material orgânico fibroso, a absorção de água deste material deve ser conhecida para reajustar a água adicionada no proporcionamento. Para isso, foi realizado o ensaio de absorção de água, conforme metodologia indicada por Santos (2020), que consiste em pesagens do biomaterial submerso em água em períodos pré-determinados, para que seja possível avaliar o incremento de peso relativo à absorção de água no tempo, nas etapas: Submersão em água (Figura 16 (b)) + Secagem (Figura 16 (c)) + Pesagem.

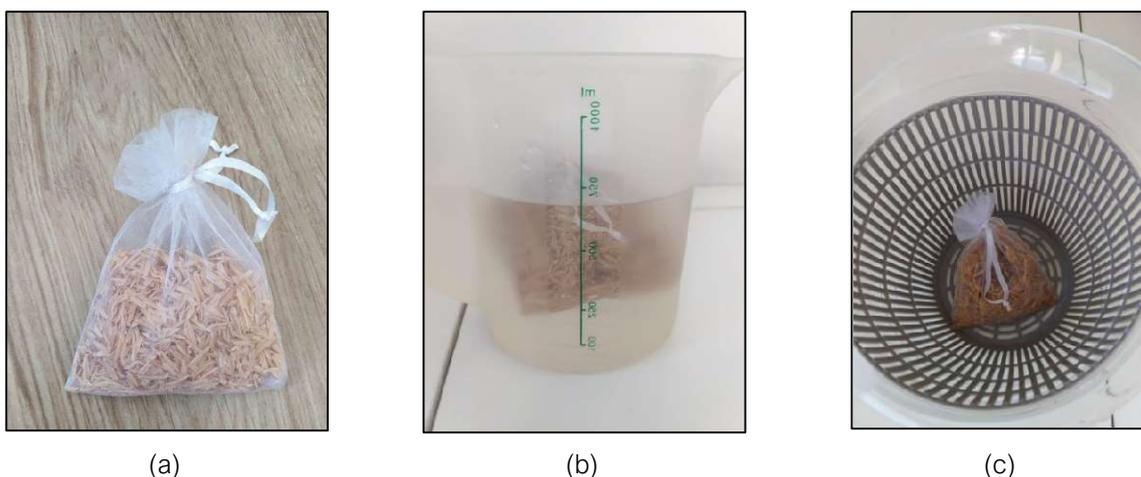
A secagem consiste em dois processos: (1) suspensão do conjunto (sache + casca) ao ar por 30 segundos para remoção do excesso de água e (2) secagem em

centrífuga manual (Figura 16 (c)) em rotação constante e aproximada de 60 rpm, para que então seja aferido o seu peso. Os primeiros 10 ciclos obedeceram aos seguintes tempos:

- I. Dois minutos submerso;
- II. Trinta segundos suspenso;
- III. Secagem em centrífuga (aproximadamente sessenta segundos);
- IV. Pesagem em balança de mesa;
- V. Retorna para a água para iniciar o próximo ciclo.

Após os 10 ciclos iniciais, no próximo (11º ciclo) o conjunto é deixado submerso por dez minutos, sendo mantido o tempo das etapas consecutivas. Então, a partir deste (11º ciclo), em todos os próximos a submersão do conjunto (sache + casca) deve durar 1 hora, sendo mantido o tempo das etapas consecutivas (SANTOS, 2020).

Figura 16: Ensaio de absorção de água do bio-agregado CA composto por a) Conjunto sache + CA b) Conjunto submerso em água c) Conjunto na centrífuga manual para secagem



(a)

(b)

(c)

As leituras de incremento de massa seguiram os ciclos já indicados e foram sendo registradas, até que o incremento de massa se estabilizasse em função do tempo, com variação inferior a 1% do peso, ou seja, o bio-agregado atingisse a saturação. Com esses dados, calculou-se o ganho de massa ao longo do tempo (Eq. 1) e absorção (Eq. 2).

$$G_m = M_t - M_i \quad (1)$$

$$A_m = \frac{(M_t - M_i)}{M_i} \times 100 \quad (2)$$

Onde,

G_m : Massa ganha (g).

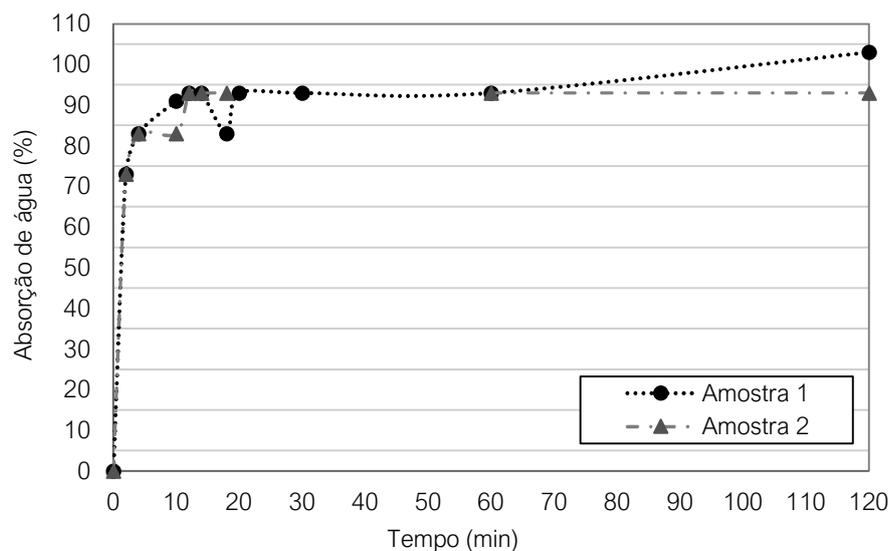
A: Absorção de água (%).

M_i : Massa inicial, casca seca (g).

M_t : Massa casca de arroz em contato com a água (g).

O ensaio foi realizado em duplicata. A partir desta metodologia, a absorção encontrada após 11 horas de ensaio foi de 93%, como pode ser observado no gráfico de absorção no tempo (Figura 17).

Figura 17: Absorção de água da casca de arroz *in natura* em função do tempo



A CA foi submetida à análise termogravimétrica (Figura 18), com taxa de aquecimento de 10°C/min até 1000 °C em atmosfera de ar sintético, e vazão de 100 ml/min, baseado nos estudos de Amantino (2021) e Santos (2020). As propriedades químicas da CA foram analisadas pelo ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX) (Tabela 8) em espectrômetro Rigaku modelo ZSX Primus IV, equipado com tubo de Rh.

Figura 18: Análise termogravimétrica da Casca de Arroz *in natura* lavada

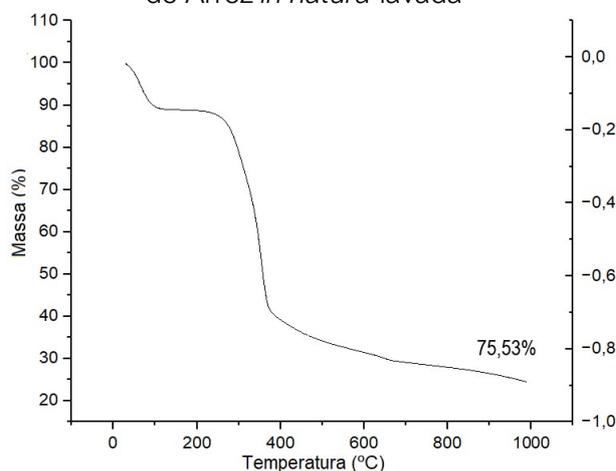


Tabela 8: Propriedades químicas da casca de arroz *in natura* por FRX

Óxidos Analisados (%)	Casca de Arroz
CaO	0,11
SiO ₂	14,20
K ₂ O	0,27
Cl	-
LOI	85,42
Soma (%)	100,00
Al ₂ O ₃ , MgO, SO ₃ , Fe ₂ O ₃ , TiO ₂ , Na ₂ O, MnO, P ₂ O ₅ < Limite de Quantificação (LQ)	

Foram identificados três picos de queda de massa na análise termográfica da casca de arroz. De acordo com o estudo conduzido por Marconcini e Oliveira (2007) para casca de diferentes espécies de arroz cultivadas no Brasil, a primeira perda de massa equivale à saída de voláteis presentes na amostra. Devido à majoritária presença dos materiais orgânicos celulose e lignina (somados, correspondem a, aproximadamente, 75% dos compostos (WALTER; ROSSATO, 2010), a queima dos compostos orgânicos tem início próximo a 190 °C, e essa temperatura varia à medida que a taxa de aquecimento aumenta. Quando a porcentagem de massa atinge o segundo patamar, toda a fração orgânica da casca é consumida pela combustão, deixando principalmente compostos inorgânicos, como a sílica (MARCONCINI; OLIVEIRA 2007).

4.2 PREPARO DOS ESPOROS BACTERIANOS

O procedimento de preparo das bactérias seguiu a metodologia adotada por Lenz et al. (2023). As bactérias a serem utilizadas foram do gênero *Bacillus subtilis* AP91, as quais obtiveram os melhores resultados para a autocicatrização no grupo de pesquisa de autocicatrização por agentes biológicos da Universidade Federal da Integração Latino Americana (GHELLERE, 2021; LENZ et al., 2023). A reativação das bactérias ocorreu através da técnica de semeadura por meio de estrias de esgotamento em placas de Petri contendo meio de cultivo ágar-nutriente (NA) (Figura 19).

Figura 19: Reativação de *Bacillus subtilis* AP91 em estrias de esgotamento no meio ágar-nutriente



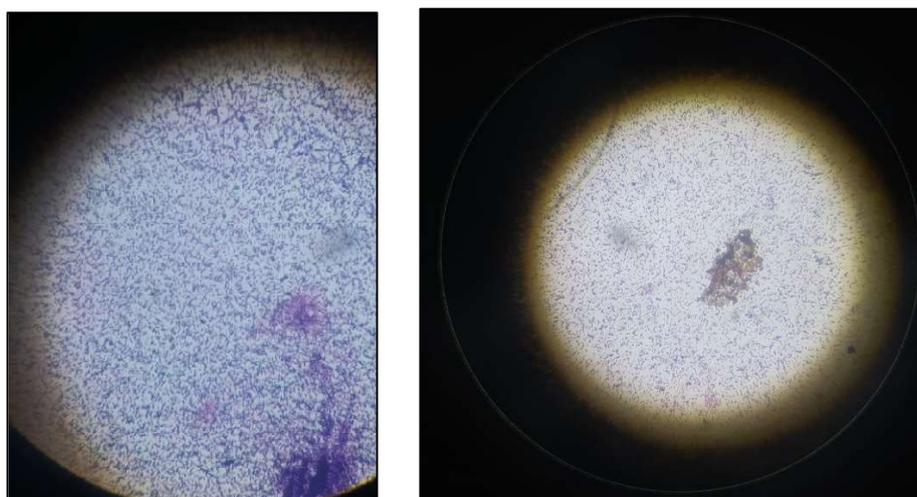
Após reativadas, o cultivo bacteriano foi realizado em meio de cultura líquido Mueller Hinton (MH), conforme estudos de Schwantes-Cezario et al. (2018) e Lenz et al. (2023) (Figura 20) agitado em Shaker por 66 horas, com rotação de 130 rpm e temperatura média de 37 °C, para favorecer seu crescimento.

Figura 20: Conjunto de Erlenmeyers com a solução líquida MH para o crescimento das bactérias



Após o crescimento, as soluções foram centrifugadas a 3600 rpm para aumentar a concentração e lavadas por duas vezes com solução salina NaCl a 85%, sendo armazenadas nesta solução à temperatura 8°C por 48 horas para ocorrer o processo de esporulação. A forma de esporos permite a sobrevivência das bactérias nos materiais a base de cimento (LENZ et al., 2023). Antes da contagem de esporos, realizou-se a identificação celular pelo método do Verde Malaquita, no qual foi possível observar grande quantidade de esporos bacterianos na coloração roxa (Figura 21), demonstrando que a metodologia de cultivo e crescimento foi assertiva.

Figura 21: Visualização da formação de esporos pelo formato e coloração roxa



Verificada a existência de esporos, a solução foi quantificada pelo teste de densidade óptica (DO) em espectrofotômetro, com um comprimento de onda de 600 nm.

Para atingir a concentração desejada de 10^6 esporos/ml, concentração com maior êxito em fechamento de fissuras por Pacheco (2020), foram realizados cálculos de diluição a partir das leituras obtidas no espectrofotômetro. Após a quantificação dos esporos, os frascos foram armazenados em geladeira à temperatura de 4°C até a utilização nos materiais cimentícios.

4.3 INCORPORAÇÃO DAS BACTÉRIAS

As bactérias foram adicionadas à matriz de duas formas: misturadas à água de amassamento e incorporadas nas CAs por saturação.

No primeiro método, relativo à argamassa MB (com bactérias e sem casca de arroz), a solução bacteriana foi adicionada juntamente com a água de amassamento no momento da mistura da argamassa, enquanto os nutrientes extrato de levedura e lactato de cálcio foram adicionados juntos com os aglomerantes.

Já o processo de encapsulamento de bactérias em casca de arroz *in natura*, por se tratar de uma prática inédita, passou inicialmente por uma fase de definição de protocolo descrito a seguir. Toda a CA foi colocada em um recipiente, tanto com a solução bacteriana preparada quanto com os nutrientes (lactato de cálcio e extrato de levedura), e acrescentada a água de compensação somada aos 70% de toda a água de amassamento.

Figura 22: Recipiente contendo: casca de arroz *in natura*, solução bacteriana e nutrientes EL e LC, após 1 hora de imersão em água.



Após a 1 hora de imersão, o conjunto (CA + solução bacteriana + EL + LC + água de compensação + 70% água amassamento) foi introduzido ao misturador mecânico, sobre os aglomerantes já previamente misturados. Os 30% remanescentes da água de amassamento foram utilizados para limpar o recipiente de imersão da casca, para remover os materiais aderidos, e então introduzir esta água com o restante de materiais ao misturador mecânico. Deve-se ressaltar que neste protocolo não foi avaliado se houve ou não um encapsulamento completo das bactérias e nutrientes nas partículas da casca de arroz.

4.4 PREPARO DE ARGAMASSAS

Foram desenvolvidas cinco argamassas, apresentadas na Tabela 9, com base cimentícia ternária composta por cimento, sílica ativa e cinza volante, além de água, fibra de polipropileno e agregado miúdo composto por areia mineral natural. A segunda variação contou com a adição de aditivo mineral cristalizante, em proporção relativa à massa de aglomerantes. A terceira variação contou com a incorporação de esporos de bactérias e seus nutrientes: extrato de levedura (EL) e lactato de cálcio (LC). Finalmente, as argamassas que contiveram biomassa em suas misturas receberam a combinação de agregado miúdo mineral com 2 frações de casca de arroz (substituição parcial à areia, em volume: 1 e 5%).

Tabela 9: Nomenclatura das argamassas utilizadas

Nomenclatura	Detalhamento
MRef	<i>Reference Mortar</i> – Argamassa de Referência
MMad	<i>Mortar with Mineral Admixture</i> – Argamassa com Aditivo Mineral Autocicatrizante
MB	<i>Mortar with Bacteria</i> – Argamassa com Bactéria
MB_{RH1}	<i>Mortar with Bacteria + 1% of Rice Husk</i> – Argamassa com bactéria e 1% de Casca de Arroz
MB_{RH5}	<i>Mortar with Bacteria + 5% of Rice Husk</i> - Argamassa com bactéria e 1% de Casca de Arroz

Os materiais e as suas quantidades em cada proporcionamento estão apresentados na Tabela 10, em quilograma por metro cúbico. O aditivo mineral da MM_{AD} foi adicionado juntamente aos aglomerantes, no misturador mecânico. A solução bacteriana na

argamassa MB foi adicionada com conta-gotas junto à água de amassamento, e nas argamassas MB_{RH1} e MB_{RH5} a solução foi incorporada na CA pelo processo descrito anteriormente. A quantidade de água ficou atrelada à relação água/aglomerante de 0,40, tendo sido feito emprego de um aditivo polifuncional no teor de 0,7% em relação ao material cimentício. Ainda, as argamassas com a adição de bactérias contaram com 1% de adição de nutrientes do tipo Extrato de Levedura (EL) e Lactato de Cálcio (LC) relativo à massa de aglomerantes, que foram adicionados junto com os aglomerantes para a argamassa MB e juntamente com as bactérias na incorporação em CA, nas argamassas MB_{RH1} e MB_{RH5}.

Tabela 10: Proporcionamento das Argamassas em kg/m³

Tipo	Cimento	Cinza Volante	Sílica Ativa	Areia	Fibra	Aditivo Polif.	Adit. Mineral	Solução Bact.	CA	Água	EL ²	LC ²
MREF	389	97	39	1575	1,4	3,68	-	-	-	207	-	-
MMAD	388	97	39	1569	1,4	3,67	4,2	-	-	207	-	-
MB	385	96	39	1557	1,4	3,64	-	10,6	-	194	5,2*	5,2*
MB _{RH1}	385	96	39	1542	1,4	3,64	-	10,6	2,4	194 ¹	5,2*	5,2*
MB _{RH5}	385	96	39	1479	1,4	3,64	-	10,6	11,8	194 ¹	5,2*	5,2*

¹ Adicionada água de compensação relativa à absorção da casca.

² Teor de 1% em relação à massa de aglomerantes – EL: Extrato de Levedura. LC: Lactato de Cálcio

* Em adição à massa de aglomerantes

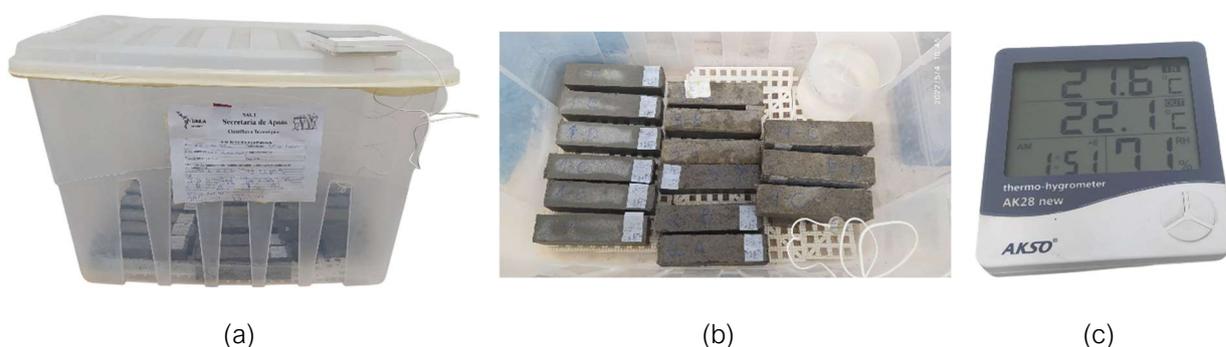
Para cada tipo de argamassa foram produzidos 15 corpos de prova prismáticos (40 x 40 x 160 mm) e 6 cilindros, com 100 mm de raio (100 x 50 mm). Na Tabela 11 são apresentados os ensaios realizados nos corpos de prova, as idades a serem ensaiados, os seus formatos, e o número de amostras. Cada ensaio respeitou as normativas, se houver, vigentes de moldagem, cura e execução, salvo a necessidade de alteração do formato devido ao processo de fissuração, apresentado na sequência.

Tabela 11: Ensaios realizados, formato e quantidade de CPs

Ensaios	Idades	Forma	Nº de CPs por tipo de argamassa	Quantidade de CPs
Resistência à Compressão (NBR 13279:2005)	7, 28, 56, 90, 120 dias	 40X40x160 mm	15	75
Resistência à Tração na Flexão (NBR 13279:2005)				
Ultrassom (Fissurado) e Módulo de Elasticidade Dinâmico (NBR 8802:2019)	7, 28, 56, 90 dias			
Ensaio de Massa Específica e Índice de Vazios (NBR 9778:2005)	-	 100x50 mm	6	24
Inspeção Visual por Microsc. Óptica (Fissurado)	7, 28, 56, 90 dias			

Os corpos de prova foram desmoldados após 48 horas, e curados em caixa com controle de umidade relativa ($70\% \pm 2\%$), de acordo com o descrito em Santos (2020) do início até as últimas idades de ensaio. A caixa foi preparada no estudo piloto com a intenção de manter um equilíbrio de umidade entre ambientes interno e externo (Figura 23a). Para isso, foi posicionada uma vasilha com água no fundo da caixa e os corpos de prova foram acomodados em um estrado emborrachado (Figura 23b). Para evitar a perda de umidade e o controle desta, foi mantido um dispositivo de aferição da umidade relativa do ar e a tampa foi selada com fita (Figura 23c).

Figura 23: Caixa de umidade relativa constante para cura úmida

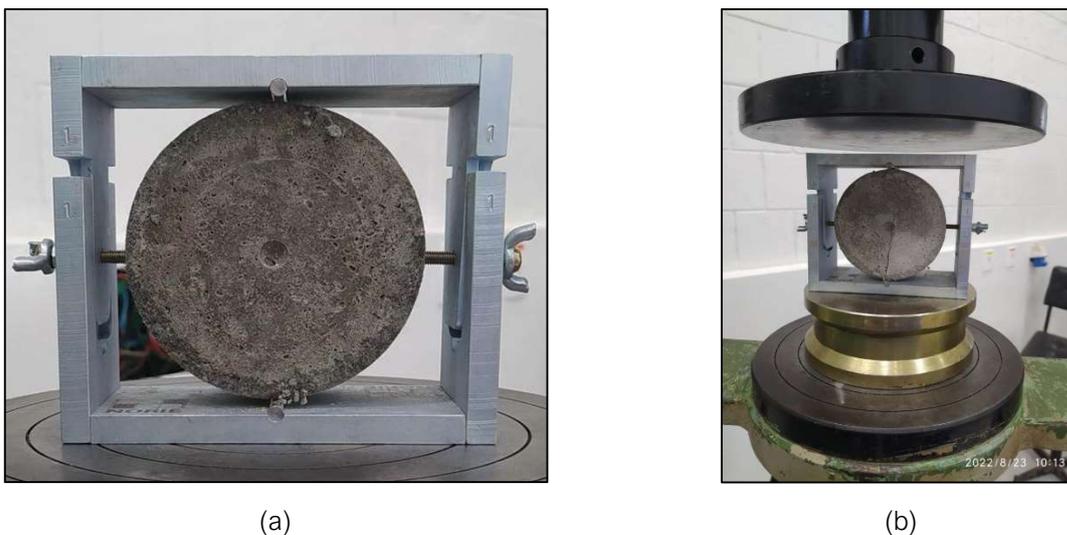


4.5 FISSURAÇÃO DAS ARGAMASSAS

A capacidade de autocicatrização das argamassas foi avaliada em termos do fechamento de fissuras por análise visual e por velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Para tanto, amostras cilíndricas (100 x 50 mm) foram submetidas à indução de fissuras induzidas em laboratório com controle de abertura.

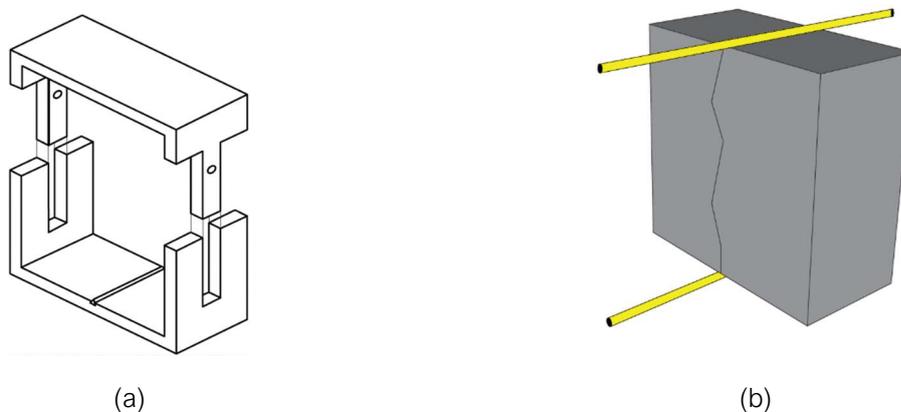
O processo de fissuração de argamassas se apresenta extremamente delicado haja vista a alta rigidez do compósito envolvido no estudo. Para tal, o controle da abertura de fissuras foi possível de ser realizado com o uso de um aparato que evitou que o corpo de prova entrasse em colapso e se partisse por completo. O dispositivo desenvolvido por Dal Molin *et al.* (2020) possibilitou o controle da abertura de fissuras induzidas dos corpos de prova devido ao controle lateral de dilatação (Figura 24a). O conjunto - dispositivo + amostra - foi posicionado sobre uma prensa hidráulica para a aplicação de carga até à fissuração (Figura 24b).

Figura 24: (a) Dispositivo de controle de abertura de fissuras em amostras de argamassa (b) posicionado na prensa hidráulica



A metodologia de uso do dispositivo (Figura 25a) é descrita por Cappellesso (2018) para a indução de fissuras com abertura de 0,4 mm. O mecanismo ocorre pela aplicação de carga de tração por compressão diametral nos corpos de prova, sendo realizada em um ponto específico na parte superior e inferior da amostra, com auxílio de duas barras lisas de 5,00 mm (Figura 25b). A utilização das barras garante a distribuição uniforme das tensões em todos os corpos de prova – análogas às chapas de madeira entre o corpo de prova e os pratos de aplicação de carga indicados pela NBR 7222 (ABNT, 2011). Além disso, ocasiona esforços de tração no compósito, direcionando a fissura de forma perpendicular à face de aplicação da carga, resultando na ruptura do corpo de prova.

Figura 25: Método de fissuração com controle de abertura de fissuras (a) Dispositivo (b) Posicionamento dos apoios direcionados paralelamente ao prisma



Fonte: Cappellesso (2018)

Por restrição de formatos de moldes, foram desenvolvidos corpos de prova cilíndricos 100 x 50 mm em formas de PVC. A velocidade de aplicação de carga utilizada foi definida em $15,00 \pm 3,00$ kg/s após testes em amostras de forma a ter um controle sobre a abertura das fissuras, sem que ocorresse de maneira brusca (o que acabava por aumentar significativamente a abertura). O fim da aplicação de carga ocorre automaticamente, quando há queda de força, o que indica ruptura e visual abertura de fissura. A face da argamassa em contato com a superfície do molde de PVC ficou perfeitamente lisa, e foi nesta superfície do corpo de prova em que foram feitas as análises visuais da fissura induzida no decorrer do tempo. A face que ficou “aberta” durante a moldagem ficou irregular, contudo, foi possível observar a fissura por ela.

O protocolo de fissuração foi realizado na idade de sete dias dos corpos de prova, os quais foram submetidos à inspeção visual por estereomicroscópio e ao ensaio de ultrassom para verificar a velocidade de propagação de ondas ao cruzar pela fissura.

Vale ressaltar que a fissura induzida atravessou o corpo de prova argamassado, sendo observada pelas duas faces da amostra, contudo, apenas a face lisa foi analisada, devido à regularidade da superfície. E embora a fissura tenha atravessado o corpo de prova de forma perpendicular e transversal, a amostra não se partiu em duas metades, devido, sobretudo, à adição de fibras de polipropileno que atuaram como ponte no local da fissura.

4.6 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS ESPECIAIS

Neste trabalho, as técnicas escolhidas para visualizar e determinar o fenômeno de autocicatrização foram análises visuais por microscopia óptica e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, a partir das velocidades ultrassônicas, foi necessário conhecer as massas específicas das amostras. Esta propriedade, juntamente com o índice de vazios, foi obtida a partir do ensaio de Massa Específica e Índice de Vazios NBR 9778 (ABNT, 2005).

Para avaliar o desempenho mecânico ao longo do tempo das argamassas produzidas, realizou-se o ensaio de resistência à tração na flexão por quatro pontos e o ensaio de resistência à compressão.

4.6.1 Análise de Imagem do Fechamento das Fissuras

Para a avaliação do fechamento de fissuras das amostras ao longo do tempo, foram escolhidos dois dos quatro corpos de prova cilíndricos (100 x 50 mm) já fissurados com as dimensões de aberturas mais semelhantes, totalizando 10 amostras analisadas por idade. Foram realizadas medições em cinco idades (0, 21, 49 e 83 dias após a fissuração), utilizando um Estereomicroscópio da marca *Zeiss Discovery V12* equipado com lentes *Zeiss PlanApo S 1.0x FWD* de 60 mm. As leituras foram capturadas pela câmera *Zeiss Axiocam 105*, que permite ampliação de até 100x, e processadas pelo software *AxioVision SE64*. Para fins de medição foi utilizada a ampliação de 18x da imagem.

De forma a limitar as regiões de leitura no microscópio óptico, as fissuras foram particionadas em trechos de 5 mm (Figura 26), eliminando as extremidades devido à irregularidade, seguindo o proposto por Cappellesso (2018) . A primeira leitura foi realizada imediatamente após a fissuração (7 dias de cura) e neste momento foi tomada a medida das espessuras de cada trecho da fissura, obtendo uma espessura média (e) para cada trecho. Registros foram feitos ao longo das idades para cada trecho da fissura em cada amostra, a fim de comparar com a imagem capturada do respectivo trecho na primeira idade, e assim verificar se houve precipitação de CaCO_3 na superfície das fissuras.

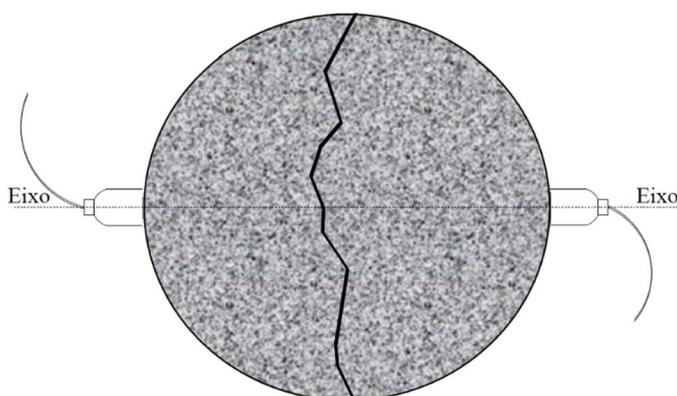
Figura 26: Amostra fissurada com abertura particionada em trechos de comprimento 5 mm



4.6.2 Velocidade de propagação de ondas ultrassônica e Módulo de Elasticidade

O ensaio para determinar o módulo dinâmico foi realizado de acordo com a NBR 8802 (ABNT, 2019) nas idades 7, 28, 56, 90 e 120 dias em amostras íntegras e fissuradas. A emissão do pulso ultrassônico foi realizada por transmissão direta, com os transdutores em faces opostas e perpendiculares à fissura (Figura 27), possibilitando a transmissão das ondas com maior intensidade e precisão de leitura (ABNT, 2019). Para garantir que as leituras fossem realizadas sempre no mesmo local e não influenciar nos resultados, foram feitas demarcações nas faces onde eram posicionados os transdutores.

Figura 27: Posicionamento dos transdutores na amostra em posição de transmissão direta de ondas ultrassônicas



O objetivo deste ensaio foi obter o tempo de propagação do pulso ultrassônico na amostra por meio do equipamento, a fim de determinar a velocidade ultrassônica. O aumento da velocidade das ondas ultrassônicas pode estar associado à melhoria da matriz cimentícia devido à contínua hidratação do cimento e à precipitação de CaCO_3 nas fissuras, favorecida pelos agentes autocicatrizantes. Isso ocorre porque meios sólidos contínuos permitem uma maior velocidade de propagação das ondas (CAPELESSO, 2018).

Foram realizadas três leituras por idade em cada amostra, utilizando um gel acoplador para facilitar a propagação das ondas entre o corpo de prova e o transdutor. Após alguns segundos, o equipamento mediu a velocidade de propagação do pulso ultrassônico na amostra. O aumento da velocidade das ondas ultrassônicas pode ser atribuído à melhoria da matriz cimentícia devido à hidratação contínua do cimento, bem como à precipitação de

CaCO₃ nas fissuras. Quando as fissuras são seladas, as ondas podem passar pelo produto precipitado, reduzindo o tempo de transmissão.

Com a leitura das médias de velocidade de propagação, foi possível encontrar o módulo dinâmico pela equação 3 abaixo.

$$Ed = \rho \times V^2 \times \frac{(1+\nu) \times (1-2\nu)}{1-\nu} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

ρ : Densidade do concreto endurecido (kg/m³).

V: Velocidade de propagação da onda ultrassônica para percorrer o corpo de prova longitudinalmente (km/s).

ν : Coeficiente de Poisson.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a velocidade de propagação da onda ultrassônica é afetada pelas condições de umidade, sendo que em condições saturadas, os dados coletados apresentam um aumento. Para evitar variações na condição interna de saturação durante o ciclo, optou-se por padronizar o dia de medição das amostras utilizadas nos testes.

4.6.3 Análise das Propriedades Mecânicas

Como controle tecnológico das argamassas produzidas, o ensaio de resistência à tração na flexão em três pontos e compressão foi realizado em todas as variações de argamassa, em amostras íntegras. Para cada traço, foram produzidas amostras em triplicata, com dimensões de 40x40x160 mm, conforme as prescrições da NBR 13279 (ABNT, 2005). Para obter a resistência à tração na flexão das argamassas, foi aplicada uma carga em uma prensa hidráulica até a ruptura do corpo de prova, resultando em duas metades que foram utilizadas para o ensaio de resistência à compressão. Os ensaios foram realizados nas idades de 7, 28, 56, 90, 120 dias, no laboratório de concreto da Usina Hidrelétrica de Itaipu (Foz do Iguaçu).

Para comparar o efeito das variáveis “agente autocicatrizante” e “casca de arroz”, as argamassas especiais foram divididas em dois grupos:

(a) com e sem agente autocicatrizante (MR_{EF} , MM_{AD} e MB), e

(b) com bactérias incorporadas em CA ou na água de mistura (MB, MB_{RH-1} e MB_{RH-5}), na presença dos nutrientes Extrato de Levedura (EL) e Lactato de Cálcio (LC).

Assim, realizou-se a correlação dos resultados de resistência à compressão e módulo dinâmico tanto em amostras íntegras como também na condição fissurada (Figura 32), aos 7, 28, 56, 90 e 120 dias, para os dois grupos. Em amostras íntegras avaliou-se o incremento de rigidez da matriz no tempo, enquanto nas amostras fissuradas avaliou-se a recuperação das fissuras causadas por autocicatrização autógena e autônoma, sendo esta última estimulada pelo aditivo mineral e pela ação da bactéria *Bacillus subtilis AP91*.

4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados de resistência à tração na flexão, à compressão, velocidade de propagação de ondas e módulo de elasticidade dinâmico também foram analisados por meio de análise estatística ANOVA no *software Origin 2023*. Para a realização da ANOVA foram realizadas três combinações distintas, a fim de avaliar a influência das diferentes variáveis de controle: tipo de argamassas e idade, nas variáveis de resposta: resistência à tração, resistência à compressão, velocidade de ondas ultrassônicas e módulo de elasticidade dinâmico. Foi adotado nível de significância de 95% (p -valor < 0,05).

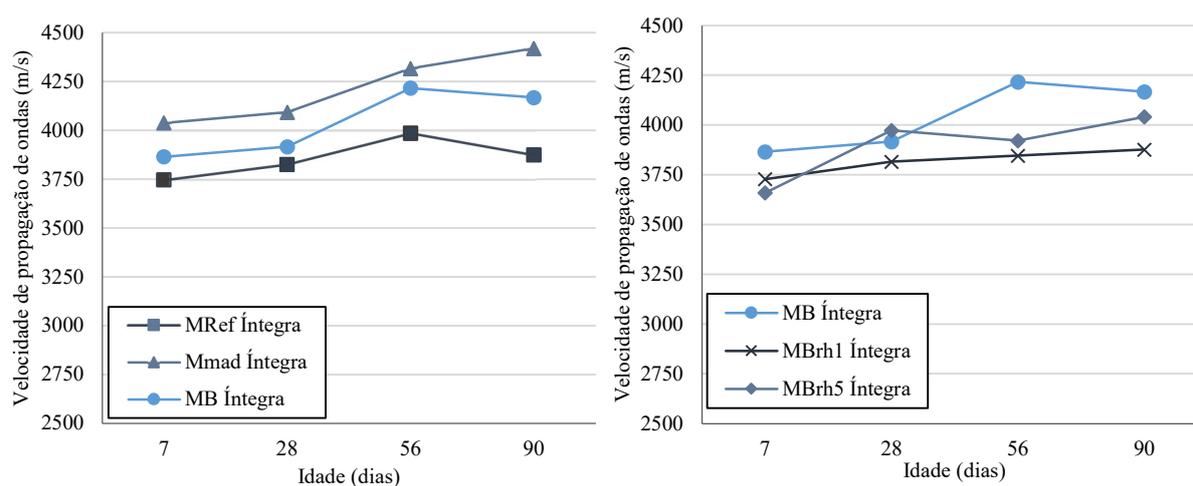
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

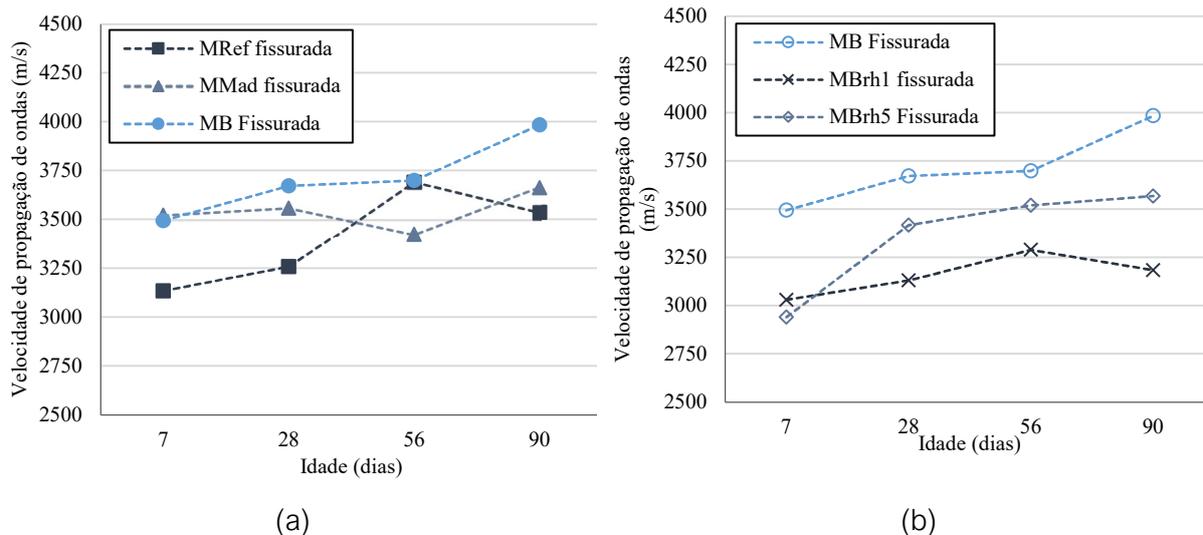
Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos realizados para atingir os objetivos propostos para este estudo, bem como a discussão com base na literatura.

5.1 ANÁLISE DA AUTOCICATRIZAÇÃO PELA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS

As velocidades de propagação de ondas ultrassônicas foram avaliadas em amostras fissuradas e não fissuradas, para os grupos com (Figura 28a) o efeito da adição de agentes autocicatrizantes (MR_{EF} , MM_{AD} e MB) e (Figura 28b) o efeito da adição de casca de arroz (MB , MB_{RH1} e MB_{RH5}), como forma de verificar a densificação da matriz e recuperação do dano ao longo do tempo.

Figura 28: Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em amostras íntegras e fissuradas com o efeito da adição de (a) agente autocicatrizante e (b) casca de arroz





Para os dois grupos de argamassas, observou-se o comportamento comum de aumento de velocidade até os 56 dias, com posterior tendência à estabilização. Capelesso (2018) avaliou a relação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas com o íntegro inicial em argamassas com diferentes tipos de cimento, e verificou que após os 84 dias houve uma linearidade dos resultados, apontada por ela como o término de material reativo restante dentro da matriz cimentícia, sem a formação significativa de produtos de autocicatrização.

Avaliando o efeito da adição de agentes autocicatrizantes (Figura 28a), em amostras íntegras e fissuradas, os valores alcançados para a velocidade de propagação de ondas foram todos comparáveis, e ressalta-se que para as duas condições de integridade, as argamassas com agente autocicatrizante (MM_{AD} e MB) apresentaram maiores velocidades do que a argamassa de referência haja vista a incorporação desse suplemento mineral (MM_{AD}) e da bactéria e seus efeitos no tempo. Este fato elucidou a ação desses agentes autocicatrizantes na precipitação de $CaCO_3$ em poros da matriz, tornando-a mais densa e, conseqüentemente com maior velocidade ultrassônica. Observou-se que para as amostras íntegras a maior velocidade em todas as idades foi verificada para a argamassa com aditivo mineral (MM_{AD}), com valor máximo de 4420 m/s aos 56 dias, seguido pela amostra com gente bacteriano, com valor máximo de 4217 m/s aos 90 dias.

Observou-se um aumento de velocidade ao longo do tempo até os 90 dias em todas as argamassas na condição fissurada, o qual foi maior em comparação com as amostras íntegras, exceto para a argamassa MM_{AD} . Para a argamassa de referência (MR_{EF}), o incremento da velocidade foi de 13% em amostras fissuradas comparado a 3% para

amostras íntegras. Para a argamassa com *Bacillus subtilis* AP91 e sem CA (MB), os incrementos foram de 14% (fissuradas) e 8% (íntegras). Em relação às argamassas com bactérias e CA, o incremento da velocidade de propagação de ondas mais expressivo foi para a adição de 5% de CA (MB_{RH5}), aumentando em 21% em amostras fissuradas e 10% em amostras íntegras.

Destaca-se, portanto, que para todas as argamassas com bactérias, com 0%, 1% e 5% de CA em substituição do agregado miúdo, houve incremento de velocidade ao longo do tempo, e os incrementos foram superiores à argamassa de referência (confeccionada sem bactérias e sem CA), exceto para a MB_{RH1}, indicando o potencial de autocicatrização das fissuras e o refinamento de poros promovido pelo agente bacteriano.

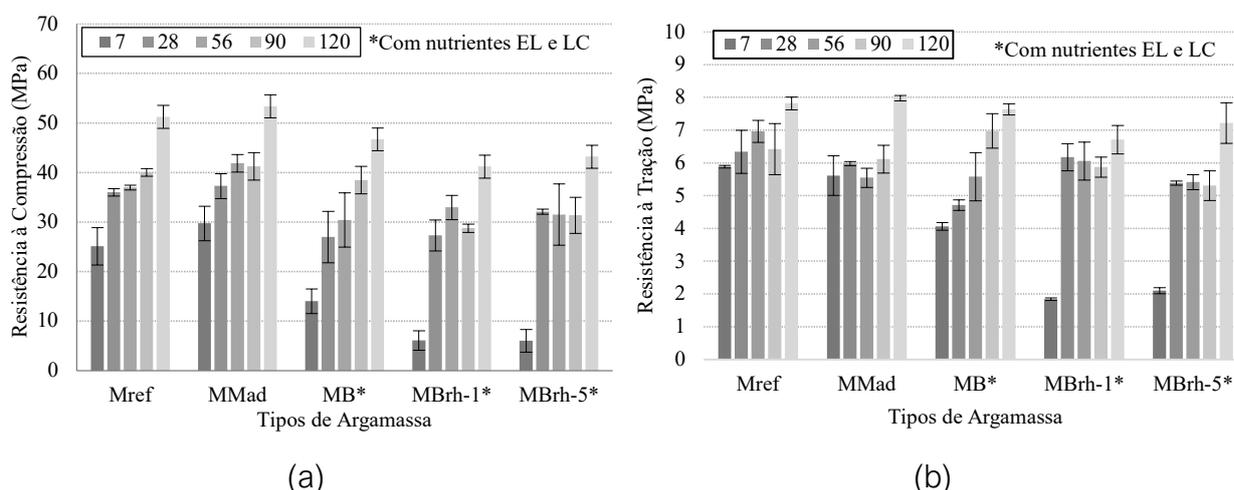
Ao avaliar o efeito da adição da casca de arroz (Figura 28b), em todas as idades a argamassa sem CA apresentou as maiores velocidades de propagação de ondas, nas condições íntegra e fissurada, atingindo os maiores valores aos 56 e 90 dias, com 4217 m/s e 4167 m/s, respectivamente, em amostras íntegras, como esperado. As velocidades em amostras íntegras para argamassas com 1% e 5% de adição de CA foram semelhantes, 3877 m/s e 4041 m/s aos 90 dias, indicando pouca variação das propriedades da matriz com esta variação de adição do bio-agregado, na idade de 120 dias, algumas oscilações ocorreram, porém, dentro da variabilidade conhecida para esse método. Os valores obtidos se mostram de acordo com a pesquisa de Amantino (2021), o qual alcançou a velocidade média de 4280 m/s para bio-concretos com 5% de adição de casca de arroz *in natura*, e 4340 m/s para as amostras de referência (0% de CA *in natura*).

5.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A determinação das propriedades mecânicas teve como objetivo avaliar a influência das variáveis de cada argamassa, e que foram os agentes autocicatrizantes (biológico e mineral) e o bio-agregado (em substituição parcial à areia, nos teores de 1 e 5%, em volume), sobre as características dos materiais cimentícios, como a resistência à compressão e a resistência à tração ao longo do tempo.

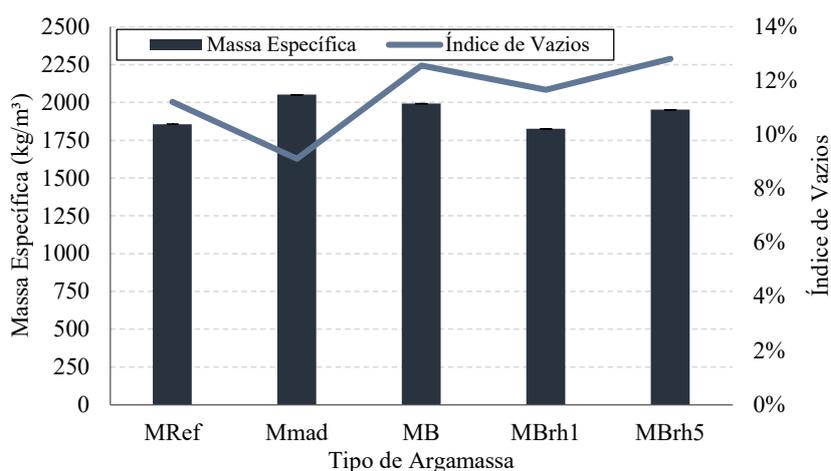
Observou-se (Figura 29a) que a resistência à compressão aumentou ao longo do tempo para todas as amostras avaliadas, com e sem as bactérias *Bacillus subtilis* AP91. Aos 120 dias foi constatado incremento de resistência, em ordem decrescente, de 42% para MB, 33% para MB_{RH-1}, 30% para MM_{AD}, 28% para MR_{EF} e 25% para MB_{RH5}, em relação aos 28 dias. Esta característica está associada à atividade pozolânica dos materiais constituintes da mistura, cujos componentes sílica ativa e cinza volante apresentam reações pozolânicas tardias em relação àquelas que ocorrem na hidratação do cimento (LOTHENBACH; SCRIEVENER; HOOTON, 2011; MCCARTHY; DYER, 2019; TALAIEKHOZAN et al., 2014).

Figura 29: Resistência à (a) compressão e à (b) tração na flexão das argamassas especiais íntegras sem *Bacillus subtilis* AP91 e os nutrientes EL e LC (MR_{EF} e MM_{AD}), com bactérias e nutrientes (MB, MB_{RH1} e MB_{RH5})



Em todas as idades a argamassa com maior resistência à compressão foi aquela contendo aditivo mineral (MM_{AD}), seguida pela referência (MR_{EF}), ambas sem nutrientes e bactérias. Um fato a se considerar foi que a argamassa MM_{AD} apresentou a maior massa específica (2051,2 kg/m³) e o menor índice de vazios (9,12%) em comparação com as demais (Figura 30 e Apêndice A). Na sequência, a maior massa específica foi observada para a argamassa MB (1992,39 kg/m³), seguida pela MB_{RH5} (1951,88 kg/m³), MR_{EF} (1856,16 kg/m³) e MB_{RH1} (1825,14 kg/m³). Já em termos de índice de vazios, os valores para as demais argamassas foram semelhantes, atingindo 11,21% para a MR_{EF}, 11,66% para a MB_{RH1}, 12,56% para a MB e 12,82% para a MB_{RH5}. Com base no exposto, esses dois parâmetros mostraram relacionados às resistências, uma vez que para as maiores massas específicas e menores índices de vazios obteve-se as maiores resistências mecânicas.

Figura 30: Massa Específica e Índice de Vazios apartir do ensaio NBR 9778:2005



Percebe-se que os resultados entre as argamassas sem bactérias e com bactérias possuem maior disparidade aos até os 28 dias. A resistência mecânica inferior para as argamassas com bactérias pode ser relacionada ao uso de 1% de extrato de levedura (EL) e de 1% de Lactato de Cálcio (LC) (totalizando 2% de adição em relação à massa de cimento) como fonte de nutrientes. Segundo a literatura (CHEN; YUAN; ALAZHARI, 2019; JUSTO-REINOSO et al. (2022) a adição de EL provoca a incorporação de ar à mistura. Justo-Reinoso et al. (2022) constaram que amostras de argamassa contendo 1% de Extrato de Levedura (em relação a massa de cimento) aumentaram em 115% o teor de ar incorporado quando comparadas à referência. Este comportamento foi também verificado por Chen, Yuan, Alazhari (2019), os quais, ao empregarem uma concentração de 0,06% de EL em argamassas, observaram um acréscimo de 81% no teor de ar em relação ao grupo sem esse composto. Este fato pôde ser observado no índice de vazios das argamassas com bactérias, que foi superior às argamassas MR_{EF} e MM_{AD}. É importante ressaltar que, devido à presença da casca de arroz *in natura* na matriz cimentícia, a interação dos nutrientes com o bio-agregado pode ter resultado em um efeito distinto na porosidade da matriz, sobretudo dos resultados relatados na literatura.

O estudo conduzido por Jonkers *et al.* (2010) investigou o efeito de quatro nutrientes adicionados em matrizes cimentícias na propriedade de resistência à compressão. Os resultados mostraram que a adição de 1% de extrato de levedura em relação à massa de cimento resultou em uma diminuição de cerca de 50% nos valores de resistência à compressão em comparação com a amostra controle. Por outro lado, a incorporação de lactato de cálcio na mesma quantidade resultou em um aumento

significativo na resistência à compressão aos 28 dias. Em estudo posterior, Wiktor e Jonkers (2011) utilizaram bactérias juntamente com lactato de cálcio e extrato de levedura (6% e \cong 0,1% em massa de agregado, respectivamente) encapsulados em argila expandida. Os resultados indicaram que a taxa de autocicatrização máxima de fissuras foi o dobro em relação à referência. Lenz (2022) avaliou o efeito da adição de extrato de levedura e lactato de cálcio, isolados e combinados em diferentes concentrações (0, 0,5 e 1%), com e sem ar incorporado, e a melhor proporção relativa ao melhor índice de cicatrização foi a combinação de 0,5% para cada nutriente (EL + LC), com aditivo incorporador de ar. Contudo, esta combinação obteve o pior desempenho mecânico, reduzindo em até 62% a resistência à compressão, enquanto a argamassa com 1% de EL com aditivo incorporador de ar reduziu em 34% a resistência à tração.

Os resultados da resistência à tração na flexão aos 28 dias mostraram tendências semelhantes aos resultados da resistência à compressão, com valores médios correspondentes a cerca de 18% da resistência à compressão, superior à faixa de 10-15% comumente encontrado na literatura (ACI546R, 2014; NEVILLE, 2016; SCHWANTEZ, 2017). O aumento de resistência à tração em relação à compressão está associado à inclusão de fibras na matriz cimentícia, visto que este reforço auxilia na redução da abertura de fissuras, melhorando a resistência à tração (ABDULHAMEED; NASSIF; KHAYAT, 2018; AISHEH et al., 2022; MALLAT; ALLICHE, 2011). Abdulhameed, Nassif, Khayat (2018) estudaram o comportamento de concretos de reparo reforçados com fibra de aço e de polipropileno. Ao empregar fibras de aço nos teores de 0,25% e 0,50% em relação à massa de cimento, e fibras de polipropileno nos teores de 0,10%, 0,15%, e 0,20%, obtiveram o incremento de resistência à tensão de flexão para todos os compósitos cimentícios de reparo, chegando ao máximo de 104% de aumento em relação ao substrato sem o reforço de fibras.

Para verificar a influência dos nutrientes, sugere-se desenvolver argamassas de referência com e sem LC e EL adicionados de forma isolada e combinada, sem a incorporação de bactérias. Esta análise se justifica visto que a maior parte dos estudos não adicionam nutrientes na matriz de referência, uma vez que sua adição está atrelada à incorporação de bactérias. Outro ponto sugerido para futuros estudos seria avaliar se a solução salina como meio de incorporação das bactérias, nas quantidades adicionadas, interfere nas propriedades mecânicas da matriz cimentícia.

Por meio da ANOVA (Apêndice E) verificou-se que há diferenças significativas para as misturas e para a interação entre as misturas e a idade de ensaio, indicando que a adição dos dois agentes autocicatrizantes (bacteriano e mineral) bem como a adição de bio-agregados interferiram nas propriedades mecânicas das argamassas.

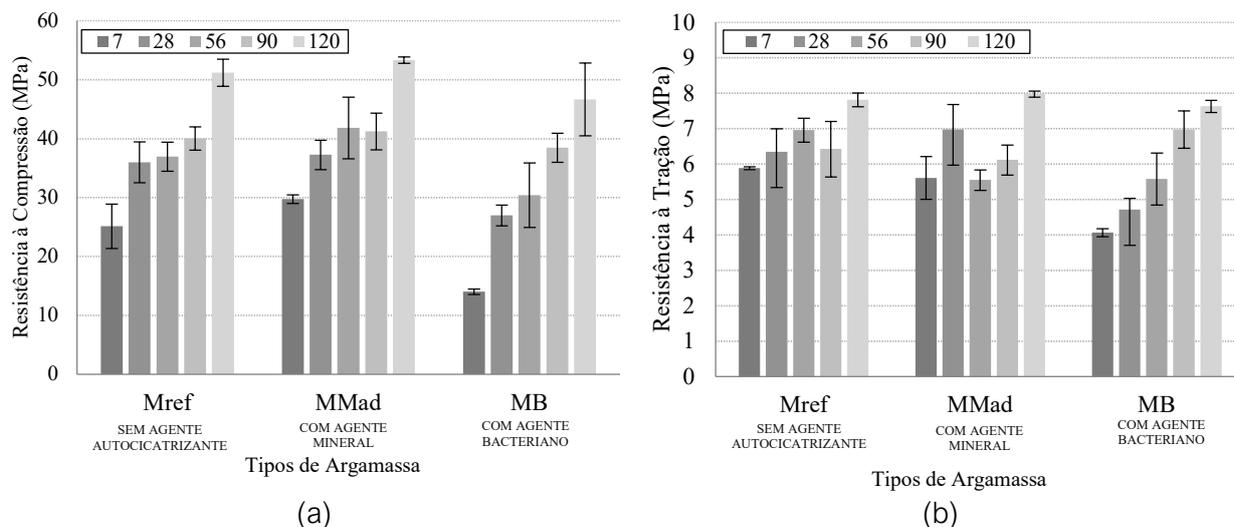
5.2.1 Avaliação do Efeito da Adição de Agentes Autocicatrizantes

Para todos os teores empregados, os resultados de resistência à compressão foram ascendentes ao longo do tempo, como pode ser observado na Figura 31. Observou-se que a argamassa com o agente autocicatrizante, sem casca de arroz (MB), apresentou em todas as idades resistências à compressão inferiores à argamassa de referência MR_{EF} e com aditivo mineral MM_{AD} . É importante ressaltar que a argamassa MB contém os nutrientes LC e EL, que não estão presentes nas outras duas misturas. Como já discutido, a redução da resistência à compressão da argamassa com bactérias e nutrientes pode estar relacionado com a incorporação de ar promovida pelo nutriente EL e justificada pelo índice de vazios superior desta argamassa em relação à MR_{EF} e MM_{AD} .

Apesar da redução desta propriedade, notou-se um considerável incremento de resistência ao longo do tempo para a argamassa MB. Enquanto aos 7 dias a argamassa com a bactéria (MB) apresentou resistência à compressão inferior à referência (MR_{EF}) e à mistura com aditivo mineral (MM_{AD}) em 44% e 53%, respectivamente, essa diferença reduziu-se aos 120 dias para 8,8% e 12,5%, respectivamente.

Este fato possivelmente ocorreu devido à efetividade da precipitação de $CaCO_3$ promovida pela adição de esporos da bactéria *B. subtilis* AP91 à água de amassamento da argamassa. Ressalta-se que esses resultados corroboram com o apresentado na literatura por Ghosh et al. (2009) e Schwantes-Cezario et al. (2022), os quais obtiveram um aumento na resistência à compressão em todas as idades analisadas com a concentração de 10^5 células/ml de diferentes bactérias. O mesmo comportamento foi encontrado por Alsharif et al. (2016), os quais incorporaram na água de amassamento do concreto, em diferentes teores, bactérias redutoras de sulfato de água de lama ácida coletada em na Malásia.

Figura 31: Efeito do agente autocicatrizante ao longo do tempo (em dias) na resistência a) à compressão e b) à tração na flexão



Comportamento semelhante foi obtido em relação à resistência à tração, que para este grupo, a argamassa de referência com bactérias (MB) obteve a menor resistência à tração nas idades iniciais, sendo que aos 120 dias a resistência entre as três misturas é similar e sem diferenças significativas estaticamente (Apêndice E), com valores de 7,63 MPa 7,81 MPa e 7,98 MPa para a MB, MR_{EF} e MM_{AD} respectivamente. De acordo com a análise Tukey (Apêndice E), houve diferença significativa na resistência à tração apenas aos 7 dias entre a argamassa MB em relação às demais sem bactérias e nutrientes, e aos 28 dias entre a MB e a referência MR_{EF}.

Este comportamento de crescente incremento de resistência mecânica em argamassas com bactérias difere de Pacheco (2020) e Lenz (2022), que obtiveram decréscimo de resistência à compressão aos 56 dias para todas as argamassas que continham bactérias. Pacheco (2020) atribui a queda de resistência à perlita quanto que. Justo-Reinoso et al. (2022) e Lenz (2022) atribuem a perda de resistência ao emprego de nutrientes.

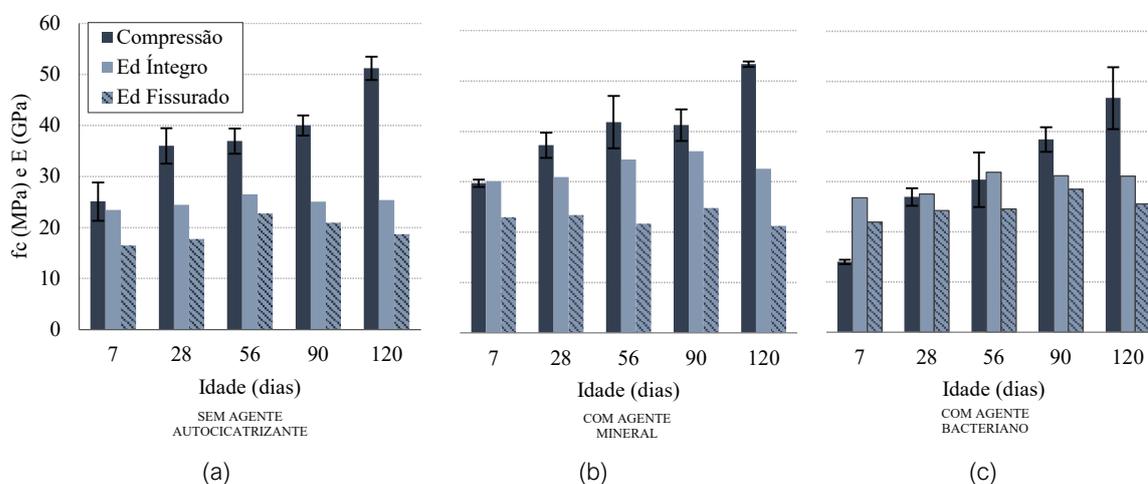
Um dos motivos das resistências inferiores nas primeiras idades neste estudo pode ser associada falta de um material de preenchimento com granulometria intermediária entre os materiais cimentantes, que prejudicou o empacotamento do esqueleto granular Rampanelli (2021) desenvolveu argamassas de reparos em vários teores de cimento Portland CPV-ARI, com adição de sílica ativa e filer em um proporcionamento empacotado, a fim de se obter alto desempenho levando em consideração a redução de

custo e de liberação de CO_2 . Com isso, para o proporcionamento de 360 kg/m^3 de cimento, 20% de sílica e 37% de filer, em adição à massa de cimento, o autor obteve já aos 7 dias 41,3 MPa e aos 28 dias 57,3 MPa.

A ANOVA (Apêndice E) indicou que os efeitos isolados e combinados da mistura e idade apresentam significância estatística nos resultados de resistências à tração e à compressão. Foi possível confirmar pelo teste de Tukey (Apêndice E) que o efeito da adição dos agentes autocicatrizantes trouxe diferenças significativas em todas as interações. O efeito das idades comparando a última idade (120 dias) com as demais foi significativo tanto para as resistências à tração na flexão quanto para as resistências à compressão.

Observou-se que para todas as amostras íntegras do primeiro grupo (com avaliação do efeito do agente autocicatrizante) o módulo de elasticidade aumentou ao longo do tempo, e até 120 dias (Figura 32).

Figura 32: Correlação entre as resistências à compressão (em amostras íntegras) e o módulo de elasticidade dinâmico para as amostras íntegras e fissuradas (a) MR_{EF} , (b) MM_{AD} e (c) MB, ao longo do tempo.



Com o processo de hidratação (que ocorre ao longo do tempo) são gerados os compostos hidratados C-S-H e a portlandita (nas primeiras idades - até aproximadamente 28 dias) (LOTHENBACH; SCRIEVENER; HOOTON, 2011; MCCARTHY; DYER, 2019). Em idades mais avançadas ocorrem em maior intensidade reações pozolânicas que reagem com a portlandita formando C-S-H, corroborando para a densificação da matriz (pela velocidade de propagação de ondas ultrassônicas) e ganho de

resistência e rigidez (maior módulo), com o esperado refinamento de poros, conforme descrito por Chindaprasirt, Jaturapitakkul e Sinsiri (2007) e Mendes e Repette (2019).

A velocidade de propagação de ondas e o módulo de elasticidade dinâmico das amostras íntegras e fissuradas foram analisados pela ANOVA, indicando que houve diferenças significativas em relação às dosagens e às idades de ensaio (Apêndice E). O efeito das idades na análise Tukey (Apêndice E) para amostras íntegras também indicou diferenças significativas em todas as idades tanto para a velocidade de propagação de ondas quanto para o módulo dinâmico, exceto na comparação de 56 a 90 dias. Já para amostras fissuradas a análise Tukey (Apêndice E) confirmou a diferença significativa (apresentada pelo número 1) para a variação das amostras e das idades, exceto na comparação dos 28 aos 120 dias.

As análises comparativas efetuadas para o módulo de elasticidade foram feitas entre as idades de 7 e 90 dias haja vista oscilações experimentais verificadas entre 90 e 120 dias, e indicação de significância por Tukey.

O potencial de autocicatrização autógena pôde ser verificado pelo módulo de elasticidade dinâmico na amostra MR_{EF} nas condições íntegra e fissurada, a qual apresentou um incremento de 7% e 27% da propriedade, respectivamente, entre 7 e 90 dias. A densificação da matriz e o conseqüente refinamento dos poros, em decorrência das reações pozolânicas, promoveu o aumento de rigidez da argamassa (módulo de elasticidade). Sendo assim, a velocidade das ondas ultrassônicas que se propagam por meio sólido aumentou ao longo do tempo para todas as argamassas. De acordo com Metha e Monteiro (2014), a precipitação de produtos hidratados resultantes da reação pozolânica de materiais cimentícios suplementares com o hidróxido de cálcio presente na matriz pode contribuir para o refinamento dos poros e densificação da matriz.

Observou-se o potencial de autocicatrização autônoma do agente mineral autocicatrizante e da bactéria *Bacillus subtilis* AP91 em amostras íntegras ao verificar que o incremento de módulo de elasticidade foi de 20% e 16%, respectivamente, aos 90 dias. Ambos foram superiores às amostras íntegras da argamassa de referência. Possivelmente os agentes autocicatrizantes propiciaram o refinamento de poros na matriz, indicado pelo aumento do módulo e da velocidade ultrassônica, principalmente após 28 dias nas argamassas com tais aditivos. O mesmo comportamento ocorreu para estas argamassas

na condição fissurada, apresentando um incremento de rigidez aos 90 dias de 8% para a MM_{AD} e 30% para a MB, sendo este último o maior incremento de módulo, representando um indicativo do potencial de autocicatrização dos agentes biológicos.

Ressalta-se que, embora até os 28 dias a argamassa com agente bacteriano apresentou resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico menores que as demais, o efeito da bactéria confere ganho expressivo nestas propriedades em idades avançadas, chegando a patamares semelhantes àqueles com agente mineral e sem agente autocicatrizante aos 120 dias.

Sabe-se que o efeito da característica (abertura e extensão) da fissura da amostra impacta os resultados, desta forma cada amostra fissurada deve ser tratada individualmente, como única. Sendo assim, a comparação entre diferentes amostras fica mais próxima à realidade quando da replicação em uma amostragem maior (aqui sugere-se 10 amostras por tipo de argamassa com fissuras semelhantes entre si). Neste estudo, cada tomada de medidas e análises foi realizada, no mínimo, em triplicata por amostra, e em duas amostras por cada tipo de argamassa. Contudo, destaca-se que foi possível a comparação da evolução do módulo de elasticidade e da velocidade de propagação de ondas apenas em uma mesma amostra ao longo do tempo. A validação dos resultados, principalmente na verificação da capacidade de autocicatrização autônoma por bactérias, existiu devido à comparação com o comportamento de amostras íntegras, uma vez que nestas os resultados de incremento de módulo seguiram o mesmo padrão (maior incremento para argamassas com agente autocicatrizante bacteriano).

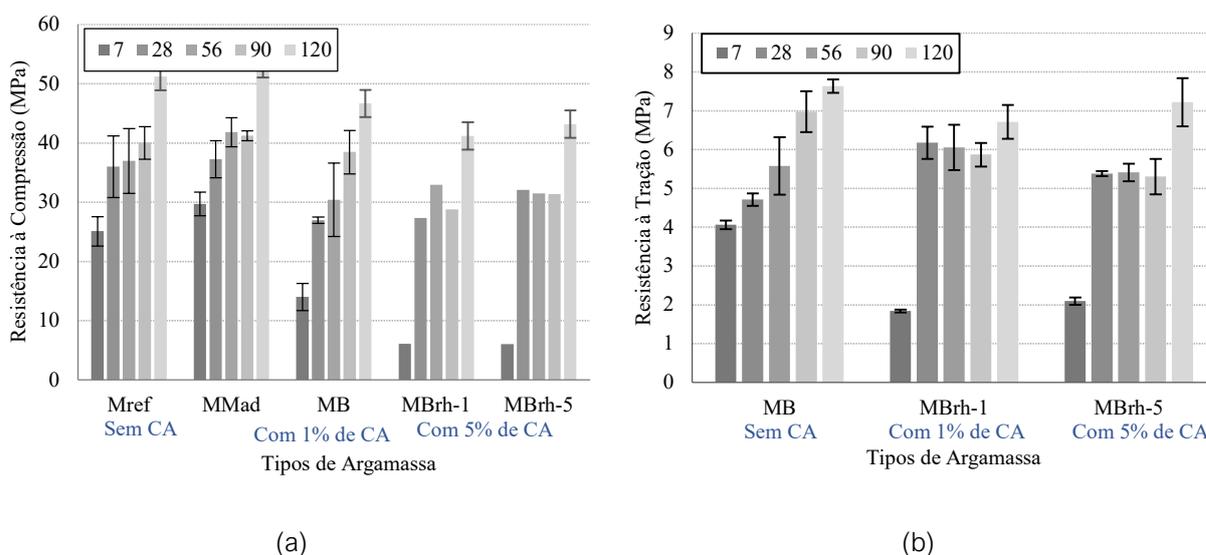
5.1.2 Avaliação do Efeito da Adição de Casca de Arroz

Na análise do efeito da casca de arroz nas propriedades da argamassa endurecida (Figura 33) observou-se que a adição da CA não prejudicou a resistência mecânica em idades avançadas (120 dias).

Contudo verificou-se que nas primeiras idades (7 dias) as argamassas com CA apresentam baixos valores de resistência à compressão. Contudo, observou-se que já aos 28 dias as resistências se equipararam, com os valores de 26,96 MPa, 27,29 MPa e 32,07, para a MB, MB_{RH1} e MB_{RH5} , respectivamente. Fato similar foi observado por Amantino et al. (2022), os quais, ao adicionarem 1% de casca de arroz *in natura* em substituição ao

volume de agregado miúdo em bio-concretos observaram que, ao longo do tempo, a diferença de resistência à compressão dos bio-concretos para o concreto de referência (sem CA) reduziu de 16% para 5%. Os resultados de resistência à compressão encontrados pelos autores se assemelharam aos desta pesquisa, os quais atingiram em torno de 25 MPa aos 28 dias e 30 MPa aos 90 dias. Souza et al. (2007) desenvolveram bioargamassas utilizando casca de arroz *in natura* para substituir o agregado miúdo em proporções de 10%, 20% e 30%. Para todas as amostras com casca de arroz, a resistência à compressão foi superior em comparação à argamassa de referência (sem CA), sendo que a argamassa com 20% de casca de arroz foi a que apresentou a melhor resistência à compressão aos 28 dias, alcançando 9,5 MPa.

Figura 33: Efeito da casca de arroz (CA), adicionada em substituição ao volume do agregado miúdo, ao longo do tempo na resistência à a) compressão e à b) tração na flexão.



Durante o período analisado, é importante destacar que a condição de cura utilizada nesta pesquisa (70% de UR) para as matrizes cimentícias contendo bio-agregado de casca de arroz não afetou negativamente as resistências mecânicas das argamassas avaliadas com a adição de bactérias.

A argamassa com 1% de CA obteve a melhor resistência à tração na flexão aos 28 dias, contudo, aos 120 dias a argamassa sem CA (MB) obteve resistência à tração na flexão superior às demais, atingindo 7,63 MPa, em comparação a 6,71 MPa (M_{BRH1}) e 7,22 MPa (M_{BRH5}). Desta forma, constata-se que o efeito do bio-agregado de casca de arroz foi menos impactante ao desempenho mecânico das argamassas do que o observado por Amantino et al. (2022), que obtiveram uma redução da resistência à tração na flexão de

15% aos 28 dias em compósitos de concreto com 1% de CA *in natura*, comparado à referência. Contudo, pondera-se que os autores não adicionaram fibras para auxiliar na resistência à tração do material, sendo este um dos fatores que explicam as diferenças, além do compósito conter frações de agregado mineral em sua composição.

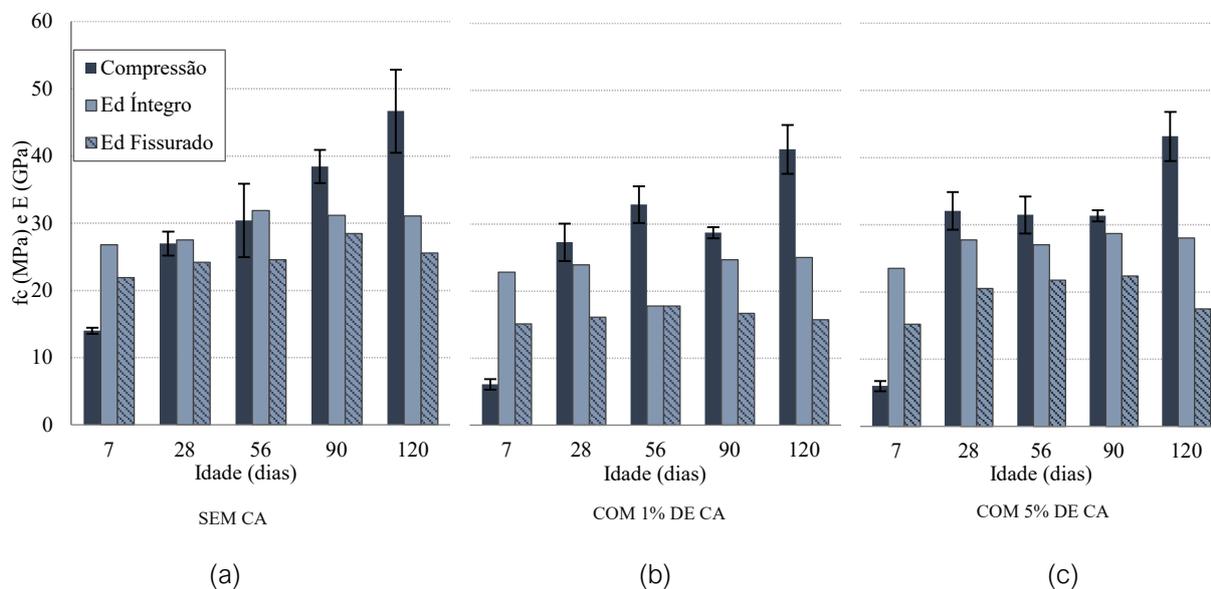
As argamassas com casca de arroz apresentaram maiores resultados para resistência à tração na flexão em relação à compressão (f_t/f_c) aos 28 dias, correspondendo a 23% e 19% para as argamassas MB_{RH-1} e MB_{RH-5}, respectivamente, enquanto a argamassa sem casca de arroz (MB) alcançou resistência à tração na flexão de 17%, em relação à compressão aos 28 dias. Este fato elucidada a atuação da CA como fibras naturais na matriz, semelhante ao desempenho das fibras poliméricas. Kenai et al. (2020) encontraram resultados semelhantes ao desenvolverem argamassas de reparo com adições minerais locais e fibras naturais, isolados e combinados. Os autores observaram que o uso de pozolanas (pozolana natural e escória de alto forno granulada moída) levou a uma ligeira redução da resistência à tração aos 28 dias devido à reação pozolânica tardia, no entanto, o uso simultâneo com as fibras de tamareira e alpha gerou o ganho de resistência à flexão nas argamassas de reparo, devido à adesão entre os bio-agregados e a pasta de cimento.

As resistências à tração e à compressão foram analisadas pela ANOVA (Apêndice E), indicando que houve diferenças significativas em relação às dosagens e às idades de ensaio, tanto para a resistência à tração na flexão quanto à compressão. A análise Tukey (Apêndice E) para a resistência à tração na flexão indicou que entre todas as amostras houve diferença significativa dos resultados. Já a resistência à compressão alcançou diferenças significativas apenas entre a argamassa sem o bio-agregado com as demais que tiveram a incorporação de 1% e 5%. Entre esses teores de casca de arroz, as amostras não apresentaram diferença significativa nos resultados de resistência à compressão. O efeito das idades comparando a última idade (120 dias) com as demais foi significativo tanto para as resistências à tração na flexão quanto para as resistências à compressão.

Os resultados de resistência à compressão e módulo dinâmico de argamassas foram correlacionados com o efeito da casca de arroz em amostras íntegras e fissuradas (Figura 34). Os maiores incrementos de resistência à compressão foram apresentados pelas argamassas com casca de arroz, com 350% e 434% para a MB_{RH1} e

MB_{RH5} , respectivamente, enquanto a argamassa de referência apresentou 145% de incremento da propriedade.

Figura 34: Correlação entre as resistências à compressão (em amostras íntegras) e o módulo de elasticidade dinâmico, ao longo do tempo, para as amostras **íntegras e fissuradas** (a) MB, (b) MB_{RH1} e (c) MB_{RH5}



Assim como as argamassas do primeiro grupo analisado (com o efeito da adição de agentes autocicatrizantes), as argamassas deste grupo também sofreram queda em todas as velocidades e módulos dinâmicos dos 90 aos 120 dias, contudo pela análise estatística, este decréscimo não foi significativo (Apêndice E).

Pode-se concluir que a rigidez das argamassas aumentou com a idade, sendo o maior módulo de elasticidade dinâmico em amostras íntegras observado para a argamassa sem casca de arroz, conforme relatado nos estudos de Amantino *et al.* (2022), Chabanes (2017) e Bezerra *et al.* (2023). Fato a ser ressaltado é que todas as argamassas apresentaram a maior evolução das propriedades dos 7 aos 56 dias, com discreto decaimento após os 90 dias.

Situação semelhante foi observada por Amantino *et al.* (2022), os quais observaram que todas as argamassas (de referência, com 1% de CA *in natura* e 1% de CA tratada) apresentaram a maior evolução de módulo de elasticidade estático nas idades iniciais, e após os 28 dias o módulo praticamente se estabilizou, chegando a reduzir a partir dos 90 dias para a argamassa com a adição de casca de arroz tratada.

De acordo com Chabannes et al., (2017), quando a interface entre o bio-agregado e a matriz cimentícia atinge o estado elastoplástico, há danos na interface entre a matriz cimentícia e o bio-agregado que fazem com que a carga seja transferida para os bio-agregados, que se compactam devido à sua baixa rigidez. A inclusão de bio-agregados porosos e de baixa densidade resulta em uma redução do módulo de elasticidade do concreto, e essa diminuição é mais acentuada com o aumento da quantidade de bio-agregados incorporados. Essa relação também foi observada nos estudos de que incorporou bio-agregados de bambu, e em Santos (2020) e Amantino (2021), que utilizaram casca de arroz como bio-agregado.

Ainda, como o módulo de elasticidade foi obtido a partir das velocidades de propagação de ondas, a presença de casca de arroz fez com que as velocidades diminuíssem. Sabe-se que este fato é atribuído às descontinuidades da matriz cimentícias ocasionadas pela adição de CA *in natura* e a porosidade deste bio-agregados, observado por Amantino *et al.* (2022) e Chabannes (2017). Quanto maior a presença de vazios, maior o isolamento térmico do material (CHEN *et al.*, 2013) e menores resistências mecânicas e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, visto que estas se dispersam em meio sólido.

Ressalta-se que, para as amostras íntegras e fissuradas, esperava-se um comportamento de maior redução das propriedades mecânicas ao adicionar bio-agregados, conforme apresentado pela literatura (AMANTINO *et al.*, 2022; CALDAS *et al.*, 2021; SANTOS, 2020). Contudo, com exceção dos 7 dias, as demais idades apresentaram resultados de resistência à compressão, módulo dinâmico e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas semelhantes e comparáveis. Pode-se atribuir ao fato da lavagem para remoção de extrativos, bem como a imersão da casca de arroz por 1h antes da mistura para que ficasse saturada com a água contendo solução de bactérias.

A velocidade de propagação de ondas e o módulo de elasticidade dinâmico das amostras íntegras foram analisados pela ANOVA, indicando que houve diferenças significativas em relação às dosagens e às idades de ensaio, tanto para a velocidade quanto ao módulo dinâmico (Apêndice D). Pela análise Tukey (Apêndice E) foi possível confirmar que o efeito da adição da casca de arroz trouxe diferenças significativas em todas as interações nos resultados de velocidade de propagação de ondas e no módulo dinâmico. O efeito das idades na análise Tukey também indicou diferenças significativas em todas as

idades tanto para a velocidade de propagação de ondas quanto para o módulo dinâmico, exceto na comparação de 90 a 120 dias.

Para as amostras fissuradas deste grupo, a ANOVA indicou diferenças significativas nos resultados de velocidade de propagação de ondas e módulo de elasticidade dinâmico (Apêndice D) tanto sob o efeito da adição de *CA in natura*, quanto sob a idade e a interação entre estes dois efeitos. A análise Tukey (Apêndice E) confirmou a diferença significativa (apresentada pelo número 1) para a variação das amostras e das idades.

5.2 AVALIAÇÃO VISUAL

As argamassas MM_{AD} (Figura 35) e MB (Figura 36) apresentaram um fechamento pontual de fissuras significativo durante o período de avaliação, dentre todas as argamassas especiais desenvolvidas. Por limitação do método empregado, a análise visual se limitou à avaliação superficial e não considerou a possibilidade de fechamento da fissura ao longo da sua profundidade. É possível observar que a argamassa com aditivo mineral (MM_{AD}) possuiu maior desempenho na autocicatrização superficial, uma vez que obteve em cada trecho da fissura, mais pontos de fechamento. Observou-se que o melhor fechamento de fissuras na argamassa com bactérias ocorreu para fissuras com abertura de 0,11 e 0,15 mm, enquanto o aditivo mineral promoveu o fechamento pontual de fissuras mais largas (de 0,15 e 0,25 mm). Esses comportamentos observados podem ser corroborados pelos resultados obtidos por ultrassom, com ganho de velocidade de propagação de ondas no tempo.

Figura 35: Fechamentos lineares e pontuais em diferentes trechos da amostra da MM_{AD}, com a idade expressa em dias após à abertura da fissura

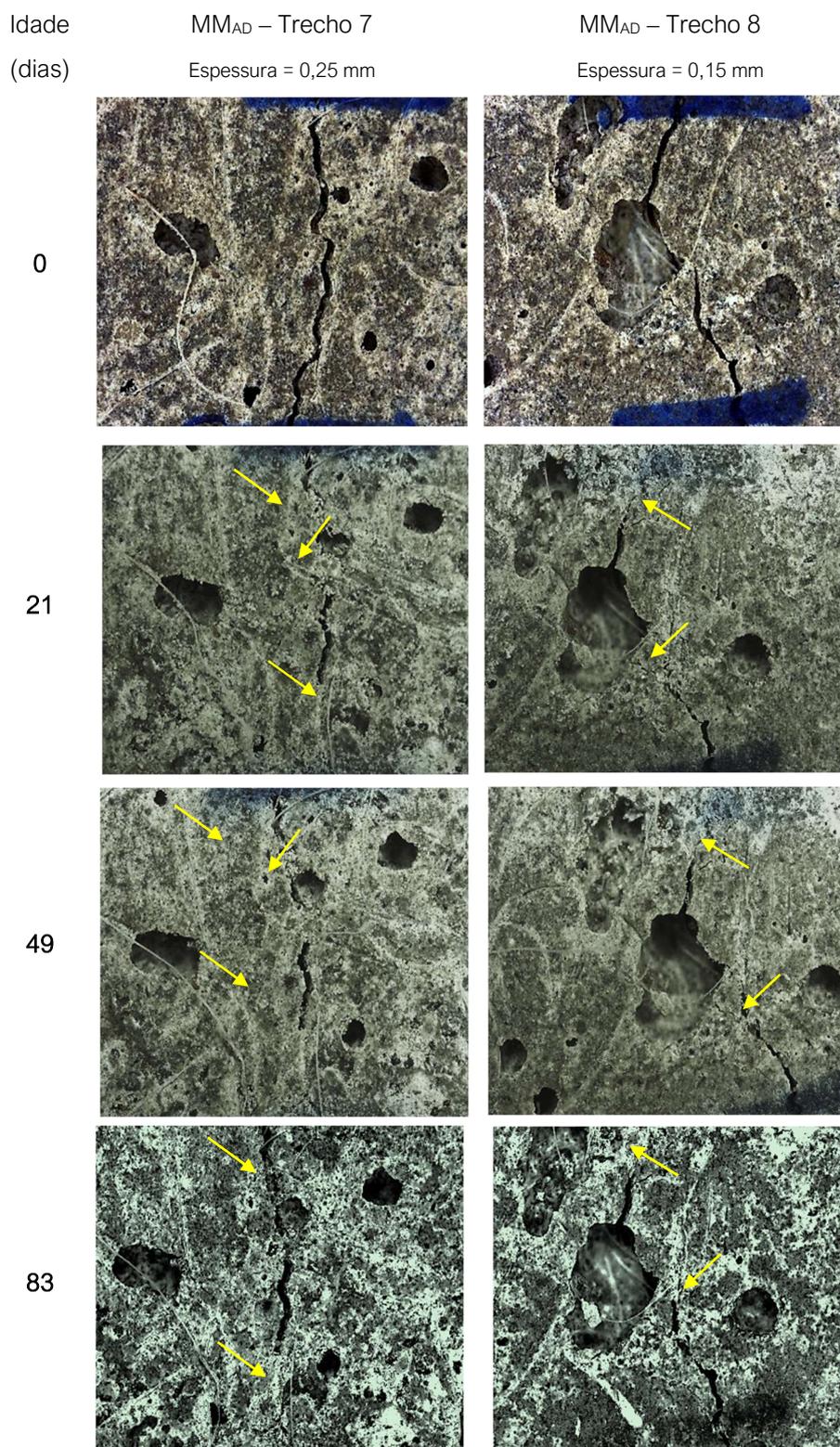
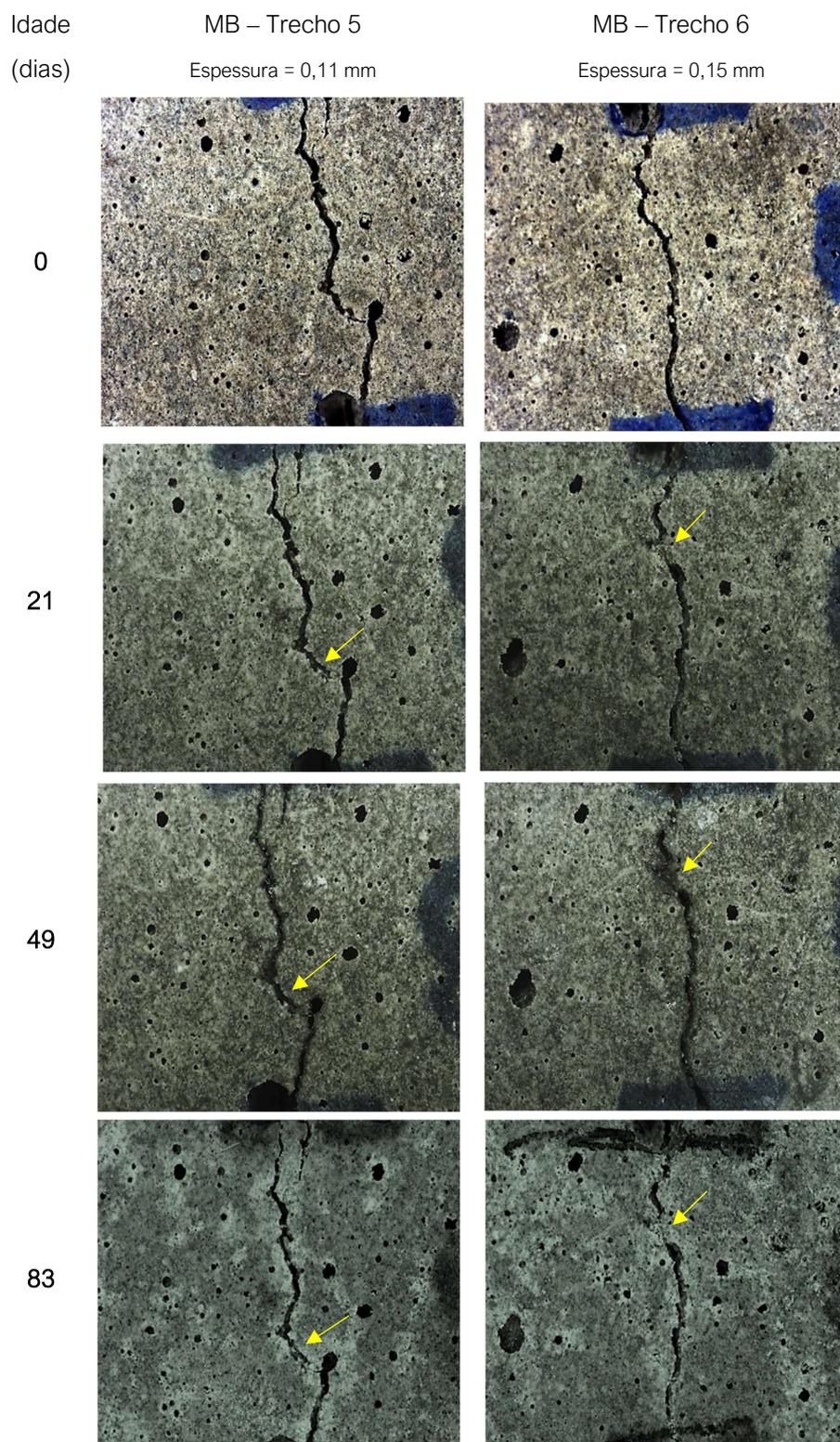


Figura 36: Fechamentos pontuais em diferentes trechos da amostra da MB, com a idade expressa em dias após à abertura da fissura



Schwantes-Cezario *et al.*, 2022 relatam que aos 28 dias já foi possível observar a autocicatrização de fissuras em amostras de concreto projetado com *Bacillus*

subtilis, adição de ureia e fonte de cálcio. Ao avaliarem a capacidade de fechamento de fissuras sem a adição de ureia e fonte de cálcio, os autores observaram a autocicatrização apenas aos 63 dias, tornando-se vantajoso o uso desta bactéria em matrizes cimentícias. Ghellere (2021) obteve o fechamento de fissuras já aos 7 dias tanto para a argamassa de referência, sem bactérias, quanto para argamassas com 10^5 esporos/ml de 5 diferentes tipos de *Bacillus sp.* com 1% de extrato de levedura e 1% de acetato de cálcio. O melhor resultado ocorreu para a bactéria coletada em parede de apartamento, com abertura de fissura de 0,29 mm.

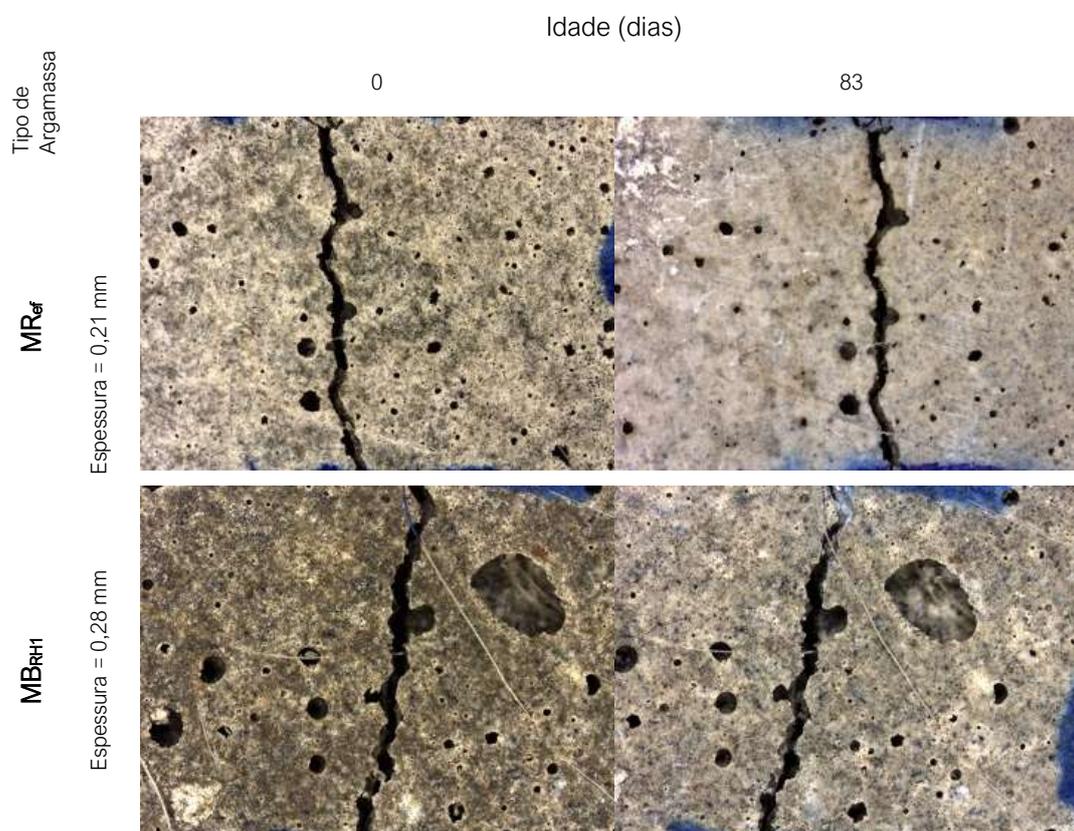
Ghellere (2021) constatou que a precipitação de carbonatos é de difícil detecção visual, sobretudo em fases iniciais, quando a quantidade formada é reduzida. À medida que o tempo passa, mais cristais se formam e se depositam nas paredes das fissuras, acumulando-se em direção à parede oposta da fissura. Como resultado, fissuras com menor abertura (inferiores à 0,43 mm) são seladas de forma mais rápida. Luo, Qian e Li (2015) obtiveram resultados similares ao constatarem que as fissuras em argamassas com adição de esporos bacterianos e larguras médias de 0,1-0,3 mm e 0,3-0,5 mm foram quase que totalmente reparadas ($\geq 85\%$ e 50 a 70% de recuperação, respectivamente), enquanto fissuras de 0,5-0,8 mm foram apenas parcialmente recuperadas ($\leq 30\%$ de recuperação). De acordo com Xu e Yao (2014), fissuras com larguras entre 0,1 e 0,4 mm foram parcialmente cicatrizadas por minerais precipitados a partir de bactérias não ureolíticas.

Esperava-se para todas as amostras de argamassas, a partir da inspeção realizada, um fechamento de fissuras mais expressivo ao longo do tempo, especialmente para argamassas contendo aditivo mineral e agente bacteriano (Figura 37). No entanto, apesar dos resultados pouco promissores da análise visual, o aumento progressivo das velocidades de propagação de ondas ao longo do tempo em argamassas fissuradas indica que os agentes autocicatrizantes estão atuando e que podem ser eficazes, com o passar do tempo, no processo de fechamento das fissuras, conforme detalhado na seção 5.1.

Um fator considerado relevante na formação de precipitados pode estar atrelado à umidade empregada ($70\% \pm 2$). Schwantes-Cesario *et al.* (2022) obtiveram aos 63 dias o completo fechamento de fissuras, e de até 0,3 mm para amostras com *B. subtilis* submetidas ao processo de cura submersa em tanque de água saturada com cal. Este mesmo processo de cura foi realizado por Lenz (2022), que avaliou dois tipos de *B. subtilis*

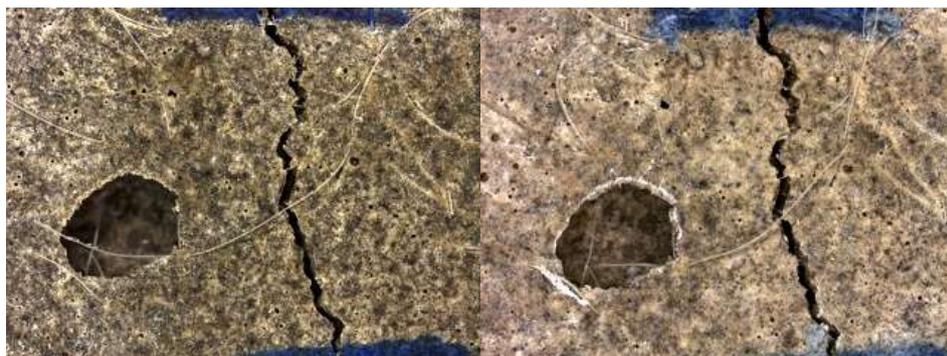
incorporados à argamassa cimentícia com e sem ar incorporado. Seus resultados apontaram cerca de 96% de fechamento de fissuras com abertura de 1,58 mm em amostras com *B. subtilis* e aditivo incorporador de ar; 72,95% de fechamento de fissuras com poros de até 2,09 mm em amostras *B. subtilis* AP91 com aditivo incorporador de ar e para esta mesma argamassa com a adição de 1% de extrato de levedura, a taxa de fechamento foi de 89,57% de cicatrização em fissuras com poros de até 2,28 mm. Ghellere (2021) manteve as amostras envoltas em manta geopolimérica umedecida, a fim de assegurar um teor de umidade mais elevado na região da fissura. A ausência de umidade, portanto, pode ter sido um dos possíveis fatores que interferiram no fechamento das fissuras das argamassas MR_{EF}, MB_{RH1} e MB_{RH5} por meio das observações visuais (Figura 37). Entretanto, ressalta-se que o ambiente de cura escolhido foi adotado haja vista que os estudos com casca de arroz recomendam o processo de cura em ambientes com umidade relativa mais baixa que a convencional, como 60% (BEZERRA *et al.*, 2023, FIDELIS, 2014), 65% (SANTOS, 2020). Isso porque o excesso de umidade acelera o processo de biodegradação dos bioagregados, além de causar alterações morfológicas, comprometendo a aderência fibra-matriz (FIDELIS, 2014).

Figura 37: Imagens de trechos aleatórios das amostras de MR_{ef}, MB_{RH1} e MB_{RH5}



MBR_{HS}

Espessura = 0,18 mm



Com a ampliação foi possível visualizar a dispersão das fibras de polipropileno na matriz, inclusive atuando como ponte na região da fissura. Como pode ser observado, com as análises visuais amplificadas em 18 vezes, por meio do estereomicroscópio, não foi possível verificar se houve fechamento pontual ou linear nas amostras, mesmo que parcial. Nesse caso, análises complementares por microscopia eletrônica de varredura seriam interessantes para validar essas considerações em futuras pesquisas. As velocidades de ondas ultrassônicas mostraram ganhos no tempo, por esse motivo acredita-se que, mesmo não sendo observado visualmente, ocorreram precipitações que poderiam ser vistas apenas a nível microscópico, como indicado.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

O objetivo geral deste estudo foi avaliar o potencial de autocicatrização de argamassas especiais em misturas ternárias, com agentes biológicos incorporados à casca de arroz ou na água de amassamento da mistura, além de aditivo mineral autocicatrizante comercial.

Com a realização desta pesquisa, constatou-se que tanto a incorporação de bactérias *Bacillus subtilis* AP91 como de aditivo mineral autocicatrizante tem potencial de autocicatrização em matrizes cimentícias íntegras e/ou fissuradas.

Entre os dois agentes de autocicatrização avaliados, o aditivo mineral disponibilizado no mercado trouxe os melhores resultados de desempenho mecânico ao longo do tempo, alcançando maiores resistências à compressão axial e à tração na flexão em todas as idades. Este aditivo também proporcionou o fechamento de fissuras com maiores dimensões, na ordem de 0,25 mm.

O fenômeno de fechamento de fissuras de até 0,15 mm também foi verificado por análise visual na argamassa com bactérias (MB). Porém, nas demais argamassas, visualmente o fechamento superficial das fissuras não foi observado. Contudo, deve ser ressaltado que o incremento das velocidades de propagação de ondas retrata a densificação da matriz cimentícia, sendo, deste modo, positivo ao longo do tempo para todas as argamassas, sobretudo para as que obtiveram a incorporação de *Bacillus subtilis* AP91 (MB, MB_{RH1} e MB_{RH5}). Portanto, conclui-se que houve a autocicatrização promovida pela adição bacteriana.

As menores resistências mecânicas da argamassa com o agente bacteriano, em relação à mistura de referência e aquela com a adição de aditivo mineral, podem estar relacionadas à incorporação de ar pelo extrato de levedura (EL), uma vez que as argamassas com este nutriente apresentaram um índice de vazios superior. Contudo, ressalta-se que a adição do agente bacteriano promoveu o maior ganho de resistência da argamassa a partir dos 7 dias, atingindo nas idades mais avançadas resistências

comparáveis com o obtido na presença do agente mineral e da argamassa de referência, permitindo ainda o fechamento de fissuras da ordem de 0,15 mm de abertura, como já explanado.

Nas matrizes com adição de sílica ativa e cinza volante, sem bactérias e aditivo cristalizante, foi constatada melhoria de desempenho mecânico a partir dos 56 dias de idade, decorrente das reações pozolânicas tardias que contribuem com a autocicatrização autógena.

Quanto ao uso da casca de arroz *in natura* como bio-agregado, bem como a lavagem da CA *in natura*, concluiu-se que para os teores adicionados – 1% e 5% - não há perdas significativas de desempenho mecânico após 28 dias em relação à amostra de referência.

Em uma análise geral entre as cinco argamassas desenvolvidas, o segundo grupo analisado (com bactérias, avaliando o efeito da CA *in natura* na matriz) foi o que apresentou os maiores incrementos de resistência à compressão dos 7 aos 120 dias, alcançando 70%, 85% e 86% para a MB, MBRH-1 e MBRH-5, respectivamente.

De forma geral, conclui-se que o emprego de combinações ternárias, com a incorporação de 35% de pozolanas (10% de sílica ativa e 25% de cinza volante), em relação à massa do cimento, aliado à incorporação de agentes biológicos (precipitadores de CaCO_3 na matriz cimentícia) é promissor na autocicatrização de matrizes cimentícias e de fissuras. Diante do exposto, o estudo mostrou que existe potencial de uso de bio-agregados, como a casca do arroz, para argamassas especiais, e que requerem determinado desempenho mecânico, além do emprego de bactérias incorporadas a essas.

Ressalta-se que é fundamental que se realizem pesquisas complementares para aprimorar os procedimentos laboratoriais empregados, com base em protocolos de investigação replicáveis, principalmente no que tange aos ensaios em amostras fissuradas. Estas perfazem amostras únicas, com performances distintas ao longo do tempo, dificultando análises comparativas.

A expectativa é que, por meio desses estudos, seja possível criar tecnologias laboratoriais capazes de produzir biomateriais para uso em construções reais em maior escala. Além disso, essas pesquisas podem fornecer subsídios para a produção

de materiais de reparo com potencial de autocicatrização, como argamassas, o que contribuiria para aumentar a durabilidade e vida útil das estruturas de concreto, considerando ainda o reaproveitamento de resíduos e, conseqüentemente, a redução dos impactos ambientais, sem falar na pegada de carbono a partir das combinações ternárias com adições minerais.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A autocicatrização cimentícia por meio do emprego de agentes biológicos precipitadores de CaCO_3 , bem como o uso de bio-agregados na forma *in natura* ainda é um assunto recente no Brasil, embora seja um país com abundante disponibilidade de resíduos agroindustriais. Para que se obtenha mais informações sobre do processo, fazem-se necessários mais estudos sobre as variáveis que interferem no fenômeno, sendo sugerido os seguintes estudos:

- Avaliar a quantidade e a combinação dos nutrientes extrato de levedura e lactato de cálcio, e se possível, substituir o primeiro haja vista a sua possível incorporação de ar na matriz;
- Estudar diferentes condições de cura (úmida ou por imersão em água) na recuperação das fissuras. Ainda, com este tipo de cura, avaliar a integridade do bio-agregado *in natura* dentro da pasta;
- Avaliar o potencial de aplicação dos ensaios não destrutivos em amostras fissuradas, uma vez que as fissuras não são uniformes e tornam as amostras individuais/únicas.
- Realizar análises das argamassas por técnicas microestruturais com foco tanto na matriz cimentícia bem como na região fissurada, ao longo do tempo, para a identificação mais precisa dos compostos formados e da capacidade de autocicatrização dos compósitos ao longo do tempo.
- Realizar estudos complementares para quantificar e validar o protocolo de incorporação das bactérias em bio-agregados.

REFERÊNCIAS

ABDULHAMEED, H. A.; NASSIF, H.; KHAYAT, K. H. Use of fiber-reinforced self-consolidating concrete to enhance serviceability performance of damaged beams. *Transportation Research Record*, v. 2672, n. 27, p. 45–55, 1 dez. 2018.

ABNT. **NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro: 2004. Disponível em: <www.abnt.org.br>.

ABNT. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro: 2005. Disponível em: <www.abnt.org.br>.

ABNT. **NBR 7211: Agregados para Concreto - Especificação**. p. 1–15, 2009a.

ABNT. **NBR 15900: Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro: 2009.

ABNT. **NBR 12653: Materiais Pozolânicos**. Rio de Janeiro: 2014.

ABNT. **NBR 16697: Cimento Portland — Requisitos**. Rio de Janeiro, Brasil, 2018. Disponível em: <www.abnt.org.br>

ABNT. **NBR 11768 - Aditivos químicos para concreto de cimento Portland**. Rio de Janeiro: 2019.

ABNT. **NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro: 2005.

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

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

ACI, C. 212. **Report on chemical admixtures for concrete**. American Concrete, 2010.

ACI546R. **Guide to concrete repair**. American Concrete Institute, 2014.

AISHEH, Y. I. A. et al. Influence of polypropylene and steel fibers on the mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, 2022.

ALSHALIF, A. F. et al. Isolation of Sulphate Reduction Bacteria (SRB) to Improve Compress Strength and Water Penetration of Bio-Concrete. **MATEC Web of Conferences**, 2016.

ALYOUSIF, A. **Self-Healing Capability of Engineered Cementitious Composites Incorporating Different Types of Pozzolanic Materials**. Doutorado—Toronto: Ryerson University, 2016.

AMANTINO, G. M. **Bioconcretos com resíduos a partir do arroz: análise de desempenho ao longo do tempo**. Mestrado—Passo Fundo: Faculdade IMED, 2021.

AMANTINO, G. M. et al. Assessment of bio-aggregate concretes' properties with rice residue. **Journal of Building Engineering**, v. 52, 2022.

AMZIANE, S.; SONEBI, M. **Overview on bio-based building material made with plant aggregate**. 2016. Disponível em: <<http://letters.rilem.net/index.php/rilem/article/view/9/11>>.

ANDREOLA, V. M. **Caracterização Física, Mecânica e Ambiental de Bio-concretos de Bambu**. Mestrado—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

ANGLANI, G.; TULLIANI, J. M.; ANTONACI, P. Behavior of pre-cracked self-healing cementitious materials under static and cyclic loading. **Materials**, v. 13, n. 5, 2020.

BAHRAMI, A.; SCHIERNING, G.; NIELSCH, K. **Waste Recycling in Thermoelectric Materials. Advanced Energy Materials**. Wiley-VCH Verlag, 2020.

BASILISK, S. H. C. **Water basin Port of Rotterdam**. Disponível em: <<https://basiliskconcrete.com/en/portfolio-items/bluswaterbassin-havenbedrijf-rotterdam-2/>>. Acesso em: 23 abr. 2023.

BENYAHIA, A. et al. Characterization of fiber reinforced self-consolidating mortars for use in patching damaged concrete. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 14, n. 6, p. 1124–1142, 2017.

BERGH, J. M. VAN DER et al. Preliminary approach to bio-based surface healing of structural repair cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 248, 2020.

BEZERRA, C. G. et al. Rheological characterization of ternary pastes for the development of lightweight rice-husk bio-concretes. **Revista Matéria**, v. 28, n. 1, 2023.

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**, v. 20, n. 3, p. 419–429, 2020.

CALDAS, L. R. et al. **Development of GHG Emissions Curves for Bio-Concretes Specification: Case Study for Bamboo, Rice Husk, and Wood Shavings Considering the Context of Different countries**. ICBBM. **Anais...**Barcelona: 2021.

CALDAS, L. R. et al. Circular economy in concrete production: Greenhouse Gas (GHG) emissions assessment of rice husk bio-concretes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 15, n. 6, 2022.

CAPPELLESSO, V. G. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura**. Mestrado—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

CASTRO, V. et al. Avaliação dos efeitos de pré-tratamentos da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cambage no grau de compatibilidade com cimento Portland. **Revista Árvore**, n. 5, p. 935–942, 2014.

CHABANNES, M. et al. **Evaluation of shear strength parameters of bio-based concretes by means of triaxial compression**. ICBBM & ECOGRAFI. **Anais...**Clermont-Ferrand: 2017.

CHEN, X.; YUAN, J.; ALAZHARI, M. Effect of microbiological growth components for bacteria-based self-healing on the properties of cement mortar. **Materials**, v. 12, n. 8, 2019.

CHINDAPRASIRT, P.; JATURAPITAKKUL, C.; SINSIRI, T. Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 7, p. 1534–1541, 2007.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. 2023.

DE BELIE, N. et al. **A review of self-healing concrete for damage management of structures**. **Advanced Materials Interfaces**. Wiley-VCH Verlag, 2018.

DE MORAES, A. C. F. Z. et al. **Influence of the use of fly ash and rice husk ash on the fresh state properties of lightweight bio-concretes.** RILEM. Anais...2021.

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Reciclagem de Resíduos Agroindustriais: Cinza de Casca de Arroz como Fonte Alternativa de Sílica. **Cerâmica Industrial**, 2005.

DHAMI, N. K.; REDDY, S. M.; MUKHERJEE, A. Biofilm and Microbial Applications in Biomineralized Concrete. Em: SETO, J. (Ed.). **Advanced Topics in Biomineralization**. 1. ed. InTech, 2012. v. 1p. 138–164.

FERRÁNDIZ-MAS, V. et al. Lightweight mortars containing expanded polystyrene and paper sludge ash. **Construction and Building Materials**, v. 61, p. 285–292, 30 2014.

FERRARA, L.; KRELANI, V. **Fracture Testing Based Approach to Assess the Self-Healing Capacity of Cementitious Composites.** Millan: 2013.

FERRARA, L.; KRELANI, V. **A fracture testing-based approach to assess the self-healing capacity of cementitious composites.** VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. Anais...Milan: 2013b.

FIDELIS, M. E. A. **Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta.** Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

FOLLIARD, K. *et al.* **Fiber in Continuously Reinforced Concrete Pavements.** 2006. Disponível em: <www.ntis.gov>.

FRARE, A. *et al.* Revisão sistemática sobre reação álcali-agregado: panorama comparativo dos estudos realizados no Canadá e no Brasil. **Revista ALCONPAT**, v. 13, n. 1, p. 1–27, 2023.

FURNAS. **Concretos - Massa, estrutural, projetado e compactado com rolo.** 1. ed. Aparecida de Goiânia. v. 1

G1. **Usina transforma 31 mil toneladas de casca de arroz em energia.** Disponível em: <<https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/especial-publicitario/grupo-ezos/grupo-ezos/noticia/2022/01/11/usina-transforma-31-mil-toneladas-de-casca-de-arroz-em-energia.ghtml>>. Acesso em: 4 abr. 2023.

GARCIA, E. et al. Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 251–258, 2015.

GHELLERE, P. **Seleção e avaliação do desempenho de bactérias produtoras de CaCO_3 na recuperação de fissuras dos materiais a base de cimento**. Mestrado—Foz do Iguaçu: Universidade Federal da Integração Latino-Americana, 2021.

GHOSH, S. et al. Microbial activity on the microstructure of bacteria modified mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 2, p. 93–98, 2009.

GIANNINI, E. R. *et al.* Characterization of concrete affected by delayed ettringite formation using the stiffness damage test. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 253–264, 2018.

HASPARYK, N. P.; DA GLORIA, M. Y. **Método de Ensaio para a Determinação do Teor de Compensação da Água de Bio-agregados (serragem de madeira, partículas de bambu e casca de arroz) empregados como Agregados Leves em Bioconcretos**. Goiânia: 2022.

HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C. **Deterioração do Concreto por Reações Expansivas**. CBDB, Salvador - BA: 2019.

HELENE, P. R. L. (PAULO R. DO L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. PINI, 1992.

HUNG, C. C.; SU, Y. F.; SU, Y. M. Mechanical properties and self-healing evaluation of strain-hardening cementitious composites with high volumes of hybrid pozzolan materials. **Composites Part B: Engineering**, v. 133, p. 15–25, 2018.

HWANG, C. L.; CHANDRA, A. The Use of Rice Husk Ash in Concrete. Em: WILLIAM ANDREW (Ed.). **Waste Materials Used in Concrete Manufacturing**. Gotemburgo: 1996. v. 1p. 184–234.

JONKERS, H. M. et al. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 2, p. 230–235, 2010.

JONKERS, H. M. Bacteria-based self-healing concrete. **Heron**, v. 56, n. 1, 2011.

JUSTO-REINOSO, I. et al. Air-entraining admixtures as a protection method for bacterial spores in self-healing cementitious composites: Healing evaluation of early and later-age cracks. **Construction and Building Materials**, v. 327, 2022.

KAN, L.-L. et al. Self-Healing Characterization of Engineered Cementitious Composite Materials. **ACI Materials Journal**107, v. 107, 2010.

KENAI, A. et al. Performance of Repair Mortar with Natural Fibers. **MRS Advances**, v. 5, n. 25, p. 1295–1304, 2020.

KIM, D. H. et al. **Materials Selection for Concrete Overlays: Information Survey Review and Evaluation of Existing Concrete Overlays in Texas**. 1. ed. Texas: 2011. v. 1

KRISHNAPRIYA, S.; VENKATESHBABU, D. L.; PRINCE ARULRAJ, G. Isolation and identification of bacteria to improve the strength of concrete. **Microbiological Research**, p. 48–55, 2015.

KUDLANVEC JUNIOR, V. L. **Aderência de Argamassas de Reparo em Substrato de Concreto com Ênfase no Comportamento Reológico**. Dissertação de Mestrado - Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2017.

LATROCH, N. et al. Physico-mechanical and thermal properties of composite mortars containing lightweight aggregates of expanded polyvinyl chloride. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 77–87, 2018.

LENZ, S. K. **Influência de Diferentes Linhagens Bacterianas e Nutrientes na Autocicatrização de Matrizes a Base de Cimento com e Sem Ar Incorporado**. Dissertação de Mestrado—Foz do Iguaçu: Universidade Federal da Integração Latino Americana, 2022.

LENZ, S.K, POSSAN, E., PASSARINI, M.R.Z, GHELLERE, P. Influence of different bacterial strains on cracks self-healing in cement-based matrices with and without incorporated air. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, 2023.

LILGE, D. S.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J. Performance evaluation of wood-cement panels manufactured with two forest species in combination with rice husk. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 1, p. 20–42, 2021.

LIMBACHIYA, M.; SEDDIK, M.; OUCHAGOUR, M. Y. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 439–449, 2012.

LIU, J.; JIA, Y.; WANG, J. Experimental Study on Mechanical and Durability Properties of Glass and Polypropylene Fiber Reinforced Concrete. **Fibers and Polymers**, v. 20, n. 9, p. 1900–1908, 2019.

LOTHENBACH, B.; SCRIEVENER, K.; HOOTON, R. D. **Supplementary cementitious materials**. **Cement and Concrete Research**, 2011.

MADDALENA, R.; TAHA, H.; GARDER, D. Self-healing potential of supplementary cementitious materials in cement mortars: Sorptivity and pore structure. **Elsevier**, 2021.

MALLAT, A.; ALLICHE, A. **Mechanical investigations of two repair mortars and repaired system**. Paris: 2011.

MCCARTHY, M. J.; DYER, T. D. Pozzolanas and pozzolanic materials. Em: **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. Elsevier, 2019. p. 363–467.

MENDES, T. M.; REPETTE, W. L. Effect of nano-silica on Portland cement matrix. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 6, p. 1383–1389, 2019.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Ed. Hasparyk, N.P., 2. ed., IBRACON, 2014.

MULLEM, T. VAN et al. First large scale application with self-healing concrete in Belgium: Analysis of the laboratory control tests. **Materials**, v. 13, n. 4, 2020.

NASCIMENTO, Y. M. G. DO et al. **Influence of thermal and alkaline treatments of bamboo, rice husk and wood on mechanical properties of bioconcretes**. RILEM. *Anais...*2021.

NEVES JUNIOR, A. **Captura de CO₂ em Materiais Cimentícios Através de Carbonatação Acelerada**. Doutorado—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: 2016.

NTIMUGURA, F. et al. **Mechanical, thermal, hygroscopic and acoustic properties of bio-aggregates – lime and alkali - activated insulating composite materials: A review of current status and prospects for miscanthus as an innovative resource in the Southwest of England**. **Sustainable Materials and Technologies**. Elsevier B.V., 2020.

PACHECO, F. **Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto.** Doutorado—São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2020.

PARRACHA, J. L. *et al.* Performance of lightweight thermal insulating mortars applied on brick substrate specimens and prototype wall. **Construction and Building Materials**, v. 364, 18 jan. 2023.

PINHEIRO, I. S. H. B. **Beneficiamento e caracterização de resíduos gerados na produção de blocos cerâmicos visando à aplicação como adição pozolânica.** Mestrado—Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

PINTO, M. C. **Influência da temperatura e de tratamentos alcalinos na remoção dos extrativos da biomassa de madeira e seus efeitos na hidratação de pastas de cimento e de bioconcreto.** Mestrado—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico.** Doutorado—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

POSSAN, E., DAL MOLIN, D.C.C., ANDRADE, J.J.O. A conceptual framework for service life prediction of reinforced concrete structures. **J Build Rehabil**, 2018.

PRUSTY, J. K.; PATRO, S. K.; BASARKAR, S. S. Concrete using agro-waste as fine aggregate for sustainable built environment – A review. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 5, n. 2, p. 312–333, 2016.

RAMPANELLI, C. H. O. **Proporcionamento de materiais cimentícios para reparo de estruturas hidráulicas empregando modelo de empacotamento de partículas.** Mestrado—Foz do Iguaçu: Universidade Federal da Integração Latino-Americana, 2021.

RASHID, K. *et al.* Experimental and analytical investigations on the behavior of interface between concrete and polymer cement mortar under hygrothermal conditions. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 414–425, 2015.

RIPOLI FILHO, F. **Estudo experimental de um compósito de argamassa utilizando cinza e casca de arroz, aplicado em blocos de vedação.** Doutorado—Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

ROIG-FLORES, M.; FORMAGINI, S.; SERNA, P. Self-healing concrete-what is it good for? **Materiales de Construcción**, v. 71, n. 341, 2021.

SALAS, J.; ALVAREZ, M.; VERAS, J. Lightweight insulating concretes with rice husk. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 8, n. 3, p. 171–181, 1986.

SALLES, P. V. et al. A importância da segregação do agregado reciclado na resistência e na durabilidade do concreto estrutural. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 3, p. 177–196, 2021.

SANTANA, W. G. et al. **Manual: controle tecnológico do concreto em empreendimentos de geração**. 1. ed. Goiânia: Furnas, 2018. v. 1

SANTOS, D. **Desenvolvimento de painéis sanduíche leves com faces em compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal e núcleo em bioconcreto de casca de arroz**. Doutorado—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020.

SBRIGHI NETO, C. Agregados naturais, britados e artificiais para concreto. **Concreto: ciência e tecnologia**, v. 1, p. 233–260, 2011.

SCHWANTES-CEZARIO, N. et al. Crack filling in concrete by addition of bacillus subtilis spores – Preliminary study. **DYNA (Colombia)**, v. 85, n. 205, p. 132–139, 2018.

SCHWANTES-CEZARIO, N. et al. Potential of cave isolated bacteria in self-healing of cement-based materials. **Journal of Building Engineering**, v. 45, 2022.

SCHWANTEZ, N. **Desempenho de Bacillus sp. na biocimentação de materiais cimentícios**. Mestrado—Londrina: Universidade Estadual de Londrina, 2017.

SEIFAN, M.; SAMANI, A. K.; BERENJIAN, A. **Bioconcrete: next generation of self-healing concrete**. New Zealand: 2016.

SHAFIGH, P. et al. Agricultural wastes as aggregate in concrete mixtures - A review. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 110–117, 2014.

SHIELDS, Y. et al. An investigation of suitable healing agents for vascular-based self-healing in cementitious materials. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 23, 2021.

SILVA, D. M. G. DA et al. Calcium hydroxide influence in autogenous self-healing of cement-based materials in various environmental conditions. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 2, p. 209–224, 2021.

SILVA, M. R. T. et al. **Compressive stress-strain behavior of bio-concretes produced with agroindustrial residues and fly ash and rice husk ash SCMs**. RILEM. *Anais...*2021.

SIRAJUDDIN, M.; GETTU, R. Plastic shrinkage cracking of concrete incorporating mineral admixtures and its mitigation. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 51, n. 2, 2018.

SON, N. K. et al. **Investigation of Agro-concrete using by-products of Rice Husk in Mekong Delta of Vietnam**. Procedia Engineering. *Anais...*Elsevier Ltd, 2017.

SOUZA, J. et al. Avaliação de argamassas com cinza e casca de arroz. **51º Congresso Brasileiro de Cerâmica**, 2007.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. PINI, 1998.

SUA-IAM, G.; MAKUL, N. Utilization of limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete incorporating high volumes of untreated rice husk ash as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 455–464, 2013.

SZEMEREY-KISS, B.; TÖRÖK, Á.; SIEGISMUND, S. The influence of binder/aggregate ratio on the pore properties and strength of repair mortars. **Environmental Earth Sciences**, v. 69, n. 4, p. 1439–1449, 2013.

TAKAGI, E. M. et al. Self-healing of self-compacting concretes made with blast furnace slag cements activated by crystalline admixture. **Int. J. Materials and Product Technology**, v. 56, n. 2, p. 169–186, 2018.

TAKAGI, E. M.; LIMA, M. G.; HELENE, P. R. L. **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III**. 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR). *Anais...*London: 2012.

TALAEKHOZAN, A. et al. A Review of Self-healing Concrete Research Development. **Environmental Treatment Techniques**, v. 2, n. 1, p. 1–11, 2014.

TOUTANJI, H. A. Properties of polypropylene fiber reinforced silica fume expansive-cement concrete. **Construction and Building Materials**. Huntsville: 1999.

USDA, U. S. Department of Agriculture. **World rice supply and utilization**. US: 2023.

VALENCIA GONZÁLEZ, Y.; SANTANA, Â. P.; CARVALHO, J. C. DE. Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología. **Bactérias nativas indutoras de precipitação de minerais de carbonato de cálcio em solos tropicais**, p. 15–21, 2014.

VAN TITTELBOOM, K. et al. **Most recent advances in the field of self-healing cementitious materials**. 4th International Conference on Self-Healing Materials. **Anais...** 2013.

VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. Self-healing in cementitious materials-a review. **Materials**, v. 6, n. 6, p. 2182–2217, 2013.

VIEIRA, G. L. **Influência da microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento**. Doutorado—Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

WALTER, J. P.; ROSSATO, M. V. **Destino do Resíduo Casca de Arroz na Microrregião de Restinga Seca-RS: Um Enfoque à Responsabilidade Socioambiental**. VI Congresso Nacional De Excelência Em Gestão. **Anais...**2010.

WANG, J. et al. A chitosan based pH-responsive hydrogel for encapsulation of bacteria for self-sealing concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 93, p. 309–322, 2018.

WANG, J. Y.; DE BELIE, N.; VERSTRAETE, W. Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, v. 39, n. 4, p. 567–577, 2012.

WIKTOR, V.; JONKERS, H. M. Un nouveau béton auto-cicatrisant grâce à l'incorporation de bactéries. **Materiaux et Techniques**, v. 99, n. 5, p. 565–571, 2011.

WIKTOR, V.; JONKERS, H. M. Field performance of bacteria-based repair system: Pilot study in a parking garage. **Case Studies in Construction Materials**, v. 2, p. 11–17, 2015.

WU, F.; YU, Q.; LIU, C. Durability of thermal insulating bio-based lightweight concrete: Understanding of heat treatment on bio-aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 269, 2021.

ZAREEI, S. A. et al. Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: Evaluating durability and mechanical properties. **Case Studies in Construction Materials**, v. 7, p. 73–81, 2017.

ZHANG, W. et al. Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: A review. **Composites Part B: Engineering**, v. 189, 2020.

ZIEGLER, F. et al. Evaluation of internal and superficial self-healing of cracks in concrete with crystalline admixtures. **Materials**, v. 13, n. 21, p. 1–18, 2020.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS

Ensaio de Granulometria - Areia			
<i>Peneira (Abertura em mm)</i>	<i>Massa Retida</i>	<i>%</i>	<i>% Retida Acumulada</i>
4,8	0	0,00%	0,00%
2,36	3,28	0,99%	0,99%
1,2	13,1	3,94%	4,93%
0,6	51,06	15,37%	20,31%
0,3	121,61	36,62%	56,92%
0,15	120,73	36,35%	93,28%
Fundo	22,33	6,72%	100,00%
Módulo de Finura	1,76	Diâmetro Máx.	1,2 mm

Massa Específica e Absorção - Areia			
	Norma NBR 16916/2021		
	<i>Amostra 1</i>	<i>Amostra 2</i>	<i>Amostra 3</i>
mb	499,990	500,060	500,060
mc	615,370	603,080	586,200
md	904,470	889,950	874,000
ma	493,660	494,700	494,200
Va	290,115	287,878	288,811
ρ_s (g/cm³)	2,352	2,332	2,340
$\rho_{smédio}$ (g/cm³)		2,341	
Absorção	1,282	1,083	1,186
Abs. média		1,184	

Massa Específica e Absorção - Casca de Arroz			
	Norma NBR 16916/2021		
	<i>Amostra 1</i>	<i>Amostra 2</i>	<i>Amostra 3</i>
mb	30,01	30,005	30
mc	140,82	140,875	140,93
md	583,46	582,535	581,61
ma	21,99	22,465	22,94
Va	444,1947	443,2112393	442,2278
ρ_s	0,3940	0,3956	0,3971
$\rho_{smédio}$ (g/cm³)		0,3956	

Massa Unitária e Índice de Vazios da Areia		
NBR 16972/2021 - Método A		
Volume do recipiente	10,025 litros	
	<i>Amostra 1</i>	<i>Amostra 2</i>
mr	1,385	1,385
ma+r	17,975	18,085
ρ_s (g/cm³)	1,655	1,666
$\rho_{smédio}$ (g/cm³)		1,660

Massa Unitária e Índice de Vazios da Casca de Arroz		
NBR 16972/2021 - Método A		
Volume do recipiente	10,0251 litros	
	<i>Amostra 1</i>	<i>Amostra 2</i>
mr	1,375	1,375
ma+r	2,71	2,712
ρ_s (g/cm³)	0,13317	0,13337
$\rho_{smédio}$ (g/cm³)		0,13327

Absorção Casca de Arroz

<i>Tempo (min)</i>	<i>Amostra 1</i>			<i>Amostra 2</i>			<i>Média</i>	
	<i>Peso sachê (g)</i>		<i>0,7</i>	<i>Peso sachê (g)</i>		<i>1,7</i>	<i>Absorção</i>	<i>Desvio P.</i>
	<i>Peso (g)</i>	<i>Ganho de Massa</i>	<i>Absorção</i>	<i>Peso (g)</i>	<i>Ganho de Massa</i>	<i>Absorção</i>		
0	10	0	0%	10	0	0%	0%	0
2	18	7,3	73%	19	7,3	73%	73%	0
4	19	8,3	83%	20	8,3	83%	83%	0
6	21	10,3	103%	20	8,3	83%	93%	0,01
8	20,8	10,1	101%	20	8,3	83%	92%	0,0081
10	19,8	9,1	91%	20	8,3	83%	87%	0,0016
12	20	9,3	93%	21	9,3	93%	93%	0
14	20	9,3	93%	21	9,3	93%	93%	0
16	21	10,3	103%	20	8,3	83%	93%	0,01
18	19	8,3	83%	21	9,3	93%	88%	0,0025
20	20	9,3	93%	20	8,3	83%	88%	0,0025
30	20	9,3	93%	22	10,3	103%	98%	0,0025
60	20	9,3	93%	21	9,3	93%	93%	0
120	21	10,3	103%	20	8,3	83%	93%	0,01
180	21	10,3	103%	21	9,3	93%	98%	0,0025
240	20	9,3	93%	21	9,3	93%	93%	0
300	20	9,3	93%	21	9,3	93%	93%	0
360	20	9,3	93%	21	9,3	93%	93%	0
420	21	10,3	103%	20	8,3	83%	93%	0,01
480	20	9,3	93%	21	9,3	93%	93%	0
540	20	9,3	93%	20	8,3	83%	88%	0,0025
600	20	9,3	93%	21	9,3	93%	93%	0
660	20	9,3	93%	21	9,3	93%	93%	0
1440	20	9,3	93%	22	10,3	103%	98%	0,0025

APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DE AGLOMERANTES E FIBRA

Massa Específica - Aglomerantes									
NBR 16605/2021									
	<i>Cimento CP-VARI</i>			<i>Sílica Ativa</i>			<i>Cinza Volante</i>		
	<i>Amostra 1</i>	<i>Amostra 2</i>	<i>Amostra 3</i>	<i>Amostra 1</i>	<i>Amostra 2</i>	<i>Amostra 3</i>	<i>Amostra 1</i>	<i>Amostra 2</i>	<i>Amostra 3</i>
V1	0,200	0,340	0,480	0,850	0,775	0,700	0,300	0,350	0,400
m	60,050	60,020	59,990	40,000	39,995	39,990	40,030	40,020	40,010
V2	19,750	19,875	20,000	18,800	18,790	18,780	19,900	19,975	20,050
<i>ρ^s (g/cm³)</i>	3,072	3,072	3,073	2,228	2,220	2,212	2,042	2,039	2,036
<i>$\rho_{smédio}$ (g/cm³)</i>		3,072			2,220			2,039	

Características Fibra de Polipropileno	
<i>Propriedades</i>	<i>Descrição</i>
Número de Filamento/kg	300 milhões
Resistência a Álcalis	Excelente
Resistência a Ácidos	Excelente
Condutividade elétrica	Baixa
Condutividade térmica	Baixa

APÊNDICE C – RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

<i>Resistência à Compressão (MPa)</i>					
<i>Tipo</i>	7	28	56	90	120
M _{REF}	25,093	35,982	36,953	40,013	51,213
Desvio M _{REF}	3,766	3,464	2,474	1,974	2,300
M _{AD}	29,712	37,245	41,823	41,235	53,340
Desvio M _{AD}	0,745	2,511	5,213	3,115	0,521
MB	14,003	26,960	30,399	38,446	46,671
Desvio MB	0,457	1,775	5,462	2,454	6,186
M _{RH1}	6,066	27,289	32,930	28,746	41,180
Desvio M _{RH1}	0,771	2,801	2,764	0,845	3,660
M _{RH5}	6,009	32,072	31,481	31,351	43,174
Desvio M _{RH5}	0,915	1,741	1,994	3,678	1,431

<i>Resistência à Tração na Flexão (MPa)</i>					
<i>Tipo</i>	7	28	56	90	120
M _{REF}	5,884	6,340	6,957	6,420	7,815
Desvio M _{REF}	0,038	0,658	0,336	0,780	0,195
M _{AD}	5,608	5,979	5,547	6,114	7,976
Desvio M _{AD}	0,604	0,065	0,292	0,423	0,082
MB	4,061	4,710	5,578	6,972	7,631
Desvio MB	0,115	0,163	0,738	0,526	0,172
M _{RH1}	1,839	6,175	6,053	5,869	6,711
Desvio M _{RH1}	0,038	0,415	0,582	0,303	0,433
M _{RH5}	2,099	5,379	5,409	5,302	7,217
Desvio M _{RH5}	0,094	0,065	0,229	0,454	0,620

APÊNDICE D – VELOCIDADES DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS E MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassônicas (m/s)					
<i>Tipo</i>	7	28	56	90	120
MR _{EF} (fissurado)	3134,33	3259,00	3689,67	3536,67	3344,67
MR _{EF} (íntegro)	3745,00	3824,67	3984,00	3873,00	3895,33
MM _{AD} (fissurado)	3522,00	3557,67	3424,00	3662,67	3390,00
MM _{AD} (íntegro)	4038,33	4093,00	4317,00	4419,67	4198,00
MB (fissurado)	3494,33	3672,67	3699,00	3984,33	3775,67
MB (íntegro)	3865,67	3916,33	4217,00	4167,33	4162,67
MB _{RH1} (fissurado)	3030,33	3130,67	3289,00	3183,33	3091,00
MB _{RH1} (íntegro)	3728,67	3815,00	3846,00	3877,00	3904,00
MB _{RH5} (fissurado)	2940,00	3417,67	3520,67	3568,33	3154,33
MB _{RH5} (íntegro)	3660,00	3972,67	3921,33	4041,67	3992,67

Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)					
<i>Tipo</i>	7	28	56	90	120
MR _{EF} (fissurado)	16,41	17,74	22,74	20,90	18,69
<i>Desvio</i>	0,32	0,24	0,17	0,14	0,34
MR _{EF} (íntegro)	23,43	24,44	26,52	25,06	25,35
<i>Desvio</i>	0,27	0,44	0,21	0,19	0,11
MM _{AD} (fissurado)	22,90	23,37	21,64	24,77	21,22
<i>Desvio</i>	0,04	0,09	0,15	0,18	0,13
MM _{AD} (íntegro)	30,11	30,93	34,41	36,06	32,53
<i>Desvio</i>	0,51	0,53	0,17	0,55	0,14
MB (fissurado)	21,90	24,19	24,54	28,47	25,56
<i>Desvio</i>	0,93	0,50	0,38	0,26	0,10
MB (íntegro)	26,80	27,50	31,89	31,14	31,07
<i>Desvio</i>	0,10	0,15	0,43	0,30	0,14
MB _{RH1} (fissurado)	15,08	16,10	17,77	16,66	15,69
<i>Desvio</i>	0,12	0,10	0,12	1,10	0,10
MB _{RH1} (íntegro)	22,84	23,91	17,77	24,69	25,04
<i>Desvio</i>	0,13	0,41	0,19	0,13	0,21
MB _{RH5} (fissurado)	15,19	20,52	21,77	22,37	17,48
<i>Desvio</i>	0,49	0,73	0,15	0,36	0,17
MB _{RH5} (íntegro)	23,53	27,72	27,01	28,70	28,00
<i>Desvio</i>	0,11	0,34	0,21	0,12	0,12

APÊNDICE E – ANÁLISES ESTATÍSTICAS

<i>Variável de Controle</i>	Resistência à Tração					Resistência à Compressão				
	<i>DF</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>f-test</i>	<i>p-valor</i>	<i>DF</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>f-test</i>	<i>p-valor</i>
Amostra	4,00	30,69	7,67	33,92	0,00	4,00	1979,65	494,91	81,50	0,00
Idade (dias)	4,00	81,65	20,41	90,23	0,00	4,00	7395,36	1848,84	304,46	0,00
Interaction	16,00	41,25	2,58	11,40	0,00	16,00	577,78	36,11	5,95	0,00

Efeito Bactéria										
<i>Variável de Controle</i>	Resistência à Tração					Resistência à Compressão				
	<i>DF</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>f-test</i>	<i>p-valor</i>	<i>DF</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>f-test</i>	<i>p-valor</i>
Amostra	2,00	5,98	2,99	12,72	0,00	2,00	481,43	240,72	31,77	0,00
Idade	4,00	36,02	9,00	38,29	0,00	4,00	3488,67	872,17	115,11	0,00
Interação	8,00	9,42	1,18	5,00	0,00	8,00	201,19	25,15	3,32	0,01
<i>Variável de Controle</i>	Velocidade (I)					Módulo de Elasticidade (I)				
	<i>DF</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>f-test</i>	<i>p-valor</i>	<i>DF</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>f-test</i>	<i>p-valor</i>
Amostra	2,00	919750,80	459875,40	931,84	0,00	2,00	443,00	221,50	2153,29	0,00
Idade	4,00	593399,20	148349,80	300,60	0,00	4,00	123,45	30,86	300,02	0,00
Interação	8,00	110933,87	13866,73	28,10	0,00	8,00	27,39	3,42	33,28	0,00
<i>Variável de Controle</i>	Velocidade (F)					Módulo de Elasticidade (F)				
	<i>DF</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>f-test</i>	<i>p-valor</i>	<i>DF</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>f-test</i>	<i>p-valor</i>
Amostra	2,00	851157,38	425578,69	563,37	0,00	2,00	152,75	76,37	716,44	0,00
Idade	4,00	603779,33	150944,83	199,82	0,00	4,00	88,20	22,05	206,85	0,00
Interação	8,00	505637,07	63204,63	83,67	0,00	8,00	72,66	9,08	85,20	0,00

Efeito Casca de Arroz										
<i>Variável de Controle</i>	Resistência à Tração					Resistência à Compressão				
	<i>DF</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>f-test</i>	<i>p-valor</i>	<i>DF</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>f-test</i>	<i>p-valor</i>
Amostra	2,00	6,23	3,11	13,48	0,00	2,00	242,98	121,49	20,02	0,00
Idade	4,00	84,73	21,18	91,75	0,00	4,00	5871,85	1467,96	241,88	0,00
Interação	8,00	19,69	2,46	10,66	0,00	8,00	168,44	21,06	3,47	0,01
<i>Variável de Controle</i>	Velocidade (I)					Módulo de Elasticidade (I)				
	<i>DF</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>f-test</i>	<i>p-valor</i>	<i>DF</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>f-test</i>	<i>p-valor</i>
Amostra	2,00	412953,73	206476,87	720,44	0,00	2,00	243,55	121,78	2271,51	0,00
Idade	4,00	488447,87	122111,97	426,07	0,00	4,00	90,89	22,72	423,86	0,00
Interação	8,00	152735,60	19091,95	66,62	0,00	8,00	32,21	4,03	75,11	0,00
<i>Variável de Controle</i>	Velocidade (F)					Módulo de Elasticidade (F)				
	<i>DF</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>f-test</i>	<i>p-valor</i>	<i>DF</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>f-test</i>	<i>p-valor</i>
Amostra	2,00	2657767,78	1328883,89	748,37	0,00	2,00	348,58	174,29	753,87	0,00
Idade	4,00	955294,53	238823,63	134,49	0,00	4,00	125,37	31,34	135,57	0,00
Interação	8,00	389420,67	48677,58	27,41	0,00	8,00	51,53	6,44	27,86	0,00

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0,05 level.
 Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0,05 level.

Análise Tukey – Efeito da idade nos resultados de Resistência à Tração referente a todas as argamassas

Comparação entre idades	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
28 7	1,98376	0,17367	16,15377	<0.0001	0,05	1	1,4923	2,47522
56 7	2,01036	0,17367	16,37036	<0.0001	0,05	1	1,5189	2,50182
56 28	0,0266	0,17367	0,2166	0,99987	0,05	0	-0,46486	0,51806
90 7	2,23714	0,17367	18,21702	<0.0001	0,05	1	1,74568	2,7286
90 28	0,25338	0,17367	2,06325	0,59333	0,05	0	-0,23808	0,74484
90 56	0,22678	0,17367	1,84666	0,6889	0,05	0	-0,26468	0,71824
120 7	3,20424	0,17367	26,09207	<0.0001	0,05	1	2,71278	3,6957
120 28	1,22047	0,17367	9,93831	<0.0001	0,05	1	0,72901	1,71193
120 56	1,19388	0,17367	9,72171	<0.0001	0,05	1	0,70242	1,68534
120 90	0,9671	0,17367	7,87505	<0.0001	0,05	1	0,47564	1,45856

Análise Tukey – Efeito das dosagens nos resultados de Resistência à Tração referente a todas as argamassas

Comparação entre amostras	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
MBRH-1 MB	-0,46086	0,17367	3,75279	0,07587	0,05	0	-0,95232	0,0306
MBRH-5 MB	-0,91113	0,17367	7,41934	<0.0001	0,05	1	-1,40259	-0,41967
MBRH-5 MBRH-1	-0,45027	0,17367	3,66655	0,08714	0,05	0	-0,94173	0,04119
Mref MB	0,89295	0,17367	7,27126	<0.0001	0,05	1	0,40149	1,38441
Mref MBRH-1	1,35381	0,17367	11,02404	<0.0001	0,05	1	0,86235	1,84527
Mref MBRH-5	1,80408	0,17367	14,69059	<0.0001	0,05	1	1,31262	2,29554
MMAD MB	0,45446	0,17367	3,70065	0,08253	0,05	0	-0,037	0,94592
MMAD MBRH-1	0,91532	0,17367	7,45344	<0.0001	0,05	1	0,42386	1,40678
MMAD MBRH-5	1,36559	0,17367	11,11999	<0.0001	0,05	1	0,87413	1,85705
MMAD Mref	-0,43849	0,17367	3,57061	0,10129	0,05	0	-0,92995	0,05297

Análise Tukey – Efeito da idade nos resultados de Resistência à Compressão referente a todas as argamassas

Comparação entre idades	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
28 7	17,20372	0,89981	27,03876	<0.0001	0,05	1	14,65743	19,75001
56 7	18,5407	0,89981	29,14005	<0.0001	0,05	1	15,99441	21,08699
56 28	1,33697	0,89981	2,10129	0,57629	0,05	0	-1,20932	3,88326
90 7	19,78165	0,89981	31,09043	<0.0001	0,05	1	17,23536	22,32794
90 28	2,57792	0,89981	4,05167	0,04588	0,05	1	0,03163	5,12421
90 56	1,24095	0,89981	1,95038	0,64361	0,05	0	-1,30534	3,78724
120 7	30,93916	0,89981	48,62648	<0.0001	0,05	1	28,39287	33,48545
120 28	13,73544	0,89981	21,58772	<0.0001	0,05	1	11,18915	16,28173
120 56	12,39847	0,89981	19,48643	<0.0001	0,05	1	9,85218	14,94476
120 90	11,15752	0,89981	17,53605	<0.0001	0,05	1	8,61123	13,70381

Análise Tukey – Efeito das dosagens nos resultados de Resistência à Compressão referente a todas as argamassas

Comparação entre amostras	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
MBRH-1 MB	-5,52441	0,89981	8,68261	<0.0001	0,05	1	-8,0707	-2,97812
MBRH-5 MB	-3,94922	0,89981	6,20691	0,000544	0,05	1	-6,49551	-1,40293
MBRH-5 MBRH-1	1,57519	0,89981	2,4757	0,41336	0,05	0	-0,9711	4,12148
Mref MB	5,08434	0,89981	7,99096	<0.0001	0,05	1	2,53805	7,63063
Mref MBRH-1	10,60875	0,89981	16,67357	<0.0001	0,05	1	8,06246	13,15504
Mref MBRH-5	9,03356	0,89981	14,19787	<0.0001	0,05	1	6,48727	11,57985
MMAD MB	7,90457	0,89981	12,42346	<0.0001	0,05	1	5,35828	10,45086
MMAD MBRH-1	13,42898	0,89981	21,10607	<0.0001	0,05	1	10,88269	15,97527
MMAD MBRH-5	11,85379	0,89981	18,63037	<0.0001	0,05	1	9,3075	14,40008
MMAD Mref	2,82023	0,89981	4,4325	0,02304	0,05	1	0,27394	5,36652

Análise Tukey – Efeito da adição de agentes autocicatrizantes nos resultados de Resistência à Tração

Comparação entre amostras	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
MMAD Mref	-0,43849	0,17707	3,50203	0,04881	0,05	1	-0,87502	-0,00196
MB Mref	-0,89295	0,17707	7,13161	<0.0001	0,05	1	-1,32948	-0,45642
MB MMAD	-0,45446	0,17707	3,62958	0,03997	0,05	1	-0,89099	-0,01793

Análise Tukey – Efeito da idade nas argamassas com e sem agentes autocicatrizantes nos resultados de Resistência à Tração

Comparação entre idades	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
28 7	0,49197	0,2286	3,04352	0,22542	0,05	0	-0,17111	1,15505
56 7	0,84276	0,2286	5,21364	0,00741	0,05	1	0,17968	1,50584
56 28	0,35079	0,2286	2,17012	0,54908	0,05	0	-0,31229	1,01387
90 7	1,31777	0,2286	8,15223	<0.0001	0,05	1	0,65469	1,98085
90 28	0,8258	0,2286	5,10872	0,00896	0,05	1	0,16272	1,48888
90 56	0,47501	0,2286	2,9386	0,25574	0,05	0	-0,18807	1,13809
120 7	2,62277	0,2286	16,22547	<0.0001	0,05	1	1,95969	3,28585
120 28	2,1308	0,2286	13,18196	<0.0001	0,05	1	1,46772	2,79388
120 56	1,78001	0,2286	11,01184	<0.0001	0,05	1	1,11693	2,44309
120 90	1,305	0,2286	8,07324	<0.0001	0,05	1	0,64192	1,96808

Análise Tukey – Efeito da adição de agentes autocicatrizantes nos resultados de Resistência à Compressão

Comparação entre amostras	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
MMAD Mref	2,82023	1,00509	3,9682	0,02305	0,05	1	0,34243	5,29803
MB Mref	-5,08434	1,00509	7,1539	<0.0001	0,05	1	-7,56214	-2,60654
MB MMAD	-7,90457	1,00509	11,1221	<0.0001	0,05	1	-10,38237	-5,42677

Análise Tukey – Efeito da idade nas argamassas com e sem agentes autocicatrizantes nos resultados de Resistência à Compressão

Comparação entre idades	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
28 7	12,91073	1,29757	14,07132	<0.0001	0,05	1	9,14699	16,67447
56 7	13,45554	1,29757	14,66511	<0.0001	0,05	1	9,6918	17,21928
56 28	0,54481	1,29757	0,59379	0,99315	0,05	0	-3,21893	4,30856
90 7	16,9621	1,29757	18,48689	<0.0001	0,05	1	13,19836	20,72584
90 28	4,05137	1,29757	4,41557	0,02997	0,05	1	0,28763	7,81511
90 56	3,50656	1,29757	3,82178	0,07726	0,05	0	-0,25718	7,2703
120 7	27,47224	1,29757	29,94183	<0.0001	0,05	1	23,7085	31,23598
120 28	14,56151	1,29757	15,87051	<0.0001	0,05	1	10,79777	18,32525
120 56	14,0167	1,29757	15,27672	<0.0001	0,05	1	10,25296	17,78044
120 90	10,51014	1,29757	11,45494	<0.0001	0,05	1	6,7464	14,27388

Análise Tukey – Efeito da adição de agentes autocicatrizantes nos resultados de Velocidade de Propagação de Ondas em amostras íntegras

Comparação entre amostras	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
MMAD Mref	348,8	8,11181	60,80981	<0.0001	0,05	1	328,80243	368,79757
MB Mref	201,4	8,11181	35,11209	<0.0001	0,05	1	181,40243	221,39757
MB MMAD	-147,4	8,11181	25,69772	<0.0001	0,05	1	-167,39757	-127,40243

Análise Tukey – Efeito da idade nas argamassas com e sem agentes autocicatrizantes nos resultados de Velocidade de Propagação de Ondas em amostras íntegras

Comparação entre idades	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
28 7	61,66667	10,4723	8,32767	<0.0001	0,05	1	31,29062	92,04271
56 7	289,6667	10,4723	39,11752	<0.0001	0,05	1	259,29062	320,04271
56 28	228	10,4723	30,78985	<0.0001	0,05	1	197,62395	258,37605
90 7	270,3333	10,4723	36,50668	<0.0001	0,05	1	239,95729	300,70938
90 28	208,6667	10,4723	28,17902	<0.0001	0,05	1	178,29062	239,04271
90 56	-19,3333	10,4723	2,61084	0,36725	0,05	0	-49,70938	11,04271
120 7	202,3333	10,4723	27,32374	<0.0001	0,05	1	171,95729	232,70938
120 28	140,6667	10,4723	18,99608	<0.0001	0,05	1	110,29062	171,04271
120 56	-87,3333	10,4723	11,79377	<0.0001	0,05	1	-117,70938	-56,95729
120 90	-68	10,4723	9,18294	<0.0001	0,05	1	-98,37605	-37,62395

Análise Tukey – Efeito da adição de agentes autocicatrizantes nos resultados de Módulo de Elasticidade Dinâmico em amostras íntegras

Comparação entre amostras	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
MMAD Mref	7,57548	0,11711	91,47933	<0.0001	0,05	1	7,28677	7,86419
MB Mref	4,90959	0,11711	59,28677	<0.0001	0,05	1	4,62088	5,1983
MB MMAD	-2,66589	0,11711	32,19256	<0.0001	0,05	1	-2,9546	-2,37718

Análise Tukey – Efeito da idade nas argamassas com e sem agentes autocicatrizantes nos resultados de Módulo de Elasticidade Dinâmico em amostras íntegras

Comparação entre idades	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
28 7	0,83706	0,15119	7,82968	<0.0001	0,05	1	0,39851	1,27561
56 7	4,12167	0,15119	38,55327	<0.0001	0,05	1	3,68312	4,56021
56 28	3,28461	0,15119	30,72359	<0.0001	0,05	1	2,84606	3,72316
90 7	3,9359	0,15119	36,81561	<0.0001	0,05	1	3,49735	4,37444
90 28	3,09884	0,15119	28,98593	<0.0001	0,05	1	2,66029	3,53739
90 56	-0,18577	0,15119	1,73766	0,73501	0,05	0	-0,62432	0,25278
120 7	2,85105	0,15119	26,66816	<0.0001	0,05	1	2,4125	3,2896
120 28	2,01399	0,15119	18,83848	<0.0001	0,05	1	1,57544	2,45254
120 56	-1,27062	0,15119	11,88512	<0.0001	0,05	1	-1,70917	-0,83207
120 90	-1,08485	0,15119	10,14745	<0.0001	0,05	1	-1,52339	-0,6463

Análise Tukey – Efeito da adição de casca de arroz *in natura* nos resultados de Resistência à Tração em amostras íntegras

Comparação entre amostras	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
MBRH-1 MB	-0,46086	0,17546	3,71463	0,0349	0,05	1	-0,8934	-0,02832
MBRH-5 MB	-0,91113	0,17546	7,3439	<0.0001	0,05	1	-1,34368	-0,47859
MBRH-5 MBRH-1	-0,45027	0,17546	3,62927	0,03999	0,05	1	-0,88281	-0,01773

Análise Tukey – Efeito da idade nas argamassas com e sem casca de arroz *in natura* nos resultados de Resistência à Tração em amostras íntegras

Comparação entre idades	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
28 7	3,0308	0,2265	18,922	<0.0001	0,05	1	2,37376	3,68781
56 7	3,0135	0,2265	18,814	<0.0001	0,05	1	2,35647	3,67053
56 28	-0,0173	0,2265	0,1079	1	0,05	0	-0,67431	0,63975
90 7	3,3813	0,2265	21,11	<0.0001	0,05	1	2,72422	4,03828
90 28	0,3505	0,2265	2,1881	0,5412	0,05	0	-0,30656	1,0075
90 56	0,3678	0,2265	2,296	0,4946	0,05	0	-0,28928	1,02478
120 7	3,9077	0,2265	24,397	<0.0001	0,05	1	3,25068	4,56473
120 28	0,8769	0,2265	5,475	0,0046	0,05	1	0,2199	1,53395
120 56	0,8942	0,2265	5,5829	0,0038	0,05	1	0,23718	1,55123
120 90	0,5265	0,2265	3,2869	0,1653	0,05	0	-0,13057	1,18348

Análise Tukey – Efeito da adição de casca de arroz *in natura* nos resultados de Resistência à Compressão em amostras íntegras

Comparação entre amostras	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
MBRH-1 MB	-5,52441	0,89955	8,68508	<0.0001	0,05	1	-7,74203	-3,3068
MBRH-5 MB	-3,94922	0,89955	6,20868	0,000371	0,05	1	-6,16684	-1,7316
MBRH-5 MBRH-1	1,57519	0,89955	2,47641	0,20336	0,05	0	-0,64242	3,79281

Análise Tukey – Efeito da idade nas argamassas com e sem casca de arroz *in natura* nos resultados de Resistência à Compressão em amostras íntegras

Comparação entre idades	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
28 7	22,53214	1,16132	27,43885	<0.0001	0,05	1	19,16361	25,90067
56 7	22,91079	1,16132	27,89995	<0.0001	0,05	1	19,54225	26,27932
56 28	0,37865	1,16132	0,4611	0,99742	0,05	0	-2,98989	3,74718
90 7	24,155	1,16132	29,41512	<0.0001	0,05	1	20,78647	27,52354
90 28	1,62286	1,16132	1,97627	0,63397	0,05	0	-1,74567	4,9914
90 56	1,24422	1,16132	1,51517	0,81954	0,05	0	-2,12431	4,61275
120 7	34,9825	1,16132	42,60046	<0.0001	0,05	1	31,61397	38,35103
120 28	12,45036	1,16132	15,16161	<0.0001	0,05	1	9,08183	15,81889
120 56	12,07171	1,16132	14,70051	<0.0001	0,05	1	8,70318	15,44024
120 90	10,8275	1,16132	13,18534	<0.0001	0,05	1	7,45896	14,19603

Análise Tukey – Efeito da adição de casca de arroz *in natura* nos resultados de Velocidade de Propagação de Ondas em amostras íntegras

Comparação entre amostras	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
MBRH-1 MB	-231,66667	6,18169	52,99942	<0.0001	0,05	1	-246,90603	-216,4273
MBRH-5 MB	-148,13333	6,18169	33,88912	<0.0001	0,05	1	-163,3727	-132,89397
MBRH-5 MBRH-1	83,53333	6,18169	19,11029	<0.0001	0,05	1	68,29397	98,7727

Análise Tukey – Efeito da idade nas argamassas com e sem casca de arroz *in natura* nos resultados de Velocidade de Propagação de Ondas em amostras íntegras

Comparação entre idades	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
28 7	149,8889	7,98053	26,5615	<0.0001	0,05	1	126,74049	173,03728
56 7	243,3333	7,98053	43,1206	<0.0001	0,05	1	220,18494	266,48173
56 28	93,44444	7,98053	16,5591	<0.0001	0,05	1	70,29605	116,59284
90 7	277,2222	7,98053	49,12598	<0.0001	0,05	1	254,07383	300,37062
90 28	127,3333	7,98053	22,56448	<0.0001	0,05	1	104,18494	150,48173
90 56	33,88889	7,98053	6,00538	0,00169	0,05	1	10,74049	57,03728
120 7	268,3333	7,98053	47,5508	<0.0001	0,05	1	245,18494	291,48173
120 28	118,4444	7,98053	20,9893	<0.0001	0,05	1	95,29605	141,59284
120 56	25	7,98053	4,4302	0,02925	0,05	1	1,8516	48,1484
120 90	-8,88889	7,98053	1,57518	0,798	0,05	0	-32,03728	14,25951

Análise Tukey – Efeito da adição de casca de arroz *in natura* nos resultados de Módulo de Elasticidade Dinâmico em amostras íntegras

Comparação entre amostras	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
MBRH-1 MB	-5,69718	0,08455	95,29712	<0.0001	0,05	1	-5,9056	-5,48875
MBRH-5 MB	-2,73861	0,08455	45,809	<0.0001	0,05	1	-2,94704	-2,53019
MBRH-5 MBRH-1	2,95856	0,08455	49,48812	<0.0001	0,05	1	2,75014	3,16699

Análise Tukey – Efeito da idade nas argamassas com e sem casca de arroz *in natura* nos resultados de Módulo de Elasticidade Dinâmico em amostras íntegras

Comparação entre idades	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
28 7	1,98032	0,10915	25,65852	<0.0001	0,05	1	1,66372	2,29692
56 7	3,33122	0,10915	43,16182	<0.0001	0,05	1	3,01463	3,64782
56 28	1,3509	0,10915	17,5033	<0.0001	0,05	1	1,0343	1,6675
90 7	3,77108	0,10915	48,86089	<0.0001	0,05	1	3,45448	4,08768
90 28	1,79076	0,10915	23,20238	<0.0001	0,05	1	1,47416	2,10736
90 56	0,43985	0,10915	5,69908	0,00301	0,05	1	0,12326	0,75645
120 7	3,6322	0,10915	47,06154	<0.0001	0,05	1	3,31561	3,9488
120 28	1,65188	0,10915	21,40302	<0.0001	0,05	1	1,33528	1,96848
120 56	0,30098	0,10915	3,89972	0,06861	0,05	1	-0,01562	0,61758
120 90	-0,13887	0,10915	1,79936	0,70963	0,05	0	-0,45547	0,17772

Análise Tukey – Efeito da adição de agentes autocicatrizantes nos resultados de Velocidade de Propagação de Ondas em amostras fissuradas

Comparação entre amostras	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
MMAD Mref	118,4	10,03608	16,68409	<0.0001	0,05	1	93,65863	143,14137
MB Mref	332,33333	10,03608	46,83005	<0.0001	0,05	1	307,59197	357,0747
MB MMAD	213,93333	10,03608	30,14597	<0.0001	0,05	1	189,19197	238,6747

Análise Tukey – Efeito da idade nas argamassas com e sem agentes autocicatrizantes nos resultados de Velocidade de Propagação de Ondas em amostras fissuradas

Comparação entre idades	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
28 7	112,8889	12,95653	12,3219	<0.0001	0,05	1	75,30708	150,4707
56 7	220,6667	12,95653	24,08591	<0.0001	0,05	1	183,08486	258,24848
56 28	107,7778	12,95653	11,76402	<0.0001	0,05	1	70,19597	145,35959
90 7	344,3333	12,95653	37,58421	<0.0001	0,05	1	306,75152	381,91514
90 28	231,4444	12,95653	25,26231	<0.0001	0,05	1	193,86264	269,02625
90 56	123,6667	12,95653	13,4983	<0.0001	0,05	1	86,08486	161,24848
120 7	119,8889	12,95653	13,08595	<0.0001	0,05	1	82,30708	157,4707
120 28	7	12,95653	0,76405	0,98231	0,05	0	-30,58181	44,58181
120 56	-100,778	12,95653	10,99996	<0.0001	0,05	1	-138,35959	-63,19597
120 90	-224,444	12,95653	24,49826	<0.0001	0,05	1	-262,02625	-186,86264

Análise Tukey – Efeito da adição de casca de arroz *in natura* nos resultados de Módulo de Elasticidade Dinâmico em amostras fissuradas

Comparação entre amostras	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
MMAD Mref	3,06026	0,11922	36,30147	<0.0001	0,05	1	2,76635	3,35416
MB Mref	4,40254	0,11922	52,22392	<0.0001	0,05	1	4,10863	4,69644
MB MMAD	1,34228	0,11922	15,92246	<0.0001	0,05	1	1,04838	1,63619

Análise Tukey – Efeito da idade nas argamassas com e sem casca de arroz *in natura* nos resultados de Módulo de Elasticidade Dinâmico em amostras fissuradas

Comparação entre idades	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
28 7	1,31655	0,15391	12,09703	<0.0001	0,05	1	0,87011	1,76299
56 7	2,52616	0,15391	23,2115	<0.0001	0,05	1	2,07972	2,9726
56 28	1,20961	0,15391	11,11447	<0.0001	0,05	1	0,76317	1,65605
90 7	4,17428	0,15391	38,35516	<0.0001	0,05	1	3,72784	4,62072
90 28	2,85773	0,15391	26,25813	<0.0001	0,05	1	2,41129	3,30417
90 56	1,64812	0,15391	15,14366	<0.0001	0,05	1	1,20168	2,09456
120 7	1,36341	0,15391	12,52761	<0.0001	0,05	1	0,91697	1,80985
120 28	0,04686	0,15391	0,43058	0,99802	0,05	0	-0,39958	0,4933
120 56	-1,16275	0,15391	10,68389	<0.0001	0,05	1	-1,60919	-0,71631
120 90	-2,81087	0,15391	25,82755	<0.0001	0,05	1	-3,25731	-2,36443

Análise Tukey – Efeito da adição de casca de arroz *in natura* nos resultados de Velocidade de Propagação de Ondas em amostras fissuradas

Comparação entre amostras	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
MBRH-1 MB	-580,33333	15,38706	53,33803	<0.0001	0,05	1	-618,26614	-542,40053
MBRH-5 MB	-405	15,38706	37,22327	<0.0001	0,05	1	-442,93281	-367,06719
MBRH-5 MBRH-1	175,33333	15,38706	16,11476	<0.0001	0,05	1	137,40053	213,26614

Análise Tukey – Efeito da idade nas argamassas com e sem casca de arroz *in natura* nos resultados de Velocidade de Propagação de Ondas em amostras fissuradas

Comparação entre idades	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
28 7	252,1111	19,8646	17,94846	<0.0001	0,05	1	194,49168	309,73054
56 7	348	19,8646	24,77504	<0.0001	0,05	1	290,38057	405,61943
56 28	95,88889	19,8646	6,82658	0,000343	0,05	1	38,26946	153,50832
90 7	423,7778	19,8646	30,16986	<0.0001	0,05	1	366,15835	481,39721
90 28	171,6667	19,8646	12,2214	<0.0001	0,05	1	114,04724	229,2861
90 56	75,77778	19,8646	5,39482	0,00531	0,05	1	18,15835	133,39721
120 7	185,4444	19,8646	13,20228	<0.0001	0,05	1	127,82501	243,06387
120 28	-66,6667	19,8646	4,74618	0,01704	0,05	1	-124,2861	-9,04724
120 56	-162,556	19,8646	11,57276	<0.0001	0,05	1	-220,17499	-104,93613
120 90	-238,333	19,8646	16,96758	<0.0001	0,05	1	-295,95276	-180,7139

Análise Tukey – Efeito da adição de casca de arroz *in natura* nos resultados do Módulo de Elasticidade Dinâmico em amostras fissuradas

Comparação entre amostras	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
MBRH-1 MB	-6,48009	0,17557	52,19661	<0.0001	0,05	1	-6,91291	-6,04726
MBRH-5 MB	-5,07412	0,17557	40,87168	<0.0001	0,05	1	-5,50695	-4,6413
MBRH-5 MBRH-1	1,40596	0,17557	11,32494	<0.0001	0,05	1	0,97314	1,83879

Análise Tukey – Efeito da idade nas argamassas com e sem casca de arroz *in natura* nos resultados do Módulo de Elasticidade Dinâmico em amostras fissuradas

Comparação entre idades	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
28 7	2,77815	0,22666	17,33376	<0.0001	0,05	1	2,12069	3,43561
56 7	3,87374	0,22666	24,16951	<0.0001	0,05	1	3,21629	4,5312
56 28	1,09559	0,22666	6,83575	0,000337	0,05	1	0,43814	1,75305
90 7	4,91446	0,22666	30,66288	<0.0001	0,05	1	4,25701	5,57192
90 28	2,13631	0,22666	13,32912	<0.0001	0,05	1	1,47885	2,79377
90 56	1,04072	0,22666	6,49337	0,000658	0,05	1	0,38326	1,69818
120 7	2,10157	0,22666	13,11233	<0.0001	0,05	1	1,44411	2,75902
120 28	-0,67658	0,22666	4,22142	0,04127	0,05	1	-1,33404	-0,01913
120 56	-1,77218	0,22666	11,05717	<0.0001	0,05	1	-2,42963	-1,11472
120 90	-2,8129	0,22666	17,55055	<0.0001	0,05	1	-3,47035	-2,15544