

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Arquitetura e Urbanismo

**Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído, Patrimônio e
Sustentabilidade**

Raphael Augusto Vasconcelos Carneiro Nascimento

**BIOESTABILIZAÇÃO DE ARGAMASSAS DE TERRA COM ADIÇÃO DE
EXCREMENTO BOVINO**

Belo Horizonte

2024

Raphael Augusto Vasconcelos Carneiro Nascimento Pachamama

**BIOESTABILIZAÇÃO DE ARGAMASSAS DE TERRA COM ADIÇÃO DE
EXCREMENTO BOVINO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Arquitetura.

Linha de Pesquisa: Tecnologia do Ambiente Construído

Orientador: Prof. Dr. Arq. Marco Antônio Penido de Rezende

Co-orientadora: Profa. Dra. Eng. Paulina Faria

Belo Horizonte

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

N244b

Nascimento, Raphael Augusto Vasconcelos Carneiro.

Bioestabilização de argamassas de terra com adição de excremento bovino [recurso eletrônico] / Raphael Augusto Vasconcelos Carneiro Nascimento. - 2024.

1 recurso online (240 p. : il.).

Orientador: Marco Antônio Penido de Rezende

Coorientadora: Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura.

1. Arquitetura vernacular - Teses. 2. Argamassa - Teses. 3. Materiais de construção - Teses. 4. Arquitetura sustentável - Teses. 5. Arquitetura nativa - Teses. 6. Patrimônio cultural - Brasil - Teses. I. Rezende, Marco Antônio Penido de. II. Rodrigues, Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Arquitetura. VI. Título.

CDD 620.112



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AMBIENTE CONSTRUÍDO E PATRIMÔNIO SUSTENTÁVEL

ATA DE DEFESA DE TESE

ATA DA DEFESA DE TESE DO(A) ALUNO(A) **Raphael Augusto Vasconcelos Carneiro Nascimento** nº de matrícula **2020725198** DO CURSO DE DOUTORADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO E PATRIMÔNIO SUSTENTÁVEL DA ESCOLA DE ARQUITETURA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Aos vinte dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e quatro, às treze horas, por videoconferência, reuniu-se a Comissão Examinadora de Tese para julgar o trabalho "Bioestabilização de argamassas de terra com adição de excremento bovino". Abrindo a sessão, o(a) orientador(a) professor(a) doutor(a) Marco Antônio Penido de Rezende, após expor as Normas Regulamentares do Trabalho Final, pediu para o(a) aluno(a) iniciar a apresentação do trabalho. Seguiu-se arguição pelos(as) examinadores(as), com a respectiva defesa do(a) candidato(a). Logo após a comissão reuniu-se, sem a presença do(a) candidato(a) e do público, para julgamento e expedição do seguinte resultado:

- ☒ (x) Aprovação
- ☐ () Aprovação com solicitação das revisões feitas pela banca
- ☐ () Reprovação

O resultado final foi comunicado publicamente ao(à) candidato(a) pela Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, a Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ata, que será assinada pelas participantes da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. Marco Antônio Penido de Rezende - Orientador

Escola de Arquitetura/UFMG

Profa. Dra. Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues - Coorientadora

Universidade Nova de Lisboa

Prof. Dr. Luis Fernando Guerrero Baca

Universidad Autónoma Metropolitana - Xochimilco

Prof. Dr. António Santos Silva

Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal – LNEC

Profa. Dra. Vera Lúcia dos Santos

Instituto de Ciências Biológicas/UFMG

Prof. Dr. Fernando de Paula Cardoso

A Pique Arquitetura e Memória Ltda; Rede Proterra

Belo Horizonte, 20 de dezembro de 2024.

Homologado pelo Colegiado do Programa dos cursos de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável:

Profa. Dra. Renata Maria Abrantes Baracho Porto - "Ad Referendum"

Coordenadora do PPG-ACPS

Assinatura dos membros da banca examinadora:



Documento assinado eletronicamente por **Marco Antonio Penido de Rezende, Professor do Magistério Superior**, em 27/12/2024, às 17:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando de Paula Cardoso, Usuário Externo**, em 27/12/2024, às 17:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luis Fernando Guerrero Baca, Usuário Externo**, em 27/12/2024, às 17:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antônio Santos Silva, Usuário Externo**, em 28/12/2024, às 12:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Renata Maria Abrantes Baracho Porto, Professora do Magistério Superior**, em 30/12/2024, às 17:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Paulina Faria Rodrigues, Usuário Externo**, em 02/01/2025, às 07:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vera Lucia dos Santos, Servidor(a)**, em 06/01/2025, às 11:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3821651** e o código CRC **4714664D**.

Dedico este trabalho à mãe natureza, aos que cuidam dela, aos que cuidam de mim e principalmente às minhas filhas Gaia e Mana.

“O futuro é ancestral e a humanidade precisa aprender com ele a pisar suavemente na terra.”

Ailton Krenak

... afinal...

“Nós somos o começo, o meio e o fim. Nossas trajetórias nos movem, nossa ancestralidade nos guia.”

Antônio Bispo dos Santos (Nego Bispo).

RESUMO

O excremento bovino é um material usado milenarmente pela humanidade como adição estabilizante na construção com terra, inclusive na arquitetura vernácula brasileira. Apesar disto, este material foi pouco explorado cientificamente. Na pesquisa de mestrado do autor, foi evidenciado o potencial desta adição, tendo apresentado muito bons resultados para resistência mecânica, aderência e em relação a água, justificando aprofundar a investigação sobre como otimizar seu uso. Na presente pesquisa foi investigado quais os efeitos causados em argamassas produzidas com três terras (uma tropical brasileira e duas mediterrâneas portuguesas) pela adição de excremento bovino em diferentes proporções (5% a 40%) e em diferentes condições de uso (fresco, seco, fermentado, *in natura* ou moído). Também foi avaliada a influência da dieta dos bovinos (pasto e ração) nos efeitos causados e o potencial de reciclagem da argamassa com esta bioadição. As argamassas foram avaliadas quanto a retração, densidade, condutibilidade térmica, resistência mecânica, aderência, durabilidade em relação a ação da água, fundamental para revestimento exterior, e higroscopicidade, muito importante para revestimento interno. Para tal avaliação foi usada principalmente a norma técnica alemã DIN 18947. Os resultados mostraram que, quanto mais fresco estiver o excremento bovino, maior será a durabilidade da argamassa em contato com água, a resistência mecânica e a aderência às alvenarias. A dieta dos bovinos e o uso do excremento seco (compostado), inteiro ou moído, não causa diferença expressiva nas argamassas. A fermentação da argamassa por 72 horas aumenta a aderência e a durabilidade em contato com água. A proporção (em volume) ótima para a adição de excremento bovino depende da aplicação: 10% causa argamassas mais resistentes mecanicamente e com mais aderência; 40% causa argamassas mais resistentes ao contato com a água; e 20% é uma proporção equilibrada e com ampla aplicação. A adição do excremento bovino definitivamente torna os rebocos: mais isolantes termicamente e especialmente resistentes à ação da água; com maior aderência às alvenarias de adobe e tijolo cerâmico; com reduzida retração, o que evita o surgimento de fissuras, e aumenta a resistência mecânica à compressão, mas principalmente a flexão. Observou-se que a composição granulométrica e mineralógica da terra também influencia os efeitos causados pela adição de excremento, sendo mais expressivos os efeitos causados na argamassa de terra tropical. Uma argamassa com adição de excremento foi reciclada e apresentou desempenho superior a argamassa sem adição de excremento, mas inferior a argamassa “original”, com resultados ainda classificáveis pelos parâmetros da norma DIN. Também foram formuladas e avaliadas argamassas com diferentes adições de areia, e com a adição de fibras vegetais e de cal. Comparado a estas adições, o excremento apresentou resultado superior em todos os ensaios. Os resultados obtidos e os efeitos apresentados pelas adições de excremento bovino demonstraram o potencial do uso de materiais naturais e adições microbiológicas para promover biocimentação e bioestabilização em detrimento de materiais aglomerantes convencionais como a cal, obtidos por processos bastante poluentes, desde a extração, beneficiamento, logística e descarte ao final do ciclo de vida. Portanto, enquanto não forem estimuladas inovações tecnológicas pautadas no uso de materiais naturais e biodegradáveis, a construção civil ficará refém de materiais que contribuem com a destruição do planeta. Este estudo também evidencia que o excremento bovino é uma solução vernácula que demonstra a magnitude dos saberes empíricos ancestrais e tradicionais, com os quais tem-se muito a aprender e respeitar.

Palavras chave: Revestimento de Terra; Argamassas Ecoeficientes; Biocimentação; Exopolissacarídeos; Bioconstrução; Agroecologia.

ABSTRACT

Cow dung is a material used for thousands of years by humanity as a stabilizing addition in earth building, including in Brazilian vernacular architecture. Even though, this material has been little investigated scientifically. In the author's master's research, the potential of this addition was highlighted, having presented very good results for mechanical resistance, adhesion and water resistance, justifying further investigation into how to optimize its use. In the present research, the effects caused to earth mortars, produced with a tropical Brazilian earth and two mediterranean Portuguese ones, by the addition of cow dung in different proportions (5% to 40%) and under different conditions of use (fresh, dry, fermented, *in nature* or grinded) were investigated. The influence of the cow's diet (pasture and grains ration feed) on the effects caused and the potential for recycling the mortar with this bioaddition was also evaluated. The biostabilized mortars were evaluated for shrinkage, bulk density, thermal conductivity, mechanical resistance, adhesion, durability in relation to the action of water, essential for external coating, and hygroscopicity, very important for internal coating. For this evaluation, the German technical standard DIN 18947 was mainly used. The results showed that the fresher the cow dung, the greater the durability of the mortar in contact with water, the mechanical resistance and the adhesion to the masonry. The cow's diet and the use of dry dung (composted), whole (*in nature*) or grinded, does not make a significant difference in the effects caused on earth mortars. Fermenting the mortar for 72 hours increases masonry adhesion and durability in contact with water. The optimal proportion (by volume) for adding cow dung depends on the application: 10% produces mortars that are more mechanically resistant and with more adhesion; 40% produces mortars that are more resistant to contact with water; and 20% is a balanced proportion with wide application. The addition of cow dung definitely makes the coatings: more thermally insulating and especially resistant to the action of water; with greater adhesion to adobe and ceramic brick masonry; with reduced shrinkage, which prevents the appearance of cracks, and increases mechanical resistance by compression, but mainly by flexion. It was observed that the granulometry and mineralogical composition of the earth also influences the effects caused by the addition of cow dung, with the effects caused in the tropical earth mortar being more expressive. The mortar with the addition of cow dung was recycled and presented superior performance to the mortar without the addition of cow dung, but inferior to the "original" mortar, with results still classifiable by the parameters of the DIN standard. Mortars were also formulated and evaluated with different volumetric additions of sand, and with the addition of vegetable fibers and air lime. Compared to these additions, cow dung showed superior results in all tests. The results obtained and the effects presented by the additions of cow dung demonstrated the potential of using natural materials and microbiological additions on promoting biocementation and biostabilization, to the detriment of conventional binding materials such as lime, obtained through very polluting processes, from extraction, processing, logistics and disposal to end of the life cycle. Therefore, until technological innovations based on the use of natural and biodegradable materials are stimulated, building will be hostage to materials that contribute to the destruction of the planet. This study also highlights that cow dung is a vernacular solution that demonstrates the magnitude of ancestral and traditional empirical knowledge, from which there is much to learn and respect.

Key words: Earth Plasters; Ecoefficient Mortars; Biocementation; Exopolysaccharides; Bioconstruction; Agroecology.

RESUMEN

El excremento bovino es un material utilizado desde hace miles de años por la humanidad como complemento estabilizador en las construcciones con tierra, incluso en la arquitectura vernácula brasileña. A pesar de esto, el material ha sido poco explorado científicamente. En la investigación de maestría del autor se destacó el potencial de esta adición, habiendo presentado muy buenos resultados en resistencia mecánica, adhesión y en relación al agua, lo que justifica mayores investigaciones sobre cómo optimizar su uso. En la presente investigación, se investigó qué efectos fueron causados en morteros producidos en tres tierras (una brasileña tropical y dos portuguesas mediterráneas) por la adición de excremento bovino en diferentes proporciones (5% a 40%) y en diferentes condiciones de uso (hecho reciente, seco, fermentado, entero o molido). También se evaluó la influencia de la dieta del bovino (pastos y piensos) sobre los efectos causados y el potencial de reciclaje del mortero con esta bioadición. Los morteros fueron evaluados en cuanto a contracción, densidad, conductividad térmica, resistencia mecánica, adherencia, durabilidad en relación a la acción del agua, esencial para el revestimiento externo, e higroscopicidad, muy importante para el revestimiento interno. Para esta evaluación se utilizó principalmente la norma técnica alemana DIN 18947. Los resultados demostraron que cuanto más fresco esté el excremento bovino, mayor será la durabilidad del mortero en contacto con el agua, mayor será la resistencia mecánica y la adherencia a la mampostería. La alimentación del bovino y el uso de excrementos secos (compostados), enteros o molidos, no suponen una diferencia significativa en los morteros. Fermentar el mortero durante 72 horas aumenta la adherencia y durabilidad en contacto con el agua. La proporción óptima (en volumen) para añadir excremento bovino depende de la aplicación: el 10% provoca morteros más resistentes mecánicamente y con mayor adherencia; el 40% provoca que los morteros sean más resistentes al contacto con el agua; y el 20% es una proporción equilibrada con amplia aplicación. La adición de excremento bovino definitivamente hace que los revestimientos sean: más aislantes térmicamente y especialmente resistentes a la acción del agua; con mayor adherencia sobre mampostería de adobe y ladrillo cerámico; con contracción reducida, lo que previene la aparición de grietas, y aumenta la resistencia mecánica a la compresión, pero principalmente a la flexión. Se observó que la composición granulométrica y mineralógica de la tierra también influye en los efectos causados por la adición de excremento, siendo más significativos los efectos causados en el mortero de tierra tropical. Se recicló un mortero con adición de excremento y presentó comportamientos superiores al mortero sin adición de excremento, pero inferiores al mortero "original", con resultados aún clasificables según los parámetros de la norma DIN. También se formularon y evaluaron morteros con diferentes adiciones de arena, y con adición de fibras vegetales y cal. En comparación con estas adiciones, el excremento mostró resultados superiores en todos los ensayos. Los resultados obtenidos y los efectos que presentaron las diferentes adiciones de excremento bovino demostraron el potencial de utilizar materiales naturales y adiciones microbiológicas para promover biocementation y biostabilization en detrimento de materiales aglomerantes convencionales como la cal, obtenidos mediante procesos muy contaminantes, desde la extracción, procesamiento, logística y disposición hasta final del ciclo de vida. Por tanto, hasta que no se impulsen las innovaciones tecnológicas basadas en el uso de materiales naturales y biodegradables, la construcción civil será rehén de materiales que contribuyen a la destrucción del planeta. Este estudio también muestra que el excremento bovino es una solución vernácula que demuestra la magnitud del conocimiento empírico ancestral y tradicional, del cual hay mucho que aprender y respetar.

Palabras clave: Recubrimiento de Tierra; Morteros Ecoeficientes; Biocementación; Exopolisacáridos; Bioconstrucción; Agroecología.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Grande Mesquita de Djenné, Mali	39
Figura 2. Reações de precipitação de CaCO_3 realizadas por <i>Sporosarcsina psateurii</i>	47
Figura 3. Mecanismo de biomineralização por MICP	47
Figura 4. Esquema demonstrativo de argamassas de auto reparo com adição microbiológica.....	49
Figura 5. Areia natural (a) e corpo de prova cilíndrico de areia biocimentada	50
Figura 6. Mobiliário produzido a partir de areia da praia, urina e bactérias.....	51
Figura 7. Cinco estágios do desenvolvimento de biofilmes	54
Figura 8. Agregados no solo envolvidos por EPS: os maiores são compostos por unidades menores, que são formadas por agregados ainda menores	55
Figura 9. MEV após 28 dias de estabilização em anaerobiose dos corpos de prova mostrando a matriz estrutural formada por bactérias e aglomerados de terra embebidos por EPS. (a) menor aproximação; (b) maior aproximação	57
Figura 10. Microscopia ótica por MEV de amostra de solo com adição de excremento e sais para promover MICP, mostrando que ocorreu deposição de carbonato de cálcio (na cor branca) em contato com agregados (caulinita e areia).....	58
Figura 11. Espécies de bovinos selvagens mais próximos geneticamente do seu ancestral comum, Auroque (<i>Bos primigenius primigenius</i>)	59
Figura 12. Principais raças de vacas leiteiras criadas no Brasil	60
Figura 13. Componentes do <i>Pachgavya</i>	63
Figura 14. Nichos ocupados pelos microrganismos presentes no rúmen	66
Figura 15. Concentração de ácidos graxos de cadeia curta no rúmen de bovinos	67
Figura 16. Amostras de excremento bovino com escores de 1 a 5.	70
Figura 17. Imagens de excremento bovino com escore entre 3 e 4.	70
Figura 18. Pilhas de compostagem de excremento bovino	72
Figura 19. Galpão com paredes para compostagem de excremento	73
Figura 20. Arquitetura <i>Tata Somba</i>	81
Figura 21. Arquitetura <i>Tata Somba</i> no Benin	81
Figura 22. Resistência à compressão por tempo de cura úmida dos corpos de prova da argamassa de terra com (bioestabilizada) e sem excremento bovino	93
Figura 23. MEV da amostra de solo não estabilizado: (a) partículas de areia revestidas com plaquetas de caulinita; (b) aglomerados independentes de caulinita.....	94
Figura 24. MEV da argamassa com adição de excremento após cura úmida por 28 dias mostrando a argila e a areia agregadas por EPS	95
Figura 25. MEV da amostra de argamassa com excremento bovino após 80 dias de cura úmida: (a) bactéria coberta por EPS; (b) bactéria coberta com placas de caulinita; (c) pontes de biofilme entre bactéria e aglomerados de caulinita; (d) pontes de biofilmes entre bactérias cobertas; (e) forma de bastão da bactéria	96
Figura 26. MEV do corpo de prova de argamassa com a adição de excremento sem fermentação em cura úmida (0 dias) mostrando fibras do excremento embebidas/envolvidas por caulinita	97
Figura 27. MEV do corpo de prova de argamassa com a adição de excremento sem fermentação em cura úmida (0 dias) mostrando fibras do excremento entre partículas de areia (fazendo pontes fibrosas e conectando agregados minerais).....	97

Figura 28: Extração de componentes a partir de excremento bovino fresco. As frações SSMA e MSMA são de aglomerados microbianos de tamanho pequeno e médio respectivamente, do inglês <i>small-sized microbial aggregates</i> (SSMA) e <i>medium-sized microbial aggregates</i> (MSMA), respectivamente	100
Figura 29. Resultado do ensaio de imersão em água de blocos de terra comprimidos estabilizados com a proporção (em massa) de cada material adicionado aos blocos indicada	101
Figura 30. Hidrofobicidade observada no pó de SSMA mediante aplicação de uma gota de água.....	102
Figura 31. Processos de caracterização das terras: ensaios de Casa Grande (a), Limites de Atterberg (b) e Sedimentação (c).	108
Figura 32. Preparação das amostras para o ensaio de Difração por Raios-X (DRX).....	109
Figura 33. Terra ITA.....	110
Figura 34. Curva de distribuição granulométrica da terra ITA.....	110
Figura 35. Terra CAP.	111
Figura 36. Curva de distribuição granulométrica da terra CAP.	111
Figura 37. Terra MON.	112
Figura 38. Curva de distribuição granulométrica da terra MON.	112
Figura 39: Excremento coletado fresco (a) e depois de compostado por 7 dias no recipiente plástico com fundo impermeável (b).	114
Figura 40: Excremento compostado por 7 dias sendo peneirado em diversas malhas (a) e depois de peneirado na malha # 2,79 mm (b).	115
Figura 41. Excremento peneirado na malha #2,79 mm depois de 30 dias de compostagem.	116
Figura 42. Excremento coletado seco e endurecido no pasto (a) e processo de desagregação manual e peneiramento para caber no moinho elétrico (b).	117
Figura 43. Preparação das fibras vegetais cortadas com no máximo 3 cm de comprimento.	120
Figura 44. Efeitos na retração causados pela adição de diferentes volumes de areia em argamassas com as terras CAP (a), MON (b) e ITA (c). A foto com identificação em verde indica o traço de referência escolhido para a argamassa com cada terra.	121
Figura 45. CP prismáticos: (a) secando na forma e (b) já fora da forma.....	126
Figura 46. CP de reboco aplicado em tijolo cerâmico.....	127
Figura 47. CP com forma de bolacha cilíndrica secando na bandeja metálica de apoio....	128
Figura 48. CP de reboco aplicados em duas alvenarias: adobe e tijolo cerâmico.	129
Figura 49. Diferentes alvenarias, cobertas, para experimento com revestimentos, localizadas na Estação Experimental de Exposição Natural de Revestimentos, CERIS-NOVA.	129
Figura 50. Ensaio para medir a condutibilidade térmica com o equipamento ISOMET 2104 (Heat Transfer Analyser) sendo realizado no corpo de prova com forma de bolacha cilíndrica.	134
Figura 51. Ensaio de resistência a flexão sendo realizado com CP prismático de argamassa.....	135
Figura 52. Ensaio de resistência à compressão sendo realizado com CP prismático rompido no ensaio de tração na flexão.	136
Figura 53. Dispositivo fabricado artesanalmente para realização do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento, suspenso num CP (a) e objetos de massa conhecida colocados progressivamente no dispositivo, antes de se atingir a rotura (b).	137

Figura 54. CP cúbicos sendo preparados (a e b) e sendo imersos (c), com indicação do tempo de ensaio (em minutos) indicado na parede de azulejo.....	138
Figura 55. CP cúbicos imersos em água na bandeja após 24 horas (a) e após 14 dias (b).....	138
Figura 56. Ensaio de erosão por gotejamento sendo realizado - Geelong drip test.....	140
Figura 57. Câmara Climática Aralab Fitoclima 300 EDTU utilizada no ensaio para avaliação da higroscopicidade.	143
Figura 58. CP com a lateral e fundo impermeabilizados sendo ensaiados dentro da câmara climatizada (a) e sendo pesados (b).	144
Figura 59. Efeito na resistência mecânica causado pela adição de areia nas três terras: média e desvio padrão.....	149
Figura 60. Efeito causado pela adição de 20% excremento bovino compostado por 18 dias, na terra TASR sem adição de areia. 2020.....	151
Figura 61. Reboco em tijolo cerâmico produzido com as argamassas sem adição de areia (1:0), sem e com adição de 20% de EBfp7.	152
Figura 62. Efeito nas resistências à compressão e flexão causado pela adição de 20% de EBfp7 como substituo da adição de areia nas argamassas MON (1:0) e CAP (1:0).	153
Figura 63. Imersão em água por até 30 minutos dos corpos de provas das argamassas MON(1:0), MON(1:1,5) com e sem adição de 20% de EBfp7.	153
Figura 64. Curva de adsorção e desadsorção por m ² de rebocos produzidos com a terra MON com e sem adição de 20% de EBfp7 e/ou de areia na adsorção.	154
Figura 65. Efeito da adição de 20% de EBfp7 e/ou de areia na adsorção por m ² de rebocos produzidos com a terra MON.	155
Figura 66. Efeito da adição de 20% de EBfp7 e/ou de areia na condutibilidade térmica rebocos produzidos com a terra MON.	156
Figura 67. Retração linear por secagem das argamassas produzidas com as três terras com a adição (em volume) de 10% e 20% de EBfp7: média e desvio padrão.....	159
Figura 68. Densidade no estado endurecido das argamassas produzidas com as três terras com a adição (em volume) de 10% e 20% de EBfp7: média e desvio padrão.....	161
Figura 69. Resistências à compressão e flexão das argamassas produzidas com as três terras com a adição (em volume) de 10% e 20% de EBfp7: média e desvio padrão.....	162
Figura 70. Aderência por cisalhamento das argamassas produzidas com as três terras com a adição (em volume) de 10% e 20% de EBfp7: média e desvio padrão.....	166
Figura 71. Corpos de provas das argamassas com terra CAP(1:1,5) sem e com adição de EBfp7 nas proporções 10% e 20%, após imersão em água por até 30 minutos.	168
Figura 72. Corpos de provas das argamassas com terra MON(1:1,5) sem e com adição de EBfp7 nas proporções 10% e 20%, após imersão em água por até 30 minutos.	168
Figura 73. Corpos de provas das argamassas com terra ITA(1:3) sem e com adição de EBfp7 nas proporções 10% e 20%, após imersão em água por até 30 minutos.	168
Figura 74. Retração linear por secagem das argamassas CAP(1:1,5) sem e com adições de diferentes amostras de EB avaliadas: média e desvio padrão.	176
Figura 75. Densidade no estado endurecido das argamassas CAP(1:1,5) com diferentes proporções a tipos de EB avaliadas: média e desvio padrão.	178
Figura 76. Resistências à compressão e flexão das argamassas CAP(1:1,5) sem e com diferentes teores e tipos de EB avaliadas: média e desvio padrão.....	179
Figura 77. Aderência por cisalhamento das argamassas CAP(1:1,5) com diferentes teores e tipos de EB avaliadas: média e desvio padrão.	181
Figura 78. Corpos de prova das argamassas de terra CAP(1:1,5) sem e com adição de diferentes proporções e tipos de EB após imersão em água por até 30 minutos.	183

Figura 79. Retração linear por secagem das argamassas: CAP-REF(1:1,5) sem e com adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7 (com e sem fermentação), 10% de Fibras e 10% de Cal: média e desvio padrão.	190
Figura 80. Densidade no estado endurecido das argamassas: CAP-REF(1:1,5) sem e com adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7 (com e sem fermentação), 10% de Fibras e 10% de Cal: média e desvio padrão.	192
Figura 81. Condutibilidade térmica das argamassas: CAP-REF(1:1,5) sem e com adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7 (com e sem fermentação), 10% de Fibras e 10% de Cal: média e desvio padrão.....	193
Figura 82. Resistências à compressão e flexão das argamassas: CAP-REF(1:1,5) sem e com adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7 (com e sem fermentação), 10% de Fibras e 10% de Cal: média e desvio padrão.	196
Figura 83. Gráfico gerado durante o ensaio de resistência a compressão das argamassas com adição de 10% de Fibras (capim picado com comprimento máximo de 3 cm).....	198
Figura 84. Observação sobre corpo de prova da argamassas CAP(1:1,5)+10Fibras rompido durante ensaio de Rf e separado manualmente.....	198
Figura 85. Resistência de aderência ao cisalhamento das argamassas: CAP-REF(1:1,5) sem e com adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7 (com e sem fermentação), 10% de Fibras e 10% de Cal: média e desvio padrão.	199
Figura 86. Imersão em água por até 30 minutos da argamassa de referência, CAP-REF (1:1,5), das argamassas com adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7 fermentadas e não fermentadas, e das argamassas com adição de 10% de Fibras e de 10% de Cal.	201
Figura 87. Massa de água adsorvida por área dos revestimentos produzidos com as argamassas: CAP-REF(1:1,5) sem e com adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7 (com e sem fermentação), 10% de Fibras e 10% de Cal: média e desvio padrão.	204
Figura 88. Adsorção e desadsorção das argamassas: CAP-REF(1:1,5) sem e com adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7 (com e sem fermentação), 10% de Fibras e 10% de Cal.....	204
Figura 89. Resultados dos dois ensaios de erosão por gotejamento realizados nos corpos de prova “tijolo rebocado” com as argamassas produzidas com a terra CAP e adição de areia no traço volumétrico 1:1,5(terra:areia): em cima, as argamassas CAP-REF(1:1,5) e as argamassas com adição de 10% de Fibras e de 10% de Cal; no meio, as argamassas com a adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7 (moldadas imediatamente após a mistura dos componentes); e em baixo, as mesmas argamassas com adição de EBfp7, mas fermentadas.....	206
Figura 90. Massa de revestimento erodida pelo gotejamento de água nos rebocos com as argamassas: CAP-REF(1:1,5) sem e com adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7 (com e sem fermentação), 10% de Fibras e 10% de Cal.	207

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais componentes presentes no excremento de bovinos alimentados no pasto e com ração	68
Tabela 2. Conteúdo de fibras totais, celulose e hemicelulose em excrementos bovinos leiteiros alimentados no pasto, de corte também no pasto e confinados.....	68
Tabela 3. Parâmetros microbiológicos para produtos lácteos. Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA). Portaria SDA/MAPA n.1.170 de 26 de agosto de 2024.....	76
Tabela 4. Publicações sobre bioestabilização de produtos para construção com terra mediante adição de excremento bovino: informações sobre o excremento e apresentação dos resultados de forma qualitativa, nos efeitos causados em relação a argamassa de referência, sem adição de excremento.	82
Tabela 5. Publicações sobre bioestabilização de produtos para construção com terra mediante adição de excremento bovino: informações sobre a terra e a argamassa utilizada para produção dos blocos ou revestimentos.....	83
Tabela 6. Resultado (% - em massa) da análise semiquantitativa por DRX (método Rietveld) das três amostras de terra.	109
Tabela 7. Distribuição granulométrica, limites de Atterberg, umidade higroscópica e densidade aparente das três terras.....	109
Tabela 8. Síntese das amostras de excremento bovino utilizadas.....	114
Tabela 9. Tempo de secagem/compostagem, teor de umidade, densidade e fração seca equivalente nas amostras de excremento bovino utilizadas na pesquisa.....	118
Tabela 10. Média do teor de umidade (%) do excremento bovino durante 60 dias.....	119
Tabela 11. Classes para avaliação da erosão causada nos CP durante o ensaio de erosão por gotejamento - <i>Geelong drip test</i>	140
Tabela 12. Parâmetro sugerido para avaliação da erosão causada nos CP durante o ensaio de erosão por gotejamento - <i>Geelong drip test</i>	142
Tabela 13. Umidade relativa (%) de soluções salinas saturadas	143
Tabela 14. Percentagem de EB adicionado, relação água/componentes secos para obter espalhamento de 170 mm, retração e densidade das argamassas no estado fresco.	148
Tabela 15. Percentagem de EB adicionado, relação água/componentes secos para obter espalhamento de 170 mm e densidade das argamassas no estado fresco.	159
Tabela 16. Percentagem de EB adicionado, relação água/componentes secos para obter espalhamento de 170 mm e densidade das argamassas no estado fresco.	175
Tabela 17. Caracterização do excremento bovino EBfp7 e das Fibras vegetais: teor de umidade, densidade e fração de material seco equivalente contido em cada amostra.	188
Tabela 18. Composição, relação água/componentes secos para obter espalhamento de 170 mm e densidade das argamassas no estado fresco.	189
Tabela 19. Síntese qualitativa dos resultados da seção 4.2.	209
Tabela 20. Síntese qualitativa dos resultados da seção 4.3.	211
Tabela 21. Síntese qualitativa dos resultados da seção 4.4.	214
Tabela 22. Síntese qualitativa dos resultados da seção 4.5.	217

LISTA DE SIGLAS E SIMBOLOS

Materials

CAP: terra CAP, da Caparica, Portugal;

MON: terra MON, de Monsaraz, Portugal;

ITA: terra ITA, de Itabirito, Brasil;

(1:x): traço volumétrico utilizado para adição de areia nas argamassas

EB: Excremento Bovino

EBfp: EB coletado fresco, de bovinos alimentados no pasto e adicionado na argamassa ainda fresco;

EBfp7: EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias;

EBfp30: EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 30 dias

EBfp30pó: EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 30 dias, moído;

EBsppó: EB coletado seco no pasto, de animais alimentados no pasto, moído

EBfra7: EB coletado fresco, de animais alimentados com ração, compostado por 7 dias;

Fibras: fibras vegetais de escalracho (*Panicum repens*) cortadas em pedaços com comprimento variado de no máximo 3 cm;

Cal: cal aérea hidratada, em pó;

Argamassas produzidas com a terra CAP, da Caparica, Portugal

CAP (1:0): Terra CAP sem adições;

CAP (1:0) + 20 EB fp7: Terra CAP, sem adição de areia, mas com adição de 20% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias.

CAP (1:1): Terra CAP:areia (1:1);

CAP (1:1,5) REF: Terra CAP:areia (1:1,5). Este foi o traço terra CAP:areia que possibilitou conter o surgimento de fissuras no reboco após a secagem da argamassa produzida com esta terra (teste preliminar de retração). Por isto, essa argamassa foi utilizada como referência (REF) para avaliar os efeitos causados pelas adições de excremento, fibra vegetal e cal;

CAP (1:1,5) + 5 EB fp7: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 5% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias;

CAP (1:1,5) + 10 EB fp7: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 10% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias;

CAP (1:1,5) + 20 EB fp7: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 10% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias;

CAP (1:1,5) + 40 EB fp7: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 40% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias;

CAP (1:1,5) + 20 EB fp7 Reciclo: Argamassa produzida reutilizando três corpos de prova da argamassa CAP(1:1,5)+20EBfp7, com 40 dias de idade. Foram triturados manualmente e misturados com água para produzir três novos corpos de prova reciclados, sem adições extras de terra, areia ou excremento.

CAP (1:1,5) + 5 EB fp7 (AF): Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 5% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias. Argamassa fresca fermentada por 72 horas;

CAP (1:1,5) + 10 EB fp7 (AF): Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 10% de EBfp7 (coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias. Argamassa fresca fermentada por 72 horas;

CAP (1:1,5) + 20 EB fp7 (AF): Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 20% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias. Argamassa fresca fermentada por 72 horas;

CAP (1:1,5) + 20 EB fp30: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 20% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 30 dias;

CAP (1:1,5) + 40 EB fp30: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 40% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 30 dias;

CAP (1:1,5) + 20 EB fp30pó: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 20% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 30 dias, moído;

CAP (1:1,5) + 20 EB sppó: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 20% de EB coletado seco no pasto, de animais alimentados no pasto, moído;

CAP (1:1,5) + 20 EB fra7: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 20% de EB coletado fresco, de animais alimentados com ração, compostado por 7 dias;

CAP (1:1,5) + 40 EB fra7: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 40% de EB coletado fresco, de animais alimentados com ração, compostado por 7 dias;

CAP (1:1,5) + 10 Fib: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 10% de fibras vegetais de escalracho (*Panicum repens*) cortadas em pedaços com comprimento variado de no máximo 3 cm;

CAP (1:1,5) + 10 Cal: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 10% de cal aérea hidratada, em pó;

Argamassas produzidas com a terra MON, de Monsaraz, Portugal

MON (1:0): Terra MON sem adições;

MON (1:0) + 20 EB fp7: Terra MON sem adição de areia, mas com adição de 20% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias.

MON (1:1): Terra MON:areia (1:1);

MON (1:1,5) REF: Terra MON:areia (1:1,5). Este foi o traço terra MON:areia que possibilitou conter o surgimento de fissuras no reboco após a secagem da argamassa produzida com esta terra (teste preliminar de retração). Por isto, essa argamassa foi utilizada como referência (REF) para avaliar os efeitos causados pelas adições de excremento;

MON (1:1,5) + 10 EB fp7: Terra MON:areia (1:1,5) com adição de 10% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias.

MON (1:1,5) + 20 EB fp7: Terra MON:areia (1:1,5) com adição de 20% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias.

Argamassas produzidas com a terra ITA, de Itabirito, Brasil

ITA (1:0): Terra ITA sem adições;

ITA (1:1): Terra ITA:areia (1:1);

ITA (1:2): Terra ITA:areia (1:2);

ITA (1:3) REF: Terra ITA:areia (1:3). Este foi o traço terra ITA:areia que possibilitou conter o surgimento de fissuras no reboco após a secagem da argamassa produzida com esta terra (teste preliminar de retração). Por isto, essa argamassa foi utilizada como referência (REF) para avaliar os efeitos causados pelas adições de excremento, fibra vegetal e cal;

ITA (1:3) + 10 EB fp7: Terra ITA:areia (1:3) com adição de 10% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias;

ITA (1:3) + 20 EB fp7: Terra ITA:areia (1:3) com adição de 20% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias;

MICP: Microbiologically Induced Calcite Precipitation

EPS: Exopolissacarídeos ou sacarídeos poliméricos extracelulares

UFMG: Universidade Federal de Minas Gerais;

NOVA: Universidade NOVA de Lisboa;

FCT: Faculdade de Ciências e Tecnologia;

LNEC: Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal;

CERIS: *Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability*;

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas;

NBR: Norma Brasileira Regulamentadora;

DIN: *Deutsche Institut für Normung*;

EN: *European Norms*;

NZS: *New Zeland Standart*;

RILEM: *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*

Rc: Resistência à Compressão;

Rf: Resistência à tração na Flexão;

Ra: Resistência de aderência ao cisalhamento;

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1. Contextualização	20
1.2. Justificativa.....	29
1.3. Objetivos e Metodologia	31
1.4. Estrutura da tese	33
2. ARGAMASSAS DE TERRA E EXCREMENTO BOVINO.....	34
2.1. Argamassas de terra.....	34
2.1.1. Adições em argamassas de terra.....	36
2.1.2. Fibras vegetais	39
2.1.3. Cal aérea hidratada	44
2.1.4. Adições microbiológicas e biomineralização	45
2.1.4.1. <i>Precipitação de carbonato de cálcio induzido microbiologicamente.....</i>	<i>45</i>
2.1.4.2. <i>Bioestabilização por exopolissacarídeos.....</i>	<i>53</i>
2.2. Excremento bovino	59
2.2.1. Os bovinos e os humanos	59
2.2.2. <i>Panchgavya</i> : um precioso presente para a humanidade.....	63
2.2.3. O processo de digestão nos bovinos	65
2.2.4. Estabelecimento dos microrganismos no rúmen e a influência da dieta na composição do excremento bovino	66
2.2.5. Composição do excremento bovino	68
2.2.6. Higienização do excremento bovino.....	71
2.2.7. Aplicações do excremento bovino	77
2.2.8. Excremento bovino na construção com terra	80
2.2.9. O que explica os efeitos causados nas argamassas de terra pela adição de excremento bovino?	88
2.2.10. Identificação das lacunas no campo de pesquisa sobre o tema	105
3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO	106
3.1. Campanha experimental	106
3.2. Materiais utilizados, sua preparação e caracterização	107
3.2.1. Terras	107
3.2.2. Excremento bovino.....	113
3.2.2.1. <i>Descrição das amostras de excremento bovino e dos diferentes processamentos adotados</i>	<i>114</i>
3.2.2.2. <i>Caracterização das amostras de excremento bovino.....</i>	<i>118</i>

3.2.3. Fibra vegetal.....	120
3.2.4. Cal aérea hidratada.....	120
3.2.5. Areia.....	120
3.3. Formulação das argamassas avaliadas	121
3.3.1. Teste preliminar de retração.....	121
3.3.2. Argamassas formuladas.....	122
3.3.3. Produção dos corpos de prova.....	126
3.4. Ensaio para avaliação das argamassas e corpos de prova necessários para a campanha experimental	130
3.4.1. Produção das argamassas e descrição geral.....	130
3.4.2. Determinação da consistência por espalhamento	131
3.4.3. Densidade no estado fresco.....	131
3.4.4. Retração linear por secagem	132
3.4.5. Densidade no estado endurecido.....	132
3.4.6. Condutibilidade térmica.....	133
3.4.7. Resistência à flexão e à compressão	134
3.4.8. Resistência de aderência ao cisalhamento	136
3.4.9. Resistência à imersão em água	137
3.4.10. Resistência à erosão por gotejamento - <i>Geelong drip test</i>	139
3.4.11. Adsorção e desadsorção de umidade - Higroscopicidade.....	142
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	146
4.1. Descrição geral.....	146
4.2. Efeitos da adição de areia nas argamassas de terra, e da adição de excremento bovino como substituto da adição de areia.....	147
4.3. Efeitos causados pela adição de excremento bovino em argamassas de terra produzidas com três terras diferentes, sendo uma do Brasil e duas de Portugal.....	157
4.4. Argamassas de terra com adição de excremento bovino: reciclagem, influência de diferentes processamentos e da dieta dos bovinos	172
4.5. Influência da fermentação em cura úmida das argamassas frescas com adição de excremento bovino e comparação com os efeitos causados pela adição de fibras vegetais e de cal.....	187
4.6. Síntese dos resultados obtidos	209
5. CONCLUSÕES	221
5.1. Considerações finais	221
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	223
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	225

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Considerando as consequências que vêm sendo observadas no planeta relacionadas com as alterações climáticas, é cada vez mais fundamental e urgente desenvolver materiais e otimizar soluções que possam atender às demandas construtivas da humanidade, ao mesmo tempo que envolvem menos impactos ambientais em sua produção e descarte final (Santos *et al.* 2021).

A terra é um material marcante na arquitetura vernácula brasileira e seu uso ainda é bastante presente em comunidades tradicionais e rurais em todo o país. Apesar de carecer de maiores investimentos e políticas públicas eficientes para garantir a conservação do patrimônio material e cultural do saber construir com terra, o Brasil possui um vasto patrimônio edificado com este material, sendo muitas construções centenárias (Galvão, 2015).

Além de ser possível encontrar uma grande variedade de pesquisas brasileiras sobre técnicas, métodos e materiais da construção com terra, Santos & Souza (2018) observaram que, de 2008 a 2018, houve um aumento significativo no interesse por construções novas edificadas em terra no país.

Zhang *et al.* (2024) observou que, nas últimas décadas, também houve um aumento no interesse por investigações científicas sobre a terra como material construtivo a nível mundial, tanto para aprimorar técnicas de conservação de patrimônio arquitetônico, como para desenvolver conhecimento para apoiar a utilização da terra em novas construções, principalmente devido a preocupações ambientais.

A sustentabilidade ambiental envolvida no uso da terra como material construtivo é sem dúvida uma justificativa para este fato. Mas as paredes executadas com terra também oferecem outras vantagens, como maior conforto higrotérmico e acústico. Além disso, em comparação com alvenarias de tijolos cerâmicos e outros materiais construtivos, devido a elevada higroscopicidade da argila na terra crua (aglutinante base das argamassas de terra), as paredes e revestimentos com terra também oferecem maior equilíbrio da umidade relativa do ar no ambiente, o que contribui para reduzir os desconfortos respiratórios e de sensação térmica causados tanto pelo excesso como pela baixa temperatura e umidade relativa do ar (Minke, 2006; Lima &

Faria, 2018; Cascione *et al.* 2019; Maddison *et al.*, 2009; Giada *et al.* 2019; McGregor *et al.* 2016).

Por se tratar de um produto natural e utilizado *in natura*, a emissão de poluentes envolvida no uso da terra crua pode ser muito baixa quando extraída próximo ao local da obra ou quando se reaproveita terra extraída de terraplanagem ou escavação para fundações, por exemplo. Além disso, em uma obra com terra crua o entulho gerado é terra, e por isto é reutilizável, podendo ser utilizado até mesmo para cultivo agrícola no próprio local da obra, desde que não sejam adicionados materiais sintéticos e não biodegradáveis que a contaminem.

Além disso, a terra é um material amplamente disponível e que demanda baixo custo para sua obtenção, comparado a materiais de construção industrializados (Santos *et al.* 2021). Por isto, atrelado a projetos de Assessoria Técnica para aplicação de inovações tecnológicas na construção com terra (Pachamama, 2018; 2022), ela pode contribuir para o acesso universal à habitação de qualidade e à outras demandas construtivas, para além dos nichos de mercado de alta renda os quais a terra tem sido amplamente utilizada por questões ambientais.

Por tanto, pesquisas que visam entender e aprimorar a construção com terra são muito importantes para garantir durabilidade, qualidade, ampliar aceitação pela população e auxiliar no processo de normalização e financiamento governamental de construções com terra e outros materiais responsáveis ambiental e socialmente.

Na construção com terra, as argamassas de terra são essenciais para muitas etapas, como para produzir e assentar adobes e blocos de terra compactada, tratar juntas das alvenarias, no enchimento do pau a pique e técnicas semelhantes, paredes monolíticas de terra e fibras, nos pisos com terra e na produção de revestimentos (emboço e reboco) para proteger a superfície das paredes e tetos dos impactos mecânicos e da ação da água, assim como para elementos decorativos.

Além das alvenarias de terra, pedra e fardos de palha, os rebocos com argamassas de terra também podem ser aplicados com êxito em diversos tipos de parede (suportes), tais como alvenaria de tijolo cerâmico e de blocos de concreto (Santos *et al.* 2019). Como os rebocos de terra têm efetivamente vantagens ambientais em comparação a rebocos com outros aglomerantes (Santos *et al.* 2021), o seu uso

mesmo para revestimento de alvenarias convencionais em edifícios já edificados, pode efetivamente contribuir para a descarbonização da indústria da construção.

As argamassas de terra, são basicamente uma mistura de terra e água. De maneira geral, a terra utilizada para produção de argamassas com terra deve ser peneirada para retirar agregados mais grossos (pelo menos superior a #4,8 mm). Em sua composição a terra possui naturalmente diferentes frações e tipos de argila, silte e areia. Nestas argamassas, a argila é o aglomerante da mistura, a areia contribui na formação da estrutura e o silte atua essencialmente como *filler*.

No entanto, apesar de contribuir para as argamassas de terra apresentarem bom desempenho em termos de trabalhabilidade, resistência mecânica e aderência ao suporte, a argila é sensível à ação da água (Pachamama *et al.* 2024b). Por outro lado, esta propriedade faz com que a argila seja um aglomerante que pode ser reutilizado (reversível), ou seja, por simples destorroamento e nova adição de água para amassadura, a argila volta a exercer a propriedade aglomerante. Ou seja, a argila é um aglomerante reversível natural de origem mineral quimicamente inerte que endurece por simples secagem, dispensando processos poluentes como a calcinação, ao contrário de aglomerantes quimicamente ativos como o cimento, a cal e o gesso.

Os argilominerais disponíveis na natureza possuem diferentes origens e composição mineralógica e, portanto, causam diferentes comportamentos nas argamassas de terra. Dentre os tipos de argila mais comuns estão a caulinita, illita e montmorilonita (Lima *et al.* 2020), sendo a primeira mais estável, mas menos higroscópica, a segunda mais resistente mecanicamente e de higroscopicidade intermediária, e a terceira mais expansiva, com maior retração e com mais elevada higroscopicidade.

Além destes componentes básicos das argamassas de terra, quando necessário, podem ser misturadas terras diferentes (mais arenosas ou mais argilosas para equilibrar a composição) ou podem ser acrescentadas areia e/ou fibras naturais, principalmente para conter a retração e fissuração quando as terras são muito argilosas. Em alternativa à adição de areia complementar podem ser adicionados outros materiais naturais além de agregados reciclados, tais como resíduos de cerâmica de barro vermelho, com diversas vantagens (Tadonbou *et al.* 2024). Estas adições têm essencialmente um efeito físico, mas também podem ser adicionadas adições estabilizantes que causam um efeito químico ou biológico, com o objetivo de

alterar alguma propriedade das argamassas de terra, principalmente melhorar o desempenho em relação ao contato com a água.

Para tornar os revestimentos mais resistentes à chuva, historicamente foram utilizados diferentes tipos de adições estabilizantes como a cal, cinzas de madeira, mucilagens de vegetais, óleos vegetais, gordura e excrementos de animais, como urina e fezes (Ngowi, 1997; Pacheco-Torgal & Jalali *et al.* 2012; Cervantes & Guerrero, 2021;). No entanto, atualmente, alguns materiais químicos industrializados e poluentes têm sido usados de maneira equivocada/contraditória em argamassas de terra para revestimento visando impermeabilizar a superfície.

Mileto & López-Manzanaraes (2017) esclarecem que, para otimizar as propriedades dos elementos construtivos com terra, como a higroscopicidade e a contribuição para o conforto higrotérmico, as argamassas para reboco (principalmente em ambientes interiores) devem ser produzidas à base de terra argilosa e agregado complementar, com possibilidade de adição de materiais em baixas proporções, mas priorizando aqueles com maior compatibilidade química com os componentes da terra argilosa e que não reduzam significativamente a referida higroscopicidade.

Assim, para proteger as alvenarias de terra da ação da água, o reboco de terra aplicado em ambientes externos não deve tornar o revestimento impermeável, mas apenas resistente a água, ou seja, deve permitir que todo o conjunto parede-revestimento se mantenha permeável ao vapor de água, e ser suficientemente resistente para não se deteriorar com impactos mecânicos e nem após o contato com a chuva, protegendo a alvenaria. Já o reboco de terra aplicado em ambientes internos, para além de bom desempenho mecânico, deve ser capaz de adsorver e liberar umidade, para equilibrar a temperatura e a umidade relativa nos espaços interiores das edificações.

Além disso, deve-se evitar as adições que possam impedir a reversibilidade da argila, ao final do ciclo de vida das argamassas. E por fim, todos os materiais utilizados, assim como os estabilizantes, devem ter baixa energia incorporada, para manter baixo o impacto ambiental das argamassas de terra. Por isso é importante investigar, caracterizar e testar todo material a ser usado como adição estabilizante, e as argamassas de terra com estas adições, para assegurar que não sejam alterados estes comportamentos positivos.

A Alemanha exemplifica bem a importância que os produtos de terra para construção têm ganhado na atualidade e a importância de estimular inovações tecnológicas ecoeficientes e o uso de bioprodutos em detrimento de aglomerantes poluentes convencionais. Desde 2013 o Instituto Alemão para Normalização tem desenvolvido e publicado um conjunto de normas técnicas DIN específicas para a construção com terra sem adições que tornem o uso da terra irreversível, cuja revisão/atualização é realizada a cada cinco anos (Ziegert *et al.* 2020; Schroeder, 2018).

Neste ano (2024), as normas DIN para construção com terra foram revisadas. Especificamente na norma DIN 18947 (NABau, 2024) para argamassas de terra para reboco não estabilizadas com aglomerantes, já era permitida a adição de fibras naturais (animal e vegetal), mas foi incluída: (i) a possibilidade de utilizar agregados reciclados inertes (desde que não haja contaminantes prejudiciais à saúde); (ii) e efetuar o reforço dos rebocos com aditivos adesivos à base de argila e celulose. O uso de aglomerantes quimicamente ativos e irreversíveis, como cal, gesso ou cimento, continua excluído da norma alemã para rebocos de terra e para outros elementos da construção com terra (ZRS, 2024).

Como uma alternativa natural e econômica à adição de aglomerantes ativos usados como estabilizante na construção com terra, no Brasil e em diversas outras regiões ao redor do mundo (BASIN, 2002; Ngowi, 1997; Fathy, 2010), o excremento bovino é tradicionalmente usado na arquitetura vernácula desde o piso e as alvenarias, até o reboco. As suas propriedades e benefícios são reconhecidas na cultura popular e também continuam sendo praticadas até os dias atuais em comunidades rurais brasileiras (Pachamama, 2018; 2022) e em outros países (Bamogo *et al.* 2020).

No século XXI, o excremento bovino tem sido considerado um recurso biológico importante para o desenvolvimento sustentável no campo da biotecnologia, com aplicações inovadoras tais como o uso das fibras do excremento para produção de compósitos de fricção reforçada (Ma *et al.* 2019), o uso de cinzas do excremento na produção de cimento para substituir cinzas volantes (Worku *et al.* 2023; Kumar *et al.* 2015), além do uso do carvão ativado obtido a partir do excremento bovino como componente estrutural de baterias para super capacitores (Yang *et al.* 2012).

Apesar de ainda haverem poucas pesquisas sobre os efeitos da adição de excremento bovino na construção com terra, desde a década de 1990 é possível encontrar alguns

trabalhos publicados sobre o assunto, com destaque para países asiáticos e africanos. Essas publicações evidenciam que, na proporção correta, a incorporação do excremento bovino reduz a retração e a absorção de água, enquanto aumenta a trabalhabilidade, a resistência mecânica, a aderência à alvenaria e a durabilidade dos blocos e revestimentos de terra em contato com a água (Ashurst, 1988; Yalley & Dorothy, 2013; Manette *et al.* 2015; Millogo *et al.* 2016; Santos & Souza, 2018; Bamogo, 2020; Pachamama *et al.* 2020; Rao *et al.* 2020, 2021; Kulshreshtha *et al.* 2022; Rao, 2023; Pachamama *et al.* 2024a,b,c).

Dentre as pesquisas encontradas até o ano de 2024, apenas três delas se propuseram a apresentar uma explicação para os mecanismos de interação entre os componentes do excremento bovino e da terra argilosa. Primeiramente, Millogo *et al.* (2016), complementados por Bamogo *et al.* (2020), explicaram que, quando adicionado nas argamassas de terra, os componentes presentes no excremento bovino (compostos de amina) reagem com a argila, como a caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e o quartzo fino (SiO_2) presentes na terra argilosa, resultando na formação de um novo composto, os silicatos de amina insolúveis ($\text{Si}(\text{OH})_4 \cdot 4\text{NH}_3$). Segundo estes pesquisadores, esse composto une os componentes da mistura conferindo resistência à água e dureza. Além disso também explicam que a presença das fibras dificulta ainda mais a retração da argamassa no estado endurecido e diminuem a formação de fissuras, o que também contribui para o aumento da resistência mecânica.

Kulshreshtha *et al.* (2022), caracterizaram o excremento bovino fresco e detectaram a presença de minúsculos agregados bacterianos (0,5-7 μm) compostos por partículas do tamanho de argila, carregados negativamente e ricos em ácidos graxos. A propriedade de repelir água presente nesses agregados bacterianos foi então apontada como responsável pelo comportamento de resistência à água conferida as argamassas de terra com a adição do excremento. A explicação dada dialoga com aquela apresentada primeiramente por Millogo *et al.* (2016) mas com informações complementares.

Finalmente Rao *et al.* (2020;2021) e Rao (2023), apresentaram a explicação mais recente e completa sobre o assunto. Após a realização de vários ensaios para caracterização do excremento e das argamassas com ele adicionadas, os efeitos da adição do excremento bovino foram justificados pela atividade natural de bactérias onipresentes (presentes em todo o excremento) que produzem sacarídeos poliméricos

extracelulares - ou exopolissacarídeos (EPS). Identificou-se que o EPS secretado pelas bactérias possui carga negativa e se liga às partículas presentes na argamassa de terra, formando um biofilme composto por produtos metabólicos de bactérias, fibras vegetais e micropartículas minerais aglomeradas. Por tanto, as bactérias presentes no excremento bovino, oriundas do sistema digestivo, promovem biocimentação nas argamassas de terra aumentando a resistência mecânica e a durabilidade em contato com a água. Rao (2023) concluiu que “a cola microbiana” (o material agregador) referida por Millogo *et al.* (2016) provavelmente corresponde aos biofilmes ricos em EPS identificados por Rao *et al.* (2021).

O uso de bactérias para promover a aglutinação de agregados biocimentação foi sugerido pela primeira vez por Whiffin (2004) e Mitchell & Santamarina (2005), em estudos para estabilização de solos. Desde então, é possível encontrar algumas pesquisas nesta área multidisciplinar promissora entre Engenharia Geotécnica, Engenharia Civil, Arquitetura e Microbiologia.

Atualmente, o uso de bactérias e suas vias metabólicas para produção de biocimentos, está emergindo cada vez mais como solução viável, e aponta para um futuro com mais responsabilidade ecológica na construção, pois proporcionam bons resultados e possibilita a redução do uso de materiais industrializados poluentes.

As investigações realizadas em Rao *et al.* (2021) trazem descobertas que colocam o excremento bovino em um patamar elevado de importância e potencial para construção com terra, uma vez que este material possui naturalmente em sua composição, bactérias (inoculantes) capazes de promover biocimentação. Portanto, com o devido processamento, o excremento bovino pode ser uma escolha viável para bioestabilizar produtos tais como argamassas de terra, seja em comunidades rurais tradicionais ou em ambientes urbanos modernos.

À medida que as preocupações ambientais e em relação a saúde humana relacionadas ao uso de agrotóxicos, e a agricultura orgânica começaram a ganhar mais destaque nas últimas décadas (desde a década de 1980), também surgiram algumas preocupações sobre as bactérias presentes no excremento bovino, pois este é um dos materiais naturais que podem ser utilizados na fertilização orgânica. No entanto, diversas pesquisas já evidenciaram que, por um efeito antagonista, a microbiota do esterco bovino apresenta eficácia para controle de diversos patógenos,

incluindo organismos fúngicos, bacterianos e nematoides (Munshi *et al.* 2018; Raj *et al.* 2014).

Além disso, pesquisas sobre o controle bacteriano em excremento bovino para aplicação na agricultura como biofertilizante também já evidenciaram que a compostagem é um método eficiente para eliminação de patógenos. Heinonen-Tanski *et al.* (2006) explicam que, além de patógenos, as elevadas temperaturas (em torno de 60°C) obtidas durante o processo de compostagem também elimina sementes, ovos de moscas e outros contaminantes.

No entanto, existem riscos muito mais graves à saúde humana relacionados ao leite do tipo A1 produzido por vacas híbridas, generalizadamente consumido no Brasil e no mundo (Woodford, 2009; Sokolov *et al.* 2005; De Noni & Cattaneo, 2010) e ao consumo da carne de bovinos tratados com antibióticos de maneira preventiva, exagerada e irresponsável (Naiemi *et al.* 2006; Abo-state *et al.* 2012; Aly *et al.* 2012; Jeyasanta *et al.* 2012; Ullah *et al.* 2012; Sharif *et al.* 2013) do que relacionados ao contato de humanos com o excremento bovino compostado, seja adicionado em argamassas de terra, seja na agricultura .

Apesar do excremento bovino ser um material natural, a pecuária extensiva no Brasil gera diversos impactos sócio ambientais desastrosos, tais como conflitos com comunidades camponesas, a perda de biomas e de biodiversidade para criação de pastagens ou de plantações em sistema de monoculturas de grãos, como milho e soja para ração, além de alto consumo de água para criação dos bovinos, práticas de queimadas para sucessão de pastagens, compactação do solo por pisoteio, resultando em processos de desertificação a médio e longo prazos (Ferreira, 2021).

Neste sentido destaca-se que a presente pesquisa não se propõe a estimular a produção de bovinos para corte no Brasil, mas (i) oferecer suporte científico para atividades de assessoria técnica para construção com terra em comunidades rurais (Pachamama, 2018; 2022) e urbanas; (ii) evidenciar a sabedoria de povos tradicionais e o potencial de soluções empíricas da arquitetura vernácula; (iii) e por fim, sugerir destinação adequada para um resíduo agroindustrial da produção de laticínios incorporando-o na indústria da construção. Afinal, a utilização destes resíduos ao invés de produtos químicos industrializados, como cimento, cal, gesso ou betumes, para estabilizar argamassas de terra, evita a liberação de toneladas de dióxido de carbono para a atmosfera pela respectiva produção e consumo de cimento.

Para comparar os efeitos causados pela adição de excremento com uma adição mais investigada cientificamente, em dois estudos prévios, Pachamama *et al.* (2020; 2024a) avaliaram argamassas de terra produzidas com duas terras brasileiras (uma argilosa e outra areno-siltosa, de Minas Gerais), com as adições (em volume) de 5% de cal hidratada CH-I e de 10% de excremento bovino. Os resultados evidenciaram que a adição de excremento apresentou desempenho superior em todos os ensaios avaliados: retração, resistência mecânica e aderência ao suporte, tanto em adobe como em tijolo cerâmico. Além da cal, na dissertação de mestrado do autor também foram avaliadas e comparadas outras adições nestas duas mesmas argamassas: gesso, cimento e óleo vegetal reciclado. Dentre os materiais avaliados, os efeitos causados pela adição do excremento bovino se destacaram expressivamente. Portanto, o excremento bovino demonstrou ser um material que realmente pode ser uma solução ecoeficiente para substituir a adição de aglomerantes em argamassas de terra e que deve ser mais investigado cientificamente em argamassas produzidas com diferentes terras para compreender melhor o seu comportamento e ampliar sua validação para diferentes aplicações. Por isto, agora, na pesquisa de doutorado, optou-se por investigar estratégias para potencializar os efeitos dessa adição promissora em argamassas de terra utilizando excremento obtido e preparado de formas distintas, usando terras diferentes e realizando mais ensaios para ampliar a caracterização e conhecimento sobre a adição do excremento bovino na construção com terra.

Espera-se com este trabalho conhecer os efeitos causados nas propriedades físicas e mecânicas em argamassas de terra pela adição de excremento bovino; identificar como potencializar os efeitos do seu uso como estabilizante nas argamassas de terra; incentivar seu uso com respaldo científico; além de deixar contribuições metodológicas para avaliação de argamassas de terra no Brasil.

Por fim, correspondendo ao perfil interdisciplinar do programa de pós graduação em que está inserida, esta pesquisa apresenta uma transdisciplinaridade marcante, e transita entre diferentes áreas do conhecimento e da ciência, desde as ciências sociais aplicadas, a arquitetura e a engenharia, passando pela química e a biologia, até as fontes primordiais que motivaram este estudo, que são os saberes populares tradicionais da construção com terra, sem os quais hoje nada disso seria possível e ninguém estaria estudando e praticando a construção com terra.

1.2. Justificativa

Este trabalho se justifica principalmente na necessidade de compreender e otimizar o uso do excremento bovino como estabilizante na construção com terra. Apesar de ser uma prática muito comum tradicionalmente na arquitetura vernácula brasileira, na cultura popular e na autoconstrução nas zonas rurais do país, não há na literatura brasileira, evidências científicas da qualidade do seu uso com tantos detalhes e informações. Portanto, para garantir qualidade técnica e respaldo científico para assegurar a indicação do uso deste material, justifica-se o presente estudo.

Além disso, o Brasil é um país que enfrenta problemas graves de desigualdade social, onde existem inúmeras famílias que habitam edificações construídas com terra com rebocos externos e internos repletos de fissuras, ou mesmo que habitam edificações construídas com alvenaria de tijolos cerâmicos e que não possuem reboco devido ao elevado custo do cimento e da areia. Estas fissuras e cavidades na superfície destas casas oferecem um ambiente propício para instalação e proliferação de insetos peçonhentos ou que são vetores de doenças graves como a de Chagas.

Neste sentido, este trabalho também se justifica na necessidade de desenvolver uma tecnologia social com baixo custo que possibilite a produção de rebocos com bom desempenho higrotérmico, sem ocorrência de fissuras, com boa aderência tanto em alvenarias de terra como em alvenarias de tijolos cerâmicos, e com elevada durabilidade e resistência a ação da chuva quando aplicado no exterior.

Além disso, devido as mudanças climáticas, principalmente em centros urbanos, há um aumento da necessidade por materiais e técnicas capazes de contribuir na melhoria da qualidade do ar e do conforto ambiental, acústico e higrotérmico no interior das edificações, principalmente utilizando tecnologias sustentáveis ecologicamente. Os rebocos realizados com argamassas de terra oferecem vantajosas propriedades que atendem exatamente a estas demandas. Na Alemanha e em outros países na Europa, encontram-se edificações em centros urbanos construídas com materiais convencionais, mas que são revestidos com argamassas de terra, devido suas propriedades higrotérmicas. Afinal, além de poupar recursos naturais e processos poluentes de produção industrial, as argamassas de terra podem gerar economia de recursos financeiros e energéticos ao nível doméstico reduzindo gastos com refrigeração e aquecimento artificial.

Os rebocos de terra também retardam a reverberação do som no ambiente, e devido a sua boa inércia térmica, transferem calor lentamente, proporcionando maior conforto térmico no interior das edificações por levar um tempo maior para equilibrar a temperatura interna com a externa a edificação (Garzon, 2002). Segundo Bamogo *et al.* (2020) e Rao (2023), estas propriedades das argamassas de terra ainda podem ser otimizadas pela adição do excremento bovino.

De acordo com Minke (2013), o excremento pode ser usado seco, fresco, fermentado, peneirado ou moído. Mas não se encontra uma pesquisa publicada que compare a diferença entre os efeitos causados por estes diferentes modos de uso, o que também justifica os objetivos da presente proposta de pesquisa.

Especialmente no campo da conservação do patrimônio, é feita uma análise da composição do suporte de aplicação (parede existente) e da argamassa de revestimento antiga deteriorada para que sejam escolhidos componentes compatíveis para elaboração da nova argamassa de recomposição. Por isto também se justifica a importância de pesquisas para a caracterização de materiais tradicionais da arquitetura vernácula brasileira como o excremento bovino. Além disso, estas argamassas também podem ser adequadas para revestimentos de sacrifício para a conservação de estruturas e suportes.

Além disso as adições microbiológicas tem sido foco de muitas pesquisas internacionais, tendo inclusive sido criada uma comissão técnica específica na RILEM (União Internacional de Laboratórios e Especialistas em Materiais, Sistemas e Estruturas de Construção) para estimular e desenvolver bioprodutos para bioestabilização de elementos para construção com terra, onde inclusive esta pesquisa ganhou uma premiação de destaque em 2023. No Brasil, o tema das adições microbiológicas, da biocimentação e da bioestabilização, assim como o desenvolvimento de argamassas ecoeficientes e bioprodutos para a construção com terra ainda é incipiente. Por tanto, se fazem necessárias pesquisas nacionais para a caracterização de materiais naturais disponíveis localmente, bem como a investigação de soluções tradicionais da arquitetura vernácula no país para buscar, na tradição, soluções que inspirem inovações tecnológicas resilientes e responsáveis ambientalmente.

1.3. Objetivos e Metodologia

O objetivo da presente pesquisa é investigar como potencializar os efeitos, nas argamassas de terra, causados pela adição de excremento bovino e desenvolver formulações para revestimentos com elevada durabilidade, em termos de aderência, isolamento térmico, higroscopicidade, resistência mecânica e ao contato com água, para aplicação em alvenarias de terra e de tijolo cerâmico.

Objetivos específicos:

Nos efeitos nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas de terra pretende-se:

- Identificar os efeitos da adição de areia e do excremento bovino como substituto à adição de areia;
- Identificar as diferenças entre usar o excremento bovino:
 - coletado fresco no pasto;
 - coletado fresco no pasto e deixado compostar (secar) por 7 dias;
 - coletado fresco no pasto e deixado compostar (secar) por 30 dias;
 - coletado fresco no pasto, deixado compostar (secar) por 30 dias e moído;
 - coletado seco no pasto e moído – o excremento secou em contato com o solo por aproximadamente 30 dias, e possivelmente parte dos componentes químicos e biológicos foram lixiviados para o solo;
- Identificar a influência da alimentação dos bovinos através da comparação dos efeitos causados pela adição de excremento produzido por bovinos alimentados no pasto e de excremento produzido por bovinos alimentados com ração de grãos e silagem;
- Identificar se a reversibilidade da propriedade aglutinante da argila é prejudicada com a adição de excremento bovino na argamassa de terra, através da reciclagem do corpo de prova;
- Identificar os efeitos causados pela adição de excremento bovino nas proporções de 5%, 10%, 20% e 40% do volume total de terra + areia, em argamassas de terra;

- Identificar a influência do processo de fermentação, em cura úmida por 72 horas, da argamassa fresca com adição de excremento bovino nas proporções de 5%, 10%, 20%;
- Comparar os efeitos causados pela adição de 10% fibras vegetais de capim escalracho (*Panicum repens*) coletadas no pasto onde os bovinos se alimentavam;
- Comparar os efeitos causados pela adição de 10% de cal aérea hidratada.
- Também é objetivo deste estudo oferecer respaldo técnico científico para assegurar a indicação do excremento bovino como bioestabilizante para construção com terra em oficinas práticas e formações em projetos de Assessoria Técnica para Construção com Terra promovidos pelo autor em parceria com comunidades tradicionais. Desta forma espera-se aprimorar soluções empíricas nestas comunidades, valorizando os saberes tradicionais e ampliando a sua autonomia construtiva.

1.4. Estrutura da tese

A tese foi organizada da seguinte maneira. No capítulo 1. INTRODUÇÃO, está apresentada a contextualização da pesquisa, a justificativa e os objetivos. As argamassas de terra foram tema da dissertação de mestrado do autor, onde foi apresentada uma extensa revisão sobre o assunto, por isto, no capítulo 2. ARGAMASSAS DE TERRA E EXCREMENTO BOVINO, apresenta-se uma breve abordagem sobre as argamassas de terra de início, mas em seguida, uma revisão mais aprofundada sobre as adições naturais para promover bioestabilização em argamassas de terra, em especial as adições microbiológicas. Esta última, é uma seção importante para entender os mecanismos utilizados por microrganismos para promover a biomineralização e a biocimentação, inclusive daqueles presentes no excremento bovino, tema central da presente pesquisa. Neste capítulo também são apresentadas informações importantes sobre o excremento bovino, levando em consideração aspectos relevantes sobre o excremento e a fisiologia dos bovinos que estão relacionados com os efeitos causados nas argamassas de terra e com as explicações científicas encontradas sobre os mecanismos de reação/interação entre o excremento bovino e a terra argilosa. No capítulo 3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO são apresentados e caracterizados todos os materiais, descrita a composição das argamassas formuladas, a produção dos corpos de prova e descritos os métodos usados nos ensaios realizados para avaliação das propriedades físicas e mecânicas das argamassas de terra. No capítulo 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO estão apresentados todos os resultados da presente pesquisa, organizados em seções por objetivos específicos, e uma síntese geral ao final com as conclusões obtidas a partir da análise dos resultados apresentados em cada seção separadamente, discutindo e relacionando-os. Por fim, no capítulo 5. CONCLUSÃO estão as considerações finais sobre as conclusões obtidas com a presente pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

2. ARGAMASSAS DE TERRA E EXCREMENTO BOVINO

2.1. Argamassas de terra

“As construções com terra são utilizadas há milênios pela humanidade, tendo um acúmulo imensurável de conhecimento a ser explorado. No entanto, nos últimos 150 anos este material tem sido sistemicamente substituído por materiais industriais quimicamente alterados e que respondem por grande poluição ambiental, geração de resíduos inertes e consumo de recursos naturais de forma irresponsável.

Apesar disso, desde a década de 1960 percebe-se esforços tanto acadêmicos como profissionais para desenvolver inovações tecnológicas mais sustentáveis ambientalmente para construção civil, buscando inspirações em práticas do passado como os designs resilientes da Arquitetura Vernácula e os materiais construtivos naturais como a terra. As construções com terra, assim como as argamassas de terra, oferecem propriedades muito vantajosas às edificações, tais como estética, equilíbrio térmico, conforto ambiental, absorção de ruídos, durabilidade e resistência ao fogo, além de gerar resíduos orgânicos e biodegradáveis.

As argamassas de terra para assentamento e revestimento são um dos itens mais utilizados em uma construção e representa grande importância para durabilidade das edificações, podendo também ser um ponto frágil se não forem executadas corretamente.

Atualmente a Alemanha é o primeiro e ainda o único país a publicar uma norma técnica específica para análise de propriedades físicas e mecânicas em argamassas de terra, a norma DIN 18.947 publicada em 2013 (e atualizada em 2018 e 2024). Em um país como o Brasil onde ainda há uma tradição viva de se construir com terra, além de um vasto repertório vernáculo de patrimônios históricos com demanda por restauração, faz-se ainda mais importante investigar as propriedades, soluções tecnológicas e composições das argamassas de terra para orientar seu uso e disseminação pelo país e subsidiar normas técnicas nacionais específicas para o material.

Assim, este artigo, que está inserido na pesquisa de mestrado do autor, pretende contribuir para a consolidação do arcabouço teórico técnico sobre o assunto no país. Se valendo da revisão bibliográfica realizada na pesquisa, este artigo apresenta um panorama de algumas soluções utilizadas para estabilização de argamassas ao longo da história vernácula da construção com terra e conclui que apesar dos materiais e soluções da arquitetura vernácula estarem sujeitos a transformações e adaptações conforme as demandas e inovações tecnológicas que surgem com o passar do tempo, as qualidades desses materiais já consagrados pela tradição vernácula empírica podem justificar o seu retorno e a permanência de seu uso.”

Resumo do artigo “Inovações e permanências em argamassas de terra”
Pachamama et al. (2019)

O trecho apresentado acima foi trazido de um artigo que resume a extensa revisão bibliográfica que foi realizada na dissertação de mestrado do autor sobre as argamassas de terra e as normas técnicas relacionadas a argamassas em geral. Foram abordados: a função de cada componente; os termos e conceitos envolvidos; as propriedades e as funções essenciais que as argamassas de terra devem cumprir; além de discutir se há a necessidade ou não de estabilizar a terra para ser utilizada como material de construção, assim como na produção de argamassas de terra.

Em relação a normas técnicas para a construção com terra, as normas alemãs, bem como seu processo de desenvolvimento, ganharam destaque no texto devido a quantidade, a qualidade e ao vanguardismo no assunto. Especificamente sobre argamassas para revestimento (reboco e emboço), foram abordadas as normas técnicas brasileiras e europeias sobre argamassas em geral (gesso, cimento e cal), e especialmente a norma técnica alemã específica para argamassas de terra, que até hoje é a única publicada no mundo. Até então, não havia pesquisa brasileira realizada sobre argamassas de terra, muito menos com base nesta norma, a DIN 18947 (2024).

Também foi realizada uma análise crítica e construtiva entre as normas brasileiras citadas na NBR 13281 (2005) (referente a argamassas em geral para assentamento e revestimento de paredes e tetos) e as normas europeias citadas na DIN 18947 (2024). Com isso foram geradas sugestões de adaptações para métodos de ensaios realizados na pesquisa; e de critérios para avaliação de argamassas de terra de acordo com o contexto brasileiro, deixando contribuições efetivas para a futura norma técnica sobre argamassas de terra no Brasil

Estas sugestões, juntamente com as normas DIN 18947 (2024) e NBR 13281 (2023), também serviram como base para o desenvolvimento da presente pesquisa. Novos ensaios também foram realizados durante o período de doutorado sanduíche na Universidade NOVA de Lisboa sob a orientação da prof. Dra. Paulina Faria, o que também gerou novas contribuições para a futura norma brasileira e terão suas metodologias descritas neste trabalho.

2.1.1. Adições em argamassas de terra

A ecoeficiência de uma construção ou de um material não pode ser analisada apenas em relação a ser natural ou não. Por exemplo, apesar da terra ser um material natural, trazer terra de locais distantes da obra em execução, gera gastos energético como o combustível necessário para abastecer o caminhão e com isso aumenta-se a quantidade de energia incorporada no material e consequentemente no processo produtivo da construção. Por outro lado, ao encomendar um caminhão de terra da mesma distância que seria encomendado um caminhão de tijolos cerâmicos, usar a terra continua sendo mais ecológico. Por isto, as construções com terra apresentam menos energia incorporada quando se utiliza a terra do próprio terreno, coletada local e regionalmente, ou quando são aproveitadas terras oriundas de escavações de outras obras próximas ao local da obra (Fernandes *et al.* 2015).

Outro fator que influencia no quesito sustentabilidade ambiental é a durabilidade do material ou da construção. Enquanto um pilar de *Eucalipto* (fruto da monocultura extensiva) pode durar poucas décadas, um pilar de *Braúna* pode durar centenas de anos. No entanto, árvores nativas do Brasil, cujas madeiras são resistentes e duradouras como *Braúnas*, foram extraídas até quase a sua extinção sem que houvesse um plano de manejo sustentável que garantisse sua permanência nos biomas brasileiros (Castro *et al.* 2021).

Já um pilar de estrutura metálica por exemplo, pode ser reaproveitado por talvez centenas de anos, passando por reformas, demolições, desmontagens e remontagens. No entanto, os processos de mineração e beneficiamento envolvidos na produção da estrutura metálica também respondem por grandes impactos ambientais, haja visto os impactos causados pela mineração no Brasil e os crimes em Brumadinho e Mariana em Minas Gerais.

Com todo o avanço tecnológico que se tem hoje no Brasil e no mundo, já é possível desenvolver uma proposta séria para indústria de usinas de reciclagem de metais para garantir a diminuição da mineração e a produção de peças recicladas com longa duração (Giannetti *et al.* 2013; Björkman *et al.* 2014). Já é possível também, utilizando técnicas agroecológicas, produzir bambu, madeira e consórcios de silvicultura com espécies variadas e mais resistentes, sem a necessidade de desmatamento de áreas nativas e desgaste do solo causado pelas monoculturas (Silva, 2017).

A mesma reflexão também se aplica a adição de areia. A depender da terra e teor e tipo da fração de argila, a adição de uma quantidade maior ou menor de areia poderá ser necessária para equilibrar a distribuição granulométrica e reduzir a retração. Contudo, a areia é um material muitas vezes oneroso, e que precisa necessariamente ser extraído do leito de rios e por isso também pode causar prejuízos e impactos ambientais (Antunes & Silva, 2024). Neste sentido, misturar diferentes terras, uma mais argilosa com outra mais arenosa, ou mesmo adicionar agregados reciclados, como resíduos da indústria cerâmica moídos com granulometria semelhante a areia (Tadonbou *et al.* 2024), podem ser soluções interessantes. Mas além dessas alternativas, existem diversas adições naturais como fibras vegetais e biopolímeros (Rao 2023), que podem contribuir para reduzir a retração das argamassas de terra ao mesmo tempo em que agregam outras propriedades vantajosas como a maior resistência mecânica e a ação da chuva. Portanto, na medida do possível, restringir para necessidades específicas e evitar a adição de aglomerantes químicos e até mesmo areia, pode gerar argamassas de terra mais ecoeficientes.

Além disso, como já foi dito, deve-se ter atenção ao escolher adições estabilizantes, para que não sejam prejudicadas outras propriedades vantajosas como a higroscopicidade e a facilidade de reutilização ao final do ciclo de vida. Por isto, como aponta Mileto & López-Manzanaraes (2017), devem ser priorizadas adições com maior compatibilidade química com os componentes da terra argilosa.

A cal é um aglomerante químico que apresenta compatibilidade química com a terra argilosa, sendo histórica e amplamente utilizada na construção com terra (Parracha *et al.* 2020). Porém, seu processo produtivo contemporâneo também é bastante poluente (Cunha, 2015). Além disso, a norma DIN 18947 (2024) é bastante clara quanto a restrição a presença de sais solúveis nas argamassas de terra e ao uso de aglomerantes químicos como a cal e o cimento, tanto devido à perda da reversibilidade, à redução drástica causada na higroscopicidade, e a maior energia que se incorpora nas argamassas de terra, mas também para incentivar o desenvolvimento de inovações mais ecoeficientes.

Portanto, somadas as justificativas ambientais, evitar a adição de cimento na estabilização de argamassas de terra, contribui para evitar anomalias como o descolamento e a eflorescência nos revestimentos, além de economizar recursos durante a construção e manter baixa a energia incorporada nas argamassas de terra.

Para a escolha de materiais sob um critério de ecoeficiência, é necessário considerar aspectos como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), da Pegada de Carbono, e a quantificação da Energia Incorporada. Nesse sentido, devido a todas as suas propriedades, as argamassas de terra podem ser uma solução bastante vantajosa e ecoeficiente, tanto para produção de revestimentos, como para vedação (Fernandes *et al.* 2015; Santos *et al.* 2021).

Apesar disso, existem pesquisas publicadas sobre construção com terra, sugerindo a incorporação de materiais sintéticos e outras adições residuais ou não, que ao final do ciclo de vida, terão comprometido a “despreocupação” com o descarte final. Se uma construção com alvenaria de adobes ou outros blocos de terra com adições biodegradáveis não contaminantes for abandonada, das paredes resultará um monte de terra argilosa, que poderá ser reutilizada. Mas se os blocos de terra tiverem adição de cimento, betume, fibras sintéticas, plásticos ou outros resíduos industriais não biodegradáveis, continuarão por muito tempo e necessitarão de cuidados específicos para o descarte final, restringindo as aplicações do resíduo reciclado.

Existem diversas possibilidades de incorporar resíduos sintéticos em outros processos e produtos da construção civil como no concreto, ou ainda naqueles que já são materiais com descarte complexo, como os produtos com gesso classificados como “*Resíduos cuja reciclagem ou recuperação não são tecnológica ou economicamente viáveis*” pela Resolução 307/2002 da CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente, Brasil). Portanto, fica a pergunta: porque adicionar materiais sintéticos e não biodegradáveis em um material natural, de fácil aplicação e descarte ao final do ciclo de vida como a terra argilosa? Não existem adições naturais, também residuais, que podem atender as mesmas demandas de estabilização?

Como já foi dito, a monocultura de bovinos no Brasil causa impactos ambientais enormes. No entanto, existem comunidades rurais tradicionais que praticam a pecuária para abastecimento local, em pequena escala e muitas vezes, de maneira integrada e harmoniosa com o meio ambiente. Estas comunidades podem reciclar os resíduos gerados neste processo para fortalecer sua autonomia, incorporando-os localmente na construção e na agricultura, além de outras possibilidades como a geração de biogás, que serão melhor apresentadas na revisão bibliográfica sobre o excremento bovino e suas aplicações. Principalmente a esta aplicação, é que se motivou este estudo.

2.1.2. Fibras vegetais

A terra é usada como material de construção há milênios e até os dias atuais é possível visitar construções históricas como as encontradas na cidade de *Arg-é Bam* no Irã, *Catal Hoyuk* na Turquia, *Harapa* no Paquistão com mais de 5.000 anos (Minke, 2006). Possivelmente, o uso da adição de fibras vegetais nas argamassas de terra iniciou-se juntamente com as primeiras construções com terra, uma vez que as soluções vernáculas são marcadas pelo uso dos materiais e recursos disponíveis localmente.

A Grande Mesquita de Djenné é um belíssimo exemplo da beleza, da qualidade e da durabilidade das construções com terra e da adição de materiais naturais (Figura 1). A mesquita está localizada ao sul do Mali, próximo à fronteira com a Burkina Faso, e foi declarada Patrimônio Mundial pela UNESCO, em 1988. A Mesquita foi originalmente construída em 1220 e reconstruída em 1907 (Snelder, 1984). Este é um dos maiores edifícios construídos com alvenaria de adobe do mundo, com aproximadamente 20 metros de altura.



Figura 1. Grande Mesquita de Djenné, Mali. Fonte: Magnusmundi

Apesar dos construtores tradicionais locais (*barey*) manterem uma relação ritualística, sagrada e misteriosa com as formulações, métodos e técnicas construtivas utilizadas na construção e manutenção (reparos) da mesquita, não é segredo que na formulação das argamassas produzidas para o revestimento da mesquita são utilizadas adições de óleos e fibras vegetais como palha de arroz, fruto do Baobá em pó, goma arábica e manteiga de karitê. Além disso, as argamassas são fermentadas por duas a três semanas antes da aplicação nas paredes (Sacko, 2021; Chabbi-Chemrouk, 2007).

O uso da adição de fibras é muito presente na arquitetura vernácula em todo o mundo, tanto de fibras vegetais (talos, folhas, cascas e frutos), como de fibras animais (pelos, crina e lã). Em pesquisas científicas sobre argamassas de terra para a produção de adobe e revestimentos, encontram-se publicações avaliando os efeitos causados pela adição de fibras vegetais como feno, capim de diversas espécies, sisal, cânhamo, palhas de arroz, casca de aveia, bagaço de cana dentre outros (Faria & Lima, 2018; Rao, 2023).

Além das fibras vegetais, também é comum o uso de mucilagens e pectinas como na arquitetura tradicional mexicana. (Guerrero, 2013). De acordo com Ávila & Guerrero (2018), a adição da mucilagem do cacto palma (*Opuntia ficus*) confere melhor trabalhabilidade às argamassas de terra, resulta em composições com organizações cristalinas mais estáveis, atua como agente coesivo e retardador de secagem, além de aumentar a resistência ao contato com água, sem tornar os revestimentos impermeáveis.

De maneira geral, as fibras vegetais são ricas em celulose, hemicelulose, lignina e sílica, componentes responsáveis pela flexibilidade, resistência e contenção da retração nas argamassas. Além disso, a celulose é uma molécula isolante termicamente. As fibras vegetais podem ser utilizadas nas formas *in natura*, fermentadas, tratadas com produtos químicos, trituradas, moídas, ou mesmo depois de transformadas em cinzas. Além disso, devido à redução da retração e da densidade das argamassas e a diminuição da condutibilidade térmica, atualmente também são encontradas publicações sobre o uso da adição de fibras vegetais na produção de concreto e argamassas de cimento (Joshaghani & Moeini, 2018).

Segundo Farinas (2011) e Vanholme *et al.* (2019), a lignina é um biopolímero aromático essencial para as plantas que está presente nas suas paredes celulares e está ligada a celulose e a hemicelulose. Ela está presente em todas as madeiras e confere resistência e rigidez às plantas, permitindo que cresçam e suportem o próprio peso. Além disso, a lignina é bastante resistente a decomposição, podendo demorar de seis a dezoito meses para se decompor na natureza.

A estabilização de argamassas de terra pode ser realizada de três formas, granulométrica (física), mecânica ou química. A cal é uma adição que ocasiona a estabilização química. Já a adição de fibras vegetais provoca uma estabilização física, uma vez que aumenta a contribuição das argamassas para o conforto térmico e acústico, mas que interfere no comportamento mecânico, pois diminui a retração (Röhlen e Ziegert, 2011). Mas além disso, as fibras vegetais também podem ter um efeito químico quando fermentadas junto a argamassa, que não prejudica a higroscopicidade e a reversibilidade-reciclagem da argamassa.

De acordo com Hijioka *et al.* (2015) e Henry & Therrien (2018), na arquitetura vernácula japonesa tradicionalmente as argamassas de terra para revestimento com adição de folhas e palhas são fermentadas por meses e até mesmo por anos a depender da aplicação. Este procedimento é realizado para se obter vantagens proporcionadas pelos processos bioquímicos que ocorrem durante o processo. A partir da decomposição da palha, pela ação dos micro-organismos, a lignina é liberada na mistura e confere impermeabilidade e resistência à ataques microbiológicos, enquanto a celulose, que é uma fibra insolúvel, forma uma armadura no interior da argamassa depois de seca (Henry & Therrien, 2018; Hijioka *et al.* 2015).

Segundo Gomes *et al.* (2018) e Faria & Lima (2018), argamassas com adição de fibras vegetais sem tratamentos podem ser degradadas quando expostas por períodos prolongados a ambientes húmidos e aumentar a suscetibilidade da argamassa à contaminação biológica. No entanto, a fermentação da argamassa com adição das fibras e uma pintura a base de cal na superfície do revestimento pode evitar tais prejuízos.

As investigações publicadas encontradas na literatura, utilizam diferentes métodos de ensaio, espécies e processamentos das fibras, além de usarem diferentes partes das plantas. Dentre as publicações encontradas, de forma geral a adição de fibras reduz

significativamente a condutibilidade térmica à medida que se aumenta a proporção da adição, tornando as argamassas mais isolantes termicamente (Millogo *et al.* 2014; Mansour *et al.* 2016; Ouedraogo *et al.* 2017; Ouedraogo *et al.* 2019; Azzouzi *et al.* 2020; Hamrouni *et al.* 2024).

Além da adição de palha e folhas de pinheiro, Aluma (2023) avaliou e comparou os efeitos causados na condutibilidade térmica de argamassas de terra causados pela adição de lã de ovelha e também observou que as argamassas se tornaram mais isolantes.

Giroundou *et al.* (2019) avaliaram a adição de palha de cevada e de lavanda na proporção em massa de 3% e 6% e todas as adições tornaram a argamassa mais isolante termicamente além de mais resistentes à erosão por gotejamento de água.

Lima & Faria (2016) avaliaram os efeitos causados pela adição de fibras de aveia e de taboa (*typha*) e observaram que a proporção volumétrica de 10% e 20% fibras de aveia reduziram a resistência e aumentaram a aderência. Além disso, as duas proporções também tornaram a argamassa mais isolante termicamente. Já as adições de 20%, 40% e 80% de fibras de taboa (*typha*) aumentaram a resistência mecânica e a aderência, mas deixaram a argamassa menos isolante termicamente. No entanto, todas as adições aumentaram a higroscopicidade em relação a argamassa de referência.

Santos & Faria (2020) avaliaram os efeitos causados em argamassas de terra pela adição de 5% (em volume) de fibras de aveia. Foi observada a redução da retração e da resistência à compressão em relação a argamassa de referência, mas a resistência à flexão não foi alterada.

Savadoغو *et al.* (2024) investigaram os efeitos causados pela adição da casca de arroz, integra e em pó, como bioestabilizante em argamassas de terra, após fermentação por três semanas. Os resultados mostraram aumento das propriedades físicas e mecânicas das argamassas, da resistência à água além de também ter observado a redução da condutibilidade térmica (ou seja, a argamassa ficou mais isolante). Os pesquisadores apontaram a proporção ótima entre 10% e 15% (em volume). A adição em pó apresentou melhor desempenho. Além disso, não foi observada a contaminação biológica, possivelmente devido ao processo e fermentação da argamassa.

Antunes *et al.* (2019) avaliaram a produção de compósitos à base de casca de arroz e terra para produção de um painel pré-moldado de base biológica que pode ser utilizado como isolamento ou revestimento de paredes. O painel apresentou baixa condutibilidade térmica e alta capacidade de adsorver-liberar umidade para o meio, contribuindo assim, de forma passiva, para o conforto acústico e higrotérmico dos ambientes, e para a eficiência energética. No entanto, observou-se ocorrência de contaminação biológica, através do pequeno surgimento de bolor na superfície dos painéis. Possivelmente, o processo de fermentação da mistura antes da aplicação/moldagem, poderia ter evitado tal ocorrência.

Lima *et al.* (2016) evidenciou que as fibras vegetais também contribuem para aumentar a resistência a flexão e o isolamento térmico de argamassas de terra com esta adição. Apesar disso, também observou a redução da resistência a compressão.

Pederganana & Elias-Ozkan (2021) avaliaram 30 argamassas com diferentes adições de areia e fibras vegetais e observaram que, embora a adição volumétrica de 5% fibras aumentasse a resistência mecânica, proporções maiores que 10% reduziram a resistência a compressão e proporções maiores que 20% também reduziram a resistência a flexão.

Dias (2019) avaliou os efeitos na resistência mecânica de adobe com adição em diferentes proporções volumétricas de fibras de bagaço de cana de açúcar (0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%), utilizando-o triturado em pedaços de até 5 cm de comprimento. Todos os adobes apresentaram resistência maior que 2 MPa. No entanto, devido ao grande volume de fibras adicionadas, não foi possível detectar a tensão de ruptura dos adobes pois quanto maior foi a adição do bagaço, maior foi a capacidade do adobe de acomodar as cargas, se deformar, mas não romper. Tal pode ser muito positivo para algumas aplicações.

Portanto, a depender da aplicação, as fibras podem ser um ótimo estabilizante, tais como em argamassas de terra para revestimentos em alto-relevo e esculturas, blocos de terra para vedação, preenchimento do pau a pique e da taipa de mão, e para outras técnicas de vedação sem função estrutural.

2.1.3. Cal áerea hidratada

Na dissertação de mestrado do autor foi apresentada uma revisão bibliográfica bastante completa sobre a cal: suas aplicações, classificações e normatização no Brasil. Por tanto no presente estudo apenas algumas informações mais relevantes serão trazidas para contextualizar sua escolha.

Apesar de ser um aglomerante quimicamente ativo, a cal é uma adição mineral que possui grande compatibilidade química com a argila. Faria (2004) explica que o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) presente na cal hidratada pode realizar ligações por covalência com as hidroxilas (OH) das argilas, promovendo ligações cerâmicas. No entanto, não se encontram referências que o demonstrem em argamassas de terra e cal. Assim, como a terra argilosa retém a água por ligações iônicas, com a presença da cal na argamassa, a argila não tem mais elétrons disponíveis para realizar ligações com a água, logo a água não é mais retida pela massa de barro.

Durante o processo de secagem da argamassa com esta adição, ocorre a carbonatação da cal, onde ela incorpora CO_2 presente no ar e retorna a sua configuração química inicial. Esse processo consolida uma estrutura como uma pedra calcária artificial rígida e porosa que torna a argamassa resistente mecanicamente, resistente a ação da água, e ainda mantém a permeabilidade do revestimento, permitindo que a alvenaria libere e absorva umidade sem deteriorar o reboco (Faria, 2018).

No entanto, desde a mineração e transporte do calcário, passando pela calcinação em fornos com elevada temperatura (900°C), logística e descarte de resíduos, o processo produtivo da cal é bastante poluente (Cunha, 2015). Além disso, as baixas adições de cal podem até aumentar a resistência em relação a ação da água de argamassas produzidas com algumas terras, mas reduz bastante a resistência mecânica das argamassas (Gomes *et al.* 2018; Santos *et al.* 2017; Santos *et al.* 2020), sendo necessário proporções volumétricas maiores que 20% (Faria, 2018) para se obter aumento na resistência mecânica e em relação a água.

Por tanto, se faz importante investigar e encontrar materiais naturais menos nocivos ao meio ambiente que tenham compatibilidade química com os componentes da terra argilosa, e que possam melhorar alguma propriedade desejada nas argamassas de terra para reboco, principalmente a resistência a ação da água.

2.1.4. Adições microbiológicas

Devido os impactos ambientais observados atualmente, tem-se aumentado cada vez mais a necessidade e o interesse por bioprodutos, ou seja, de base natural, com amplas possibilidades de aplicações na construção civil e capazes de contribuir para redução do consumo de aglomerantes e outros aditivos poluentes (Santos *et al.* 2021; Zhang *et al.* 2024). Desde os anos 2000 vem sendo realizadas investigações envolvendo adições microbiológicas para bioestabilização de solos, taludes, base para pavimentação de estradas e também para promover biomineralização em argamassas e outros compósitos (Achal *et al.* 2015; Chang *et al.* 2016; Mujah *et al.* 2016).

Apesar de começar a ter sido usado na engenharia há pouco tempo, a biomineralização é um fenômeno bastante comum entre os seres vivos e está presente no processo de formação de ossos, dentes, corais marinhos, conchas de moluscos e até estalactites e estalagmites em cavernas. A biomineralização é o processo pelo qual cristais minerais são depositados na matriz de organismos vivos, como por exemplo a partir de alterações causadas no meio por ação bacteriana e suas vias metabólicas, dando origem a estruturas de base inorgânica. Mais de cinquenta biominais já foram identificados em diferentes seres vivos, mas a maioria dos organismos que produzem tecidos mineralizados utilizam fosfatos e carbonatos de cálcio e ainda sílica quase amorfa (Bin Mansoor, 2024; Spencer *et al.* 2023; Sigel *et al.* 2004).

2.1.4.1. Precipitação de carbonato de cálcio induzido microbiologicamente

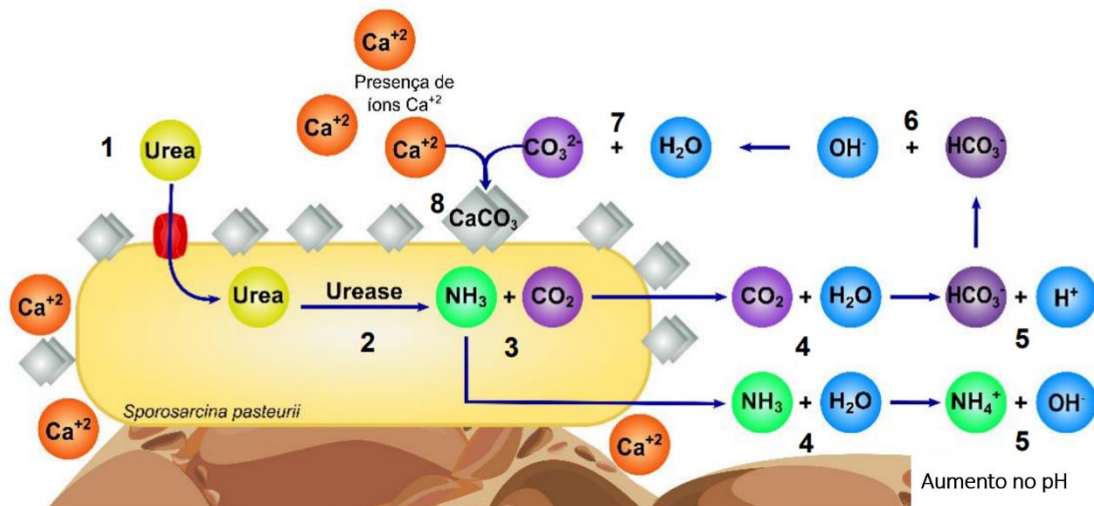
Um dos processos de biomineralização mais comuns é a precipitação de carbonato de cálcio induzida por microrganismos (MICP). A precipitação do carbonato de cálcio ocorre de várias formas na natureza, dentre elas: (i) a precipitação química não biológica formada a partir de soluções saturadas por evaporação, aumento de temperatura e/ou abaixamento de pressão; (ii) a produção de esqueletos internos e externos em organismos eucariotos; (iii) a redução da pressão de dióxido de carbono sob efeito de processos autotróficos para produção de energia de certos organismos como na fotossíntese e metanogênese; (iv) mediação fúngica; e (v) mediação de bactérias heterotróficas, isto é, bactérias que não produzem sua própria energia (Spencer *et al.* 2023; Mujah *et al.* 2016; Castanier, 1999).

Segundo Huynh (2023) vários fatores influenciam a reação de precipitação ocorrida na MICP, incluindo o pH, a temperatura, o tempo de reação, a fonte de nutriente, a concentração de células e o tipo de bactéria. Diversas bactérias não-ureolíticas, cianobactérias, bactérias redutoras de nitrato ou bactérias redutoras de sulfato também tem a capacidade de promoverem MICP (Rao *et al.* 2020; Chuo *et al.* 2020), no entanto, devido a elevada eficiência para deposição de carbonato de cálcio, a maioria das pesquisas sobre MICP utilizam a adição de bactérias ureolíticas (aquelas que decompõe a uréia através da via da urease). Por outro lado, a decomposição da uréia por bactérias ureolíticas gera amônia como subproduto, um material de elevada toxicidade. Por isto, alguns pesquisadores têm optado por experimentar outros tipos de bactérias (e outras estratégias para potencializar os seus efeitos) que não produzem amônia ou que possam ser adicionadas junto as bactérias ureolíticas para consumir a amônia gerada (Rao, 2023).

Segundo Chuo *et al.* (2020) várias espécies do gênero *Sporosarcina pasteurii* e *Bacillus* (bactérias ureolíticas) têm sido estudadas em aplicações de MICP e os produtos de carbonato de cálcio resultantes exibem diferentes morfologias como calcita, aragonita e vaterita, conhecidas por apresentarem alta rigidez e durabilidade em condições adversas.

O processo de MICP ocorre de maneira diferente a depender do tipo de bactéria adicionada ou presente no meio, mas a partir de bactérias ureolíticas este processo ocorre da seguinte maneira. As bactérias ureolíticas produzem enzimas como a urease e a anidrase carbônica, necessárias para converter a ureia (adicionada ou já presente no meio) em amônia e dióxido de carbono. Além de gerar estes dois produtos, as atividades enzimáticas também causam alterações no meio, como elevação do pH no local. Em resposta a essas alterações a superfície das bactérias ureolíticas se torna eletronegativa, atraindo os íons cálcio (adicionados ou já presentes no meio) para sua superfície, que reagem com os íons carbonato (gerados como subproduto) formando núcleos de precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3) (Figuras 2 e 3), o que pode levar ao endurecimento e maior coesão do meio submetido à biocimentação por MICP, ou seja, do solo, da argamassa de terra ou da mistura de agregados com ureia, esporos de bactérias e sais para MICP (Chuo *et al.* 2020).

O mecanismo pelo qual ocorre a conversão da ureia e a precipitação do carbonato de cálcio pela bactéria *Sporosarsina pasteurii* (ureolítica) está representado na Figura 2.



A ureia entra na célula a favor do gradiente de concentração (2); a urease hidrolisa a ureia em (3) amônia (NH_3) e dióxido de carbono (CO_2); (4) a NH_3 , em contato com a água, produz (5) amônio (NH_4^+) e íons hidróxido (OH^-); (5) o CO_2 , em contato com a água, forma íons bicarbonato (HCO_3^-); (6) com a elevação do pH, o equilíbrio da reação é modificado, (7) levando à formação de íons carbonato (CO_3^{2-}); (8) a superfície da célula fica mais eletronegativa, atraindo íons de cálcio (Ca^{+2}) e resultando na precipitação de CaCO_3 .

Figura 2. Reações de precipitação de CaCO_3 realizadas por *Sporosarcina pasteurii*. Fonte: Moreno (2020).

De maneira complementar, a Figura 3 também explica o mecanismo de biomineralização por MICP através da via da urease pela ação da bactéria *Bacillus subtilis* (ureolítica), e ilustra a superfície da bactéria com parede celular carregada negativamente atraindo assim os íons cálcio, o que promove a precipitação do carbonato de cálcio e ocasiona a biomineralização (Huynh *et al.* 2023).

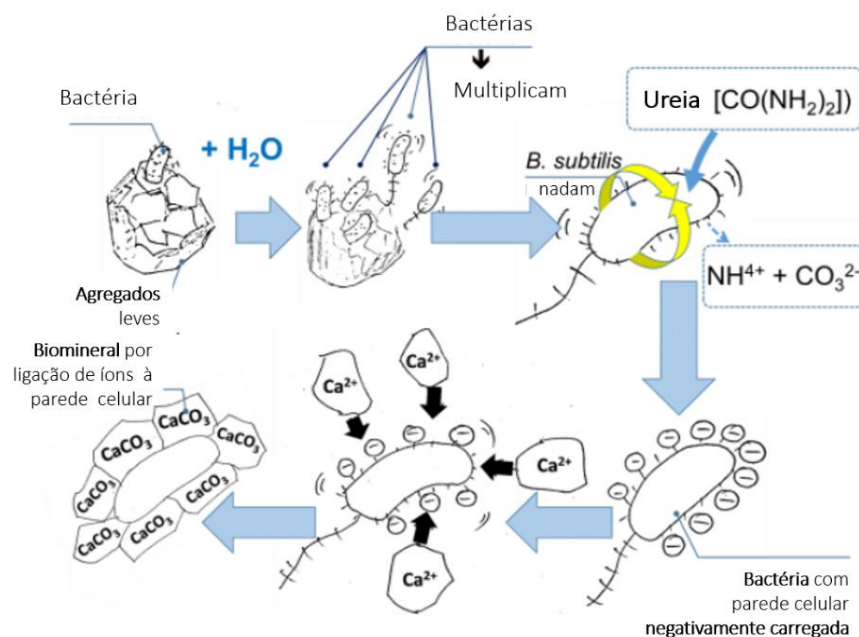


Figura 3. Mecanismo de biomineralização por MICP. Fonte: Huynh *et al.* (2023) traduzido.

Na engenharia, a MICP pode ser utilizada para diversas aplicações. Segundo Kucharski *et al.* (2005) a cimentação microbiana é aplicada para: execução de muros de contenção, barragens e aterros; reforçar ou estabilizar solos para facilitar a estabilidade de túneis ou de construções subterrâneas; reduzir o potencial de liquefação do solo; para tratamento de superfícies no processo de pavimentação; no fortalecimento de barragens de rejeitos para prevenir erosão e falhas em taludes; na construção de barreiras reativas permeáveis em mineração e engenharia ambiental; para aumentar a interação entre partículas soltas em superfícies expostas para evitar perdas por erosão; para aumentar a resistência de poços de petróleo durante a perfuração e extração; para conter avanço da pluma de poluentes; para conter erosão em áreas costeiras e rios; na criação de filtros de água; e para imobilizar bactérias em filtros ativados cimentados. As possibilidades de aplicação da adição microbiológica e biomineralização são inúmeras; no entanto muitas ainda estão na fase de pesquisa.

Na construção civil, tem-se explorado a biomineralização através de principalmente duas formas: a biocimentação e a biodeposição. A biocimentação é realizada através da adição de bactérias na mistura fresca da argamassa, juntamente com fontes de energia para as mesmas e substratos (como cálcio e ureia). Já a biodeposição é realizada através da aplicação superficial de uma solução composta por bactérias, fontes de energia e substratos, como por exemplo, para o tratamento de revestimento danificados.

Um exemplo interessante que vem sendo usado em estruturas de concreto são as argamassas auto-regenerativas (*self-healing mortars*), ou seja, argamassas de auto reparo (Fahimizadeh *et al.* 2020). Neste caso, através da colonização da argamassa, as bactérias e suas vias metabólicas provocam a biomineralização que preenche os poros (*bioclogging*) e fissuras na argamassa. A Figura 4 ilustra como a ação microbiana aliada a fonte de cálcio obtida através da adição de alginato de cálcio, foi capaz de preencher/reparar a fissura provocada intencionalmente no corpo de prova de concreto após 28 dias da aplicação (Fahimizadeh *et al.* 2020).

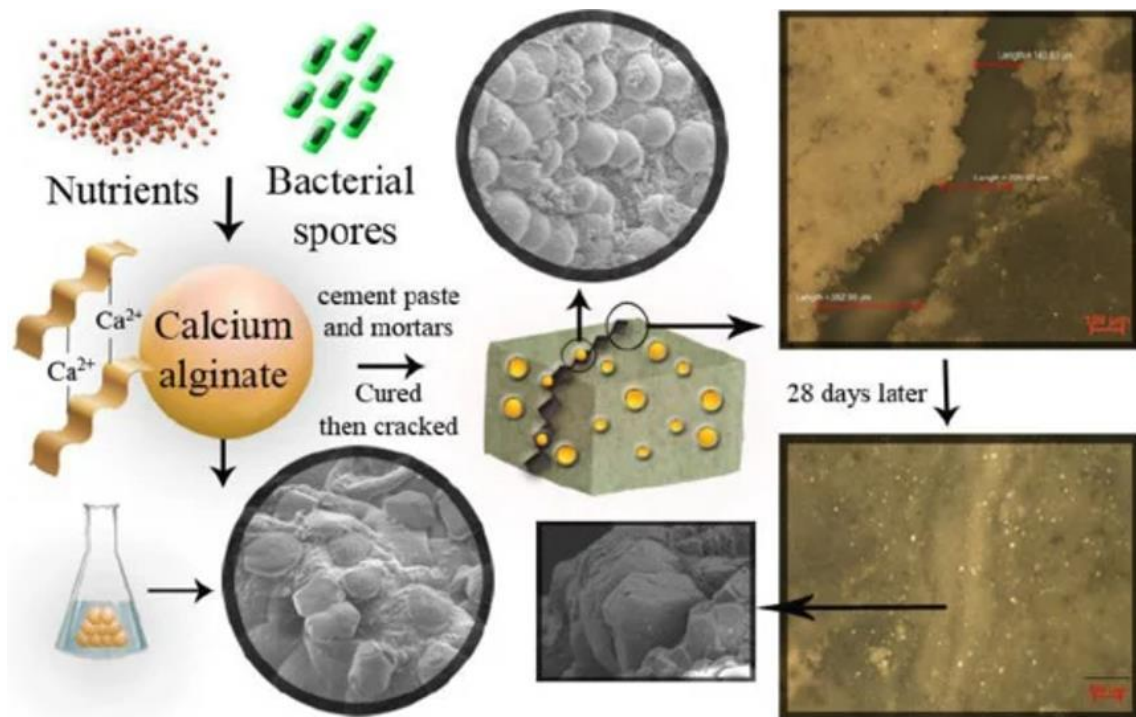


Figura 4. Esquema demonstrativo de argamassas de auto reparo com adição microbiológica. Fonte: Fahimizadeh *et al.* (2020).

Em argamassas de cimento, a biomineralização tem sido usada tanto para reparar construções danificadas como para aumentar a durabilidade das estruturas, inclusive em condições subaquáticas. Entre tantas pesquisas sobre o assunto, Schwantes-Cezario *et al.* (2019) avaliaram os efeitos da adição de esporos de bactérias *Bacillus subtilis* AP91 em argamassas de cimento e areia no traço volumétrico 1:3 (cimento:areia) e registraram redução da porosidade e aumento da resistência mecânica. Os resultados obtidos a partir da análise mecânica mostraram que a precipitação de CaCO_3 proporcionada pela bactéria foi satisfatória, particularmente quando os esporos foram adicionados à água de amassadura, aumentando a resistência à compressão em até 31%.

Além do uso da adição de microrganismos para reforçar estrutura com aglomerantes convencionais como cimento e cal, a parte mais interessante sobre este assunto está na obtenção de argamassas resistentes sem a adição destes aglomerantes. Rong *et al.* (2012) produziram argamassas biocimentadas bastante resistentes a partir de areia natural, solta, sem aglomerantes, utilizando a adição de bactérias que promovem biomineralização através de MICP, tal como apresentado na Figura 5. Para o experimento, foram utilizadas bactérias alcalofílicas, solução substrato e solução de íons cálcio (2 mol/L). Foi utilizado um inóculo de bactérias de 1,7 em densidade óptica

de 600 nm em espectrofotômetro e atividade da enzima urease de 4,4 mol/L por minuto. Como agregado foi utilizado areia quartzosa muito fina (90% dos grãos apresentavam diâmetro inferior à 150 μm e 10% inferior à 300 μm). Nos ensaios de compressão, foram obtidas resistências entre 4,5 MPa e 11,7 MPa. Na argamassa que obteve a maior deposição de carbonato de cálcio (36,3 g de CaCO_3) observou-se uma redução na porosidade do corpo de prova em 55% em relação a amostra de grãos de areia não tratados.

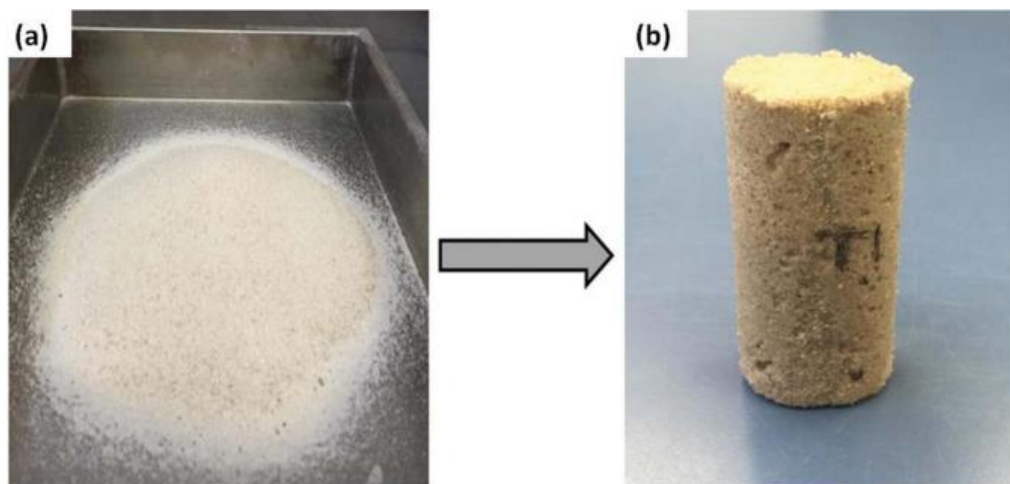


Figura 5. Areia natural (a) e corpo de prova cilíndrico de areia biocimentada. Fonte: Mujah *et al.* (2016).

Um exemplo experimental para ilustrar a diversidade de possibilidades para o uso da atividade microbiana combinada com reaproveitamento de materiais abundantes ou residuais para o desenvolvimento de bioprodutos, é uma argamassa biocimentada produzida a partir da mistura de areia da praia, urina humana e bactérias. O bioproduto desenvolvido utiliza esporos da bactéria *Bacillus pasterurii* e a urina como fonte de uréia, para solidificar a areia em um molde, consolidando uma estrutura bioestabilizada (biocimentada) por MICP. Segundo Trimble (2014), o produto é totalmente biodegradável e apresenta resistência à compressão inferior ao adobe e ao concreto, mas pode ser usado para produção de estruturas simples e utensílios cotidianos como bancos, onde ficam protegidos das intempéries e demandam menos resistência mecânica (Figura 6).



Figura 6. Mobiliário produzido a partir de areia da praia, urina e bactérias. Fonte: Trimble (2014).

Apesar de haverem mais publicações sobre a estabilização de solos através de biomineralização no campo da engenharia geotécnica, em relação a sua aplicação na construção com terra ainda existem muito poucas pesquisas, sendo o presente estudo bastante inovador.

Visando otimizar o desempenho em relação à ação da chuva e à durabilidade de elementos produzidos com argamassas de terra, novos bioprodutos à base de minerais e bactérias têm sido desenvolvidos tanto para biocimentação, ou seja, sendo adicionados na formulação das argamassas, quanto para biodeposição, ou seja, aplicados como tratamento de superfície para os revestimentos.

No estudo realizado por Parracha *et al.* (2021) foi desenvolvido um novo bioproduto contendo extratos celulares da bactéria *Escherichia coli*, cultivada em meio *Lysogenic Broth* (LB) com suplementação de ferro. O suplemento de ferro foi selecionado para estimular a formação de biominerais de óxido de ferro, um mineral considerado menos tóxico e mais durável quando comparado à calcita, que gera a amônia quando formada pela via da urease. A cepa de *E. coli* utilizada neste estudo é considerada segura, e o biomaterial foi desenvolvido e utilizado como componente a ser adicionado para a bioformulação de argamassas de terra.

Já em Parracha *et al.* (2019), o bioproduto ecoeficiente desenvolvido com culturas de *E. coli* suplementadas com ferro foi aplicado em uma superfície de reboco de terra e a eficácia do biotratamento foi avaliada. O objetivo principal desse estudo foi de melhorar a durabilidade da argamassa de reboco quando exposta à água. Como resultado, observou-se que a aplicação do bioproduto aumentou a resistência do reboco à água com uma aplicação de 0,0625 mL/cm² de *E. coli* com Fe²⁺, levando a um aumento significativo no tempo de absorção de água em comparação com rebocos semelhantes, onde a mesma quantidade de água foi aplicada. Além disso, todos os

biotratamentos avaliados geraram um leve efeito de impermeabilização, garantindo a compatibilidade do biomaterial. A perda da eficácia do material com o passar do tempo foi indicada como um fator positivo pois possibilita a reversibilidade da intervenção.

Bernardi *et al.* (2014) desenvolveram blocos de terra bioestabilizados por MICP com a bactéria *Sporosarcina pasteurii* (ATCC 11859). Os blocos foram umedecidos/borrifados com meio de cultura contendo ureia e cálcio, três vezes ao dia, durante 7, 14 e 28 dias de cura. Os blocos foram avaliados com ensaio de resistência à compressão de onda sísmica (onda-p), para verificar a uniformidade da cimentação no bloco, ensaio de compressão não-confinada e quantificação de calcita presente nos blocos bioestabilizados. Os resultados mostraram que os bioblocos obtiveram resistência superior aos blocos não estabilizados, variando entre 1 MPa e 2 MPa.

Dhami e Mukherjee (2015) realizaram ensaios em blocos de terra com adição da bactéria *Bacillus megaterium* cultivada em meio NBU (meio nutriente com ureia e cloreto de cálcio). Os resultados observados por esses pesquisadores mostram redução de 40% na absorção de água e diminuição da retração linear dos blocos biocimentados, resultando em um bloco de terra mais estável.

Em outro estudo, Mukherjee *et al.* (2013) avaliaram a adição da bactéria *Bacillus megaterium*, cultivada em meio NBU e pH 8.0, na formulação de blocos de solo-cimento, com posterior cura e pulverização da superfície com meio NBU por 28 dias, e com período adicional de secagem de 30 dias. Esses pesquisadores observaram uma redução de 33,6% na absorção de água por imersão por 24 h e aumento de 10% na resistência à compressão.

García-González *et al.* (2020) avaliaram a adição de dois agentes ecológicos como biotratamento: *Escherichia coli* enriquecida com ferro e culturas microbianas mistas (MMC) com adição de glicerol usado em blocos de terra (adobe e blocos de terra comprimida). Como resultados esses pesquisadores observaram que os bioprodutos não alteraram a estética das superfícies dos blocos de terra. Além disso, os bioprodutos com *E. coli* e ferro melhoraram a resistência à absorção de água, sendo considerado o tratamento mais eficiente. O tratamento realizado com MMC e glicerol usado também contribuiu para diminuir a absorção da água do bloco de terra.

Ivanov *et al.* (2010;2014) realizaram biotratamentos em solo com a bactéria *Bacillus sp.* VS1 cultivada em meio de cultura com CaCl_2 e ureia para promover MICP, e com

minério de ferro e resíduos orgânicos. Os autores observaram que no bio solo com adição de ferro, a permeabilidade à água foi significativamente reduzida e a mistura apresentou aspecto de gel. No solo estabilizado com cálcio houve maior resistência à compressão e a mistura apresentou aparência cristalina.

Além de promover a bioestabilização de argamassas para produção de componentes (blocos, tijolos, revestimentos) através da biomineralização (induzir a nucleação de minerais, elementos inorgânicos) como a MICP, a atividade microbiana também pode ser usada para promover a bioestabilização a partir da produção de elementos orgânicos como os exopolissacarídeos (EPS) (Dorfan *et al.* 2023; Rao *et al.* 2021; Costa *et al.* 2018).

2.1.4.2. Bioestabilização por exopolissacarídeos

A bioestabilização por exopolissacarídeos (EPS) ocorre de maneira diferente da MICP, e é promovida a partir da aglomeração das partículas disponíveis no meio (como, fibras vegetais, agregados, argila e areia), pela secreção EPS, que camada sobre camada, consolida biofilmes compostos por estas partículas embebidas em EPS.

Os EPS são substâncias poliméricas extracelulares secretadas/produzidas por vários microrganismos, inclusive por bactérias, para formar biofilmes. Os biofilmes, por sua vez, são a forma com que comunidades microbianas aderidas a superfícies assumem para se protegerem de estresses ambientais (Sutherland, 2001; Vu *et al.* 2009). Na natureza, este também é um fenômeno muito comum, e pode ser observado inclusive em encanamentos, banheiras de banho, pia de cozinha, ou seja, qualquer local em que haja disponibilidade de “alimento” para bactérias. A cárie dental, por exemplo, é resultante da formação de biofilmes bacterianos na superfície dos dentes (Leite *et al.* 2006). Além disso a formação de biofilmes também ocorre em cateteres, e é um problema comumente encontrado no meio clínico (Storti, *et al.* 2007).

Os EPS excretados pelas bactérias são responsáveis pela coesão dos microrganismos envolvidos por ele, pela adesão dos biofilmes às superfícies e preenchimento de vazios, além de contribuírem para manter a estrutura e a forma física do biofilme estável (Chenu, 1995; Costa *et al.* 2018). Os EPS aderem-se às superfícies através de atração por *van der Waals* e ligações iônicas e de hidrogênio (Costa *et al.* 2018; Martin, 1971; Mitchell & Santamarina, 2005).

A Figura 7 ilustra o processo de formação de biofilme por ação de bactérias em uma superfície.

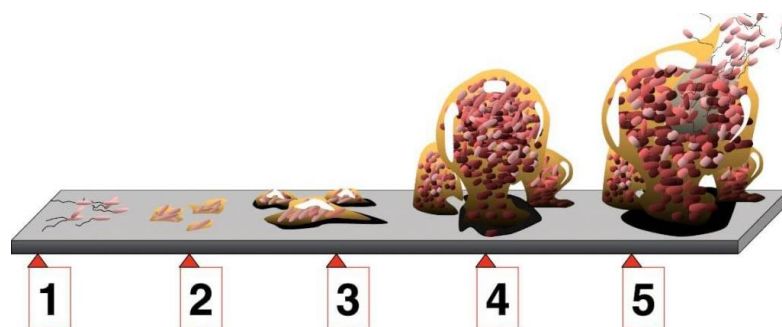


Figura 7. Cinco estágios do desenvolvimento de biofilmes. Fonte: Monroe (2007).

O interesse nas aplicações biotecnológicas dos EPS bacterianos tem aumentado significativamente nas duas últimas décadas em diversos campos como na engenharia geotécnica, biomateriais, indústria farmacêutica e agricultura sustentável (Sutherland, 1990; Lai & Tabacchioni, 2009; Berwanger, 2005).

Por serem produtos biológicos, os EPS bacterianos vêm sendo extensivamente utilizados também como substituto de polímeros sintéticos em aplicações de alto valor comercial, tais como nas indústrias de alimento, farmacêutica, médica e cosmética, onde são utilizados, principalmente, como agentes espessantes, estabilizantes e encapsulantes (Freitas *et al.* 2011). São exemplos destas aplicações: a integração de implantes, o processamento de alimentos (como por exemplo as gomas xantana e gelana) e de medicamentos (capsulas gelatinosas comestíveis) (Mukherjee *et al.* 2017; More *et al.* 2014; Li & Yu, 2014; Lin *et al.* 2014; Flemming & Wingernder, 2010; Perry *et al.* 2009).

A espécie bacteriana *Paenibacillus* se destaca por produzir EPS com aplicações em diversos campos, como na biorremediação para conter avanço de plumas de contaminação, na remoção e degradação de poluentes ambientais e no tratamento de efluentes, por promover biofloculação (Dias, 2019). Além disso, esta espécie de bactéria apresenta potencial econômico pela alta produtividade e por ser aplicada ambientalmente sem causar danos colaterais indesejados ou subprodutos tóxicos (Daud *et al.* 2019; Liang & Wang, 2015).

A aplicação do EPS na engenharia é mais difundida no campo da geotecnia para modificar propriedades de solos, sendo utilizado na estabilização em bases para pavimentação, para evitar processos de erosão, e também no preenchimento de poros

(*bioclogging*) para reduzir a condutividade hidráulica (Sutherland, 1990). Chenu (1995) e Costa *et al.* (2018) explicam que o solo é composto por agregados maiores, que são compostos por subunidades menores, formadas por agregados ainda menores. Como o EPS tem uma textura viscosa e cargas iônicas, age como uma cola que se adere aos agregados da terra (argila, minerais e areia) e aos íons, mantendo as partículas sólidas unidas e evitando erosão e lixiviação de minerais e nutrientes (Figura 8). Por isto, as propriedades do EPS são tão importantes para aplicação na estabilização de solos, e podem ser bastante úteis para produção de argamassas resistentes à água, especialmente para a construção com terra.

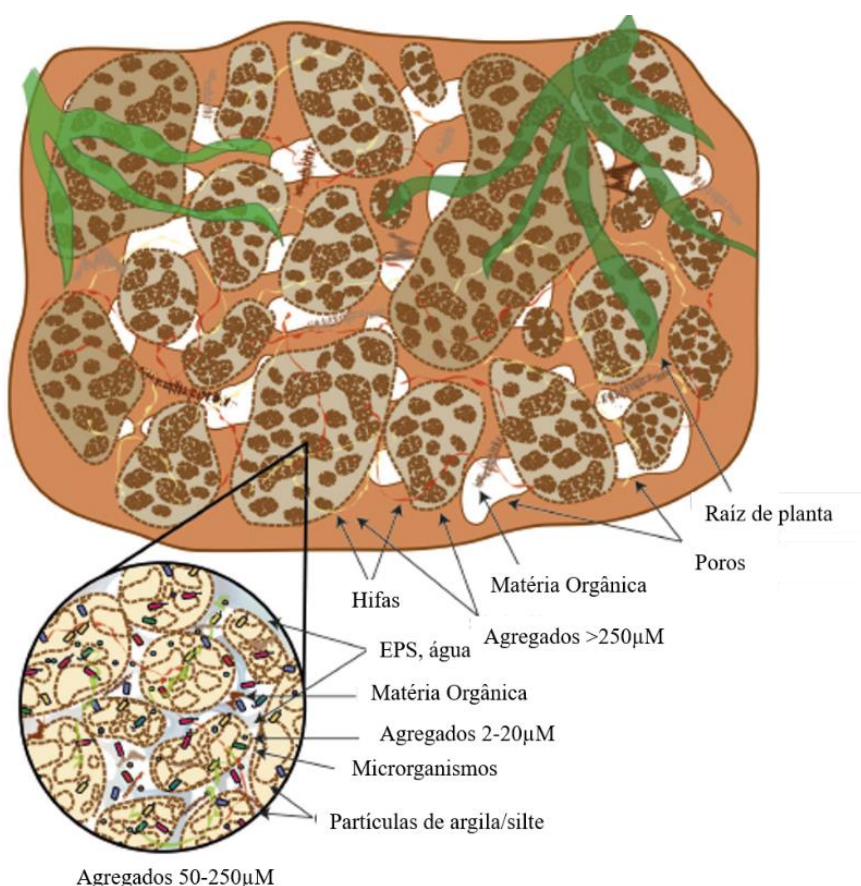


Figura 8. Agregados no solo envolvidos por EPS: os maiores são compostos por unidades menores, que são formadas por agregados ainda menores. Fonte: Costa *et al.* (2018), traduzido.

Chang & Cho (2012) avaliaram a capacidade de estabilização de uma amostra de solo coreano pela adição um polímero comercial produzido pelo fungo *Aureobasidium pullulans* e foi observado aumento na resistência à compressão em mais de 200%. Este EPS foi considerado pelos pesquisadores como uma adição estabilizante economicamente competitiva e ambientalmente segura.

Em outro estudo, Chang *et al.* (2015) avaliaram uma pequena adição (em massa) de 1 a 1,5% de outro EPS microbiano, a goma xantana, em amostras de solo e observaram um aumento significativo na resistência à compressão, maior do que a causada pela adição de 10% cimento na mesma amostra. Foi observado também que a biocimentação com a goma xantana é mais eficiente em solos com mais partículas finas e que a resistência da estrutura aumenta por meio de ligações de hidrogênio. Os pesquisadores destacaram a vantagem da biocimentação pela adição destes biopolímeros não comprometerem a “despreocupação” com o descarte final das argamassas de terra, sendo também biodegradáveis.

Brzyski (2024) também avaliaram os efeitos causados pela adição de outro EPS, a goma arábica, nas proporções (em massa) de 1%, 2% e 3%, em uma amostra de solo com o objetivo de produzir argamassas de terra para revestimento. Em relação à argamassa de referência, as argamassas com goma arábica apresentaram aumento na resistência ao contato com água proporcionalmente ao aumento da adição, além de aumento significativo na resistência à flexão (em 82 a 150%) e à compressão (em 84 a 170%). A adição deste biopolímero também reduziu a porosidade da argamassa em 10 a 12% e o tamanho médio dos poros em 12 a 18%. Devido aos efeitos causados, os pesquisadores indicaram a adição de goma arábica para produção de argamassas de terra bioestabilizadas tanto para produzir e assentar adobe quando para produzir rebocos aplicáveis em paredes internas e externas.

Por ainda não haver uma cadeia produtiva consolidada de bioprodutos para a construção civil e geotecnia, o uso de adições microbiológicas capazes de produzir EPS para produção de argamassas em larga escala, ainda é muito oneroso (Ivanov & Chu, 2008). Por isto, buscar também outras fontes de EPS em materiais residuais, é uma opção muito interessante de pesquisa.

A partir da busca por adições microbiológicas eficientes e valorizar os materiais naturais tradicionais da arquitetura vernácula indiana, o professor Sudhakar Rao, da Universidade de Bangalore, na Índia, vem desenvolvendo investigações muito interessantes, das quais muitas estão reunidas em Rao (2023). Uma das adições investigadas é o excremento bovino, e os resultados encontrados são bastante esclarecedores e evidenciam o potencial que este material e suas inúmeras aplicações tem para oferecer a construção civil, para a estabilização de solos e para a construção com terra.

Através da caracterização de argamassas de terra estabilizadas com adição de excremento bovino, Rao *et al.* (2020) identificaram que no excremento existem bactérias que secretam EPS (promovendo bioestabilização) e que apresentam alta taxa de compatibilidade e colonização na matriz de solo/terra. Nas duas imagens geradas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) mostradas na Figura 9, é possível visualizar a matriz estrutural formada por bactérias e aglomerados de terra embebidos em EPS, na amostra de argamassa estabilizada com adição de excremento bovino (Rao *et al.* 2020).

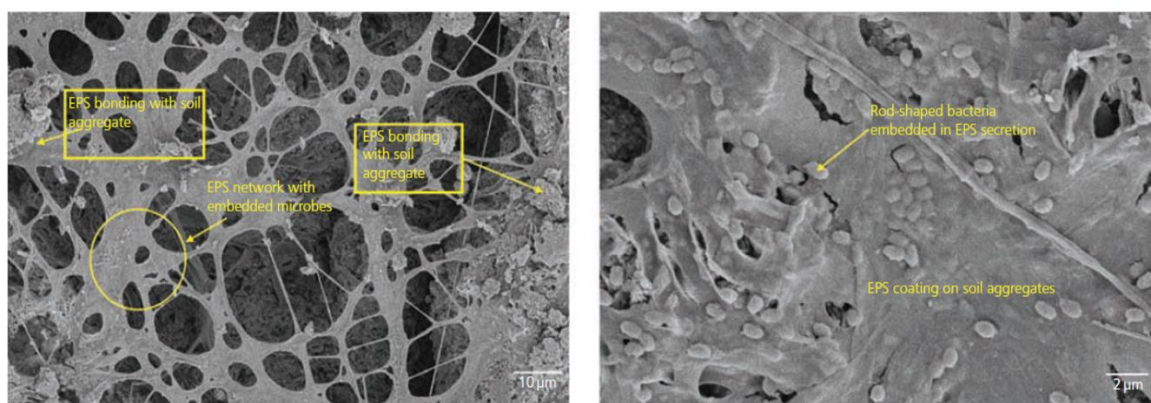


Figura 9. MEV após 28 dias de estabilização em anaerobiose dos corpos de prova mostrando a matriz estrutural formada por bactérias e aglomerados de terra embebidos por EPS. (a) menor aproximação; (b) maior aproximação. Fonte: Rao *et al.* (2020).

Os efeitos bioestabilizantes causados pela adição de excremento bovino levaram a investigação mais aprofundada dos mecanismos de interação entre os componentes do excremento e da terra para: explicar os efeitos causados e descobrir se há, no excremento, bactérias capazes de promover biomineralização. Para tal, Rao *et al.* (2020) utilizaram uma mistura de argila caulinita pura com areia quartzosa na proporção de 1:1 (em massa) para produzir três tipos de amostras: (i) argamassa não estabilizada, (ii) argamassa estabilizada com 10% (em massa) de excremento bovino (seco e em pó); (iii) argamassa estabilizada com 10% do excremento (seco e em pó) com adição de sais de nitrato de cálcio e óxido de magnésio. A argamassa com adição de excremento e com sais para promover MICP apresentou um aumento de 28 a 37% em relação a argamassa com a adição de apenas excremento. Além disso, a análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da argamassa estabilizada com excremento, aos 28 dias, revelou que, além de biofilmes aglomerados por EPS, também ocorreu a precipitação de carbonato de cálcio (calcita) (Figura 10).

A partir desses resultados, além de bactérias produtoras de EPS, Rao *et al.* (2020) evidenciaram que no excremento bovino também estão presentes bactérias (ao menos não-ureolíticas, pois não foi adicionado ureia para não gerar amônia) que promovem MICP.

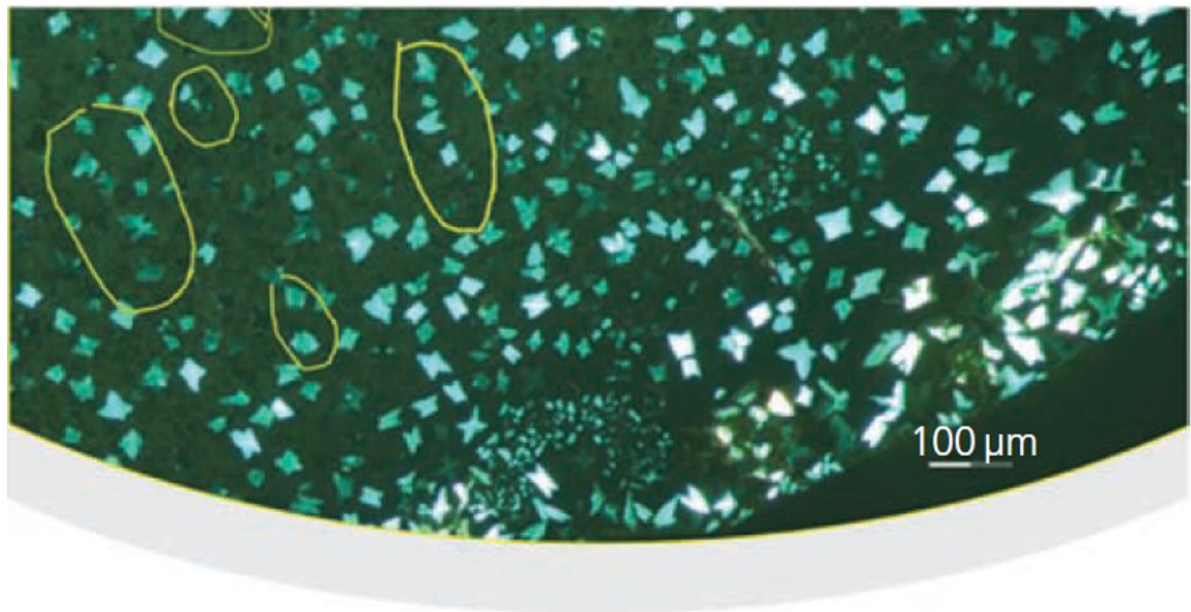


Figura 10. Microscopia ótica por MEV de amostra de solo com adição de excremento e sais para promover MICP, mostrando que ocorreu deposição de carbonato de cálcio (na cor branca) em contato com agregados (caulinita e areia). Fonte: Rao *et al.* (2020).

Portanto, o excremento bovino é um material natural completo com grande potencial e aplicações na construção com terra, pois possui bactérias capazes de promover biocimentação orgânica (por EPS) e inorgânica (por MICP), além de possuir os substratos e fontes de energia necessárias para o desenvolvimento e ação das bactérias presentes (fontes de nutrientes) além das fibras vegetais, que servem, tanto como fonte de carbono como reforço (armadura interna) para a matriz estrutural da argamassa.

2.2. Excremento bovino

2.2.1. Os bovinos e os humanos

Estima-se que a humanidade tenha começado a praticar a domesticação e criação de gado, para consumo da carne e do leite, na Idade da Pedra Polida (Período Neolítico) há cerca de 10 mil anos atrás, o que antecede até mesmo a agricultura (Ngowi, 1997). De acordo com Hiendleder *et al.* (2008) evidências arqueológicas indicam que as raças de bovinos que foram domesticadas na Eurásia e são criadas atualmente, são provenientes de distintos grupos ancestrais de Auroque (*Bos primigenius primigenius*) (Figura 11). Estas raças contemporâneas podem ser separadas em dois grandes grupos: as que possuem giba/cupim e barbela abundante, denominados Zebuínos ou Zebu (*Bos taurus indicus*); e as que não possuem, denominadas bovino Europeu ou Taurino (*Bos taurus taurus*).



Bos primigenius primigenius ou Auroque



Yak



Bos gaurus ou Gaur



Bos frontalis ou Gayal



Bali, forma domesticada do Banteng, *Bos javanicus*



Bos sauveli ou Kouprey

Figura 11. Espécies de bovinos selvagens mais próximos geneticamente do seu ancestral comum, Auroque (*Bos primigenius primigenius*). Fonte: Jorge *et al.* (2013).

Por ser a maneira mais fácil e econômica, o cruzamento entre animais de raças diferentes é a forma mais utilizada para melhoramento genético em bovinos, reunindo em um mesmo animal, características desejáveis de duas ou mais raças envolvidas em cada cruzamento (Miranda & Freitas, 2009).

No Brasil, cerca de 70% de toda a produção de leite provém de vacas mestiças Holandês-Zebu. Na pecuária leiteira, considera-se bovino mestiço aqueles animais derivados do cruzamento de uma raça pura de origem europeia e que seja especializada na produção de leite (Holandês, Jersey, Suíça-Parda), com uma raça pura de origem indiana, uma das várias que formam o grupo Zebu (Gir Leiteiro, Guzará, Sindi e Indubrasil). A raça Holandês predomina nos cruzamentos, sendo o mais comum o cruzamento de Holandês com o Gir Leiteiro, mais conhecido como “Girolando” (Figura 12). Há também o “Guzolando”, resultado do cruzamento de Holandês com Guzará, e já há alguns produtores fazendo o “Nerolando”, que é o cruzamento do Holandês com o Nelore (Jorge *et al.* 2006).



Figura 12. Principais raças de vacas leiteiras criadas no Brasil. Fonte: Jorge (2006).

No entanto, o cruzamento entre vacas de origem indiana e vacas europeias, faz com que as vacas híbridas/mestiças resultantes produzam leite do tipo A1, que contém um constituinte danoso para a saúde, chamado b-casomorfina-7 (BCM-7), obtido da vaca *Bos taurus* (Raja *et al.* 2021).

De acordo com Woodford (2009), Sokolov *et al.* (2005) e De Noni & Cattaneo (2010), o BCM-7 pode promover vários efeitos adversos no corpo e aumenta o risco de doenças crônicas. Em pacientes com síndrome do intestino permeável, o BCM-7 acessa a corrente sanguínea e, devido à ligação do BCM-7 com receptores opióides e à inibição da ligação e função normais das endorfinas, estas ficam impedidas de

desempenhar sua função, o que causa danos ao sistema imunológico. Em lactentes, isto pode causar diabetes tipo 1 e autismo, e em adultos isto pode levar à esquizofrenia e aterosclerose. O consumo de leite A1 também está associado às causas da asma, doenças cardíacas e reações alérgicas. Por outro lado, o leite obtido de raças de vacas indianas puras, é do tipo de leite A2, com inúmeros benefícios para a saúde humana e várias atividades medicinais (Raja *et al.* 2021).

A pecuária teve início no território brasileiro na primeira metade do século XVI, com os primeiros engenhos de açúcar. Hoje, o país é um dos maiores criadores de bovinos do mundo. No entanto, a monocultura de bovino para consumo humano de carne é uma atividade comercial que causa enormes impactos ambientais negativos no Brasil. Historicamente, para a monocultura de bovinos de corte no Brasil em regime de pastagem, primeiramente a floresta nativa é desmatada, as madeiras são vendidas de forma ilegal, a área é queimada e gramíneas são plantadas para pastagem. Após alguns anos esse solo fica exaurido, desgastado, pisoteado, pobre nutricionalmente e então é usado para produção de madeira através da monocultura de eucalipto. Neste processo, o destino final é a desertificação de várias áreas que até 30 anos antes eram ricas e férteis (Barona *et al.* 2010; Ometto *et al.* 2011; França *et al.* 2021; Ferreira, 2021; Fearnside, 2022).

Já os animais que são criados em confinamento, são alimentados com ração e silagem. No entanto, além do sofrimento causado no animal encarcerado, a monocultura de bovinos em confinamento também promove desmatamento ilegal, muitas vezes envolvendo conflitos com comunidades tradicionais e camponesas (Brito, 2013; Souza & Chaveiro, 2019), para implantação de enormes monoculturas de soja e milho usados para produção da ração que alimenta esses animais (França *et al.* 2021).

Segundo dados do governo brasileiro (IBGE, 2022), em 2022 o Brasil tinha 203 milhões de habitantes humanos e em torno de 235 milhões de bovinos (além de 1,6 bilhões de frangos e galinhas) para consumo próprio e exportação. Desta população bovina, em torno de 20 milhões de animais são para produção de leite enquanto os outros 215 milhões são para corte e reprodução.

Em média, cada bovino produz diariamente de 10 a 40 kg de fezes. Todo esse resíduo agroindustrial apresenta elevado potencial de poluição de águas subterrâneas (lençol

freático) e de rios devido o descarte inapropriado e ilegal, como denunciado nos relatórios da *Food and Agriculture Organization* (FAO, 2006). Outros resíduos orgânicos da indústria alimentar gerados em grande quantidade, também apresentam esse problema: se descartados de maneira inapropriada e ilegal em rios ou no solo, podem causar mau cheiro, contaminação, além de atrair vetores e transmissores de doenças. Mas se passados por processo de compostagem ou outros beneficiamentos, podem se tornar bioprodutos com diversas aplicações úteis para a humanidade.

De maneira geral o consumo de carne em grandes quantidades diárias e em larga escala por humanos é insustentável ambientalmente, mas em comparação com a carne de galináceos, porcos e caprinos, a produção extensiva de carne bovina é a mais prejudicial ao meio ambiente. Embora estes impactos sejam amenizados em pequenas criações para subsistência e comércio local em comunidades tradicionais.

O livro “*Sob a Pata do Boi – Como a Amazônia vira pasto*” (2021) reúne argumentos, estudos e evidências que a Amazônia está entre os biomas mais impactados pela criação extensiva de gado. No entanto, desde 2022 tem-se observado uma redução do desmatamento na Amazônia, e um aumento da ocupação pecuarista no Cerrado. Segundo França *et al.* (2021) e Ferreira (2021), em 1985 as áreas de pastagem na chamada Amazônia legal representavam 12% do território, e em 2018, a ocupação desta atividade aumentou para 29%, com um aumento contínuo na taxa de produção de bovinos para corte de 184% no mesmo período.

A Floresta Amazônica desempenha funções essenciais a nível mundial na fixação de carbono atmosférico, na manutenção da biodiversidade de espécies e em dinâmicas complexas de chuvas que impactam diretamente no clima e na manutenção de corpos hídricos. Portanto sua supressão para criação de pastagens gera impactos imensos de difícil recuperação (Ometto, 2011).

Quanto maior o consumo de carne no Brasil e no mundo, mais áreas para pastagem, ou para produção de grãos e cereais para produção de ração e alimentação em confinamento, precisam ser abertas, e mais áreas de florestas, fontes produtoras de oxigênio, precisarão serem desmatadas. Se a humanidade não despertar para este entendimento, os maus hábitos de alimentação humana podem levar a precarização das condições ambientais que possibilitam sua existência, e ocasionalmente podem levar a sua própria extinção.

2.2.2. *Panchgavya: um precioso presente para a humanidade*

Apesar dos impactos ambientais avassaladores causados pelo monocultivo de bovinos para consumo e exportação de carne no Brasil, há regiões e povos, como os praticantes do Hinduísmo, onde culturalmente os bovinos são considerados seres sagrados e por isto são muito respeitados. Sua carne não é consumida, mas os produtos derivados do leite são bastante apreciados.

A Índia é um território que possui diversas tradições baseadas nos conhecimentos ancestrais, e apesar de diferenças específicas relacionadas a zebuínos e bufalinos, de maneira geral os praticantes da religião Hindu consideram os bovinos, em especial as vacas, como seres sagrados devido a sua natureza nutritiva como uma mãe, referindo-se a elas como "*Gaumata*" (mãe vaca, divindade vaca) ou "*kamadhenu*" (que cumpre os desejos solicitados). Os derivados e excrementos de bovinos, são considerados "tesouros" que são chamados *Panchgavya*. Cada produto possui diferentes componentes e aplicações, desde a saúde humana e a agricultura além de outros propósitos. São eles: leite de vaca, coalhada, *ghee* (extraído da manteiga), urina e fezes (Figura 13). O termo *Panchgavya* foi derivado de duas palavras, "*Panch*" que significa cinco e "*gavya*", que significa obtido da vaca. Os *Panchgavya* e seus benefícios foram profundamente apresentados em um estudo muito interessante intitulado *Panchgavya: a precious gift to humankind*, de Bajaj *et al.* (2022), do qual foram extraídas algumas importantes informações a respeito de cada um desses produtos.

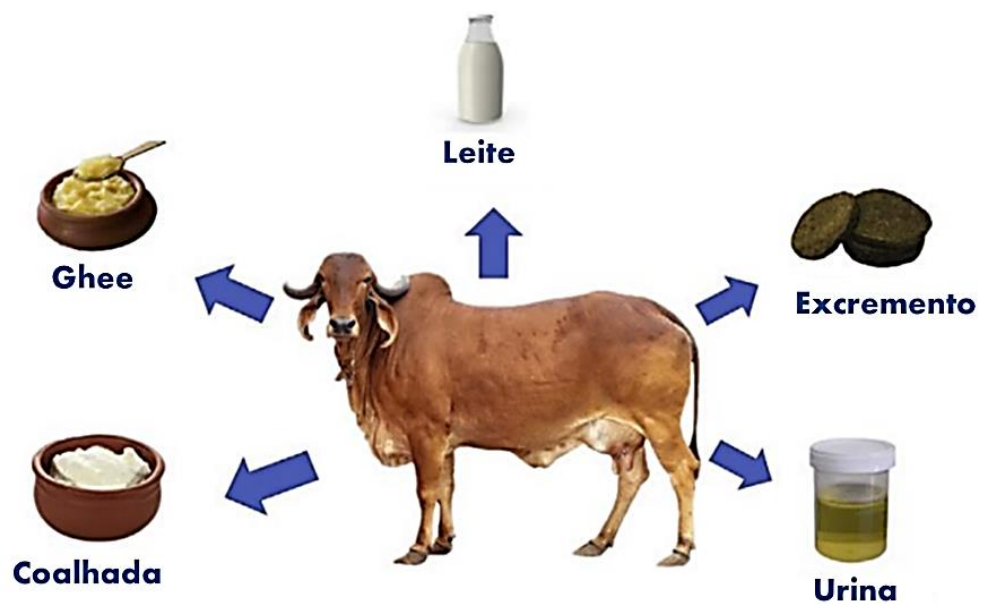


Figura 13. Componentes do Pachgavya. Fonte: Bajaj *et al.* (2022), traduzido.

No Ayurveda, o sistema de medicina indiano tradicional e milenar, cada um dos “gavya” exerce um impacto medicinal diferente contra várias doenças. A terapia ou tratamento *Panchgavya*, em inglês é chamado de “*Cowpathy*” (terapia da vaca), semelhante a outras linhas como alopatria, homeopatia e naturopatia (Raja *et al.* 2021; Bajaj *et al.* 2022).

A terapia *Panchgavya* é recomendada para uma variedade de doenças, como asma, gripe, alergias, doenças cardiovasculares, distúrbios renais, artrite reumatoide, leucoderma (manchas brancas na pele), cicatrização de feridas, leucorreia, hepatite, distúrbios alimentares e do trato gastrointestinal, obesidade, tuberculose, úlcera, intoxicação química além de outras infecções bacterianas, fúngicas e virais. A terapia também demonstrou eficiência no tratamento de patologias graves como câncer, AIDS e diabetes (Dhama *et al.* 2005; Schnürer & Magnusson, 2005; Chauhan, 2004)

Além de aplicações no campo da saúde, *Panchgavya* também oferecem benefícios aplicados na agricultura orgânica como um potente fertilizante orgânico. Sua aplicação descarta o uso de fertilizantes sintéticos prejudiciais, pesticidas, inseticidas e antibióticos. Além disso, aumenta a fertilidade do solo, aumenta a quantidade e a eficiência das minhocas e promove a saúde das plantações. Ademais, os excrementos bovinos também são amplamente utilizados como biomassa para gerar energia por produção de biogás (Dhama *et al.* 2005; Tharmaraj *et al.* 2011; Pathak e Ram, 2013) contribuindo para a autonomia energética de comunidades rurais na Índia, além de para outras novas aplicações biotecnológicas que serão apresentadas mais adiante.

A literatura tradicional indiana cita vários efeitos medicinais de *Panchgavya*; no entanto, a evidência científica que apoia a literatura e crenças tradicionais antigas é muito pequena. Por isto, foi criado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia do Governo da Índia um programa nacional chamado “Validação Científica e Pesquisa sobre *Panchgavya*” (SVAROP) para promover investigações científicas com o objetivo de evidenciar cientificamente as propriedades e aplicações dos produtos *Panchgavya*. O programa inclui estudos sobre a atividade, eficácia, perfil de segurança, toxicidade e aceitabilidade deste e de outros produtos obtidos dos bovinos, e em especial das vacas (Bajaj *et al.* 2022).

2.2.3. O processo de digestão nos bovinos

Os bovinos são animais ruminantes cujo trato gastrointestinal passou por modificações ao longo do processo evolutivo, principalmente devido a dieta com alto teor de fibras. De forma geral, o aparelho digestivo tem como principal função realizar a digestão e absorção dos alimentos e excretar os produtos que não são aproveitados pelo organismo (Wlodarski *et al.* 2017).

O trato gastrointestinal dos bovinos é formado pela boca, faringe, esôfago, estômago dividido em quatro compartimentos (rúmen, retículo, omaso e abomaso), intestino delgado (duodeno, jejuno e íleo), intestino grosso (ceco, colón e reto) e ânus, além das glândulas anexas (salivares, pâncreas e fígado). Os ruminantes possuem a capacidade de aproveitarem, de forma eficiente, carboidratos fibrosos como fonte de energia e compostos nitrogenados não proteicos como fonte de proteína (Valadares Filho & Pina, 2006). A capacidade de aproveitar esses nutrientes se deve ao fato de o estômago dos ruminantes ser dividido em quatro compartimentos e da relação simbiótica que foi desenvolvida com microrganismos fermentadores de fibra: fungos, protozoários e bactérias (Wlodarski *et al.* 2017).

Outra adaptação evolutiva dos ruminantes está na saliva, na qual o pH é alcalino e não há a enzima α -amilase, presente na saliva dos não ruminantes para digestão do amido. O pH alcalino tem ação tamponante, auxiliando na manutenção das condições ideais de pH no ambiente ruminal, além de atuar no ciclo da ureia, a qual faz parte do processo de reciclagem de nitrogênio (Wlodarski *et al.* 2017).

O consumo de alimento volumoso (capim) assegura que o pH do rúmen permaneça dentro da faixa considerada ideal (5,5 a 6,8) para o estabelecimento dos microrganismos no rúmen (Oliveira *et al.* 2007). A fermentação realizada por estes microrganismos produz nutrientes como proteínas, ácidos graxos de cadeia curta (AGCC) e vitaminas do complexo B (Van Soest, 1994). Entre os AGCC, o butirato é o que mais exerce influência no desenvolvimento das papilas ruminais, seguido pelo propionato e acetato (Oliveira *et al.* 2007). As papilas ruminais possuem a função de aumentarem a superfície de contato da mucosa ruminal, para absorverem os produtos da fermentação, tendo sua formação afetada pela qualidade das fibras ingeridas. A ingestão de alimento fibroso com fibra de baixa qualidade, leva a formação de papilas ruminais anormais, reduzindo a absorção de nutrientes no rúmen (Cunningham, 1992).

2.2.4. Estabelecimento dos microrganismos no rúmen e a influência da dieta na composição do excremento bovino

O rúmen é considerado um ecossistema único e diverso, repleto de microrganismos, os quais estão distribuídos entre a fase sólida e a fase líquida do conteúdo ruminal (Figura 14). Estes microrganismos são peças fundamentais no processo de degradação de fibras porque disponibilizam os produtos do processo fermentativo e nutrientes para serem utilizados no metabolismo do animal ruminante. Esta interação simbiótica entre microrganismos ruminais e os animais ruminantes explica o motivo de os bovinos serem animais de grande porte que ingerem alimentos com baixo teor energético, como capim, gramíneas e forragens.

As bactérias constituem de 60% a 90% da biomassa microbiana com cerca de 200 espécies distintas (Kozloski, 2011; Wlodarski *et al.* 2017), com maior abundância de bacilos e cocos. Poucos fungos e leveduras também estão presentes. Estes microrganismos interagem e se regulam através de relações como predação, competição, antibiose e mutualismo (Arcuri *et al.* 2006).

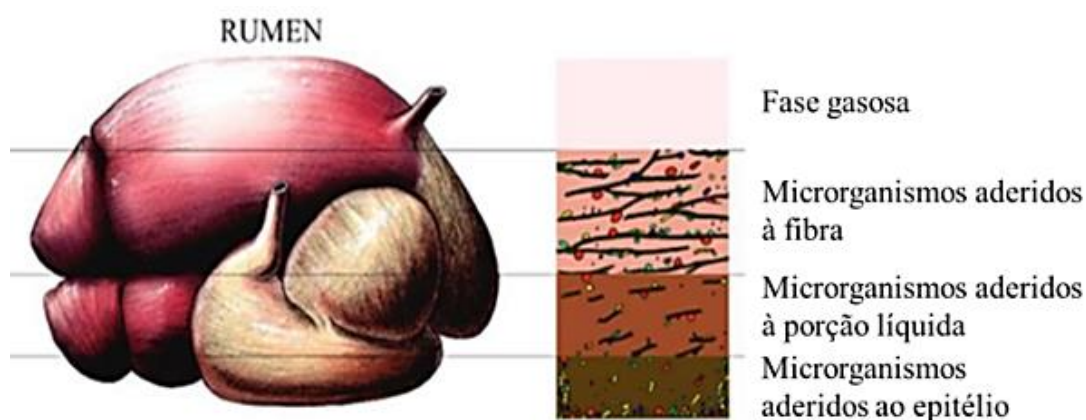


Figura 14. Nichos ocupados pelos microrganismos presentes no rúmen. Fonte: Romagnoli *et al.* (2017) adaptado por Oliveira (2019).

A microbiota ruminal pode ser alterada devido a uma série de fatores, como a lactação, a dieta, a idade e a saúde do animal. Em bovinos saudáveis, a dieta é a principal responsável pela composição da população microbiana ruminal (Welkie *et al.* 2010).

Em um estudo sobre a composição de bactérias no excremento bovino, Zhang *et al.* (2021) comparou a influência da dieta na composição da microbiota, em diversidade e abundância de microrganismos, presente no excremento de bovinos alimentados em sistema de pastagem e de bovinos em confinamento alimentados com ração a

base de grãos e cereais. Segundo estes pesquisadores, os bovinos que são alimentados no pasto ingerem um alimento com alto teor de fibras e vitaminas, mas com baixo valor energético, enquanto que os bovinos que são mantidas em confinamento alimentados com ração, ingerem uma dieta rica em grãos que são mais fáceis de digerir e possuem alto valor energético. As conclusões do estudo mostraram que a dieta dos bovinos causa diferenças tanto na estrutura como na abundância e na atividade da microbiota. Além disso, de acordo com Van Soest (1994), mesmo em bovinos alimentados no pasto, alguns fatores alteram a microbiota ruminal em virtude da gramínea utilizada.

As taxas de produção dos ácidos graxos de cadeia curta (AGCC) variam com o tempo após a ingestão e com o tipo de alimento. Quando o alimento é a base de ração (concentrado), a curva é mais aguda e o pico de produção ocorre em torno de duas a três horas após a ingestão. De outro modo, quando a dieta é composta por pasto e forragens (volumoso), a curva de produção é menos aguda e o pico ocorre em torno de quatro a cinco horas após a ingestão (Figura 15).

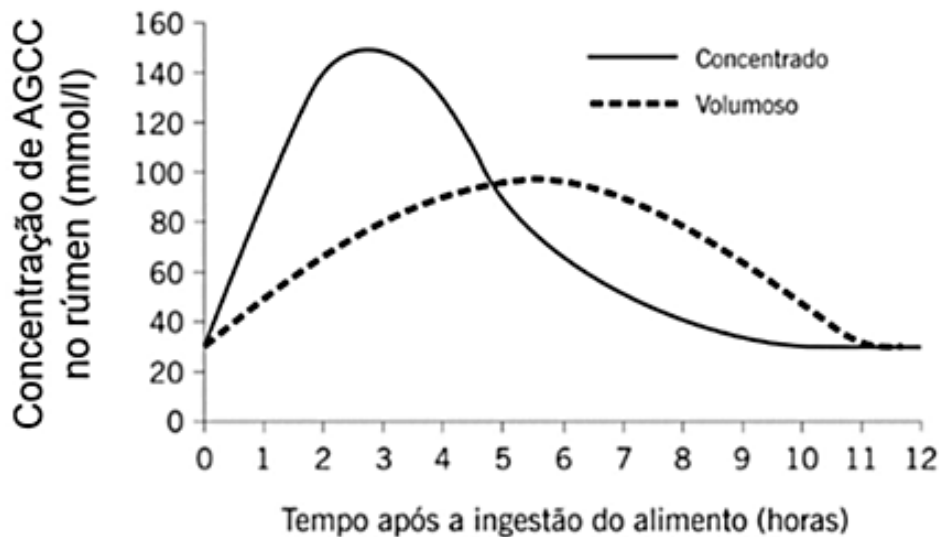


Figura 15. Concentração de ácidos graxos de cadeia curta (AGCC) no rúmen de bovinos.
Fonte: Kozloski (2002)

2.2.5. Composição do excremento bovino

A composição geral do excremento bovino é de aproximadamente 80% de água (em massa). Já a matéria seca é composta por fibras não digeridas, células do epitélio intestinal escamadas, produtos metabólicos e resíduos de substâncias endógenas incluindo enzimas digestivas, derivados de muco e outras secreções, bactérias, pigmentos e substâncias nutritivas (Teixeira, 1996; Van Soest, 1994). Entre os nutrientes, o excremento bovino contém cerca de vinte e quatro minerais como potássio, nitrogênio (na forma de vinte e três aminoácidos), e menores quantidades de enxofre, cálcio, magnésio, manganês e cobalto (Harrison *et al.* 2004).

A Tabela 1 apresenta a composição e principais nutrientes presentes no excremento tanto de bovinos alimentados no pasto (leiteiro e de corte) como de bovinos em confinamento alimentados com ração.

Tabela 1. Principais componentes presentes no excremento de bovinos alimentados no pasto e com ração. Fonte: Harrison *et al.* (2004), traduzido.

Parâmetro	Conteúdo do excremento (%)			Elementos	Conteúdo do excremento (%)		
	Pasto Leiteiro	Pasto Corte	Ração Confinado		Pasto Leiteiro	Pasto Corte	Ração Confinado
Água	86,61	87,44	78,39	Nitrogênio	2,90	1,94	2,72
Sólidos totais	13,39	12,56	26,61	Fósforo	0,48	0,42	0,81
Sólidos voláteis totais	11,21	9,97	22,78	Potássio	2,86	1,44	0,92
Sólidos totais fixados	2,18	2,59	3,83	Carbono	45,37	43,81	43,56

Harrison *et al.* (2004) também determinaram o conteúdo de celulose, hemicelulose e lignina no excremento bovino utilizando um método chamado destilação fracionada. A composição das fibras presentes no excremento bovino está expressa na Tabela 2.

Tabela 2. Conteúdo de fibras totais, celulose e hemicelulose em excrementos bovinos leiteiros alimentados no pasto, de corte também no pasto e confinados. Fonte: Harrison *et al.* (2004) traduzido.

Parâmetro	Conteúdo do excremento (% em peso seco)		
	Pasto - Leiteiro	Pasto - Corte	Confinado
Fibras totais	52,6	51,5	41,7
Celulose	27,4	21,9	14,2
Hemicelulose	12,2	17,4	21,4

De acordo com Teixeira (1996) a coloração verde do excremento bovino é causada pela presença da biliverdina, e a coloração marrom, pelo motilinogênio. A bilirrubina e biliverdina são resíduos de produtos endógenos excretados nas fezes, e o motilinogênio é produzido pela conversão microbiana destes compostos no intestino grosso. O odor característico do excremento bovino deve-se à presença de compostos aromáticos, principalmente indol e escatol produzidos pela degradação microbiana do aminoácido triptofano (Teixeira, 1996).

Um levantamento feito por Teixeira (1996) indica que bovinos defecam de 7 a 15 vezes ao dia. Já Paranhos da Costa & Cromberg (1997) comentam que a frequência diária de defecação média pelos bovinos varia muito, desde 2 a 15 vezes ao dia. No entanto, diversos fatores estão relacionados com a quantidade e a frequência da evacuação, como a dieta, a disponibilidade de alimento e água, o biotipo do animal (idade, gestação, lactação, sexo, raça, espécie), o manejo, saúde e bem-estar, além das relações entre o animal e o ambiente como temperatura e características do pasto como a declividade do terreno e o tipo de capim disponível (Braz *et al.* 2003).

O aspecto do excremento, em forma e consistência, é chamado escore e é utilizado como um parâmetro de avaliação da saúde do animal e do desempenho da digestão em resposta a dieta oferecida. Por exemplo, fezes líquidas e com consistência mole podem indicar excesso de proteína na dieta ou baixa degradabilidade no processo digestivo, mas também podem indicar que a passagem de alimento rico em amido pelo trato gastrointestinal está acelerada. Fezes fluídas podem ser decorrentes de uma ingestão de proteína excessiva, minerais ou grãos (obtidos na alimentação com ração) e um baixo consumo de fibras (volumoso). A presença de grãos nas fezes indica um processamento inadequado ou digestão ineficiente. Por outro lado, excrementos muito firmes indicam excesso de fibras na dieta. Além disso, o odor também é um bioindicador, pois o odor putrefativo das fezes sugere um excesso de proteína na dieta ou uma capacidade reduzida do animal em digerir as proteínas ingeridas (Teixeira, 1997; Litherland, 2007; Ferreira *et al.* 2013).

A Figura 16 ilustra o aspecto físico do excremento conforme o escore de 1 a 5.



Figura 16. Amostras de excremento bovino com escores de 1 a 5.

Considera-se que pequenas alterações no escore não sejam preocupantes em relação a saúde do animal, sendo desejável que o excremento apresente escore entre 3 e 4, com a consistência variando entre uma condição pastosa a firme, sem grandes variações em um período que varia entre uma semana e outra (Litherland, 2007).

Portanto, para uso do excremento bovino como adição em argamassas de terra, recomenda-se coletar excrementos pastosos a firmes, preferencialmente com anéis concêntricos, com escore entre 3 e 4, o que indicam bovinos saudáveis (Figura 17). Apesar disso, é também importante realizar procedimentos para higienização do excremento, como a compostagem, para garantir a eliminação de possíveis patógenos e outros contaminantes.



Figura 17. Imagens de excremento bovino com escore entre 3 e 4.

2.2.6. Higienização do excremento bovino

À medida que as preocupações ambientais e as preocupações em relação a saúde humana relacionadas ao uso de agrotóxicos aumentaram, a agricultura orgânica começou a ganhar mais destaque. Com isso, também surgiram algumas preocupações sobre as bactérias presentes no excremento bovino, pois este é um dos materiais naturais que podem ser utilizados na fertilização orgânica, como por exemplo, conforme os critérios e exigências para insumos na agricultura orgânica certificada, que estão apresentadas nas Diretrizes para o Padrão de Qualidade Orgânico IBD (Instituto Biodinâmico).

Ao contrário do excremento (fezes), a urina não contém bactérias, sendo composta apenas de água, ureia, enzimas e sais minerais. O excremento, por sua vez, contém bactérias, mas não contém ureia. No entanto, apesar de conter grande número de bactérias, por volta de 10^9 a 10^{10} UFC/g (Unidades Formadoras de Colônias por grama) (Salanitro *et al.* 1977; Plews *et al.* 1984), segundo Heinonen-Tanski *et al.* (2006), uma vez fora do trato intestinal do bovino (excretados na forma de fezes), aproximadamente 90% desses microrganismos entéricos encontram dificuldades de sobrevivência.

Hutchison *et al.* (2005) avaliaram a sobrevivência de patógenos em amostras de excremento bovino no ambiente natural. Para esta avaliação, amostras de excremento bovino contaminadas com microrganismos patogênicos foram deixadas no pasto e análises periódicas das amostras de excremento contaminadas e do solo em contato com a amostras foram realizadas ao longo de 160 dias. Os resultados mostraram que, sem qualquer tratamento, 90% dos microrganismos patogênicos são eliminados naturalmente nos primeiros 30 dias, e os 10% restantes são completamente eliminados até os 150 dias, ou seja, em 5 meses deixados no pasto.

Nos casos de produtores que têm disponibilidade de áreas maiores para cultivo agrícola, suficiente para fazer rodízio das áreas cultivadas e deixar áreas em “repouso”, a adubação do solo com o excremento com 4 meses de antecedência ao período de plantio também é eficiente para eliminar patógenos no excremento e evitar a possibilidade de contaminação dos cultivos. No entanto, a diversidade microbiana, que traz outros benefícios, também é perdida. Por isto, a compostagem é um método mais interessante para higienização do excremento, pois apesar de eliminar

patógenos, ainda se observa permanência de outros microrganismos eficientes e desejáveis para diversas aplicações (Sipila, 1998; Heinonen-Tanski *et al.* 2006).

Para garantir a segurança do uso do excremento bovino, principalmente no cultivo de plantas que serão consumidas cruas, Heinonen-Tanski *et al.* (2006) descreveu diversos métodos biológicos, físicos e químicos para reduzir microrganismos patogênicos em excremento bovino, sendo a compostagem em pilha (Figura 18) o método considerado mais simples, economicamente viável e eficiente na eliminação de microrganismos potencialmente perigosos presentes no excremento.



Figura 18. Pilhas de compostagem de excremento bovino. Fonte: EPAGRI, 2022.

Devido ao seu elevado teor de matéria orgânica, o excremento bovino pode ser decomposto pelo processo de compostagem, em que microrganismos realizam respiração aeróbica, gerando uma quantidade significativa de calor. Esse calor eleva a temperatura da pilha de compostagem para cerca de 60 °C, o que é suficiente para diminuir substancialmente o número de microrganismos patogênicos entéricos que ainda possam estar presentes após a excreção do animal. Ao mesmo tempo, algumas proteínas se decompõem pelo processo de amonificação, elevando os níveis de pH e de amônia na pilha, o que reduz ainda mais a possibilidade de sobrevivência de diversos microrganismos, e amplia o potencial de higienização através do método compostagem (Heinonen-Tanski *et al.* 2006; EMBRAPA, 2015; EPAGRI, 2022).

Para maior eficiência do processo de compostagem, é importante aferir diariamente a temperatura e umidade da pilha de compostagem para garantir que estão nas faixas desejáveis. Além disso toda a pilha de excremento deve ter contato com as elevadas temperaturas registradas nas camadas mais interiores da pilha, além de também ter contato com oxigênio para viabilizar também a degradação aeróbica. Por isto, é importante revirar a pilha diariamente para promover a homogeneização do composto, a aeração adequada e o rodízio das porções de excremento que estarão mais próximas do núcleo da pilha. Em regiões de clima frio (Figura 19), as pilhas podem ainda ser montadas sobre grades elevadas do chão, ou sistemas com dutos de ventilação, para aumentar a aeração, além de montar as pilhas em ambientes com vedação lateral para se obter maior isolamento térmico (Sipila, 1998; EPAGRI, 2022).

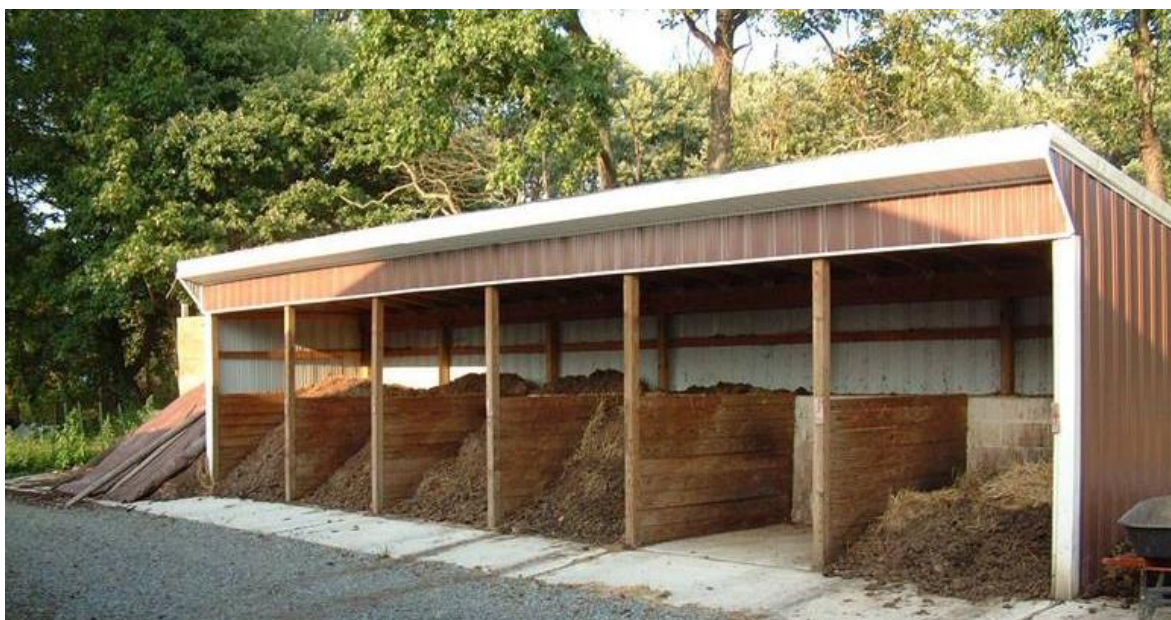


Figura 19. Galpão com paredes para compostagem de excremento. Fonte: Arquitetura Equestre.

Assim como a temperatura, a umidade e a aeração, também é muito importante fazer pilhas separadas pela “idade” do excremento, para garantir que todos passarão pelo mesmo período de tempo em compostagem, garantindo sucesso total do processo de tratamento e eliminação de patógenos (Manyi-Loh *et al.* 2016). Simujide *et al.* (2013) também destacam que a eficácia do processo depende tanto da temperatura quanto do tempo de exposição ao calor.

Além dos documentos técnicos elaborados por órgãos federais como a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) e também por órgãos estaduais como a

EPAMIG (Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais), que orientam como implementar e dar manutenção em sistemas de compostagem para tratamento de excremento animal e outros resíduos da agropecuária, muitas publicações científicas também podem ser encontradas evidenciando a eficiência deste método para eliminação de patógenos no excremento bovino.

Larney *et al.* (2003) demonstrou que 7 dias de compostagem em pilhas são suficientes para eliminar 99,99% dos coliformes fecais totais, incluindo *Escherichia coli*. Em outro estudo, Sunar *et al.* (2010) demonstrou que o processo de compostagem por 8 dias é suficiente e fundamental para eliminar de *Salmonella spp.* A pesquisa comparou, ao longo de 20 dias, uma amostra de excremento contaminada que não passou pelo processo de compostagem, e outra que passou pelo processo. Os resultados das análises evidenciaram que, após 8 dias de compostagem, não haviam mais bactérias *Salmonella spp.*, enquanto a amostra que não foi compostada, após 20 dias, ainda apresentava em torno de 10^4 UFC/g.

No entanto, para o tratamento de grandes quantidades de excremento, como em fazendas para produção de leite, Manyi-Loh *et al.* (2016) recomendam o uso combinado de dois métodos de tratamento dos excrementos para assegurar a completa eliminação de microrganismos patogênicos. Além da compostagem, os pesquisadores destacam a digestão anaeróbica em biodigestores como uma das melhores alternativas para o controle de patógenos diversos em excremento animal, pois, além de controlar os patógenos, essa técnica traz benefícios socioeconômicos e ambientais, como a produção de biogás e biofertilizantes seguros.

Os parasitas entéricos obrigatórios, em particular, são incapazes de se reproduzir fora do organismo do hospedeiro, mas a maioria dos microrganismos patogênicos apresenta baixa capacidade de se desenvolver no excremento (após ser excretado pelo animal), devido à intensa competição com outros microrganismos presentes no pasto, no solo ou no material de cama (palha usada para forrar o piso dos currais de confinamento). Além disso, outros fatores também contribuem para a redução de patógenos, como a exposição a condições ambientais adversas, a ausência de uma temperatura corporal constante, variações de pH, baixo potencial de oxidação-redução, falta de água e a escassez de nutrientes fora do trato intestinal (Himathongkham *et al.* 1999; Placha *et al.* 2001; Hutchison *et al.* 2005).

Portanto, mesmo se não forem usados outros tratamentos como a compostagem (que demanda manejo diário, aeração e homogeneização), o excremento pode ser armazenado em pilhas acondicionadas em galpões cobertos para evitar que sejam molhados pela chuva, por um período mínimo de 4 meses antes do uso, pois assim, o número de patógenos entéricos será tão baixo que os problemas de higiene e contaminação serão bastante reduzidos (Mukherjee *et al.* 2004).

No Brasil e em diversos outros países, existem publicadas regulamentações legais relacionadas a higiene sanitária, que apresentam requisitos e parâmetros para uso e comercialização de compostos fertilizantes e outros produtos com excremento bovino, subprodutos bacterianos e laticínios, como por exemplo a Portaria n.1.170/2024 (SDA/MAPA, 2024) apresentado pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) do Brasil, e o regulamento 1774/2002 (CE, 2002) apresentado pelo Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia.

O atual regulamento da União Europeia 1774/2002 (2002) permite a presença de no máximo 10^3 UFC/g de *Enterobacteriaceae* em produtos de excremento bovino como biofertilizantes. Ao mesmo tempo, alguns queijos feitos de leite não pasteurizado podem conter até 10^4 ou mesmo 10^5 UFC/g de bactérias *E. coli*, de acordo com o Ministério da Agricultura Finlandês (1995), considerado em harmonia com os regulamentos da União Europeia (Remus *et al.* 2000; Utkhede *et al.* 2000; Iniguez *et al.* 2004).

No Brasil, a Instrução Normativa nº61/2020 (MAPA, 2020) não apresenta parâmetros ou limites para a presença de bactérias ou microrganismos no excremento bovino para comercialização como fertilizante agrícola. Apesar disso, segundo os parâmetros considerados na portaria n.1.170/2024 (SDA/MAPA, 2024), os produtos lácteos podem ser classificados em três categorias: qualidade aceitável, qualidade intermediária ou qualidade inaceitável, baseado na determinação da concentração de micro-organismo (UFC). Para essa classificação, o MAPA determinou os parâmetros biológicos descritos na Tabela 3, onde “n” é o número de amostras do alimento, “c” é o mínimo permitido de amostras para classificação intermediária, “m” é a quantidade permitida de UFC encontradas para ser classificado como intermediário, e “M” o limite máximo permitido de UFC encontradas para ser classificado minimamente como aceitável.

Tabela 3. Parâmetros microbiológicos para produtos lácteos. Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA). Portaria SDA/MAPA n.1.170 de 26 de agosto de 2024.

Microrganismos	Critérios			
	n	c	m	M
Aeróbios mesófilos estáveis/g	5	2	3×10^4	10^5
<i>Enterobacteriaceae</i> /g	5	0	10	-
<i>Estafilococcus coagulase</i>	5	1	10	10^2
<i>Salmonella sp</i> (25g)	10	0	0	-

Embora, à primeira vista, essas informações possam parecer fora do contexto do presente estudo, elas são bastante relevantes. Se nos alimentos para consumo humano certos níveis de bactérias são permitidos, isso nos oferece uma referência sobre quais quantidades de bactérias desse grupo (patogênicas) representariam riscos à saúde humana quando incorporadas (mesmo que não sejam ingeridas) em argamassas de terra com adição do excremento bovino.

No entanto, outro ponto igualmente ou ainda mais preocupante que os microrganismos naturais presentes no trato intestinal dos bovinos é o uso indiscriminado de antibióticos na criação de animais, assim como na prática clínica humana. Esse uso excessivo representa um sério risco para a população devido à resistência bacteriana que pode se desenvolver quando a carne de animais tratados com grandes quantidades de antibióticos é consumida. Muitas vezes, esses medicamentos são administrados de forma excessiva, preventiva e irresponsável. O abuso de antibióticos reduz a eficácia dos tratamentos para infecções bacterianas, aumentando o risco para a saúde humana, elevando as taxas de morbidade e mortalidade e também o custo dos tratamentos (Naiemi *et al.* 2006; Abo-state *et al.* 2012; Aly *et al.* 2012; Jeyasanta *et al.* 2012; Ullah *et al.* 2012; Sharif *et al.* 2013).

Em um estudo realizado por Omojowo & Omojasola (2013), foram identificadas seis espécies de bactérias patogênicas de *Escherichia coli*, *E. coli* O157:H7, *Shigella dysenteriae*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella typhi*, e *Aeromonas hydrophila* no excremento bovino a partir de amostras de excremento fresco de 200 bovinos. Entre as bactérias isoladas, 100% delas foram resistentes ao antibiótico ofloxacin e também foram observados padrões de resistência a múltiplos antibióticos revelando que 100% das cepas foram resistentes a tetraciclina, ampicilina (86%), amoxicilina (83%), cloranfenicol (66%), gentamicina (48%), eritromicina (44%) e ácido nalidíxico (18%).

Portanto, para aquelas pessoas que se preocupam com o uso de excremento bovino na construção com terra ou têm opiniões preconceituosas sobre suas várias aplicações biotecnológicas na construção civil, é importante refletir, antes, sobre o consumo de carne bovina e leite de vacas híbridas. Esse preconceito, na verdade, reflete a desvalorização do conhecimento ancestral, popular e tradicional, o que impede grandes avanços na ciência e na tecnologia.

2.2.7. Aplicações do excremento bovino

O uso do excremento de bovinos (assim como de outros ruminantes e equinos) é amplamente conhecido e estudado como fertilizante na agricultura. Nesta aplicação, ele é utilizado depois de compostado, sendo denominado e conhecido popularmente por esterco bovino.

O uso do esterco na agricultura orgânica é essencial para manter a qualidade do solo, devido à grande presença microbiana e valor nutricional elevado. Além disso, o esterco estimula o aumento da população de minhocas, o que acelera o processo de nitrificação (Hand *et al.* 1988). A diversidade microbiana presente no esterco também ajuda a controlar biologicamente doenças que afetam as plantações, limitando o desenvolvimento de fungos comuns, como *Fusarium oxysporum*, *Fusarium solani* e *Sclerotinia sclerotiorum* (Basak *et al.* 2002). Neste sentido, o esterco também se apresenta como uma alternativa aos agrotóxicos, pesticidas, fertilizantes, herbicidas e antibióticos que podem ser prejudiciais à saúde humana e animal, sendo conhecidos por causarem doenças graves, como imunossupressão, reações de hipersensibilidade e distúrbios autoimunes (Geetha & Fulekar, 2008; Chauhan & Singhal, 2006). Assim, produtos da agricultura orgânica que utilizam esterco bovino são mais seguros para a saúde humana e o meio ambiente, pois são livres de produtos químicos nocivos.

A microbiota presente no esterco bovino também tem sido estudada como agente mobilizador de minerais, o que promove maior fertilidade do solo (Gupta *et al.* 2016). O uso extensivo de fertilizantes químicos tem sido associado a várias desvantagens, como aumento da acidez, desequilíbrio mineral e degradação do solo. Em contraste, a compostagem de resíduos orgânicos e excremento bovino por microrganismos gera dióxido de carbono, água, minerais e matéria orgânica estabilizada. Estudos recentes mostraram que a adição de esterco bovino em processos de compostagem de biomassa (resíduos) da indústria de óleo de palma melhorou as propriedades físicas

e químicas do composto, incluindo sua composição nutricional para o solo, e parâmetros como pH, condutividade elétrica e proporção C:N (Gupta *et al.* 2016). Portanto, o esterco bovino é considerado um bom substituto para fertilizantes químicos, pois além de fornecer matéria orgânica, também atua como condicionador de solo.

A Índia é o país com maior população de praticantes do hinduísmo no mundo e é também aonde está localizada a maior quantidade de bovinos e bufalinos. Como dito anteriormente, para o Hinduísmo, os bovinos são considerados entidades sagradas. Portanto, é na Índia que se encontra a maior variedade de aplicações para os subprodutos dos bovinos vivos como o leite, a urina e também as fezes (excremento).

Por ser rico em celulose, o material fibroso obtido do excremento é usado para a produção de papéis, objetos e utilitários simples como vasos para plantas, recipientes multiuso e objetos decorativos (Annano *et al.* 2021). Recentemente, defumadores e repelentes de mosquitos à base de excremento bovino têm estado entre as melhores alternativas para substituir repelentes sintéticos tóxicos (Palanisami *et al.* 2014).

A decomposição do excremento bovino gera bastante metano, um gás que, quando liberado na atmosfera, contribui 21 vezes mais para o aquecimento global do que o dióxido de carbono (Brand & Blamey *et al.* 2016; Kalyuzhnaya *et al.* 2019). Neste sentido, a captação dos gases emitidos para produção de biogás, é uma forma responsável de gerenciamento deste resíduo e uma alternativa para os combustíveis fósseis, como carvão e petróleo. Segundo Gupta *et al.* (2016), o excremento bovino é a principal fonte de biogás na Índia, havendo diversas usinas instaladas em todo o país. Além disso, pesquisas continuam a explorar o potencial de outros resíduos agrícolas e do excremento de porco, para expandir a produção.

De acordo com Werner *et al.* (1989), o excremento produzido por três a cinco bovinos é suficiente para uma pequena usina de biogás que pode sustentar uma família de seis a oito pessoas, permitindo cozinhar duas a três refeições diárias, manter duas lâmpadas acesas por três horas, manter uma geladeira ligada por um dia, ou mesmo manter um gerador de 3 kW ligado por uma hora. Na Índia é comum a construção de pequenas usinas de biogás em comunidades rurais, onde o excremento bovino é convertido em metano e usado para geração de eletricidade e como gás de cozinha,

enquanto o resíduo restante é aproveitado como adubo orgânico para o solo. Além disso, o excremento seco também é usado como lenha para fogão, diminuindo a dependência de carvão e madeira, o que segundo Ananno *et al.* (2021) também contribui para eliminar microrganismos no ar ao redor no ambiente do local da queima.

Outra aplicação interessante do excremento na Índia, é na biorremediação. Produtos químicos tóxicos são frequentemente descartados ilegalmente no meio ambiente sem tratamento adequado, contaminando corpos d'água em várias regiões do mundo e prejudicando a saúde humana e ambiental. Métodos convencionais de tratamento, como dragagem, incineração, uso de materiais sorventes, decantação e dispersão, além de serem economicamente inviáveis, são ambientalmente insustentáveis. Em contraste, métodos biológicos como a biorremediação, utilizam a atividade de microrganismos com diferentes capacidades metabólicas para degradar rapidamente poluentes orgânicos perigosos, restaurando o ambiente a níveis seguros (Umanu *et al.* 2013). Devido a vasta diversidade de microrganismos presentes em sua composição, como *Acinetobacter*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Serratia* e *Alcaligenes spp.*, o excremento bovino apresenta grande potencial para biorremediação em solos contaminados com hidrocarbonetos, metais pesados, antibióticos, pesticidas, além de resíduos biomédicos e farmacêuticos (Umanu *et al.* 2013). Por isto, na Índia, o excremento bovino também é utilizado para degradar resíduos urbanos e hospitalares.

Diante do que foi apresentado, é fácil reconhecer que os bovinos são animais fascinantes que exemplificam a complexidade e a perfeição da natureza. A humanidade tem cometido erros graves como os maus-tratos a esses animais em nome do consumo excessivo de seus derivados, incluindo alterações genéticas para aumentar a produção de leite e criação em confinamento para produção de carne em série. Apesar do desmatamento de florestas nativas e destruição de biomas brasileiros causados pela criação extensiva, os bovinos não são os vilões nesta narrativa. Neste sentido, de um ponto de vista científico, este trabalho destaca que além da qualidade nutricional e medicinal dos seus outros produtos, o excremento bovino é um importante aliado para desenvolver atividades humanas mais favoráveis economicamente e ambientalmente.

2.2.8. Excremento bovino na construção com terra

Ao observar o excremento bovino completamente seco no pasto, nota-se elevada dureza e resistência a tentativa de desintegração manualmente, além de ser resistente a ação da água da chuva. Portanto, é natural que civilizações antigas tenham percebido que, ao ser adicionado nas argamassas de terra para reboco como material estabilizante, algumas de suas propriedades e características também seriam conferidas ao reboco.

Segundo Ngowi (1997) muitas sociedades tradicionais empregaram excrementos de equinos e de ruminantes como bovinos e camelos, além de sangue e gorduras animais, como adições estabilizantes em diversas técnicas de construção com terra. Os excrementos bovinos talvez sejam utilizados pela humanidade na estabilização de argamassas de terra desde os primeiros sistemas de cultivo agrícola e de criação de animais, há cerca de 10.000 anos (Pacheco *et al.* 2012; Kumar & Selvaraj, 2023).

Na Índia, as argamassas de terra com adição de excremento são denominadas “*Gohber*” e são aplicadas em paredes, tetos e pisos com o objetivo de se obter um revestimento com limitados retração e fissuramento superficial e com elevada resistência a ação da água (BASIN, 2002). No Brasil, esta técnica também é bastante difundida na arquitetura vernácula, e ainda nos dias atuais é comum encontrar pisos, fornos e paredes revestidas com argamassas com esta formulação em comunidades rurais e tradicionais (Pachamama, 2018).

Assim como relatado na seção 2.1.2. sobre adição de fibras vegetais em argamassas de terra, a fermentação da argamassa com adição de excremento bovino também é uma prática comum na arquitetura vernácula de países na Ásia e na África (BASIN, 2002; Ghida, 2024; Pradines, 2022; Henry & Therrien, 2018).

Em comunidades tradicionais na África Ocidental, como os povos *Tamberma*, no Togo, e *Somba*, no Benin, é praticada um tipo de construção chamada *Tata Somba* (Figura 20). A singularidade desta arquitetura foi inclusive reconhecida pela UNESCO como patrimônio mundial desde 2004. Guida (2024) relata que, neste tipo de construção, são usados materiais naturais disponíveis localmente, principalmente terra, pedra e fibras vegetais.



Figura 20. Arquitetura Tata Somba. Fonte: humansworld.org.

As espessas paredes de alvenaria de “*banko*” (semelhante ao cob) são revestidas com uma argamassa de terra composta por terra e excremento bovino ou de ovelhas, além de outras adições naturais (Figura 21). De acordo com os construtores locais, o excremento é adicionado a argamassa porque aumenta a resistência mecânica e ao contato com água, além de reduzir a retração. Durante a preparação do revestimento, a argamassa com excremento é deixada fermentar pelo menos por dois dias antes de ser aplicada, para que seja obtida maior qualidade final do revestimento (Guida, 2024).



Figura 21. Arquitetura Tata Somba no Benin. Fonte: Romarick ATOKE - Flickr.

Apesar de seu uso milenar, o uso do excremento bovino em argamassas de terra não foi tão investigado cientificamente. No entanto, desde a década de 1990 é possível encontrar alguns estudos, com destaque para países asiáticos e africanos, que avaliaram os efeitos causados pela adição de excremento bovino na produção de elementos para construção com terra, em especial adobe e revestimentos. De maneira geral, estes estudos evidenciam que a adição de excremento bovino diminui a retração, a densidade das argamassas no estado endurecido e a condutibilidade térmica; e aumenta a resistência mecânica, a aderência e a resistência ao contato com água.

As publicações científicas encontradas na revisão bibliográfica sobre a adição de excremento bovino em produtos para construção com terra são trazidas a seguir. Os resultados destes estudos são apresentados de maneira qualitativa na Tabela 4. As setas verdes indicam que houve aumento da propriedade indicada no topo da coluna, e as setas vermelhas indicam que houve redução. Os valores da adição de excremento que estão destacados em verde, indicam a proporção que apresentou melhor desempenho nos ensaios realizados em cada publicação.

Tabela 4. Publicações sobre bioestabilização de produtos para construção com terra mediante adição de excremento bovino: informações sobre o excremento e apresentação dos resultados de forma qualitativa, nos efeitos causados em relação a argamassa de referência, sem adição de excremento.

Referência - Publicação	Excremento Bovino						Resist. (N/mm ²)			Resist. à água	Isolam. térmico
	Densid. Aparente (g/cm ³)	Tempo de secagem - compost.	Íntegro ou em pó	Ferment.	Adição (%) em relação a qntd. de terra+areia	Mas. ou Vol.	Rc	Rf	Ra		
Millogo <i>et al.</i> (2016)	-	2-3 sem.	Pó	Sim	1,2 e 3	Mas.	↑	↑	-	↑	-
Mahamat <i>et al.</i> (2015)	-	-	-	Não	1,2,3,4 e 5	Mas.	-	-	-	-	↑
Vilane (2010)	-	2-3 mês.	Íntegro	Não	10	Vol.	↑	-	-	↑	-
					5,15 e 20		↓				
Kulshreshta <i>et al.</i> (2022)	-	Fresco	Íntegro	Sim	2	Vol.	-	-	-	↑	-
Yalley e Dorothy (2013)	-	-	-	Não	15,20,25 e 30	Mas.	↑	↑	-	↑	-
Bamogo <i>et al.</i> (2020)	-	2-3 sem.	Pó	Sim	2,4 e 6	Mas.	↑	↑	-	↑	↑
Mbreyaho <i>et al.</i> (2020)	-	Fresco	Íntegro	Não	10,20,30 e 40	Mas.	↑	-	-	↑	-
Lekshmi <i>et al.</i> (2020)	-	2-3 sem.	Pó	Não	10 e 20	Mas.	↓	↓	-	-	-
					10 e 20		↓	↓			
Pachamama <i>et al.</i> (2020)	0,4	2 a 3 sem.	Íntegro	Não	10	Vol.	↑	↑	↑	-	-
					20		↓	↓	↑	-	-
Pachamama <i>et al.</i> (2024a)	0,4	18 dias	Íntegro	Não	10 e 20	Vol.	↑	↑	↑	-	-
Rao <i>et al.</i> (2020)	-	Seco	Pó	Sim	10	Mas.	↑	-	-	-	-
Rao <i>et al.</i> (2021)	-	Seco	Pó	Sim	10	Mas.	↑	-	-	-	-

Como são muitas informações a respeito de cada publicação, as informações contidas em cada uma foram divididas em duas tabelas, sendo a primeira (Tabela 4) com as informações sobre o excremento utilizado e os resultados obtidos; e a segunda (Tabela 5) com as informações sobre a terra utilizada e as argamassas formuladas, assim como o produto de terra em que a adição de excremento foi avaliada.

Tabela 5. Publicações sobre bioestabilização de produtos para construção com terra mediante adição de excremento bovino: informações sobre a terra e a aplicação da argamassa.

Referência - Publicação	Produto	Composição final da argamassa de terra					
		País de origem da terra	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Grãos >2 mm (%)	Argila ou CTC*
Millogo <i>et al.</i> (2016)	Adobe	Burkina Faso	36	17	43	4	Caulinita
Mahamat <i>et al.</i> (2015)	Adobe	Chade	49	27	23	1	-
Vilane (2010)	Adobe	Essuantini	10	5	85	-	-
Kulshreshta <i>et al.</i> (2022)	BTC	Holanda	15	17	68	-	52 m ² /g
Yalley e Dorothy (2013)	BTC	Gana	11	-	-	-	-
Bamogo <i>et al.</i> (2020)	Revest.	Burkina Faso	40	10	50	10	Caulinita
Mbereyaho <i>et al.</i> (2020)	Revest.	Ruanda	-	-	-	-	-
Lekshmi <i>et al.</i> (2020)	Revest.	Índia	14	42	40	4	-
			10	38	52	-	
Pachamama <i>et al.</i> (2020)	Revest.	Brasil	14	3	83	-	Caulinita
Pachamama <i>et al.</i> (2024a)	Revest.	Brasil	5	18	77	-	Caulinita
Rao <i>et al.</i> (2020)	Solo	Índia	50	-	50	-	Caulinita
Rao <i>et al.</i> (2021)	Solo	Índia	50	-	50	-	Caulinita

* CTC - Capacidade de Troca Catiônica

As informações mais detalhadas de cada publicação são trazidas a seguir em ordem crescente da proporção de excremento adicionado.

Para produção de blocos de terra comprimida, Kulshreshta *et al.* (2022) produziu argamassas com a adição de 2% (em massa) de excremento bovino fresco e deixou a mistura fermentando por 5 dias em um recipiente fechado antes de produzir os corpos de prova prensados. Os blocos foram avaliados através do ensaio de imersão em água e observou-se que os corpos de prova com adição de excremento se tornaram resistentes ao contato com a água, ao contrário daqueles sem a adição.

Millogo *et al.* (2016) investigaram a adição de excremento bovino seco e em pó, nas proporções de 0 a 3% (em massa) em adobes. As argamassas frescas para produção dos adobes foram mantidas por 72 horas em recipientes plásticos hermeticamente

fechados para fermentação, antes de serem moldadas para produzir corpos de prova prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm). Os pesquisadores verificaram que a retração e a absorção de água diminuíram e a resistência mecânica dos adobes aumentou, proporcionalmente ao aumento da quantidade da adição de excremento.

Bamogo *et al.* (2020) investigaram, em argamassas de terra para reboco, a adição de excremento bovino seco e em pó nas proporções de 0 a 6% (em massa). As argamassas frescas foram fermentadas por 72 horas em recipientes plásticos hermeticamente fechados antes de serem moldadas em corpos de prova prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm). Através da norma DIN 18947 (2018) foi verificado que a resistência mecânica aumentou e a absorção de água por capilaridade reduziu, com o aumento da proporção de excremento adicionado.

Mahamat *et al.* (2015) avaliaram os efeitos causados pela adição de excremento bovino na proporção de 0 a 5% (em massa) nas propriedades termo-físicas de corpos de prova de terra (sem adição de areia) medindo 3 cm x 10 cm x 10 cm, e observaram que as argamassas tornaram-se mais isolantes termicamente à medida que se aumentou a quantidade de excremento adicionada.

Pachamama *et al.* (2024a) avaliaram as propriedades físicas e mecânicas de argamassas de terra usando uma terra brasileira areno siltosa (terra SSE) com o traço 1:1 (terra:areia) e a adição de excremento bovino nas proporções de 10% e 20% (em volume). As duas proporções causaram redução da retração das argamassas e aumento da resistência mecânica e da aderência às alvenarias de adobe e de tijolo cerâmico. No entanto, a proporção de 10% ofereceu benefícios mais expressivos. O excremento utilizado foi excretado por animais alimentados no pasto, colhido fresco, compostado por 18 dias, peneirado e apresentando densidade de 0,40 g/cm³. Para a metodologia dos ensaios utilizou-se a norma alemã DIN 18947 (2018), corpos de prova prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm) e rebocos aplicados sobre adobe e tijolo cerâmico.

Yalley & Dorothy (2013) avaliaram a adição de 15%, 20%, 25% e 30% (em massa) de excremento bovino na produção de blocos de terra comprimida usando apenas terra, sem adição de areia. Observaram que todas as proporções aumentaram a resistência mecânica dos blocos de terra, mas a proporção de 20% obteve melhor resultado além de ter reduzido a absorção de água após 10 minutos de imersão em água. Além disso, observou-se a redução da perda de massa por abrasão proporcionalmente ao

aumento da adição. Não foram informadas as características do excremento (fresco, seco ou em pó).

Mbereyaho *et al.* (2020) investigou, em argamassas de terra para revestimento, usando corpos de prova cúbicos de 10 cm, os efeitos causados pela adição de 10%, 20%, 30% e 40% (em massa) de excremento bovino fresco. Foi verificado que a proporção de 20% reduziu a absorção de água e a retração de maneira mais eficiente.

Lekshmi *et al.* (2020) avaliaram o efeito da adição de excremento bovino (seco ao sol por 2 a 3 semanas e moído) nas proporções (em massa) de 10 e 20%, em argamassas de terra sem adição de areia, utilizando duas terras diferentes (A e K) e corpos de prova cúbicos com 7 cm de lado. A terra A apresentou composição granulométrica: 10% de argila, 38% de silte e 52% de areia. A terra K apresentou: 14% de argila, 42% de silte e 40% de areia. Os resultados mostraram que ambas as proporções de adição de excremento reduziram a resistência à compressão (R_c), sendo que a proporção de 20% reduziu mais que a proporção de 10%. O mesmo comportamento ocorreu com as duas terras avaliadas. No entanto, a redução na R_c causada pela adição de excremento foi mais expressiva na terra A. A diferença observada foi associada à maior quantidade de argila na terra K, que por isto, apresentou maior resistência.

Vilane (2010) avaliou a adição de excremento bovino seco e moído, com 2 a 3 meses de idade, nas proporções de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% (em volume), em argamassa para produção de adobe. A terra utilizada apresentou a seguinte composição granulométrica: 10% de argila, 5% de silte e 85% de areia. Os adobes também foram avaliados quanto a R_c , secos e saturados, após 7 dias submersos em água. Em comparação com o adobe sem excremento, os resultados obtidos tanto para adobes secos quanto saturados foram: aumento da R_c com a proporção de 10% de excremento; e a redução da R_c com as proporções de 5%, 15% e 20%.

Pachamama *et al.* (2020) avaliaram as propriedades físicas e mecânicas de argamassas de terra usando uma terra brasileira argilosa (terra KCE), com o traço 1:4 (terra:areia) e adição de excremento bovino nas proporções (em volume) de 10% e 20%. O excremento utilizado foi produzido por animais alimentados no pasto; foi colhido fresco, seco a sombra por 2 a 3 semanas e peneirado. Para a metodologia dos ensaios foi usada a norma alemã DIN 18947 (2018). Apesar da terra ser bastante argilosa (70%), ao serem adicionados 4 volumes de areia para controlar a retração, a

composição granulométrica final da argamassa foi: 14% de argila, 3% de silte e 83% de areia. Os resultados evidenciaram que a adição de 10% de excremento bovino apresentou benefícios bastante expressivos em todos os ensaios realizados: retração, resistência à flexão e à compressão e aderência em adobe e em tijolo cerâmico. Já a proporção de 20% também reduziu a retração e aumentou a resistência a flexão e a aderência em ambos os suportes. No entanto, causou redução da resistência à compressão.

Os resultados das publicações descritas acima deixam claras os benefícios da adição de excremento bovino nas argamassas para a construção com terra, seja adobe, outros blocos de terra ou revestimentos. Além disso, os resultados relatam aumento da resistência mecânica proporcionalmente ao aumento da adição de excremento até a proporção de 20% em massa, e a proporção de 10% em volume. No entanto, apenas três publicações relataram redução da resistência à compressão com as proporções de 20%, sendo que uma delas também observou redução com a proporção de 10%. Apesar disso, mesmo nestes três casos, a proporção de 10% aumentou a R_c em Vilane (2010) e em Pachamama *et al.* (2020), ou como no caso de Leikshmi *et al.* (2022), causou o menor prejuízo.

De acordo com Millogo *et al.* (2016) a redução na resistência mecânica observada nos adobes em Vilane (2010) provavelmente está associada ao menor teor de argila (10%) na composição da terra utilizada. Em Leikshmi *et al.* (2022), as duas terras utilizadas (A e K) para produção dos corpos de prova, também apresentavam baixo teor de argila (10% e 14% respectivamente). E em Pachamama *et al.* (2020) a terra KCE também continha pouca argila (14%). A partir da comparação entre estas publicações encontradas, Rao (2023) também identificou uma tendência, de que a resistência a compressão e a biocimentação por EPS, tendem a aumentar em argamassas de terra com maior teor de argila.

Além disso, segundo Kulshreshta *et al.* (2022) e Rao (2023), os efeitos causados pela adição do excremento bovino nas argamassas de terra tendem a ser melhores com o excremento mais fresco. Leikshmi *et al.* (2022) e Pachamama *et al.* (2020) utilizaram o excremento seco com 2 a 3 semanas de idade, e Vilane (2010) usou o excremento seco ainda mais “velho”: entre 2 e 3 meses de idade. Neste sentido, além do baixo teor de argila, o fato de usarem um excremento mais seco poderia ser outro fator responsável pela redução da resistência à compressão nestes dois estudos.

No entanto, apesar de Millogo *et al.* (2016), Bamogo *et al.* (2020) e Rao *et al.* (2020; 2021) terem utilizado terras muito mais argilosas (36%, 40% e 50%, respectivamente) também utilizaram excremento seco e moído adicionado em baixa proporções (3% e 6%) e observaram aumento bastante expressivo na resistência mecânica. Além disso, apesar de Pachamama *et al.* (2024a) ter utilizado uma argamassa com baixo teor de argila (4,5%) também foi observado aumento expressivo da resistência mecânica com a adição de excremento seco (sem ser moído) na proporção de 10% e menos expressivo com a proporção de 20%.

Portanto, Rao (2023) também explica que, além do fator granulométrico, os efeitos da adição de excremento, assim como de outras adições nas argamassas de terra, dependem de outros fatores relacionados com a composição mineralógica. Afinal, ao contrário de outros materiais mais padronizados, os solos e as terras deles extraídas podem apresentar uma variedade enorme de composição granulométrica e mineral. Neste sentido, mais investigações sobre os efeitos da adição de excremento bovino em argamassas de terra são necessárias para melhor compreender as relações entre essa adição e as características das terras.

Outro fator que dificulta a comparação dos resultados das outras pesquisas é que nem todas as publicações informam a densidade e o teor de umidade da amostra de excremento bovino utilizada. Cada pesquisa avalia o excremento em uma condição de idade e integridade física diferente: fresco, velho, seco, fermentado, íntegro ou moído. Além disso, varia-se também a unidade de medida da proporção (em massa e em volume) usada para calcular a adição de excremento nas argamassas. Sem as informações de densidade, não é possível comparar uma percentagem em massa e em volume. E sem as informações de teor de umidade, não é possível saber a quantidade de material seco sólido equivalente que foi adicionada nas argamassas.

Também se faz importante realizar, além da caracterização granulométrica, a caracterização mineralógica das terras usadas para identificar o tipo de argila predominante. Só assim torna-se também possível montar uma base de dados com as características das terras utilizadas em cada pesquisa e os efeitos causados pela adição de excremento bovino, para compreender como seu uso pode ser otimizado a partir das condições granulométricas e mineralógicas de cada terra.

2.2.9. O que explica os efeitos causados nas argamassas de terra pela adição de excremento bovino?

Millogo et al. (2016) e Bamogo et al. (2020)

Millogo *et al.* (2016) foi a primeira pesquisa que propôs uma explicação sobre os mecanismos de reação que causam os efeitos da adição do excremento bovino em argamassas de terra. Os pesquisadores investigaram os efeitos da adição de excremento bovino seco e em pó, nas proporções 0%, 1%, 2% e 3% (em massa), nas transformações micro estruturais e nas propriedades físicas e mecânicas de adobes feitos com terra tropical de Burkina Faso sem adição de areia. A terra apresentava a seguinte composição granulométrica: 36% de argila (predominantemente caulinita), 17% de silte, 43% de areia e 4% de agregados de maior dimensão. Após a produção das argamassas, a mistura foi colocada em um recipiente plástico fechado hermeticamente para fermentar por 72 horas. Após esse período, as argamassas foram moldadas em corpos de prova prismáticos. Neste estudo foi avaliada a resistência à compressão e absorção de água dos corpos de prova.

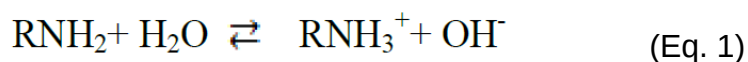
Os resultados obtidos evidenciaram um aumento na resistência à compressão (R_c) e à flexão (R_f) dos corpos de prova proporcionalmente ao aumento no teor de pó de excremento adicionado, tendo seu melhor desempenho nessa propriedade com o teor de 3%: R_c de 2,8 MPa e R_f de 0,7 MPa, que representou um aumento de 33% e 133% respectivamente, em relação a argamassa de referência. Já quanto a absorção de água e retração linear, registrou-se redução das duas propriedades proporcionalmente ao aumento da adição de excremento. A redução da retração foi atribuída à presença de fibras vegetais; a redução da absorção de água foi atribuída a presença dos silicatos de amina insolúveis, novo composto formado pela reação entre o excremento bovino, a argila caulinita e o quartzo fino; e o aumento da resistência mecânica foi atribuído aos silicatos de amina que são reforçados pela presença das fibras, que criam uma estrutura interna na argamassa mais resistente.

Em outra publicação com participação de Millogo, Bamogo *et al.* (2020) avaliaram as adições de 2%, 4% e 6% de excremento bovino na estabilização de argamassas de terra para revestimento. Foi utilizado excremento seco e moído e, após ser adicionado a argamassa, a mistura foi deixada fermentar por 72 horas, tal como em Millogo *et al.* (2016). A terra utilizada, também da Burkina Faso, foi seca na estufa à 105°C e moída

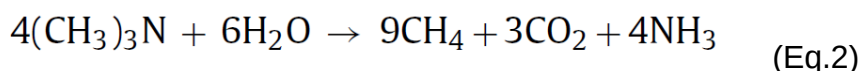
até que todo o material obtivesse diâmetro inferior a 5 mm. A composição granulométrica final foi 16% de areia grossa, 34% de areia fina, 10% de silte e 40% de argila (predominância de caulinita). Os resultados mostraram aumento em torno de 30% na Rc e na Rf com a adição de 6% de excremento; e aumento da resistência à água (através do ensaio de erosão com spray de água) proporcionalmente ao aumento da adição de excremento. Além disso, também foi evidenciado que essa adição contribui para o adobe equilibrar a umidade do ar e melhorar o conforto térmico e acústico dos ambientes, através dos ensaios de absorção por capilaridade, análise de porosidade e condutibilidade térmica. A redução da condutibilidade térmica foi atribuída a presença das fibras vegetais presentes no excremento bovino, que são ricas em celulose e possuem propriedades isolantes termicamente. E a redução da porosidade e o aumento da resistência mecânica e da resistência em relação ao contato com água foram atribuídos aos silicatos de amina insolúveis.

Para identificar como o excremento reage com a matriz argilosa, foi realizada a caracterização por Difração de Raios X (DRX) dos corpos de prova com e sem excremento. Este método identifica apenas compostos cristalinos (minerais); já compostos amorfos (orgânicos) não são detectados. Não foi detectada a formação de novos compostos cristalinos, mas a presença de caulinita e quartzo (ricos em silicatos) diminuíram, o que indica que a argila (caulinita) e a fração mais fina da areia (quartzo solúvel em meio básico) reagiram com o excremento.

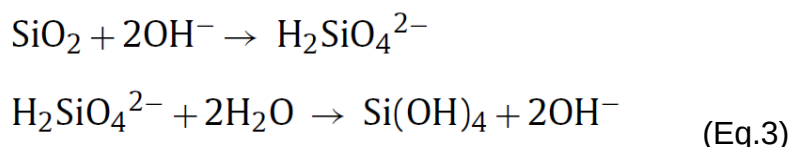
Millogo *et al.* (2016) explicam que, em solução aquosa, compostos orgânicos de amina (RNH_2 sendo “R” um radical orgânico) como os que estão contidos no excremento, produzem um composto catiônico (composto com carga positiva que tem propriedades hidro-repelentes e que tem capacidade de se aderir em superfícies) pela equação 1.



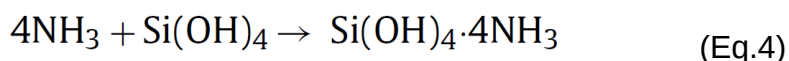
Gashaw *et al.* (2014) *apud in* Bamogo *et al.* (2020) explicam que o excremento contém amina e, em geral, trimetilamina, $(\text{CH}_3)_3\text{N}$. Por um processo bioquímico na presença de bactérias, a fermentação da trimetilamina contida no excremento bovino induz a formação de metano, dióxido de carbono e amônia de acordo com a equação 2.



Como a argila e o quartzo fino são solúveis em meio básico, e durante o período de secagem do adobe com excremento registrou-se no corpo de prova um pH alcalino (pH 12), a solubilização do quartzo fino produziu ácido silícico, Si(OH)_4 , através da equação 3.



Assim, a partir disso, Millogo *et al.* (2016) e Bamogo *et al.* (2020) deduziram que a amônia (composto orgânico da amina) gerada pela fermentação da trimetilamina reagiu quimicamente com o ácido silícico, resultando em um novo composto, identificado como silicato de amina insolúvel ($\text{Si(OH)}_4 \cdot 4\text{NH}_3$) através da equação 4.



Esta reação (e o novo composto formado) uniu as partículas isoladas na matriz do solo, resultando em adobes com maior resistência mecânica e resistência à água. Millogo *et al.* (2016) explicam que o novo composto possivelmente formado, provavelmente é amorfo e/ou presente em pequenas quantidades (<2% em peso) e por isso não foi detectado pelo DRX.

A amina é um composto orgânico que contém um ou mais radicais ligados ao nitrogênio e é frequentemente utilizada como coletor aniônico na flotação de silicatos (Filippov *et al.* 2012; Papini *et al.* 2001; Mendes *et al.* 2018), além de também ser bastante usada na produção de sabão, sabonetes e shampoo para reduzir a sensibilidade à água, o que reforça o argumento.

Bamogo *et al.* (2020) também explicam que a molécula de silicato de amina comporta-se como um adesivo devido aos pares de elétrons livres nos átomos de oxigênio e especialmente nos átomos de nitrogênio; e que este caráter adesivo da molécula pode melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos rebocos de terra.

Rao et al. (2020), Rao et al. (2021) e Rao (2023)

Apesar das publicações de Rao et al. (2020; 2021) não terem sido realizadas especificamente para a produção de elementos para construção com terra, mas para estabilização de solos instáveis, as conclusões são aplicáveis às argamassas de terra para construção com terra. Já no livro “*Stabilization of Earthen Building Materials by Select Native Binders*” (Rao, 2023) são apresentados uma série de estudos, discutindo com os resultados de outras publicações, sobre os efeitos de adições naturais com efeito estabilizante em argamassas para produção de elementos da construção com terra (adobe e revestimentos).

Antes de apresentar estes estudos, é preciso destacar uma diferença entre dois procedimentos utilizados. Millogo et al. (2016) e Bamogo et al. (2020) fermentaram a argamassa com a adição de excremento ainda fresca, logo após misturar os componentes. Primeiramente, foram misturados terra, água e excremento. Em seguida, a mistura foi colocada em um recipiente plástico fechado hermeticamente para fermentar a argamassa durante 72 horas. Após este período, o recipiente foi aberto e os corpos de prova foram moldados imediatamente e deixados secar às condições naturais do ambiente do laboratório (60% de UR e 30°C de temperatura).

Já Rao et al. (2020; 2021) moldaram os corpos de prova cilíndricos, com comprimento de 76 mm e diâmetro de 38 mm, imediatamente após misturar os componentes da argamassa: argila (caulinita), areia, água e excremento. Depois que os corpos de prova secaram por algum tempo (não informado) nas condições naturais do ambiente do laboratório até que obtivessem a densidade de 1,6 g/cm³, estes corpos de prova foram desmoldados e embalados individualmente com plástico filme e colocados dentro de dessecadores de vidro (para reduzir o contato com o ar atmosférico) com água no compartimento inferior do dessecador para evitar perda de umidade. Estes corpos de prova foram então desembulhados (para serem utilizados no ensaio de resistência à compressão - R_c) após diferentes tempos: 0 (imediatamente após o desmolde), 7, 14, 28, 56, 80, 120 dias. A este processo, Rao et al. (2020; 2021) nomearam de cura húmida dos corpos de prova. No entanto, apesar de, por definição, a fermentação só ocorrer na ausência de oxigênio, após serem embalados individualmente com plástico filme, proporcionou-se aos corpos de prova um ambiente

em micro aero filia (com pouco contato com oxigênio) e que por isto, é possível afirmar que tenha ocorrido fermentação durante a cura úmida dos corpos de prova.

Dito isto, Rao *et al.* (2020) (referência trazida na seção 2.1.4. sobre adições microbiológicas) já havia detectado que há no excremento bovino, tanto bactérias capazes de promover biocimentação por MICP (mediante a adição de sais de nitrato de cálcio e óxido de magnésio), como bactérias capazes de promover biocimentação por secreção de EPS e formação de biofilmes compostos por partículas de solo (argila e quartzo) e fibras vegetais (provenientes do excremento) aglomerados por EPS.

No referido estudo, a argamassa com adição de excremento e com sais para promover MICP, apresentou um aumento 28-37% maior na Rc em relação a argamassa apenas com a adição do excremento sem a adição de sais para MICP (onde ocorreu apenas a biocimentação por EPS). Em Rao *et al.* (2020) também foi constatado que o processo de fermentação em cura úmida dos corpos de prova, aumentou ainda mais os efeitos causados pela biocimentação por MICP, sendo o período de ao menos 7 dias suficiente para elevar expressivamente a resistência dos corpos de prova.

Posteriormente, em Rao *et al.* (2021), para otimização dos efeitos causados pela adição de excremento, os pesquisadores se dedicaram a avaliar a influência da fermentação em cura húmida dos corpos de prova na intensificação da produção de EPS. Com a maior produção de EPS (que de fato foi constatada) causada pela fermentação em cura húmida (0, 7, 14, 28, 56, 80 e 120 dias) dos corpos de prova, foi possível realizar uma caracterização mais precisa dos mecanismos de reação/interação entre os componentes do excremento e das argamassas de terra e o processo de biocimentação causado pelo EPS na matriz de solo/terra.

Rao *et al.* (2020; 2021) utilizaram água “ultra pura” (como referido pelos pesquisadores) na proporção de 21% (água / materiais sólidos) e ao invés de usar uma amostra de solo/terra natural, optaram por produzir uma argamassa com areia e argila (caulinita) secas em estufa, usando o traço 1:1 (caulinita:areia), e a adição de 10% (em massa) de excremento seco e moído (em pó) passado na peneira com malha # 2 mm. Para avaliar os efeitos da fermentação em cura úmida dos corpos de prova nas propriedades físicas e mecânicas, Rao *et al.* (2021) realizaram o ensaio de resistência a compressão. Para avaliar o crescimento de bactérias produtoras de EPS

e mecanismos de aglomeração de EPS com partículas de solo/terra, foram realizados estudos micro estruturais e o monitoramento de mudanças nos parâmetros bioquímicos de amostras das argamassas com adição de excremento. As imagens geradas utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram usadas para observar as estruturas formadas nas argamassas com e sem adição de excremento.

O gráfico apresentado na Figura 22 mostra que, em Rao *et al.* (2021), o corpo de prova com adição de excremento bovino que não passou pela cura úmida (tempo 0), apresentou Rc 300% maior em relação a argamassa sem adição de excremento. Este aumento foi o maior entre todas as referências encontradas, maior inclusive que o aumento observado por Millogo *et al.* (2016). Abaixo de Rao *et al.* (2021), na literatura, o maior aumento na Rc causado pela adição de excremento (na proporção volumétrica de 10%) foi observado por Pachamama *et al.* (2024a), que obteve aumento de 80% (com a argamassa produzida com uma terra areno-siltosa nomeada SSE) sem fermentação da argamassa fresca e sem cura úmida dos corpos de prova. Rao *et al.* (2021) explicam que o enorme aumento na Rc provavelmente se deu devido ao maior teor e qualidade da argila (50% caulinita pura) usado na produção das argamassas.

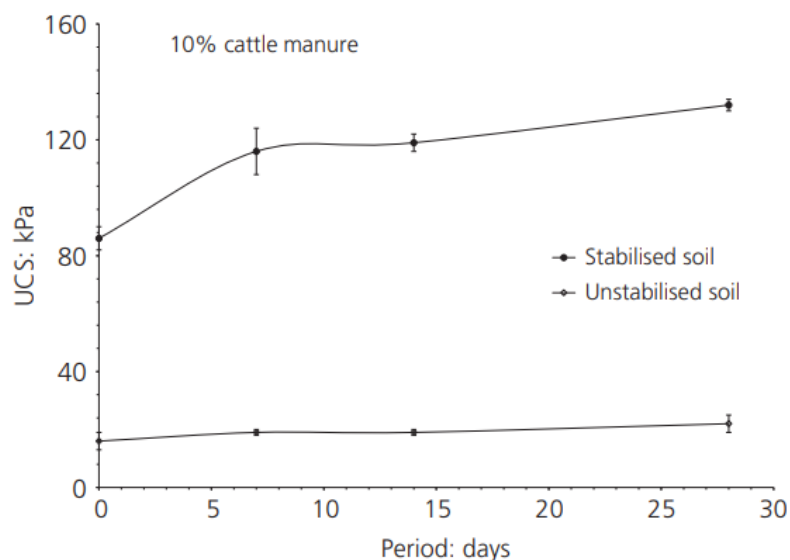


Figura 22. Resistência à compressão por tempo de cura úmida dos corpos de prova da argamassa de terra com (bioestabilizada) e sem excremento bovino. Fonte: Rao *et al.* (2021).

Além disso, Rao *et al.* (2021) observou que o processo de fermentação em cura úmida dos corpos de prova de argamassa de terra com adição de excremento, potencializou os efeitos causados em relação a Rc. No gráfico apresentado na Figura 22 também é

apresentado que os corpos de prova com adição de excremento que passaram pelo processo da cura úmida por 7 dias (tempo 7), apresentaram um aumento ainda 50% maior em comparação aos corpos de prova com adição de excremento que não passaram pela cura úmida (tempo 0). Este comportamento continuou a ser observado e a R_c aumentou proporcionalmente a quantidade de dias de cura úmida até os 28 dias (tempo 28) (Figura 22).

Estes resultados evidenciam e reforçam a compatibilidade entre a argila caulinita, muito presente em solos tropicais, com os microrganismos presentes no excremento bovino, assim como observado por Millogo *et al.* (2016).

Para identificar as mudanças na microestrutura da matriz estrutural das argamassas de terra que ocorreram com a adição de excremento bovino, Rao *et al.* (2021) apresentam imagens com MEV das argamassas com e sem adição de excremento, onde é possível observar a matriz de solo/terra-excremento-EPS formada. Na Figura 23 é apresentada a imagem de MEV da argamassa sem adição de excremento, apenas com caulinita e areia, onde é possível observar partículas de areia revestidas por plaquetas de caulinita e aglomerados independentes de caulinita.

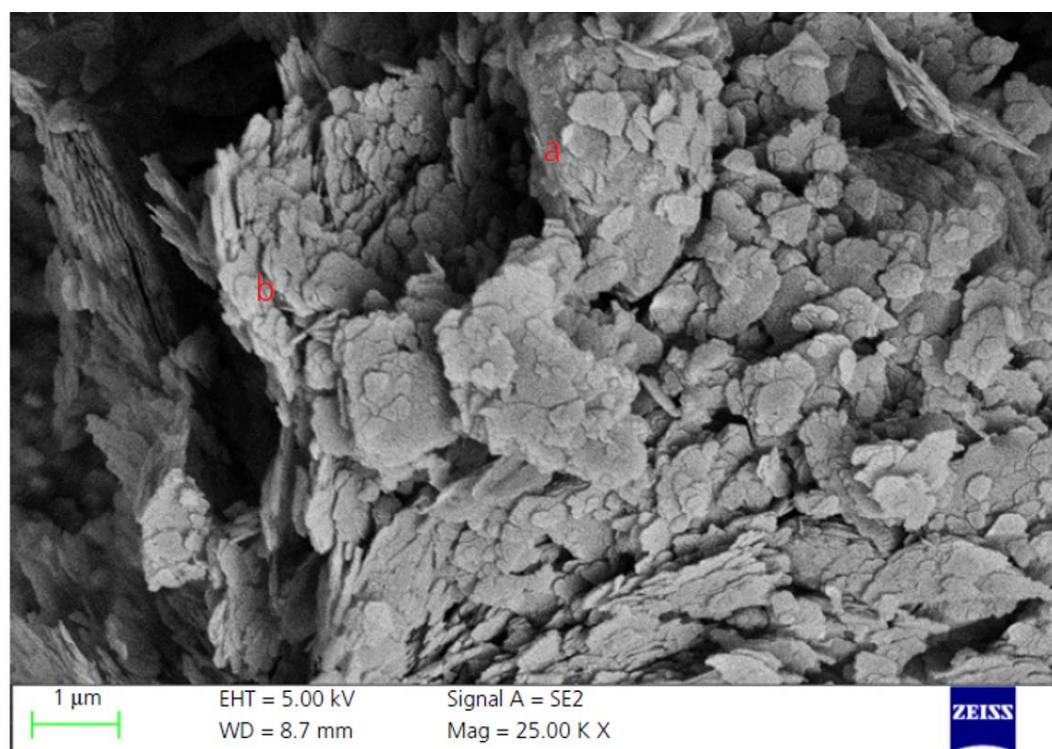


Figura 23. MEV da amostra de solo não estabilizado: (a) partículas de areia revestidas com plaquetas de caulinita; (b) aglomerados independentes de caulinita. Fonte: Rao *et al.* (2021).

Na Figura 24 é apresentada uma imagem de MEV dos corpos de prova da argamassa com adição de excremento após 28 dias em cura úmida. Nesta imagem, apesar de a aproximação ser quatro vezes menor, é possível notar uma diferença na matriz da argamassa após estar agregada por maior quantidade de EPS.

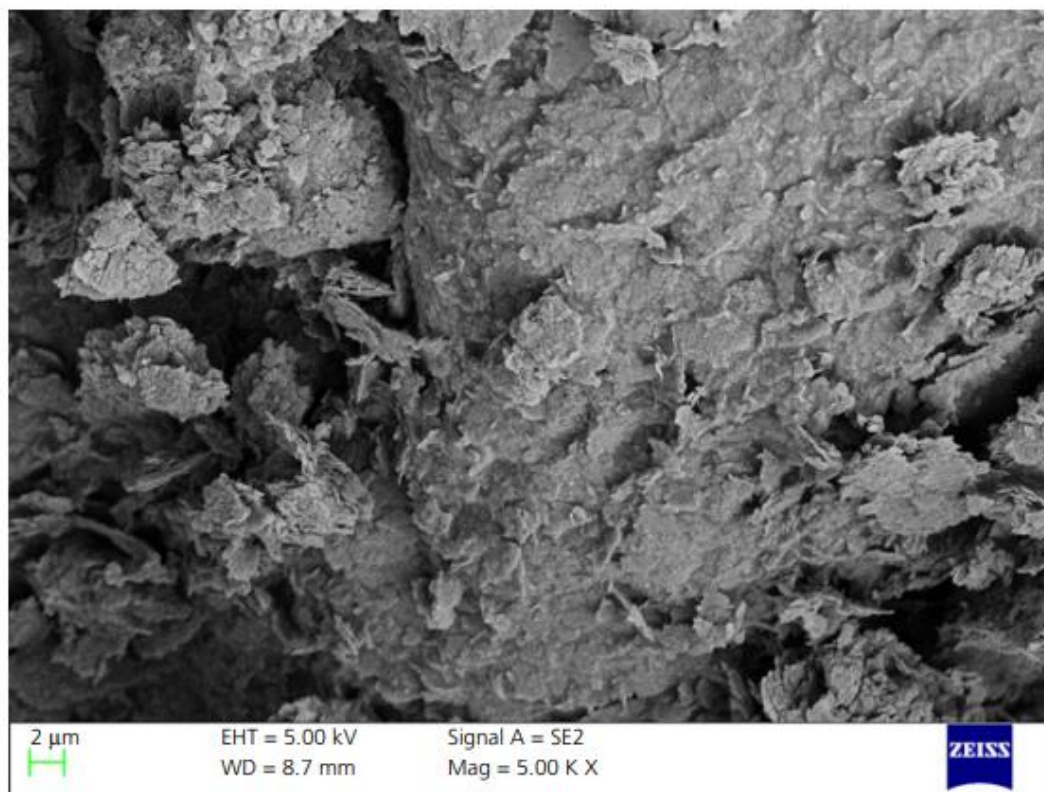


Figura 24. MEV da argamassa com adição de excremento após cura úmida por 28 dias mostrando a argila e a areia agregadas por EPS. Fonte: Rao *et al.* (2021).

Já na Figura 25, desta vez com maior aproximação, é apresentada uma imagem de MEV aos 80 dias de cura úmida dos corpos de prova das argamassas com adição de excremento. Devido ao maior tempo de cura úmida e consequente aumento da produção de EPS, nessa imagem é possível visualizar mais nitidamente as bactérias cobertas por secreções de EPS, enquanto outras estão envoltas/revestidas por placas hexagonais de caulinita. Também é possível identificar a formação de biofilme com bactérias, aglomerados de caulinita e fibras.

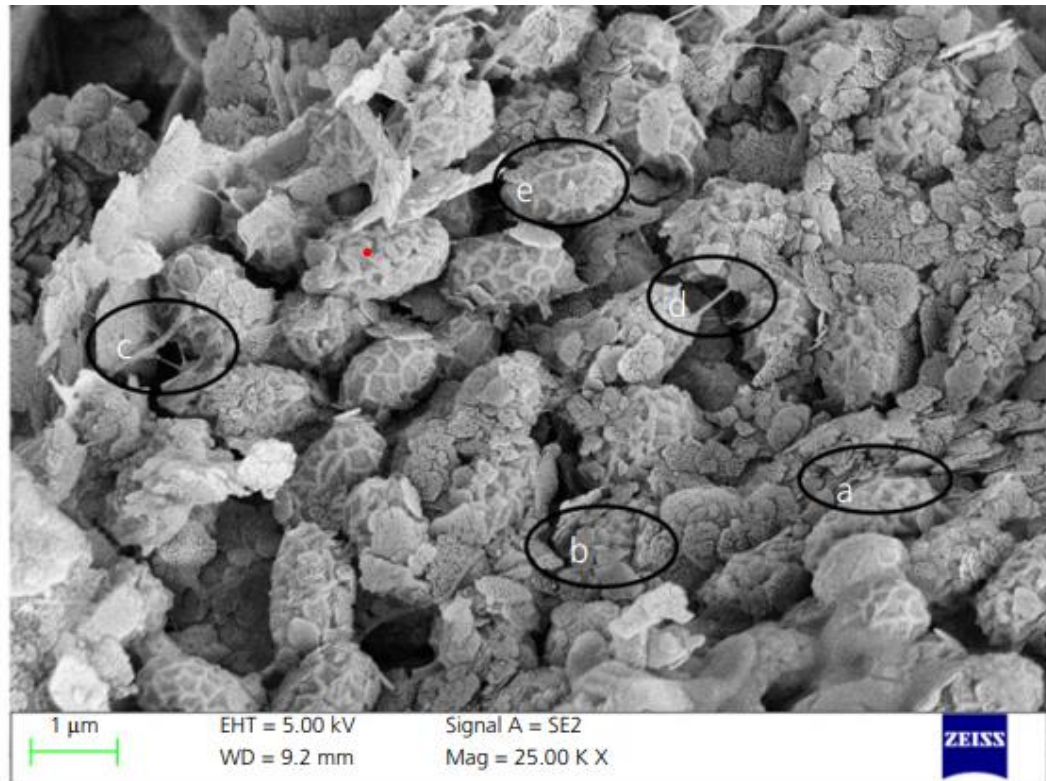


Figura 25. MEV da amostra de argamassa com excremento bovino após 80 dias de cura úmida: (a) bactéria coberta por EPS; (b) bactéria coberta com placas de caulinita; (c) pontes de biofilme entre bactéria e aglomerados de caulinita; (d) pontes de biofilmes entre bactérias cobertas; (e) forma de bastão da bactéria. Fonte: Rao *et al.* 2021

Nas Figuras 26 e 27 são apresentadas duas imagens de MEV do corpo de prova da argamassa com adição de excremento que não passaram pela fermentação em cura úmida, ou seja, logo no dia 0. Nestas imagens, é possível observar as fibras vegetais presentes no excremento envoltas/embebidas por partículas de caulinita (Figura 26); e as fibras entre partículas de areia (Figura 27) construindo pontes de ligação fibrosa entre aglomerados de argila-areia-EPS. Estas imagens evidenciam como as fibras vegetais também contribuem para fortalecer a matriz estrutural da argamassa. Embasados nisso, e nos resultados de R_c , Rao *et al.* (2021) afirmam que a presença das fibras vegetais contribui na redução da retração e no aumento da resistência mecânica das argamassas. Além disso, passivamente também contribuem para maior aderência do revestimento à parede, uma vez que reduzem a retração e constituem pontes fibrosas embebidas em argila e EPS, entre a parede e o reboco.

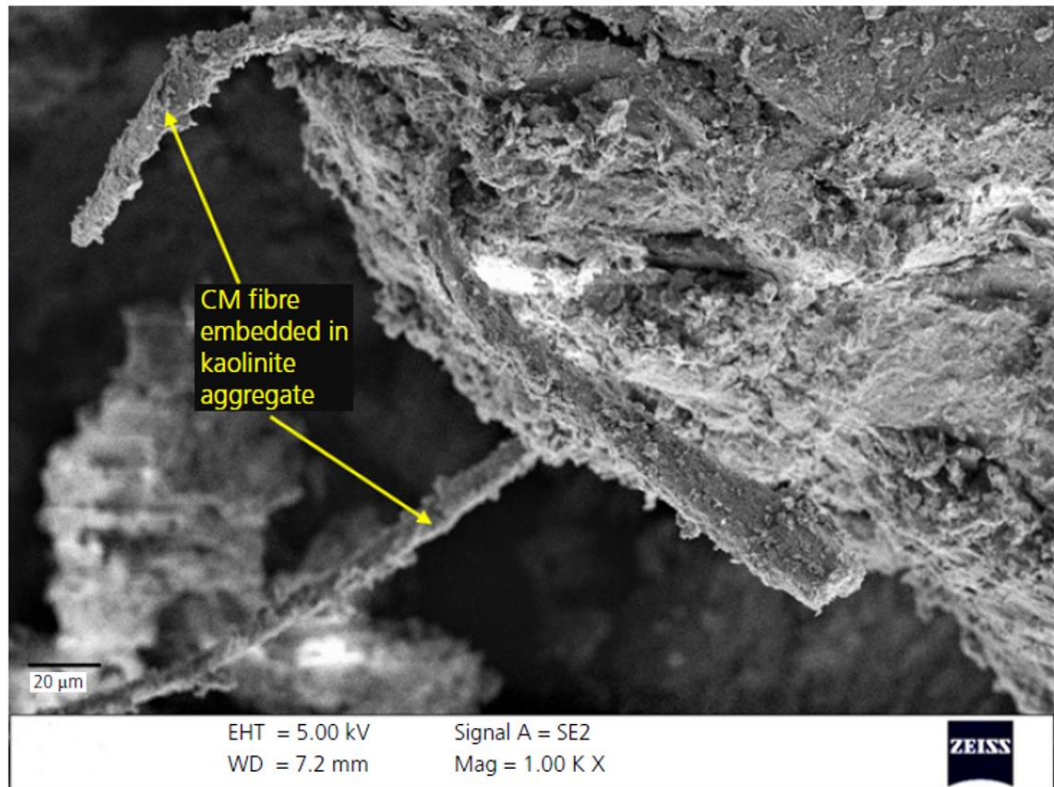


Figura 26. MEV do corpo de prova de argamassa com a adição de excremento sem fermentação em cura úmida (0 dias) mostrando fibras do excremento embebidas/envolvidas por caulinita. Fonte: Rao *et al.* (2021).

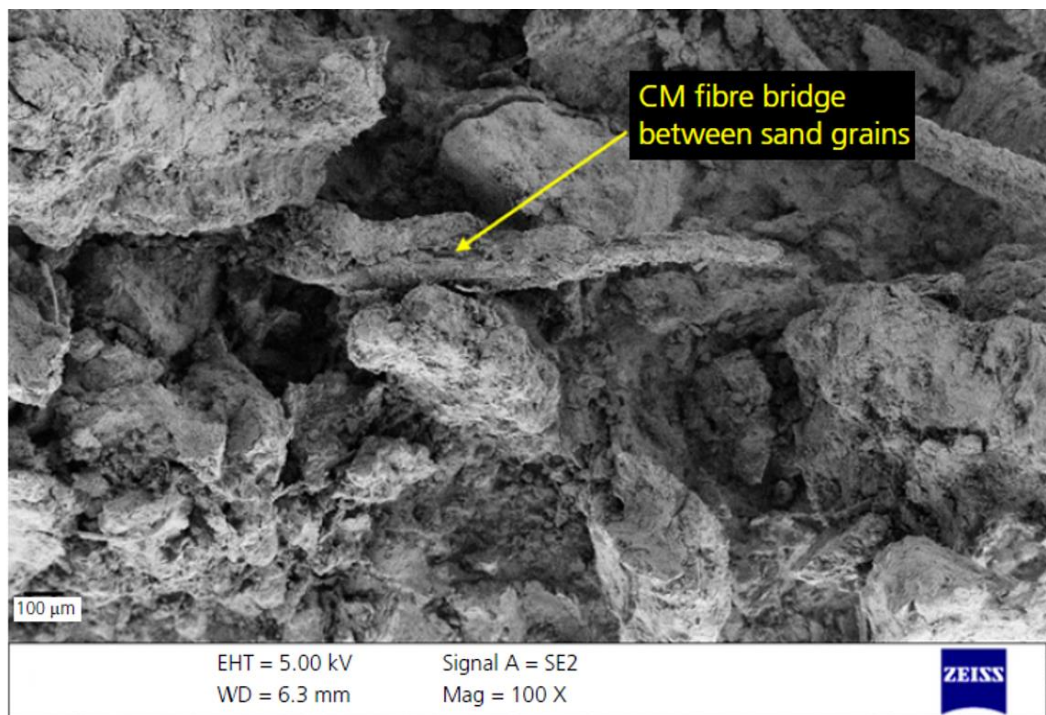


Figura 27. MEV do corpo de prova de argamassa com a adição de excremento sem fermentação em cura úmida (0 dias) mostrando fibras do excremento entre partículas de areia (fazendo pontes fibrosas e conectando agregados minerais). Fonte: Rao *et al.* (2021).

De acordo com os resultados dos ensaios anteriores, somado à análise da porosidade da estrutura da argamassa de terra com e sem a adição de excremento, Rao *et al.* (2021) observaram que a biocimentação por EPS preenche os poros na estrutura do solo/terra e envolve as partículas de argila e areia formando uma massa homogênea/aglomerada, o que causa dureza, resistência mecânica, redução da retração e maior aderência da argamassa. Além disso, a biocimentação por EPS também pode estar relacionado à capacidade de reduzir a absorção de água, devido ao preenchimento dos poros.

Mistry *et al.* (2020) *apud in* Rao *et al.* (2021) explicam que a presença das fibras vegetais, embutidas entre os aglomerados de argila e areia, mobilizam a resistência interfacial entre as unidades minerais, fazendo com que as fibras presentes no excremento potencializem os efeitos de biocimentação promovidos pelo EPS em relação ao aumento da resistência mecânica observada. Além disso, segundo Rao *et al.* (2021), o maior teor de agregados finos também otimiza resultados de biocimentação por EPS.

Para explicar as mudanças bioquímicas que ocorreram nos corpos de prova que passaram pela cura úmida, outros ensaios foram realizados para caracterização da matriz de solo/terra-excremento-EPS. Os resultados dos ensaios de caracterização bioquímica e da Espectrometria no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) mostraram que, após 28 dias de cura úmida dos corpos de prova com adição de excremento, a quantidade de aminos, celulose e açúcares ribose, diminuem ao mesmo tempo em que aumentam a quantidade de EPS secretado por bactérias anaeróbicas e aeróbicas facultativas e de um “novo composto” formado: um biofilme composto por partículas de solo/terra e fibras, agregadas por EPS (que possui carga negativa e atrai estas partículas). Estes dois resultados indicam que as fibras vegetais foram decompostas pelas bactérias como fonte de energia/carbono para produzir EPS.

A partir destes resultados, Rao (2023) concluiu que a “cola microbiana” (material agregador) e os silicatos de amina insolúveis referidos por Millogo *et al.* (2016) e Bamogo *et al.* (2020), provavelmente correspondem ao EPS e aos biofilmes formados, compostos por argila, quartzo fino e fibras vegetais, ricos em EPS, que foram identificados em Rao *et al.* (2021).

Discussão complementar

O processo de fermentação em cura úmida por 7 dias dos corpos de prova cilíndricos de caulinita com areia (1:1) com adição de 10% de excremento (Rao *et al.* 2020;2021) foram eficientes para otimizar a produção de EPS e aumentar em mais de 300% a resistência à compressão em relação a argamassa de referência, sem excremento. Já o processo de fermentação da argamassa ainda fresca com adição de 3% e 6% de excremento, antes de moldar os adobes ou aplicar a argamassa na parede como reboco (Millogo *et al.* 2016; Bamogo *et al.* 2020), aumentou a resistência ao contato com água e causou aumento na resistência à compressão em aproximadamente 30% (Millogo *et al.* 2016; Bamogo *et al.* 2020). Para além disso aumentou a resistência à flexão em 30% em Bamogo *et al.* (2020) e em 133% em Millogo *et al.* (2016), usando terras diferentes.

Analizando estes resultados, a fermentação em cura úmida dos corpos de prova parece ser mais eficiente do que a fermentação da argamassa fresca antes de moldar os corpos de prova. No entanto, seria bastante complicado fazer uma cura úmida em micro aero filia de revestimentos depois de aplicados na parede. Neste sentido, considerando que as bactérias decompõe as fibras vegetais como fonte de energia e que as fibras vegetais contribuem para o aumento da resistência das argamassas com adição de excremento bovino (Rao *et al.* 2020), possivelmente adicionar junto ao excremento bovino, fibras vegetais moídas, para repor as fibras degradadas pelas bactérias (cujo fruto é a produção/secreção de EPS), poderia potencializar ainda mais os efeitos positivos nas argamassas de terra quando fermentadas frescas (antes de aplicação como reboco ou de produzir os adobes). Além disso, Rao (2023) também recomenda que a mistura da argamassa em fermentação deve ser mantida com o menor contato possível com oxigênio e revirada o mínimo possível antes da aplicação do revestimento ou moldagem dos adobes, para não danificar as ligações entre terra-fibras-EPS ainda frescas.

Para produção de adobe, Rao (2023) recomenda que sejam usados métodos para diminuir a perda de água durante os primeiros 7 dias após a produção: por exemplo, cobrir os adobes com um pano úmido (ou uma lona plástica) e que sejam deixados secar a sombra (assim como é recomendado fazer com blocos de solo-cimento para a hidratação na cura do cimento).

Kulshreshtha et al. (2022)

Kulshreshtha et al. (2022) se propuseram tentar explicar o que causa o efeito hidró-repelente em blocos de terra pela adição de excremento bovino. As conclusões do trabalho foram tiradas a partir de blocos de terra comprimidos produzidos sem adição de areia, mas com adição de excremento na proporção de apenas 2% (em massa). Essa foi a menor proporção de excremento adicionada dentre todas as investigações encontradas. Foram realizados ensaios específicos para caracterização do excremento.

Os autores utilizaram uma terra cuja composição granulométrica é 15% de argila (com predominância de esmectita), 17% de silte e 68% de areia. O excremento foi coletado fresco em uma fazenda de criação orgânica de bovinos. Ao chegar no laboratório o material foi peneirado (63 μm) com o objetivo de separar apenas as fibras. O material restante, foi então centrifugado para separar um material líquido com o que estava em suspensão (sobrenadante), e um material pastoso que ficou precipitado. Assim foi possível mensurar que o excremento estudado possui, em massa, 42% de fibras e 58% de líquidos com aglomerados microbianos, dos quais 34% possuem entre 1 e 63 μm (por isto chamados de aglomerados microbianos de tamanho médio - MSMA) e 24% possuem entre 0,5 e 0,7 μm (por isto chamados de aglomerados microbianos de tamanho pequeno - SSMA). A Figura 28 ilustra este processo.



Figura 28: Extração de componentes a partir de excremento bovino fresco. As frações SSMA e MSMA são de aglomerados microbianos de tamanho pequeno e médio respectivamente, do inglês small-sized microbial aggregates (SSMA) e medium-sized microbial aggregates (MSMA), respectivamente. Fonte: Kulshreshtha et al. (2022).

Para comparar os efeitos causados pela adição isolada de cada um deles, foram formuladas um corpo de prova como referência (sem excremento), outro com adição de 2% (em massa) de excremento bovino integral e outros com cada um dos três componentes adicionados separadamente na proporção equivalente aquela contida na proporção de 2% (em massa) de excremento integral (*in natura*).

Para produção dos corpos de prova, foi adicionada água para amassadura (17% em relação a massa de terra) e as argamassas foram deixadas em um recipiente metálico tampado para fermentar por cinco dias. Após esse período, os recipientes foram destampados e as argamassas foram colocadas em formas de 4 cm x 4 cm x 4 cm e prensadas com força de 2,5 MPa para preparar corpos de prova de blocos de terra comprimida.

Para avaliar a resistência à água destes blocos, foi realizado o ensaio de imersão em água. Os resultados evidenciaram que os corpos de prova com adição dos SSMA obtiveram os melhores resultados, sendo esta fração líquida com microrganismos em suspensão a apontada pelos pesquisadores como responsável pelo aumento da durabilidade dos corpos de prova em contato com a água (Figura 29).

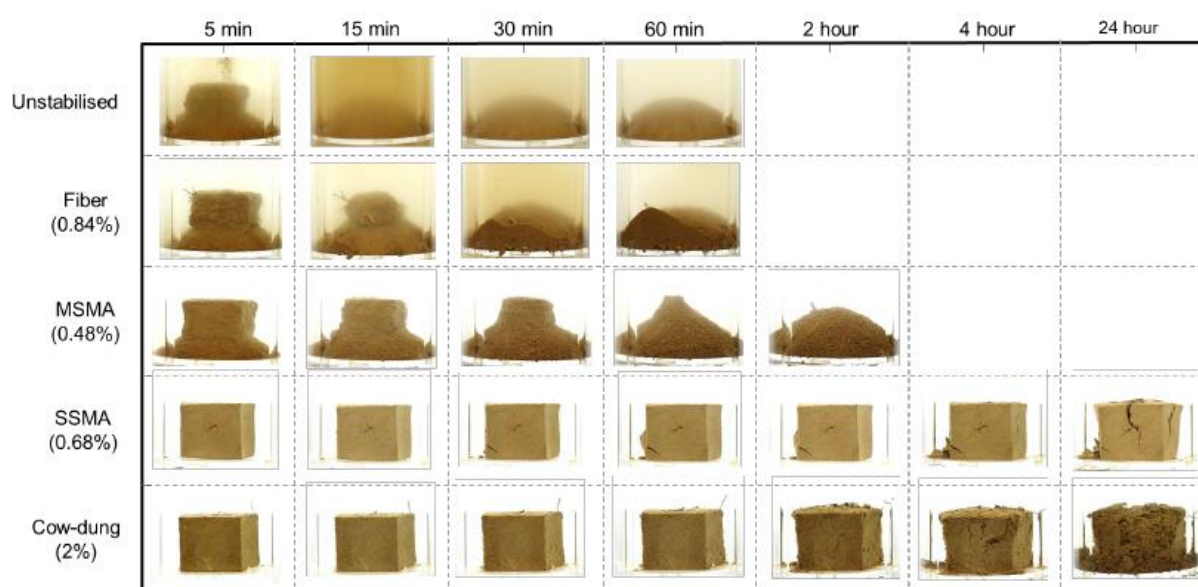


Figura 29. Resultado do ensaio de imersão em água de blocos de terra comprimidos estabilizados com a proporção (em massa) de cada material adicionado aos blocos indicada. Fonte: Kulshreshtha *et al.* (2022).

A fração líquida com o sobrenadante (SSMA) foi caracterizada através dos ensaios de cromatografia gasosa, porosimetria de intrusão de mercúrio, área superficial N₂- BET, medição de potencial zeta e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

“Os resultados indicaram que os aglomerados microbianos de pequeno porte são compostos de partículas carregadas negativamente do tamanho de argila, ricas em ácidos graxos de cadeia curta, média e longa. Os ácidos graxos de cadeia curta no intestino de um bovino são produzidos através da digestão das fibras alimentares pelas bactérias intestinais. Um dos ácidos graxos dominantes, o ácido octadecanóico, tem sido usado com nano partículas de sílica para preparar revestimentos super higrofóbicos resistentes à água (Heale et al. 2018)”. (Kulshreshtha et al. 2022)

Para confirmar a sua ação higrofóbica, os SSMA foram desidratados a 80°C e moídos. Então pingou-se uma gota de água sobre o material em pó e mesmo após uma hora, a gota não foi capaz de penetrá-lo (Figura 30). As gotas de água apresentaram a tendência de deslizar e “escapar” do SSMA ao cair sobre ele. Após várias tentativas, uma gota estável pôde ser obtida com um ângulo de contato de cerca de 120°. A partir da hidrofobicidade observada no pó de SSMA, Kulshreshtha *et al.* (2022) concluiu que o comportamento de resistência à água dos blocos de terra comprimida com a adição de excremento bovino está possivelmente relacionado as propriedades hidrofóbicas dos aglomerados microbianos de pequeno porte, especialmente devido aos ácidos graxos de cadeia curta presentes na composição.

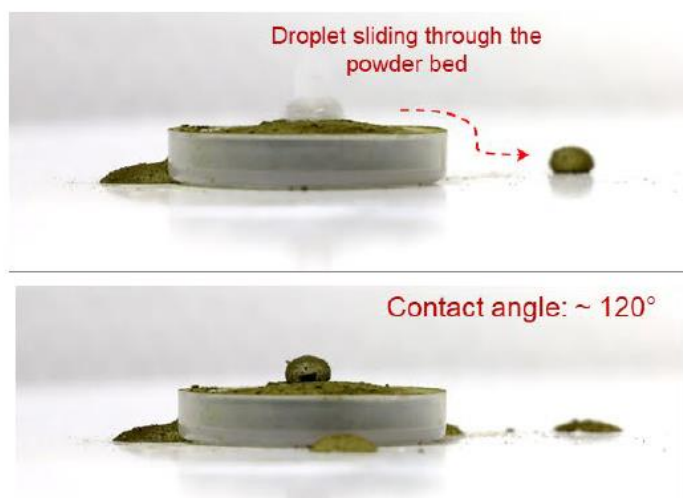


Figura 30. Hidrofobicidade observada no pó de SSMA mediante aplicação de uma gota de água. Fonte: Kulshreshtha *et al.* (2022).

Baseado na investigação aplicada em blocos de terra comprimida, o estudo conclui recomendando que se retire, ao menos com o auxílio de uma peneira, as fibras vegetais presentes no excremento antes de usá-lo, visando aumentar a resistência à água. A preocupação dos pesquisadores é compreensível, pois ao ter contato com água, e absorvê-la por capilaridade, as fibras podem ter seu volume expandido e abalar a estrutura interna do material. No entanto, as fibras contribuem para a redução da retração e contribuem para o aumento do isolamento térmico e acústico, conforme os estudos apresentados na seção 2.1.2. sobre adições de fibras vegetais e nas conclusões de Bamogo *et al.* (2020). Além disso, segundo Rao (2023) e Rao *et al.* (2021), as fibras são fundamentais para a resistência mecânica, e fundamentais como fonte de energia/carbono para os microrganismos.

A adição de excremento *in natura* (sem retirar as fibras), apresentou menor durabilidade no ensaio de imersão possivelmente devido ao fato dos corpos de prova serem comprimidos. Ao imergir os blocos comprimidos em água, naturalmente, as fibras podem ter absorvido alguma umidade por capilaridade e expandiram de volume, o que ocasionou o colapso do corpo de prova compactado. Afinal, este comportamento não foi observado em nenhuma outra pesquisa sobre a adição de excremento na produção de adobe e de revestimentos. Portanto, possivelmente, a sugestão de Kulshreshta *et al.* (2022) de retirar as fibras do excremento antes de adicioná-lo nas argamassas de terra, só se aplica para produção de blocos de terra comprimida. No entanto, vale lembrar que Yalley & Dorothy (2013) também avaliaram o efeito da adição de excremento bovino em blocos de terra comprimida e observaram que a adição de excremento na proporção de 20% aumentou a resistência a compressão em 25% e reduziu a absorção de água após 10 minutos de imersão em água.

Por fim, retirar as fibras do excremento para adição em argamassas para produção de blocos de terra e revestimentos para construção é uma tarefa bastante complicada e trabalhosa para ser realizada artesanalmente, que parece exagerada e precipitada, uma vez que as conclusões foram tiradas a partir de uma adição muito baixa de excremento (2% em massa).

Outra conclusão apresentada por Kulshreshtha *et al.* (2022) é que se utilize o excremento o mais fresco possível. Esta conclusão foi obtida a partir da comparação da performance no ensaio de imersão em água, entre um corpo de prova produzido

com adição de excremento fresco e outro com adição do excremento seco na mesma proporção, 2%. Apesar de não ser especificamente detalhado, ao ler o artigo entende-se que o excremento seco foi desidratado em estufa a 80°C. O corpo de prova com adição de excremento seco se desmanchou em menos de 60 minutos de imersão em água, enquanto o corpo de prova com adição do excremento fresco ainda não havia se desmanchado em 24 horas. Talvez, a baixa proporção de excremento adicionada tenha proporcionado tamanha disparidade de comportamento.

A partir da comparação da dimensão dos SSMA em suspensão na fração líquida do excremento fresco e da dimensão dos SSMA depois de desidratado (a 80°C) e moído, os pesquisadores observaram que, quando o SSMA fresco foi seco e moído, o diâmetro médio do material foi aproximadamente 10 vezes maior que o SSMA fresco em suspensão. Por isto afirmam que quanto mais fresco, mais micropartículas e microrganismos vivos estão soltos (desagregados), devido a sua dimensão reduzida.

No entanto, após ser desidratado a 80°C e moído, podem ter ocorrido outras mudanças bioquímicas nos aglomerados microbianos. Portanto, usar como argumento o fato da dimensão dos SSMA desidratados e moídos terem aumentado depois de passar por esse processo, também parece inadequado. Apesar disso, os pesquisadores reforçam o argumento com uma explicação que converge com Millogo *et al.* (2016) e Rao *et al.* (2021). Kulshreshta *et al.* (2022) explicam que à medida que o excremento seca, estas moléculas vão se coagulando e aglutinando a matéria seca presente no excremento (fibras vegetais, microrganismos, resíduos da digestão e do trato intestinal), tal como a formação de biofilme por EPS explicado por Rao *et al.* (2021). Com isto, à medida que secam e se formam aglomerados maiores no excremento antes de ser adicionado a argamassa, reduz-se significativamente o potencial de aglomerar/unir mais partículas de argila e quartzo fino soltas na argamassa.

A conclusão de Kulshreshta *et al.* (2022) é que os aglomerados microbianos de pequeno tamanho (SSMA), ricos em ácidos graxos de cadeia curta, são os responsáveis pelo efeito de repelência à água causado nos blocos de terra comprimida, ou seja, aumentar a resistência da argamassa ao contato com a água.

2.2.10. Identificação das lacunas no campo de pesquisa sobre o tema

Os mecanismos de reação entre o excremento e a terra parecem bem explicados, apesar disso, ainda são necessários mais ensaios com diferentes terras para traçar tendências de comportamento mediante a influência da composição mineralógica e granulométrica, além de também ser necessário entender melhor a função das fibras vegetais e as interações entre os microrganismos, suas vias metabólicas e a terra.

Já em relação aos as propriedades físicas e mecânicas das argamassas bioestabilizadas, não foi ainda investigado se a adição de excremento bovino compromete a reversibilidade da propriedade aglutinante da argila, prejudicando o potencial de reciclagem das argamassas, nem a influência da alimentação dos bovinos (pasto ou ração), e nem feita a comparação com os efeitos causados pela adição de fibras e de cal usando a mesma argamassa de referência (mesma terra e proporção de areia).

Também não foi ainda comparado no mesmo estudo e com campanha experimental vasta (com ensaios de retração, condutibilidade térmica, higroscopicidade, resistência à flexão, à compressão, à aderência e ao contato com água por imersão e erosão por gotejamento), realizado com a mesma terra e com o mesmo excremento, com as detalhadas informações de teor de humidade e densidade: uma avaliação da influência da adição do excremento fresco, seco, *in natura* (integral) ou em pó; a influência da fermentação da argamassa fresca por 72 horas; a influência da proporção da adição. Também não foram avaliados os efeitos da adição de excremento em diferentes proporções causados em diferentes terras, em especial de continentes e climas diferentes.

Por tanto, justificam-se assim os objetivos da presente pesquisa para enriquecer a compreensão do uso do excremento bovino como adição estabilizante na construção com terra e contribuir com a caracterização de um material tão importante na arquitetura vernácula brasileira e de outras regiões no mundo.

3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO

3.1. Campanha experimental

Para atender estas justificativas e objetivos, no presente estudo foram formuladas argamassas de terra produzidas com três terras diferentes, sendo uma do Brasil e outras duas de Portugal, para avaliar os efeitos causados pela adição de excremento bovino em: (i) diferentes proporções (5%, 10%, 20% e 40%); (ii) diferentes condições de integridade física (íntegro *in natura* e moído em pó); (iii) e diferentes idades (fresco, compostado por 7 dias e por 30 dias).

Além disso também foram avaliadas: (iv) a influência do processo de fermentação da argamassa; (v) a influência da alimentação dos animais (pasto ou ração); (vi) se há diferença nos efeitos causados nas argamassas entre usar o excremento coletado já seco no pasto ou usar o excremento coletado fresco no pasto e deixado compostar em recipiente impermeável afim de evitar perda/lixiviação de componentes para o solo; (vii) e se a adição de excremento bovino mantém a reversibilidade da propriedade aglutinante da argila e a possibilidade de reutilização das argamassas.

Foram realizados ensaios com as argamassas de terra para reboco com e sem adição de excremento bovino para avaliar: a retração; a densidade no estado endurecido; a condutibilidade térmica; a higroscopicidade; as resistências à flexão e à compressão; a aderência à alvenaria de adobe e de tijolo cerâmico; a durabilidade quando imersa em água e à erosão por gotejamento.

No capítulo 3 estão apresentadas as seguintes informações, agrupadas por seções:

Na seção 3.2. estão os materiais utilizados, os procedimentos como foram preparados e a sua caracterização;

Na seção 3.3. estão as argamassas formuladas para alcançar os objetivos específicos e os corpos de prova que foram produzidos;

Na seção 3.4. estão a descrição dos ensaios realizados para avaliação das propriedades físicas e mecânicas das argamassas de terra formuladas.

3.2. Materiais utilizados, sua preparação e caracterização

A primeira etapa da pesquisa foi realizada em campo para seleção e coleta de solo, de excremento bovino e de gramíneas no pasto. Em seguida foram adquiridas a areia e a cal. Todos os ensaios com as argamassas e a caracterização dos materiais foram realizados nos laboratórios CERIS – *Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability* do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa (NOVA FCT) e no Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC).

3.2.1. Terras

Optou-se por referir-se ao material como solo, enquanto ele estiver em campo. Depois de peneirado na malha #4,8 mm para retirar agregados mais grossos, e trazê-lo para o laboratório, passou-se a referir-se como terra, quando foi usada para os ensaios de caracterização e para produzir as argamassas de terra no laboratório.

Foram coletadas três amostras de solo sendo uma do Brasil, na cidade de Itabirito no estado de Minas Gerais, e outras duas em Portugal, sendo uma da região metropolitana de Lisboa, na Caparica, e a outra de Monsaraz, próximo à fronteira com Espanha, 200 km a leste de Lisboa. A terra do Brasil (Itabirito) é a mesma que foi usada durante o mestrado do autor (naquele momento referida como terra TAV - Terra Argilosa Vermelha e agora referida como ITA). Optou-se por continuar usando esta mesma terra para somar às informações, caracterizações e ensaios realizados anteriormente. Essa terra foi escolhida por conter elevado teor de argila (70%) caulinita. A terra da Caparica foi escolhida porque contém um tipo diferente de argila, a ilita, muito comum em Portugal, e é mais siltosa. A terra de Monsaraz foi escolhida porque é utilizada sem adição de areia (ou outros componentes) para produzir tijolos maciços artesanais de forma tradicional, com bom desempenho, pelo Telheiro de S. Pedro, localizado em S. Pedro do Corval, no Alentejo, Portugal. As amostras de solo foram peneiradas na malha #4,8 mm e trazidas para o laboratório. As terras obtidas foram nomeadas conforme o nome da sua localização de origem:

- ITA: Terra obtida através do peneiramento do solo de Itabirito (Brasil)
- CAP: Terra obtida através do peneiramento do solo da Caparica (Portugal)
- MON: Terra obtida através do peneiramento do solo de Monsaraz (Portugal)

Para a caracterização física das terras, foram realizados os seguintes ensaios de acordo com as normas especificadas:

- Classificação granulométrica - NBR 7181 (2016); EN 1015-1 (1998)
- Determinação do Limite de Liquidez (LL) - NBR 6459 (2017)
- Determinação do Limite de Plasticidade (LP) - NBR 7.180 (2016)
- Densidade específica dos grãos - NBR 7181 (2016)
- Teor de umidade - NBR 7181 (2016)

A Figura 31 apresenta fotografias tiradas durante o processo de caracterização física das amostras de terra.

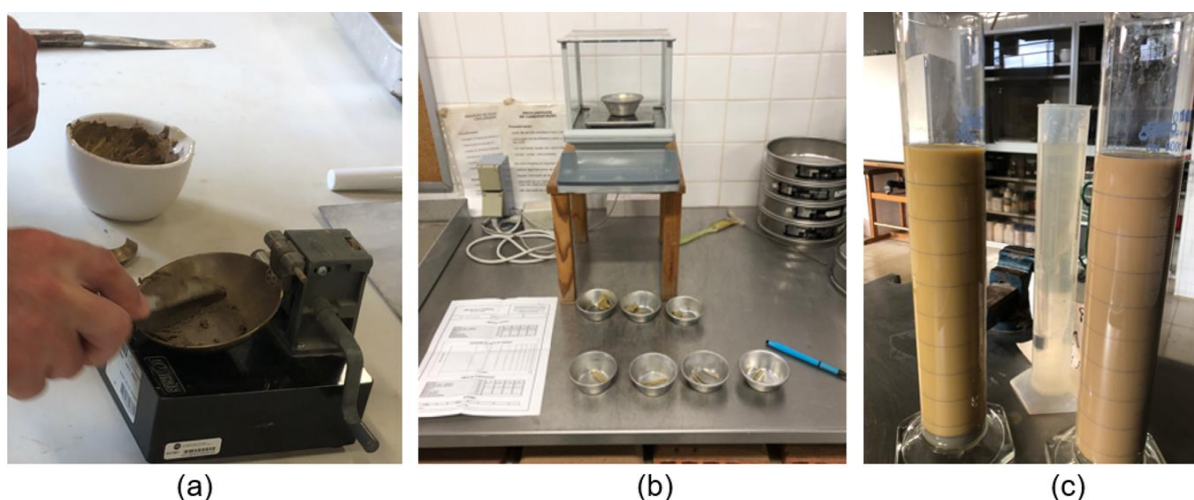


Figura 31. Processos de caracterização das terras: ensaios de Casa Grande (a), Limites de Atterberg (b) e Sedimentação (c).

Para a caracterização mineralógica das amostras de terra, foram realizados os seguintes ensaios:

- Difração por Raios-X (DRX) - Realizado com um difratômetro de raios X *Malvern PANalytical*, modelo AERIS, com radiação Cu K α filtrada por Ni com 40 kV e 15 mA e velocidade de 0,02 °/s variando de 5 a 66° 2 θ .
- Os minerais foram identificados combinando as fases cristalinas com as informações do Centro Internacional de Arquivos de Difração de Pó de Dados de Fração (ICDD PDF), e a análise semiquantitativa foi realizada por refinamento de *Rietveld*. A preparação das amostras (Figura 32) consistiu em moer manualmente o material em um cadinho e peneirar repetidas vezes até que todo o conteúdo passasse na malha 0,075mm.



Figura 32. Preparação das amostras para o ensaio de Difração por Raios-X (DRX).

A Tabela 6 reúne os resultados da caracterização mineralógica das três terras, obtidos através do ensaio de DRX, e a Tabela 7 reúne os resultados da caracterização física.

Tabela 6. Resultado (% - em massa) da análise semiquantitativa por DRX (método Rietveld) das três amostras de terra.

Componentes cristalinos - Fases minerais	ITA (%)	MON (%)	CAP (%)
Quartzo - SiO_2	22,1	33,6	51,2
Feldspato (microcline) - KAlSi_3O_8	-	5,2	9,7
Feldspato (albite) - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	-	40,2	17,5
Mica (muscovita) - $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	-	-	9,6
Mica (illita) - $(\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,\text{H}_2\text{O}]$	-	7,1	8,2
Hornblenda - $\text{Ca}_2[\text{Mg}_4(\text{Al},\text{Fe}^{3+})]\text{Si}_7\text{AlO}_{22}(\text{OH})_2$	-	13,3	-
Montmorillonita - $(\text{Na},\text{Ca})_{0,3}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	-	0,1	0,1
Caulinita - $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	62,7	0,1	0,7
Coesita - SiO_2	-	1,4	-
Goethita - $\text{FeO}(\text{OH})$	15,2	-	-

Tabela 7. Distribuição granulométrica, limites de Atterberg, umidade higroscópica e densidade aparente das três terras

Limites e granulometria	ITA	MON	CAP
Areia ($0,06 < d < 2\text{mm}$) (%)	15	45	60
Silte ($0,002 < d < 0,06\text{mm}$) (%)	15	40	25
Argila ($< 0,002\text{mm}$) (%)	70	15	15
Limite de Liquidez (%)	54	20	33
Índice de Plasticidade (%)	23	3	5
Umidade higroscópica (%)	14	3,8	2,8
Densidade aparente (g/cm^3)	1,06	1,34	1,14

Terra ITA

A caracterização com DRX revelou que a terra ITA apresenta em sua composição mineralógica predominância de argila caulinita, seguida de quartzo, e goethita (óxido de ferro). A terra ITA pode ser classificada como uma terra argilosa. A cor avermelhada desta terra (Figura 33) é característica de solos com elevada presença de óxido de ferro; a terra ITA possui expressivos 15% (em massa) deste componente.



Figura 33. Terra ITA.

A curva granulométrica da terra ITA está apresentada na Figura 34.

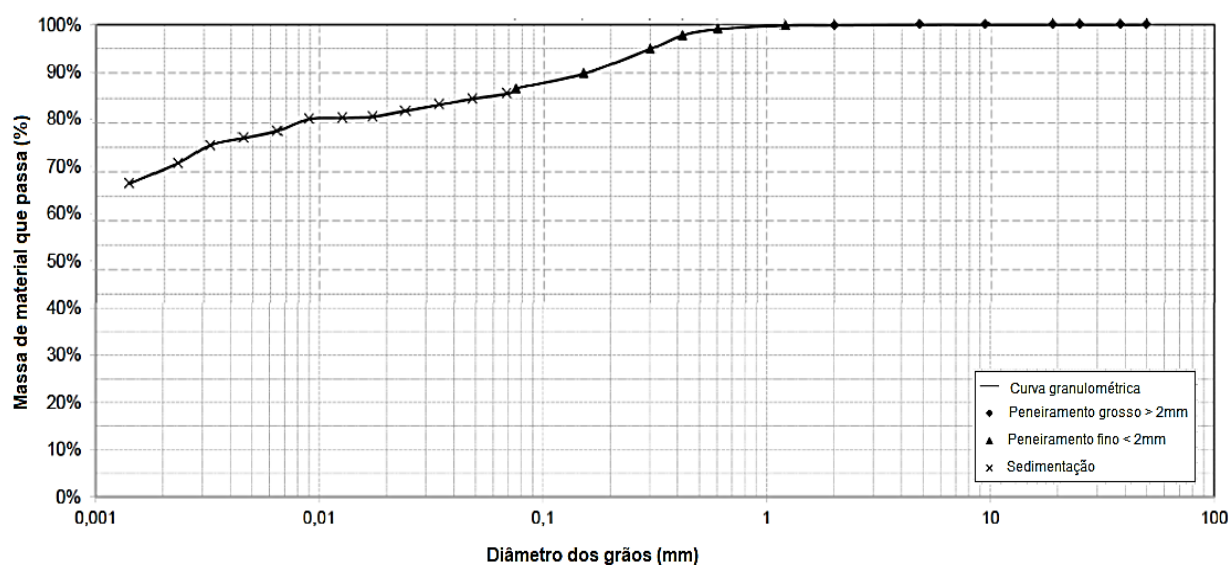


Figura 34. Curva de distribuição granulométrica da terra ITA.

Terra CAP

A caracterização por DRX, revelou que a terra CAP apresenta em sua composição mineralógica predominância de quartzo (confirmada pelo elevado teor de areia), seguida de feldspato (albite), feldspato (microclina), mica (moscovita) e mica (ilita). A terra CAP pode ser classificada como uma terra areno-siltosa. A cor amarelo-bege-branquiçada desta terra (Figura 35) é característica de solos ricos em areia.



Figura 35. Terra CAP.

A curva granulométrica da terra CAP está apresentada na Figura 36.

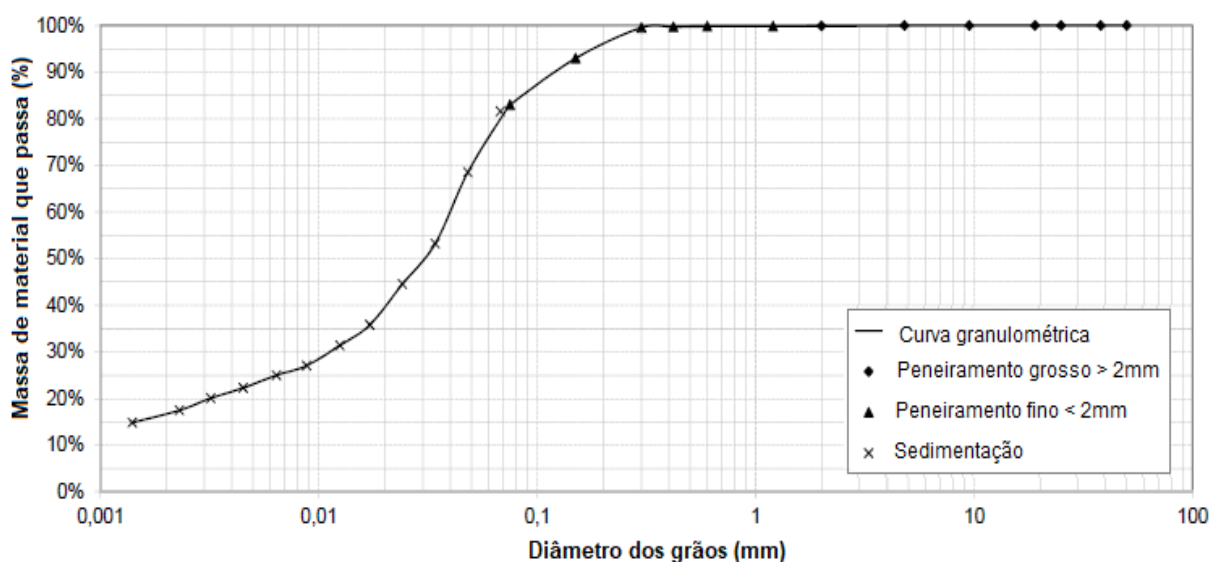


Figura 36. Curva de distribuição granulométrica da terra CAP.

Terra MON

A caracterização por DRX, revelou que a terra MON apresenta em sua composição mineralógica predominância de feldspato (albite), seguido de quartzo, *horneblenda*, mica (Ilita) e feldspato (microclima). A terra MON pode ser classificada com uma terra areno-siltosa. A análise termogravimétrica indicou que a argila predominante em MON é Ilita. A cor cinza escura desta terra (Figura 37) é característica da presença significativa (13%) de *horneblenda*.



Figura 37. Terra MON.

A curva granulométrica da terra MON está apresentada na Figura 38.

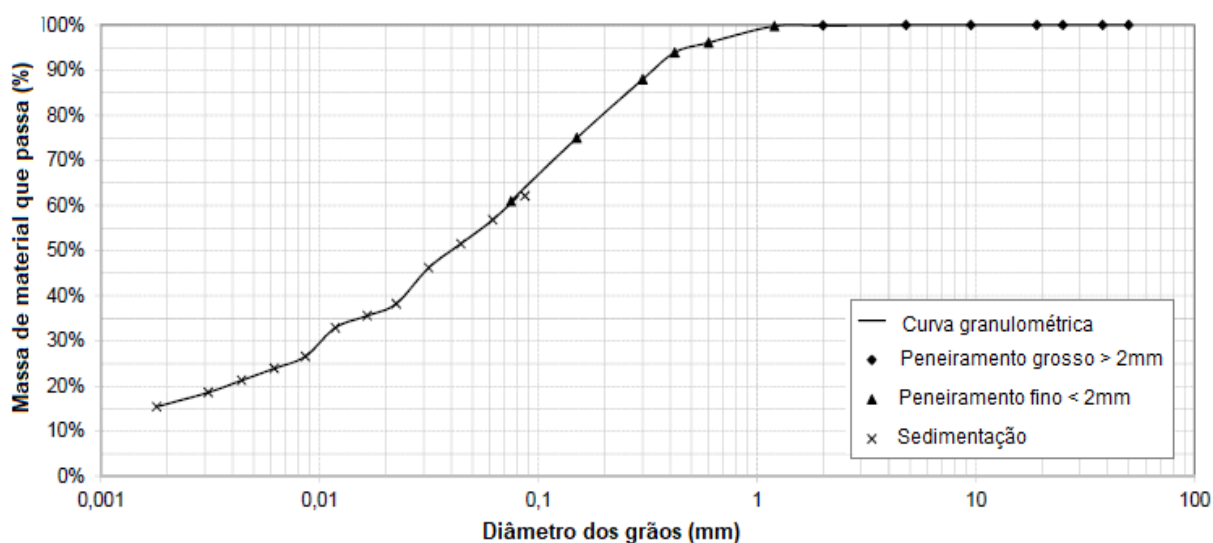


Figura 38. Curva de distribuição granulométrica da terra MON.

3.2.2. Excremento bovino

Nas publicações científicas em português, o excremento bovino é referido como esterco de vaca ou excremento bovino. Em espanhol, *estercól de vaca*. E em inglês, *cow dung* ou *cattle manure*. Nas publicações em inglês fruto desta pesquisa, optou-se por utilizar o termo *cow dung* abreviado como “CD” (Pachamama *et al.* 2024 b,c) e nas publicações em português (Pachamama *et al.* 2024 d,e), optou-se por utilizar o termo excremento bovino, abreviado como “EB”, para diferenciar do campo da agropecuária, onde é mais usado o termo esterco. As siglas utilizadas na presente pesquisa para nomear as amostras de excremento bovino (EB), referem-se:

- se foi coletado: fresco ou seco (f ou s);
- à alimentação do bovino: pasto ou ração (p ou ra);
- à quantidade de dias que foi compostado: 7 ou 30;
- se foi moído: pó.

A amostra que não apresenta um número na sua identificação, foi usada fresca e não passou pelo processo de compostagem. As amostras que não apresentam o sufixo “pó” em sua identificação, foram usadas *in natura*, íntegras, com o EB integral.

Para atingir os objetivos da pesquisa, foram utilizadas três amostras de EB, sendo uma coletada seca no pasto, outra coletada fresca no pasto e a terceira coletada fresca no estábulo de bovinos em confinamento que são alimentados com ração e silagem.

Os EB seco e fresco produzidos por bovinos alimentados no pasto foram coletados em uma fazenda na região metropolitana de Lisboa, próximo a cidade de Moita, ao Sul de Lisboa, Portugal.

O EB coletado seco no pasto foi utilizado apenas moído (EBsppó).

A amostra coletada fresca no pasto foi utilizada de quatro maneiras: pastosa como coletada (EBfp); depois de 7 dias de compostagem (EBfp7), depois de 30 dias de compostagem (EBfp30), e depois de 30 dias de compostagem e moída (EBfp30pó).

O EB fresco de bovinos alimentados com ração e silagem foram coletados em um criatório na região metropolitana de Lisboa, na cidade de Sobreda, próximo a Almada, ao sul do rio Tejo. Os animais foram alimentados majoritariamente com ração de grãos e cereais (base nutritiva), mas também recebiam pequenas porções diárias de silagem - feno (alimentação volumosa).

A amostra coletada fresca no estábulo foi utilizada apenas depois de 7 dias de compostagem (EBfra7).

A Tabela 8 sintetiza as informações sobre as amostras de excremento utilizadas. Estas siglas também estão listadas na lista de siglas/abreviaturas, no início do documento.

Tabela 8. Síntese das amostras de excremento bovino utilizadas.

Amostra de excremento	Dieta dos bovinos	Coletado	Tempo de secagem-compostagem	Integridade física do excremento
EB fp	Pasto	Fresco	0	Integral
EB fp 7	Pasto	Fresco	7	Integral
EB fp 30	Pasto	Fresco	30	Integral
EB fp 30 pó	Pasto	Fresco	30	Moído
EB sp pó	Pasto	Seco	-	Moído
EB fra 7	Ração e silagem	Fresco	7	Integral

3.2.2.1. Descrição das amostras de excremento bovino e dos diferentes processamentos adotados

Bovinos alimentados no pasto

Foram coletados 50 kg de EB fresco no pasto. Uma parte foi adicionada na argamassa enquanto ainda fresco (EBfp). O restante do material foi deixado a compostar. Para evitar que quaisquer componentes físicos, químicos ou biológicos fossem lixiviados para o solo, optou-se por realizar a compostagem das amostras de EB sem contato com o solo, em um recipiente plástico com fundo impermeável (Figura 39). O recipiente plástico ficou destampado (coberto apenas com uma tela mosquiteiro), e o material foi revirado diariamente com uma colher para aeração e uniformização.



Figura 39: Excremento coletado fresco (a) e depois de compostado por 7 dias no recipiente plástico com fundo impermeável (b).

Depois de 7 dias de compostagem dentro do recipiente plástico o material foi desagregado manualmente e peneirado em diferentes malhas, da maior para a menor, sempre desagregando manualmente os torrões que se aglomeraram (Figura 40). Em seguida, o material já mais fino foi passado em peneiras com malhas menores com auxílio das mãos (com luvas) realizando leve pressão em movimentos circulares sobre a malha da peneira #4,8 mm. E por último o material foi passado da mesma forma na malha #2,79 mm, para desfazer os últimos pequenos grumos húmidos e reter restos de folhas e galhos. Depois de peneirado, o material ficou bastante homogêneo, repleto de fibras vegetais cujo comprimento não ultrapassava visualmente os 2 cm, bastante úmido e com odor vivo e suave de horta molhada (Figura 40). Após o peneiramento, a amostra compostada por 7 dias foi nomeada EBfp7. Parte da amostra foi utilizada imediatamente para a produção de algumas argamassas.



Figura 40: Excremento compostado por 7 dias sendo peneirado em diversas malhas (a) e depois de peneirado na malha # 2,79 mm (b).

A título de curiosidade investigativa, uma pequena parte do material foi deixado secar por mais de 7 dias antes de peneirar, mas à medida que secava, mais aglomerados (grumos) eram formados, mais secos e mais duros. Por isto, recomenda-se peneirar o EB após 7 dias de compostagem para possibilitar passá-lo nas peneiras mais finas (#4,8 e #2,79 mm), e pesar um material “sólido”, sem que estivesse pastoso e nem seco, mas ainda bastante húmido embebido no próprio líquido, provavelmente rico em microrganismos, seus metabólitos e outros compostos orgânicos como ácidos graxos de cadeia curta e aminas (Rao *et al.* 2021; Kulshreshta *et al.* 2022; Millogo *et al.* 2016). Para verificar diferenças nos efeitos causados na argamassa de terra pela adição do EB mais fresco ou mais seco, depois de separado o EBfp7, o restante do material peneirado foi compostado por mais 23 dias no mesmo recipiente, da mesma forma.

Diariamente continuou sendo revirada e, de 7 em 7 dias, peneirada na malha #2,79 mm com auxílio das mãos (com luvas) para desfazer os grumos formados. No entanto, observou-se que, com o passar dos dias, os grumos já não se formavam com a mesma intensidade, provavelmente devido a menor umidade no material. Esta amostra foi chamada EBfp30, pois foi compostada por 30 dias (Figura 41). O material final ficou bastante homogêneo, mais seco, mais desagregado e com odor de “horta molhada” mais suave em comparação com a amostra utilizada aos 7 dias de compostagem.



Figura 41. Excremento peneirado na malha #2,79 mm depois de 30 dias de compostagem.

Dentre os estudos publicados sobre efeitos da adição de excremento bovino nas argamassas para produção de elementos para construção com terra, alguns o utilizaram fresco e integral, e outros o utilizaram seco e moído em pó (Tabelas 4 e 5). Portanto, na presente pesquisa, parte do material compostado por 30 dias (EBfp30) foi muito facilmente moído num moinho elétrico de laboratório para ser transformado em pó. Por isto essa amostra foi chamada EBfp30pó.

Tentou-se também moer uma amostra de EBfp7 e de outras amostras com diferentes teores de umidade, mas devido ao elevado teor de umidade ainda presente nestas amostras, o moinho não conseguiu moer o material de forma eficiente.

Por último, foram coletadas amostras de EB secas no pasto em contato com o solo para verificar se há diferença nos efeitos causados nas argamassas em relação a usar um EB que secou no pasto em contato prolongado com o solo ou usar um excremento coletado fresco e deixado secar/compostar em um recipiente impermeável por 30 dias (sem perda de fração para o solo). Naturalmente as placas de excremento já estavam

secas e duras, mas foi possível quebrá-las manualmente em pedaços menores para caberem na abertura do moinho elétrico. Depois de moer as placas de excremento secas, a amostras deste excremento moída foi chamada EBspóp (Figura 42).



Figura 42. Excremento coletado seco e endurecido no pasto (a) e processo de desagregação manual e peneiramento para caber no moinho elétrico (b).

Baseado na experiência profissional pessoal do autor, vale aqui alertar para não utilizar amostras de EB com grumos secos e duros na produção de argamassas de terra, principalmente para revestimento. Se não houver outro excremento disponível, é necessário triturar o EB seco e depois moer ou apiloar antes de misturar na argamassa. Além disso depois de triturado, recomenda-se também deixar o EB seco imerso na água de amassadura por uma hora para hidratar e em seguida passar nas malhas #4,8 mm e #2,79mm para desfazer os grumos que estarão encharcados e inchados. Só depois deste processo, deve-se acrescentar à terra e areia, misturar o suficiente para homogeneizar a mistura e então deixar a argamassa em repouso por pelo menos 24 horas antes da aplicação para melhor incorporar os componentes.

Bovinos alimentados com ração e silagem

O EB produzido por bovinos alimentados com ração e silagem também foi recolhido fresco. Após 7 dias secando em compostagem da mesma forma descrita anteriormente, obteve-se a amostra que foi chamada EBfra7. Foi possível observar, visualmente e sem equipamentos específicos, que o EB produzido por bovinos alimentados no pasto (EBfp7) apresenta em sua composição fibras vegetais em maior quantidade e com maior comprimento em comparação com o EB produzido por bovinos alimentados com ração (EBfra7). Além disso, o excremento produzido por bovinos alimentados com ração possui odor mais forte e de amido fermentado.

3.2.2.2. Caracterização das amostras de excremento bovino

Ao longo de 60 dias foram determinadas a densidade e o teor de humidade das amostras de EB. Para cada avaliação do teor de umidade foram coletadas três pequenas amostras de cada EB (aproximadamente 10 g) que foram colocadas em pequenas capsulas de alumínio na estufa a 100°C, por 24 horas. O teor de humidade foi calculado pela diferença de massa (em porcentagem) antes e depois da desidratação na estufa.

Para determinar a densidade foi utilizado um recipiente com 100 ml de volume e uma balança digital com precisão de duas casas decimais. O recipiente cheio com EB foi pesado, subtraído o peso do recipiente, e a massa encontrada foi dividida pelo volume do recipiente. Para evitar erros de método e medição pelo operador, recomenda-se que, para determinar a densidade aparente dos materiais, sejam usados os métodos descritos nas normas NBR 13278 (2005) e EN 1097-3 (1998).

Na Tabela 9 estão apresentadas a densidade e o teor de umidade de todas as amostras de EB, e a quantidade de material seco equivalente contido em 100 ml.

Tabela 9. Tempo de secagem/compostagem, teor de umidade, densidade e fração seca equivalente nas amostras de excremento bovino utilizadas na pesquisa.

Amostra de excremento	Tempo de secagem - compostagem (dias)	Teor de umidade	Densidade	Fração seca contida em recipiente de 100ml cheio de excremento (g)
		(% massa)	(g/cm ³)	
EB fp	0	84	0,99	16
EB fp 7	7	61	0,40	16
EB fp 30	30	12	0,20	18
EB fp 30 pó	30	10	0,40	36
EB sp pó	-	10	0,40	36
EB fra 7	7	57	0,38	16

Como esperado, observa-se que, à medida em que seca, o excremento perde água, massa e diminui a sua densidade, mas a quantidade de material seco contida em cada amostra permanece praticamente a mesma. No entanto, quando o EB é moído, ocupa menos espaço no recipiente de 100 ml, e por isto, tem maior densidade. Isto parece óbvio, mas nas publicações sobre uso de EB como adição bioestabilizante na construção com terra, estas informações nem sempre são fornecidas. O mesmo

também foi notado em outras pesquisas sobre a adição de outros materiais naturais que têm sua densidade e teor de umidade alterados à medida que secam.

Estas informações, assim como se a proporção da adição do material foi calculada em massa ou volume, são informações importantes a serem apresentadas na caracterização do excremento pois isto permite que os resultados sejam comparados entre diferentes pesquisas. Afinal, o teor de umidade e a densidade de uma amostra de EB utilizada em diferentes pesquisas, estão diretamente relacionadas com a quantidade (em massa) que foi adicionada de material sólido (fibras e aglomerados microbianos) nas argamassas.

Por isto, para que os resultados dos ensaios a serem publicados por qualquer pesquisa futura sobre o tema possam ser comparados com outras pesquisas em todo o mundo, recomenda-se que sejam determinados o teor de umidade e a densidade das amostras exatamente no dia em que o excremento for adicionado na produção das argamassas de terra e dos CP. Vale também sugerir que se forneça a unidade de medida em proporção volumétrica, pois essa facilita a aplicação dos resultados em campo sem a necessidade de usar equipamentos como balança.

Além da determinação do teor de umidade de cada amostra de EB no dia em que foi adicionada à argamassa, através da medição semanal foi possível conhecer (usando a média aritmética em triplicata) o teor de umidade do EB de 1 a 60 dias. Os resultados estão na Tabela 10. Nota-se que entre os 30 e 60 dias a variação é muito pouca, tendo o material obtido massa constante, equilibrando-se com a umidade do ambiente.

Tabela 10. Média do teor de umidade (%) do excremento bovino durante 60 dias.

Tempo de secagem - compostagem (dias)	Teor de umidade (%)
Dia 1	81
Dia 3	74
Dia 7	61
Dia 14	39
Dia 21	20
Dia 30	12
Dia 60	10

3.2.3. Fibra vegetal

A fibra vegetal utilizada foi o capim escalracho (*Panicum repens*), coletado no pasto onde foram coletadas as amostras de EB de bovinos alimentados no pasto. O capim foi cortado verde, deixado secar à sombra e ao vento por 7 dias, e cortado com uma tesoura em pedaços com comprimento variado de no máximo 3 cm (Figura 43). No dia em que foram utilizadas para a produção das argamassas, as fibras picadas (designadas Fib) apresentaram densidade de 0,20 g/cm³ e 20% de teor de umidade.



Figura 43. Preparação das fibras vegetais cortadas com no máximo 3 cm de comprimento.

3.2.4. Cal aérea hidratada

Para comparar com os efeitos causados pela adição de excremento e fibras, foi formulada uma argamassa com cal (Ca(OH)_2) em pó, da marca Lusical H100, tipo CL90, de natureza calcítica e elevada pureza, pois contém no máximo 10% de óxidos de cálcio não hidratados na sua composição. Esta adição foi designada Cal e apresenta densidade de 0,41 g/cm³.

3.2.5. Areia

A areia que foi utilizada para adição nas argamassas é siliciosa, ou seja, composta basicamente por quartzo, dióxido de silício (SiO_2). Foi escolhida uma areia lavada de granulometria média (0,2 mm a 0,6 mm). Esta adição apresenta densidade de 1,4 g/cm³.

3.3. Formulação das argamassas avaliadas

Antes de formular as argamassas, foi preciso definir qual o traço de terra:areia necessário para conter a retração nas argamassas produzidas com cada uma das três terras, para então usá-los como traço de referência na avaliação dos efeitos causados pelas adições de excremento bovino (EB), fibras vegetais (Fib) e cal hidratada (Cal).

3.3.1. Teste preliminar de retração

Primeiramente foram produzidas argamassas usando os traços volumétricos 1:0, 1:1, 1:1,5, 1:2 e 1:3 (terra:areia) com adição de água na quantidade necessária para se obter espalhamento de 170 mm (consistência) e boa trabalhabilidade para aplicação como reboco. A superfície dos tijolos cerâmicos foi umedecida com água (spray) para receber cada argamassa em aplicação única, obtendo rebocos com 1,5 cm de espessura. Após 24 horas observou-se, para cada terra, qual traço apresentou menor surgimento de fissuras na superfície do reboco (Figura 44).

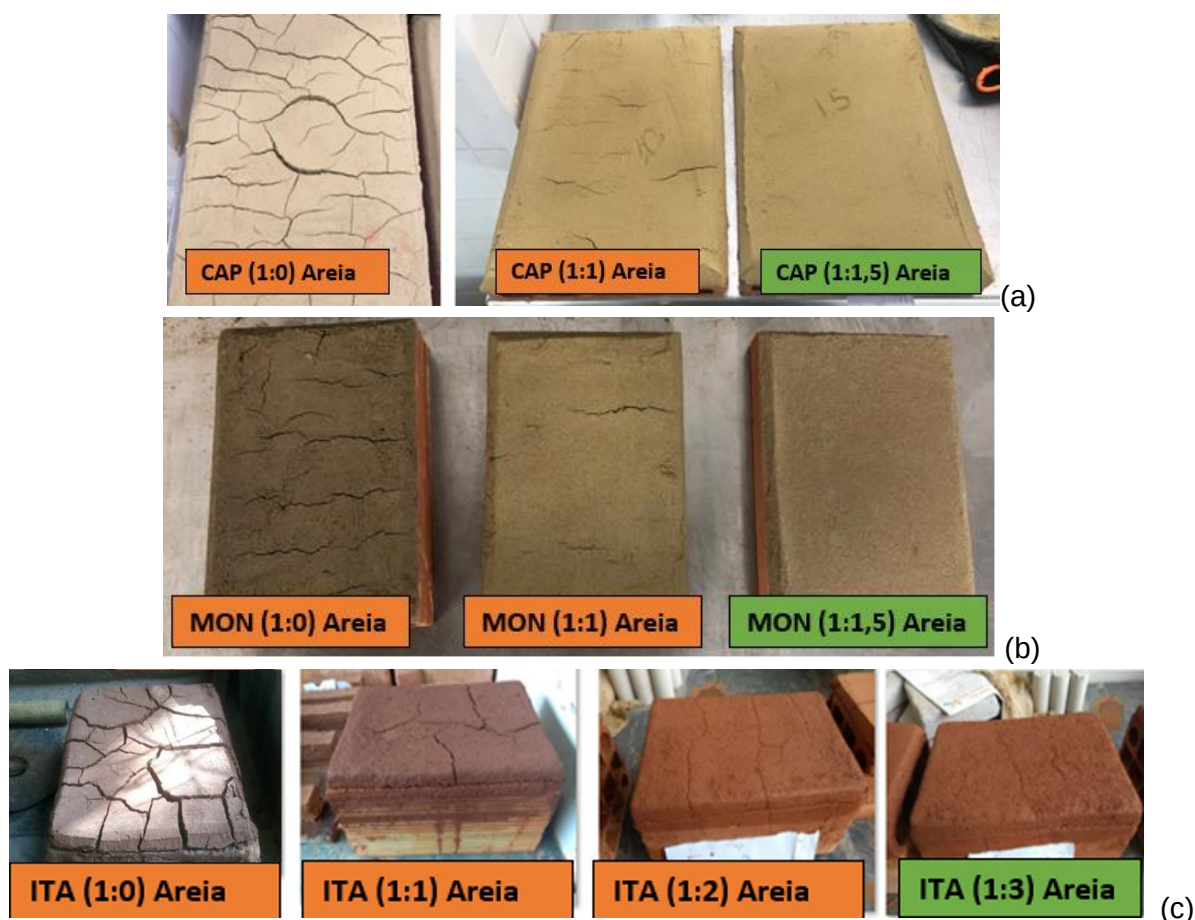


Figura 44. Efeitos na retração causados pela adição de diferentes volumes de areia em argamassas com as terras CAP (a), MON (b) e ITA (c). A foto com identificação em verde indica o traço de referência escolhido para a argamassa com cada terra.

Para produzir as argamassas com as terras CAP e MON, optou-se pelo traço volumétrico terra:areia 1:1,5. Já com a terra ITA, ainda que o traço 1:3 não tenha evitado 100% do surgimento de fissuras, optou-se por esta proporção pois o traço 1:4 (com a terra ITA) já havia sido utilizado em estudo prévio (Pachamama *et al.* 2020) onde foi observada a redução da retração com a adição de EB no Brasil. Considerando que a adição de EB iria reduzir a retração e a necessidade por adicionar areia, poderia ter sido usado o traço 1:1 para as argamassas produzidas com as terras CAP e MON. No entanto, este foi o primeiro contato com estas terras e preferiu-se usar o traço 1:1,5.

3.3.2. Argamassas formuladas

Para formulação das argamassas, a terra e todas as adições, inclusive a areia, foram calculadas por volume, para facilitar sua reprodução em campo, e também porque o efeito de ter a matriz argilosa a preencher os espaços vazios deixados pela areia é físico. No entanto, em laboratório e através da densidade de cada material, é fácil transformar o traço volumétrico em traço em massa, para análise complementar.

Relembra-se que os prefixos ITA (Itabirito - Brasil), CAP (Caparica - Portugal) e MON (Monsaraz - Portugal) indicam a terra que foi usada para produção da argamassa. O traço terra:areia adicionada está especificado logo ao lado, entre parênteses. Em seguida está indicada a proporção volumétrica (5%, 10%, 20% ou 40%) das adições: EB (Excremento Bovino), Fibras ou Cal. As letras minúsculas ao lado direito da sigla EB referem-se às variáveis do excremento bovino, conforme apresentado na descrição e caracterização das amostras de excremento na seção 3.2.2. O sufixo “*Reciclo*” indica que a argamassa foi produzida a partir da reutilização da argamassa de origem depois de seca, triturada e com adição de apenas água para produzir os corpos de prova reciclados. E por fim, algumas argamassas apresentam o sufixo (AF), para indicar que a argamassa fresca foi fermentada por 72 horas em cura úmida, antes de moldar os corpos de prova ou aplicá-la na parede como reboco.

Por definição, a fermentação ocorre na ausência de oxigênio. Para fermentar a argamassa de terra estabilizada, seria necessário colocar a mistura num recipiente hermeticamente fechado. Mas no presente estudo as argamassas de terra com adição de EB utilizadas para avaliar a fermentação da argamassa (identificada pelo sufixo AF - Argamassa Fermentada) foram colocadas em um recipiente destampado, mas

coberto com um pano molhado. Por esta razão, este procedimento não poderia ser rotulado como fermentação, mas como cura úmida em micro aero filia.

Apesar disso, é possível afirmar que o conteúdo abaixo da camada externa superior (“nata”) da mistura fresca de argamassa bioestabilizada não tem contato com oxigênio. Assim, o procedimento de “cura úmida por 72 horas” utilizado no presente estudo também pode permitir a fermentação da argamassa fresca e a otimização da atividade de bactérias aeróbias e anaeróbias facultativa descrita por Rao *et al.* (2021). Uma porção extra de 50 ml de água foi adicionada nestas argamassas para compensar a água que seria evaporada durante as 72 horas em cura úmida e manter a argamassa ainda plástica/pastosa para moldá-las ao fim do processo de fermentação.

Abaixo estão listadas todas as 32 argamassas formuladas para atingir os objetivos propostos pela presente pesquisa. Para facilitar a leitura da tese, estas siglas estão também listadas na lista de siglas/abreviaturas, no início do documento.

Argamassas produzidas com a terra CAP, da Caparica, Portugal

CAP (1:0): Terra CAP sem adições;

CAP (1:0) + 20 EB fp7: Terra CAP, sem adição de areia, mas com adição de 20% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias.

CAP (1:1): Terra CAP:areia (1:1);

CAP (1:1,5) REF: Terra CAP:areia (1:1,5). Este foi o traço terra CAP:areia que possibilitou conter o surgimento de fissuras no reboco após a secagem da argamassa produzida com esta terra (teste preliminar de retração). Por isto, essa argamassa foi utilizada como referência (REF) para avaliar os efeitos causados pelas adições de excremento, fibra vegetal e cal;

CAP (1:1,5) + 5 EB fp7: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 5% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias;

CAP (1:1,5) + 10 EB fp7: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 10% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias;

CAP (1:1,5) + 20 EB fp7: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 10% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias;

CAP (1:1,5) + 40 EB fp7: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 40% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias;

CAP (1:1,5) + 20 EB fp7 Reciclo: Argamassa produzida reutilizando três corpos de prova da argamassa CAP(1:1,5)+20EBfp7, com 40 dias de idade. Foram triturados manualmente e misturados com água para produzir três novos corpos de prova reciclados, sem adições extras de terra, areia ou excremento.

CAP (1:1,5) + 5 EB fp7 (AF): Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 5% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias. Argamassa fresca fermentada por 72 horas;

CAP (1:1,5) + 10 EB fp7 (AF): Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 10% de EBfp7 (coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias. Argamassa fresca fermentada por 72 horas;

CAP (1:1,5) + 20 EB fp7 (AF): Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 20% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias. Argamassa fresca fermentada por 72 horas;

CAP (1:1,5) + 20 EB fp30: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 20% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 30 dias;

CAP (1:1,5) + 40 EB fp30: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 40% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 30 dias;

CAP (1:1,5) + 20 EB fp30pó: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 20% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 30 dias, moído;

CAP (1:1,5) + 20 EB sppó: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 20% de EB coletado seco no pasto, de animais alimentados no pasto, moído;

CAP (1:1,5) + 20 EB fra7: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 20% de EB coletado fresco, de animais alimentados com ração, compostado por 7 dias;

CAP (1:1,5) + 40 EB fra7: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 40% de EB coletado fresco, de animais alimentados com ração, compostado por 7 dias;

CAP (1:1,5) + 10 Fib: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 10% de fibras vegetais de escalracho (*Panicum repens*) cortadas em pedaços com comprimento variado de no máximo 3 cm;

CAP (1:1,5) + 10 Cal: Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 10% de cal aérea hidratada, em pó;

Argamassas produzidas com a terra MON, de Monsaraz, Portugal

MON (1:0): Terra MON sem adições;

MON (1:0) + 20 EB fp7: Terra MON sem adição de areia, mas com adição de 20% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias.

MON (1:1): Terra MON:areia (1:1);

MON (1:1,5) REF: Terra MON:areia (1:1,5). Este foi o traço terra MON:areia que possibilitou conter o surgimento de fissuras no reboco após a secagem da argamassa produzida com esta terra (teste preliminar de retração). Por isto, essa argamassa foi utilizada como referência (REF) para avaliar os efeitos causados pelas adições de excremento;

MON (1:1,5) + 10 EB fp7: Terra MON:areia (1:1,5) com adição de 10% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias.

MON (1:1,5) + 20 EB fp7: Terra MON:areia (1:1,5) com adição de 20% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias.

Argamassas produzidas com a terra ITA, de Itabirito, Brasil

ITA (1:0): Terra ITA sem adições;

ITA (1:1): Terra ITA:areia (1:1);

ITA (1:2): Terra ITA:areia (1:2);

ITA (1:3) REF: Terra ITA:areia (1:3). Este foi o traço terra ITA:areia que possibilitou conter o surgimento de fissuras no reboco após a secagem da argamassa produzida com esta terra (teste preliminar de retração). Por isto, essa argamassa foi utilizada como referência (REF) para avaliar os efeitos causados pelas adições de excremento, fibra vegetal e cal;

ITA (1:3) + 10 EB fp7: Terra ITA:areia (1:3) com adição de 10% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias;

ITA (1:3) + 20 EB fp7: Terra ITA:areia (1:3) com adição de 20% de EB coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias;

3.3.3. Produção dos corpos de prova

Para realizar todos os ensaios propostos na presente pesquisa, foram produzidos quatro tipos de CP: prismático, cilíndrico, reboco aplicado em um tijolo cerâmico e reboco aplicado em dois muros experimentais com alvenarias: de adobe e tijolo cerâmico. Antes as argamassas foram caracterizadas no estado fresco.

Para os ensaios de retração, densidade no estado endurecido, resistência à flexão e à compressão e imersão em água, foram usados CP prismáticos com dimensão de 16 cm x 4 cm x 4 cm (CP padrão da norma DIN). Para avaliação da higroscopicidade e da condutibilidade térmica foram usados CP cilíndricos com 8,5 cm de diâmetro e 2 cm de altura (Faria *et al.* 2016). Para avaliar a resistência de aderência ao cisalhamento foram usados CP que consistem em uma pequena amostra de reboco (5 cm x 4 cm e 1,5 cm de espessura) aplicado em duas alvenarias: de adobe e de tijolo cerâmico. Para o ensaio de resistência à erosão por gotejamento de água (*Geelong drip test*) foram usados CP que consistem em um tijolo cerâmico rebocado na maior face (30 cm x 20 cm, com espessura de 1,5 cm).

Para a produção dos CP prismáticos, foram utilizadas formas metálicas normalizadas e desmontáveis (Figura 45). Para evitar que os CP sejam danificados no momento do desmolde, utilizou-se óleo de girassol (vegetal e natural) em toda a parte interna do molde com um pincel e foi salpicada areia no fundo e nas laterais internas do molde, antes de colocar a argamassa fresca. Optou-se por não utilizar o óleo desmoldante convencional, para fazer o uso apenas de produtos naturais na pesquisa. Foram produzidos quatro CP prismáticos para cada argamassa.



Figura 45. CP prismáticos: (a) secando na forma e (b) já fora da forma.

Para a produção dos CP de tijolo rebocado (Figura 46), foi utilizada uma forma para garantir uma aplicação homogênea com 1,5 cm de altura da argamassa na superfície dos tijolos. A superfície do tijolo cerâmico foi umedecida com água antes da aplicação da argamassa para evitar que absorvesse água da argamassa em excesso. Para maior ancoragem à superfície, a argamassa foi lançada a 70 cm de altura em relação a superfície do tijolo (colocado na horizontal) para simular de forma uniforme a energia de projeção contra uma parede, e em seguida foi rasada a forma com uma desempenadeira de aço. A forma então foi retirada e, com a desempenadeira, as bordas e as quinas foram chanfradas em 45° para evitar arestas quebradiças. Foi produzido um tijolo cerâmico rebocado por argamassa avaliada.



Figura 46. CP de reboco aplicado em tijolo cerâmico.

Para a produção dos CP com formato de bolacha cilíndrica (Figura 47) foram utilizadas formas circulares com 8,5 cm de diâmetro e 2 cm de altura. As formas foram produzidas usando um cano de PVC (85 mm de diâmetro interno). O cano foi cortado em seções de 2 cm e as bordas foram lixadas com lixa d'água.

Como este CP seria usado no ensaio para avaliação da higroscopicidade (adsorção de vapor de água), para evitar que a presença ou reações com óleo pudessem interferir nos resultados, foi pincelada água ao invés de óleo de girassol nas laterais internas do molde, e em seguida foi salpicada areia no fundo (bandeja metálica de apoio) e nas laterais internas do molde de PVC, antes de colocar a argamassa. Foram produzidos três CP com forma de bolacha cilíndrica por argamassa avaliada.



Figura 47. CP com forma de bolacha cilíndrica secando na bandeja metálica de apoio.

A DIN 18947 (2024) orienta que os CP sejam ensaiados após atingirem massa constante. Para uma comparação em mesmas condições, todos os CP foram ensaiados com 30 dias de idade, exceto os CP com adição de cal que foram ensaiados com 60 dias de idade para dar mais tempo ao processo de carbonatação da cal adicionada.

A norma DIN 18947 (2024) também orienta que os CP sejam mantidos, desde a produção até o período de realização dos ensaios, em ambiente controlado com média de temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $60\pm 5\%$ de umidade relativa do ar (valores adaptados para o Brasil conforme a NBR 13281 (2023)). Apesar disso, na pesquisa optou-se por deixar os CP prismáticos, cilíndricos e os tijolos rebocados secando/curando sob condições naturais no ambiente do laboratório com o intuito de aproximar os CP das condições ambientais reais. No entanto, desde a produção dos CP até o dia da realização dos ensaios, a temperatura ambiente no laboratório apresentou uma média de 25°C e uma umidade relativa do ar de 64%, com variações que coincidem com os valores determinados pela norma.

Por fim, para avaliar a resistência de aderência, apesar da norma DIN indicar o método arrancamento ou *pull-off* definido na NBR 15258 (2005) e na EN 1015-12 (2016), optou-se por utilizar o método por cisalhamento, sugerido por Hamard *et al.* (2013). Este método foi desenvolvido para atividades de restauro e avaliação de rebocos *in situ*, em edifícios históricos para conservação de paredes de taipa na França, e por isso não danifica os corpos de prova e nem o suporte (alvenaria). Este método é de mais fácil execução, inclusive em obra, e apresenta resultados bastante precisos, dispensando o uso do equipamento *pull-off*, que além de ser bastante oneroso, precisa sempre estar sendo calibrado. Para tal foram produzidos três CP específicos que

consistem em áreas retangulares de reboco medindo 5 cm x 4 cm de superfície e 1,5 a 2 cm de espessura, obtidos a partir de aplicação da argamassa diretamente na alvenaria (Figura 48).



Figura 48. CP de reboco aplicados em duas alvenarias: adobe e tijolo cerâmico.

Estes CP foram produzidos em duas alvenarias, protegidas por um telhado, localizadas na Estação Experimental de Exposição Natural de Revestimentos (Figura 49), na área externa dos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil na NOVA FCT, sendo uma alvenaria com adobes e outra com tijolos cerâmicos vazados. A superfície das alvenarias foi umedecida com água (spray) antes da aplicação de cada argamassa-reboco. Estes CP foram produzidos, aplicados e deixados secar sob as condições naturais do ambiente (média de 23°C e 60% de UR, julho de 2023) foram ensaiados com a mesma idade dos CP prismáticos e cilíndricos que secaram dentro do laboratório, 30 dias.



Figura 49. Diferentes alvenarias, cobertas, para experimento com revestimentos, localizadas na Estação Experimental de Exposição Natural de Revestimentos, CERIS-NOVA.

3.4. Ensaios para avaliação das argamassas e corpos de prova necessários para a campanha experimental

3.4.1. Produção das argamassas e descrição geral

Primeiramente os materiais secos foram misturados manualmente com uma colher até homogeneizar a mistura. Só então foi adicionada a água de amassadura, misturado manualmente mais uma vez. O misturador mecânico foi acionado por 60 segundos na velocidade lenta e então desligado. Esperou-se 5 minutos e o equipamento foi acionado novamente para mais 60 segundos de amassadura, mas desta vez, na velocidade acelerada. Nas argamassas em que foi avaliada a influência da fermentação da argamassa com adição de excremento, depois de homogeneizadas no misturador elétrico, foram deixadas a fermentar por 72 horas num recipiente sem tampa, coberto por um pano molhado (Rao, 2023), para então serem colocadas nas formas para produção dos corpos de prova (CP) ou aplicadas nas alvenarias de teste.

Cada argamassa foi produzida para um objetivo em específico, e nem todos os ensaios foram realizados com todas as argamassas formuladas. Os corpos de prova e os ensaios foram realizados majoritariamente conforme a norma alemã específica para argamassas de terra para revestimento sem adição de aglomerantes químicos DIN 18947 (2024) e as normas do conjunto EN 1015 (1998, 1999) por ela indicadas. A norma EN 998-1 (2016) para argamassas de revestimento em geral também foi consultada. Os ensaios análogos que também estão indicados na norma brasileira NBR 13281 (2023) também tiveram suas normas brasileiras consultadas. Para os ensaios realizados que não estão indicados na norma DIN (2024), foram usadas outras referências.

No estado fresco foram realizados os seguintes ensaios:

- Consistência por espalhamento: NBR 13276 (2005) e EN 1015-3 (1999);
- Densidade no estado fresco: NBR 13278 (2005) e EN 1015-6 (1998).

No estado endurecido foram realizados os seguintes ensaios:

- Retração linear por secagem: NBR 15261 (2005) e DIN 18947 (2024);
- Densidade no estado endurecido: NBR 13280 (2005) e EN 1015-10 (1999);
- Condutibilidade térmica: Manual do equipamento ISOMET;
- Resistência à flexão e à compressão: NBR 13279 (2005) e EN 1015-11 (1999);
- Resistência a aderência: DIN 18947 (2024) e Hamard et al. (2013);

- Resistência à erosão por gotejamento - *Geelong drip test: The Australian Earth Building Handbook* (2002) e NZS 4298-A1 (2000);
- Resistência à Imersão em água: NBR 8492 (2013);
- Adsorção e desadsorção de vapor de água (Higroscopicidade): adaptado de DIN 18947, Lima *et al.* (2020) e Faria *et al.* (2016).

Ensaio no estado fresco

A norma DIN 18947 (2024) define que a quantidade de água utilizada na preparação das argamassas é aquela suficiente para atingir uma consistência por espalhamento de 175 ± 5 mm. Após misturar todos os componentes, antes de produzir os CP, com cada argamassa foi realizado o ensaio de espalhamento e determinada a densidade no estado fresco. Para avaliações *in situ*, é mais prático avaliar a consistência através do penetrômetro (EN 1015-4) ou outro expedito semelhante ao teste da queda da bola.

3.4.2. Determinação da consistência por espalhamento

Inicialmente a superfície da mesa circular (*flow table*) do equipamento foi limpa com um pano úmido e o molde troncônico foi posicionado no meio da mesa. O molde foi preenchido até a metade com argamassa, que foi apiloada antes de completar o molde com mais argamassa. O topo do molde cheio foi novamente apiloado e rasado para retirar o excesso de argamassa, utilizando uma espátula. Em seguida o molde foi retirado verticalmente e foram efetuados 15 golpes em 15 segundos na mesa de consistência. Ao obter a consistência por espalhamento de 170 mm (para menor ocorrência de fissuras mantendo boa trabalhabilidade) foi registrado o volume (ml) de água adicionada à mistura e calculado seu percentual em relação ao conjunto de componentes secos da argamassa (terra + areia + excremento bovino).

3.4.3. Densidade no estado fresco

Para determinar a densidade da argamassa no estado fresco foi seguida a norma NBR 13278 (2005). Foi utilizado um recipiente com capacidade para 200 ml. Primeiramente foi determinada a massa do recipiente vazio. Em seguida, preencheu-se o recipiente até a metade com a mistura da argamassa pronta. O conteúdo foi devidamente compactado para eliminar vazios através do seguinte procedimento: soltando sobre a mesa o recipiente da altura de 3 cm para eliminar vazios. Em seguida completou-se o recipiente com a argamassa até a marca de 200 ml. O conteúdo foi compactado

novamente e rasada a superfície com uma espátula. Após limpar o recipiente externamente o conjunto foi pesado. Para calcular a densidade da argamassa no estado fresco, a massa do recipiente cheio subtraído da massa do recipiente vazio foi dividida pelo volume de 200 ml (200 cm³). A norma DIN 18947 (2024) define que a argamassa no estado fresco deve apresentar densidade superior a 1,2 kg/dm³.

Ensaio no estado endurecido

3.4.4. Retração linear por secagem

Para a determinação da retração são necessários pelo menos três CP prismáticos. A norma DIN orienta que se faça a medição no lado mais longo do prisma e na metade da altura do CP para se comparar com as medidas iniciais de 16 cm.

Para o cálculo da retração utiliza-se a equação 5.

$$R_l = \frac{\Delta}{dim} \times 100 \quad (\text{Eq.5})$$

Nesta equação:

RI é a retração linear, em porcentagem (%);

Δ é a variação dimensional do maior comprimento, em milímetros (mm);

dim é o tamanho do maior comprimento do corpo de prova, cerca de 160 mm.

O resultado para cada traço de argamassa é o valor médio dos três CP (triplicata), arredondado a uma casa decimal. A norma DIN (2024) estabelece o valor máximo de 2% para a retração para argamassas sem adição de fibras, e o valor máximo de 3% para rebocos com adição de fibras.

3.4.5. Densidade no estado endurecido

Para determinar a densidade das argamassas no estado endurecido foram utilizados os mesmos três CP prismáticos de cada traço de argamassa utilizados para determinar a retração dimensional. Primeiramente foram determinadas as dimensões de largura, altura e comprimento de cada CP, para calcular o volume pela multiplicação dessas medidas. Em seguida foi determinada a massa de cada CP na balança de precisão e então foi calculada a densidade aparente dividindo a massa pelo volume de cada CP. A norma DIN (2024) orienta que os resultados devem ser a média das medições dos três CP, expressos em g/cm³ e arredondados para duas casas decimais.

3.4.6. Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica é uma forma de medir o quanto um material é capaz de conduzir calor. Revestimentos produzidos com materiais que possuem alta condutibilidade térmica conduzem calor mais rápido do que materiais de baixa condutibilidade térmica, que são chamados isolantes.

Esta propriedade está diretamente relacionada ao conforto térmico no interior das edificações, mas não é a única. Da mesma forma que uma panela de barro no fogo demora para esquentar, e quando o fogo é apagado ela demora para esfriar; ou assim como um filtro de barro deixa a água sempre mais fresca do que uma garrafa de plástico, vidro ou metal; um revestimento de terra aplicado nas paredes, faz com que o ambiente interno das construções esteja sempre mais fresco no verão e mais quentes no inverno, pois demoram mais tempo para transferir o calor (possuem maior inércia térmica), mas também mais efeito evaporativo. No entanto, como os rebocos são relativamente finos, o efeito de diferentes condutibilidades térmicas tem menos impacto no conforto global do ambiente, do que a higroscopicidade.

Para o ensaio de condutibilidade térmica, a norma DIN 18947 (2024) indica a metodologia determinada pela norma DIN V 4108-4, (à qual não se teve acesso). O ensaio foi realizado usando o equipamento ISOMET 2104 (*Heat Transfer Analyser*) com sonda de superfície API 210412 de 60 mm de diâmetro. A sonda emite um fluxo térmico e o equipamento analisa a resposta do material a esse impulso. Portanto, a condutibilidade térmica é uma característica que traduz a forma como um material se deixa atravessar pelo calor. Para se obter resultados mais precisos, é importante que a superfície ensaiada apresente o mínimo de irregularidades possível.

O manual do equipamento indica que o CP ensaiado deva ter espessura mínima de 20 mm e superfície mínima de 60 mm, devido ao tamanho da sonda apresentar diâmetro de 60 mm. O ensaio foi realizado usando três CP com forma de bolacha cilíndrica para cada argamassa, que cumprem as exigências do manual do equipamento. O ensaio deve ser realizado em um ambiente controlado com temperatura de $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $65\pm 5\%$. Durante o dia anterior e os dois dias de realização do ensaio, o ambiente do laboratório apresentou umidade relativa média de 64% e temperatura média de 25°C , dentro das condições exigidas.

Durante a realização do ensaio foi colocada uma placa de poliestireno expandido, com 40 mm de espessura, por baixo dos CP, para que o calor não seja dissipado pela mesa de apoio, evitando interferência nos resultados do ensaio. A sonda então é posicionada na superfície superior do CP (Figura 50) e selecionado a opção “*thermal conductivity*” e “*play*” no equipamento. A partir de então, a sonda emite um fluxo de calor por aproximadamente 15 minutos sobre o CP e exibe o valor da condutibilidade térmica.



Figura 50. Ensaio para medir a condutibilidade térmica com o equipamento ISOMET 2104 (Heat Transfer Analyser) sendo realizado no corpo de prova com forma de bolacha cilíndrica.

3.4.7. Resistência à flexão e à compressão

Os ensaios de resistência à flexão foram realizados com os mesmos CP com que foram determinados o índice de retração e a densidade no estado endurecido. Conforme orienta a norma DIN (2024), os CP foram acondicionados por pelo menos 7 dias antes do ensaio sob as condições de temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e de umidade relativa do ar de $60 \pm 5\%$. Os resultados devem ser expressos em N/mm^2 (igual a MPa) e arredondados para duas casas decimais. Primeiramente, os três CP utilizados nos foram rompidos no ensaio de tração na flexão. Em seguida, com as seis metades obtidas após o rompimento, foi realizado o ensaio de compressão axial.

Para o ensaio de resistência à flexão por três pontos, a prensa universal foi montada com uma célula de carga de 2 kN e configurada para exercer a carga vertical com a velocidade de 0,2 mm/min. Os dois apoios inferiores para o CP foram ajustados para

a distância de 10 cm entre si, e então foi colocado um CP por vez (Figura 51). As superfícies laterais que antes estavam em contato com a forma, apresentavam menos irregularidade, por isto foram voltadas para as áreas de contato com o equipamento



Figura 51. Ensaio de resistência a flexão sendo realizado com CP prismático de argamassa.

O software do equipamento emite um gráfico em tempo real apontando a carga em Newtons (N) que está sendo aplicada em função do tempo em segundos (s), e mostra a força exercida no instante de rompimento do CP na flexão (F_f). Esta força é então utilizada para calcular a resistência a tração na flexão (R_t). Tanto a norma NBR 13279 (2005) quanto a EN 1015-11 (1999), indicada na norma DIN 18947 (2024) orientam que para calcular a R_t (N/mm²), deve-se utilizar a equação 6.

$$R_t = \frac{1,5 \times F_f \times L}{d^3} \quad (\text{Eq.6})$$

Nesta equação:

R_t é a resistência à tração na flexão, em MPa ou N/mm²;

F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma em Newtons (N);

L é a distância entre os apoios, em milímetros (100 mm).

d é a largura da face quadrada do corpo de prova

Depois de calcular a R_t para cada CP rompido, foi calculada a média dos três CP, determinando assim a R_t de cada argamassa avaliada, e respectivo desvio-padrão.

Para o ensaio de compressão, a prensa universal foi montada com a célula de carga de 2 kN e configurada para exercer a carga vertical com a velocidade de 0,7 mm/min.

Em seguida foi colocado um CP por vez entre as bases planas da prensa, com as

superfícies mais regulares voltadas para as áreas de contato com o equipamento (Figura 52).

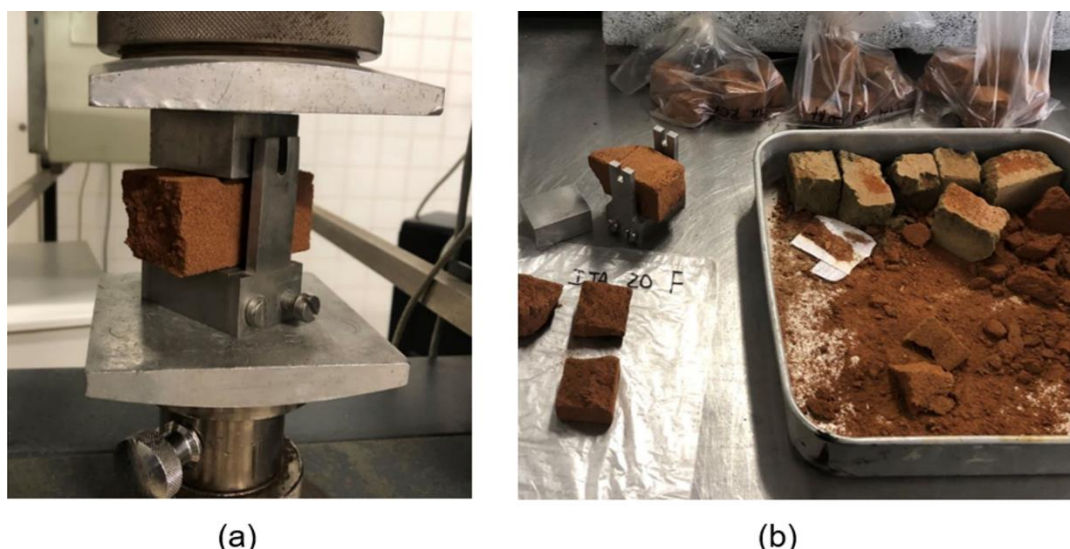


Figura 52. Ensaio de resistência à compressão sendo realizado com CP prismático rompido no ensaio de tração na flexão.

A força máxima, exercida no instante de rompimento do CP na compressão (F_c , em N) também é registrada pelo software do equipamento, e foi utilizada para calcular a resistência à compressão (R_c). Tanto a norma NBR 13279 (2005) quanto a EN 1015-11 (1999), indicada na norma DIN 18947 (2024) orientam que, para calcular R_c (N/mm^2), deve-se dividir a F_c pela área de compressão, que é aproximadamente $1600 mm^2$, resultante de dimensões aproximadas de $40 mm \times 40 mm$. Depois de calcular a R_c para cada CP rompido, foi calculada a média dos seis CP, determinando assim a R_c de cada argamassa avaliada e respectivo desvio-padrão.

3.4.8. Resistência de aderência ao cisalhamento

Para este ensaio, primeiramente devem ser preparados os CP de reboco aplicado em alvenaria que consistem em áreas retangulares de reboco medindo $5 cm \times 4 cm$ de superfície e $1 a 2 cm$ de espessura, sendo três aplicações por argamassa avaliada em cada alvenaria. O equipamento necessário para realização do ensaio é bastante simples e pode ser produzido artesanalmente com peças de madeira. Primeiro este dispositivo é apoiado no topo do CP “reboco aplicado em alvenaria”, em seguida, na pequena plataforma na parte inferior do dispositivo vão sendo progressivamente colocados objetos com massa de $250 g$ (Figura 53), a cada 30 segundos.

A resistência ao cisalhamento adesivo (em N/mm^2) é definida pela massa máxima suportada (em gramas) multiplicada pela aceleração gravitacional (g de $9,81 \text{ m/s}^2$) e dividida pela área da amostra de reboco (em torno de $5 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$) em contato com a parede (em mm^2).



Figura 53. Dispositivo fabricado artesanalmente para realização do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento, suspenso num CP (a) e objetos de massa conhecida colocados progressivamente no dispositivo, antes de se atingir a rotura (b).

3.4.9. Resistência à imersão em água

O ensaio de imersão em água é muito mais exigente do que os requisitos e ensaios habituais para avaliação do comportamento dos rebocos de terra em relação ao contato com a água, seja em ambientes internos (mesmo para cozinha e banheiro) ou ambientes externos (mais expostos a chuvas). No entanto, apesar da norma DIN 18947 (2024) não o exigir na caracterização das argamassas de terra, este ensaio foi realizado pois definitivamente ilustra e evidencia se a adição avaliada causa o efeito de manter a integridade física das argamassas em contato prolongado com água.

Dos quatro CP prismáticos produzidos, três foram utilizados primeiro para os ensaios de retração linear e densidade aparente, em seguida para resistência à flexão (rompendo cada um ao meio) e por último, para resistência à compressão usando as seis metades. O quarto CP prismático foi cortado em três cubos de 4 cm , dos quais um para cada argamassa foi escolhido para ser imerso em um béquer de vidro de 250 ml preenchido com 150 ml de água fria (Figura 54) na temperatura ambiente. Foram feitas fotografias quando o CP foi imerso (tempo 0 minutos) e após 1, 2, 5, 10, 15 e 30

minutos de imersão. Para facilitar a identificação das fotografias, foi escrito e riscado nos azulejos da parede atrás dos béqueres, com caneta para quadro branco, o tempo (em minutos) em que a fotografia foi tirada (Figura 54). A análise dos CP foi feita sobre os efeitos visuais observados nas fotografias quanto à integridade física dos cubos.

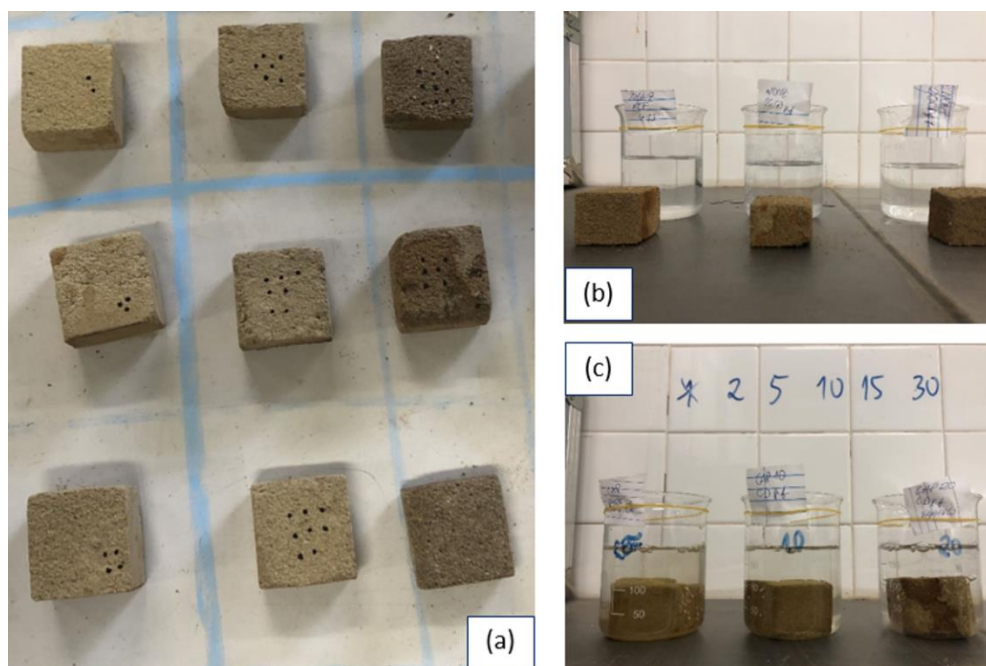


Figura 54. CP cúbicos sendo preparados (a e b) e sendo imersos (c), com indicação do tempo de ensaio (em minutos) indicado na parede de azulejo.

Além disso, um segundo CP cúbico de cada argamassa foi imerso em uma bandeja preenchida com água até uma altura de 10 cm para fazer observações visuais complementares após 24 horas, 7 e 14 dias de imersão (Figura 55).

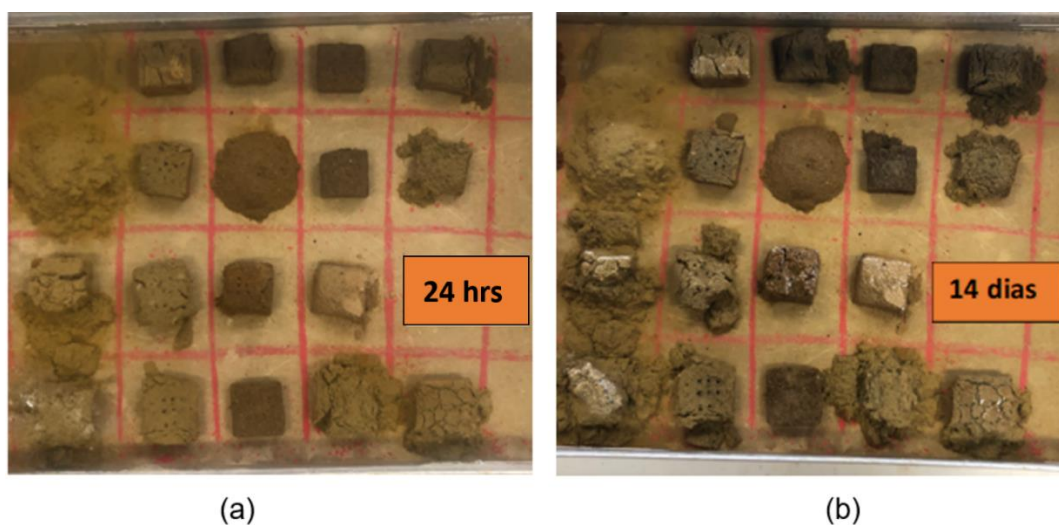


Figura 55. CP cúbicos imersos em água na bandeja após 24 horas (a) e após 14 dias (b).

3.4.10. Resistência à erosão por gotejamento - Geelong drip test

Apesar da norma DIN 18947 (2024) também não contemplar o ensaio de resistência à erosão por gotejamento, considera-se importante avaliar esta propriedade em países de clima tropical com altos índices pluviométricos como o Brasil.

Para realizar o ensaio, foi utilizado o CP de tijolo cerâmico rebocado. Diferente do ensaio para avaliação da aderência entre o revestimento e o suporte que foi realizado em dois suportes diferentes (adobe e tijolo cerâmico), neste ensaio foi usado apenas o tijolo cerâmico, pois o que está sendo avaliado em relação ao contato com a água por gotejamento, é a resistência superficial do revestimento.

Para realizar o ensaio *Geelong drip test* utilizou-se o método definido na norma técnica da Nova Zelândia, a NZS 4298-A1 (2000) e as adaptações sugeridas por Lima *et al.* (2020). A referida norma foi desenvolvida para avaliar a resistência à chuva de CP de taipa, adobe e blocos de terra comprimida com dimensões de 30 cm × 30 cm × 12,5 cm. Por isto, para aplicar este ensaio em revestimentos de terra (cuja espessura é em torno de 2 cm), Lima *et al.* (2020) sugerem adaptações nos métodos do ensaio, as quais foram seguidas na presente pesquisa.

Basicamente, o teste como descrito na norma NZS 4298-A1 (2000) consiste em deixar pingar sobre o CP uma determinada quantidade de água, de uma determinada altura, por um determinado espaço de tempo (Figura 56). Após o ensaio é realizada uma avaliação das dimensões e da profundidade da erosão causada no CP e, ao quebrá-lo imediatamente após a conclusão do teste, a profundidade que a água penetrou. A norma prevê que 100 ml de água sejam deixados pingar de uma altura de 40 cm, sobre o CP, inclinado em aproximadamente 27°. Os 100 ml de água pingando devem ocorrer durante um intervalo de tempo de 20 a 60 minutos, ou seja, o gotejamento deve ocorrer com vazão entre 1,67 ml/min e 5 ml/min.

Como o CP “tijolo rebocado” apresenta uma camada de revestimento com espessura 1,5 cm, muito mais fino em comparação aos 12,5 cm de altura do CP definido na norma NZS 4298-A1 (2000)., Lima *et al.* (2020) sugerem que a quantidade de água seja reduzida proporcionalmente à espessura de 1,5 cm do revestimento, para 12 ml. A duração do gotejamento também foi reduzida para entre 2,4 a 3,0 min, ou seja, que o gotejamento seja realizado com vazão de 4 a 5 ml/min, ainda dentro dos limites estipulados pela norma NZS 4298-A1 (2000).



Figura 56. Ensaio de erosão por gotejamento sendo realizado - *Geelong drip test*.

Já quanto a avaliação dos resultados do ensaio, além de avaliar as dimensões e a profundidade da erosão, Lima *et al.* (2020) sugerem substituir a quebra do CP e análise da profundidade de penetração da água, pela pesagem do material desagregado pelo processo erosivo por gotejamento, depois de seco, ou pela variação de massa do CP antes e depois do ensaio. Para isto, sugeriram o aumento da inclinação do CP para 63° afim de promover o “escorregamento” do material erodido, e a colocação de um recipiente na parte inferior do CP para coletar e pesar o material.

Yttrup *et al.* (1981) e *The Australian Earth Building Handbook* (2002) apresentam alguns parâmetros (Tabela 11) para classificação do resultado dos produtos de terra analisados, baseado na profundidade da erosão causada. No entanto, dada a menor espessura do revestimento (1,5 cm) em comparação à espessura do CP (12,5 cm) indicado na norma NZS 4298-A1 (2000), estes parâmetros não são aplicáveis para avaliação das argamassas de terra para revestimento.

Tabela 11. Classes para avaliação da erosão causada nos CP durante o ensaio de erosão por gotejamento - *Geelong drip test* (traduzido de Yttrup *et al.* 1981; e de *The Australian Earth Building Handbook*, 2002).

Profundidade da erosão	Classe	Aprovação
0	1	Não erosível
Entre 0 e 5 mm	2	Pouco erosível
Entre 5 e 10 mm	3	Erosível
Entre 10 e 15 mm	4	Muito erosível
> 15 mm	5	Reprovado

No entanto, a partir da aplicação das adaptações sugeridas por Lima *et al.* (2020), observou-se um detalhe que talvez possa gerar uma contribuição para um parâmetro de avaliação deste ensaio em revestimentos de terra.

Ao aumentar a inclinação do CP de 27° para 63°, a intenção de Lima *et al.* (2020) foi de promover o fator escorregamento do material erodido. No entanto, durante a realização do ensaio na presente pesquisa, e análise do CP após o ensaio, notou-se que mesmo com a inclinação maior, parte do material erodido não teve força/velocidade/fluxo suficiente para ser carregado para fora do CP, talvez pela elevada aderência causada pela adição de excremento bovino. Assim, por mais que visualmente um CP esteja nitidamente mais erodido que outro, se o material arrastado não for totalmente carregado para fora do CP, ele permanecerá na superfície do tijolo. Ao ser realizada a pesagem do material erodido, e comparado com um CP menos erodido, mas que o material foi mais carregado para fora do CP, pode-se obter resultado distorcido para a perda de massa e erosão sofrida.

Para otimizar a avaliação neste ensaio, Lino (2019) recomendou que antes e depois de realizar o ensaio, os CP sejam deixados na estufa à 40°C até obterem massa constante. Então a nova massa do CP seco após ser erodido pelo gotejamento, pode ser comparada com a massa do CP seco antes de ser submetido ao ensaio. Apesar disso, o material erodido, permanecerá (seco e desagregado) na superfície do CP.

Portanto, a sugestão que aqui se acrescenta, é que após obterem massa constante depois de realizado o ensaio, antes de serem pesados, os CP sejam limpos com um pincel para retirar o restante de material erodido que não foi carregado para fora do CP, evitando que a perda de massa seja determinada equivocadamente. Como as adaptações sugeridas para avaliação do ensaio de erosão por gotejamento em revestimentos de terra foram publicadas recentemente, há ainda poucas pesquisas realizadas com o método sugerido. No entanto, a partir dos resultados de Lino (2019), Lima *et al.* (2020) e da presente pesquisa, sugere-se a Tabela 12, baseada na norma NZS 4298-A1 (2000), como parâmetro de avaliação da perda de massa nesse ensaio aplicado em revestimentos de terra.

Sugere-se também que essa seja constantemente atualizada a cada pesquisa que usar o método adaptado e os parâmetros aqui sugeridos para aprimorar o parâmetro de avaliação.

Tabela 12. Parâmetro sugerido para avaliação da erosão causada nos CP durante o ensaio de erosão por gotejamento - *Geelong drip test*.

Perda de massa (%)	Classe	Aprovação
< 2 g	1	Não erosível
Entre 2 e 4 g	2	Pouco erosível
Entre 4 e 6 g	3	Erosível
Entre 6 e 8 g	4	Muito erosível
> 8 g	5	Reprovado

3.4.11. Adsorção e desadsorção de umidade - Higroscopicidade

A higroscopicidade é a propriedade que os materiais ou produtos têm de adsorver e liberar umidade para o ambiente em função das variações de temperatura e umidade relativa do ar (Faria & Lima, 2018). A terra argilosa, e os produtos e elementos de construção produzidos à base deste material, apresentam elevada higroscopicidade. Portanto, esta é outra importante vantagem, pois contribuem, passivamente, para o maior conforto térmico e equilíbrio da umidade do ar no interior dos ambientes construídos com terra ou mesmo aqueles apenas rebocados com argamassas de terra (Minke, 2006; Maddison *et al.* 2009; Cascione *et al.* 2019; Giada *et al.* 2019; McGregor *et al.* 2016). Portanto, os materiais adicionados como estabilizantes não devem prejudicar a higroscopicidade da argamassa de terra.

Para avaliar a higroscopicidade de um material, o mesmo é exposto a um meio ambiente com uma temperatura fixa cuja umidade deve-se manter constante por um determinado espaço de tempo. Após estar exposto pelo tempo determinado, mantém-se a temperatura no ambiente, mas eleva-se a umidade relativa do ar, que deve ser mantida constante pelo mesmo espaço de tempo usado anteriormente. Em seguida, diminui-se a umidade relativa novamente para a umidade inicial, que também deve ser mantida constante pelo mesmo espaço de tempo. Medidas da massa do material ensaiado devem ser aferidas ao longo dos processos de adsorção de umidade (exposição a umidade mais elevada) e de desadsorção (exposição a umidade menos elevada). Assim se torna possível mensurar a higroscopicidade do material a partir da quantidade de vapor d'água adsorvida e desadsorvida pelo material, em função da área exposta.

Para laboratórios que não possuem Câmaras Climáticas com controle de umidade e temperatura, a avaliação dessa propriedade pode ser realizada utilizando uma sala

com ar condicionado para controle da temperatura, caixas organizadoras plásticas grandes com tampa vedada tendo, dentro destas caixas, recipientes com uma solução salina saturada. Dentro de pequenos espaços fechados com temperaturas controladas, soluções salinas saturadas produzem umidade relativa do ar própria de cada sal, mantendo uma umidade de equilíbrio constante no interior da caixa. A Tabela 13 apresenta alguns sais utilizados no preparo de soluções salinas saturadas para se obter ambiente com umidade constante e controlada.

Tabela 13. Umidade relativa (%) de soluções salinas saturadas. Fonte: Medeiros (2006; Winston & Bates (1960); Takeshita (2016).

Solução Salina		Umidade Relativa % (UR)	
		Temperatura	
		20 C	25 C
Pentóxido de sódio	P_2O_5	0	0
Acetato de potássio	CH_3COOK	23,0	23
Cloreto de magnésio	$MgCl_2$	33,0	32,5
Carbonato de Potássio	K_2CO_3	44,0	43,0
Cloreto de sódio	$NaCl$	76,0	75,5
Cloreto de potássio	KCl	85,0	85,0
Nitrato de potássio	KNO_3	93,5	92,5

Na presente pesquisa, a higroscopicidade das argamassas formuladas foi avaliada utilizando uma Câmara Climatizada da marca e modelo Aralab Fitoclima 300 EDTU (Figura 57), e uma balança com precisão de 0,001g para determinar a massa dos CP e o vapor de água por eles adsorvida e desadsorvida.



Figura 57. Câmara Climática Aralab Fitoclima 300 EDTU utilizada no ensaio para avaliação da higroscopicidade.

O ensaio de adsorção foi realizado adaptado da norma DIN 18947 (2024), com base em Lima *et al.* (2020). A norma define que este ensaio seja realizado com CP retangular plano cuja superfície tenha 1000 cm² (reproduzindo uma amostra de reboco). No entanto, optou-se por realizá-lo com CP com forma de bolacha cilíndrica de acordo com sugestões apresentadas por Faria *et al.* (2016). Apesar da área de superfície ser bem menor, os resultados apresentados por Faria *et al.* (2016) indicam que em ambos CP a curva de adsorção é muito semelhante, porém com diferentes volumes de água adsorvidos proporcionalmente às áreas de superfície.

Depois que os CP com forma de bolacha cilíndrica obtiveram massa constante, foram impermeabilizados com uma fita adesiva no fundo e nas laterais para que a adsorção de água fosse realizada apenas pela face superficial superior. Em seguida foi determinada a massa do CP já com a fita adesiva impermeabilizante.

No dia anterior ao ensaio, a câmara climatizada foi ligada e configurada para manter a temperatura de 23°C e umidade relativa do ar de 50%. Três CP por argamassa formulada foram colocados dentro do equipamento para equilíbrio higroscópico, sendo um CP em cada um dos três “andares” dentro do equipamento, para expor os CP as mesmas condições (Figura 58).



Figura 58. CP com a lateral e fundo impermeabilizados sendo ensaiados dentro da câmara climatizada (a) e sendo pesados (b).

Ao completar 24 horas dentro da câmara, os CP foram pesados novamente e deixados mais 24 horas para nova pesagem e conferir se já alcançaram o equilíbrio higroscópico com o meio. Por fim, esta última medida foi a massa considerada como referência para calcular a água adsorvida nas próximas 24 horas. Imediatamente o equipamento foi configurado para manter a temperatura de 23°C, mas aumentar a umidade relativa para 80% dentro da câmara. A partir deste momento, a câmara só foi aberta, muito rapidamente, para pesagem dos CP, após 1, 3, 6, 12 e 24 horas. De cada vez que a câmara foi aberta, apenas os três CP de cada argamassa foram retirados, pesados o mais rápido possível na balança de precisão, e colocados de volta dentro da câmara, sendo essa novamente aberta e fechada rapidamente.

Ao completar 24 horas de adsorção, a última pesagem foi realizada e deu-se início a avaliação da desadsorção, ou seja, a capacidade de devolver o vapor de água para o ambiente quando este se torna mais seco. Imediatamente após as 24 horas de adsorção, a câmara foi configurada para manter a temperatura de 23°C, mas reduzir a umidade relativa para 50% novamente. A partir de então, os CP também foram pesados após 1, 3, 6, 12 e 24 horas, da mesma forma descrita anteriormente.

Ao completar 24 horas de cada um dos dois ensaios, é possível calcular a massa de água adsorvida e desadsorvida pelos CP a partir da diferença de massa a cada período de pesagem, da última pesagem, para a primeira, no tempo 0. Esta massa é dividida pela área exposta do CP (superfície superior exposta) e com os resultados é montado um gráfico (tempo em abcissa e variação de massa por área exposta em ordenada). A curva gerada e a variação de massa adsorvida e desadsorvida possibilita comparar a higroscopicidade de diferentes materiais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Descrição geral

Como foram avaliadas muitas variáveis e argamassas, os resultados foram agrupados de maneira a responder os objetivos específicos propostos. Portanto, cada seção do capítulo 4, atende a um ou mais objetivos, e estão listadas abaixo com indicação dos ensaios que foram realizados em cada uma:

Na seção 4.2. foram identificados os efeitos causados pela a adição de areia nas argamassas de terra produzidas com as três terras (CAP, MON e ITA), e da adição de 20% de EBfp7 como substituto da adição de areia. As argamassas foram avaliadas quanto a: retração, resistência mecânica, resistência à imersão em água, higroscopicidade e condutibilidade térmica.

Na seção 4.3. foram identificados os efeitos causados pela adição de 10% e 20% de EBfp7 em argamassas de terra produzidas também com as três terras (CAP, MON e ITA). As argamassas foram avaliadas quanto a: retração, densidade, resistência mecânica, aderência e resistência à imersão em água.

Na seção 4.4. foram identificados a influência da dieta dos bovinos e da adição de EB em diferentes processamentos, nos efeitos causados nas argamassas produzidas com a terra CAP. Também foi avaliado o potencial de reciclagem de uma argamassa com adição de 20% de EBfp7. As argamassas foram avaliadas quanto a: retração, densidade, resistência mecânica, aderência e resistência à imersão em água.

Na seção 4.5. foi identificada a Influência da fermentação das argamassas frescas com adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7, e apresentada uma comparação com os efeitos causados pela adição de 10% de fibras vegetais e pela adição de 10% de cal aérea hidratada, nas argamassas produzidas com a terra CAP. As argamassas foram avaliadas quanto a: retração, densidade, condutibilidade térmica, resistência mecânica, aderência, resistência à imersão em água e à erosão por gotejamento e higroscopicidade.

Na seção 4.6. foi apresentada uma síntese dos resultados obtidos em todas as outras seções anteriores.

4.2. Efeitos da adição de areia nas argamassas de terra, e da adição de excremento bovino como substituto da adição de areia

O objetivo desta seção é apenas discutir os efeitos causados pela adição de areia na formulação das argamassas de terra e os efeitos causados pela adição de 20% de EBfp7 como substituto a adição de areia. Para verificar os efeitos causados pela adição de areia, foram produzidas argamassas com e sem adição de areia, utilizando as três terras. Para verificar os efeitos causados pela adição de EBfp7, foram produzidas argamassas sem adição de areia, mas com a adição de 20% de EBfp7, utilizando apenas as terras CAP e MON. Todas as argamassas utilizadas na presente seção estão descritas a seguir. Entre parênteses está o traço volumétrico de areia adicionada para produção de cada uma.

CAP(1:0) - Terra CAP sem adições;

CAP(1:0)+20EBfp7 - Terra CAP:areia (1:0) com adição de 20% de EBfp7 (coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias);

CAP(1:1) - Terra CAP:areia (1:1);

CAP(1:1,5) - Terra CAP:areia (1:1,5);

CAP(1:1,5)+20EBfp7 - Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 20% de EBfp7 ;

MON(1:0) - Terra MON sem adições;

MON(1:0)+20EBfp7 - Terra MON:areia (1:0) com adição de 20% de EBfp7;

MON(1:1) - Terra MON:areia (1:1);

MON(1:1,5) - Terra MON:areia (1:1,5);

MON(1:1,5)+20EBfp7 - Terra MON:areia (1:1,5) com adição de 20% de EBfp7;

ITA(1:0) - Terra ITA sem adições;

ITA(1:1) - Terra ITA:areia (1:1);

ITA(1:2) - Terra ITA:areia (1:2);

ITA(1:3) - Terra ITA:areia (1:3).

Nesta seção em específico, as argamassas foram selecionadas por diferentes critérios para serem avaliadas por diferentes ensaios, sendo que nem todos os ensaios foram realizados com todas as argamassas. De maneira geral as argamassas foram avaliadas com os seguintes ensaios: retração linear por secagem, condutibilidade térmica, higroscopicidade, resistências à flexão, à compressão, à aderência e à imersão em água.

As argamassas foram produzidas com a quantidade de água necessária para se obter consistência de espalhamento de 170 mm, conforme limites da norma DIN 18947 (2024). Todas as argamassas estão de acordo com a norma DIN (2024) apresentando densidade no estado fresco superior a 1,2 g/cm³. A proporção de água e de EB adicionados, e a densidade no estado fresco, estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14. Percentagem de EB adicionado, relação água/componentes secos para obter espalhamento de 170 mm, retração e densidade das argamassas no estado fresco.

Argamassas e traço volumétrico (terra:areia)	Adição de (EB) excremento bovino (% vol. T+A)	Relação água/ (T+A+EB) (%)	Retração (%)	Densidade fresca (g/cm ³)
CAP(1:0)	0	25	3,68	1,53
CAP(1:0)+20EBfp7	20	28	2,02	1,48
CAP(1:1)	0	22	2,51	1,48
CAP(1:1,5)	0	20	1,56	1,45
CAP(1:1,5)+20EBfp7	20	23	1,19	1,36
MON(1:0)	0	25	2,83	1,49
MON(1:0)+20EBfp7	20	28	0,83	1,44
MON(1:1)	0	23	1,05	1,43
MON(1:1,5)	0	21,5	0,43	1,40
MON(1:1,5)+20EBfp7	20	25	0	1,31
ITA (1:0)	0	35	6,31	1,91
ITA (1:1)	0	29	4,87	1,89
ITA (1:2)	0	25	3,41	1,87
ITA (1:3)	0	22	1,95	1,85

A partir dos resultados apresentados na Tabela 14, nota-se que a adição de EB implicou em pequeno aumento da relação água/componentes secos, enquanto a adição de areia implicou uma pequena redução. As argamassas com a terra mais argilosa (ITA) necessitaram de maior relação água/componentes secos. Nas argamassas CAP e MON, 20% de adição de EB foi mais eficaz na redução da retração em comparação com a adição de 1 volume de areia. A adição de areia reduziu a densidade no estado fresco das argamassas, provavelmente devido à redução da relação água/sólidos. E a adição de 20% de EB reduziu a densidade das argamassas frescas, devido a menor densidade do EB em comparação com à terra e à areia.

Resistência à flexão e à compressão - Influência da adição de areia

Apesar da adição de areia reduzir a retração, a Figura 59 mostra que a adição de areia também reduz a resistência a compressão (R_c) e à flexão (R_f) das argamassas produzidas com as três terras. Portanto, caso não seja adicionado outro material natural capaz de cumprir esta função, a adição de areia nas argamassas de terra deve ser a mínima necessária para conter a retração e surgimento de fissuras.

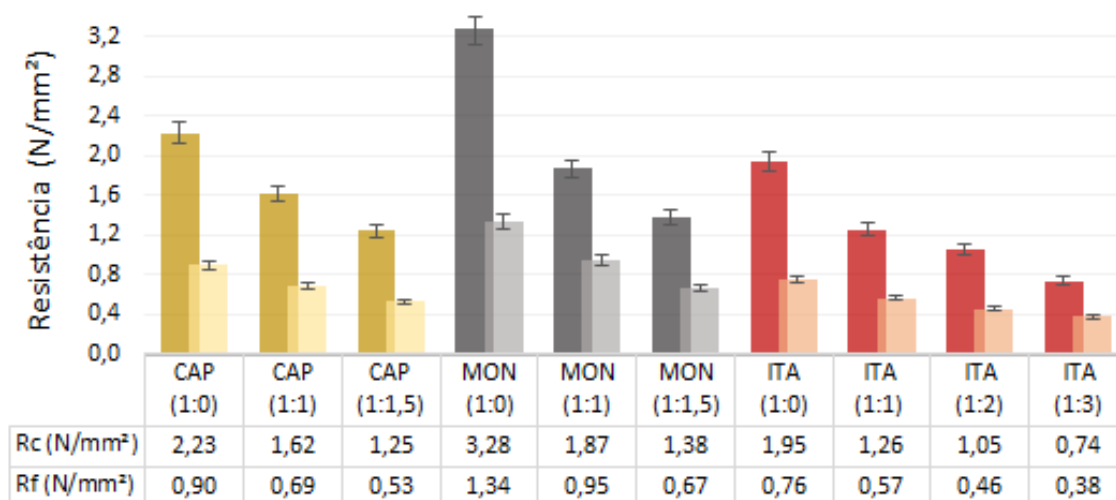


Figura 59. Efeito na resistência mecânica causado pela adição de areia nas três terras: média e desvio padrão.

Dentre as argamassas sem adição de areia produzidas com as três terras, a terra ITA apresenta a menor resistência mecânica. Até o momento, para além de Pachamama *et al.* (2020; 2024 b,c), não se encontraram outras publicações em revistas científicas avaliando as propriedades físicas e mecânicas de argamassas de terra produzidas com terras brasileiras. Por isto não é possível fazer uma análise comparativa com muitas argamassas produzidas com terras brasileiras.

Apesar disso, Walter *et al.* (2022) avaliou a resistência mecânica de argamassas de terra, sem adição extra de areia, produzidas com 14 terras da Guiana Francesa, também de clima tropical. Walter *et al.* (2022) encontraram Rc de 0,21 a 2,53 N/mm² e Rf de 0,3 a 0,8 N/mm². Estes resultados mostram a grande variação existente apenas entre as terras de um pequeno país tropical próxima geograficamente do Brasil. Nota-se, que os resultados apresentados pelas argamassas CAP, MON e ITA sem adição de areia estão dentro da gama de valores encontrados por Walter *et al.* (2022) para as terras tropicais da Guiana, e também dentro da gama de valores apresentada por Röhlen & Ziegert (2011) entre 0,6 e 3 N/mm².

Após realizar a caracterização química das terras tropicais da Guiana, Walter *et al.* (2022) observaram que a maior resistência mecânica das argamassas com essas terras tropicais tem correlação direta com a maior presença de óxidos de ferro e de alumínio na terra. No presente estudo, de acordo com os resultados da DRX, a terra tropical ITA, possui presença expressiva de óxidos de ferro (15% goethita em massa), mas quando a argamassa ITA (1:0) é comparada com as argamassas MON e CAP (1:0), a sua resistência mecânica é menor em relação as de clima temperado.

Dentre as três argamassas sem adição de areia avaliadas, MON (1:0), apresentou a maior resistência mecânica. A partir da caracterização das três terras (Tabelas 6 e 7), observou-se que a terra MON apresenta a distribuição granulométrica mais equilibrada (45% de areia, 40% de silte e 15% de argila) e a maior densidade (1,34 g/cm³), enquanto a terra CAP apresenta densidade intermediária (1,14 g/cm³) e a terra ITA apresenta a menor densidade (1,06 g/cm³), exatamente a mesma ordem decrescente de resistência mecânica. Afinal, uma distribuição granulométrica mais equilibrada reduz a quantidade de vazios na estrutura, o que acaba por aumentar a densidade da terra (e da argamassa com ela produzida) e a resistência mecânica do produto final.

Além da distribuição granulométrica mais equilibrada em MON, foi identificado um componente mineral na proporção expressiva de 13% (em massa) que só está presente nesta terra: a horneblenda. De acordo com o Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert, a horneblenda “*é o mineral mais comum do grupo dos inossilicatos de cadeia dupla. Mineral de origem metamórfica e/ou magmática. É encontrado em rochas metabásicas (anfíbolitos, metagabros, etc), em rochas metassedimentares (xistos, paragneisses, etc), granulitos, etc. e, em diversas rochas magmáticas (granitos, granodioritos, sienitos, dioritos, andesitos, tonalitos, etc)*”.

A horneblenda é o mineral mais abundante em uma rocha conhecida como anfíbolito, que possui inúmeras utilizações. Triturado pode ser usado na construção de estradas e lastro ferroviário. Cortado pode ser usado como pedra de mão na construção civil. Mas “*as peças de mais qualidade são cortadas, polidas e vendidas sob o nome de “granito preto” para uso em fachadas de prédios, pisos, bancadas e outros usos arquitetônicos*” (Manual de Mineralogia, 2019). Devido sua composição mineral, este é um mineral iônicamente estável e possui alta densidade (Pinto & Kämpf, 1997).

Este componente não está presente nem na terra tropical ITA, e nem na terra de clima temperado CAP coletada a “apenas” 200 km de distância da terra MON. Portanto, devido sua elevada densidade e dureza, sua presença pode estar relacionada a maior resistência mecânica apresentada pela argamassa MON (1:0). Portanto, apenas o fato da terra ser de origem tropical ou de clima temperado não justifica ou determina generalizadamente a resistência mecânica das argamassas de terra. Pelo contrário, existe uma combinação de fatores como o tipo de argila e a composição mineralógica, iônica e granulométrica que são responsáveis pelo seu comportamento, e que podem variar mesmo em terras de origem geográfica semelhante.

Excremento bovino como substituto da adição de areia

Como dito anteriormente na seção 2.1.1., a extração de areia causa grandes impactos ambientais negativos como na dragagem de leitos de rios, enquanto a adição de outra terra mais arenosa pode ser um resíduo de escavação de obras. No entanto, há também materiais naturais, residuais ou não, que também podem contribuir para a substituição da adição de areia.

Na dissertação de mestrado do autor foi usada uma outra terra areno siltosa rosa (TASR) com 9% de argila (caulinita e moscovita), 36% de silte e 55% de areia em sua composição. Apesar do baixo teor de argila, as argamassas produzidas com essa terra precisaram da adição de areia no traço 1:1 (TASR:areia) para conter a fissuração apresentada. Dentre outros objetivos, na referida dissertação, também foi avaliado se a adição de EB na argamassa apenas com a terra TASR, seria capaz de excluir a necessidade de adicionar areia para conter a retração. Foi verificado que a proporção volumétrica de 20% de EB conseguiu conter a retração e o surgimento de fissuras na superfície do reboco com sucesso, dispensando a adição de areia (Figura 60), e ainda oferecendo aumento expressivo na aderência à alvenaria (adobe e tijolo cerâmico) e não alterando a resistência mecânica da terra TASR pura, sem adição de areia.



Figura 60. Efeito causado pela adição de 20% excremento bovino compostado por 18 dias, na terra TASR sem adição de areia. Nascimento, 2020.

Na presente pesquisa, a adição de 20% de EB também foi capaz de conter o surgimento de fissuras nos rebocos produzidos com as terras CAP e MON sem a necessidade de adicionar areia (Figura 61). Já com a terra ITA, devido ao seu elevado teor de argila (70%), não foi possível conter a fissuração com a adição de 20% de EBfp7. Ao observar com mais aproximação, a argamassa CAP(1:0)+20EBfp7 ainda manifesta microfissuras, no entanto, apesar de não ter sido avaliado, possivelmente duas ou três demãos de tinta à base de terra podem cobrir estas fissuras.

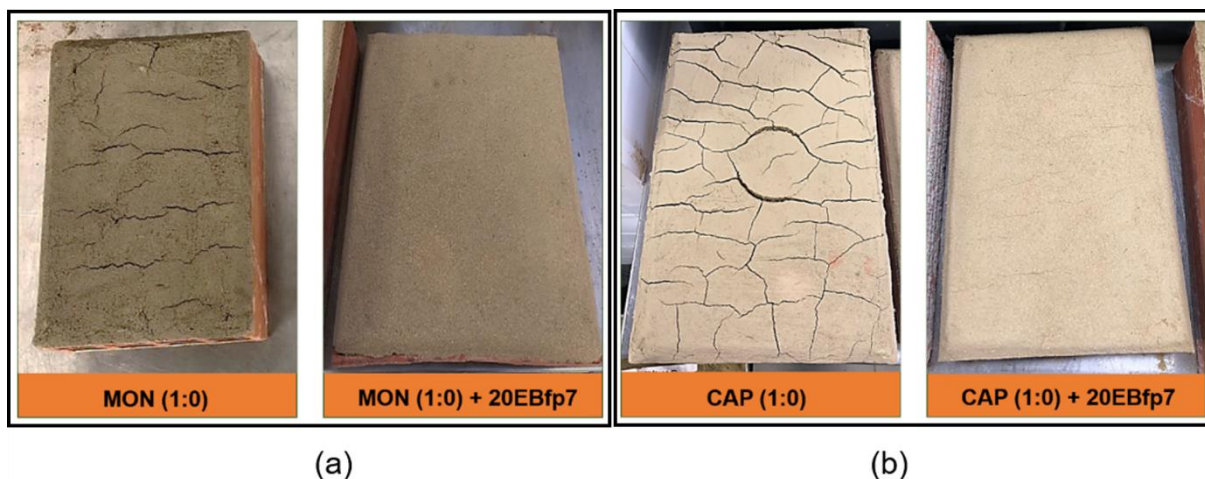


Figura 61. Reboco em tijolo cerâmico produzido com as argamassas sem adição de areia (1:0), sem e com adição de 20% de EBfp7.

Comparando as terras brasileiras ITA e TASR com as duas terras portuguesas CAP e MON, nota-se que, em terras com mais de 40% de areia e com no máximo 15% de argila, a adição de 20% (em volume) de EB é capaz de conter a retração da argamassa, estabilizando fisicamente os rebocos sem necessidade de adicionar areia.

Resistência à flexão e à compressão - Adição de EB substituindo a adição de areia

Na pesquisa de mestrado do autor, na argamassa produzida com a terra TASR no traço 1:0 (terra:areia) a adição de 20% de EB proporcionou aumento na R_c e na R_f . No entanto, a Figura 62 mostra que, no presente estudo, apesar de conter a retração, a adição de 20% de EBfp7 não proporcionou aumento da resistência mecânica nas argamassas produzidas com as terras CAP e MON. Apesar disso, mesmo com a redução causada, as resistências apresentadas pelas duas argamassas com adição de 20% de EBfp7 ainda são bastante elevadas e muito superiores aos limites mínimos para R_c , de 1 N/mm^2 , e para R_f , de $0,5 \text{ N/mm}^2$, determinados pela norma DIN 18947 (2024) para argamassas de terra para revestimentos. São também muito acima que o valor mínimo de $1,5 \text{ N/mm}^2$ exigido para R_c de adobes (individualmente), de acordo com a norma brasileira NBR 16814 (2020).

Nota-se também que em ambas as terras, percentualmente, as reduções causadas nas R_c são mais expressivas que nas R_f , possivelmente devido à presença das fibras vegetais. Além disso, a redução causada na resistência mecânica da argamassa produzida com a terra MON (1:0) foi maior (20% e 17% na R_c e R_f , respectivamente) que a redução causada na resistência mecânica da terra CAP (1:0) (13% e 6% respectivamente).

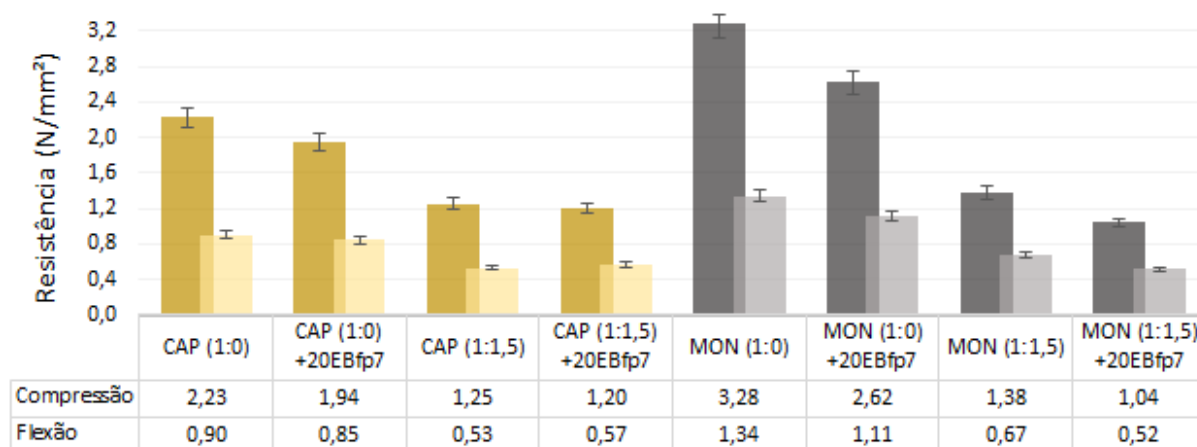


Figura 62. Efeito nas resistências à compressão e flexão causado pela adição de 20% de EBfp7 como substituo a adição de areia nas argamassas MON (1:0) e CAP (1:0).

Imersão em água

Outro efeito causado pela adição de areia na argamassa de terra, também pode ser observado em relação à resistência ao contato com a água. Devido ao seu menor teor de areia, a terra MON foi selecionada, para formular argamassas com (1:1,5) e sem (1:0) adição de areia e com adição de 20% de EBfp7 em substituição a adição de areia. Na Figura 63 estão apresentadas fotografias do ensaio de imersão em água realizado com as quatro argamassas.

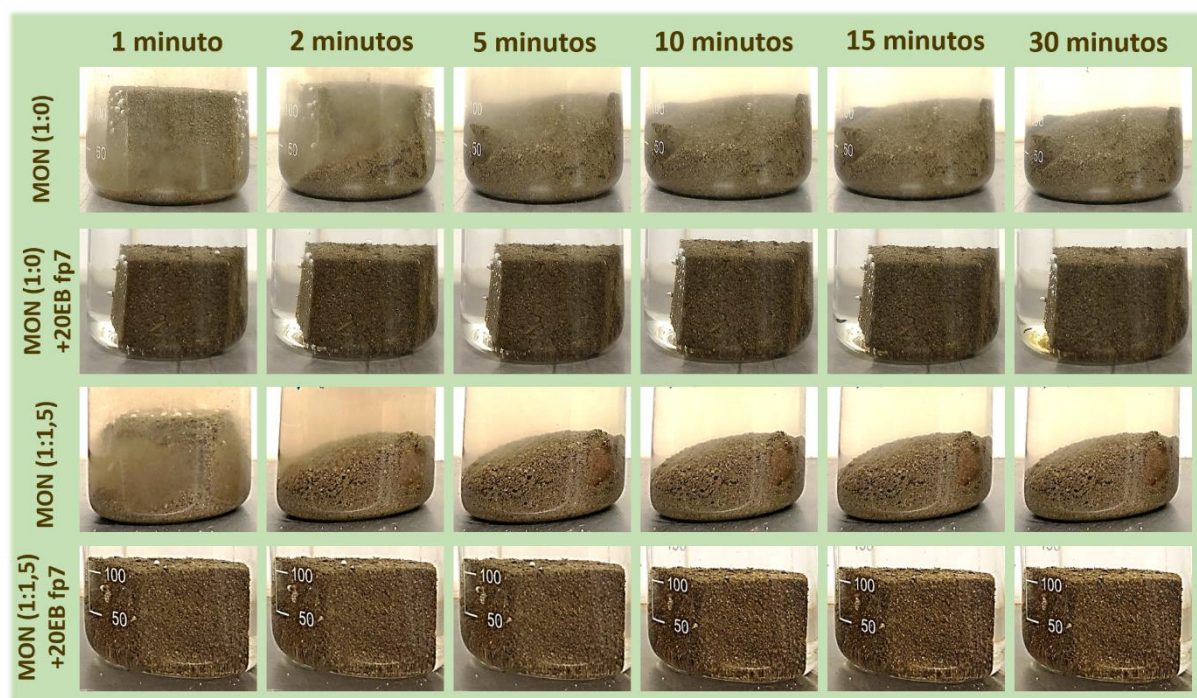


Figura 63. Imersão em água por até 30 minutos dos corpos de provas das argamassas MON(1:0), MON(1:1,5) com e sem adição de 20% de EBfp7.

Os resultados mostram que a adição de areia (logo o menor teor de argila) na argamassa MON(1:1,5), causa menor durabilidade da argamassa em contato com a água. Além disso, a Figura 63 também evidencia mais um benefício causado pela adição de 20% de EB como substituto da areia: o aumento drástico da durabilidade por resistência ao contato com a água.

Adsorção por área de reboco

A Figura 64 apresenta as curvas de adsorção e de desadsorção das argamassas produzidas com a terra MON sem adição de areia (1:0), com e sem adição de 20% de EBfp7; e da argamassa com adição de areia no traço volumétrico 1:1,5 (terra MON:areia) com e sem adição de 20% de EBfp7.

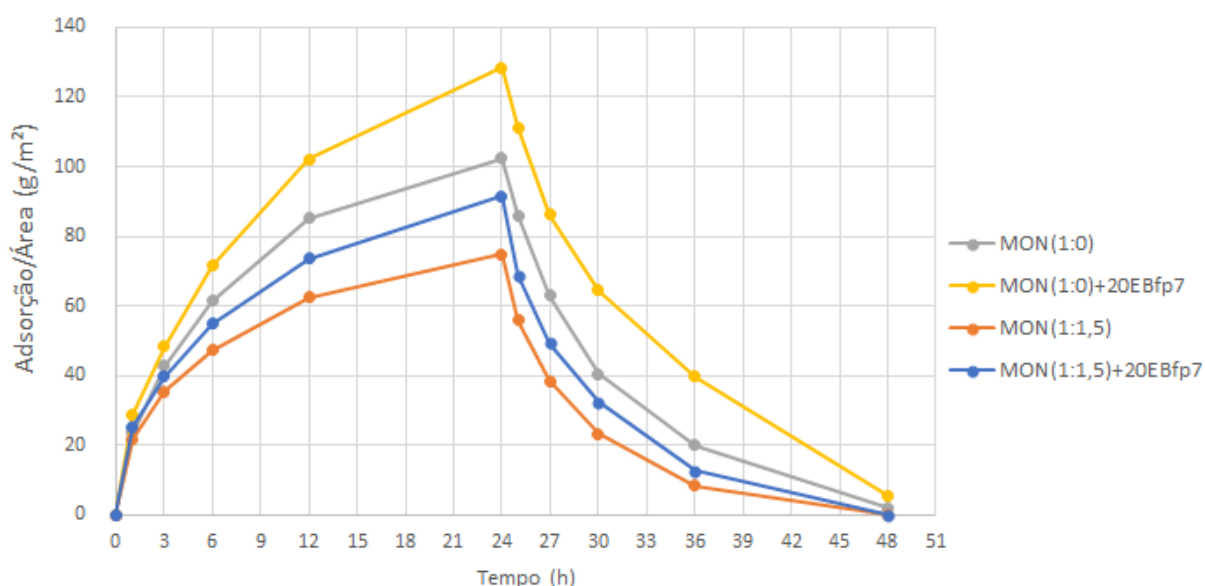


Figura 64. Curva de adsorção e desadsorção por m² de rebocos produzidos com a terra MON com e sem adição de 20% de EBfp7 e/ou de areia na adsorção.

Como pode ser visto nas Figuras 64 e 65, a adição de areia na argamassa produzida com a terra MON também reduz a higroscopicidade em 27%. A argila é o componente responsável pela propriedade de adsorver e liberar umidade para o ambiente, portanto, a redução do teor de argila provocado pela adição de areia, naturalmente resultou na redução da higroscopicidade da argamassa. Por outro lado, além de ter aumentado a resistência ao contato com a água por imersão, a adição de EB também não prejudicou a higroscopicidade do revestimento, pelo contrário, aumentou em 25%, o que é uma outra grande vantagem.

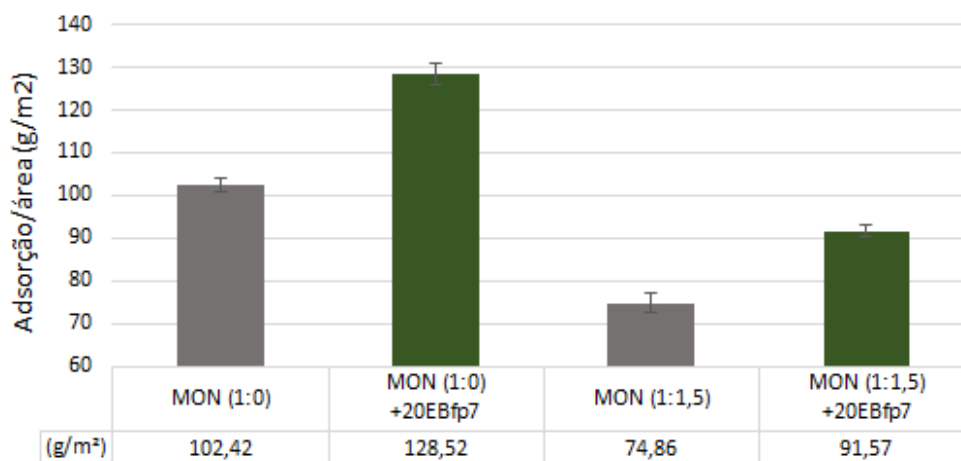


Figura 65. Efeito da adição de 20% de EBfp7 e/ou de areia na adsorção por m² de rebocos produzidos com a terra MON.

Lima *et al.* (2016) também avaliaram a adsorção de umidade em argamassas de terra ilítica, comparando os efeitos causados pela adição de areia nos traços volumétricos 1:2 e 1:4 (terra:areia), e também observaram redução na higroscopicidade da argamassa com maior adição de areia, tendo os dois traços apresentado resultados de 72,3 g/m² e 53,7 g/m², respectivamente.

Comparando com os resultados apresentados nesta seção, a argamassa MON (1:1,5) apresentou valor semelhante a argamassa de Lima *et al.* (2016) produzida com a adição de 2 volumes de areia (1:2). Já a argamassa MON (1:0) que não possui areia adicionada (além daquela naturalmente presente na composição da terra MON), apresentou adsorção ainda maior, naturalmente pela menor presença de areia e maior presença de argila.

Condutibilidade térmica

Além de reduzir a resistência em relação ao contato com a água e a higroscopicidade, a adição de areia e de EB nas argamassas também influencia a condutibilidade térmica dos rebocos produzidos. Na Figura 66, é possível observar que a argamassa se torna menos isolante termicamente com a adição de areia. Ao contrário, a adição de EB torna a argamassa ainda mais isolante, pois reduz a sua condutibilidade térmica.

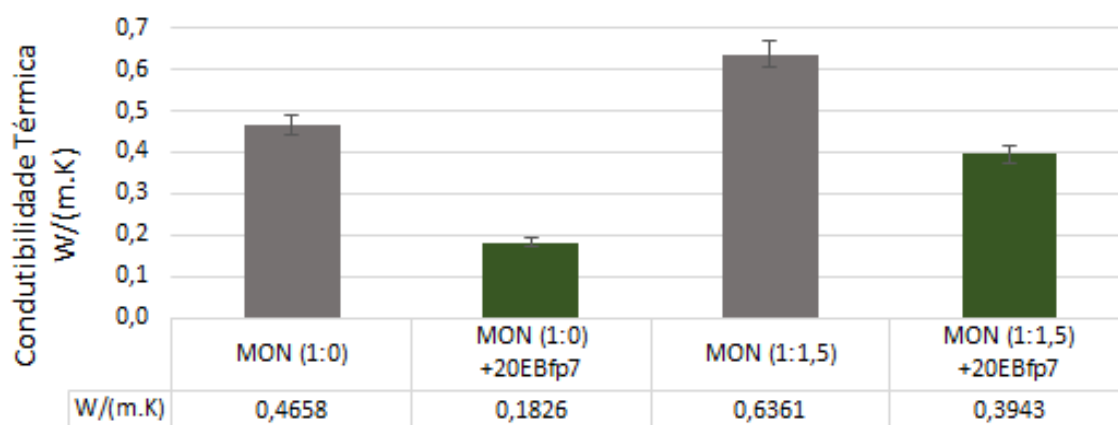


Figura 66. Efeito da adição de 20% de EBfp7 e/ou de areia na condutibilidade térmica rebocos produzidos com a terra MON.

Outras publicações também encontraram resultados que reforçam a redução da propriedade de isolamento térmico causada pela adição de areia nas argamassas de terra (Ashour *et al.* 2010).

Aluma (2023) comparou os efeitos causados na condutibilidade térmica de argamassas de terra causados pela adição de areia, palha, EB, lã de ovelha e folhas (aciculiformes) de pinheiro, utilizando um método simplificado baseado na equação de transferência de calor de Fourier. Os resultados mostraram que a condutibilidade térmica dos rebocos de terra diminuiu proporcionalmente ao aumento da adição de fibras, lã e de EB; e aumentou com o aumento da adição de areia, tal como os resultados encontrados na presente pesquisa.

Diante do exposto, ficam claros os benefícios causados pelo uso da adição de EB em substituição a adição de areia. Portanto antes de adquirir areia para estabilização física de argamassas de terra, vale a pena testar os efeitos causados pela adição de EB na terra sem adição de areia. Afinal, usar o EB como substituo da adição de areia pode gerar economia tanto de recursos financeiros como de recursos naturais como a areia e contribuir para a preservação do meio ambiente.

4.3. Efeitos causados pela adição de excremento bovino em argamassas de terra produzidas com três terras diferentes, sendo uma do Brasil e duas de Portugal

Esta seção foi tema de um artigo publicado em 2024, intitulado: *Effect of Cow Dung Additions on Tropical and Mediterranean Earth Mortars: Mechanical Performance and Water Resistance* (Pachamama et al. 2024b).

Em estudos anteriores realizados com duas terras brasileiras (Pachamama et al. 2020; 2024a) já foi evidenciado que a adição de EB do Brasil nas proporções de 10% e 20% (em volume) causaram redução da retração e aumento da resistência mecânica e da aderência às alvenarias de adobe e de tijolo cerâmico das argamassas produzidas com as duas terras. Uma das duas terras utilizadas nas duas referidas publicações, é a mesma terra ITA apresentada no presente estudo, porém nestes dois estudos anteriores esta foi referida como terra KCE e foi utilizado o traço volumétrico 1:4 (terra:areia) e no presente estudo foi utilizado o traço volumétrico 1:3.

Para verificar (i) os efeitos causados pela adição de EB em argamassas de terra produzidas com terras de composição e origem geográfica diferentes, e para verificar (ii) se os mesmos efeitos causados pela adição de EB do Brasil são proporcionados ao adicionar um EB de origem geográfica diferente (no caso, português) nas argamassas produzidas com a terra ITA, agora com o traço 1:3 (terra:areia): foram avaliadas e comparadas argamassas produzidas com três terras, sendo uma do Brasil (terra ITA) e duas de Portugal (terras CAP e MON), sem e com adição de EB coletado em Moita, Portugal, nas mesmas proporções volumétricas: 10% e 20%.

Para estes objetivos específicos foi utilizado apenas a amostra de excremento intitulada EBfp7, excretado por animais alimentados no pasto (em Moita, Portugal), coletado fresco no pasto, compostado por 7 dias sem contato com o solo, conforme caracterização descrita na seção 3.2.2. O EBfp7 foi escolhido pois, segundo a literatura, a compostagem do EB por ao menos 7 dias já é suficiente para eliminar possíveis patógenos e outros contaminantes que estiverem presente no EB.

No dia da produção das argamassas, a amostra EBfp7 apresentava 61% de teor de umidade e densidade de 0,40 g/cm³.

Conforme o teste preliminar de retração, apresentado na seção 3.3.1., todas as argamassas foram formuladas com o traço volumétrico terra:areia que apresentou

menor retração e surgimento de fissuras: ITA (1:3), CAP (1:1,5) e MON (1:1,5). Para avaliar a diferença de comportamento das argamassas produzidas com as três terras, foram formuladas uma argamassa sem adição de EB (como referência - REF) com cada uma das três terras. Para avaliar os efeitos da adição de EB nestas argamassas, também foram formuladas mais duas argamassas (com cada terra) com a adição de EBfp7 nas mesmas proporções volumétricas em relação a terra + areia adicionada (10% e 20%). Todas as argamassas formuladas estão descritas a seguir. Entre parênteses está o traço volumétrico de areia adicionada para produção de cada uma:

ITA-REF (1:3) - Terra ITA:areia (1:3) sem adição de EB;

ITA(1:3)+10EBfp7 - Terra ITA:areia (1:3) com adição de 10% de EBfp7 (coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias);

ITA(1:3)+20EBfp7 - Terra ITA:areia (1:3) com adição de 20% de EBfp7;

CAP-REF (1:1,5) - Terra CAP:areia (1:1,5) sem adição de EB;

CAP(1:1,5)+10EBfp7 - Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 10% de EBfp7;

CAP(1:1,5)+20EBfp7 - Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 20% de EBfp7;

MON-REF (1:1,5) - Terra MON:areia (1:1,5) sem adição de EB;

MON(1:1,5)+10EBfp7 - Terra MON:areia (1:1,5) com adição de 10% de EBfp7;

MON(1:1,5)+20EBfp7 - Terra MON:areia (1:1,5) com adição de 20% de EBfp7.

As argamassas foram avaliadas quanto a: retração linear por secagem, densidade no estado endurecido, resistências à flexão, à compressão, à aderência (por cisalhamento) e à imersão em água.

Para garantir boa trabalhabilidade e baixa retração, foi adicionada água na quantidade necessária para se obter argamassas com espalhamento de 170 mm no ensaio de consistência por espalhamento, dentro dos limites estimulados pela norma DIN 18947 (2024). As argamassas frescas foram caracterizadas pela densidade fresca, seguindo a NBR 13278 (2005) e a EN 1015-6 (1998). Todas as argamassas frescas apresentaram densidade superior a 1,2 g/cm³, tal como exigido pela norma DIN (2024). A proporção de água e de EB adicionados, e a densidade no estado fresco, estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15. Percentagem de EB adicionado, relação água/componentes secos para obter espalhamento de 170 mm e densidade das argamassas no estado fresco.

Argamassas e traço volumétrico (terra:areia)	Adição de (EB) excremento bovino (% vol. T+A)	Relação água/ (T+A+EB) (%)	Densidade fresca (g/cm ³)
ITA-REF (1:3)	0	22	1,85
ITA(1:3)+10EBfp7	10	24	1,79
ITA(1:3)+20EBfp7	20	26	1,74
MON-REF (1:1,5)	0	21,5	1,40
MON(1:1,5)+10EBfp7	10	23	1,36
MON(1:1,5)+20EBfp7	20	25	1,31
CAP-REF (1:1,5)	0	20	1,45
CAP(1:1,5)+10EBfp7	10	21,5	1,39
CAP(1:1,5)+20EBfp7	20	23	1,36

Com todas as três terras, a adição de água necessária para boa trabalhabilidade da argamassa aumentou a medida em que mais EB foi adicionado. E a densidade das argamassas frescas reduziu, afinal o EB apresenta densidade muito menor em comparação com a terra e a areia. Devido ao maior teor de argila na terra ITA e maior limite de plasticidade, foi necessário adicionar mais água nestas argamassas.

Retração Linear por secagem

Embora o traço terra:areia tenha sido escolhido após o teste preliminar de retração realizado por análise visual de tijolos rebocados (seção 3.3.1.) e tenha sido adicionado areia suficiente para limitar a fissuração em cada argamassa, os resultados apresentados (Figura 67) pelas três argamassas de referência para retração linear são significativamente diferentes. Apesar disso, todas as argamassas avaliadas, com e sem adição de excremento, cumprem os requisitos da norma DIN 18947 (2024) ao apresentar índice de retração abaixo de 2%.

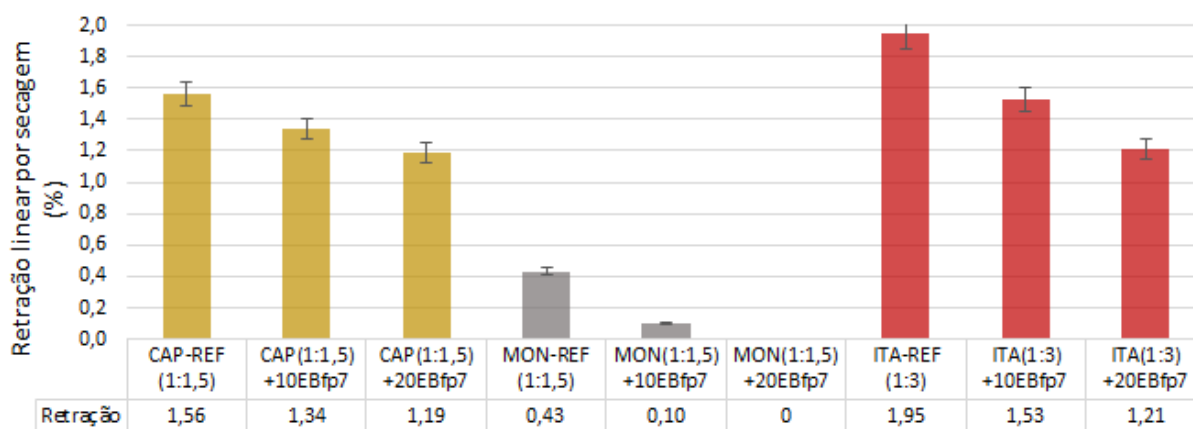


Figura 67. Retração linear por secagem das argamassas produzidas com as três terras com a adição (em volume) de 10% e 20% de EBfp7: média e desvio padrão.

Observando os resultados da retração linear por secagem, fica evidente que a adição de EB reduz a retração das argamassas. Portanto, antes de adquirir areia, vale sempre verificar se a adição de 10% e 20% EB é capaz de conter a retração. A Figura 67 mostra que as argamassas MON-REF e CAP-REF apresentam retração menor que a argamassa ITA-REF. Isto se justifica principalmente pelo teor de argila presente em cada terra. As argamassas produzidas com as terras CAP/MON:areia (1:1,5) contêm aproximadamente 6% de argila (Ilita) em sua composição, enquanto as argamassas produzidas com a terra ITA:areia (1:3) contêm 18% de argila (caulinita), o que causou mais retração. Mesmo que as argamassas com a terra ITA tenham sido produzidas com o dobro de areia adicionada, devido ao elevado teor de argila (70%) na terra ITA, as argamassas ITA-REF (1:3) ainda continham o triplo de argila em sua composição final, comparado as argamassas MON-REF e CAP-REF (1:1,5).

Apesar de apresentarem o mesmo teor de argila (6%) e de areia adicionada (1:1,5), as argamassas produzidas com a terra MON apresentam retração linear ainda menor do que as produzidas com a terra CAP. Isso pode ser justificado pela composição mineralógica e granulométrica das duas terras. A terra MON contém compostos menos expansivos e apresenta Limite de Liquidez menor (devido ao maior teor de silte), precisando, por isso, de uma menor adição de água de amassadura, também contribuindo para uma menor retração durante a secagem. Além disso, a terra MON contém maior teor de areia grossa e distribuição granulométrica mais homogênea. Isso também justifica porque a terra MON é usada tradicionalmente para produção local de tijolos feitos artesanalmente, e com excelente qualidade, sem qualquer adição.

Em relação a adição de EB, em todas as argamassas produzidas com os três diferentes tipos de terras, observou-se a redução da retração linear por secagem, tendo a proporção de 20% reduzido mais a retração do que a de 10%. Isto é provavelmente explicado pelo elevado teor de fibras vegetais presentes no EBfp7 adicionado as argamassas. Outra razão é a apresentada por Millogo *et al.* (2016) e Rao *et al.* (2021): os compostos com propriedades aglutinantes formados a partir da interação entre os componentes da terra e do EB, (sejam os silicatos de amina ou os biofilmes formados por exopolissacarídeos, EPS, secretados pelas bactérias), ligam-se as partículas soltas na terra, dificultando a retração. As investigações trazidas na revisão bibliográfica também observaram a redução da retração com a adição de EB até a proporção de 20% (Pachamama *et al.* 2020; 2024a; Mbereyaho *et al.* 2020).

Densidade de massa aparente no estado endurecido

As diferenças em relação a densidade no estado endurecido (Figura 68) entre as argamassas produzidas com as três terras diferentes e com as mesmas proporções de EB adicionado não são muito significativas. No entanto, como a terra MON é a mais densa, as argamassas produzidas com esta terra também têm a maior densidade, seguidas pelas argamassas produzidas com a terra CAP e com a terra ITA.

Como esperado, a adição de EB reduz a densidade proporcionalmente ao aumento da adição em todas as três argamassas. Isto ocorre porque o EBfp7 tem densidade $0,40 \text{ g/cm}^3$, enquanto as terras e a areia têm densidade superior a 1 g/cm^3 . Portanto, quanto maior a quantidade de EB adicionada, menor será a densidade da argamassa.

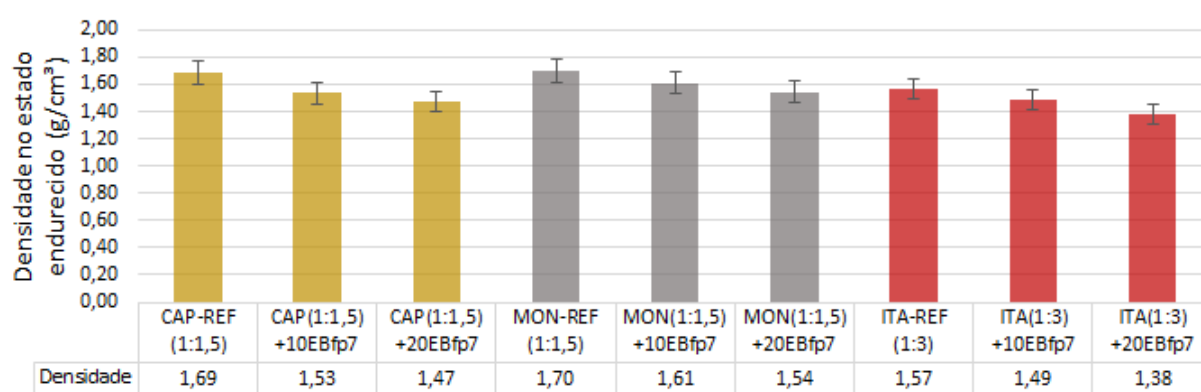


Figura 68. Densidade no estado endurecido das argamassas produzidas com as três terras com a adição (em volume) de 10% e 20% de EBfp7: média e desvio padrão.

A densidade aparente de todas as argamassas secas possui valores classificáveis quanto aos parâmetros apresentado pela DIN 18947 (2024). As argamassas CAP-REF, MON-REF e MON+10EBfp7 são da classe 1,8, as argamassas CAP+10EBfp7, CAP+20EBfp7, MON+20EBfp7, ITA-REF e ITA+10EBfp7 são classe 1,6, e a argamassa ITA+20EBfp7 é da classe 1,4.

Resistência à flexão e à compressão

Em relação aos resultados dos ensaios de resistência à flexão e à compressão (Figura 69), as argamassas produzidas com a terra ITA apresentam os menores valores em comparação às produzidas com as terras MON e CAP.

Lima *et al.* (2020) avaliaram as propriedades mecânicas de argamassas de terra produzidas com três diferentes terras, sendo cada uma com a predominância de um tipo diferente de argila em sua composição (ilita, caulinita e montmorilonita). Em todas

as argamassas produzidas foram adicionadas a mesma proporção volumétrica de areia (traço terra:areia 1:3). Os rebocos de terra íltica apresentaram maior resistência à compressão e à flexão ($0,88 \text{ N/mm}^2$ e $0,25 \text{ N/mm}^2$, respectivamente) que os rebocos de terra caulinítica ($0,45 \text{ N/mm}^2$ e $0,18 \text{ N/mm}^2$, respectivamente).

Meimaroglou *et al.* (2019) produziram 49 argamassas de terra produzidas com 26 solos/terras da Grécia com diferentes argilas e composições granulométricas e mineralógicas. Os resultados encontrados apontam que a capacidade de troca catiônica (CTC) dos solos (e das terras deles extraídas) está diretamente relacionada com a resistência à compressão (R_c) das argamassas de terra avaliadas, tendo sido observada uma tendência à maior R_c nas argamassas de terra que apresentam maior CTC. A CTC do solo/terra é também uma informação que auxilia a identificar a quantidade e o tipo de argila presente na amostra. Por isto, estes pesquisadores também afirmaram que, como as argilas do tipo ilita ($10\text{-}40 \text{ cmol/kg}$) apresentam maior CTC comparadas as argilas do tipo caulinita ($1\text{-}15 \text{ cmol/kg}$), a depender da composição mineralógica e do teor de argila presente, as argamassas com predominância de argila ilita tendem a apresentar mais resistência à compressão.

Os resultados e conclusões obtidos nos dois estudos trazidos acima podem justificar o fato das argamassas com argila íltica (CAP e MON) apresentarem maior resistência mecânica que a argamassa de terra caulinítica (ITA), mesmo que em ITA-REF (1:3) haja o triplo da quantidade de argila em comparação a CAP-REF e MON-REF (1:1,5).

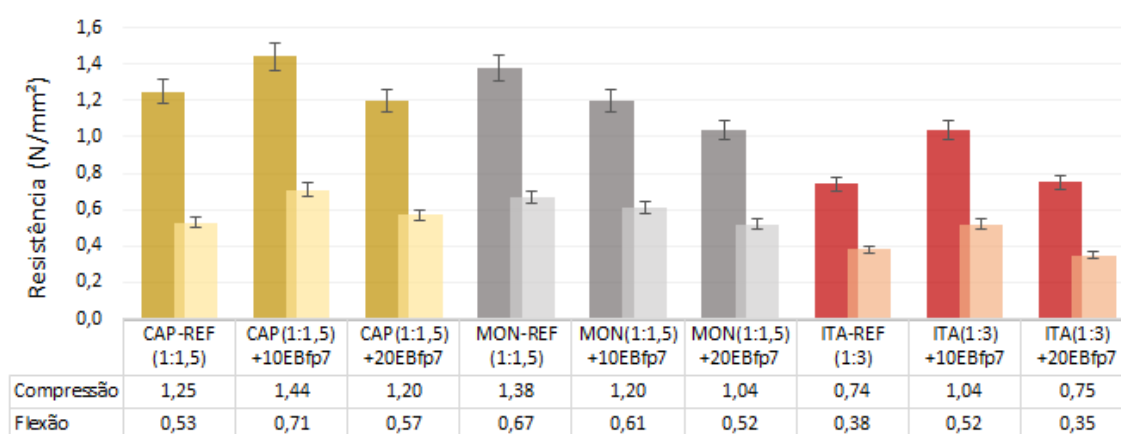


Figura 69. Resistências à compressão e flexão das argamassas produzidas com as três terras com a adição (em volume) de 10% e 20% de EBfp7: média e desvio padrão.

Em relação aos efeitos da adição de EB, a Figura 69 mostra que a proporção de 10% de EB aumentou a resistência mecânica das argamassas bioestabilizadas em comparação com as argamassas de referência com as terras CAP e ITA. Já a

proporção de 20% de EB, não causou alterações (considerando o desvio padrão). Por outro lado, nas argamassas produzidas com a terra MON, a adição de EB reduziu a resistência, sendo que a proporção de 20% reduziu mais que a proporção de 10%. Como essa adição reduz significativamente a retração, o EB ainda é uma adição vantajosa para as argamassas produzidas com a terra MON, afinal, mesmo a adição de 20% ainda proporciona resistência mecânica: acima dos parâmetros determinados pela norma DIN 18947 (2024), que estipula que a R_f deve ser superior a $0,3 \text{ N/mm}^2$ e a R_c deve ser superior a 1 N/mm^2 ; acima do valor mínimo de argamassas em geral para reboco segundo a norma EN 998-1 (2016): $R_c > 0,4 \text{ N/mm}^2$.

Pachamama *et al.* (2020) avaliaram os efeitos causados pela adição de EB do Brasil nas proporções volumétricas de 10% e 20% em argamassas de terra produzidas com a mesma terra ITA mas na proporção volumétrica 1:4 (terra:areia). A argamassa de referência ITA (1:4) sem adição de EB apresentou R_f de $0,3 \text{ N/mm}^2$ e R_c de $0,6 \text{ N/mm}^2$. A adição de 10% de EB na argamassa aumentou a R_c e a R_f em torno de 50%, e com a adição de 20% de EB diminuiu R_c e R_f em torno de 15%. No presente estudo, a argamassa ITA-REF (1:3) apresentou resistência mais elevada, o que se justifica pela menor adição de areia (1:3) e, logo, um maior teor de argila presente na mistura. A argamassa com adição de 10% de EBfp7 também aumentou R_c e R_f em torno de 50%, e a adição de 20% de EBfp7 não alterou a resistência da argamassa em comparação à de referência (considerando o desvio padrão).

A diferença observada entre os efeitos causados na argamassa ITA 1:4 (Pachamama *et al.* 2020) e ITA 1:3 (presente estudo) vai de acordo com a tendência observada por Millogo *et al.* (2016) e Rao (2023) de que, quanto a R_c , os efeitos da adição de EB são mais expressivos em argamassas de terra com maior teor de argila e de areia fina e menor teor de silte. Isto também pode ser observado nos resultados apresentados pelas argamassas CAP e MON (1:1,5). Além do fato de ITA+10EBfp7 ter apresentado a maior R_f , proporcionalmente, o aumento causado em R_c foi maior em ITA+10EBfp7, seguido por CAP+10EBfp7, e em último por MON+10EBfp7, que apresentou redução da R_c . Analisando a curva de distribuição granulométrica das três terras (seção 3.2.1.), em relação ao maior teor de finos, as três terras apresentam a mesma ordem decrescente dos resultados para R_c : terras ITA, CAP e MON, sendo a terra MON a que apresenta grãos mais grossos e a maior redução em R_c .

De maneira geral, as pesquisas trazidas na revisão bibliográfica também observaram aumento da resistência mecânica com a adição de EB nas proporções até 20%. Pachamama *et al.* (2020) e Vilane (2010) foram as duas únicas publicações que observaram aumento da R_c com a adição de 10% de EB, mas redução da R_c com a adição de 20% de EB, concordando com os resultados apresentados pelas argamassas com terra ITA e CAP. O interessante é que apenas estas duas publicações utilizaram a unidade de medida em volume para calcular a proporção da adição de excremento e, além disso, as argamassas apresentadas nestes dois estudos são produzidas com terras tropicais e apresentaram composição granulométrica semelhante: 10% de argila, 85% de areia e 5% de silte (Vilane, 2010) e 14% de argila, 83% de areia e 3% de silte (Pachamama *et al.* 2020). A partir disso, é possível inferir que a proporção volumétrica de 10% de EB possa ser a que causa maior aumento na resistência mecânica nas argamassas de terra, ao menos para essa faixa granulométrica. Mas são tantas variáveis mineralógicas que, para ser possível ter certeza são necessários estudos com mais amostras de terras tropicais. Além disso, é possível afirmar que o aumento da R_c causado pela adição de EB apresentaram-se mais intensos nas terras com predominância de caulinita, presente nas terras tropicais usadas por Millogo *et al.* (2016), Bamogo *et al.* (2020), Pachamama *et al.* (2020, 2024a) e Rao *et al.* (2020; 2021).

Já as argamassas produzidas com a terra MON apresentaram redução da R_c com a adição de EB nas proporções de 10% e 20%, a mesma tendência observada por Leikshmi *et al.* (2020), o que até então havia sido inédito. A composição granulométrica final da argamassa MON (1:1,5) e da terra K (Leikshmi *et al.* 2020) são completamente diferentes: 6% de argila, 78% de areia e 16% de silte para MON (1:1,5) e 14% de argila, 40% de areia e 42% de silte para a terra K.

No entanto, se não for adicionada areia na terra MON para produzir uma argamassa, a composição final da argamassa MON(1:0) será 15% de argila, 45% de areia e 40% de silte, o que em termos de frações, a torna semelhante à argamassa com a terra K (1:0) de Leikshmi *et al.* (2020) (14% de argila, 40% de areia e 42% de silte). Para sanar esta dúvida foram formuladas mais argamassas com as terras CAP e MON, desta vez sem areia adicionada: CAP(1:0) e MON(1:0), sem e com adição de 20% de EBfp7. A Figura 62 (na seção 4.2.) apresenta a resistência mecânica obtida.

Os resultados mostram que a adição de 20% de EBfp7 causou redução na Rc de 13% na CAP(1:0) e de 4% na CAP(1:1,5), indicando que para a terra CAP, o menor teor de argila foi benéfico para os efeitos da adição de EB. Já com a terra MON, a adição de 20% de EBfp7 causou redução na Rc de 20% em MON(1:0); e de 25% em MON(1:1,5), indicando que, ao contrário da terra CAP, para a terra MON o maior teor de argila foi mais vantajoso. Comparando a argamassa MON(1:0) com a argamassa da terra K de Leikshmi *et al.* (2020), de composição granulométrica semelhante, evidencia-se que ambas apresentam comportamento também semelhante: redução da Rc e Rf.

Sabe-se que a terra K é de origem tropical (Kerala, Índia) e a terra MON é de clima temperado mediterrânico (Alentejo, Portugal). Resta saber o que as terras MON e K têm de semelhante além da composição granulométrica. Como nenhuma das pesquisas determinou a CTC das terras e Leikshmi *et al.* (2020) não informaram a caracterização mineralógica da terra K e nem o tipo de argila predominante, não é possível tirar conclusões a respeito disso, exceto que existem condicionantes relacionados a composição mineralógica das terras que influenciam os efeitos causados pela adição de EB nas argamassas de terra, concordando com Rao (2023).

Resistência de aderência ao cisalhamento

Em relação a resistência de aderência ao cisalhamento (Figura 70), o aumento causado pela adição de EB é unânime. Nota-se que os resultados na alvenaria de adobe são sempre superiores aos da alvenaria de tijolo cerâmico. Isto é explicado pela maior compatibilidade química entre as argamassas de terra e o adobe. Os tijolos cerâmicos passam por um processo de queima sob altas temperaturas, que transforma o material argiloso em cerâmico. Este procedimento acaba por alterar as propriedades e comportamentos do material argiloso e deve prejudicar a compatibilidade entre a argamassa de terra e os tijolos cerâmicos. Além disso, outra possível explicação para este fato é que a superfície de contato entre o adobe e o reboco é mais rugosa em comparação com a superfície do tijolo cerâmico, o que também contribui para maior ancoragem da argamassa.

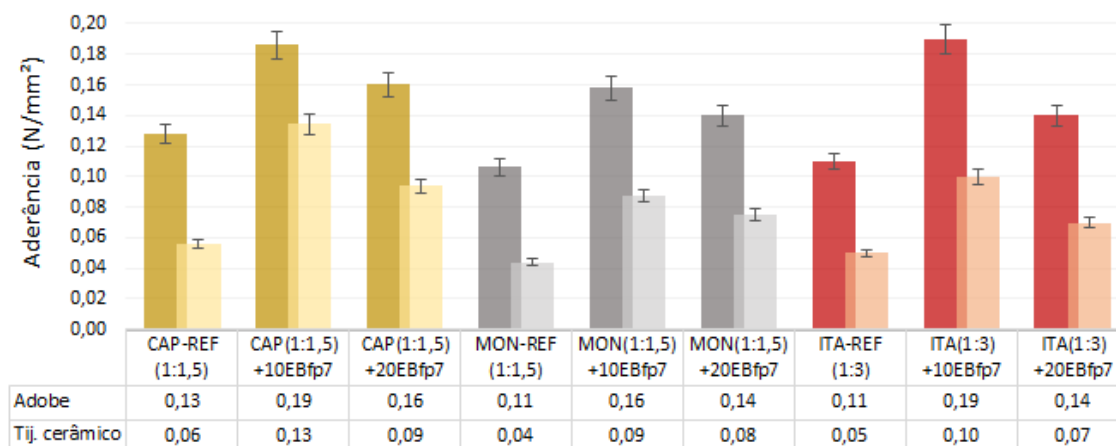


Figura 70. Aderência por cisalhamento das argamassas produzidas com as três terras com a adição (em volume) de 10% e 20% de EBfp7: média e desvio padrão.

Embora o ensaio tenha sido realizado utilizando um método diferente (Hamard *et al.* 2013) do definido na norma DIN 18947 (2024) todas as argamassas apresentaram resultado superior a 0,05 N/mm², conforme os parâmetros da norma DIN (2024).

Lima *et al.* (2020) também utilizaram o mesmo método (Hamard *et al.* 2013) para avaliar a aderência de rebocos de terra com o traço 1:3 (terra:areia) aplicados sobre tijolos cerâmicos. Os rebocos produzidos com terras ílíticas e cauliníticas obtiveram resistência de 0,07 N/mm² e 0,04 N/mm², respectivamente. Estes resultados são semelhantes aos obtidos em tijolos cerâmicos pelas argamassas de referência avaliadas no presente estudo, também produzidas com terra caulinítica (ITA) e com terras ílíticas (CAP e MON).

A argamassa ITA-REF (1:3) apresentou aderência ligeiramente menor em comparação com a argamassa CAP-REF (1:1,5), embora, com a adição de EB, o aumento proporcional tenha sido mais expressivo na terra ITA. Mas mesmo em MON-REF(1:1,5), a adição de EB aumenta significativamente a aderência da argamassa.

Na alvenaria de tijolo cerâmico, a proporção de 10% de EBfp7 aumentou em mais de 100% a aderência das argamassas produzidas com as três terras. Na alvenaria de adobe, a mesma proporção (10%) de EBfp7 também aumentou a aderência das argamassas em mais de 45% (CAP e MON) e em mais de 70% (ITA). Já a proporção de 20% de EBfp7 também aumentou a aderência em comparação com as argamassas de referência, mas de maneira menos expressiva. Na alvenaria de tijolo cerâmico, a proporção de 20% de EBfp7 aumentou em 50% (CAP e ITA) e em 100% (MON). Na alvenaria de adobe, aumentou em 23% (CAP) e em 27% (MON e ITA).

Ao testar a resistência de aderência (R_a) de rebocos de terra ITA com o traço 1:4 (terra:areia) com adição (em volume) de 10% e 20% de EB do Brasil, Pachamama *et al.* (2020) encontraram R_a de 0,10 N/mm² (adobe) para a argamassa de referência, 0,17 N/mm² com a adição de 10% de EB e 0,12 N/mm² com a adição de 20% de EB. No presente estudo os resultados em alvenaria de adobe foram um pouco superiores e isto provavelmente se justifica pelo maior teor de argila (menos areia) nas argamassas. Além disso, os adobes no presente estudo apresentavam superfície mais rugosa e irregular em comparação aos usados em Pachamama *et al.* (2020), o que contribui para melhor ancoragem do reboco. Em Pachamama *et al.* (2020) foi utilizado o método padrão de ensaio *pull-off* (arrancamento), enquanto no presente estudo foi utilizado o ensaio de resistência ao cisalhamento (Hamard *et al.* 2013). Este método de ensaio foi escolhido por ser considerado mais adaptado e apropriado para ensaiar rebocos com terra, pois reduz falhas na preparação de amostras de adesão. Comparando a execução dos dois métodos, de fato, isto foi notado.

Millogo *et al.* (2016) e Bamogo *et al.* (2020) explicam que, devido aos pares de elétrons livres nos átomos de oxigênio e especialmente nos átomos de nitrogênio, os silicatos de amina se comportam como um adesivo. Rao *et al.* (2021) explicam que o EPS secretado pelas bactérias é carregado negativamente e possui fortes propriedades adesivas e aglutinantes, justificando o aumento da resistência à aderência apresentada pelos rebocos com adição de EB. Rao (2023) concluiu que este novo composto referido, mas não caracterizado, por Millogo *et al.* (2016) e Bamogo *et al.* (2020), possivelmente seja o mesmo detectado e caracterizado por Rao *et al.* (2021).

Imersão em água

As Figuras 71, 72 e 73 apresentam os corpos de prova das argamassas produzidas respectivamente com as terras CAP(1:1,5), MON(1:1,5) e ITA(1:3), com e sem adição de EBfp7 nas proporções volumétricas de 10% e 20%, imersos na água após 1, 2, 5, 10, 15 e 30 minutos de ensaio.

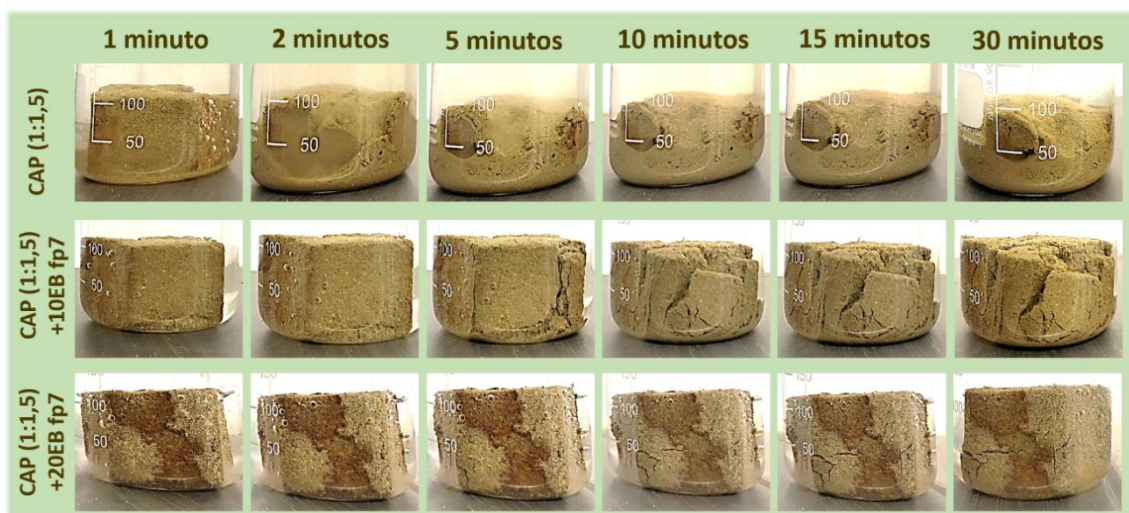


Figura 71. Corpos de provas das argamassas com terra CAP(1:1,5) sem e com adição de EBfp7 nas proporções 10% e 20%, após imersão em água por até 30 minutos.

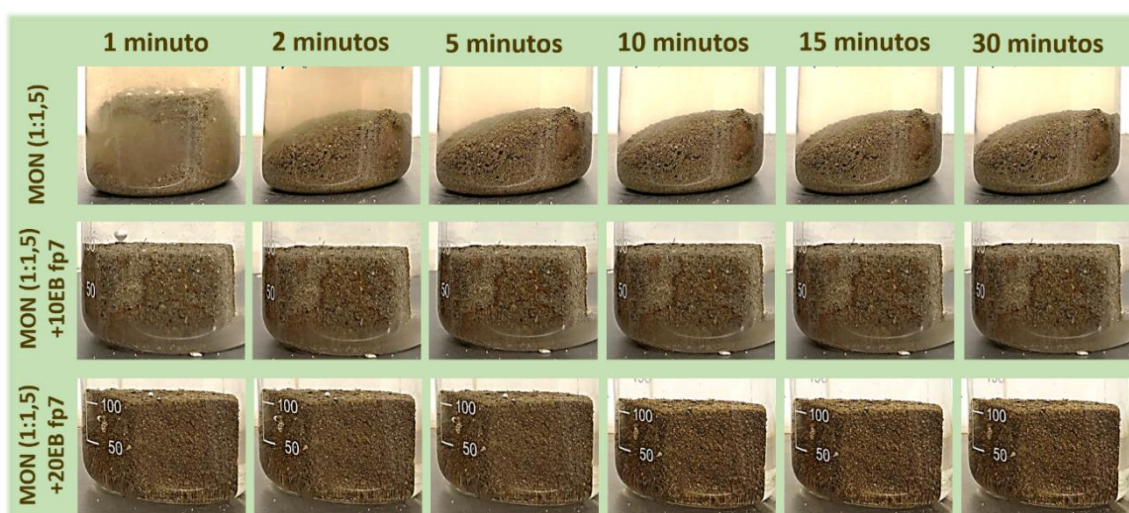


Figura 72. Corpos de provas das argamassas com terra MON(1:1,5) sem e com adição de EBfp7 nas proporções 10% e 20%, após imersão em água por até 30 minutos.

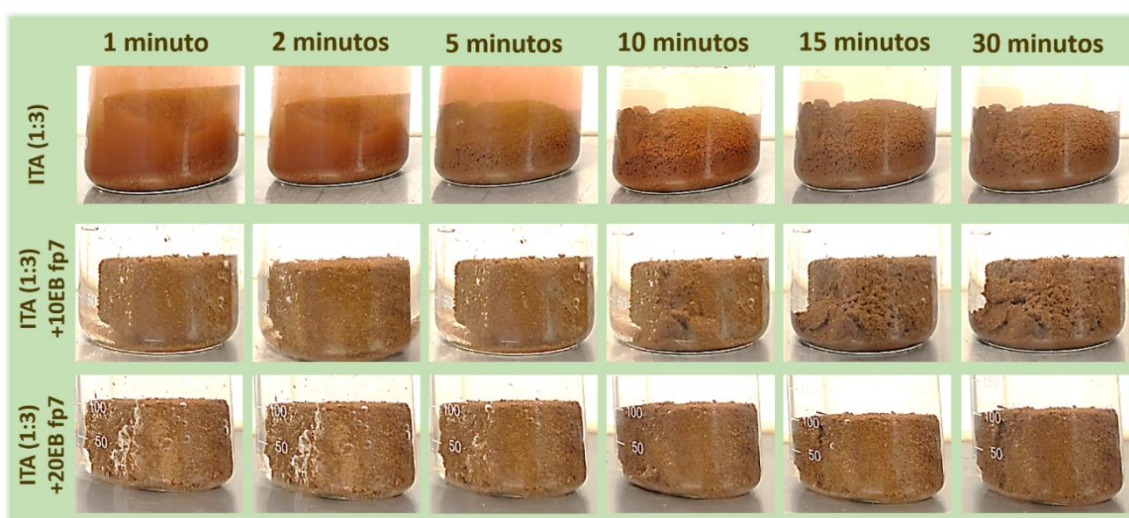


Figura 73. Corpos de provas das argamassas com terra ITA(1:3) sem e com adição de EBfp7 nas proporções 10% e 20%, após imersão em água por até 30 minutos.

Comparando as argamassas de referência, a argamassa ITA-REF (1:3) apresentou durabilidade um pouco maior. Aos 2 minutos, o corpo de prova ainda mantinha a forma cúbica, e aos 5 minutos ainda mantinha parte da forma. A argamassa CAP-REF (1:1,5) começou a desagregar após 1 minuto, e aos 5 minutos estava totalmente desintegrada. Já a argamassa MON REF (1:1,5) desagregou-se antes dos 2 minutos.

A maior durabilidade da argamassa ITA-REF (1:3) pode ser justificada pelo maior teor de argila (18%) entre as argamassas de referência, o que a torna mais resistente. Mas provavelmente a composição mineralógica da terra tropical também desempenha um papel importante. De acordo com Vargas (1977) devido às características climáticas (altas temperaturas e muita chuva) e geológicas características das regiões de clima tropical, os solos tropicais apresentam composição mineral diferente dos solos de clima temperado. A terra ITA foi extraída em uma região cujos solos são classificados como lateríticos. Estes solos são constituídos essencialmente por argilominerais do grupo das caulinitas e óxido e hidróxido de ferro e/ou alumínio; e apresentam uma capacidade de troca catiônica (CTC) menor que os solos formados em clima temperado. Estas características conferem a estrutura porosa e agregações altamente estáveis, com menor capacidade de adsorção de água. Neste sentido, justifica-se a ligeira maior durabilidade da argamassa ITA-REF (1:3) em relação às duas argamassas com terras de clima temperado.

O fato da argamassa MON-REF (1:1,5) começar a desagregar-se mais rapidamente do que CAP-REF (1:1,5) deve estar relacionado ao maior teor de silte e de areia grossa contidos na terra MON. Mas além disso, outros fatores relacionados com a composição mineralógica também podem justificar tal comportamento.

Em relação as contribuições da adição de EB para a resistência em contato com a água, os benefícios são nítidos e claramente visíveis. A proporção de 10% de EBfp7 aumentou a durabilidade das argamassas, mas a proporção de 20% foi capaz de manter a forma cúbica dos corpos de prova das argamassas formuladas com as três terras durante todo o ensaio.

Especificamente nas argamassas produzidas com a terra MON, a adição de EBfp7 reduziu a resistência mecânica, embora tenha aumentado a aderência à alvenaria. No entanto, em relação ao contato com a água, curiosamente, o efeito mais expressivo provocado pela adição de EB foi exatamente nas argamassas produzidas com a terra

MON. Mesmo a proporção de 10% já manteve a forma cúbica intacta após 30 minutos de imersão (Figura 72). Além disso, vale ressaltar que aos 14 dias de imersão na bandeja com água, os corpos de prova da argamassa MON+20EBfp7 ainda mantinham a forma cúbica, apesar de se apresentarem macios (pouco resistentes) à tentativa de esmagamento manual.

Nas argamassas produzidas com as terras CAP e ITA, os corpos de prova com adição de 10% de EBfp7 começaram a deformar após 5 minutos de imersão e, após 30 minutos, já estavam parcialmente desintegrados. Já os corpos de prova das argamassas com adição de 20% de EBfp7 mantiveram a forma cúbica até 30 minutos de imersão. Após 7 dias submersos em água dentro de bandeja ainda mantinham a forma cúbica, mas manifestavam rachaduras e começaram a se deformar; aos 14 dias estavam parcialmente desintegrados.

Bamogo *et al.* (2020) avaliaram a resistência à água usando dois ensaios menos agressivos: a absorção de água por capilaridade e um ensaio para avaliar a resistência dos rebocos de terra à erosão causada por spray de água, simulando a ação de chuva “lateral ou com vento”. Os resultados mostraram que o coeficiente de absorção capilar de água diminuiu à medida que aumentava, de 0 a 6% (em massa), a adição de EB. O ensaio de erosão com spray de água mostrou uma diminuição da perda de massa após o ensaio, à medida que mais EB foi adicionado às argamassas. A argamassa de referência (0% EB) apresentou a maior erosão. Os resultados foram atribuídos à formação do silicato de amina que aglutinam as partículas soltas da terra e conferem hidrofobicidade, o que para Rao (2023) seriam as secreções microbianas, o EPS, e o biofilme formado.

Kulshreshtha *et al.* (2022) produziram argamassas de terra com a adição de apenas 2% (em massa) de EB para produzir pequenos blocos de terra comprimida e realizaram o ensaio de imersão em água, onde também foi claramente observada a maior durabilidade do formato dos corpos de prova com adição de EB. A partir da caracterização do EB utilizado fresco, foram identificados aglomerados microbianos ricos em ácidos graxos de cadeia curta, sendo o efeito de repelir a água obtido pela adição de EB atribuído a estes componentes.

No presente estudo, a adição de EB na proporção de 20% foi unânime em promover maior coesão e durabilidade em contato com a água nas três argamassas. No entanto,

com a terra MON os efeitos foram muito mais expressivos. Como nas três argamassas foi adicionado a mesma quantidade do mesmo EB, descarta-se a possibilidade de haver diferentes quantidade de ácidos graxos de cadeia curta presentes nestas argamassas, a menos que resultem de alguma reação com os constituintes das diferentes terras, o que não foi avaliado. Por outro lado, a diferença da granulometria ou da composição mineralógica, pode ter sido mais ou menos propícia para a ocupação bacteriana e para a coesão promovida pelos exopolissacarídeos (EPS) nas argamassas. No entanto, sem a caracterização microbiológica das argamassas, é impossível afirmar alguma conclusão a respeito da influência das composições granulométrica e mineralógica, ou mesmo de CTC, nos efeitos causados pela adição de EB nas argamassas com diferentes terras.

4.4. Argamassas de terra com adição de excremento bovino: reciclagem, influência de diferentes processamentos e da dieta dos bovinos

Esta seção foi tema de um artigo publicado em 2024 intitulado: *Cow dung biostabilized earth mortars: reusability and influence of cow dung processing and cow diet* (Pachamama et al. 2024c).

A presente pesquisa não se propõe a caracterizar as argamassas de terra bioestabilizadas para explicar os mecanismos de reação entre os componentes da terra e do EB, pois já existem pesquisas (Millogo et al. 2016; Bamogo et al. 2020; Rao et al. 2020; 2021; Kulshreshtha et al. 2022; Rao, 2023) que realizaram ensaios específicos para isso, tendo cinco delas sido publicadas durante os quatro anos de desenvolvimento da presente pesquisa. Dentre elas, as investigações mais completas (Rao et al. 2020,2021) obtiveram conclusões esclarecedoras a partir de ensaios para caracterização microbiológica com análises aos 0, 7, 14 e 28 dias, utilizando argamassa produzidas com caulinita pura e areia (1:1) com adição de EB seco moído, na proporção de 10% (em massa). Contudo, em relação aos efeitos causado nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas, apenas foi avaliada a resistência à compressão e utilizando corpos de prova cilíndricos. Portanto, por se tratar de uma área do conhecimento científico que ainda está em fase inicial de compreensão, a presente pesquisa avalia, em corpos de prova prismáticos e em aplicações de reboco, os efeitos causados nas propriedades físicas e mecânicas de argamassas de terras para revestimento pela adição de EB sob diferentes processamentos; comparando e discutindo os resultados com as explicações apresentadas nas referidas referências.

Apesar das argamassas produzidas com a terra ITA terem apresentado o maior aumento proporcional em R_c , R_f e R_a , para controlar a retração nestas argamassas é necessário adicionar maior volume de areia. Já a terra MON apresentou redução da resistência mecânica e apresenta composição mineralógica muito particular. Já a terra CAP apresentou bom desempenho em todos os ensaios. Isto, somado ao fato de que havia maior disponibilidade da terra CAP para realização dos ensaios, apenas a terra CAP foi selecionada para produzir as argamassas de terra e avaliar os efeitos causados pelos diferentes processamentos e proporções de EB, que serão apresentados nesta e na próxima seção.

Nos resultados apresentados anteriormente, já foi evidenciado que a adição do EBfp7 na proporção de 10% (em volume) oferece maior resistência mecânica e aderência. Porém, a proporção de 20% oferece mais durabilidade e resistência ao contato com a água ao mesmo tempo em que ainda aumenta a aderência do reboco e não prejudica a resistência mecânica (R_f e R_c) das argamassas. Por esse motivo, optou-se por usar a proporção de 20% para comparar os efeitos causados nas argamassas de terra pela adição de EB sob diferentes processamentos, com os seguintes objetivos.

- Identificar as diferenças entre usar o EB:
 - coletado fresco no pasto e adicionado ainda fresco na argamassa (EBfp);
 - coletado fresco no pasto e compostado por 7 dias (EBfp7);
 - coletado fresco no pasto e compostado por 30 dias (EBfp30);
 - coletado fresco no pasto, compostado por 30 dias e moído (EBfp30pó);
 - coletado seco no pasto (em contato com o solo) e moído (EBsppó);
- Identificar a influência da alimentação dos bovinos através da comparação dos efeitos causados pela adição de EB produzido por bovinos que foram alimentados no pasto e de EB produzido por bovinos alimentados com ração de grãos e silagem:
 - coletado fresco no curral e compostado por 7 dias (EBfra7);
- Identificar se a reversibilidade da argamassa é prejudicada com a adição de EB, através da reutilização de corpos de prova.

Para atender estes objetivos foram usadas diferentes amostras de EB já descritas detalhadamente na seção 3.2.2., onde encontram-se a Tabela 8 com todas as informações sobre o aspecto em que cada amostra foi coletada, tempo de compostagem e se foi usado íntegro ou em pó; e a Tabela 9 com o teor de umidade, a densidade e a fração de matéria seca equivalente em cada amostra. Como pode ser observado nas Tabelas 8 e 9 o teor de umidade e a densidade do EB reduzem à medida em que seca, mas a quantidade de material seco equivalente contida em cada amostra, é praticamente a mesma. No entanto, ao moer o EB seco, a quantidade de material seco equivalente dobra. Portanto, a adição volumétrica de 20% das amostras de EB em pó, correspondem a 40% das amostras de EB íntegros. Por isto, além da proporção de 20% de EB, para comparar a diferença causada pelos diferentes processamentos de EB, também foram formuladas argamassas com a proporção de 40% de EB para corresponder a mesma fração de matéria seca adicionada.

Além de uma argamassa de referência sem adição de EB (0% de EB), foram produzidas uma argamassa reciclada e mais nove argamassas com diferentes adições de EB numa proporção volumétrica calculada sobre o volume total de terra + areia. Conforme o teste preliminar de retração realizado com a terra CAP, apresentado na seção 3.3.1., todas as argamassas foram formuladas com o traço volumétrico 1:1,5 (terra:areia), o que quer dizer que, sem contar com as adições de EB, possuem em sua composição 40% de terra CAP e 60% de areia adicionada. A composição de cada uma delas está descrita a seguir:

CAP-REF (1:1,5) - Terra CAP:areia (1:1,5) sem adição de EB;

CAP(1:1,5)+20EBfp - Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 20% de EBfp (coletado fresco, de bovinos alimentados no pasto e adicionado ainda fresco);

CAP(1:1,5)+20EBfp7 - Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 20% de EBfp7 (coletado fresco, de bovinos alimentados no pasto, compostado por 7 dias);

CAP(1:1,5)+20EBfp30 - Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 20% de EBfp30 (coletado fresco, de bovinos alimentados no pasto, compostado por 30 dias);

CAP(1:1,5)+20EBfra7 - Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 20% de EBfra7 (coletado fresco, de bovinos alimentados com ração e silagem, compostado por 7 dias);

CAP(1:1,5)+20EBfp7 Reciclo - Argamassa produzida reutilizando três corpos de prova da argamassa CAP(1:1,5)+20EBfp7, com 40 dias de idade, que foram triturados manualmente e misturados com água para produzir três novos corpos de prova reciclados, sem adições extras de terra, areia ou EB;

CAP(1:1,5)+40EBfra7 - Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 40% de EBfra7 (coletado fresco, de bovinos alimentados com ração e silagem, compostado por 7 dias);

CAP(1:1,5)+40EBfp7 - Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 40% de EBfp7 (coletado fresco, de bovinos alimentados no pasto, compostado por 7 dias);

CAP(1:1,5)+40EBfp30 - Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 40% de EBfp30 (coletado fresco, de bovinos alimentados no pasto, compostado por 30 dias);

CAP(1:1,5)+20EBfp30pó - Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 40% de EBfp30 (coletado fresco, de bovinos alimentados no pasto, compostado por 30 dias e moído);

CAP(1:1,5)+20EBsppó - Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 20% de EBsppó (coletado seco, de bovinos alimentados no pasto, seco naturalmente no pasto em contato com o solo, e moído).

As argamassas foram avaliadas quanto a: retração linear por secagem, densidade no estado endurecido, resistências à flexão, à compressão e à aderência (por cisalhamento) e à imersão em água.

Para a produção das argamassas foi adicionada a quantidade de água suficiente para obter espalhamento de 170 mm no ensaio de consistência. A proporção entre água e componentes secos (terra + areia + EB) variou bastante de acordo com a quantidade de EB adicionada e do quão seca estava a amostra de EB. Quanto maior foi a adição de EB e quanto mais seco este estava, mais água teve que ser adicionada. Notou-se que todas as amostras de EB adicionadas melhoraram a trabalhabilidade das argamassas. Além disso, todas as argamassas frescas apresentaram densidade superior a 1,2 g/cm³, estando de acordo com a norma DIN 18947 (2024). A proporção de água e de EB adicionados, e a densidade no estado fresco, estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16. Percentagem de EB adicionado, relação água/componentes secos para obter espalhamento de 170 mm e densidade das argamassas no estado fresco.

Argamassas e traço volumétrico (T:A) (terra:areia)	Adição de (EB) Excremento Bovino (% vol. T+A)	Relação água/ (T+A+EB) (%)	Densidade fresca (g/cm ³)
CAP(1:1,5) REF	0	20	1,45
CAP(1:1,5)+20EBfp	20	21	1,37
CAP(1:1,5)+20EBfp7	20	23	1,36
CAP(1:1,5)+20EBfp30	20	28	1,38
CAP(1:1,5)+20EBfra7	20	26	1,35
CAP(1:1,5)+20EBfp7 Reciclo	20	26	1,30
CAP(1:1,5)+40EBfp7	40	30	1,26
CAP(1:1,5)+40EBfrat7	40	36	1,23
CAP(1:1,5)+40EBfp30	40	30	1,24
CAP(1:1,5)+20EBfp30pó	20	33	1,21
CAP(1:1,5)+20EBsppó	20	36	1,23

Como a nomenclatura/identificação de cada argamassa ficou muito extensa, nos gráficos e Figuras que apresentam os resultados nesta seção as argamassas estão com nomenclatura abreviada, sendo identificadas apenas pela proporção e tipo de amostra de EB que lhes foi adicionada. Portanto, todas estas argamassas foram produzidas com o traço volumétrico 1:1,5 (terra CAP:areia adicionada).

Retração linear por secagem

Como visto anteriormente, a proporção de 20% de EBfp7 reduz a retração. Mas os resultados na Figura 74 também mostram que todas as variáveis de processamento do EB adicionadas, tanto na proporção de 20%, como na proporção de 40% (ainda mais expressiva), também reduzem a retração. Todas as argamassas apresentam retração inferior a 2%, conforme exigido pela norma DIN (2024).



Figura 74. Retração linear por secagem das argamassas CAP(1:1,5) sem e com adições de diferentes amostras de EB avaliadas: média e desvio padrão.

Considerando o desvio padrão, em relação a conter a retração das argamassas, pode-se dizer que não há diferença entre usar o EB fresco (EBfp), compostado (tanto por 7 quanto por 30 dias), reciclado ou mesmo de bovinos com as duas diferentes dietas avaliadas, ou seja ocorreu um empate técnico. Já quando se aumenta a proporção da adição de EB de 20% para 40%, e quando se mói o EB (em pó) há de fato uma diferença mais expressiva.

No entanto, a partir da comparação entre os valores médios obtidos com os corpos de prova de cada argamassa formulada (apresentados na Figura 74), observa-se que a adição de 20% de EBfp reduz a retração um pouco mais do que a adição de 20% de EBfp7, e ainda mais do que 20% de EBfp30, ou seja, a medida que seca de 7 a 30 dias em compostagem, reduz-se ligeiramente a capacidade de reduzir a retração. A adição de 20% de EBfra7 (com menos fibras na composição devido a dieta com ração e silagem) reduz menos a retração do que a adição de 20% de EBfp7, que contém mais fibras devido a dieta de capim no pasto. A mesma tendência se manifesta com a adição de 40% das três amostras destes EB (EBfp7, EBfp30 e EBfra7).

A maior proporção (40%) das amostras de EB íntegras adicionadas reduziram significativamente a retração, em torno de 50%. A argamassa reciclada apresentou a menor redução da retração, embora também tenha reduzido em relação a argamassa de referência. A adição de 20% de EBfp30pó é menos eficiente para limitar a retração em comparação à 40% de EBfp30 íntegro (antes de ser moído). Todos estes resultados apontam para um importante papel das fibras presentes no EB na contenção da retração das argamassas e indicam que, quanto mais fresco e quanto maior a integridade e disponibilidade das fibras, maior será a redução da retração.

De acordo com Rao (2023), com o passar dos dias (e à medida que o EB seca), as bactérias disponíveis no EB decompõem a estrutura das fibras vegetais presentes na argamassa, o que reduz o efeito de limitar a retração que seria oferecido pelas fibras ali contidas. Nos resultados deste ensaio (retração linear) podem ser encontrados indícios deste efeito, pois (apesar do empate técnico considerando o desvio padrão) a adição de 20% de EBfp (mais fresco) conteve melhor a retração do que a adição de 20% de EBfp7 e de EBfp30 (7 e 30 dias mais “velhos” e mais secos).

Porém, além da contribuição das fibras para limitar a retração, também há outra causa complementar, pois, mesmo as adições de EB em pó (moídas) também limitam a retração em comparação à argamassa de referência CAP-REF (1:1,5), embora menos que as amostras de EB íntegro, com fibras inteiras. As investigações trazidas na revisão bibliográfica também observaram a redução da retração com a adição de EB, mesmo quando seco e em pó (Millogo *et al.* 2016; Bamogo *et al.* 2020; Lekshmi *et al.* 2020). Este fato evidencia que, além das fibras vegetais longas, as microfibras e a biocimentação (bioestabilização) promovida pelos microrganismos presentes também contribuem para o controle da retração. Millogo *et al.* (2016), Bamogo *et al.* (2020) e Rao *et al.* (2021) explicam que os silicatos de amina, ou os biofilmes aglomerados por EPS, unem as partículas soltas de terra, o que acaba por dificultar a retração da argamassa e otimizar a contribuição das fibras, até mesmo trituradas.

Densidade de massa aparente no estado endurecido

Assim como as adições de 10% e 20% de EBfp7 reduzem a densidade, a proporção de 40% também o faz (Figura 75). Afinal o EB adicionado é menos denso do que a terra CAP e a areia. Em relação aos parâmetros estabelecidos pela norma DIN 18947 (2024), a densidade aparente seca de todas as argamassas possui valores

classificáveis. A argamassa CAP-REF é da classe 1,8, as argamassas CAP+20EBfp, CAP+20EBfp7, CAP+20EBfp30, CAP+20EBfra7, CAP+20EBfp7 Reciclo são da classe 1,6 e as argamassas CAP+40EBfra7, CAP+40EBfp7, CAP+40EBfp30, CAP+20EBfp30pó e CAP+20EBsppó são da classe 1,4.

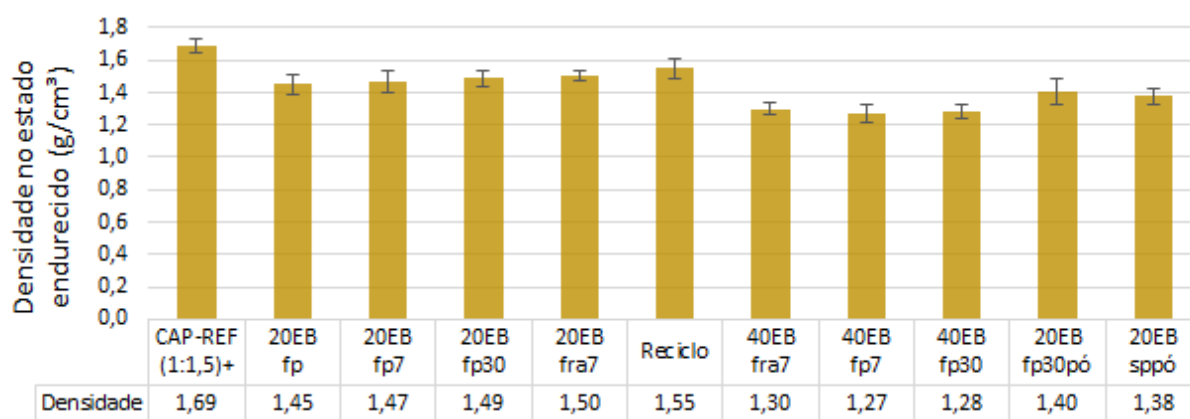


Figura 75. Densidade no estado endurecido das argamassas CAP(1:1,5) com diferentes proporções e tipos de EB avaliadas: média e desvio padrão.

Resistência à flexão e à compressão

Como visto anteriormente (Figura 74), a adição de EB mais fresco (EBfp) ofereceu a maior contribuição para limitar a retração. No ensaio de resistência à flexão (Rf) e à compressão (Rc) (Figura 76), as resistências mais elevadas também foram oferecidas pela adição do EB mais fresco (20% de EBfp). Além disso, a segunda e terceira resistências mais elevadas foram obtidas com as adições desse mesmo EB após 7 dias (20% de EBfp7) e 30 dias de compostagem (20% de EBfp30). A mesma tendência também se observa comparando 40% de EBfp7 com 40% de EBfp30.

Como dito anteriormente, de acordo com Rao *et al.* (2021) isso é possivelmente justificado pela degradação da estrutura das fibras por ação dos microrganismos do EB, que usam as fibras como fonte de energia (carbono). Portanto, ao adicionar um EB mais “velho” e seco (EBfp30) na argamassa, neste restam menos disponibilidade de fibras para reforçar a estrutura biocimentada pelo biofilme composto por EPS, fibras, argila, silte e areia. Neste sentido, apesar da pequena diferença entre as argamassas (considerando o desvio padrão) os resultados obtidos neste ensaio (Figura 76) também oferecem indícios de que, quanto mais fresco o EB for adicionado, mais íntegras estão as fibras, menos retração as argamassas apresentam e maior o aumento da resistência mecânica.



Figura 76. Resistências à compressão e flexão das argamassas CAP(1:1,5) sem e com diferentes teores e tipos de EB avaliadas: média e desvio padrão.

A argamassa reciclada com adição de 20% de EBfp7 (Reciclo) apresenta R_c 12% menor, e R_f 28% menor que a CAP+20EBfp7. As fibras vegetais apresentam papel importante em relação à R_f ; portanto, a redução proporcional maior na R_f (do que em R_c), mais uma vez deixa indícios de que as fibras são “degradadas” pela ação microbiana. Afinal os corpos de prova da argamassa “Reciclo” passaram por dois períodos de 30 dias de secagem (um quando a argamassa foi produzida e secou pela primeira vez e outro quando a argamassa foi reciclada e secou novamente).

É muito interessante evidenciar cientificamente que, mesmo depois de seca, triturada e misturada com água novamente para ser reutilizada, a argamassa de terra com adição de EB ainda apresenta a mesma resistência (considerando o desvio padrão) da argamassa original; além de resistência superior aos limites mínimos da norma DIN 18947 (2024): $R_c > 1 \text{ N/mm}^2$ e $R_f > 0,3 \text{ N/mm}^2$; e superior ao limite mínimo da norma EN 998-1 (2016): $R_c > 0,4 \text{ N/mm}^2$.

O mesmo já não acontece com as argamassas de terra estabilizadas com cal ou cimento, que depois de endurecerem por carbonatação ou hidratação, perdem a propriedade aglutinante e precisam de nova adição de aglomerante para produzir argamassas novamente, podendo ser recicladas apenas como agregado. Para além disso, para serem recicladas como agregados, estas argamassas necessitam de ser moídas, com consumo de energia, o que já não acontece com a argamassa de terra com EB, que pode ser reutilizada apenas por desagregação e nova amassadura com água. Este, é mais um argumento que reforça a necessidade de serem desenvolvidas mais investigações sobre adições microbiológicas em argamassas de terra.

Comparando a adição do EB produzido por bovinos que são alimentados no pasto (EBfp7) com o EB dos bovinos alimentados com ração e silagem (EBfra7), sob o mesmo processo de compostagem por 7 dias e nas mesmas proporções (20 e 40%), a adição de EBfra7 apresentou em torno de 4% a menos de Rc e 10% a menos de Rf, o que considerando o desvio padrão, é um empate técnico. Apesar disso, a ligeira diminuição da resistência obtida não seria um problema, pois (considerando o desvio padrão) ainda estão dentro das exigências da norma DIN 18947 (2024). Além disso, todos os resultados excedem significativamente o limite mínimo de 0,4 N/mm² exigido para Rc pela norma EN 998-1 (CEN, 2016) para argamassas de uso geral.

Aumentando a proporção da adição de EBfp7 de 20% para 40%, a Rc diminuiu em 15%, e a Rf diminuiu em 12%. Comparando a adição de 40% de EBfp7 com a de 40% de EBfp30, a adição do EB mais seco e mais “velho” (EBfp30) reduziu a Rc em 7% e a Rf em 14%, embora ainda dentro dos parâmetros da EN 998-1 (CEN, 2016). O resultado médio dos corpos de prova também apresenta indícios de que, quanto mais fresco o EB adicionado à argamassa de terra, maior a Rc e a Rf proporcionada.

Verificou-se também que, em comparação com a adição de 40% de EBfp30 íntegro, a adição de 20% de EBfp30pó (que corresponde a 40% de EBfp30 íntegro) causa apenas 5% de redução em Rf e Rc (um empate técnico considerando o desvio padrão). Mas quando se compara a adição de 20% de EBfp30 com a adição de 20% de EBfp30pó, o EB em pó apresenta Rc e Rf bem menores, o que deixa claro que os resultados obtidos com a adição do EB íntegro ou em pó (na mesma proporção) são diferentes. Por isto aqui fica claro que, para comparar os resultados de diferentes pesquisas e comparar os efeitos da adição de EB íntegro com EB em pó, deve ser considerada a densidade e o teor de umidade das duas amostras de EB utilizadas, e calculada a fração de matéria seca contida nas duas amostras.

Comparando a adição do EB compostado por 30 dias no recipiente impermeável sem contato com o solo, e moído (EBfp30pó), com a adição do EB que secou no pasto em contato com o solo e também foi moído (EBsppó), nota-se que as duas adições causaram exatamente o mesmo efeito na resistência mecânica da argamassa de terra. Isto reforça a teoria de que a “idade” do EB é mais importante que o fato de ter sido moído ou não. Afinal as argamassas com adição de EB mais fresco (EBfp e EBfp7) apresentaram Rc e Rf um pouco maiores do que as argamassas com adição de EB após 30 dias de compostagem, seja íntegro, moído ou secas no pasto e moído.

Aderência por cisalhamento

A Figura 77 mostra que independente do processamento e idade, a adição de EB na proporção de 20% aumenta a aderência das argamassas em comparação à CAP-REF(1:1,5), que não teve adição de EB. Já a proporção de 40% de EB praticamente não altera a aderência da argamassa de referência. Como já foi explicado na seção anterior, devido a maior compatibilidade da argamassa de terra com o adobe, também produzido com argamassa de terra, a aderência na alvenaria de adobe é sempre superior à aderência na alvenaria de tijolo cerâmico.

Com exceção da argamassa com adição de EB coletado já seco no pasto (EBsppó), todas as argamassas apresentaram resultados dentro dos parâmetros da norma DIN 18947 (2024), que exige R_a superior a $0,05 \text{ N/mm}^2$.

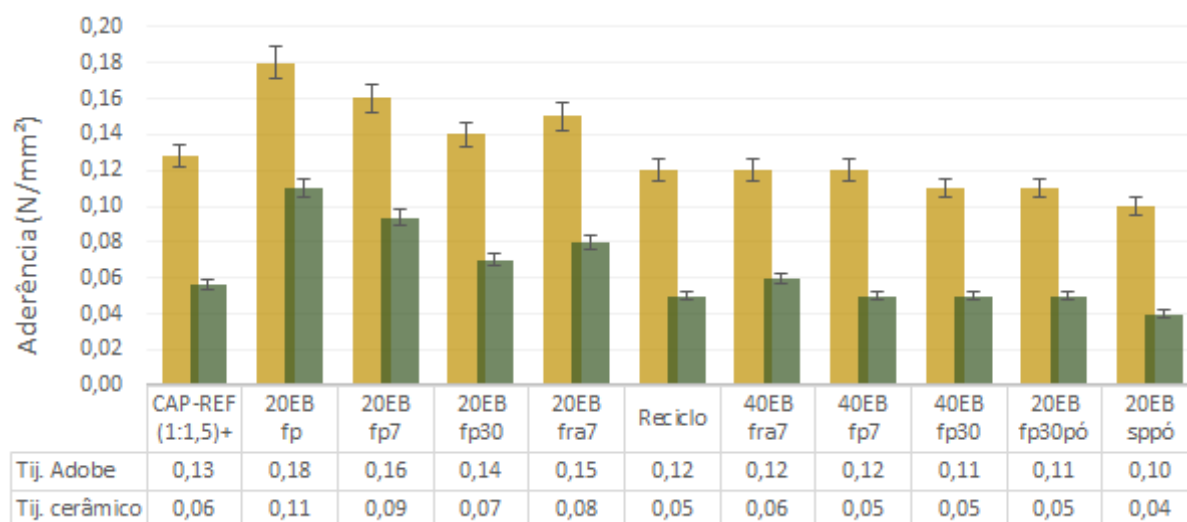


Figura 77. Aderência por cisalhamento das argamassas CAP(1:1,5) com diferentes teores e tipos de EB avaliadas: média e desvio padrão.

Assim como para retração e resistência mecânica, a argamassa com adição do EB adicionado ainda fresco (EBfp) ofereceu maior aderência às alvenarias. Em comparação com a argamassa de referência, a adição de 20% de EBfp aumentou a R_a em 38%, seguida pela adição de 20% de EBfp7, que aumentou a R_a em 23%, e pela adição de 20% de EBfp30, que aumentou a R_a em 8%. Estes resultados também reforçam a teoria de que quanto mais fresco o EB, mais intensos os efeitos causados na argamassa de terra.

Além dos resultados positivos anteriores, a argamassa reciclada manteve a capacidade de aumentar a aderência às duas alvenarias em comparação com CAP-REF(1:1,5), embora menos que a argamassa original, CAP+20EBfp7.

Na proporção de 20%, a adição de EBfra7 (bovinos alimentados com ração e silagem) ofereceu Ra 6% menor em comparação com a adição de 20% de EBfp7 (bovinos alimentados no pasto), ou seja, considerando o desvio padrão não houve diferença. E na proporção de 40%, a adição de 40% de EBfra7 ofereceu a mesma Ra que a adição de 40% de EBfp7.

Já com a adição de EBfp7, houve diferença mais considerável. Aumentando a proporção de 20% para 40% de EBfp7, a Ra reduziu em 25%, apresentando Ra semelhante à argamassa de referência sem adição de EB, CAP-REF(1:1,5).

Ao comparar as argamassas CAP+40EBfp30 e CAP+20EBfp30pó, nota-se que o fato de moer o EBfp30 não prejudicou a propriedade adesiva. No entanto, as argamassas menos aderentes são aquelas com adição de EB mais seco, mais “velho” e moídas, sendo a argamassa com adição de EB seco no pasto (EBsppó) a que apresentou a menor Ra.

Além das publicações realizadas em 2024 apresentando os resultados obtidos na presente pesquisa (Pachamama *et al.* 2024 b,c), que se tenha conhecimento, as únicas publicações que avaliam a resistência de aderência das argamassas de terra com adição de EB são as realizadas pelo autor em Pachamama *et al.* (2020; 2024a), avaliando argamassas de terra produzidas com duas terras tropicais do Brasil. Assim como no presente estudo, nestas publicações também foi observado aumento significativo na aderência das argamassas com a adição de EB, sendo maior com a proporção volumétrica de 10% do que com a proporção de 20%.

Resistência à imersão em água

A Figura 78 apresenta os corpos de prova de argamassas de terra produzidas com a terra CAP usando o traço 1:1,5 (terra:areia), sem e com adição de EB nas proporções volumétricas de 20% e de 40% (íntegro) e com adição de 20% de EB moído (em pó). As fotografias foram tiradas após 1, 2, 5, 10, 15 e 30 minutos de imersão dos corpos de prova em água.



Figura 78. Corpos de prova das argamassas de terra CAP(1:1,5) sem e com adição de diferentes proporções e tipos de EB após imersão em água por até 30 minutos.

Apesar de todas as adições terem nitidamente aumentado a durabilidade dos corpos de prova de maneira semelhante, é possível observar surgimento maior ou menor de fissuras em alguns corpos de prova. Assim como em todos os ensaios apresentados anteriormente, no ensaio de imersão em água a adição de 20% de EBfp causou durabilidade e integridade física maior, seguida pelas argamassas com adição de 20% de EBfp7 e 20% de EBfp30. Os resultados do ensaio de imersão em água reforçam que o EB é um pouco mais eficiente quando adicionado na argamassa mais fresco, embora mesmo após 30 dias de compostagem a sua adição continue sendo bastante eficiente para aumentar a durabilidade em contato com a água das argamassas e dos rebocos com elas produzidos.

A argamassa reciclada apresentou resistência mecânica e aderência reduzida em relação à CAP(1:1,5)+20EBfp7, embora ainda maior quando comparada com CAP-REF(1:1,5). No entanto, na imersão em água, a argamassa reciclada também se manteve íntegra após os 30 minutos de ensaio, tal como a argamassa CAP(1:1,5)+20EBfp7. Isto reforça a constatação de que a adição de EB não prejudica uma propriedade importante das argamassas de terra: a sua reversibilidade e facilidade de reutilização. No entanto, para afirmar se ainda há, ou não, atividade microbiana aos 40 ou 80 dias de secagem da argamassa, apenas a caracterização microbiológica poderá identificar, o que deverá ser explorado em estudos futuros.

Na Figura 78 é possível notar que a adição de 20% de EBfp30 (mais seco e mais “velho”) apresentou menor integridade física após 30 minutos de imersão em água, em comparação com a adição de 20% de EBfp7 (mais fresco), assim como nos outros ensaios. Mas, ao contrário da proporção de 20%, na proporção de 40%, as diferenças observadas entre as adições de EBfp7 e EBfp30 não se mostram mais. Este fato apresenta mais um argumento que reforça a explicação de Rao (2023) e Rao *et al.* (2021) sobre o papel das fibras e dos microrganismos na biocimentação (bioestabilização) das argamassas de terra com adição de EB.

Apesar de, tal como definido na metodologia da presente pesquisa, não terem sido realizados ensaios para caracterização microbiológica das argamassas bioestabilizadas, a partir dos resultados anteriores do ensaio de imersão em água, e apoiado na literatura, é possível inferir que devido ao maior teor de fibras vegetais adicionadas na argamassa com a proporção de 40% de EB, provavelmente mais EPS foi secretado pelas bactérias e ainda restaram fibras para contribuir no reforço da

estrutura interna formada pelo biofilme composto por fibras, terra e EPS, o que resultou em maior durabilidade no ensaio de imersão em água.

Portanto, possivelmente uma baixa adição de fibras juntamente com a adição de EB pode oferecer fonte de energia extra para as bactérias, e ainda preservar fibras integras para reforçar a estrutura interna da argamassa depois de seca.

No ensaio de imersão em água, as adições de 20% e 40% de EBfra7 (ração e silagem) causaram basicamente os mesmos efeitos que as adições de 20% e 40% de EBfp7 (pasto). As duas argamassas com adição de 20% apresentaram pequenas fissuras até os 30 minutos de ensaio, e as duas argamassas com a adição de 40% mantiveram-se intactas até os 30 minutos de ensaio e depois até os 7 dias de imersão na bandeja.

A durabilidade e integridade dos corpos de prova com adição de 20% de EBsppó e 20% de EBfp30pó no teste de imersão em água, também deixa indícios que ainda ocorre atividade bacteriana mesmo no EB moído, seja compostado por 30 dias sem contato com o solo (em recipiente plástico) ou coletado seco no pasto em contato com o solo. Mas vale lembrar que a adição de 20% de EB em pó, corresponde à adição de 40% do EB íntegro.

Na imersão em água na bandeja, até aos 7 dias todas as argamassas produzidas com a terra CAP e com adição de 20% de EB íntegro ainda mantinham a forma cúbica, mas manifestavam rachaduras e começaram a se deformar, e aos 14 dias já estavam parcialmente desintegrados e não se distinguia mais a forma cúbica. Já as argamassas com adição de 40% de EB íntegro e 20% de EB em pó ainda preservaram a forma cúbica até aos 14 dias mas apresentavam degradação por rachaduras profundas. Em especial a argamassa CAP+40EBfp7 apresentava fissuras consideráveis, mas impressionantemente, ainda mantinham sua forma cúbica mais preservada em comparação com as outras argamassas.

Kulshreshtha *et al.* (2022), foi a única publicação que também investigaram o ensaio de imersão em água, mas, como referido anteriormente, com blocos de terra comprimida e com a adição de apenas 2% (em massa) de EB. Para aumentar a durabilidade dos corpos de prova, Kulshreshtha *et al.* (2022) recomendaram retirar ao máximo as fibras do EB antes de adicioná-lo à argamassa de terra para produção dos blocos. No entanto, no presente estudo, com corpos de prova não comprimidos, de argamassas de terra para revestimento, observou-se o contrário. A resistência à água

dos corpos de prova avaliados aumentou consideravelmente com a adição de 10%, 20% e ainda mais com a adição de 40% de EB, deixando indícios que a maior adição de fibras vegetais aumenta a durabilidade das argamassas em contato com a água. Provavelmente, o fato de comprimir os corpos de prova com adição de EB é que causaram o efeito observado por Kulshreshtha *et al.* (2022). Ao absorver água por capilaridade durante a imersão, as fibras podem ter expandido de volume (mais do que as argilas) e causado o colapso de dentro para fora dos corpos de prova comprimidos. Portanto, o equívoco de Kulshreshtha *et al.* (2022) foi generalizar a sugestão de retirar as fibras antes de adicionar o EB para quaisquer argamassa e produtos de terra, e concluir que elas prejudicam a resistência e durabilidade no ensaio de imersão em água. Muito provavelmente isso só se aplica ao caso dos blocos de terra comprimidos e, a princípio, apenas com a adição de 2% (em massa) de EB.

Em nenhuma outra investigação sobre o uso da adição de EB, com diferentes proporções, em argamassas de terra para produção de adobe ou revestimento isto foi relatado. Portanto, como demonstrado no presente estudo, a depender da proporção de EB adicionado e da aplicação para a argamassa, a retirada das fibras é desnecessária ou até mesmo prejudicial para proporcionar maior durabilidade em contato com água de argamassas de terra para produção de elementos que não serão comprimidos, como adobe, pau a pique, emboços e rebocos.

4.5. Influência da fermentação em cura úmida das argamassas frescas com adição de excremento bovino e comparação com os efeitos causados pela adição de fibras vegetais e de cal

Depois de avaliar as diferenças entre os efeitos causados pela adição de EB sob diferentes processamentos, nesta seção será apresentada a influência da fermentação em cura úmida por 72 horas das argamassas frescas, com a adição de EB em diferentes proporções volumétrica: 5%, 10% e 20%. Para comparar os efeitos causados pelo EB com outros dois materiais já mais investigados cientificamente, também serão apresentadas nesta seção os resultados da caracterização de argamassas de terra com a adição de 10% de cal aérea hidratada e com 10% de fibras vegetais.

Devido ao seu comportamento apresentado na seção 4.3., na presente seção (assim como na 4.4) também foi utilizada apenas a terra CAP para produzir as argamassas. Conforme o teste preliminar de retração, apresentado na seção 3.3.1, todas as argamassas foram formuladas com adição de areia usando o traço volumétrico 1:1,5 (terra:areia), o que quer dizer que em sua composição, sem considerar as outras adições, contêm, em volume, 40% de terra CAP e 60% de areia adicionada.

Nesta seção foi utilizada apenas a amostra EBfp7: excretado por bovinos alimentados no pasto (em Moita, Portugal), coletado fresco no pasto e compostado por 7 dias sem contato com o solo, conforme caracterização descrita na seção 3.2.2. O EBfp7 foi escolhido pois alia duas prioridades importantes: (i) usar o EB o mais fresco possível (conforme conclusões apresentadas na seção 4.4.) e (ii) usar o EB de maneira segura. De acordo com a revisão bibliográfica realizada, a compostagem do EB por 7 dias já é suficiente para eliminar a presença de possíveis patógenos. Como a compostagem por 30 dias é mais segura ainda, também poderia ter sido usado o EBfp30, que apresentou desempenho superior aos limites mínimos apresentados na norma DIN 18947 (2024), apesar de apresentar valores médios pouco inferiores ao EBfp7. Por essa razão, foi selecionado este último. No dia da produção das argamassas, a amostra EBfp7 apresentava teor de umidade de 61% e densidade de 0,4 g/cm³.

A cal aérea hidratada (Cal) utilizada possui densidade de 0,41 g/cm³.

As fibras vegetais íntegras (Fib) de escalracho (*Panicum repens*) foram cortadas em pedaços com comprimento variado de no máximo 3 cm, conforme descrito na seção

3.2.3. A proporção volumétrica de 10% foi escolhida para a adição de Fibras para que fosse adicionada na argamassa a mesma fração de matéria seca contida na proporção volumétrica de 10% de EBfp7. A Tabela 17 apresenta o teor de umidade, a densidade e a fração de matéria seca equivalente em cada amostra, para justificar a proporção utilizada para esta adição.

Tabela 17. Caracterização do excremento bovino EBfp7 e das Fibras vegetais: teor de umidade, densidade e fração de material seco equivalente contido em cada amostra.

Materiais Amostras	Tempo de secagem - compostagem (dias)	Teor de umidade	Densidade	Fração seca contida em recipiente de 100ml (g)
		(% massa)	(g/cm ³)	
EBfp7	7	61	0,40	16
Fibras	7	20	0,20	16

Considerando estas informações, foi formulada uma argamassa sem adição de EB como referência, CAP-REF(1:1,5), seis argamassas com a adição de EBfp7 nas proporções, em volume, de 5%, 10% e 20%, sendo três moldadas imediatamente após a mistura dos componentes para produção dos corpos de prova e três deixadas em um recipiente plástico destampado e coberto com um pano úmido, por 72 horas para fermentar a argamassa em cura úmida, antes dos corpos de prova serem moldados. Além das argamassas com adição de EB, também foram produzidas uma argamassa com adição de 10% de Cal e uma argamassa com a adição de 10% de Fibras. As argamassas estão descritas a seguir. Entre parênteses está o traço volumétrico de areia adicionada para a produção de cada uma:

CAP-REF (1:1,5) - Terra CAP:areia (1:1,5) sem adição de EB;

CAP(1:1,5)+5EBfp7 - Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 5% de EBfp7 (coletado fresco, de animais alimentados no pasto, compostado por 7 dias);

CAP(1:1,5)+10EBfp7 - Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 10% de EBfp7;

CAP(1:1,5)+20EBfp7 - Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 20% de EBfp7;

CAP(1:1,5)+5EBfp7(AF) - CAP(1:1,5)+5EBfp7 fermentada por 72 horas antes de produzir os corpos de prova;

CAP(1:1,5)+10EBfp7(AF) - CAP(1:1,5)+10EBfp7 fermentada por 72 horas antes de produzir os corpos de prova;

CAP(1:1,5)+20EBfp7(AF) - CAP(1:1,5)+20EBfp7 fermentada por 72 horas antes de produzir os corpos de prova;

CAP(1:1,5)+10Fibras - Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 10% de fibras vegetais de escalracho (*Panicum repens*) cortadas em pedaços com comprimento variado de no máximo 3 cm;

CAP(1:1,5)+10Cal - Terra CAP:areia (1:1,5) com adição de 10% de cal aérea hidratada.

As argamassas foram avaliadas quanto a retração, densidade no estado endurecido, condutibilidade térmica, higroscopicidade e resistências: à flexão, à compressão, à aderência por cisalhamento, à imersão em água e à erosão por gotejamento.

Em todas as argamassas foi adicionada água suficiente para obter espalhamento de 170 mm no ensaio de consistência em mesa de espalhamento (EN 1015-3, 1999), estando de acordo com a norma DIN 18947 (2024). Uma pequena porção extra de 50 ml de água foi adicionada às argamassas fermentadas para compensar a água que teria sido evaporada durante a fermentação por 72 horas em cura úmida e manter as argamassas ainda plásticas para, ao fim do processo de fermentação, moldar e produzir os corpos de prova. As argamassas frescas foram caracterizadas pela densidade fresca, seguindo a EN 1015-6 (1998) e a NBR 13278 (2005). Todas as argamassas frescas apresentaram densidade superior a 1,2 g/cm³, tal como exigido pela norma DIN 18947 (2024). A proporção de água e de EB adicionados, e a densidade no estado fresco, estão apresentados na Tabela 18:

Tabela 18. Composição, relação água/componentes secos para obter espalhamento de 170 mm e densidade das argamassas no estado fresco.

Argamassas e traço volumétrico (terra:areia) (T:A)	Adição (% vol. T+A)	Relação água/ (T+A+Adição) (%)	Densidade fresca (g/cm ³)
CAP REF (1:1,5)	0	20	1,45
CAP(1:1,5)+5EBfp7	5	20,5	1,41
CAP(1:1,5)+10EBfp7	10	21,5	1,39
CAP(1:1,5)+20EBfp7	20	23	1,36
CAP(1:1,5)+5EBfp7 (AF)	5	21	1,41
CAP(1:1,5)+10EBfp7 (AF)	10	22	1,39
CAP(1:1,5)+20EBfp7 (AF)	20	23,5	1,36
CAP(1:1,5)+10Fibras	10	22	1,38
CAP(1:1,5)+10Cal	10	21	1,40

Retração linear por secagem

Já havia sido evidenciado que as proporções de 10% e 20% de EBfp7 reduzem a retração das argamassas, e a Figura 79 mostra que a adição de 5% também o faz, embora menos que as outras duas proporções, naturalmente pelo menor teor de fibras adicionado com a proporção de 5% de EBfp7. Considerando o desvio padrão, não há diferença entre fermentar ou não a argamassas frescas com adição de EB, no entanto, a partir do valor médio obtido pelos corpos de prova, o processo de fermentação causou ligeiro aumento na retração em relação às argamassas que não foram fermentadas. Este fato também reforça a teoria de que durante o processo de fermentação as fibras vegetais presentes no EB são degradadas pela ação bacteriana. Portanto, a redução da integridade e resistência física das fibras também se manifesta na redução do potencial de limitar a ocorrência de retração. Apesar disso, todas as argamassas com adição de EBfp7 apresentaram índice de retração abaixo de 2% e 3%, os limites estipulados pela norma DIN 18947 (2024) para argamassas sem e com adição de fibras, respectivamente.

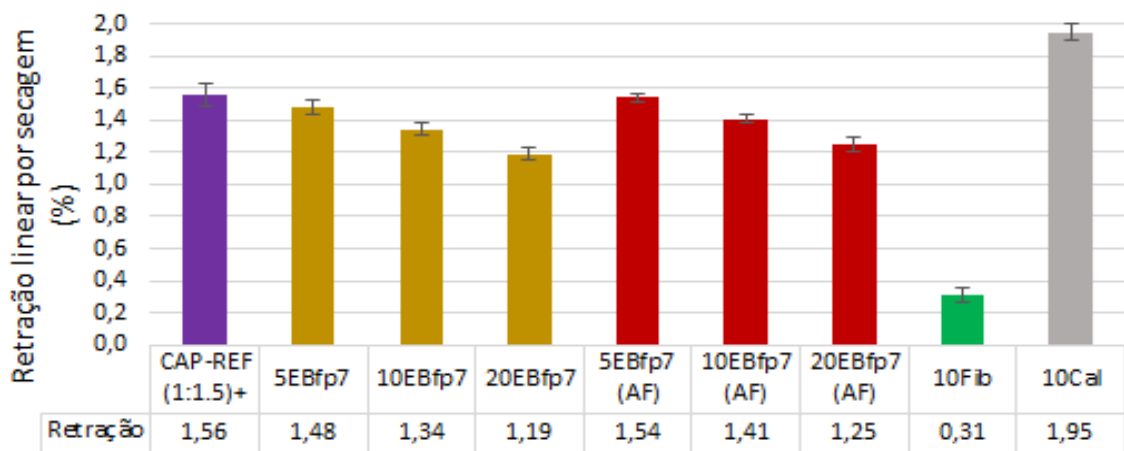


Figura 79. Retração linear por secagem das argamassas: CAP-REF(1:1,5) sem e com adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7 (com e sem fermentação), 10% de Fibras e 10% de Cal: média e desvio padrão.

A argamassa com adição de 10% de Fibras foi a que mais limitou a retração. A presença de fibras vegetais bastante íntegras e de comprimento variado (máx. 3 cm), ricas em celulose e lignina, certamente são as responsáveis por criar uma rede estrutural capaz de limitar a retração desta forma.

Já a adição de Cal aumentou a retração consideravelmente (em 30%) em relação a CAP-REF, quase alcançando o limite de 2% da norma DIN 18947 (2024) para adições sem fibras. O aumento da retração com baixa adição de cal em argamassas de terra

portuguesa de clima temperado (como CAP) também foi observado por outros pesquisadores. Gomes *et al.* (2018) avaliaram argamassas de terra (caulinita) com o adição de areia usado o traço 1:3 (terra:areia) e observaram um aumento de 95% da retração com a adição de 5% de cal. Já quando os pesquisadores adicionaram 5% de cal com 5% de fibras de cânhamo, não foi observada alteração da retração em relação à argamassa de referência.

Pachamama *et al.* (2020; 2024a) avaliaram os efeitos causados pela adição de cal aérea hidratada e EB em argamassas de terra produzidas com duas terras tropicais brasileiras, sendo uma argilosa (KCE) e outra areno siltosa (SSE). Em relação à argamassa de referência KCE-REF (1:4) a adição de 5% de cal reduziu a retração em 15%, a adição de 20% de EB reduziu em 67%. A adição combinada de 5% de cal com 10% de EB reduziu em 5%. Já com a argamassa TASR-REF (1:1), a adição de 5% de cal aumentou a retração em 10%, a adição de 20% de EB reduziu em 81% e a adição simultânea de 5% de cal com 10% de EB reduziu em apenas 5%. Em Pachamama *et al.* (2020;2024a) a porcentagem de água adicionada nas duas argamassas com as terras KCE e SSE e adição de cal foi de 16% e 13%, respectivamente. Já no presente estudo, na argamassa produzida com a terra CAP e adição de cal, foi de 21%. Portanto, além da composição mineralógica das terras tropicais, a menor quantidade de água e de cal adicionada em Pachamama *et al.* (2024a) podem ser fatores que justificam o comportamento apresentado por estas argamassas.

Densidade no estado endurecido

Já era sabido que a maior adição de EB reduz a densidade das argamassas secas, mas um detalhe importante pode ser observado na figura 80: a fermentação aumentou a densidade das três argamassas com adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7.

Ao multiplicar a diferença de aproximadamente 0,08 g/cm³ entre as argamassas fermentadas e a suas análogas sem fermentação, por 256 cm³ (volume total dos corpos de prova prismáticos com 4 cm x 4 cm x 16 cm), encontra-se um aumento em torno de 20 g de material sólido nos corpos de prova. A partir desta diferença entre as argamassas fermentadas e suas análogas sem fermentação, produzidas com a mesma terra, mesmo traço terra:areia, mesmo EBfp7, nas mesmas proporções e apoiado nos esclarecimentos de Rao *et al.* (2021) e Rao (2023), o aumento de 20 g ou 0,08 g/cm³ pode representar um aumento na produção de EPS nas argamassas.

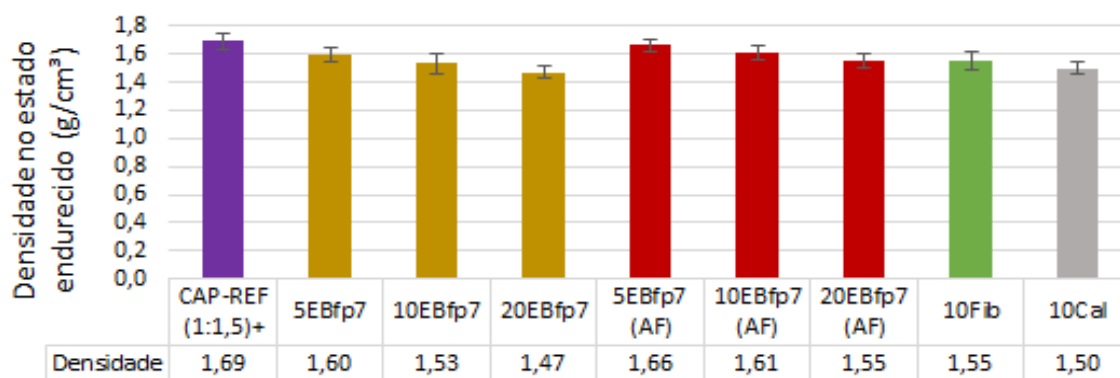


Figura 80. Densidade no estado endurecido das argamassas: CAP-REF(1:1,5) sem e com adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7 (com e sem fermentação), 10% de Fibras e 10% de Cal: média e desvio padrão.

A adição de 10% de Fibras também reduziu a densidade da argamassa e apresentou um valor semelhante a argamassa com 10% de EBfp7, que contém quantidade equivalente de matéria seca em sua composição. De acordo com os parâmetros da norma DIN 18947 (2024) para densidade aparente seca, as argamassas CAP-REF (1:1,5) e CAP+5EBfp7(AF) são da classe 1,8. As argamassas CAP+5EBfp7, CAP+10EBfp7, CAP+20EBfp7, CAP+10EBfp7(AF), CAP+20EBfp7(AF), CAP+10Fibras e CAP+10Cal são classe 1,6.

Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica traduz a resistência de um material ou produto homogêneo à passagem do fluxo de calor. Quanto menor a condutibilidade térmica, mais isolante é o material. Geralmente, quanto mais denso o material (e menos poroso), maior a condutibilidade térmica (Röhlen & Ziegert, 2011). Além dos outros efeitos vantajosos causados pela adição de EB observados anteriormente, os resultados deste ensaio evidenciam que as argamassas se tornam mais isolantes a medida que se aumenta a adição de EB (Figura 81). As adições de EBfp7 nas proporções de 5%, 10% e 20% reduziram a condutibilidade térmica em 16%, 21% e 36%, respectivamente.

Segundo Bamogo *et al.* (2020), esta redução se dá por dois motivos: (i) o aumento da porosidade observada por estes pesquisadores nas argamassas com adição de EB, em comparação a argamassa de referência sem EB; (ii) e a elevada presença de fibras vegetais no EB, que contém grande quantidade de celulose, uma molécula com propriedades isolantes que contribui para reduzir a condutibilidade térmica das argamassas de terra, conforme observado também em outras pesquisas (Ouedraogo *et al.* 2019; Ouedraogo *et al.* 2017; Millogo *et al.* 2014; Mansour *et al.* 2016).

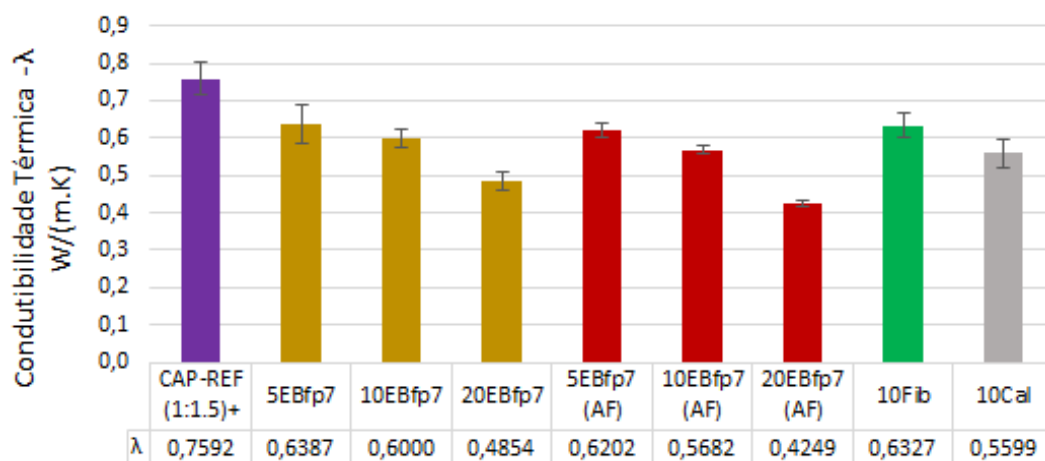


Figura 81. Condutibilidade térmica das argamassas: CAP-REF(1:1,5) sem e com adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7 (com e sem fermentação), 10% de Fibras e 10% de Cal: média e desvio padrão.

As argamassas fermentadas com adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7 tornaram-se ligeiramente mais isolantes (3%, 5% e 12%, respectivamente) em comparação com as suas análogas não fermentadas. Apesar destas argamassas serem em torno de 5% mais densas em comparação a suas análogas não fermentadas, a condutibilidade térmica das mesmas não aumentou. Isto provavelmente se deve a propriedade isolante conhecida dos exopolissacarídeos (EPS) secretados pelas bactérias presentes no EB, conforme apresentado na seção 2.1.4.2. Os microrganismos secretam o EPS e consolidam biofilmes para se protegerem do estresse ambiental, inclusive térmico. Por tanto, os resultados do ensaio de condutibilidade térmica, assim como o aumento causado na densidade dos corpos de prova produzidos com argamassas fermentadas, trazem mais indícios de que o processo de fermentação causa maior produção de EPS nas argamassas com adição de EB.

Considerando o valor médio apresentado pelos corpos de prova, a adição de 10% de Fibras reduziu a condutibilidade térmica de maneira menos expressiva que a adição de 10% de EBfp7. Como ambas apresentam a mesma quantidade de matéria seca contida (16 g), estes também são indícios que a biocimentação por EPS em CAP+10EBfp7 tornou a argamassa mais isolante.

E por último, a adição de 10% de Cal também reduziu a condutibilidade térmica alcançando valor semelhante à adição de 10% de EBfp7. A adição de cal torna a estrutura da argamassa mais porosa, o que, aliado à menor densidade no estado endurecido, resulta em uma argamassa mais isolante termicamente (Faria, 2004).

De acordo com os parâmetros apresentados na norma EN 998-1 (2016), todas as argamassas são classificadas como T1, pois apresentam λ inferior a 0,1 W/(m.k); portanto, são argamassas bastante isolantes termicamente.

Devido ao fato do campo de pesquisa sobre efeitos de adições de EB em argamassas de terra ainda ser inovador e incipiente, existem poucas publicações que avaliaram a condutibilidade térmica destas argamassas. Em relação à adição de fibras naturais, encontram-se investigações utilizando diferentes métodos de ensaio, espécies de vegetais e processamentos das fibras, além de usarem diferentes partes das plantas tais como fibras, cascas e folhas. Portanto, só foi possível comparar os resultados da presente pesquisa com o de outras, de forma qualitativa. Dentre as publicações encontradas, de forma geral a adição de fibras reduz significativamente a condutibilidade térmica (Faria & Lima, 2018; Rao, 2023; Hamrouni *et al.* 2024).

Giroundou *et al.* (2019) avaliaram a adição de palha (*straw*) de cevada e palha (*straw*) de lavanda (ambos resíduos da agroindústria) picadas com 1 cm de comprimento, em argamassa de terra. Os corpos de prova prismáticos retangulares (5 cm x 15 cm x 15 cm) de referência apresentaram 0,471 W/(m.K). A adição de 3% e 6% de palha de cevada reduziram a condutibilidade térmica para 0,254 e 0,155 W/(m.K), respectivamente. A adição de 3% e 6% de palha de lavanda reduziram de maneira menos expressiva, para 0,325 e 0,289 W/(m.K), respectivamente. Ambas as adições de fibras vegetais tornaram a argamassa mais isolante termicamente.

Lima & Faria (2016) avaliaram os efeitos causados pela adição de fibras na condutibilidade térmica de uma argamassa de terra íltica. Ao adicionar 10% e 20% (em volume) de fibras de aveia, a condutibilidade térmica reduziu em 9% e 27%, respectivamente. Ao adicionarem 20% (em volume) de fibras de taboa (*typha*), que são muito finas, observaram um aumento de 7%, enquanto com a adição de 80% já obtiveram uma redução de 5%.

Quanto a adição de EB em argamassas de terra, apenas foram encontradas duas publicações que avaliaram a condutibilidade térmica. Bamogo *et al.* (2020) observaram que, com o aumento da adição de EB, de 0 a 6% (em massa), a condutibilidade da argamassa reduziu em 10%, de 0,84 W/(m.K) para 0,75 W/(m.K). Mahamat *et al.* (2015) avaliaram a adição de EB nas proporções de 0 a 5% (em massa) e também foi observada uma redução significativa da condutibilidade térmica,

proporcionalmente ao aumento da adição. A argamassa de referência apresentou 0,8 W/(m.K) enquanto a adição com 5% de EB apresentou 0,3 W/(m.K), ou seja uma redução de 60%. Na presente pesquisa, a redução da condutibilidade térmica proporcional ao aumento da adição de EBfp7 de 5% para 10% e 20% também foi observada, reforçando os resultados encontrados.

Santos *et al.* (2017) avaliou a condutibilidade térmica de uma argamassa de terra argilosa (ilítica) usando o traço 1:3 (terra:areia), com densidade de 1,55 g/cm³, e encontrou resultados em torno de 0,9 W/(m.K). Com a substituição de 20% (em volume) da areia por PCM (*Phase Change Materials* - materiais de mudança de fase) foram encontrados resultados em torno de 0,5 W/(m.K). PCM são substâncias que absorvem ou liberam calor latente quando sofrem uma transição de fase. Quando adicionados em argamassas, são capazes de torná-las capazes de armazenar grandes quantidades de energia térmica em uma faixa de temperatura relativamente pequena, o que os torna mais eficientes do que os materiais de armazenamento de calor convencionais. Portanto, levando em consideração que a adição de um material específico para aumentar o isolamento térmico (PCM) proporcionou 45% de redução da condutibilidade térmica nas argamassas avaliadas em Santos, (2014), a redução em 44% causada na argamassa na presente pesquisa pela adição de 20% de EBfp7 (fermentada), evidencia o potencial da adição de EB para aumentar o isolamento térmico das argamassas de terra.

Resistência à flexão e à compressão

Na seção 4.3. já havia sido apresentado que a proporção volumétrica de 10% de EBfp7 aumenta a resistência à compressão (Rc), e que as proporções de 10% e 20% aumentam a resistência à flexão (Rf). No entanto, a Figura 82 mostra que a proporção volumétrica de 5% de EBfp7 também aumenta ambas as resistências, embora de maneira menos expressiva que a proporção de 10% de EBfp7. Com estes resultados, evidencia-se que a proporção volumétrica de 10% EB é de fato a mais eficiente para aumentar a resistência mecânica das argamassas de terra. As argamassas fermentadas apresentaram resistência mecânica ligeiramente menor em comparação as suas análogas sem fermentação. Rao *et al.* (2021) explica que isto ocorre porque, durante a fermentação, parte das fibras são degradadas e estas contribuem com a resistência mecânica das argamassas.

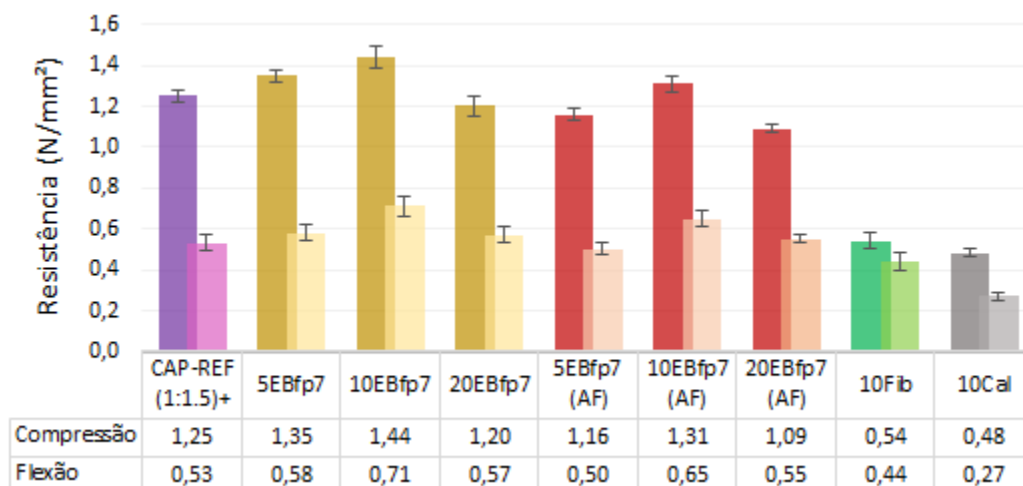


Figura 82. Resistências à compressão e flexão das argamassas: CAP-REF(1:1,5) sem e com adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7 (com e sem fermentação), 10% de Fibras e 10% de Cal: média e desvio padrão.

Com exceção das argamassas com adição de 10% de Fibra e 10% de Cal, todas as argamassas com adição de EBfp7 atendem os requisitos apresentados para resistência mecânica da norma DIN 18947 (2024), que determina que a R_f deve ser maior que 0,3 N/mm² e a R_c maior que 1,0 N/mm². Apesar disso, todas as argamassas apresentam R_c superior ao mínimo de 0,4 N/mm² apresentado na EN 998-1 (2016).

A adição de 10% de Cal foi a que mais reduziu a resistência mecânica das argamassas produzidas com a terra CAP, tanto R_c (em 62%) como R_f (em 50%). A redução nas R_c e R_f também foi observada em outras publicações sobre estabilização de argamassas de terra ilíticas portuguesas com baixa adição (5% em volume) de cal (Gomes *et al.* 2018, Santos *et al.* 2017). Este prejuízo é amenizado à medida que se aumenta o valor da adição de cal para 10% e 15% (Gomes *et al.* 2018). E adições a partir de 20% deste aglomerante (Faria, 2018) já começam a aumentar a resistência mecânica de argamassas de terra. De acordo com Santos *et al.* (2020), a rede estrutural criada pelo carbonato de cálcio interrompe as ligações entre as lâminas de argila, prejudicando a matriz estrutural argilosa. Como a adição de cal é baixa, não se forma uma matriz estrutural forte o suficiente para substituir aquela formada pela argila, o que resulta na redução da resistência mecânica da argamassa.

Por outro lado, em Pachamama *et al.* (2020; 2024a), usando duas terras tropicais brasileiras, a adição de 5% de cal (também em volume) não reduziu a resistência mecânica das argamassas, tendo-se mantido semelhante à resistência das argamassas de referência. Possivelmente, a diferença na composição mineralógica

das terras tropicais pode ter causado a diferença no comportamento das argamassas com baixa adição de cal.

É interessante observar que, percentualmente, o aumento causado pela adição de 10% de EBfp7 é maior em relação a Rf (34% de aumento) do que em relação a Rc (15% de aumento). Isto deixa indícios de que as fibras vegetais contidas no EB influenciam mais a Rf, e a atividade bacteriana influencia mais a Rc, o que não isenta a contribuição da ação bacteriana na melhoria da Rf e das fibras na melhoria de Rc. Esta observação pode ser reforçada ao analisar os resultados da adição de 10% de Fibras, que causou redução expressiva na Rc (57% de redução) e redução muito mais amena na Rf (17% de redução).

Lima & Faria (2016) também observaram redução em Rc bem mais expressiva que a redução em Rf com a adição de fibras de aveia. A argamassa de referência havia apresentado Rc de 0,88 N/mm² e Rf de 0,25 N/mm² e, com a adição de 10% (em volume) de fibras de aveia, Rc reduziu em 38% e Rf reduziu em 20%.

Apesar da redução causada pelas fibras, na presente pesquisa, a adição de 10% de Fibras ofereceu um diferencial muito interessante que pôde ser observado durante os ensaios de flexão e compressão. No momento da ruptura da argamassa de referência, CAP-REF(1:1,5), e da argamassa com adição de 10% de Cal, o corpo de prova se partiu imediatamente. Com a adição de EBfp7, o corpo de prova foi rompido, mas não se partiu sozinho, ou seja, foi preciso manusear o corpo de prova e forçar para separar as duas metades. Esta resistência à separação do corpo de prova rompido aumentou proporcionalmente ao aumento da adição de EBfp7, de 5% até 40%. Já com a adição de 10% de Fibras, essa resistência foi ainda maior. O corpo de prova foi rompido pelo equipamento, mas continuou suportando carga (principalmente na compressão), impedindo que o ensaio fosse interrompido.

Na Figura 83 é possível ver na fotografia tirada do monitor do equipamento durante o ensaio de compressão com um corpo de prova da argamassa CAP(1:1,5)+10Fibras. No eixo das ordenadas está a força exercida verticalmente sobre o corpo de prova e no eixo da abscissa está o deslocamento ocorrido. Com os corpos de prova de CAP-REF(1:1,5) e CAP(1:1,5)+10Cal a curva no gráfico alcançou seu auge quando foi aplicada uma Força tal que rompeu os corpos de prova, e então a linha do gráfico desceu abruptamente na vertical. Mas com CAP(1:1,5)+10Fibras, a curva ficou

estagnada na força de rompimento por mais de 2 minutos, enquanto o corpo de prova acomodava a carga que estava sendo aplicada. O ensaio foi realizado em triplicata, e o mesmo comportamento foi observado com os 3 corpos de prova. Passados quase 3 minutos de ensaio a curva começou a descer lentamente.

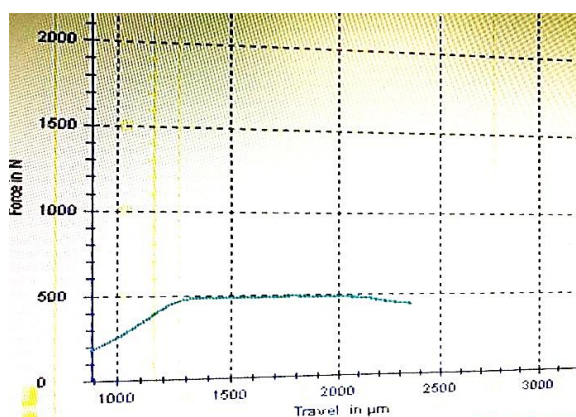


Figura 83. Gráfico gerado durante o ensaio de resistência a compressão das argamassas com adição de 10% de Fibras (capim picado com comprimento máximo de 3 cm).

Na Figura 84 é possível observar uma forte rede estrutural criada pelo emaranhado de fibras no interior da argamassa CAP(1:1,5)+10Fibras, o que contribui para distribuir e continuar suportando mais carga, sem se desintegrar. Este é um grande diferencial oferecido pela adição de fibras e, por isto, a depender da aplicação, pode ser a adição mais adequada, mesmo apresentando resultado pouco expressivo para R_c , mas satisfatório em relação a R_f . Afinal, a propriedade mais importante e desejável para argamassas para revestimento é a resistência à flexão (R_f), pois contribui para conter a retração e evitar o fissuramento por deformações causadas por dilatação térmica.

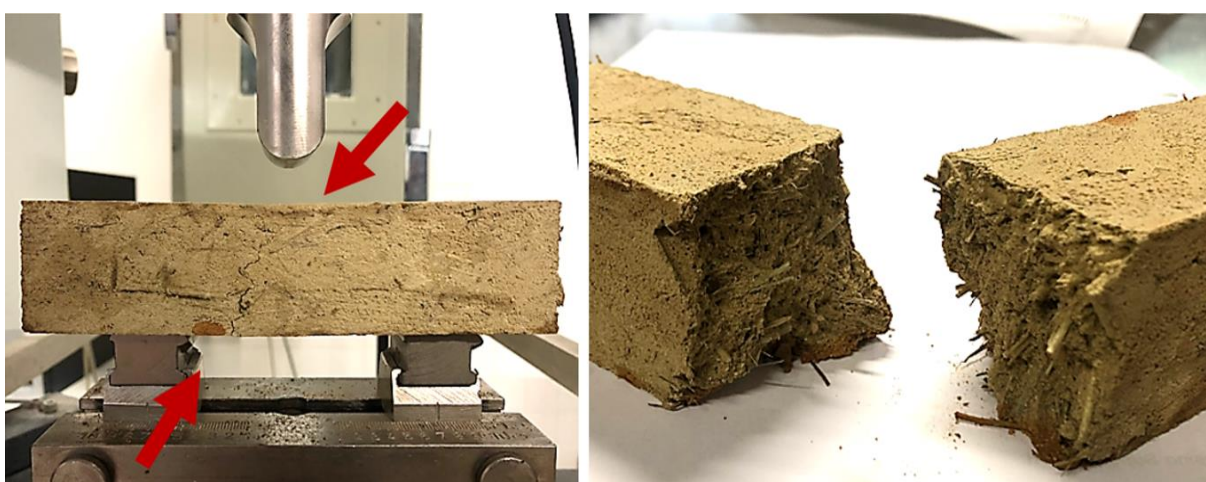


Figura 84. Observação sobre corpo de prova da argamassas CAP(1:1,5)+10Fibras rompido durante ensaio de R_f e separado manualmente.

Dias (2019) observou o mesmo comportamento quando avaliou os efeitos na resistência mecânica de adobes com adição em diferentes proporções volumétricas de fibras de bagaço de cana de açúcar (0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%) triturado em pedaços de até 5 cm de comprimento. Todos os adobes apresentaram resistência maior que 2 MPa. No entanto, não foi possível detectar a tensão de ruptura dos adobes pois quanto maior a adição de bagaço, maior a capacidade do adobe de acomodar as cargas, de deformar, mas não romper.

Resistência de aderência ao cisalhamento

A Figura 85 mostra que mesmo a baixa a adição de EBfp7 na proporção de 5% já é suficiente para aumentar a aderência das argamassas de terra. Os efeitos causados pela adição de 10% e 20% de EBfp7 já eram esperados, e comparando com 5%, conclui-se que a proporção de 10% é a que mais aumenta a propriedade adesiva das argamassas de terra, em 50%, o que é bastante expressivo. Apesar disso, todas as adições de EBfp7 também aumentam Ra.

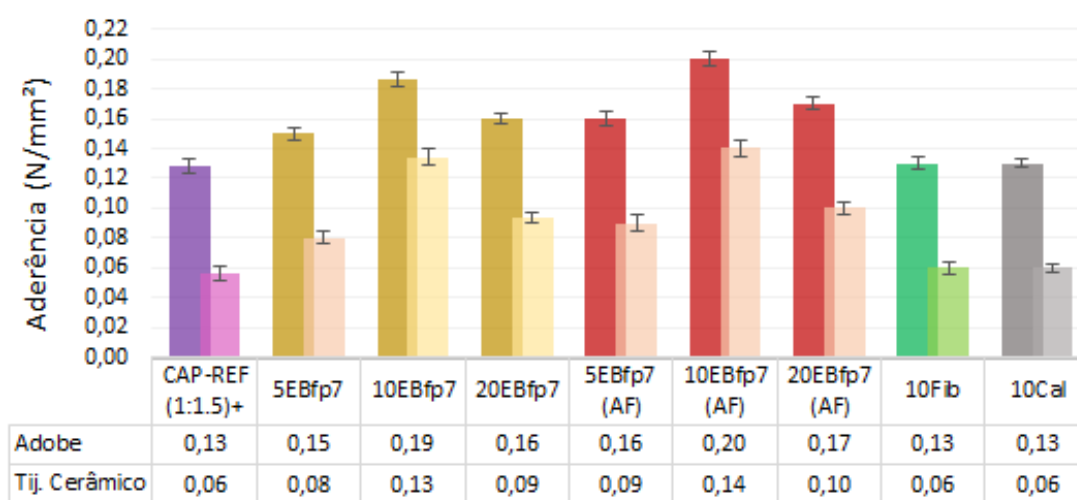


Figura 85. Resistência de aderência ao cisalhamento das argamassas: CAP-REF(1:1,5) sem e com adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7 (com e sem fermentação), 10% de Fibras e 10% de Cal: média e desvio padrão.

Os resultados também mostram que a fermentação das argamassas com adição de EB aumentam ainda mais a aderência às alvenarias de adobe e de tijolo cerâmico em comparação com as argamassas não fermentadas. As argamassas com adição de 10% de Cal e de 10% de Fibras não alteraram a aderência da argamassa de referência. Todas as argamassas apresentam resistência superior a 0,05 N/mm², limite mínimo determinado pela norma DIN 18947 (2024).

De acordo com Rao *et al.* (2021) e Rao (2023), o EPS secretado pelas bactérias possui carga negativa e é responsável pela coesão dos biofilmes formados e pela sua aderência às superfícies aonde se instalam, como explicado na seção 2.1.4.2. A biocimentação (e bioestabilização), promovida pelos EPS, oferece forte aderência e é potencializada pela formação de pontes fibrosas (envolvendo as fibras presentes no EB) que aumentam a aderência entre as argamassas e as alvenarias, principalmente nas alvenarias de adobe devido a maior compatibilidade entre o adobe e o reboco de terra e maior rugosidade da superfície. Portanto, além do aumento na densidade seca e da redução da condutibilidade térmica das argamassas fermentadas, o aumento da propriedade adesiva nestas argamassas também reforça que o processo de fermentação das argamassas de terra com adição de EB leva ao aumento da produção de EPS pela ação microbiana, tal como explicado por Rao *et al.* (2020; 2021).

Lima & Faria (2016) também avaliaram os efeitos causados na resistência de aderência (Ra) causados pela adição de fibras de aveia e de taboa (*typha*) em argamassa de terra ilítica. A argamassa de referência apresentou Ra de 0,07 N/mm². Com a adição de 10% (em volume) de fibras de aveia, observaram modesto aumento na aderência para 0,08 N/mm². Com a adição de 20%, reduziu-se a resistência mecânica mas houve aumento ainda maior da Ra para 0,9 N/mm². Com a adição de 20%, 40% e 80% de fibras de taboa (*typha*), registrou-se aumento da resistência mecânica e da aderência, sendo a proporção de 80% a que ofereceu resultados mais vantajosos, com Ra de 0,11 N/mm². Portanto, estes resultados também reiteram a contribuição da adição de fibras vegetais para o aumento da aderência dos rebocos com terra.

Em Pachamama *et al.* (2020;2024a), também foi avaliada a aderência das argamassas com as duas terras tropicais brasileiras. Em relação as argamassas de referência com as terras KCE e SSE, a adição de 5% de cal causou aumento em Ra em torno de 20%, enquanto a adição de 10% de EB causou aumento em torno de 70%.

Imersão em água

Nas duas seções anteriores já foi evidenciado que, em relação a resistência em contato com água, quanto maior a adição de EB, maior a durabilidade das argamassas. A Figura 86 comprova esta constatação pois a proporção de 5% de

EBfp7 foi a que apresentou menor durabilidade, tendo a forma cúbica do corpo de prova resistido apenas 5 minutos. Já o processo de fermentação das argamassas aumenta consideravelmente a resistência ao contato com a água.



Figura 86. Imersão em água por até 30 minutos da argamassa de referência, CAP-REF (1:1,5), das argamassas com adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7 fermentadas e não fermentadas, e das argamassas com adição de 10% de Fibras e de 10% de Cal.

No ensaio de aderência o processo de fermentação causou aumento de apenas 5% em relação às argamassas não fermentadas, um empate técnico. Mas no ensaio de imersão em água os efeitos são muito mais expressivos. A fermentação da argamassa CAP(1:1,5)+5EBfp7 aumentou a durabilidade do corpo de prova, mas ainda assim, a proporção volumétrica de 5% para adição de EBfp7 é insuficiente para tornar a argamassa de terra resistente ao contato prolongado com água.

A argamassa CAP(1:1,5)+10EBfp7 não havia resistido a 10 minutos de imersão, mas a mesma argamassa fermentada resistiu a 30 minutos. No entanto, ao observar mais de perto, é possível identificar o início do surgimento de microfissuras no corpo de prova que aumentaram ao longo de 24 horas submerso em outra bandeja com 10 cm de altura de água e mais ainda ao longo dos seguintes 7 e 14 dias de imersão, mas sem se desintegrar. Portanto, a argamassa com adição de EBfp7 na proporção de 10% e fermentada é mais adequada para revestimento de paredes internas.

A argamassa com 20% EB resistiu a 30 minutos de imersão, mas apresentou surgimento de fissuras (menos do que CAP+10EBfp7(AF)). Mas com o processo de fermentação a argamassa CAP+20EBfp7(AF) manteve-se perfeitamente intacta até os 30 minutos de ensaio e por 24 horas de imersão. Nos próximos 7 dias essa ainda se manteve mais íntegra em comparação a CAP+10EBfp7(AF); no entanto, menos íntegra que a argamassa com adição de 40% de EBfp7, que se manteve intacta até aos 7 dias de imersão, quando começaram a surgir fissuras que aumentaram gradativamente até 14 dias de imersão, embora ainda mantendo a forma cúbica. Portanto, a argamassa com adição de EBfp7 na proporção de 20%, e fermentada, é suficiente para revestimento de paredes externas, o que não exclui a necessidade do uso de um beiral no telhado.

A argamassa com adição de 10% de Cal começou a se desintegrar logo aos 5 minutos de imersão. Depois do ensaio, apesar de não ter se desintegrado completamente, a argamassa CAP+10Cal estava macia, e após deixar secar por 7 dias apresentou-se bastante fraca ao esmagamento manualmente, tornando-se menos resistente em comparação a CAP-REF(1:1,5). Isto possivelmente também se justifica pela baixa proporção que foi adicionada de cal. Além disso, nota-se também que essa adição prejudicou a capacidade da argamassa de terra de apresentar coesão e resistência física após a secagem do corpo de prova que foi ensaiado na imersão em água.

Apesar de reduzir a resistência a compressão expressivamente, a argamassa com adição de 10% de Fibras apresentou comportamento surpreendente e manteve-se intacta durante todo o ensaio. Além disso, após a secagem por 7 dias do corpo de prova ensaiado, o mesmo ainda apresentou-se rígido tal como antes do ensaio de imersão, sendo esta uma vantagem importante para os revestimentos a base de terra. Faz sentido que a adição de fibras não tenha alterado a reversibilidade da argila, uma vez que esta adição provoca uma estabilização apenas física. Se tivesse sido fermentada, também poderia ter causado uma estabilização química (Savadoغو *et al.* 2024; Hijioka *et al.* 2015; Henry & Therrien, 2018).

Todos os corpos de prova com adição de EBfp7 que foram ensaiados na imersão em água e deixados secar por 7 dias, apresentavam-se rígidos e resistentes a tentativa de esmagamento manual. No entanto, apenas a argamassa com adição de 20% de EBfp7 foi reciclada e devidamente caracterizada novamente com todos os ensaios apresentados na seção anterior (4.4.).

Higroscopicidade

Como já foi discutido anteriormente na seção 3.4.11., os materiais adicionados como estabilizantes não devem prejudicar a higroscopicidade da argamassa de terra. Os resultados do ensaio de adsorção de água (Figura 87) evidenciam que, apesar de aumentar a resistência ao contato com a água, a adição de EB não reduz a higroscopicidade da argamassa de terra; pelo contrário, aumenta a adsorção de umidade do reboco proporcionalmente ao aumento da adição. A fermentação das argamassas praticamente não alterou a massa de água adsorvida em relação às mesmas argamassas sem fermentar, embora tenha aumentado minimamente. Este comportamento é surpreendente e muito positivo pois, além do aumento da durabilidade e resistência em contato com água observado no ensaio de imersão em água, a fermentação da argamassa não prejudicou a higroscopicidade do reboco.

A adição de 10% de Fibras também aumentou a quantidade de água adsorvida da argamassa, tal como a adição de 20% de EBfp7. Já a adição de 10% de Cal, causou uma redução bastante expressiva, de 27%, evidenciando como esta estabilização química, causada por este aglomerante irreversível, reduz a higroscopicidade da argamassa de terra.

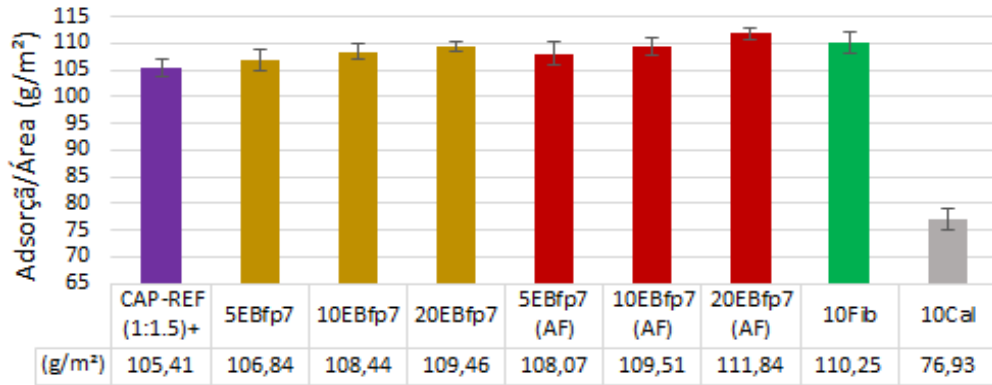


Figura 87. Massa de água adsorvida por área dos revestimentos produzidos com as argamassas: CAP-REF(1:1,5) sem e com adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7 (com e sem fermentação), 10% de Fibras e 10% de Cal: média e desvio padrão.

A Figura 88 apresenta, para cada argamassa avaliada, a massa (g) de vapor de água adsorvida por área em até 24 horas sob umidade relativa de 80%; e liberada em até 24 horas sob umidade relativa de 50%, a 23°C de temperatura. Devido à elevada higroscopicidade de CAP-REF, mesmo a argamassa com adição de 10% de Cal apresentou valor superior ao mínimo exigido pela norma DIN 18947 (2024) de 35 g/m² de massa de água adsorvida após 12 horas do ensaio de adsorção.

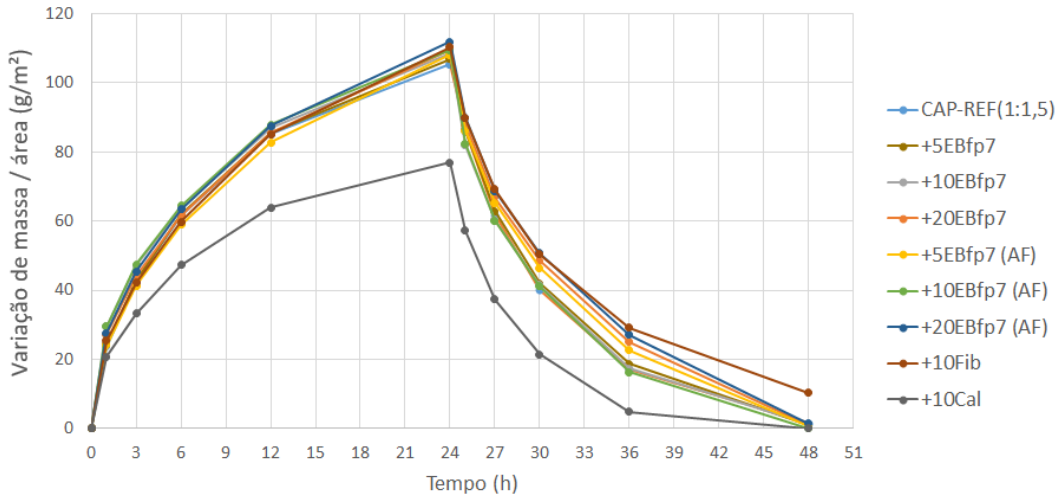


Figura 88. Adsorção e desadsorção das argamassas: CAP-REF(1:1,5) sem e com adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7 (com e sem fermentação), 10% de Fibras e 10% de Cal.

Segundo as classificações apresentadas na norma DIN (2024), com exceção da argamassa CAP(1:1,5)+10Cal que é classificada como WS-II (adsorção de vapor após 12h ≥ 50 g/m²) todas as outras argamassas são classificadas como WS-III (adsorção de vapor após 12h ≥ 65 g/m²), a classe mais elevada. As argamassas avaliadas no presente estudo apresentam valores muito superiores aos apresentados na norma, sendo, portanto, argamassas bastante higroscópicas, ou seja, com elevada habilidade de equilibrar a umidade relativa no interior dos ambientes com elas rebocados.

Todas as argamassas com adição de EB liberaram praticamente a mesma quantidade de água que adsorveram ao término do ciclo de desadsorção tendo retido apenas uma média de 0,5 g/m² de umidade (em torno de 0,5% da massa total de água adsorvida e liberada). O reboco com adição de 10% fibras ainda continha retido um pouco de umidade (cerca de 10 g/m²) após as 24 horas do ensaio de desadsorção, o que corresponde a 10% da umidade adsorvida. Isto quer dizer que o reboco com adição de fibras demoraria mais tempo para liberar toda a umidade nas referidas condições de temperatura e umidade. Enquanto que o reboco com adição de 10% de cal liberou toda a umidade mais rapidamente.

Lima *et al.* (2016) realizaram o mesmo ensaio para avaliar os efeitos causados pela adição de gesso em argamassas de terra íltica com adição de areia usando o traço volumétrico 1:3 (terra:areia). A argamassa de referência apresentou o resultado de 70 g/m² e a adição de 5%, 10% e 20% de gesso (outro aglomerante irreversível) também reduziu a higroscopicidade das argamassas proporcionalmente ao aumento da adição.

Usando a mesma terra e mesmo traço volumétrico 1:3 (terra:areia) para adição de areia, Lima & Faria (2016) realizaram o mesmo ensaio para avaliar os efeitos causados na higroscopicidade das argamassas pela adição (em volume) de 20% de fibras de aveia e de 20% de fibras de *typha* (taboa) e encontraram os valores de 67 g/m² e 66 g/m², respectivamente. As argamassas com adição de fibras apresentaram resultados muito semelhantes à argamassa de referência, não tendo prejudicado ou melhorado a higroscopicidade da argamassa de referência.

Ainda usando a mesma terra íltica, Lima *et al.* (2016) avaliaram a adsorção de umidade das argamassas com adição de areia em dois traços volumétricos, 1:4 e 1:2 (terra:areia), e obtiveram os resultados de 53,7 g/m² e 72,3 g/m², respectivamente. A argamassa de referência na presente seção, CAP-REF(1:1,5), apresentou adsorção de umidade superior a estes valores. Isso justifica-se pela menor adição de areia em CAP-REF (produzidas com o traço volumétrico 1:1,5 de terra:areia) e a resultante maior fração de terra e argila. Como evidenciado na seção 4.2., à medida em que se adiciona areia nas argamassas de terra, reduz-se a higroscopicidade. Os resultados de Lima *et al.* (2016) também reforçam esse argumento pois, ao reduzir a adição de areia na argamassa (entre os traços terra:areia de 1:4 para 1:2), também registrou-se aumento de 50% na adsorção de umidade. Ou seja, quanto maior a presença de argila na terra, mais higroscópica será a argamassa e o reboco com ela produzido.

Erosão por gotejamento - Geelong drip test

A Figura 89 apresenta fotografias dos corpos de prova tijolo rebocado após duas realizações do ensaio de erosão por gotejamento. As fotografias foram tiradas logo após a segunda realização do ensaio, portanto em cada tijolo rebocado, à direita (já seco) está a erosão (quando há) causada pela primeira vez que o ensaio foi realizado, e à esquerda (ainda molhada) está a erosão causada pela segunda vez que o ensaio foi realizado.

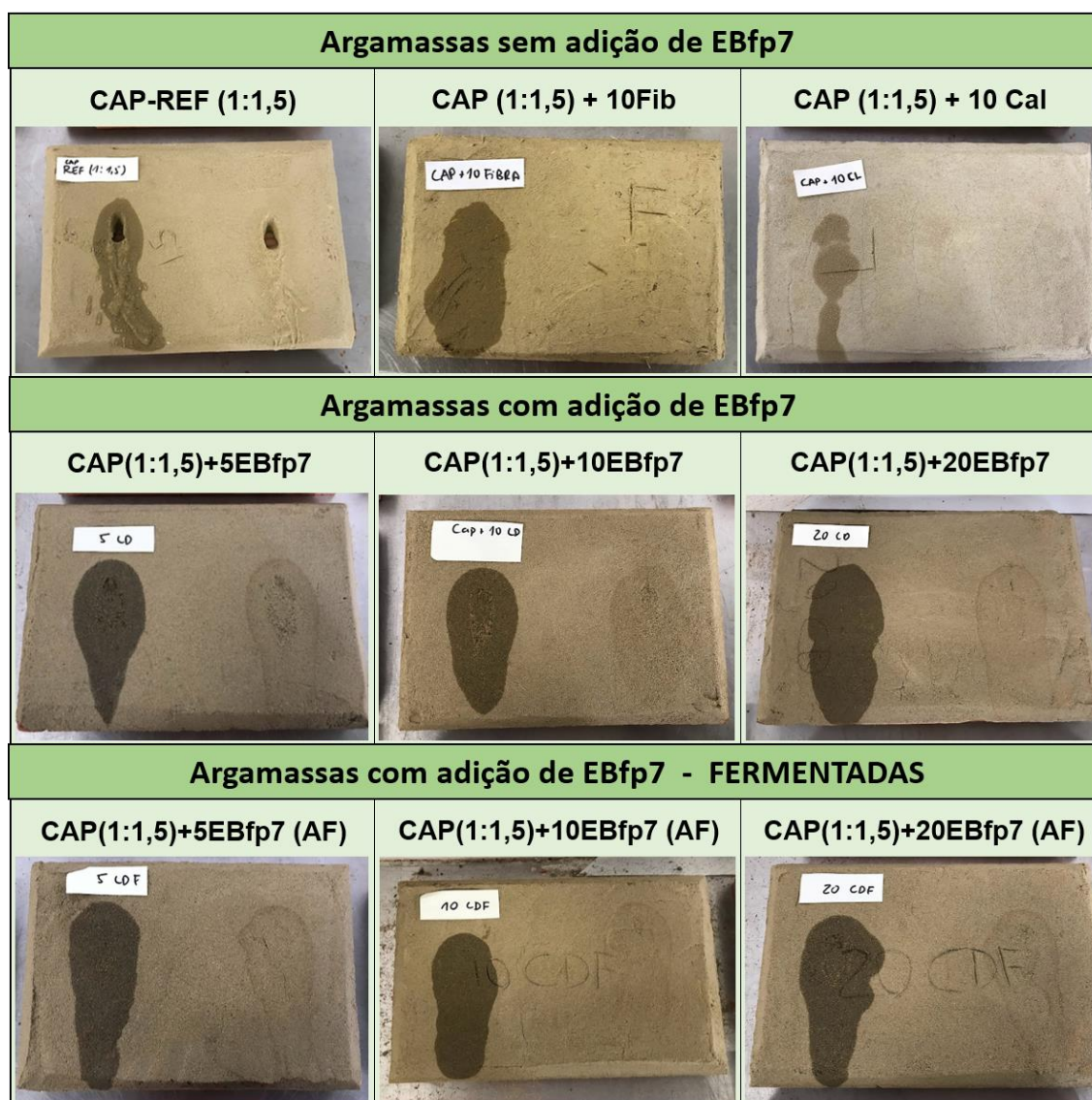


Figura 89. Resultados dos dois ensaios de erosão por gotejamento realizados nos corpos de prova “tijolo rebocado” com as argamassas produzidas com a terra CAP e adição de areia no traço volumétrico 1:1,5(terra:areia): em cima, as argamassas CAP-REF(1:1,5) e as argamassas com adição de 10% de Fibras e de 10% de Cal; no meio, as argamassas com a adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7 (moldadas imediatamente após a mistura dos componentes); e em baixo, as mesmas argamassas com adição de EBfp7, mas fermentadas.

A argamassa de referência, sem adições, foi a única expressivamente erodida pelo gotejamento. As argamassas com adição de EBfp7 tiveram a resistência ao gotejamento claramente melhorada. Apesar de sutil, é possível notar que a resistência à erosão por gotejamento aumentou proporcionalmente ao aumento da adição de EB; e que a fermentação da argamassa fresca melhorou o desempenho em comparação com as argamassas análogas sem fermentação.

Em comparação com a argamassa de referência CAP-REF, a redução causada pela adição de EB é muito expressiva. Mas em comparação com a adição de EB, a adição de 10% de Fibras foi ainda menos erodida. No entanto, a argamassa com a adição de cal foi a menos erodida, embora manifeste fissuramento na superfície do revestimento.

Além da análise visual da erosão causada nas argamassas, os corpos de prova também foram pesados (Figura 90). No entanto, mesmo que o corpo de prova tenha sido posicionado debaixo da fonte de gotejamento com uma inclinação em torno de 60° para facilitar o escorregamento da matéria desagregada pela erosão, nem todo o material foi deslocado para fora do corpo de prova. Por isto, mesmo que uma argamassa tenha sido mais erodida, se fragmentos desprendidos da argamassa permanecerem na superfície do corpo de prova, o corpo de prova ainda apresentará maior massa, indicando erroneamente, que a argamassa foi menos erodida. Neste sentido, reforça-se a importância de que o corpo de prova seja levado a estufa antes e depois do ensaio; e que depois do ensaio o corpo de prova seja levemente varrido com um pincel para retirar o material desagregado/erodido antes de ser pesado.

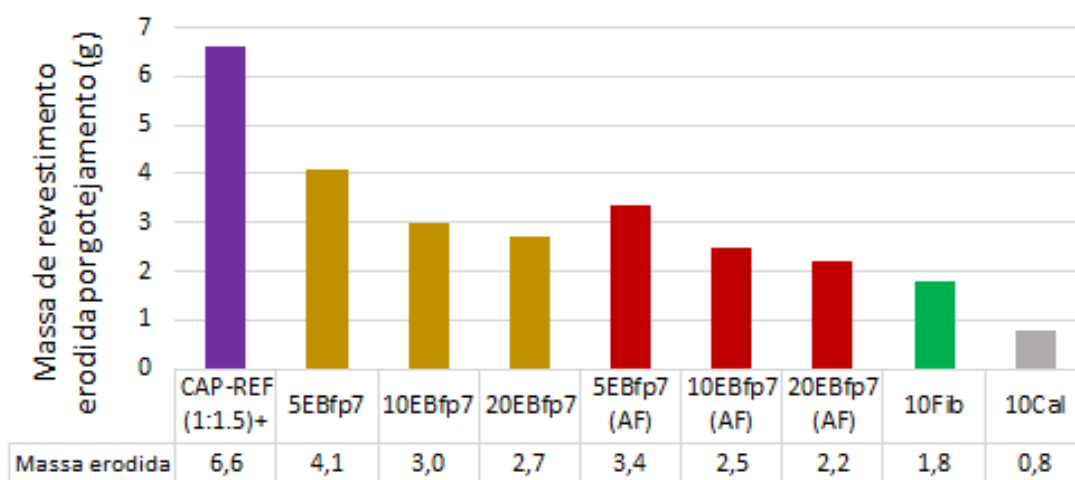


Figura 90. Massa de revestimento erodida pelo gotejamento de água nos rebocos com as argamassas: CAP-REF(1:1,5) sem e com adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7 (com e sem fermentação), 10% de Fibras e 10% de Cal.

A Figura 90 mostra a massa (g) perdida após o ensaio, mas vale ressaltar que estes resultados devem ser avaliados conjuntamente com a análise visual dos efeitos causados no corpo de prova tijolo rebocado (Figura 89), para avaliar o quão resistente o reboco é à erosão por gotejamento. Ressalta-se também que os resultados da perda de massa correspondem a duas execuções do ensaio, pois a massa de cada tijolo foi medida depois da segunda vez que o ensaio foi realizado.

Bamogo *et al.* (2020) foi a única publicação encontrada sobre adição de EB em argamassas de terra que realizou um ensaio semelhante ao que foi usado na presente pesquisa. O ensaio realizado avaliou a resistência do reboco através da erosão causada por uma simulação de gotas de chuva aspergidas sob pressão de 2 bares e um fluxo constante de 5 L/min por 10 minutos em um reboco inclinado em 30° em relação ao plano vertical (ou seja, 60° em relação ao piso). Assim como na presente pesquisa, os resultados também evidenciaram que a perda de massa reduz à medida que a proporção de EB adicionado aumenta de 0% a 6% (em massa).

Giroudon *et al.* (2019) realizaram o mesmo ensaio com base na norma da Nova Zelândia NZS 4298-A1 (2000) e avaliaram a adição de fibras de cevada e de lavanda (ambos resíduos da agroindústria) picadas com 1 cm de comprimento, na proporção em massa de 3% e 6%. Também obtiveram a mesma tendência, com redução de mais de 50% da erosão por gotejamento. Lerner & Donahue (2003) realizaram um ensaio parecido para avaliar a adição de diferentes fibras vegetais em argamassas de terra e também foi observado que a adição destas fibras reduziu a erosão causada pela água.

Diante do exposto, ficam claros os benefícios causados nas argamassas de terra pela adição do EB e das fibras vegetais de capim escalracho. Neste sentido, é fundamental avaliar cuidadosamente a demanda estrutural e específica para a aplicação de cada argamassa para, sempre que possível, evitar e reduzir o consumo de materiais industrializados cujo processo produtivo e de descarte ao final do ciclo de vida são bastante poluentes, como o cimento, a cal, o gesso e outras adições sintéticas não biodegradáveis.

4.6. Síntese dos resultados obtidos

Na primeira seção de resultados, 4.2., foram avaliados os efeitos causados pela adição de areia em argamassas de terra (além daquela contida naturalmente na composição das terras) e o potencial do EB como substituto à adição de areia para conter a retração e melhorar a trabalhabilidade.

Na Tabela 19 apresenta-se a síntese qualitativa dos resultados obtidos na seção 4.2.

Tabela 19. Síntese dos resultados da seção 4.2.

Efeitos da adição de areia e/ou de 20% EBfp7 - argamassas com as terras CAP, MON e ITA						
Terra e adição de areia (terra:areia)	Retração (%)	Rc (MPa)	Rf (MPa)	Durabilidade por imersão	Conduct. Térm.	Adsorção
CAP (1:0) REF	3,68	2,23	0,90			
Adições (vol.)	Variação em relação a CAP(1:1,5)REF					
CAP (1:0) + 20EBfp7	-45%	-13%	-6%			
CAP (1:1)	-32%	-27%	-23%			
CAP (1:1,5)	-58%	-44%	-41%			
CAP (1:1,5) + 20EBfp7	-68%	-46%	-37%			
Terra e adição de areia (terra:areia)	Retração (%)	Rc (MPa)	Rf (MPa)	Durabilidade por imersão	Conduct. Térm.	Adsorção
MON (1:0) REF	2,83	3,28	1,34	5 minutos	0,4658	102,42
Adições (vol.)	Variação em relação a MON(1:1,5)REF					
MON (1:0)+20EBfp7	-71%	-20%	-17%	7 dias	-61%	25%
MON (1:1)	-63%	-43%	-29%			
MON (1:1,5)	-85%	-58%	-50%	1 minuto	37%	-27%
MON (1:1,5)+20EBfp7	-100%	-68%	-61%	7 dias	-15%	-11%
Terra e adição de areia (terra:areia)	Retração (%)	Rc (MPa)	Rf (MPa)	Durabilidade por imersão	Conduct. Térm.	Adsorção
ITA (1:0) REF	6,31	1,95	0,76			
Adições (vol.)	Variação em relação a ITA(1:3)REF					
ITA (1:1)	-23%	-35%	-25%			
ITA (1:2)	-46%	-46%	-39%			
ITA (1:3)	-69%	-62%	-50%			

Na primeira linha em amarelo (no tom mais forte) estão os resultados obtidos com a argamassa de referência (identificadas com o sufixo REF) produzida com a terra CAP sem adições de areia ou EBfp7. Nas linhas seguintes abaixo estão apresentados a variação percentual causada nas outras argamassas produzidas com a terra CAP mas com diferentes adições, especificadas na primeira coluna da tabela. Se a adição causou redução da propriedade, há um sinal negativo (-) antes do valor em

percentagem. Se a adição causou aumento, não há sinais antecedendo os valores em percentagem. Nas linhas em cinza e vermelho repete-se a mesma lógica utilizada, porém são estes os resultados obtidos com as argamassas produzidas com as terras MON e ITA, respectivamente. As cores escolhidas remetem a cor de cada terra.

Após análise dos resultados, concluiu-se que a adição de areia, como agregado fino, contribuiu para obtenção de melhor trabalhabilidade da terra tropical brasileira ITA, que é muito argilosa (70%), e contribuiu para limitar a retração das argamassas com as três terras analisadas. No entanto, evidenciou-se que a adição de areia também causa efeitos colaterais indesejados, tais como: diminuição da resistência mecânica, diminuição da resistência à imersão em água e à erosão por gotejamento, além de aumento da condutibilidade térmica.

Por outro lado, também foi evidenciado que, além de conter a retração das argamassas produzidas com as terras portuguesas, de clima temperado mediterrânico, CAP e MON, a adição de 20% de EBfp7 ainda causou outros benefícios, como aumento da adsorção e higroscopicidade, aumento da resistência ao contato com água e da resistência mecânica, e ainda redução da condutibilidade térmica, deixando as argamassas ainda mais isolantes termicamente.

No entanto, a adição de 10% de EBfp7 não foi capaz de conter a retração dos rebocos sem a adição de areia, e a de 5% provavelmente também não seria, o que tornaria inviável avaliar os efeitos causados pela adição de diferentes proporções de EB. Por isto, optou-se por usar a adição de areia na produção das argamassas de referência (controle), mas na proporção volumétrica mínima necessária para conter a retração e fissuração nos rebocos produzidos com as três terras. Assim, foi possível avaliar os efeitos causados pelas diferentes adições de EB nas argamassas produzidas com as três terras. Apesar disso, para aplicações práticas de campo, antes de adicionar areia nas argamassas de terra, vale sempre conferir se a adição de 20% de EB é capaz de conter a retração das argamassas, afinal, serão conferidos mais qualidades e benefícios à argamassa, e evitados os prejuízos colaterais causados pela adição de areia.

Na segunda seção de resultados apresentada, 4.3., foram produzidas argamassas com a terra brasileira (ITA) e com as duas terras portuguesas (CAP e MON) para comparar o comportamento entre argamassas de terra para reboco produzidas com

os diferentes tipos de terra, ensaiadas sob mesmas condições e equipamentos; e para avaliar os efeitos causados pela adição de um mesmo EB (EBfp7, obtido em Portugal) em duas proporções (10% e 20%), calculadas sobre o volume total dos componentes secos (terra + areia adicionada).

Na Tabela 20 apresenta-se a síntese qualitativa dos resultados obtidos na seção 4.3. Na primeira linha de cada cor (no tom mais forte) estão os resultados obtidos com as argamassas produzidas com cada terra apenas com a adição de areia usando o traço volumétrico necessário para conter a fissuração nos rebocos, sendo estas as argamassas de referência (identificadas com o sufixo REF). Nas linhas seguintes abaixo de cada uma, estão apresentadas a variação percentual causada pelas adições (especificadas na primeira coluna da tabela) em relação a argamassa de referência.

Tabela 20. Síntese dos resultados da seção 4.3.

Efeitos da adição de 10% e 20% de EBfp7 nas argamassas com as terras CAP, MON e ITA							
Terra e adição de areia (terra:areia)	Retração (%)	Densid. (g/cm ³)	Rc (MPa)	Rf (MPa)	Aderência (MPa)		Durabilidade por imersão
					Adobe	Tij. Cer.	
CAP(1:1,5) REF	1,56	1,69	1,25	0,53	0,13	0,06	2 minutos
Adições (vol.)	Variação em relação a CAP(1:1,5)REF						Durabilidade
10EBfp7	-14%	-9%	15%	34%	45%	139%	10 minutos
20EBfp7	-24%	-13%	-4%	8%	25%	67%	< 7 dias
Terra e adição de areia (terra:areia)	Retração (%)	Densid. (g/cm ³)	Rc (MPa)	Rf (MPa)	Aderência (MPa)		Durabilidade por imersão
					Adobe	Tij. Cer.	
MON(1:1,5) REF	0,43	1,70	1,38	0,67	0,11	0,04	1 minuto
Adições (vol.)	Variação em relação a MON(1:1,5)REF						Durabilidade
10EBfp7	-77%	-5%	-13%	-9%	49%	100%	7 dias
20EBfp7	-100%	-9%	-25%	-22%	32%	71%	> 7 dias
Terra e adição de areia (terra:areia)	Retração (%)	Densid. (g/cm ³)	Rc (MPa)	Rf (MPa)	Aderência (MPa)		Durabilidade por imersão
					Adobe	Tij. Cer.	
ITA(1:3) REF	1,95	1,57	0,74	0,38	0,11	0,05	2 minutos
Adições (vol.)	Variação em relação a ITA(1:3)REF						Durabilidade
10EBfp7	-22%	-5%	41%	37%	73%	100%	10 minutos
20EBfp7	-38%	-12%	1%	-8%	27%	40%	7 dias

A argamassa de terra ITA-REF(1:3) com teor de argila (caulinita) de 18%, apresentou menor resistência mecânica, embora contenha o triplo do teor de argila das argamassas CAP e MON (ilita) de 6%. Provavelmente, isso se deve ao tipo de argila predominante em ITA (caulinita), que apresenta menor Capacidade de Troca Catiônica

(CTC) e oferece menor resistência mecânica comparada a argila ilita, predominante em CAP e MON.

Por outro lado, a argamassa produzida com a terra ITA apresenta durabilidade ligeiramente maior quando imersa em água, o que provavelmente se explica pela origem tropical, menor CTC e maior teor de argila, em comparação com as outras duas terras, como explicado detalhadamente na referida seção. No entanto, também existem outras diferenças na composição mineral e na distribuição granulométrica dos três tipos de terra que podem influenciar o seu desempenho. Em relação às duas terras de Portugal, embora tenham sido coletadas em locais não muito distantes (200 km), apresentaram desempenho diferente, o que é natural, uma vez que há uma infinidade de variações na composição dos solos e das terras deles extraídas.

Ao comparar os efeitos causados nas argamassas ITA com a adição de EBfp7 (de Portugal) com os efeitos causados em uma argamassa produzida com a mesma terra ITA em estudos anteriores (Pachamama *et al.* 2020) mas com a adição de um EB do Brasil, os resultados do presente estudo evidenciaram que os dois excrementos causaram os mesmos efeitos: redução da retração, aumento da aderência e aumento da resistência à flexão com ambas proporções (10% e 20% de EB), e aumento da resistência à compressão com a adição de 10% de EB. Isso mostra a pouca influência da origem geográfica e da espécie dos bovinos nos efeitos causados pela adição dos seus EB, pelo menos numa argamassa de terra tropical.

Em relação aos efeitos causados pela adição de EBfp7 nas argamassas produzidas com as terras CAP e MON, na retração linear por secagem, a proporção de 20% foi mais eficiente para evitar o surgimento de fissuras, embora 10% também tenha reduzido. Já quanto à aderência, a proporção de 10% foi mais eficiente, embora 20% também tenha aumentado essa propriedade em pelo menos 20%. Na imersão em água, a adição de EB foi unânime em aumentar a durabilidade das argamassas, em especial com a argamassa produzida com a terra MON, e a proporção de 20% foi expressivamente mais eficiente.

Com a terra CAP, as duas proporções de EB causaram aumento na resistência à flexão, e na resistência a compressão a adição de 10% de EBfp7 causou aumento, mas a proporção de 20% de Ebfp7 causou ligeira redução (4%, o que considerando o desvio padrão é irrisório ou nulo). Já com a terra MON, as duas proporções causaram

redução na resistência à flexão e à compressão, sendo a proporção de 10% menos prejudicial. Apesar disso, mesmo com esta redução, os valores são classificáveis pelos parâmetros apresentados na norma DIN 18947 (2024).

A partir da comparação dos efeitos causados pela adição de EB nas argamassas produzidas com as três terras diferentes, e uma análise dos resultados apresentados em publicações de outros pesquisadores, não foi possível detectar alguma relação clara entre a composição granulométrica e mineralógica das terras e das argamassas de terra com a otimização dos efeitos causados. No entanto, certamente ambas composições influenciam os efeitos causados nas argamassas. Neste sentido, para tentar outra estratégia de encontrar parâmetros de composição das terras que possam auxiliar a determinar adições otimizadas de EB, pode ser útil caracterizar as amostras de terra e as argamassas, quanto a CTC para se ter maior precisão sobre a sua composição. Por enquanto, para aplicações práticas, recomenda-se continuar fazendo testes com diferentes traços de terra:areia e diferentes proporções de EB, a fim de encontrar as formulações mais apropriadas para cada terra e para cada aplicação.

Com os presentes resultados com terras brasileiras e portuguesas, e também validados pela literatura e publicações com terras tropicais de África e Ásia, os efeitos positivos da adição de EB são válidos para argamassas de terra produzidas com terra tanto de clima tropical como temperado mediterrânico. No entanto, em percentagem, os benefícios desta adição são mais expressivos nas terras tropicais (Tabelas 4 e 20), possivelmente pela composição mineral das terras. De acordo com Rao *et al.* (2020), além das bactérias produtoras de exopolissacarídeos (EPS) que promovem bioestabilização, também existem bactérias no EB que promovem biocimentação por precipitação de calcita induzida microbiologicamente (MICP). Portanto, pode haver nas terras tropicais ricas em caulinita, óxido e hidróxido de ferro, alguns sais, nutrientes e minerais naturalmente em sua composição, que são capazes de promover biomineralização a partir de outras vias metabólicas ainda não identificadas.

Na terceira seção de resultados, 4.4., foi avaliada a influência que diferentes modos de coletar e preparar o EB podem ter nos efeitos de bioestabilização causados em argamassas de terra para revestimento. Foi apresentada a influência: (i) de adicionar o excremento fresco ou seco depois de compostado; (ii) do tempo de compostagem (secagem) por 7 e 30 dias; (iii) de usar compostado e seco (teor de 10% de umidade) ou de usar o EB já seco no pasto em contato com o solo (teor de 10% de umidade);

(iv) da integridade física do excremento (íntegro ou moído passando na peneira 2,79 mm); e (v) da dieta dos bovinos (pasto ou ração e silagem). Foi ainda verificado (vi) o potencial de reutilização da argamassa de terra bioestabilizada com adição de EB. Além de (vii) tentar compreender a influência da integridade das fibras presentes naturalmente na composição do EB.

Na Tabela 21 apresenta-se a síntese qualitativa dos resultados obtidos na seção 4.4. Na primeira linha em amarelo (no tom mais forte) estão os resultados obtidos com a argamassa de referência (identificadas com o sufixo REF) produzida com a terra CAP e com a adição de areia usando o traço volumétrico 1:1,5 (terra:areia), aquela que conteve o fissuramento no reboco conforme o teste preliminar de retração realizado. Nas linhas seguintes abaixo estão apresentados a variação percentual causada pela adição das diferentes amostras de EB, em relação a argamassa de referência.

Tabela 21. Síntese dos resultados da seção 4.4.

Efeitos da adição de 20% e 40% de EB - diferentes processamentos - argamassas com a terra							
Terra e adição de areia (terra:areia)	Retração (%)	Densid. (g/cm ³)	Rc (MPa)	Rf (MPa)	Aderência (MPa)		Durabilidade por imersão
					Adobe	Tij. Cer.	
CAP(1:1,5) REF	1,56	1,69	1,25	0,53	0,13	0,06	2 minutos
Adições (vol.)	Variação em relação a CAP(1:1,5)REF						Durabilidade
20EB fp	-27%	-14%	0%	13%	40%	96%	7 dias
20EB fp7	-24%	-13%	-4%	8%	25%	67%	< 7 dias
20EB fp30	-20%	-12%	-10%	-2%	9%	24%	< 7 dias
20EB fra7	-20%	-11%	-8%	-4%	17%	42%	< 7 dias
20EB fp7 (Reciclo)	-17%	-8%	-15%	-23%	-6%	-11%	< 7 dias
40EB fra7	-39%	-23%	-21%	-17%	-6%	7%	14 dias
40EB fp7	-48%	-25%	-18%	-6%	-6%	-11%	14 dias
40EB fp30	-49%	-24%	-24%	-19%	-14%	-11%	14 dias
20EB fp30pó	-35%	-17%	-28%	-25%	-14%	-11%	< 14 dias
20EB sppó	-36%	-18%	-28%	-25%	-22%	-29%	< 14 dias

Depois de avaliar os resultados, concluiu-se que, considerando o desvio padrão, não há diferença expressiva entre usar o EB de diferentes maneiras, mas há diferença evidente entre usar diferentes proporções desta adição. No entanto, a partir dos valores médios obtidos, a utilização do excremento fresco (EBfp) proporciona maior aumento no desempenho mecânico, aderência e durabilidade em contato com água. A segunda melhor maneira de usar o excremento é após ser compostado por 7 dias (EBfp7), seguido pelo excremento compostado por 30 dias (EBfp30). No entanto, como o armazenamento do excremento compostado é mais prático, e o processo de

compostagem por ao menos 7 dias é importante para garantir a eliminação de patógenos e outros possíveis contaminantes (como ovos de mosca e sementes) recomenda-se que se use o EBfp7 (compostado por 7 dias) pois este causou melhoria no desempenho das argamassas em todos os ensaios, e proporcionou resultados superiores aos limites mínimos das normas aplicáveis.

A dieta dos bovinos parece fazer pouca diferença em relação aos efeitos causados nas argamassas de terra. Apesar da maior disponibilidade de carboidratos (fonte de carbono) oferecida pela dieta de ração de grãos (Zhang *et al.* 2021), a menor presença de fibras longas, ricas em celulose, hemicelulose e lignina (que é obtida com dieta a base de pasto), pode ter prejudicado a resistência mecânica registrada pela adição do excremento de bovinos alimentados com ração e silagem compostado por 7 dias (EBfra7). Apesar disso, a argamassa com adição de 40% de EBfra7 (CAP(1:1,5)+40EBfra7) apresentou excelente durabilidade no teste de imersão em água após 30 minutos e também até 7 dias.

As fibras parecem estar diretamente relacionadas com a redução da retração e o aumento da resistência mecânica. Além disso, parece haver um ponto ótimo entre a presença de fibras e a atividade microbiana, pois com 10% e 20% de adição de EBfp7, as argamassas produzidas com a terra CAP não resistem íntegras à 20 minutos de imersão; mas com 40% de adição de EBfp7, a durabilidade em contato com água é muito elevada. Embora as fibras possam ser um caminho para entrada de água, por capilaridade, no caso da adição de EB, em que microfibras surgem agregadas com microrganismos e secreções bacterianas, estas podem desempenhar um papel muito favorável: a criação de uma rede estrutural, possivelmente, biocimentada por EPS produzido pela ação microbiana, que mantém a integridade da argamassa quando imersa em água ou quando em contato com água de maneira geral.

Coletar o excremento fresco e deixá-lo secar (compostagem) em recipiente plástico impermeável antes do uso, oferece melhores efeitos à argamassa de terra do que usar o excremento coletado já seco no pasto, após secagem ao sol e em contato com o solo (EBsppó). Isto ocorre possivelmente pela degradação das fibras vegetais presentes no excremento que, como foi demonstrado, contribuem para o aumento da resistência mecânica da argamassa através da consolidação de uma matriz estrutural interna biocimentada. Reforçando o argumento, a elevada adição de 20% de EBsppó (excremento coletado seco no pasto e moído), que equivale à adição de 40% de

excremento íntegro (sem ser moído), também foi capaz de manter intacta a forma cúbica dos corpos de prova até o final do ensaio de imersão em água por 30 minutos e por até 7 dias. Isso indica que a presença da atividade bacteriana e a promoção de bioestabilização e biocimentação é mantida mesmo após a secagem do excremento no pasto. Portanto, se mesmo com atividade microbiana esta adição causou redução da resistência mecânica na argamassa (em comparação a EBfp30), tem-se aqui mais um indício da contribuição das fibras no aumento da resistência mecânica, pois quando é adicionado um EB com menos disposição de fibras íntegras e “novas/frescas” (EBsppó e EBfp30pó), registra-se a redução da resistência mecânica. O mesmo se observa com as diferenças nos efeitos causados entre as adições de EBfp, EBfp7 e EBfp30, nas proporções de 20% e 40%.

Neste sentido, possivelmente uma baixa adição extra de fibras poderia compensar/repor as fibras que foram degradadas pela ação microbiológica e aumentar a resistência mecânica. No entanto, deve haver uma proporção específica para que se mantenha o equilíbrio ótimo, uma vez que adições maiores do que 10% de EB (rico em fibras) também reduzem a resistência mecânica.

Por fim, a adição de EB nas argamassas de terra mostra-se mais uma vez um método de bioestabilização vantajoso, pois permite a reutilização da argamassa apenas pela sua trituração e adição de água para amassadura novamente. A argamassa CAP(1:1,5)+20 EBfp7 foi reciclada e apresentou resultados superiores à argamassa de referência (CAP-REF) e semelhantes (embora pouco inferiores) à mesma argamassa sem ser reciclada CAP(1:1,5)+20EBfp7. Apesar de não ter sido avaliado, a resistência mecânica e de aderência da argamassa reciclada possa ser potencializada com a adição extra de 10% de EBfp7 durante a amassadura ou ainda com uma baixa adição (1-2%) de fibras vegetais trituradas/moídas com o mesmo comprimento máximo de 2 cm do EBfp7. De qualquer modo, os resultados obtidos com a argamassa reciclada são muito promissores.

Na quarta seção de resultados, 4.5., foi avaliada a influência nos efeitos causados pelo processo de fermentação em cura úmida por 72 horas das argamassas de terra com a adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7. Além disso, também foram comparados os resultados com os efeitos causados pela adição de 10% de fibras vegetais (escalracho do pasto) e de 10% de cal aérea hidratada.

Na Tabela 22 apresenta-se a síntese qualitativa dos resultados obtidos na seção 4.5. A lógica para organização da tabela foi a mesma utilizada na tabela anterior (Tabela 21).

Tabela 22. Síntese dos resultados da seção 4.5.

Efeitos da adição de 5%, 10% e 20% de EBfp7, fermentação (AF), 10% de Fibras e 10% de Cal - Terra CAP											
Terra e adição de areia	Retração (%)	Densid. (g/cm³)	Rc (MPa)	Rf (MPa)	Aderência (MPa)		Condut. Térm.	Adsorção	Geelong		Durabilidade por imersão
					Adobe	Tij. Cer.			(g)	Erosão	
CAP(1:1,5) REF	1,56	1,69	1,25	0,53	0,13	0,06	0,7592	105,41	6,6	Muito	2 minutos
Adições (vol.)	Variação em relação a CAP(1:1,5)REF									Erosão	Durabilidade
5EBfp7	-5%	-5%	8%	9%	17%	42%	-16%	1%	-38%	Pouco	5 minutos
10EBfp7	-14%	-9%	15%	34%	45%	139%	-21%	3%	-55%	Pouco	10 minutos
20EBfp7	-24%	-13%	-4%	8%	25%	67%	-36%	4%	-59%	Pouco	< 7 dias
5EBfp7 (AF)	-1%	-2%	-7%	-6%	25%	60%	-18%	3%	-49%	Pouco	30 minutos
10EBfp7 (AF)	-10%	-5%	5%	23%	56%	149%	-25%	4%	-62%	Pouco	< 7 dias
20EBfp7 (AF)	-20%	-8%	-13%	4%	33%	78%	-44%	6%	-67%	Pouco	< 14 dias
10Fibras	-80%	-8%	-57%	-17%	1%	7%	-17%	5%	-73%	Pouco	< 14 dias
10Cal	25%	-11%	-62%	-49%	1%	7%	-26%	-27%	-88%	Não	30 minutos

Os resultados evidenciaram que, embora as adições de 5% e de 10% de EBfp7 também aumentem estas propriedades, a adição de 10% é a mais eficiente para aumentar a resistência à flexão, à compressão, e à aderência das argamassas de terra em alvenarias de adobe e tijolo cerâmico. A fermentação das argamassas com adição de EB aumenta a aderência dos revestimentos, mas reduz ligeiramente a resistência mecânica, provavelmente devido à degradação das fibras pela ação bacteriana. Apesar disso, as argamassas fermentadas e mesmo a argamassa com adição de 40% EBfp7 ainda apresentam resistências acima dos limites mínimos determinados na norma alemã DIN 18947 (2024) para rebocos de terra.

A adição de 10% de Fibras reduziu bastante a resistência à compressão, mas de maneira bem menos expressiva a resistência à flexão, e não alterou a aderência da argamassa em comparação a CAP-REF(1:1,5). Já a adição de 10% de Cal reduziu bastante a resistência mecânica, mas também não alterou a aderência da argamassa comparada a CAP-REF(1:1,5). As duas adições, Cal e Fibras, resultaram em resistências à compressão inferiores ao limite da norma alemã e apenas a adição de Fibras apresentou resistência à flexão superior ao limite mínimo da norma.

Já em relação aos ensaios para avaliar a resistência à água, as maiores proporções de adição de EB apresentam mais vantagem. No ensaio de imersão em água a proporção de 40% apresenta a maior durabilidade, mantendo a forma cúbica dos

corpos de prova das argamassas até aos 14 dias de imersão. A durabilidade das argamassas reduziu proporcionalmente à redução da proporção da adição de EB. No entanto, a fermentação das argamassas com proporção de 5%, 10% e 20% garantiram aumento significativo da durabilidade, com destaque para a adição de 20% de EBfp7, que permitiu que a argamassa se mantivesse íntegra até 7 dias de imersão em água.

A adição de 10% de Fibras conferiu excelente durabilidade à argamassa imersa em água, superior às adições de 10% e 20% de EBfp7 (sem fermentação), mas inferior à adição de 40% de EBfp7. Já a baixa adição de 10% de Cal aumentou a durabilidade da argamassa em relação à CAP-REF, que se desfez em 5 minutos de imersão, mas não resistiu íntegra aos 30 minutos de ensaio. Após o ensaio de 30 minutos, observou-se que o corpo de prova da argamassa com adição de cal estava frágil e macio ao toque. Além disso, depois do ensaio, após secar por 7 dias, estes corpos de prova apresentavam-se quebradiços (pouco resistentes) ao esmagamento manual.

No ensaio de erosão por gotejamento, apenas a argamassa CAP-REF(1:1,5) foi erodida a ponto de gerar uma cavidade e expor a alvenaria (tijolo cerâmico). À medida que se aumentou a adição de EB, as argamassas ficaram cada vez mais resistentes e menos erodidas. Mas mesmo a adição de 5% de EBfp7 já conferiu ótimo desempenho e aumento da resistência à erosão por gotejamento, sendo a argamassa classificada pela norma neozelandesa, como pouco ou não erosível. Sutilmente, a proporção de 20% apresentou aspecto mais intocado, tal como as argamassas com adição de 10% de Fibra vegetal e 10% de Cal, que se mantiveram completamente intactas após o ensaio de erosão por gotejamento. Por fim, fermentar as argamassas fez com que a proporção de 5%, 10% e 20% melhorassem ainda mais a resistência ao gotejamento.

Após o ensaio de erosão por gotejamento notou-se que, quando as argamassas secaram, aquelas com adição de 10% de Fibra vegetal e 10% Cal, visualmente nem sequer pareciam que foram ensaiadas. Já as adições de EB, após secarem, manifestaram uma mancha com a cor no tom entre marrom e verde musgo. No entanto, quando voltam a secar, apresentaram-se tão rígidas e resistentes à abrasão manual quanto antes. De acordo com a literatura antes citada (Teixeira, 1996) sobre composição bioquímica do EB, existem substâncias responsáveis pela coloração do excremento. A bilirrubina e a biliverdina são substâncias solúveis em água, de cor amarela-esverdeada, produzida no fígado de humanos e de bovinos, que são

eliminadas nas fezes (maior parte) e na urina (menos). O molitinogênio, fruto da conversão microbiana dessas duas substâncias pigmentares, é responsável pela coloração marrom das fezes, que juntamente com a biliverdina e a bilirrubina, são os responsáveis pela coloração marrom - verde musgo do EB. Como a bilirrubina é solúvel em água, quando há contato com água de chuva ou ensaio de gotejamento, ela se espalha provocando a mancha observada. No entanto, isto não é motivo de preocupação técnica em relação a resistência e durabilidade e nem de preocupação biológica, pois estas substâncias são apenas pigmentos naturais, e pode ser perfeitamente evitado com a aplicação de uma pintura à base de cal e terra para evitar o contato da água direto com o reboco. No entanto, não foi avaliado se a cobertura desses revestimentos com a tinta à base de cal e terra prejudicam a higroscopicidade dos rebocos com adição de EB.

A argamassa de referência CAP-REF(1:1,5) se mostrou bastante higroscópica, superando os “limites máximos” da norma DIN 18947 (2024). A adição de excremento causou aumento da massa de vapor de água adsorvida, proporcionalmente ao aumento da adição. Este fato é bastante positivo pois demonstra que, além de aumentar a resistência das argamassas em contato com a água (à imersão e à erosão por gotejamento), a adição de EB não prejudicou a higroscopicidade do revestimento. A adição de 10% de Fibras vegetais também aumentou a higroscopicidade tanto quanto a adição de 20% de EBfp7. Já a adição de 10% de Cal reduziu a adsorção de vapor de água de maneira bastante expressiva (30%).

Geralmente a adição de cal é desejada por aumentar a resistência em contato com a água, apesar de que com a adição de 10% na terra CAP isto não ocorreu. No entanto, a adição de cal prejudica a higroscopicidade das argamassas de terra. Os resultados da presente pesquisa evidenciam que, na mesma proporção volumétrica (10%), a adição de EB em relação à adição de cal é mais vantajosa inclusive neste aspecto. A adição de cal em maiores proporções (acima de 20%) pode oferecer resultados melhores, mas demanda maior produção e consequentemente impactos ambientais.

Em relação à condutibilidade térmica, as argamassas se tornaram mais isolantes proporcionalmente ao aumento da adição de excremento. Neste ensaio, a fermentação das argamassas não alterou os resultados das argamassas análogas. Assim como a condutibilidade térmica, a densidade no estado endurecido das argamassas acompanhou a mesma tendência e também reduziu à medida que

aumentou a adição de excremento. A adição de 10% de Fibras também tornou as argamassas mais isolantes termicamente, tal como a adição de 10% de EBfp7. E por fim, embora a adição de 10% de Cal tenha causado diversos prejuízos, exceto na aderência onde não alterou o desempenho de CAP-REF(1:1,5), a argamassa CAP-REF(1:1,5)+10Cal foi a que apresentou a menor condutibilidade térmica. No entanto, devido à espessura relativamente pequena dos revestimentos de parede, o impacto das diferenças obtidas em termos de condutibilidade térmica é pouco relevante. Já a maior higroscopicidade do revestimento pode ter impacto relevante nos espaços interiores dos edifícios. A adsorção e liberação de umidade também impactam o desempenho e conforto térmico global da parede e do ambiente interior dos edifícios, uma vez que temperatura e umidade relativa estão diretamente relacionadas entre si. A adsorção de umidade leva à geração de calor latente (que pode aumentar a temperatura interna dos ambientes) e a liberação de umidade das paredes e revestimentos de terra levam ao resfriamento, diminuindo assim a temperatura interior. Portanto, os materiais a base de terra argilosa com adições que não comprometem a higroscopicidade e a inércia térmica (como o EB), proporcionam uma temperatura interior mais confortável e equilibrada em todas as estações do ano, além de contribuírem para reduzir a necessidade de condicionamento artificial de umidade e temperatura para aquecer, resfriar ou umidificar os ambientes.

Depois de todos os ensaios realizados e de todos os resultados avaliados e discutidos, os efeitos positivos nas argamassas de terra e as vantagens ecológicas do uso do EB são impressionantes e inegáveis. Por isto, se faz bastante importante a realização de estudos como este, tanto para validar uma solução tradicional da arquitetura vernácula brasileira, como para otimizar os efeitos causados por esta adição natural microbiológica que é capaz de promover bioestabilização física e química nas argamassas de terra.

Portanto, para incentivar pesquisas brasileiras sobre avaliação de argamassas de terra e difundir sua utilização no Brasil, reitera-se aqui também, a importância da elaboração de uma norma técnica brasileira específica para classificação e avaliação das propriedades físicas e mecânicas de argamassas de terra, inspirada na norma DIN 18947, inclusive marcada pelo estímulo ao uso e desenvolvimento de adições naturais e bioprodutos.

5. CONCLUSÕES

5.1. Considerações finais

Considerando os resultados da presente pesquisa, e reforçados pela literatura e práticas tradicionais africanas, brasileiras e asiáticas da arquitetura vernácula, a adição de EB confere às argamassas de terra importantes benefícios como: aumento da trabalhabilidade, da resistência mecânica, da aderência à parede (pelo menos em alvenarias de adobe e tijolos cerâmicos), da durabilidade em contato com água e redução da retração e da condutibilidade térmica. Também não foram observados aspectos negativos relacionados com odor, alergia ou toxicidade, o que torna este material uma poderosa adição ecoeficiente para argamassas de terra. Além disso, conforme os resultados apresentados pela argamassa reciclada, a adição não impede que a argamassa e os produtos com ela produzidos possam ser facilmente reutilizados ou descartados ao final do ciclo de vida sem preocupações, tendo inclusive todos os resíduos da pesquisa sido usados para adubar o jardim atrás do laboratório.

Além de serem muito ecoeficientes quando aplicadas para reboco, as argamassas com adição de EB também o podem ser para outras aplicações, tais como para a produção de adobe, para assentar e rejuntar alvenarias de adobe, outros blocos de terra e pedra, para preenchimento de pau a pique e revestimento de tetos.

As descobertas da presente pesquisa sobre a diferença dos efeitos causados pela adição de EB em diferentes formas de processamento também são importantes para embasar formulações de argamassas por construtores que já utilizam a adição deste material na construção com terra, e aqueles que pretendem começar a utilizá-lo ou começar a pesquisar sobre ele. Além disso, a possibilidade de reutilização da argamassa de terra com EB, configura esse material como importante aliado para o desenvolvimento de bioprodutos e para práticas de construção muito sustentáveis ambientalmente.

Apesar dos benefícios da adição de EB serem evidentes, pode não haver uma proporção ideal e genérica para sua adição em argamassas de terra, tanto pela enorme variabilidade de composição mineralógica e granulométrica dos solos e das terras deles extraídas, como pelo fato da proporção mais adequada depender da aplicação prevista para a argamassa e dos requisitos específicos. Por exemplo, para uma argamassa de terra para revestimento de uma parede externa, a adição de 20%

pode ser mais apropriada do que 10%, pois resiste melhor ao contato com a água proveniente da chuva. No entanto, a utilização desse reboco deve ser conjugada com os benefícios de um generoso beiral no telhado e/ou um acabamento com pintura à base de cal (caiação), para aumentar a durabilidade à chuva. A proporção de 20% também é a melhor escolha quando se considera argamassas de terra para rejuntar paredes de alvenaria de pedra ou outros blocos de terra sem revestimento. Por outro lado, para revestir superfícies interiores de paredes, mais expostas a impactos mecânicos e menos à água, a proporção de 10% pode ser mais adequada, embora a proporção de 20% também atenda perfeitamente. Em casos de aplicação em que o isolamento térmico e a resistência à água forem prioridade e não há risco exagerado de impacto físico, a proporção de 40% é mais indicada. No entanto, para uma camada única e de múltipla aplicação, a argamassa fermentada com adição volumétrica de 20% de EB é a mais eficiente.

O fato da argamassa de terra com adição de EB ser mais isolante termicamente e proporcionar aumento da higroscopicidade do revestimento (e de outros produtos com ela produzidos), é um efeito importante devido a economia que pode gerar de recursos energéticos e financeiros para ambientes que necessitam de condicionamento artificial do ar e, mais importante ainda, por ser uma solução natural e acessível para gerar mais conforto nas edificações e moradias em comunidades tradicionais.

Desde a dissertação de mestrado do autor em 2020, ainda não foram encontradas outras publicações em periódicos científicos sobre as propriedades físicas e mecânicas de argamassas de terra brasileiras, sendo este trabalho ainda bastante inovador no Brasil. Portanto, esta pesquisa também deixa um convite para que novas investigações sejam realizadas e para que, em mutualismo, cooperação e parceria, possam-se somar esforços para a melhor compreensão e difusão da terra como material construtivo no país. Além disso, com esta pesquisa também pretendeu-se incentivar a investigação por outras adições naturais capazes de contribuir com a conscientização socioambiental e a redução do consumo de materiais de construção industrializados, cujo processo produtivo são bastante poluentes e vão acabar por comprometer as condições ambientais agradáveis e favoráveis para a sobrevivência humana neste planeta e o convívio harmônico com outras espécies.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Toda pesquisa pode ser interessante e importante para a sociedade, desde que contribua para o equilíbrio e a harmonia da vida no planeta e a aplicação da função social na ciência e na tecnologia. Uma vez que ainda há muito a pesquisar, a seguir estão algumas recomendações e sugestões para trabalhos futuros:

- Continuar a caracterizar argamassas de terras distintas (inclusive com “terras artificiais” variando o teor de argila, areia e silte), sem e com adições de EB e outras adições naturais, para criar uma base de dados que contribua para melhor informar os profissionais das vantagens destas argamassas (e tentar compreender a influência da granulometria nos efeitos causados pelas adições);
- Lembrar de sempre informar a caracterização do EB (ou do material natural), ao menos no dia em que foi utilizado na produção das argamassas: origem, processamento, teor de humidade e densidade, além de usar preferencialmente a unidade de medida em volume para facilitar a reprodução dos resultados em campo sem necessidade de equipamentos específicos como balança;
- Avaliar os efeitos da adição de fibras (íntegras e moídas) junto com o EB para verificar se isso pode compensar a perda de resistência mecânica ocorrida com a fermentação e degradação das fibras presentes naturalmente no EB pela ação microbiana;
- Avaliar o quanto a pintura com cal afeta a higroscopicidade do revestimento de terra com adição de EB e com adição de fibras vegetais;
- Determinar a CTC das amostras de terra com e sem adição de EB e também do próprio excremento, pois esta análise pode contribuir na compreensão da influência da composição das terras nos efeitos causados, complementadas pela caracterização granulométrica e mineralógica com DRX;
- Avaliar outras adições combinadas com EB com e sem fermentação da argamassa fresca e com e sem cura úmida no caso da produção de adobe;
- A sugestão final é que se pesquise mais adições naturais e se reflita sobre as relações entre humanos e outros seres, principalmente sobre as consequências ambientais envolvidas na saciação dos desejos humanos. Isto poderá levar a humanidade a novas descobertas inimagináveis anteriormente.



REFERENCIAS

- ABO-STATE, M.A.; MAHDY, H.M.; EZZAT, S.M.; ABD EL SHAKOUR, E.H.; EL-BAHNASAWY, M.A. Antimicrobial resistance profiles of *Enterobacteriaceae* isolated from Rosetta Branch of River Nile, Egypt. **World Applied Science Journal**. v.19. p.1234–1243. 2012.
- ACHAL, V.; MUKHERJEE, A.; KUMARI, D.; ZHANG, Q. Biomineralization for sustainable construction – A review of processes and applications, **Earth-Science Reviews**, v. 148, p. 1-17, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.05.008>. 2015.
- ALUMA, B. **Determining the thermal conductivity of earth plaster samples with mortar mixes suitable for African architecture**. M.S. - Master of Science, Middle East Technical University, 2023.
- ALY, M.; BALKHY, H.H. The Prevalence of Antimicrobial Resistance in Clinical Isolates from Gulf Corporation Council Countries. **Antimicrobial Resistance and Infection Control**, 1, 26. <https://doi.org/10.1186/2047-2994-1-26>. 2012.
- ANANNO A.A.; MASUD M.H.; MAHJABEEN M.; DABNICHKI P. Multi-utilization of cow dung as biomass. In: Inamuddin, Khan A, editors. Sustainable bioconversion of waste to value added products. **Advances in science, technology & innovation** (IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development). Cham: Springer; 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61837-7_13. 2021.
- ANTUNES, A.; FARIA, P.; SILVA, V.; BRÁS, A. Rice husk-earth based composites: A novel bio-based panel for buildings refurbishment. **Construction and Building Materials**, v.221, p.99-108. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.074>. 2019.
- ANTUNES, V.N.B.; SILVA, M.S. Danos ambientais e subsidência de mineração: lições extraídas de uma revisão sistemática da literatura. Confins, **Revista Franco-brasileira de Geografia**. n. 64, 2024 <https://doi.org/10.4000/12f3d>. 2024.
- ARCURI, P.B.; LOPES, F.C.F.; CARNEIRO, J.C. Microbiologia do rúmen. In: Berchielli, T. T.; Pires, A. V.; Oliveira, S. G. **Nutrição de Ruminantes**, Jaboticabal: Funep, p. 111-116. 2006.
- ASHOUR, T.; WIELAND, H.; GEORG, H.; BOCKISCH, F-J.; WU, W. The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings. **Materials & Design**. v.31. p.4676-4685. doi: 10.1016/j.matdes.2010.05.026. 2010.
- ASHURST, J.; ASHURST, N. **Practical building conservation: brick, terracotta and earth**. v. 2. Aldershot: Gower. 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**. Solo: Determinação do limite de liquidez. ABNT. Rio de Janeiro. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**. Solo: Determinação do limite de plasticidade. ABNT. Rio de Janeiro. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**. Solo: Análise granulométrica. ABNT. Rio de Janeiro. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8492**. Tijolo de solo-cimento - Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio. ABNT. Rio de Janeiro. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**. Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Preparo da Mistura e determinação do índice de consistência. ABNT. Rio de Janeiro. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**. Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. ABNT. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**. Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da resistência a tração na flexão e a compressão axial. ABNT. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280**. Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. ABNT. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**. Argamassas inorgânicas: Requisitos e métodos de ensaios. Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos. ABNT. Rio de Janeiro. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15258**. Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da resistência potencial de aderência à tração. ABNT. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16814**. Adobe: requisitos e métodos de ensaio. ABNT. Rio de Janeiro. 2020.

AVILA, E.; GUERRERO, L. **El mucílago de Opuntia Ficus como estabilizante en recubrimientos de tierra**. 18º Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra. La Antigua Guatemala, Guatemala: USAC-CII/PROTERRA, pp. 115-126. 2018.

AZZOUZI, D.; RABAHI, W.; SEDDIRI, F.; HEMIS, M. Experimental study of the fibers content effect on the heat insulation capacity of new vegetable composite plaster-pea pod fibers, **Sustainable Materials and Technologies**, v. 23, e00144. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00144>. 2020.

BAMOGO, H.; OUEDRAOGO, M.; SANOU, I.; JÉRÉMY KOUKA, A.; KALIFALA DAO, O.; AUBERT, J-E.; MILLOGO, Y. Improvement of water resistance and thermal comfort of earth renders by cow dung: an ancestral practice of Burkina Faso. **Journal of Cultural Heritage**, v. 46, p. 42-51. 2020.

BARONA, E.; RAMANKUTTY, N.; HYMAN, G.; COOMES, O. T.; The role of pasture and soybean in deforestation of the Brazilian Amazon. **Environmental Research Letters**. v., 5, 024002. doi: 10.1088/1748-9326/5/2/024002. 2010

BASAK A.B.; LEE M.W.; LEE T.S. In vitro inhibitory activity of cow urine and dung to fusarium solani f. sp. cucurbitae. **Mycobiology**. 30:51e4. 2002.

BECKETT, C.; BRAS, A.; FABBRI, A.; KEITA, E.; PERLOT, C.; PERROT, A. (Eds.) Second RILEM International Conference on Earthen Construction. ICEC 2024; RILEM Bookseries; Springer: Cham, Switzerland. Volume 52. 2024.

BERCHIELLI, T.T.; PIRES, A.V.; OLIVEIRA, S.G. **Nutrição de Ruminantes**, Jaboticabal: Funep, p. 111-116. 2006.

BERNARDI, D.; DEJONG, J.; MONTOYA, B.; MARTINEZ, B. Bio-bricks: Biologically cemented sandstone bricks. **Construction and Building Materials**. v.55, pp. 462-469, 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.019. 2014.

BERWANGER, A.N.S. **Produção e Caracterização de biopolímero sintetizado por *Sphingomonas capsulata***. Tese de Mestrado em Engenharia de Alimentos. Universidade Regional Integrada do Alto do Uruguai e das Missões, URI – Campus de Erichim, RS. 2005.

BIN MANSOOR, A.; YOUSAF, S.; GULZAR, A.; IQBAL, R.; QURASHI, A.W. A Review on Role of Bacillus Species in Bio-Calification: A Way Forward in Carbonate Precipitation, **Journal of Bioresource Management**, 11 (1). 2024.

BJÖRKMAN, B.; SAMUELSSON, C. **Recycling of Steel**. In: Handbook of Recycling. Illustrated ed. Elsevier. p. 65–83. 2014.

BRAND, U.; BLAMEY, N.; GARBELLI, C.; GRIESSHABER, E.; POSENATO, R.; ANGIOLINI, L.; AZMY, K.; FARABEGOLI, E.; CAME, R. Methane Hydrate: Killer cause of Earth's greatest mass extinction. **Palaeoworld**, v. 25, n. 4, p. 496-507. 2016.

BRAZ, S.P.; NASCIMENTO JUNIOR, D.; CANTARUTTI, R.B.; MARTINS, C.E.; FONSECA, D.M.; BARBOSA, R.A. Caracterização da Distribuição espacial das Fezes por Bovinos em uma Pastagem de *Brachiaria decumbens*. **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 787-794. 2003.

BRZYSKI, P. Influence of gum arabic admixture on selected properties of clay mortar, **Construction and Building Materials**, v. 451. P. 138865. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138865>. 2024.

BASIN - BUILDING ADVISORY SERVICE SIN AND INFORMATION NETWORK. **Mud plasters and renders**. Practical Action. Original text - Appropriate Technology Magazine, v. 26 (1). 2002.

CASCIONE, V.; MASKELL, D.; SHEA, A.; WALKER, P. A review of moisture buffering capacity: From laboratory testing to full-scale measurement. **Construction and Building Materials**, v.200, p.333–343. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.094>. 2019

CASTANIER, S.; MÉTAYER-LEVREL, G.L., Jean-Pierre PERTHUISOT, Ca-carbonates precipitation and limestone genesis — the microbiogeologist point of view, *Sedimentary Geology*, v. 126, i. 1–4, p. 9-23. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(99\)00028-7](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(99)00028-7). 1999.

CASTAGNARA, D.D.; KRUTZMANN, A.; ZOZ, T.; STEINER, F.; CASTRO, A.C. M.; NERES, M.A.; OLIVEIRA, P.S.R. Effect of boron and zinc fertilization on White oats grown in soil with average content of these nutrients. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.41(7). p.1598 – 1607. 2012.

CASTRO, A.C.M.; MARAVILHA, L.F.; TITON, M.; PINHEIRO, A.C.; FARNEZI, M.M. M.; PEREIRA, I.M.; OLIVEIRA, M.L.R. Recipientes e substratos na produção de mudas de *Melanoxylon brauna* Schott. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.11, p.11-19. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.011.0002>. 2021.

CERVANTES, A.C.; GUERRERO, L. **Experiencias de bioconstrucción: conceptos generales y visiones desde México**. Bonilla Distribución y Edición S.A. de C.V., 1ed. 336 pag. 2021.

CHABBI-CHEMROUK, N. **Conservation of Djenné**. Technical report. Ref. 363, MLI. Aga Khan Trust for Culture, Djenné. 2007.

CHANG, I.; CHO, G.-C. Strengthening of Korean residual soil with b-1,3/1,6-glucan biopolymer. **Construction and Building Materials**. v.30, p. 30–35. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.030. 2012.

CHANG, I.; IM, J.; PRASIDHI, A.K.; CHO, G.-C. Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening. **Construction and Building Materials**. v.74, p. 65–72. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.10.026. 2015.

CHAUHAN R.S.; SINGHAL, L. Harmful effects of pesticides and their control through cowpathy. **International Journal of Cow Science**. v.2. p.61-70. 2006.

CHAUHAN, R.S. Panchgavya therapy (Cowpathy): current status and future directions. **The Indian Cow: The Scientific and Economic Journal**. v.1. p. 3-7. 2004.

CHENU, C. **Extracellular polysaccharides: an interface between microorganisms and soil constituents**, In *Environmental Impact of Soil Component Interactions. Natural and Anthropogenic Organics*, eds P. M. Huang, J. Berthelin, J. M. Bollag, W. B. McGill, and A. L. Page (Boca Raton, FL: CRC Lewis Publishers). 1995.

CHUO, S.C.; MOHAMED, S.F.; MOHD SETAPAR, S.H.; AHMAD, A.; JAWAID, M.; WANI, W.A.; YAQOOB, A.A.; MOHAMAD IBRAHIM, M.N. Insights into the Current Trends in the Utilization of Bacteria for Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation. **Materials**, 13, 4993. <https://doi.org/10.3390/ma13214993>. 2020.

CONSELHO EUROPEU. REGULAMENTO n.º **1774/2002** do Parlamento Europeu e do Conselho de 3 de Outubro de 2002 que estabelece regras sanitárias relativas aos subprodutos animais não destinados ao consumo humano. 2002.

COSTA, O.Y.A.; RAAIJMAKERS, J. M.; KURAMAE, E.E. Microbial Extracellular Polymeric Substances: Ecological Function and Impact on Soil Aggregation. **Frontiers in Microbiology**, v. 9:1 p. 16-36. doi: 10.3389/fmicb.2018.01636. 2018.

CUNHA, M.V.H. **Novo material a partir da composição dos resíduos da fabricação de revestimento cerâmico e da produção da cal**. Curitiba. 54 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Universidade Federal do Paraná, Brasil. 2015.

DE NONI, I.; CATTANEO, S. Occurrence of β -casomorphins 5 and 7 in commercial dairy products and in their digests following *in vitro* simulated gastro-intestinal digestion. **Food Chemistry**, 119, 560–566. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.06.058>. 2010.

DAUD, N.S.; DIN, A.R.J.M.; ROSLI, M.S.; AZZAM, Z.M.; OTHMAN, N.Z.; SARMIDI, M.R. *Paenibacillus polymyxa* bioactive compounds for agricultural and biotechnological applications. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 18. p. 1-7. 2019.

DHAMA, K.; RATHORE, R.; CHAUHAN, R.S.; TOMAR, S. Panchgavya (cowpathy): an overview. **International Journal of Cow Science**. v.1. p.1-15. 2005.

DHAMI, N.; MUKHERJEE, A. Can we benefit from the microbes present in rammed earth? **Rammed Earth Construction** – Ciancio & Becket (Eds.), Taylor & Francis Group, London, p.89-92. 10.13140/2.1.3968.0326. 2015.

DIAS, D.S.B. **Aplicação de substâncias poliméricas extracelulares (EPS) com viés biotecnológico**: Ênfase na produção por *Paenibacillus* / Diogo Simas Bernardes Dias [et al.]. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC. 56p.: il. (Série Tecnologia Ambiental, 107). 2019.

DIAS, P.S. **Tijolos de adobe com adição de bagaço de cana de açúcar**. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, GO, 58p. 2019.

DIRETRIZES PARA O PADRÃO DE QUALIDADE ORGÂNICO **IBD**. 28ª Edição Janeiro 2020. Disponível em: https://www.ibd.com.br/wp-content/uploads/2021/03/8_1_2_Diretriz_IBD_Organico_30aEd_04032021.pdf. Acesso em: 18 set. 2024.

DORFAN, Y.; MORRIS, Y.; SHOHAT, B.; KOLODKIN-GAL, I. Sustainable construction: Toward growing biocement with synthetic biology. **Research Directions: Biotechnology Design**, 1:e14. doi:10.1017/btd.2023.7. 2023.

European Committee for Standardization. **EN 1015**: Methods of test for mortars for masonry. CEN. Brussels. 1998.

European Committee for Standardization. **EN 1015-1**. Methods of test for mortars for masonry. Part 1: Determination of particle size distribution (by sieve analysis). CEN. Brussels. 1998.

European Committee for Standardization. **EN 1015-2**. Methods of test for mortars for masonry. Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars. CEN. Brussels. 1998.

European Committee for Standardization. **EN 1015-3**. Methods of test for mortar for masonry. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). CEN. Brussels. 1999.

European Committee for Standardization. **EN 1015-4**. Methods of test for mortar for masonry – Part 4: Determination of consistence of fresh mortar. CEN. Brussels. 1998.

European Committee for Standardization. **EN 1015-6**. Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar. CEN. Brussels. 1998.

European Committee for Standardization. **EN 1015-7**. Methods of test for mortar for masonry - Part 7: Determination of air content of fresh mortar. CEN. Brussels. 1998.

European Committee for Standardization. **EN 1015-8**. Methods of test for mortar for masonry – Part 8: Determination of water retentivity of fresh mortar. CEN. Brussels. 1999.

European Committee for Standardization. **EN 1015-12**. Methods of test for mortar for masonry. Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates. CEN. Brussels. 2000.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Circular Técnico 48: **Compostagem**. Rio de Janeiro. 2015.

EPAGRI. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural. Compostagem: Estratégias para transformar resíduos em fertilizantes. Santa Catarina. 2022.

FAHIMIZADEH, M.; DIANE ABEYRATNE, A.; MAE, L.S.; SINGH, R.K.R.; PASBAKHSH, P. Biological Self-Healing of Cement Paste and Mortar by Non-Ureolytic Bacteria Encapsulated in Alginate Hydrogel Capsules. **Materials**. v.13, 3711. <https://doi.org/10.3390/ma13173711>. 2020.

FARIA, P. **Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: contributo para o estudo da influência dos ligantes**. Tese de Doutorado. Universidade Nova de Lisboa, UNL. 2004.

FARIA, P.; SANTOS, T.; AUBERT, J-E. Experimental Characterization of an Earth Eco-Efficient Plastering Mortar. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 28, i.3. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.000136](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000136). 2016.

FARIA P. Argamassas de cal e terra: características e possibilidades de aplicação. **Ambiente Construído**. 18, 49-62. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000400292>. 2018.

FARIA, P. **Argamassas Sustentáveis**. In: Conferência Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono, 2ed. 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/9494>. Acesso em: 08 set. 2024.

FARINAS, C.S. A parede celular vegetal e as enzimas envolvidas na sua degradação. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária EMBRAPA**. Documento 54. ISSN. 1518-7179. 2011.

FATHY, H. **Architecture for the poor**: an experiment in rural Egypt. New ed. Egypt: University of Chicago Press. 2000.

FEARNSIDE, P.M. **Destruição e conservação da floresta amazônica**. INPA – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA, Brasil. ISBN 978-85-211-0193-2 356. 2022.

FERNANDES, J.; MATEUS, R.; BRAGANÇA, L.; PIMENTA, C. O Contributo dos Materiais Vernáculos para Sustentabilidade do Ambiente Construído. In: **Livro de Atas** do Seminário REVER. Contributos da arquitetura vernácula portuguesa para a sustentabilidade do ambiente construído. Porto, 28 de março de 2015. 2015.

FERREIRA, R. (org.). **Sob a Pata do Boi** – Como a Amazônia vira pasto. Rio de Janeiro: Associação O Eco. 2021.

FERREIRA, S.F.; GUIMARÃES, T.P.; MOREIRA, K.K.G.; ALVES, V.A.; LEMOS, B.J.M.; SOUZA, F.M. Caracterização Fecal de Bovinos. **Revista Científica Eletrônica de Medicina Veterinária**. Ano XI. n. 20. Janeiro de 2013 – Periódico Semestral. 2013.

FILIPPOV, L.O.; DUVERGER, A.; FILIPPOVA, I.V.; KASAINI, H.; THIRY, J. Selective flotation of silicates and Ca-bearing minerals: The role of non-ionic reagent on cationic flotation. **Minerals Engineering**, v.36, p. 314-323. 2012.

FLEMMING, H.C.; WINGERNDER, J. The biofilm matrix. **Nature Reviews Microbiology**. v. 8. p. 623-633. 2010.

FRANÇA, F.; SOLAR, R.; LEES, A.C.; MARTINS, L.P.; BERENGUER, E.; BARLOW, J. Reassessing the role of cattle and pasture in Brazil's deforestation: A response to "Fire, deforestation, and livestock: When the smoke clears". **Land Use Policy** v. 108. 105195. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105195>. 2021.

FREITAS, F.; ALVES, V.D.; REIS, M.A.M. Advances in bacterial exopolysaccharides from production to biotechnological applications. **Trends in Biotechnology**. v.28. p. 388-398. 2011.

GALVÃO JUNIOR. O Adobe e as Arquiteturas. IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, 2015. Disponível em: http://portal.iphan.gov.br/uploads/publicacao/Adobe_e_as_Arquiteturas.PDF. Acesso em: 23 ago. 2018.

GARCÍA-GONZÁLEZ, J.; PEREIRA, A.S.; LEMOS, P.C.; ALMEIDA, N.; SILVA, V.; CANDEIAS, V.; JUAN-VALDÉS, A.; FARIA, P. Effect of surface biotreatments on construction materials. **Construction and Building Materials**. v.241. a.118019, 10.1016/j.conbuildmat.2020.118019. 2020.

GARZON, B.S. De la construcción tradicional a la racionalización de componentes en caña y tierra-cemento *In: I SEMINARIO IBERO-AMERICANO DE CONSTRUÇÃO COM TERRA*. p. 23-28 Salvador, BA, 16-18 de setembro 2002.

GASHAW, A.; TESHITA, A. Co-digestion of Ethiopian food waste with cow-dung for Biogas production, **International Journal of Research**. p. 475–500. 2014.

GEETHA, M.; FULEKAR, M.H. Bioremediation of pesticides in surface soil treatment unit using microbial consortia. **African Journal of Environmental Science and Technology**; v.2. p. 36-45. 2008.

GHIDA, D.B.; Organic stabilization in earthen plaster: Eco-compatible architecture and ancient techniques in Tata Somba homes, **Frontiers of Architectural Research**. v. 13. i. 3. p. 625-638, <https://doi.org/10.1016/j.foar.2024.02.004>. 2024.

GIADA, G.; CAPONETTO, R.; NOCERA, F. Hygrothermal properties of raw earth materials: A literature review. **Sustainability**. 11 n.19, 5342. <https://doi.org/10.3390/su11195342>. 2019.

GIANNETTI, B.F.; BONILLA, S.H.; ALMEIDA, C.M.V.B. An energy-based evaluation of a reverse logistics network for steel recycling. **Journal of Cleaner Production**, v. 46, p. 48–57, 2013. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.024>. 2013.

GIROUDON, M.; LABOREL-PRÉNERON, A.; AUBERT, J.E.; MAGNIONT, C. Comparison of barley and lavender straws as bioaggregates in earth bricks. **Construction and Building Materials**, v. 202, p. 254–265. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.126>. 2019.

GOMES, M.I.; FARIA P.; GONÇALVES T.D. Earth-based mortars for repair and protection of rammed earth walls. Stabilization with mineral binders and fibers. **Journal of Cleaner Production** v.172: p.2401-2414. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.170>. 2018.

GUERRERO, L. "La cal y los sistemas constructivos". En Barba, L. y Villaseñor, I. (Eds.), *La cal, historia propiedades y usos*. México: IIA-UNAM / Anfagal, pp. 47-70. 2013.

GUPTA, K.K.; ANEJA, K.R.; RANA, D. Current status of cow dung as a bioresource for sustainable development. **Bioresources and Bioprocessing**. v. 3, n. 28. p.1-11. 2016. <https://doi.org/10.1186/s40643-016-0105-9>. 2016.

HAMARD, E.; MOREL, J. C.; SALGADO, F.; MARCOM, A.; MEUNIER, N.; A procedure to access the suitability of plaster to protect vernacular earthen architecture. **Journal of Cultural Heritage**, v.14, p. 109-115. 2013.

HAND, P., HAYES, W.A.; SATCHELL, J.E.; FRANKLAND, J.C. Vermicomposting of cow slurry. *In: Earthworms waste environ manage* by Clive A. Edwards; Edward F. Neuhauser. 1988.

HAMROUNI, I.; JALILI, H.; OUAHBI, T.; TAIBI, S.; JAMEI, M.; MABROUK, A. Thermal properties of a raw earth-flax fibers building material, *Construction and Building Materials*, v. 423, 135828, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135828>. 2024.

HARRISON, J.; ELLIOTT, D.C.; LIAO, W., *et al.* Value-added Chemicals from Animal Manure. **ResearchGate**. Pacific Northwest National Laboratory. 2004.

HEALE, F.L.; PAGE, K.; WIXEY, J.S.; TAYLOR, P.; PARKIN, I.P.; CARMALT, C.J. Inexpensive and non-toxic water repellent coatings comprising SiO₂ nanoparticles and long chain fatty acids. **RSC Advances Journal**. 8, 27064–27072. <https://doi.org/10.1039/C8RA04707C>. 2018.

HEINONEN-TANSKI, H.; MOHAIBES, M.; KARINEN, P.; KOIVUNEN, J. Methods to reduce pathogen microorganisms in manure. **Livestock Science**. v. 102, i. 3. p. 248-255. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2006.03.024>. 2006.

HENRY, M.; THERRIEN, T. **Essential Natural Plasters: A Guide to Materials, Recipes, and Use** New Society Publishers, New Westminster, CB. 2018.

HIENDLEDER, S.; LEWALSKI, H.; JENKE, A. Complete mitochondrial genomes of *Bos taurus* and *Bos indicus* provide new insights into intra-species variation, taxonomy and domestication. **Cytogenetic and Genome Research**. v.120. p.150-156. 2008.

HIJIOKA, A.; JOAQUIM, B.; INO, A. Aprendendo com os mestres japoneses o tsuchikabe: técnica de taipa japonesa no Brasil. In: **Tierra, sociedad, comunidad: 15º Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra**. Universidad de Cuenca, p. 561-571. 2015.

HIMATHONGKHAM, S.; BAHARI, S.; RIEMANN, H.; CLIVER, D. Survival of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella typhimurium* in cow manure and cow manure slurry. **Federation of European Microbiological Societies (FEMS)**. 1999.

HUTCHISON, M.L.; WALTERS, L.D.; MOORE, T.; THOMAS, D.J.; AVERY, S.M. Fate of pathogens present in livestock wastes spread onto fescue plots. **Applied Environmental Microbiology**. v.71, p. 691– 696. 2005.

INIGUEZ, A.L.; DONG, Y.; TRIPLETT, E.W. Nitrogen fixation in wheat provided by *Klebsiella pneumoniae* 342. **Molecular Plant–Microbial Interactions**. v.17, p.1078– 1085. 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA **IBGE**. Rebanho de bovinos (bois e vacas) 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/bovinos/br>. Acesso em: 08 out. 2024.

IVANOV, V.; CHU, J. Applications of Microorganisms to Geotechnical Engineering for Bioclogging and Biocementation of Soil in Situ. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v.7, p.139-153. <https://doi.org/10.1007/s11157-007-9126-3>. 2008.

IVANOV, V.; CHU, J.; STABNIKOV V.; HE, J.; NAEIMI, M. Iron-based bio-grout for soil improvement and land reclamation. Coventry University and The University of Wisconsin Milwaukee Centre for By products Utilization, Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies June 28 - June 30, 2010, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy. **Special Technical Proceedings**, ed. P Claisse, E Ganjian, F Canpolat and T Naik ISBN 9781450714884 <http://www.claisse.info/Proceedings.htm>. 2010.

IVANOV, V. STABNIKOV V. **Biotechnological production of biopolymers and admixtures for eco-efficient construction materials**. In: *Biopolymers and Biotech Admixtures for Ecoefficient Construction Materials* (F. Pacheco Torgal, Volodymyr Ivanov, J. A. Labrincha, Niranjana Karak, eds.). Woodhead Publishing Limited, Cambridge, p. 37-56. 2016.

JEYASANTA, K.I.; AIYAMPERUMAL, V.; PATTERSON, J. Prevalence of antibiotic resistant *Escherichia coli* in sea foods of Tuticorin coast, southeastern India. **Adv Biol Res** v.6. p.70–77. 2012.

JORGE, W.; ISSA, E.C.; SERENO, F.T.P. DE S., SERENO, J.R.B. **Caracterização genética de bovinos por meio de estudos do cromossomo Y e do DNA mitocondrial**. Documentos 155. ISSN. 1517-5111. Embrapa Cerrado. Planaltina DF. 2006.

JORGE W. A genômica bovina - Origem e evolução de taurinos e zebrinos. **Veterinária e Zootecnia**. jun.; 20(2): 217-237. 2013. Disponível em: <https://rvz.emnuvens.com.br/rvz/article/view/1478/986>. Acesso em: 8 jun. 2023.

JOSHAGHANI, A.; MOEINI, M.A. Evaluating the Effects of Sugarcane-Bagasse Ash and Rice-Husk Ash on the Mechanical and Durability Properties of Mortar. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 30, 7, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.00023](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.00023). 2018.

KALYUZHNYA, M.G.; COLLINS, D.; CHISTOSERDOVA, L. **Microbial Cycling of Methane**. Reference Module in Life Sciences, DOI:[10.1016/B978-0-12-809633-8.90670-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.90670-8). 2019.

KOZLOSKI, G.V. **Bioquímica dos ruminantes**. 3ª Ed. UFSM, Santa Maria. 212 p. 2011.

KUCHARSKI, E.S.; WINCHESTER, W.; LEEMING, W.A.; CORD-RUWISCH, R.; MUIR, C.; BANJUP, W.A.; WHIFFIN, V.S.; AL-THAWADI, S.; MUTLAQ, J. Microbial biocementation. Patent Application WO/2006/066326; **International Application** No.PCT/ AU2005/001927. 2005.

KULSHRESHTHA, Y.; VARDON, P. J.; MEESTERS, G. M. H.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M.; MOTA, N.; & JONKERS, H. M. What Makes Cow-Dung Stabilised Earthen Block Water-Resistant? **Construction Technologies and Architecture**, v. 1, p. 540-548. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/CTA.1.540>. 2022.

KUMAR, S.; KRISTÁLY, F.; MUCSI, G. Geopolymerisation behaviour of size fractioned fly ash. **Advanced Powder Technology**. v.26 p. 24-30. 2015.

INSTITUTO PORTUGUÊS DE QUALIDADE. **IPQ EN998-1**: Especificações para argamassas de revestimento, Caparica. 2016.

IVANOV, V.; CHU, J.; STABNIKOV, V. **Iron- and calcium-based bio grouts for porous soils** **Construction Materials**, 167 p. 36-41, 10.1680/coma.12.00002. 2014.

LAI, S.; TABACCHIONI, S. Ecology and biotechnological potential of *Paenibacillus polymyxa*: a minireview. **Indian Journal Microbiology**, v. 49, p.2-10. 2009.

LARNEY, F.J.; YANKER, L.J.; MILLER, J.J.; MCALLISTER, T.A. Fate of coliform bacteria in composted beef cattle feedlot manure. **Journal of Environmental Quality**. v. 32, p. 1508–1515. 2003.

LEITES, A.C.B.R.; PINTO, M.B.; SOUZA, E.R. Aspectos microbiológicos da cárie dental. **Salusvita** v.25.2. p. 239-52. 2006.

LEKSHMI, M.S.; VISHNUDAS, S.; NAIR, D.G. Strength, sorptivity and shrinkage characteristics of cow dung stabilized mud mortar, **Materials Today: Proceedings**, v. 32, Part 4, p. 782-787. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.715>. 2020.

LERNER, K.; DONAHUE, K. Structural Testing of Plasters for StrawBale Construction, **Ecological Building Network**, www.ecobuildnetwork.org/pdfs/Plaster_tests.pdf, acesso em: 24 nov. 2024. Ontario Straw Bale Building Coalition-OSBBC (2004) "Straw Bale Building: An Information Package for Building Officials in Ontario", OSBBC, Spencerville, Ontario. 2003.

LI, W.; YU, H. Insight into the roles of microbial extracellular polymer substances in metal biosorption. **Bioresource Technology**, v. 160. p. 15-23. 2014.

LIANG, T.; WANG, S. Recent advances in exopolysaccharides FROM *Paenibacillus spp.*: Production, Isolation, structure, and Bioactivities. **Marine drugs**. v. 13. p. 1847-1863. 2015.

LIMA, J.; FARIA, P.; SILVA, A. S. Earth Plasters: The Influence of Clay Mineralogy in the Plasters' Properties, **International Journal of Architectural Heritage**. doi: 10.1080/15583058.2020.1727064. 2020.

LIMA, J.; FARIA, P. Eco-efficient earthen plasters. The influence of the addition of natural fibers. Figueiro, Raul, Rana, Sohel (Eds.). **Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications RILEM Book Series**. v. 12 (Feb 2016), 315-327, Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7515-1_24. 2016.

LIMA, J.; CORREIA, D.; FARIA, P. Rebocos de terra: a influência da adição de gesso e da granulometria da areia. ARGAMASSAS 2016 – II Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento, 16-17 Junho 2016, ITeCons, Coimbra, ID 15, 119-130. <https://run.unl.pt/handle/10362/18283>. 2016.

LIN, H.; ZHANG, M.; WANG, F.; MENG, F.; LIAO, B.Q.; HONG, H.; CHEN, J.; GAO, W. A critical review of extracellular polymeric substances (EPSs) in membrane bioreactors: Characteristics, roles in membrane fouling and control strategies. **Journal of Membrane Science**. v. 460. p. 110-125. 2014.

LITHERLAND, N. Oklahoma Dairy Report – A dairy nutrition newsletter. **Oklahoma State University**. i. 2, v. 1, 2007.

MA, H.; WU, X.; XIA, L.; HUANG, L.; XIONG, L.; YANG, H.; ZHONG, B.; ZHANG, T.; YANG, Z.; GAO, F.; WEN, G. Friction and wear behavior of carbon fiber reinforced lithium aluminosilicate composites sliding against GCr15 steel. **Friction** 8(6): 1063–1072. ISSN. 2223-7690. <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0322-2>. 2020.

MADDISON, M.; MAURING, T.; KIRSIMAE, K.; MANDER, U. The humidity buffer capacity of clay–sand plaster filled with phytomass from treatment wetlands. **Building and Environment** v. 44:9, pp. 1864–1868 (acessível em <https://doi:10.1016/j.buildenv.2008.12.008>). 2009.

MAHAMAT, A.D.; HAMID, O.I.; SOULTAN, M.; KHAYAL, M.Y.; ELHAMDOUNI, Y.; GAROUM, M.; GAYE, S. Effect of cow's dung on thermophysical characteristics of building materials based on clay. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 10(4), p. 464–470. <https://doi.org/10.19026/rjaset.10.2512>. 2015.

MANETTE, N.; OYAWA, W.; NYOMBOI, T. Potential of Quarry Dust and Cow Dung as stabilisers for Black Cotton soil Eco-blocks for Housing. International Knowledge Sharing Platform: **Civil and Environmental Research**, v. 7. n. 8, p. 117-125. 2015.

MANUAL DE MINERALOGIA. Handbookofmineralogy.org. 2019. Disponível em: <http://www.handbookofmineralogy.org>. Acesso em: 4 mar. 2024.

MANSOUR, M.B.; JELIDI, A.; SOUKAINA, A.C.; JABRALLAH, S.B. Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB), **Construction and Building Materials**. v.10. p. 444–451. 2016.

MARTIN, J.P. Decomposition and binding action of polysaccharides in soil, **Soil Biology and Biochemistry**, v. 3, i. 1, p. 33-41, ISSN 0038-0717, [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(71\)90029-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(71)90029-0). 1971.

MBEREYAHU, L.; IRAFASHA, D.; HABUMUGISHA, E.; MUSABIREMA, J. Assessment of Cohesive Soil - Cow Dung Mortar Properties as Replacement of Cement Mortar for Simple Plastering Works. **Rwanda Journal of Engineering, Science, Technology and Environment**, v. 3(2). <https://doi.org/10.4314/rjeste.v3i2.6>. 2020.

MCGREGOR, F.; HEATH, A.; MASKELL, D.; FABBRI, A.; MOREL, J.-C. A review on the buffering capacity of earth building materials. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials**, v.169(5), p.241–251. <https://doi.org/10.1680/jcoma.15.00035>. 2016.

- MEIMAROGLOU, N.; MOUZAKIS, C. Cation Exchange Capacity (CEC), texture, consistency and organic matter in soil assessment for earth construction: The case of earth mortars, **Construction and Building Materials**. v. 221. p. 27-39, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.036>. 2019.
- MENDES, M.V.A.; CANANÉIA, H.L.M.; NEIVA, I.B.; MACHADO, L.A.; CORREA, L.A. flotação de silicatos. **Revista HOLOS**, Ano 34, v. 03 DOI: 10.15628/holos.2018.7440. 2018.
- MILETO, C.; LÓPEZ-MANZANARES, F.V.; GARCÍA-SORIANO, L.; CRISTINI, V. Vernacular and Earthen Architecture: Conservation and Sustainability: Proceedings of Sostierra 2017 (Valencia, Spain, 14-16 September 2017). 2017.
- MILLOGO, Y.; MOREL, J.C.; AUBERT, J.E.; GHAVAMI, K. Experimental analysis of pressed adobe blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers, **Construction and Building Materials**. v. 52. p. 71–78. 2014.
- MILLOGO, Y.; AUBERT, J. E.; SÉRÉ, A. D.; FABBRI, A.; MOREL, J. C. Earth blocks stabilized by cow dung. **Materials and Structure**. v.49(11), p. 4583-4594. 2016.
- MINKE, G. Building with Earth, Design and Technology of a Sustainable Architecture. **Birkhauser Publishers for Architecture**, Berlin, 18. 2006.
- MINKE, G. **Paredes e Rebocos de Terra**. Tradução Daniel Pinheiro. 2. Ed. São Carlos: RiMa Editora, 2018.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E DA PECUÁRIA **MAPA** - BRASIL. Portaria nº61/2020. 2020.
- MIRANDA, J.E.C.; FREITAS, A.F. **Raças e tipos de cruzamentos para produção de leite**. Heterose ou vigor híbrido. Circular Técnica Embrapa n. 98. 2009.
- MISTRY, M.K.; SHUKLA, S.J.; SOLANKI, C.H.; SHUKLA, S.K. Study of fibre-clay interface behaviour and reinforcing mechanism. **Geotechnical and Geological Engineering** 38(2): 1899–1917, <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01138-y>. 2020.
- MITCHELL, J.K.; SANTAMARINA, J.C. Biological considerations in geotechnical engineering. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v.131, i.10, p.1222–1233. 2005.
- MONROE, D. Looking for chinks in the armor of bacterial biofilms. **PLoS Biology**. v. 5(11). p.307. doi: 10.1371/journal.pbio.0050307. PMID: 18001153; PMCID: PMC2071939. 2007.
- MORE, T.T.; YADAV, J.S.S.; YAN, S.; TYAGI, R.D.; SURAMPALLI, R.Y. Extracellular polymeric substances of bacteria and their potential environmental applications. **Journal of Environmental Management**, v. 144, p. 1-25. 2014.
- MORENO, A.M.R. **Produção de urease por Sporosarcina pasteurii ATCC 11859 em resposta a condições de crescimento e seu potencial para a estabilização de solos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Microbiologia, Universidade Federal de Viçosa (UFV). 2020.
- MUJAH, D.; SHAHIN, M.A.; CHENG, L. State-of-the-Art Review of Biocementation by Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) for Soil Stabilization. **Geomicrobiology Journal**. v. 34. i.6. 2017.
- MUNSHI, S.K.; ROY, J.; NOOR, R. Microbiological investigation and determination of the antimicrobial potential of cow dung samples. **Stamford Journal of Microbioly**. 8, 34–37.2018.
- MUKHERJEE, A.; SPEH, D.; DYCK, E.; DIEZ-GONZALEZ, F. Preharvest evaluation of coliforms, Escherichia coli, Salmonella, and Escherichia coli O157:H7 in organic and conventional produce grown by Minnesota farmers. **Journal of Food Protection**. v.67, p.894–900. 2004.
- MUKHERJEE, A.; DHAMI, N.; REDDY, B.; REDDY, M. **Bacterial calcification for enhancing performance of low embodied energy soil-cement bricks**. In: Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, p.18-21 August, Kyoto, Japan. 2013.

MUKHERJEE, A.; DAS, R.; SHARMA, A.; PAL, A.; PAUL, A.K. Production and partial characterization of extracellular polysaccharide from endophytic *Bacillus cereus* RCR 08. **Microbiological Communication**, v.10, p. 612-622. 2017.

MUSEU DE MINERAIS, MINÉRIOS E ROCHAS HEINZ EBERT Disponível em : <https://museuho.com.br/mineral/hornblenda-hornblende/>. Acesso em: 1 mar. 2024.

NAIEMI, N.A.; HEDDEMA, E.R.; BART, A.; DE JONGE, E.; VANDENBROUCKE-GRAULS, C.M.; SAVELKOU, P.H.; DUIM, B. Emergence of multidrug-resistant Gramnegative bacteria during selective decontamination of the digestive tract on an intensive care unit. **Journal of Antimicrobial Chemotherapy** v. 58. p. 853–856. 2006.

NGOWI, A. B. Improving the traditional earth construction: a case study of Botswana. **Construction and Building Materials**, v.11(1), p. 1-7. 1997.

NGUYEN, H.N.T.; NGUYEN-PHAM, H.H.; KHOI, N.H.T.; NGUYEN, K-S. Eco-friendly method of biocementation for soil improvement and environmental remediation in the context of Viet Nam: a state-of-the-art review. *Vietnam Journal of Science and Technology* 61(6):917-942. DOI:[10.15625/2525-2518/18516](https://doi.org/10.15625/2525-2518/18516). 2023.

Normenausschuss Bauwesen. **DIN 18947**. Earth plasters: terms and definitions, requirements, test methods (em alemão). Berlim. 2024.

OLIVEIRA, J. S.; ZANINI, A. M.; SANTOS, E. M. Fisiologia, manejo e alimentação de bezerros de corte. **Arquivos de Ciências Veterinárias e Zootecnia**. v. 10(1). p.39-48. 2007.

OLIVEIRA, V. S.; SANTOS, A. C. P.; VALENÇA, R. L. Desenvolvimento e fisiologia do trato digestivo de ruminantes. **Ciência Animal**, v.29, n.3, p.114-132. 2019.

OMETTO, J.P.; AGUIAR, A.P.D.; MARTINELLI, L.A. Amazon deforestation in Brazil: effects, drivers and challenges. **Carbon Management Journal** v.2(5), p.575–585. Future Science ISSN 1758-3004. 2011.

OMOJOWO, F.S.; OMOJASOLA, F.P. Antibiotic Resistance Pattern of Bacterial Pathogens Isolated from Cow Dung Used to Fertilize Nigerian Fish Ponds. *Print ISSN 2067-3205; Electronic 2067-3264. Notulae Scientia Biologicae*. v.5(1). p.15-19. 2013.

OUEDRAOGO, M.; DAO, K.; MILLOGO, Y.; SEYNOU, M.; AUBERT, J.E.; GOMINA, M. Influence des fibres de kenaf (*Hibiscus altissima*) sur les propriétés physiques et mécaniques des adobes, **Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie**. v. 043. p.48–63. 2017.

OUEDRAOGO, M.; DAO, K.; MILLOGO, Y.; AUBERT, J-E.; MESSAN, A.; SEYNOU, M.; ZERBO, L.; GOMINA, M. Physical, thermal and mechanical properties of adobes stabilized with fonio (*Digitaria exilis*) straw, **Journal of Building Engineering**, v. 23, p. 250-258, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.02.005>. 2019.

PACHAMAMA, R.A.V.C.N. Guia para autoconstrução em Bambu e Terra: Adobe e Taipa de mão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO COM TERRA NO BRASIL, 7. **Anais**. p. 476-485. Rio de Janeiro, Brasil, 2018.

PACHAMAMA, R.A.V.C.N.; SANTOS, D.P.; REZENDE, M.A.P. Inovações e permanências em argamassas de terra. In: 2º SEMINÁRIO ARQUITETURA VERNÁCULA. **Anais**. Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Brasil. 2019. Disponível em: <<https://www.even3.com.br/anais/2arqvernacula/190293-INOVACOES-E-PERMANENCIAS-EM-ARGAMASSAS-DE-TERRA>>. Acesso em: 18 fev. 2024.

PACHAMAMA R.A.V.C.N.; REZENDE M.A.P.; JUNIOR A.N.C.; BARBOSA R.A.; MORAES P.M. Earth mortars: a vernacular technology and a modern eco-efficient solution, **International Journal of Development Research**, v.10, (09), p.40329-40335. 2019.

PACHAMAMA, R.V.; REZENDE, M.A.P.; FARIA, P. Evaluating the Physical and Mechanical Properties of Earth Plasters with Cow dung - A Vernacular Solution for Earth Building in Brazil. **LEHM** 2020. Disponível em: https://www.dachverband-lehm.de/lehm2020_online/pdf/lehm2020_b_pachamama-rezende-faria_en.pdf. Acesso em: 25 out. 2024.

PACHAMAMA, R.A.V.C.N. Práticas de ensino e aprendizagem para a construção com terra em comunidades de resistência - tecnologia, tradição e agroecologia. In: SEMINÁRIO QUEBEC-BRASIL SEMINÁRIO INTERNACIONAL DIVERSIDADE E DESIGUALDADES NA EDUCAÇÃO: POLISSEMIA E COMPLEMENTARIDADE EM PESQUISAS DO NORTE E DO SUL. **Anais**. UNIVASF, Petrolina, Brasil. <https://doi.org/10.12957/periferia.2022.69726>. 2022.

PACHAMAMA, R.V.; REZENDE, M.A.P.; FARIA, P. Efeitos da adição de excremento bovino e cal em argamassas de terra para reboco produzidas com uma terra areno siltosa e uma terra argilosa: Caracterização de materiais da arquitetura vernácula popular brasileira. In: 4º Seminário Arquitetura Vernácula Popular: Tradição e Contemporaneidade. **Anais**. Escola de Arquitetura e Urbanismo da UFF - Niterói - Rio de Janeiro - Brasil. (2024a). Disponível em: <<https://www.even3.com.br/anais/4-seminario-brasileiro-de-arquitetura-vernacula-popular/871496-efeitos-da-adicao-de-excremento-bovino-e-cal-em-argamassas-de-terra-para-reboco-produzidas-com-uma-terra-areno-sil/>>. Acesso em: 18 ago. 2024.

PACHAMAMA, R.N.; FARIA, P.; REZENDE, M.A.P.; SANTOS SILVA, A. Effect of Cow Dung Additions on Tropical and Mediterranean Earth Mortars-Mechanical Performance and Water Resistance. **Materials**. 17(12), 2885. <https://doi.org/10.3390/ma17122885>. 2024b.

PACHAMAMA, R.N.; FARIA, P.; REZENDE, M.A.P.; MORAES, P.M. Cow Dung Biostabilized Earth Mortars: Reusability and Influence of Cow Dung Processing and Cow Diet. **Buildings**. 14, 3414. <https://doi.org/10.3390/buildings14113414>. 2024c.

PACHAMAMA, R.N.; FARIA, P.; REZENDE, M.A.P.; SANTOS SILVA, A. Efeitos da adição de excremento bovino no desempenho mecânico de argamassas produzidas com uma terra argilosa do Brasil e outra arenosa de Portugal. In: 5º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. **Anais**. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal. 2024d.

PACHAMAMA, R.N.; FARIA, P.; REZENDE, M.A.P.; SANTOS SILVA, A. Efeitos da adição de excremento bovino em argamassas produzidas com terras do Brasil e de Portugal - Resistência a água. A. Ferreiro, Z. Salcedo Gutierrez, C. Neves (Eds.). **22º SIACOT** - Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra. PROTERRA/Universidad de la Serena/CIATYP, La Serena, Chile, 18 a 24 de novembro 2024, 125-136. 2024e.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction, **Construction and Building Materials**, v. 29, 2012, p. 512-519 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>. 2012.

PALANISAMI, S.; NATARAJAN, E.; RAJAMMA, R. Development of eco-friendly herbal mosquito repellent. **Journal of Innovative Biology**. v.1. p.132-136. 2014.

PAPINI, R.M.; BRANDÃO, P.R.G.; PERES, A.E.C. Cationic flotation of iron ores: amine characterization and performance. **Mining, Metallurgy & Exploration**, v. 18, p. 5-9. 2001.

PARANHOS DA COSTA, M.J.R.; CROMBERG, V.U. Alguns aspectos a serem considerados para melhorar o bem-estar de animais em sistema de pastejo rotacionado. In: Peixoto, A. M.; Moura, J. C. e Faria, V. C. **Fundamentos do Pastejo Rotacionado**, FEALQ: Piracicaba, p. 273-296. 1997.

PARRACHA, J.L.; PEREIRA, A.S.; VELEZ DA SILVA, R.; SILVA, V.; ALMEIDA, N.; FARIA, P. Efficacy of iron-based bioproducts as surface biotreatment for earth-based plastering mortars, **Journal of Cleaner Production**, v.237, 117803. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117803>. 2019.

PARRACHA, J.L.; SANTOS SILVA, A.; COTRIM, M.; FARIA, P. Mineralogical and microstructural characterisation of rammed earth and earthen mortars from 12th century Paderne Castle. **Journal of Cultural Heritage** v. 42, p. 226-239. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.07.021>. 2020.

PARRACHA, J.L.; PEREIRA, A.S.; VELEZ DA SILVA, R.; SILVA, V.; FARIA, P. Effect of innovative bioproducts on the performance of bioformulated earthen plasters, **Construction and Building Materials**, v. 277, 122261. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122261>. 2021.

PATHAK, R.K.; RAM, R.A. Bio-enhancers: a potential tool to improve soil fertility, plant health in organic production of horticultural crops. **Progressive Horticulture**. v.45. p.237-254. 2013.

PEDERGNANA, M.; ELIAS-OZKAN, S. Impact of various sands and fibres on the physical and mechanical properties of earth mortars for plasters and renders. **Construction and Building Materials**. 308. 125013. 10.1016/j.conbuildmat.2021.125013. 2021.

PERRY, C.C.; PATWARDHAN, S.V.; DESCHAUME, O. From biominerals to biomaterials: the role of biomolecule–mineral interactions. **Biochememical Society Transactions**, v. 37. p. 687-691. 2009.

PINTO, L.F.S.; KÄMPF, N. Balanço geoquímico de solos derivados de rochas básico-ultrabásicas no ambiente subtropical do rio grande do sul. **Revista brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.21. p.651-658. Seção v - gênese, morfologia e classificação do solo. 1997.

PLEWS, P.I.; BROMEL, M.C.; SCHIPPER, I.A. Characterization of the coliform and enteric bacilli in the environment of calves with colibacillosis. **Applied and Environmental Microbiology**. v.49, p.949– 954. 1984.

PRADINES, S. **Historic Mosques in Sub-Saharan Africa: From Timbuktu to Zanzibar** v. 163 *de Handbook of Oriental Studies. Section 1 The Near and Middle East*. Editora Brill. p.368. 2022. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=f1ebEAAAQBAJ&lpg=PR7&ots=9zXnI7M&dq=earth%20mortar%20Djenne%20Mosque%20cow%20dung%20cattle%20manure&lr&hl=pt-BR&pg=PR7#v=snippet&q=djenne&f=false>. Acesso em: 25 jul. 2024.

RAJ, A.; JHARIYA, M.K.; TOPPO, P. Cow dung for ecofriendly and sustainable productive farming. **Environmental Science**. v. 3, i.10, ISSN. 2277-8179. 2014.

RAJA, M.K.M.M.; MANNE, R.; DEVARAJAN, A. Benefits of Cow Dung - A Human Ignored Gift. **Journal of natural remedies**. Doi: 10.18311/jnr/2021/26653. 2021.

RAO, S.M.; SUKUMAR, R.; JOSHUA, R.E.; MOGILI, N.V. Biocementation of soft soil by carbonate precipitate and polymeric saccharide secretion. **Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials**, <https://doi.org/10.1680/jbibrn.20.00032>. 2020.

RAO, S.M.; SUKUMAR, R.; JOSHUA, R.E.; REKAPALLI, M. Bio-stabilization of soft soil using cattle manure. *Proc. Inst. Civ. Eng.—Ground Improvment*. 176, 41–53. 2021.

RAO, S.M. **Stabilization of Earthen Building Materials by Select Native Binders**, 1st ed.; Springer Nature: Cham, Switzerland, 2023.

REMUS, R.; RUPPEL, S.; JACOB, H.-J.; HECHT-BUCHHOLZ, C.; MERBACH, W. Colonization behavior of two enterobacterial strains on cereals. **Biology and Fertility of Soils** v.30, p.550– 557. 2000.

RÖHLEN, U.; ZIEGERT, C. **Earth Building Practice**, Bauwerk, Beuth Verlag GmbH. 2011.

RONG, H.; QUIAN, C. Characterization of microbe cementitious materials. **Materials Science**. v. 57. N. 11; 1333-1338. doi: 10.1007/s11434-012-5047-9. 2012.

SACKO, O. The involvement of local communities in the conservation process of earthen architecture in the Sahel-Sahara region – the case of Djenné, Mali. **Built Heritage**, v.5 (26), 10.1186/s43238-021-00040-y. 2021.

SALANITRO, J.P.; BLAKE, I.G.; MUIRHEAD, P.A. Isolation and identification of fecal bacteria from adult swine. **Applied Environmental**. v.33, p.79– 84. 1977.

SANTOS, T.; NUNES, F.; FARIA, P. Production of eco-efficient earth-based plasters: influence of composition on physical performance and bio-susceptibility. **Journal of Cleaner Production**. 167. 55–67, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.131>. 2017.

SANTOS, T.; FARIA, P.; SILVA, V. Can an earth plaster be efficient when applied on different masonries? **Journal of Building Engineering**. v. 23, p. 314-323. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.02.011>. 2019.

SANTOS, T.; GOMES, M.I.; SANTOS SILVA, A.; FERRAZ, E.; FARIA, P. Comparison of mineralogical, mechanical and hygroscopic characteristic of earthen, gypsum and cement-based plasters. **Construction and Building Materials**. v.254, 119222. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119222>. 2020.

SANTOS, T.; ALMEIDA, J.; SILVESTRE, J.D.; FARIA P. Life cycle assessment of mortars: a review on technical potential and draw-backs. **Construction Building Materials**., v. 288, 123069. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123069>. 2021.

SAVADOGO, N.; TRAORE, Y.B.; LANKOANDE, N.; NSHIMIYIMANA, P.; MESSAN, A. Investigation of the Fermentation Mode of Rice Husk for the Stabilization of Earth Plaster. **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering**, v.12, p.17-36. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2024.121002>. 2024.

SECRETARIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA - Ministério da Agricultura e da Pecuária **MAPA**. Portaria n.1.170/2024.

SCHNÜRER, J.; MAGNUSSON, J. Antifungal lactic acid bacteria as biopreservatives, **Trends in Food Science & Technology**, v. 16, I. 1–3, p. 70-78, ISSN 0924-2244, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2004.02.014>. 2005.

SCHROEDER, H. **The New DIN Standards in Earth Building**—The Current Situation in Germany. Dachverband Lehm e. V. (DVL), Weimar, 99425, Alemanha. 2018.

SCHWANTES-CEZARIO, N.; PORTO, M.F.; SANDOVAL, G.F.B.; NOGUEIRA, G.F.N.; COUTO, A.F.; TORALLES, B.M. Effects of *Bacillus subtilis* biocementation on the mechanical properties of mortars. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, 12(01), 31-38. 2019.

SHARIF, M.R.; ALIZARGAR, J., SHARIF, A. Antimicrobial resistance among Gramnegative bacteria isolated from different samples of patients admitted to a University hospital in Kashan, Iran. **Advances in Biological Research** v.7. p.199–202. 2013.

SIGEL, Helmut; SIGEL, Roland (Ed.). **Metal Ions In Biological Systems, Volume 44: Biogeochemistry, Availability, and Transport of Metals in the Environment**. CRC press, 2005.

SILVA, C.C. **Impacto ecológico e silvicultural do uso e colheita de eucalipto consorciado com espécies arbóreas nativas para a restauração da Mata Atlântica**. 131p. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo (USP). 2017. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-01032018-171947/en.ph>. Acesso em: 24 out. 2024.

SIMUJIDE, H.; AORIGELE, C.; WANG, C.J.; MANDA, B.; LINA, M.; WU, M.Y.; LI, Y.; BAI, T.R.G. Reduction of foodborne pathogens during cattle manure composting with addition of calcium. **Journal of Environmental Engineering & Landscape Management**. v.21, p. 77–84. 2013

SNELDER, R. **The Great Mosque at Djenné: Its Impact Today as a Model**. <https://jstor.org/stable/10.2307/al.ch.document.sip200048>. 1984.

SOKOLOV, O.Y.; PRYANIKOVA, N.A.; KOST, N.V.; ZOLOTAREV, Y.A.; RYUKERT, E.N.; ZOZULYA, A.A. Reactions between β -Casomorphins-7 and 5-HT₂-Serotonin Receptors. **Bulletin of Experimental Biology and Medicine**. 140, 582–584. <https://doi.org/10.1007/s10517-006-0030-6>. 2005.

SOUZA, L.B.E.; CHAVEIRO, E.F. Territory, environment and way of life: conflicts between agribusiness and the Quilombola community of Morro de São João, Tocantins. **Sociedade & Natureza**, v.31, e42482. <https://doi.org/10.14393/SN-v31n1-2019-42482>. 2019.

SPENCER, C.A.; SASS, H.; VAN PAASSEN, L. Increased Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) Efficiency in Multiple Treatment Sand Biocementation Processes by Augmentation of Cementation Medium with Ammonium Chloride. **Geotechnics** 3, 1047-1068. <https://doi.org/10.3390/geotechnics3040057>. 2023

Standards Association of New Zealand. **NZS 4298-A1**. Materials and workmanship for earth buildings: Amendment 1. 2000.

STORTI, A.; PIZOLITTO, A.C.; STEIN, R.A.; PIZZOLITTO, E.L. Biofilme detectado em ponta de cateter venoso central por cultura usando método quantitativo. **Revista Brasileira de Análises Clínicas**. p.183-187. 2007.

SUTHERLAND, I.W. Biotechnology of microbial exopolysaccharides. n. 9. **Cambridge University Press**. 1990.

TADONBOU, J.; PLIYA, P.; BEAUCOUR, A.-L.; FARIA, P.; NOUMOWE, A. Behavior of earth mortars at high temperature. **Construction and Building Materials**. 425, 136093. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136093>. 2024.

TEIXEIRA, J.C. **Fisiologia digestiva dos animais ruminantes**. Lavras: UFLA/FAEPE. 270p. 1996.

THARMARAJ, K.; GANESH, P.; KUMAR, R.S.; ANANDAN, A.; KOLANJINATHAN, K. A critical review on Panchagavya: a boon plant growth. **International Journal of Pharmaceutical & Biological Archive**. v.2. p. 1611-1614. 2011.

THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2002. **Regulation (EC) No. 1774/2002** of the European Parliament and of the Council Laying Down Health Rules. 2002.

TRIMBLE, P. Concrete Results from Sand and Urea. **The alumni magazine. Billet & General Concl Papers**. The University of Edimburg. Sustainability Special. Summer 2014. p.7. 2014. Disponível em: <https://www.ed.ac.uk/files/atoms/files/edit-summer-2014.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2024.

ULLAH, A.; DURRANI, R.; ULLAH, I.; RAFIQ, M. Antibiotic resistance profile of clinical gram-negative bacteria. **Journal of Biological and Food Science Research** v.1. p. 23–25. 2012.

UMANU, G.; NWACHUKWU, S.C.U.; OLASODE, O.K. Effects of cow dung on microbial degradation of motor oil in lagoon water. **Global Journal of Biochemistry and Biotechnology**. v.2. p.542-548. 2013.

UTKHEDE, R.; NIE, J.; XU, H.; EASTWELL, K.; WIERSMA, P. Transformation of biocontrol agent *Enterobacter agglomerans* with salicylate utilizing gene and its monitoring in orchard soil. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, v. 75(1), p. 50–54. <https://doi.org/10.1080/14620316.2000.11511199>. 2000.

VALADARES FILHO, S.C.; PINA, D.S. **Fermentação ruminal**. In: Berchielli, T. T.; Pires, A. V.; Oliveira, S. G. (Ed). *Nutrição de Ruminantes*. 2 ed. Jaboticabal:Funep. p. 161-189. 2011.

VAN SOEST, P.J. **Nutritional Ecology of the Ruminant**. Ithaca: Cornell University Press, 476p. 1994.

VANHOLME, R.; DE MEESTER, B.; RALPH, J.; BOERJAN, W. Lignin biosynthesis and its integration into metabolism. **Current Opinion in Biotechnology**, v.56, p.230-239. 2019.

VILANE, B.R.T. Assessment of stabilisation of adobes by confined compression tests. **Biosystems Engineering**. v. 106(4), p.551-558. 2010.

VU, B.; CHEN, M.; CRAWFORD, R.J.; IVANOVA, E.P. Bacterial Extracellular Polysaccharides Involved in Biofilm Formation **Molecules** , 14, 2535-2554. <https://doi.org/10.3390/molecules14072535>. 2009.

WALTER, L.; MEDJIGBODO, G.; CLAUDOT, L.; NAIT-RABAH, O.; LINGUET, L. Influence of metal oxides and particle size on earthen mortar built with tropical soils. **Academic Journal of Civil Engineering**, 40, 1–10, 2022.

WELKIE, D.G.; STEVENSON, D.M.; WEIMER, P.J. Analysis of ruminal bacterial community dynamics in lactating dairy cows during the feeding cycle. **Anaerobe**. v.16(2). p. 94–100. 2010.

WHIFFIN, V.S. **Microbial CaCO₃ precipitation for the production of biocement**. PhD Thesis, Murdoch University, Perth, WA, p162. 2004.

WLODARSKI, L.; MAEDA, E.M.; FLUCK, A.C.; GILIOLI, D. Microbiota ruminal: diversidade, importância e caracterização. REDVET. **Revista Eletrônica de Veterinária**. v.18(11). p.1-20. 2017. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63653574006>. Acesso em: 14 fev. 2024.

WOODFORD, K.B. **Devil in the milk: Illness, Health and the Politics of A1 and A2 Milk**. Ed. Chelsea Green; 2009.

WORKU, M.A.; TAFSESE, W.Z.; HAILEMARIAM, B.Z.; YEHUALAW, M.D. Cow dung ash in mortar: An experimental study. **Applied Sciences**. v. 13, p. 6218. 2023.

YALLEY, P.P-K.; DOROTHY, M. Strength and Durability Properties of Cow Dung Stabilised Earth Brick. **Civil and Environmental Research**. v. 3, n. 13, p. 117-125. 2013.

YANG, D.S.; BHATTACHARJYA, D.; INAMDAR, S.; PARK, J.; YU, J.S. Phosphorus-doped ordered mesoporous carbons with different lengths as efficient metal-free electrocatalysts for oxygen reduction reaction in alkaline media. **Journal of American Chemical Society** 134:16127–16130. 2012.

ZHANG, Y.; JIANG, S.; QUAN, D.; FANG, K.; WANG, B.; MA, Z. Properties of Sustainable Earth Construction Materials: A State-of-the-Art Review. **Sustainability**, 16(2), 670. <https://doi.org/10.3390/su16020670>. 2024.

ZHANG, Z.; YANG, L.; HE, Y.; LUO, X.; ZHAO, S.; JIA, X. Composition of Fecal Microbiota in Grazing and Feedlot Angus Beef Cattle. **Animals**. v.11, 3167. <https://doi.org/10.3390/ani11113167>. 2021.

ZIEGERT, C.; RÖHLEN, U.; SCHROEDER, H. The success story of earth building standards in Germany. **Proceedings of LEHM 2020**. Disponível online em: https://www.dachverband-lehm.de/lehm2020_online/pdf/lehm2020_b_ziegert-roehlen-schroeder_en.pdf [acessado em 13 de março de 2024]. 2020.

ZRS. 2024. Disponível em: <https://www.zrs.berlin/en/article/new-generation-of-earth-building-standards/>. Acesso em: 5 abr. 2024.