

IMPRESSÃO 3D COM ARGAMASSA DE TERRA NA FEUP

Márcio Albuquerque Buson¹; Humberto Salazar Amorim Varum²; Marco Antônio Penido de Rezende³

¹Universidade de Brasília – FAU/UnB, Brasil, márcio.fau.unb@gmail.com

²Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Portugal, hvarum@fe.up.pt

³Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Brasil, marco.penido.rezende@hotmail.com

Palavras-chave: extrusão, Kraftterra, incorporação de fibras, arquitetura de terra

Resumo

A impressão 3D com argamassa de terra ainda está em desenvolvimento e enfrenta desafios. A otimização da mistura de argamassa, a melhoria da resistência estrutural, a relação entre a velocidade de impressão e a quantidade de material extrudido, e a durabilidade a longo prazo são áreas que ainda estão sendo aprimoradas. Este trabalho apresenta para discussão os registros, análises, estudos e considerações sobre as primeiras iniciativas com a impressão 3D com a extrusão de argamassa de terra desenvolvidas na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Foram feitos estudos para a definição da consistência ideal para impressão 3D; da relação ideal entre velocidade de impressão e taxa de extrusão; e análise do uso de argamassas de terra com a incorporação de fibras dispersas de papel kraft provenientes das embalagens de sacos de cimento, o Kraftterra. As argamassas de Kraftterra demonstraram ter excelente desempenho com a impressão 3D. O uso de argamassa de terra em processos construtivos com a impressão 3D tem grande potencial na construção civil e poderá ser mais uma boa alternativa para a produção de edificações mais sustentáveis e ambientalmente mais adequadas.

1 INTRODUÇÃO

A impressão 3D com solo natural é uma tecnologia promissora que combina a construção tradicional com os avanços da fabricação aditiva. Essa abordagem utiliza uma mistura de argamassa de terra, com ou sem aditivos, para criar estruturas complexas camada por camada, através de um processo automatizado.

Existe uma grande variedade de tipos de misturas para argamassas de cimento para a impressão 3D e que a cada ano essa quantidade se expande cada vez mais (LESOVIK, ET AL., 2022). Mesmo que a construção digital com argamassa de terra ainda esteja em seu desenvolvimento inicial em comparação com a argamassa de cimento, alguns trabalhos científicos mostraram seu potencial e demonstraram seu conceito técnico e algumas iniciativas industriais mostraram sua aplicabilidade como método construtivo promissor (SONEBI, ET AL., 2022).

É importante reconhecer que a impressão 3D com argamassa de terra ainda está em desenvolvimento e enfrenta desafios. A otimização da mistura de argamassa, ou seja, a sua construtibilidade ou a capacidade de carga da camada recém-formada; a melhoria da resistência estrutural; a relação entre a velocidade de impressão e a quantidade de material extrudido (taxa de extrusão); e a durabilidade a longo prazo são áreas que ainda estão sendo aprimoradas. Além disso, questões regulatórias e de certificação também precisam ser consideradas para garantir a segurança e a conformidade das estruturas impressas em 3D.

No geral, a impressão 3D com argamassa de terra tem o potencial de revolucionar a indústria da construção, oferecendo uma abordagem mais sustentável e eficiente para a criação de edificações. À medida que a tecnologia avança e os desafios são superados, é provável que vejamos um aumento na adoção e na diversidade de aplicações dessa tecnologia na construção civil.

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Iniciou-se com a coleta de amostras de solo potencialmente adequados à produção de adobes e posterior caracterização das amostras. Em seguida foram realizados estudos para definição da consistência ideal para impressão 3D; da trabalhabilidade da mistura; e da relação ideal entre velocidade de impressão e taxa de extrusão. Foram feitas análises do uso de argamassas de terra com a incorporação de fibras dispersas de papel kraft provenientes das embalagens de sacos de cimento, o Kraftterra, bem como de tipos de acabamento.

2.1 Escolha do solo potencialmente adequado á impressão 3D

Como em qualquer das muitas técnicas utilizadas na arquitetura de terra, é de suma importância a escolha de um solo potencialmente adequado para a impressão 3D. Os adobes, por usualmente serem produzidos através de adensamento de argamassa, serviram de referência. Portugal possui alguns sítios onde é possível encontrar solos tradicionalmente utilizados na produção de adobes.

No norte de Portugal é difícil encontrar solos mais adequados. Alguns exemplos podem ser encontrados na região de Bragança e na freguesia de Angueira. Entretanto, no centro e mais ao sul são mais frequentes. Nomeadamente os solos da região de Aveiro (mais arenosos); da Pateira de Fermentelos (mais argilosos); das margens do Rio Lis, que atravessa a Leiria, e da zona rural de Martingança; da região de Tomar, quer junto de linhas de água quer no interior, das margens do Rio Nabão ou de Carvalhos de Figueiredo (mais argiloso); do Ribatejo, das margens do Rio Sorraia, região de Coruche; da margem sul do Rio Tejo no Concelho da Moita e Pinhal Novo, da freguesia do Rosário, Sarilhos Grandes, Sarilhos Pequenos e Pinhal Novo; da margem norte do rio Tejo, em Manique, Concelho de Vila Franca de Xira; e das regiões mais ao sul, do Algarve e regiões próximas.

O solo escolhido foi da região de Melides (38°11'27.499"N 8°40'33.701"W), cerca de 100km ao sul de Lisboa, cerca de 6km da Praia de Melides e cerca de 150km de Lagos, no Algarve. O solo foi retirado de uma movimentação de terra de uma obra em andamento. Solo de coloração amarelada, muito característica da região do Algarve, com cerca de 29% de argila, percentual muito próximo do tradicionalmente recomendado por muitos autores e construtores, que é de 30%.

2.2 Caracterização do solo

Os resultados da caracterização do solo de Melides são os seguintes: análise granulométrica (29,0% de argila; 29% de silte; 39% de areia; 3% de cascalho fino); peso específico (26,6 kN/m³); limite de liquidez - LL (34%); limite de plasticidade - LP (18%); índice de plasticidade (16%); expansibilidade (14,7%).

Foram produzidos adobes com o solo natural, sem correções, e realizados ensaios de compressão simples em 14 adobes (Figura 1), conforme recomendações da ABNT NBR 16814:2020 – Adobe — Requisitos e métodos de ensaio.

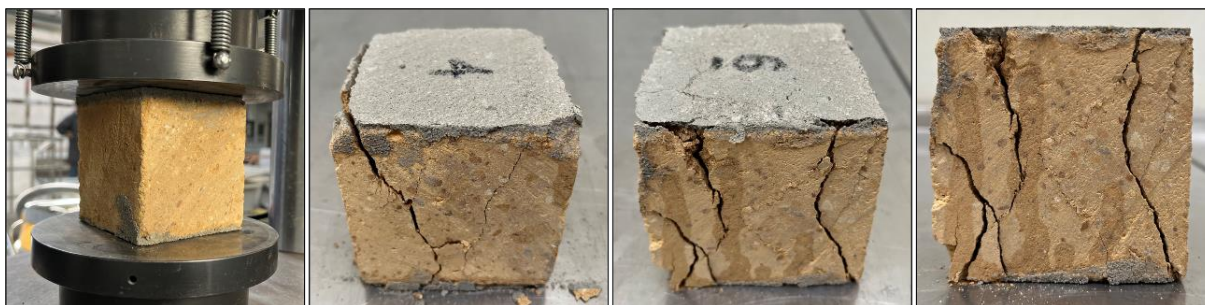


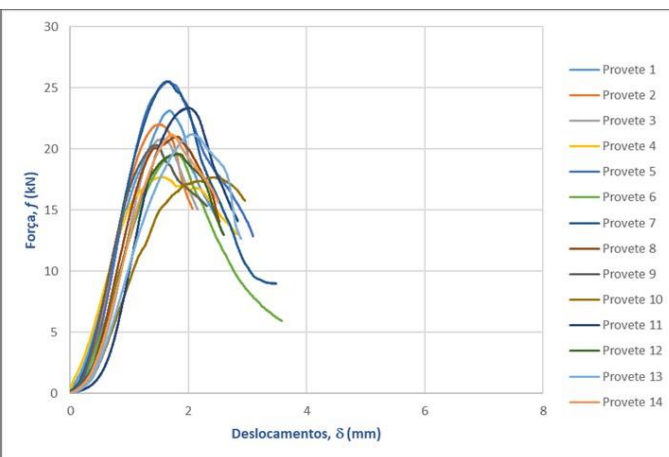
Figura 1 - Ensaios de resistência á compressão simples. Fonte: Autores.

Os adobes produzidos somente com terra e água alcançaram a média de aproximadamente 3,20 Mpa de resistência à compressão simples. Sendo que o provete com desempenho mais alto alcançou 3,88 Mpa e o de mais baixo desempenho alcançou 2,57 Mpa. A referida norma

estipula que os adobes devem ter resistência individual igual ou superior a 1,5 Mpa (Tabela 1). Com estes resultados o uso da amostra de terra de Melides foi validado para verificação da potencialidade do seu uso na impressão 3D com extrusão de argamassa.

Tabela 1 - Ensaio de resistência à compressão simples dos adobes. Fonte: Autores.

ÁREA DE RUPTURA (mm ²)						FORÇA DE RUPTURA F _{rup} (N)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO f _{cd} (Mpa)
CP	a1	a2	b1	b2	A _{rup}		
1	80,75	80,91	86,66	85,05	6.939,66	23150,7249	3,3360029
2	79,50	80,69	80,36	82,62	6.526,94	22016,7138	3,3732053
3	80,70	81,00	79,54	79,02	6.409,79	20881,6208	3,2577709
4	80,63	82,57	79,84	80,96	6.560,64	17701,4552	2,6981293
5	81,00	81,93	79,90	81,41	6.570,56	25544,0041	3,8876452
6	78,33	80,92	80,27	77,80	6.293,16	19612,2609	3,1164399
7	80,88	82,09	82,65	84,70	6.818,26	25558,0634	3,7484744
8	82,98	81,87	80,74	83,18	6.755,55	21021,127	3,1116812
9	85,61	83,96	81,97	82,10	6.955,34	20319,9707	2,9214931
10	84,02	82,97	83,55	81,25	6.879,99	17683,0865	2,5702205
11	83,03	82,78	80,29	82,65	6.794,27	23366,1175	3,4594584
12	81,54	81,20	82,04	80,37	6.607,65	19621,3044	2,9694826
13	81,89	80,17	82,06	79,90	6.561,81	21218,9958	3,2337111
14	82,12	83,60	83,05	81,77	6.828,49	21169,6453	3,1001931
Resistência à Compressão Média (Mpa)						f _{cam}	3,1988506
Desvio-padrão da amostra (Mpa)						S _d	0,3613964
Resistência Característica à Compressão (Mpa)						f _{cdk}	2,6043535



2.3 Análise e definição da consistência adequada da mistura

Em 2022 foi instalada uma impressora 3D de grande porte no Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP. Modelo SMART 2500, fabricado por pela empresa espanhola BE MORE 3D (Figura 2a). Estrutura em pórtico com área efetiva de impressão de 4,5m de comprimento, por 3,0m de largura, por 3,0m de altura. Sistema aberto de inserção de materiais através de um grande funil de aço inoxidável por onde os materiais são depositados, os quais chegam ao funil através de uma mangueira Rondo BD 570psi de diâmetro interno de 2,5cm (Figura 2b) vinda de uma bomba injetora PFT Swing L (Figura 2c). Sistema de rosca sem fim para a extrusão dos materiais (Figura 2d). Sistema de extrusão vertical com bico fixo (Figura 2e). Os bicos de extrusão podem variar de 20mm a 60mm de diâmetro de saída, os quais podem ser utilizados na extrusão de diferentes tipos de materiais, como argamassas cimentícias e argamassas de terra.



Figura 2 - a) Impressora Smart 2500 da BE MORE 3D; b) Sistema aberto de inserção de material; c) Bomba injetora; d) Rosca sem fim; e) Bicos extrusores. Fonte: Autores.

Ao acompanhar diversas impressões 3D na FEUP com argamassas cimentícias foi possível constatar os seguintes fatos: 1) Para volumes pequenos de impressão a bomba injetora não era utilizada, pois exige um preparo de pelo menos 30 litros de material para o alcance do nível mínimo do recipiente da bomba (25 litros) e para o preenchimento de sua mangueira (5 litros), a qual possui diâmetro externo de 3,5cm, diâmetro interno de 2,5cm e comprimento mínimo de 10,0m para atender às características e dimensões da impressora da FEUP. A argamassa era depositada no funil através de baldes plásticos (Figura 3a); 2) Para iniciar qualquer impressão era necessária a preparação de pelo menos 25kg de argamassa para se preencher o funil e bico extrusor; 3) A inserção de material no funil sem o uso da mangueira da bomba injetora é dificultado pelo acesso ao funil ter apenas uma pequena abertura livre (Figura 3b); 4) A argamassa inserida na abertura do funil por diversas vezes ficou acumulada nas laterais menos inclinadas, sendo necessário algum procedimento para seu deslocamento até a área do funil onde se encontra a rosca sem fim; 5) A argamassa que se desloca até as

laterais menos inclinadas do funil, lado oposto ao de entrada, muitas vezes também se acumulava. Como este lado oposto é de difícil acesso (Figura 3c), a argamassa depositada ali frequentemente seca e endurece, gerando desperdício e dificultando o serviço de limpeza ao final das impressões.



Figura 3 - a) Inserção de material no funil com o uso de baldes; b) Pequena abertura livre para inserção de material; c) Lado oposto do funil de difícil acesso. Fonte: Autores.

Como os adobes foram os escolhidos como referência, iniciamos os estudos de consistência tendo como base uma mistura de terra e água a mais parecida com a que usualmente se utiliza na produção de adobes. A terra foi seca ao sol e depois armazenada em big-bags no piso inferior do Laboratório de Estruturas da FEUP, em sítio protegido das intempéries. A mistura base foi feita com as mãos em pequena escala, numa gamela de 35 litros, com a proporção de 1kg de solo para 250ml de água, o que resultou numa mistura com teor de umidade médio (w) de 24,5%. Foram produzidos alguns adobes com dimensões 20x20x10cm e a mistura se mostrou adequada e muito semelhante à que usualmente se utiliza na produção de adobes. Os adobes produzidos não apresentaram fissuras e resultaram em produtos de excelente aspecto visual e boa regularidade dimensional.

Para as análises comparativas das consistências foi utilizada uma pistola de argamassa para rejuntas com bico de extrusão de 35mm, mesma bitola do bico de extrusão da impressora de grande porte. Esta pistola foi acoplada em uma impressora 3D manual projetada e produzida pelos autores (Figura 4).



Figura 4 - Modelo eletrônico e impressora 3D manual. Fonte: Autores.

Variou-se a quantidade de água por quilo de solo em 50ml, para menos e para mais. Com menor quantidade de água o processo de extrusão foi dificultado, sendo necessário aplicar muito mais força na pistola para a extrusão da argamassa de terra, bem como foi possível perceber o surgimento de vazios nos cordões extrudidos. Motivo que qual foi descartada a utilização de uma quantidade menor de água na mistura que a da proporção da mistura base.

Com a adição de mais água, a mistura ficou com consistência mais fluida e o processo de mistura foi mais rápido e mais fácil. Os cordões de argamassa ficaram com bom aspecto e a extrusão exigiu a aplicação de forças menores comparadas às necessárias com a amostra base.

A seguir, passou-se para a etapa de produção de provetes com a sobreposição de dez camadas de cordões extrudidos, cada uma com 1,5cm de espessura. Os provetes com a amostra base praticamente não sofreram abatimento ou esmagamento nas camadas, apresentando ao final da impressão a altura total de 14,975cm (Figura 5 esq.). Já os provetes com mistura com 100ml de água a mais por quilo de solo apresentaram abatimento de aproximadamente 0,3cm (Figura 5 dir.).



Figura 5 - Na esquerda, medição do abatimento com amostra base. Na direita, medição do abatimento com maior quantidade de água na mistura. Fonte: Autores.

Pelo exposto anteriormente, decidiu-se utilizar a consistência da amostra base, a mesma utilizada na produção dos adobes, para a impressão com a impressora de grande porte.

2.4 Trabalhabilidade da mistura base

Iniciou-se a produção em maior escala da mistura de terra com a consistência da amostra base com um misturador horizontal utilizado na produção de argamassas de cimento. O processo de mistura em si foi bastante eficiente e rápido. Entretanto a consistência da mistura base não permitiu que o material fosse despejado pela pequena abertura inferior do misturador. Praticamente todo o material teve que ser retirado do misturador manualmente, o que resultou em perda de tempo e excessivo gasto de energia física. O processo final de limpeza também foi demorado e exigiu muito esforço físico para retirar todo o material dos vários cantos presentes nas pás do misturador (Figura 6a).

Optou-se pelo uso de outros dispositivos, um misturador elétrico manual e um balde plástico de 42 litros (Figura 6b). Desta vez a produção em uma maior escala da mistura de terra com a consistência da amostra base foi de fácil execução. Foi utilizado um misturador elétrico manual de haste individual, marca RUBIMIX modelo 9N, haste do tipo multimaterial com rosca M14, utilizada para mistura de argamassas e outros materiais de alta densidade e baixa fluidez (Figura 6c). Ao final, o processo de limpeza foi muito rápido e não exigiu esforços físicos. Com jatos de água de média pressão foi possível retirar quase todo o material.



Figura 6 - a) Misturador de argamassa de cimento com a mistura base de terra; b) Misturador elétrico manual Rubimix 9N e balde; c) Misturador elétrico manual a trabalhar. Fonte: Autores.

A mistura base, a mesma utilizada para a produção dos adobes, se adaptou muito bem ao processo de extrusão da impressora 3D de grande porte. A argamassa de terra foi extrudida sem dificuldades pelo bico extrusor, cordões contínuos e sem a formação de bolhas ou vazios. A consistência da amostra base teve excelente desempenho ao produzir cordões impressos contínuos e com dimensões bem regulares e constantes.

2.5 Relação entre velocidade de impressão e fator de extrusão

A impressora 3D da FEUP possui sistema de extrusão vertical e bico de extrusão fixo, o que faz com que os materiais extrudidos ao entrarem em contato com as superfícies de suporte tenham a tendência a ser lançados em todas as direções. Isso ocorre até mesmo quando as larguras dos cordões são iguais ao diâmetro do bico extrusor.

As diferentes Relações entre Velocidade de Extrusão e Fator de Extrusão (RVEFE) possibilitam controlar as larguras finais dos cordões de impressão e das paredes, bem como as forças verticais aplicadas pelo processo de extrusão quando da sobreposição de camadas, o que pode gerar ou não abatimento das camadas inferiores, uma vez que a força de extrusão será diretamente proporcional ao aumento da largura do cordão de impressão a mais que o diâmetro de saída do bico extrusor.

A argamassa de terra ao ser extrudida com RVEFE que produz cordões mais largos que o diâmetro de saída do bico extrusor costuma apresentar acabamentos com textura menos lisas e com certa descontinuidade de material. Tal comportamento pode ser encontrado em diferentes estudos de impressão 3D com argamassas de terra (BHUSAL, ET AL., 2022; FERETTI, ET AL., 2022; GOMAA, ET AL., 2021; SILVA, ET AL., 2022).

Com diferentes tipos de impressoras e bicos extrusores móveis é possível imprimir argamassas de terra com acabamento bem liso. Por exemplo, Perrot, et al (2018) utilizaram um braço robótico e um bico extrusor inclinado. O bico extrusor caminha à frente e seguindo o eixo do cordão de impressão fazendo com que a argamassa impressa se acomodasse nas camadas de suporte proporcionando o mínimo de forças verticais, praticamente o peso próprio. O material não era extrudido para todos os lados e somente na direção do cordão a ser impresso.

Com bicos de extrusão fixos e na vertical, quando a RVEFE produz cordões de extrusão com mesma largura que o diâmetro de saída do bico extrusor ocorre uma tendência dos cordões de impressão terem acabamento liso e sem descontinuidade de material.

Foram testadas várias RVEFE, sempre com o bico extrusor com saída de 35mm de diâmetro, tanto com argamassas de terra quanto com argamassas de Kraftterra. Com os dois tipos de argamassa as RVEFE produziram cordões com acabamentos bem similares. Sendo que o acabamento mais liso foi conseguido com a argamassa de terra quando se utilizou uma RVEFE que produziu um cordão de impressão com largura igual ao da saída do bico extrusor e com uma VE bem reduzida (Figura 7).



Figura 8 - Impressão com acabamento liso. Foi utilizada RVEFE que produziu cordões de extrusão com mesma largura que o diâmetro de saída do bico extrusor. Fonte: Autores.

As RVEFE devem ser definidas para cada tipo de argamassa e consistência. Os produtos finais podem variar até com alterações climáticas de temperatura e umidade relativa do ar. Todas as impressões realizadas nessa pesquisa foram feitas no verão e em Porto, Portugal, com temperaturas que variavam entre 23°C e 26°C e umidade relativa do ar sempre próximo dos 70%.

3 DESEMPENHO DA ARGAMASSA DE TERRA NA IMPRESSÃO 3D

As impressões com a argamassa de terra produziram elementos construtivos seguindo corretamente as dimensões e geometria dos seus modelos eletrônicos, estáveis e sem abatimentos ou esmagamento perceptíveis nas camadas. Os primeiros modelos impressos com a mistura base, terra e água acabaram por apresentar várias fissuras verticais, decorrentes da retração, em várias regiões já no primeiro dia após a impressão. Nos dias subsequentes as fissuras aumentaram e chegaram a separar algumas das partes dos protótipos (Figura 9). Tal situação já era esperada, embora os adobes produzidos com a mesma argamassa, mesmo percentual de água e mesma consistência não tenham apresentado fissuras. As paredes desses primeiros provetes, com cerca de 3,5cm de

espessura, eram bem mais finas que as dimensões dos adobes, cuja menor dimensão era de 10,0cm, a secagem ocorreu com maior rapidez, o que provocou a elevada retração.

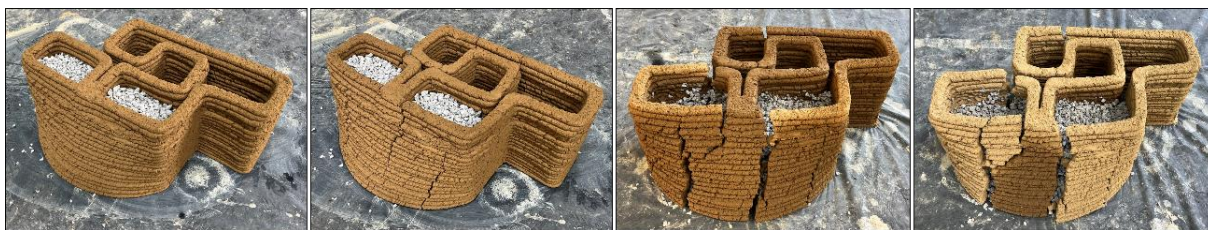


Figura 9 - a) Parede impressa com amostra base logo após impressão; b) Um dia após impressão; c) Dois dias após impressão; d) Três dias após impressão. Fonte: Autores.

Segundo Ramezani, et al. (2023), os efeitos da retração também são considerados na impressão 3D com argamassa de cimento. As fibras que podem ser utilizadas como reforços na impressão 3D com argamassa de cimento são as de aço, carbono, vidro, álcool polivinílico (PVA), polietileno (PE) e polipropileno (PP).

Na arquitetura de terra é usual a utilização de fibras naturais como estabilizantes e para se combater a retração. O uso de fibras naturais para estabilizar o material a ser impresso e combater a retração estava previsto nos procedimentos metodológicos. Passou-se portanto, a analisar o desempenho da terra com a incorporação de fibras dispersas do papel kraft multifoliado provenientes das embalagens de sacos de cimento, o Kraftterra.

4 DESEMPENHO DA ARGAMASSA DE KRAFTTERRA NA IMPRESSÃO 3D

O bom desempenho do Kraftterra foi apresentado em 2009 com uma proporção ideal das fibras na mistura sendo de 6% em massa (BUSON, 2009).

Para dispersão das fibras do papel kraft proveniente das embalagens de sacos de cimento foi utilizado um misturador elétrico manual Rubimix 9N, com haste com ponta adaptada com chapas dentadas de aço inoxidável produzidas no Laboratório de Estruturas da FEUP (Figura 10abc), e um triturador de jardinagem Bosch AXT Rapid 2000 (Figura 10d). Todo o procedimento para a dispersão das fibras seguiu as recomendações que se encontram na tese de doutorado de Buson (2009).



Figura 10 - a) Misturador elétrico manual com haste adaptada; bc) Detalhe da haste de aço inoxidável para dispersão de fibras de papel; d) Triturador de jardinagem; e) Fibras dispersas provenientes da reciclagem das embalagens de sacos de cimento. Fonte: Autores.

A mistura do Kraftterra adequada para a produção de adobes, por conta da adição das fibras dispersas na mistura, necessita receber um pouco mais de água que a mistura somente com terra. Para cada 1kg de terra são necessários 60g de fibras e 333ml de água. O teor de umidade da mistura de Kraftterra com as referidas proporções foi de 36,87%. O volume de 6% em massa das fibras se aproxima da metade do volume de terra a ser acrescentado na mistura de Kraftterra.

As impressões com a argamassa de Kraftterra produziram elementos construtivos seguindo corretamente as dimensões e geometria dos seus modelos eletrônicos, estáveis e sem

abatimentos ou esmagamento nas camadas. Não apresentaram nenhuma fissura ou qualquer outra patologia no período de cura e secagem.

As retrações foram bastante minimizadas ou mesmo eliminadas. As dimensões ao final da impressão praticamente se mantiveram iguais após a secagem e ganho de resistência.

O trabalho com a argamassa de Kraftterra é um pouco mais facilitado que com a argamassa de terra. A maior quantidade de água na mistura associada à presença das fibras produz uma argamassa coesa e com boa consistência, um pouco mais pastosa que a argamassa produzida somente com a terra. Por sua vez, as fibras dispersas do papel kraft provenientes da reciclagem de sacos de cimento, as quais têm em média 12mm de comprimento, se incorporam muito bem à terra e não dificultam ou atrapalham o processo de impressão.

5 TIPOS DE ACABAMENTO COM PAREDES IMPRESSAS DE KRAFTTERRA

Foram produzidas duas paredes em “L” com o Kraftterra. Dimensões similares no eixo de extrusão: 60,0cm de comprimento no lado maior, 40,0cm no lado menor e 20,0cm nas laterais. Altura de 30,0cm com 20 camadas com 15mm de espessura.

Para as duas paredes foi utilizado o bico extrusor com diâmetro de saída de 35mm. A primeira parede foi impressa com VE de 22mm/s e FE de 30 e os cordões de impressão ficaram com 5,5cm de largura. A segunda parede foi impressa com VE de 40mm/s e FE de 40 e ficou com 7,5cm de largura. As duas não apresentaram nenhuma fissura durante o período de secagem e ganho de resistência.

A primeira ficou com acabamento conforme impressão e a segunda recebeu um acabamento liso produzido com uma simples colher de pedreiro. Esse acabamento foi feito sem adição de qualquer material e foi realizado um dia após a impressão. O uso de desempenadeiras de aço poderia produzir um acabamento ainda mais liso e uniforme (Figura 11).



Figura 10 - Tipos de acabamento, textura impressa e liso. Fonte: Autores.

O processo de alisamento da parede foi de fácil e rápida execução. Um dia após a impressão a parede já havia secado um pouco e apresentava boa estabilidade e ganho de resistência. Entretanto suas superfícies ainda estavam maleáveis e com boa trabalhabilidade. A coloração amarelada da parede foi ressaltada e o acabamento produzido somente com uma colher de pedreiro umedecida para além de proporcionar um bom alisamento acabou por produzir um agradável brilho às superfícies.

Aparentemente o material extrudido para as laterais durante a impressão pode ser considerado como um reboco a ser alisado posteriormente. Desta forma, quando a opção for por paredes com acabamento liso já se pode eliminar uma etapa da obra, nomeadamente, a aplicação do reboco.

Após a impressão de outra parede em “L” com o Kraftterra aguardou-se três dias para a realização do processo de alisamento das superfícies externas, também com a utilização de uma colher de pedreiro. Com três dias após a impressão as superfícies abauladas das camadas de impressão ainda estavam maleáveis e o processo de alisamento continuou a ser de rápida e fácil execução.

6 CONCLUSÕES

Após os estudos e análises é possível afirmar que o solo de Melides é bastante adequado à produção de elementos construtivos, tanto com a técnica do adobe quanto com a impressão 3D com extrusão de argamassa.

Também é possível afirmar que o solo de Melides apresentou excelente trabalhabilidade na impressão 3D com a mesma consistência e mesmo percentual de água utilizados nas misturas para a produção de adobes, tanto em misturas que continham somente o solo natural quanto nas misturas com a incorporação de fibras dispersas provenientes da reciclagem do papel kraft das embalagens dos sacos de cimento, o Kraftterra.

Na impressão 3D foi possível constatar fissuras durante o período de secagem e ganho de resistência em alguns dos elementos construtivos produzidos apenas com o solo natural, principalmente quando as larguras das camadas de impressão eram mais finas, com cerca de 3,5cm. Com larguras maiores a ocorrência de fissuras foi menor, tanto em número quanto nas dimensões.

A incorporação de fibras dispersas provenientes dos sacos de cimento potencializou o uso da argamassa de terra em todo o processo de impressão 3D com extrusão de argamassa. O Kraftterra apresentou boa trabalhabilidade e excelente construtibilidade, tanto com a bomba de injeção quanto com a impressora 3D de grande porte.

Com o trabalho é possível reforçar e reafirmar que a impressão 3D com argamassa de terra tem grande potencial de uso na construção civil, bem como que a incorporação de fibras dispersas de papel kraft provenientes da reciclagem dos sacos de cimento é um excelente recurso para se alcançar boa construtibilidade na impressão 3D com argamassa de terra.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como ressaltado anteriormente, esses foram os primeiros estudos e trabalhos realizados na FEUP com a impressão 3D de argamassa de terra. Há muito para se estudar e analisar para se alcançar adequada, correta e segura utilização da terra em processos de impressão 3D.

Para trabalhos futuros são sugeridos estudos e análises para compreender melhor a relação entre velocidade de impressão e fator de extrusão no uso de argamassas de terra na impressão 3D, uma vez que essa relação afeta diretamente o tempo de produção e de impressão de uma obra, bem como na homogeneidade dos elementos construtivos.

O uso de estabilizantes, como o cimento, a cal e as fibras, devem fazer parte de estudos e análises futuras para se garantir a produção de edificações de qualidade, com eficiência energética, seguras e duráveis.

Nesse trabalho inicial foram impressas paredes com até 30cm de altura. Portanto, deve ser estudado todo o processo de produção dos elementos construtivos de vedação com alturas usualmente utilizadas nas edificações. Também se fazem necessários estudos e análises para se definir como ocorre a relação entre os demais sistemas das construções impressas.

Estudos e análises para caracterização das propriedades físico-mecânicas devem ser realizados visando não somente a definição de desempenho dos elementos construtivos, mas também a normalização dos procedimentos.

A produção de protótipos e análises pós-ocupacionais são essenciais para se compreender o comportamento e o desempenho das edificações em seus períodos pós-construção, principalmente nos primeiros anos de uso e manutenção. Bem como servem para caracterizar e qualificar a eficiência energética em uso e comparar com as simulações utilizadas em fase de projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 16814 – Adobe – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2020. ISBN 978-85-07-08397-9. ICS 91.080.30

BHUSAL, S.; UVIÑA, F.; HOJATI, M. Preliminary study on 3d printing of locally available earthen materials in New Mexico. Publicação eletrônica no ResearchGate, 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/365945674>. Acessado em Julho 2023.

BUSON, M. Kraftterra: Desenvolvimento e análise preliminar do desempenho técnico de componentes de terra com a incorporação de fibras de papel kraft provenientes da reciclagem de sacos de cimento para vedação vertical. Brasília: PPG/FAU/UnB, 136 p.: 63 il. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, 2009. <https://repositorio.unb.br/handle/10482/5993>

FERRETTI, E.; MORETTI, M.; CHIUSOLI, A.; NALDONI, L.; DE FABRITIIS, F.; VISONÀ, M. Mechanical Properties of a 3D-Printed Wall Segment Made with an Earthen Mixture. Materials 2022, 15, 438. <https://doi.org/10.3390/ma15020438>

GOMAA, M.; JABI, W.; REYES, A. V.; SOEBARTO, V. 3D printing system for earth-based construction: Case study of cob. Automation in Construction, 2021, Volume 124, ISSN 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103577>

LESOVIK, V.; TOLSTOY, A.; FEDIUK, R.; AMRAN, M.; ALI, M.; DE AZEVEDO, A.R.G. Improving the Performances of a Mortar for 3D Printing by Mineral Modifiers. Buildings 2022, 12, 1181. <https://doi.org/10.3390/buildings12081181>

PERROT, A.; RANGEARD, D.; COURTEILLE, E. 3D printing of earth-based materials: Processing aspects. Construction and Building Materials, 2018, Volume 172, Pages 670-676. ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.017>

SILVA, G.; ÑAÑEZ, R.; ZAVALA, D.; BURGOS, V.; KIM, S.; RUIZ, G.; PANDO, M. A.; AGUILAR, R.; NAKAMATSU, J. Eco-friendly additive construction: Analysis of the printability of earthen-based matrices stabilized with potato starch gel and sisal fibers. Construction and Building Materials, 2022, Volume 347, ISSN 0950-0618 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128556>

SONEBI, M.; ABDALQADER, A.; AMZIANE, S.; DVORKIN, L.; GHORBEL, E.; KENAI, S.; KHATIB, J.; LUSHNIKOVA, N.; PERROT, A. Trends and Opportunities of Using Local Sustainable Building Materials in the Middle East and North Africa Region. RILEM Tech Lett 2022, 7, 127-138. DOI: <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2022.169>.

AUTORES

Márcio Albuquerque Buson, pós-doutorado em tecnologia da construção (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2023 e 2015-16); doutor em tecnologia da construção, mestre em tecnologia da arquitetura, arquiteto, professor associado no Departamento de Tecnologia da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília. Desenvolve pesquisas e trabalhos com a Arquitetura de Terra, Impressão 3D e Reciclagem de Resíduos Sólidos.

Humberto Salazar Amorim Varum, Professor Catedrático da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Doutor em Engenharia Civil pela Universidade de Aveiro. Mestre em Estruturas de Engenharia Civil e Licenciatura em Engenharia Civil na FEUP, Portugal. Desenvolve pesquisas e trabalhos com avaliação, reabilitação e reforço de estruturas; ensaios em estruturas; simulação do comportamento de estruturas; risco sísmico; reforço sísmico; construções em terra; e aplicabilidade da impressão 3D nas construções. É co-autor de mais de 350 publicações em conferências e revistas internacionais.

Marco Antônio Penido de Rezende, pós-doutorado em arquitetura vernácula (*University of Oregon*, EUA, 2010); doutor em construção civil; mestre em arquitetura; arquiteto; professor titular no departamento de tecnologia da arquitetura e urbanismo, escola de arquitetura, UFMG; membro do conselho consultivo da Rede Ibero-Americana PROTERRA e da Rede TerraBrasil. Currículo completo em <http://lattes.cnpq.br/8413549938151614>.