



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CAMPUS DE CRATEÚS

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

FRANCISCO DAVID MARTINS VIEIRA

**CARACTERIZAÇÃO DE MASSA DE TERRA CRUA PARA EXTRUSÃO
EM IMPRESSORA 3D**

CRATEÚS

2026

FRANCISCO DAVID MARTINS VIEIRA

CARACTERIZAÇÃO DE MASSA DE TERRA CRUA PARA EXTRUSÃO
EM IMPRESSORA 3D

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de graduação em Engenharia Civil do campus
Crateús da Universidade Federal do Ceará como
requisito parcial à obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Heloína Nogueira da Costa

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

V715c Vieira, Francisco David Martins.
Caracterização de massa de terra crua para extrusão em impressora 3D / Francisco David Martins Vieira. –
2026.
74 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,
Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2026.
Orientação: Profa. Dra. Heloína Nogueira da Costa.

1. Terra crua . 2. Impressão 3D. 3. Caracterização do solo. 4. Extrusão. 5. Sustentabilidade. I. Título.
CDD 620

FRANCISCO DAVID MARTINS VIEIRA

CARACTERIZAÇÃO DE MASSA DE TERRA CRUA PARA EXTRUSÃO EM
IMPRESSORA 3D

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de graduação em Engenharia Civil do campus
Crateús da Universidade Federal do Ceará como
requisito parcial à obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil.

Aprovada em: __/__/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Heloína Nogueira da Costa (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antonio Eduardo Bezerra Cabral
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Zezinho e Dalveci.

Ao meu irmão, Dênis.

A mim, Francisco David.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre permaneceu do meu lado, guiando meus passos, me dando força nos momentos difíceis e desafiadores e fortalecendo minha fé durante toda essa longa jornada..

A minha família, minha mãe Dalveci por todas as noites durante esses anos de faculdade que chegava sua ligação preocupado comigo, por nunca ter me deixado passar por nenhuma dificuldade sozinho, sempre do meu lado. Ao meu pai, que foi o durão do coração mais bondoso que já conheci, sempre pegando no meu pé, mas sempre do meu lado, me apoiando, me mostrando o caminho do bem, brigando e aconselhando ao mesmo tempo. Ao meu irmão Dênis, meu irmãozinho, a quem sem dúvidas eu atravessaria qualquer problema para vê-lo bem, sempre me ligando para saber se estava tudo certo, como tava indo na faculdade, saibam que isso tudo foi por vocês.

Aos meus avós maternos e paternos, que nunca mediram esforços em me ajudar, Manoel e Francimar me permitiram morar durante 3 anos com vocês quando estava cursando o Ensino Médio, José e Helena pessoas com quem eu passei todos os meus anos de vida do lado, meu avô sempre me livrando das broncas, minha avó sempre me puxando orelha e dando conselhos sobre a vida, hoje você não está mais presente em vida, mas sei que de onde você está, sempre estará vibrando com minhas conquistas, saiba que essa conquista vai ser dedicada a você.

A todos os familiares e amigos tanto os que cresci convivendo quando os que tive a oportunidade de conhecer na faculdade em especial Gildezio, Matheus, Luan, Haniel, Emerson, Guilherme, Leonardo, Roberto e Cauet que estiveram presentes durante todos esses anos de caminhada, de muito estudo, agradeço a todos vocês por todos os momentos, juntos nas conquistas e nos dias difíceis, a trajetória com vocês foi sensacional. A minha orientadora Heloína Nogueira, a quem eu fui aluno, bolsista durante dois anos e tive a oportunidade de ser seu orientando, professora muito dedicada, gentil e nunca mediu esforços em me ajudar, obrigado por tudo. Ao meu amigo Vanutti, por ter me ajudado durante esse processo de escrita do trabalho, sempre me dando orientações, tirando minhas dúvidas, gratidão a você meu amigo por toda a ajuda.

Por fim, a mim David, por nunca desistir dos meus sonhos e apesar das dificuldades que encontrei nessa jornada, sempre permaneci otimista, com fé e dedicado em todos os momentos.

“É justo que muito custe o que muito vale.”

Santa Teresa D'Ávila

RESUMO

A impressão 3D por extrusão com terra crua direcionada à construção civil, se comporta como uma tecnologia emergente com potencial de diminuir impactos ambientais, pela capacidade de aproveitamento de materiais naturais e por reduzir o uso de insumos industrializados. Portanto, o objetivo deste estudo é a caracterização de solos naturais para a formulação de massas de terra crua com capacidade para aplicação em processos de impressão 3D por extrusão. Os solos estudados foram coletados na cidade de Crateús – CE e analisados de forma individual e combinados em diferentes proporções, realizou-se ensaios de caracterização granulométrica e estudo da plasticidade das massas. Os resultados obtidos destacaram comportamentos distintos entre os solos analisados. O solo A demonstrou caráter argiloso, com cerca de 29,9% de argila, 12,4% de silte, limite de liquidez (LL) de 42% e índice de plasticidade (IP) de 16%. O solo B apresentou predominância arenosa, com 48,7% de areia, baixos teores de finos 8,4% de argila e 7,6% de silte, LL de 16% e inexistência de plasticidade. Logo, foi realizada a combinação dos dois materiais e elaborada uma mistura composta por 35% do solo argiloso e 65% do arenoso, composição que resultou em uma massa adequada, com 45,3% de areia, 18% de argila, 11,8% de silte, LL de 25% e IP de 9%, valores que estão dentro das faixas recomendadas pela literatura e compatíveis com as exigências do processo extrusão. O ensaio de consistência da mistura apresentou espalhamento de 17,96cm, valor que enquadra o solo em uma faixa intermediária de consistência, indicando equilíbrio entre deformação e estabilidade dimensional. Referente ao ensaio de extrusão, o material permitiu a formação de filamentos contínuos com melhor aspecto após extrusão para o bico de 24 mm. No ensaio de resistência à compressão foi obtido valores de 1,62 MPa aos 7 dias e 1,83 MPa aos 28 dias, comportamento comum a materiais a base de terra crua, que demonstram resistência mecânica limitada. O estudo contribuiu para o entendimento da atuação de solos naturais direcionados a utilização na manufatura aditiva, enfatizando o potencial da terra crua como alternativa construtiva sustentável, além de fornecer informações técnicas para o desenvolvimento de misturas adequadas para essa tecnologia.

Palavras-chave: Terra crua; Impressão 3D; Caracterização do solo; Extrusão; Sustentabilidade.

ABSTRACT

3D printing by raw earth extrusion for the construction industry is emerging as a technology with the potential to reduce environmental impacts by using natural materials and decreasing the consumption of industrialized inputs. Therefore, this study aims to characterize natural soils for the formulation of raw earth mixtures suitable for application in extrusion-based 3D printing processes. The soils were collected in the city of Crateús, Ceará, Brazil, and analyzed individually and in combination at different proportions. Granulometric characterization tests and plasticity analyses were performed. The results revealed distinct behaviors between the analyzed soils. Soil A exhibited a clayey character, with approximately 29.9% clay and 12.4% silt, a liquid limit of 42%, and a plasticity index of 16%. Soil B showed predominantly sandy behavior, with 48.7% sand, low fines content (8.4% clay and 7.6% silt), a liquid limit of 16%, and no plasticity. The combination of the two materials resulted in a mixture composed of 35% clayey soil and 65% sandy soil. The final mixture presented 45.3% sand, 18% clay, and 11.8% silt, with a liquid limit of 25% and a plasticity index of 9%, values within the ranges recommended in the literature and compatible with extrusion process requirements. The consistency test of the mixture showed a spread diameter of 17.96 cm, placing the material within an intermediate consistency range and indicating a balance between deformability and dimensional stability. In the extrusion test, the material enabled the formation of continuous filaments, with the best geometric performance observed using the 24 mm nozzle. Compressive strength tests yielded values of 1.62 MPa at 7 days and 1.83 MPa at 28 days, which is characteristic of raw earth-based materials that exhibit limited mechanical strength. The study contributes to the understanding of the use of natural soils in additive manufacturing, highlighting the potential of raw earth as a sustainable construction alternative and providing technical support for the development of mixtures suitable for this technology.

Keywords: Raw earth; 3D printing; Soil characterization; Extrusion; Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Edificação construída com terra crua	19
Figura 2 - Técnicas de construção com terra	20
Figura 3 - Habitação antiga com parede exterior em pedra no piso inferior, seguida de parede em tabique no andar superior.....	21
Figura 4 - Parede de tabique moderna	22
Figura 5 - Taipal e pilões para produção de paredes de taipa	22
Figura 6 - Contraforte construído em uma casa feita de taipa	23
Figura 7 - Parede executada de taipa em uma edificação moderna	23
Figura 8 - Blocos de adobe	24
Figura 9 - Construção de paredes em adobe, sobre uma fundação em tijolo cerâmico	24
Figura 10 - Cidade de Shibam, Lêmen	25
Figura 11 - Pueblo de Taos, Novo México	26
Figura 12 - Edificação de terra crua construída por impressão 3D.....	29
Figura 13 - 13a) Solo A; 13b) Solo B	30
Figura 14 - 14a) Análise visual dos dois tipos de solos; 14b) Análise de dispersão em água.....	31
Figura 15 - Material utilizado para ensaios de granulometria da fração grossa, fração fina e sedimentação.....	31
Figura 16 - 16a) Aparelho dispersor utilizados no ensaio; 16b) Proveta com os materiais; 16c) Copo de dispersão	32
Figura 17 - Material retido na peneira de abertura de 0,075 mm 17a) Solo A; 17b) Solo B.....	33
Figura 18 - Material retido na peneira de 2 mm submetido a lavagem 18a) Solo A; 18b) Solo B	33
Figura 19 - Solos utilizados nos ensaios de determinação do limite de liquidez e plasticidade....	34
Figura 20 - 20a) Solo A na concha de Casagrande após os golpes; 20b) Solo B após a retirada do material para a estufa	35
Figura 21 - Realização do ensaio do limite de plasticidade 21a) Solo A; 21b) Solo B.	36
Figura 22 - Picnômetros em banhos de água a temperatura ambiente.....	36
Figura 23 - Solos utilizados nos procedimentos 23a) Solo A; 23b) Solo B	38

Figura 24 - 24a) Mistura dos dois tipos de solo; 24b) Material usado na granulometria da fração fina; 24c) Material usado na granulometria da fração grossa	38
Figura 25 - Ensaio de sedimentação da mistura.....	39
Figura 26 - Densidade real dos solos da mistura	39
Figura 27 - 27a) Ensaio do Limite de liquidez; 27b) Ensaio do Limite de Plasticidade	39
Figura 28 - Mesa de consistência.....	40
Figura 29 - Pistola de extrusão.....	40
Figura 30: Rompimento do corpo de prova	41
Figura 31 - Resultado da análise tátil-visual do solo: 31a) Solo analisado; 31b) Testa da bola; 31c) Teste de desagregação; 31d) Teste de dispersão em água.	42
Figura 32 - Curva de distribuição granulométrica	44
Figura 33- Gráfico do limite de liquidez.....	45
Figura 34 - Resultado da análise tátil-visual do solo: 34a) Solo analisado; 34b) Testa da bola; 34c) Teste de desagregação; 34d) Teste de dispersão em água.	48
Figura 35 - Curva de distribuição granulométrica	49
Figura 36 - Gráfico do Limite de liquidez	50
Figura 37 - Curva de distribuição granulométrica	53
Figura 38 - Gráfico do Limite de liquidez	54
Figura 39 - Ensaio de consistência e plasticidade da mistura 39a) Material colocado no cone; 39b) Após a retirada do cone; 39c) Após o espalhamento.....	56
Figura 40 - Ensaio de extrusão 40a) Material extrudado no bico de 42 mm; 40b) Material extrudado no bico de 24 mm; 40c) Extrudado no bico de 16 mm.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo do diagrama, dividido pelas 3 grandes famílias e tipos de construção	20
Tabela 2 - Composição granulométrica ideal de acordo com a literatura.....	27
Tabela 3 – Percentuais passantes e composição granulométrica da mistura obtida a partir dos solos A e B.....	37
Tabela 4 - Resumo da granulometria do solo	43
Tabela 5 - Resultados do limite de plasticidade do Solo	46
Tabela 6 - Resultados da densidade real dos solos	47
Tabela 7 - Resumo da granulometria do solo	48
Tabela 8 - Resultados da densidade real dos solos	51
Tabela 9 - Resumo da granulometria da mistura	52
Tabela 10 - Resultados do limite de plasticidade da mistura.....	55
Tabela 11 - Resultados da densidade real da mistura	56
Tabela 12 - Resistência à compressão aos 7 e 28 dias	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFC	Universidade Federal do Ceará
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UNESCO	Organização da Nações Unidas para Educação Ciência e Cultura
FUCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Objetivo Geral.....	17
1.2 Objetivos Específicos	18
1.3 Estrutura do trabalho.....	18
2 CONSTRUÇÃO COM TERRA	19
2.1 Técnicas construtivas com terra	21
<i>2.1.1 Tabique.....</i>	<i>21</i>
<i>2.1.2 Taipa de pilão.....</i>	<i>22</i>
<i>2.1.3 Adobe.....</i>	<i>23</i>
2.2 Construções de terra pelo mundo.....	24
2.3 Vantagens da construção com terra crua	26
2.4 Terra crua para impressão 3D.....	26
2.5 Edificações de terra crua por impressão 3D.....	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1 Materiais	30
<i>3.1.1 Caracterização do solo.....</i>	<i>30</i>
<i>a. Análise tátil visual.....</i>	<i>30</i>
<i>b. Análise Granulométrica dos solos</i>	<i>31</i>
<i>I. Sedimentação</i>	<i>32</i>
<i>II. Peneiramento Fino.....</i>	<i>32</i>
<i>III. Peneiramento Grosso</i>	<i>33</i>
<i>c. Classificação dos Solos.....</i>	<i>34</i>
<i>d. Ensaio para determinar os limites de liquidez e plasticidade dos solos.....</i>	<i>34</i>
<i>I. Limite de Liquidez.....</i>	<i>34</i>
<i>II. Limite de Plasticidade</i>	<i>35</i>
<i>e. Determinação da Densidade Real do Solos.....</i>	<i>36</i>
<i>3.1.2 Composição da massa de terra crua para impressão 3D.....</i>	<i>37</i>
<i>3.1.3 Análise da massa de terra crua para extrusão.....</i>	<i>39</i>

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1 Caracterização do solo A.....	42
<i>4.1.1 Análise tátil-visual.....</i>	<i>42</i>
<i>4.1.2 Ensaio de granulometria da fração grossa, fração fina e sedimentação</i>	<i>43</i>
<i>4.1.3 Ensaio dos limites de liquidez e plasticidade do solo</i>	<i>45</i>
<i>4.1.4 Ensaio de densidade real dos solos.....</i>	<i>47</i>
4.2 Caracterização do solo B	47
<i>4.2.1 Análise tátil-visual.....</i>	<i>47</i>
<i>4.2.2 Ensaio de granulometria da fração grossa, fração fina e sedimentação</i>	<i>48</i>
<i>4.2.3 Ensaio dos limites de liquidez e plasticidade do solo</i>	<i>50</i>
<i>4.2.4 Ensaio de densidade real dos solos.....</i>	<i>51</i>
4.3 Caracterização da mistura de terra crua.....	52
<i>4.3.1 Ensaio de granulometria da fração grossa, fração fina e sedimentação</i>	<i>52</i>
<i>4.3.2 Ensaio dos limites de liquidez e plasticidade da mistura</i>	<i>54</i>
<i>4.3.3 Ensaio de densidade real da mistura.....</i>	<i>56</i>
<i>4.3.4 Análise da consistência e plasticidade da massa terra crua.....</i>	<i>56</i>
<i>4.3.5 Teste de Extrusão</i>	<i>57</i>
<i>4.3.6 Ensaio de resistência à compressão</i>	<i>59</i>
5 CONCLUSÃO	60
<i>5.1 Limitações do trabalho.....</i>	<i>60</i>
<i>5.2 Recomendações de trabalhos futuros.....</i>	<i>60</i>
REFERÊNCIAS	62
APÊNDICE A.....	66
APÊNDICE B.....	69
APÊNDICE C.....	72

1 INTRODUÇÃO

O acelerado processo de urbanização, atrelado ao surgimento de novas tecnologias, tem promovido uma série de impactos ambientais, potencializados pela elevada exploração de recursos naturais, aumento da geração de resíduos sólidos e o crescimento das emissões de gases do efeito estufa. O setor da construção civil se destaca como um dos grandes responsáveis por esses impactos, visto que faz uso de uma proporção considerável desses recursos, como exemplo a extração de matérias-primas, além da elevada emissão de CO₂, colaborando fortemente para os impactos do meio ambiente (Ravinder, 2025). Paralelamente, existe a perseverança de um cenário de desigualdade no acesso a habitações adequadas e de qualidade, acarretando disparidades socioeconômicas que atingem grande parcela da população (Nasrabadi *et al.*, 2024).

Observa-se a urgência de se implementar práticas construtivas mais sustentáveis, que portem a capacidade de conciliar eficiência técnica com acessibilidade econômica. Entre as alternativas emergentes, destaca-se o resgate da terra crua enquanto material de construção. Nas civilizações antigas como os babilônios, egípcios e persas, a terra foi abundantemente utilizada para erguer desde habitações populares até edificações monumentais, como templos e fortificações (Giraldelli *et al.*, 2020). Entretanto, com o advento de materiais industrializados, esse método construtivo passou a ser deixado de lado, visto que passou frequentemente a ser associado à precariedade e à informalidade (Nina *et al.*, 2023).

Nos últimos anos, a terra crua vem passando por um processo de reavaliação motivada por suas características técnicas e ambientais, tais como conforto térmico, resistência ao fogo, possibilidade de reutilização e baixo consumo energético durante o processo produtivo (Sampaio *et al.*, 2020). Dentre os inúmeros métodos construtivos com terra, o adobe possui destaque, por apresentar uma massa plástica e moldável, essa característica também é importante para tecnologias de extrusão, seja pela produção de blocos extrudados ou mesmo para uso de novas tecnologias, como a impressão 3D.

Dentro do modelo contemporâneo de inovação e sustentabilidade, a manufatura aditiva, também chamada de impressão 3D, vem sendo analisada e considerada uma tecnologia promissora no desenvolvimento da construção civil. Essa técnica possibilita a automatização da elaboração de elementos com formas sofisticadas a partir de modelos digitais tridimensionais, potencializando o uso de materiais e reduzindo perdas (Pacillo *et al.*, 2021). A adoção da metodologia de impressão 3D no setor da construção tem avançado principalmente com o uso de concretos e argamassas especiais, e de maneira recente com misturas baseadas em terra crua (El-Sayegh *et al.*, 2020; Jo *et*

al., 2020).

O procedimento de extrusão controlada, que embasa o funcionamento da impressão 3D, se mostra compatível com o modo de trabalhabilidade da terra como material para a construção. De modo diferente dos materiais cimentícios que enrijecem por processos químicos, as misturas terrosas admitem resistência principalmente pela evaporação da água, acometendo assim um menor impacto ambiental. Essa propriedade permite pensar em construções sustentáveis e de baixo impacto para o ambiente, apresentando um menor consumo energético e redução das emissões de dióxido de carbono (Buswell *et al.*, 2018).

A impressão 3D com terra crua apresenta elevado potencial para combinar tradição e modernidade, a implementação dessa técnica pode originar construções com maior desempenho térmico e estético, além de reduzir a geração de resíduos nas construções. Destacando assim sua viabilidade na produção de itens arquitetônicos, mobiliário urbano, e unidades habitacionais, desde que aspectos como a resistência à água e a estabilidade das misturas sejam adequadamente considerados (Carbonari *et al.*, 2024). Essa tecnologia aliada com materiais terrosos apresenta um grande potencial para aprimorar o uso de recursos locais e promover maneiras habitacionais eficientes, principalmente em locais com restrições socioeconômicas.

O município de Crateús, localizado no interior do Estado do Ceará, possui temperaturas elevadas e um regime chuvoso irregular (FUNCEME, 2019), fatores que influenciam o uso de recursos naturais como material de construção e as práticas construtivas locais. Nessa região, a terra sempre teve papel importante como material para construção, tendo destaque em habitações de populações de baixa renda, por conta da sua ampla disponibilidade e do reduzido custo. Apesar de ser um material disponível em abundância na cidade, são limitados os estudos técnicos direcionados à caracterização e ao desempenho dos solos para uso em métodos construtivos inovadores, como a impressão 3D. Este trabalho busca avaliar dois tipos de solos coletados em Crateús, com o intuito de compreender suas propriedades físicas e granulométricas, bem como sua viabilidade para utilização em técnicas modernas como é o caso da manufatura aditiva com terra crua.

1.1 Objetivo Geral

- Obter massa de terra crua com características adequadas para extrusão em filamentos utilizada em impressora 3D.

1.2 Objetivos Específicos

- Identificar as características granulométricas e de plasticidade de solos oriundos da cidade de Crateús para uso em impressão 3D.
- Realizar projeto de mistura de terra crua com trabalhabilidade adequada para extrusão.
- Avaliar as propriedades no estado fresco e a resistência à compressão da massa de terra crua selecionada para o teste de extrusão.

1.3 Estrutura do trabalho

A pesquisa está dividida em cinco partes. Na Parte 1, denominada Introdução, é apresentado o contexto e a justificativa do estudo, seus objetivos gerais e específicos.

A seção 2 contém o referencial teórico que foi nomeado de Construção com terra, que é um estudo bibliográfico de conteúdo relacionado à realização da pesquisa. Nele, estão sendo abordados os seguintes tópicos: técnicas construtivas com terra, construções de terra pelo mundo, vantagens da construção com terra crua, terra crua para impressão 3D, edificações de terra crua por impressão 3D.

A seção 3, chamada de Materiais e Métodos, mostra os ensaios realizados com a terra crua para fins de caracterização dos solos de forma individual e composta.

A seção 4 exhibe os resultados e discussões da caracterização dos solos e da mistura composta, assim como, o comportamento no estado fresco e a resistência à compressão da massa de terra crua selecionada para o teste de extrusão. Por fim, a Seção 5 contém a conclusão do trabalho e recomendações para pesquisas futuras.

2 CONSTRUÇÃO COM TERRA

Sendo um material oriundo da natureza, destaca-se que o início das construções com terra como matéria-prima se deu nos princípios do processo de sedentarização dos seres humanos, há mais de 7.000 a.C., no período em que essas sociedades iniciaram a construção de moradias permanentes (Giraldelli *et al.*, 2020). Esse modelo de arquitetura, teve origem de forma espontânea, resultado das características de sobrevivência dos seres, com o intuito suprir as necessidades básicas de abrigo e proteção desses indivíduos.

Atualmente, parte considerável da população mundial ainda habitam edificações construídas em terra (Carrobé *et al.*, 2021), que vão desde casas simples e modestas até palácios. O uso dessa técnica foi reduzido consideravelmente por conta do avanço da industrialização desde o século passado, motivada pelo surgimento de construções com tijolo cozido, contudo, as edificações com terra ainda continuam sendo meios de habitação populares e em certas situações as únicas viáveis, principalmente em países que estão em desenvolvimento. Na atualidade, esse meio construtivo em terra (Figura 1), está sendo cada vez mais aceito e reconhecido por parte da humanidade, principalmente por conta do seu caráter sustentável (Zhang *et al.*, 2024).

Figura 1 - Edificação construída com terra crua

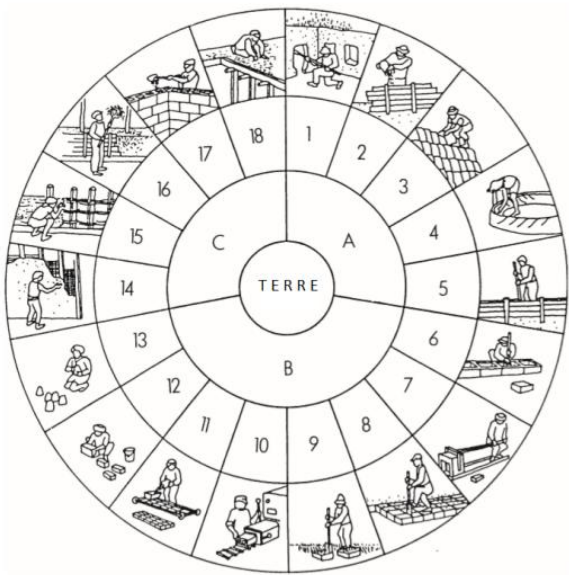


Fonte: <https://ensin-e.edu.br/arquitetura-e-construcao-com-terra-alternativa-sustentavel>

Na França, o Grupo *CRATerre (Centre de Recherche d'Architecture de Terre)*, uma organização que desde 1979 tem se voltado para o estudo do processo construtivo em terra e no desenvolvimento sustentável, é reconhecido como referência internacional (Dantas, 2019). Esse grupo criou um diagrama, em que o mecanismo central é o uso de solo como matéria-prima, nele é abordada as diversas técnicas de construção com terra, possuindo 18 tipos de sistemas, antigos e modernos, que estão divididos em 3 grandes famílias, conforme mostrado na Figura

2, e nomeados na Tabela 1.

Figura 2 - Técnicas de construção com terra



Fonte: *CRATerre* - (Adp: Houben & Guillaud, 1989)

Tabela 1 - Resumo do diagrama, dividido pelas 3 grandes famílias e tipos de construção

A	B	C
Estrutura monolítica portante	Estrutura em alvenaria portante	Estrutura de suporte com enchimento ou revestimento de terra
	6. Blocos apilados	
1. Terra escavada	7. Blocos prensados	14. Terra de recobrimento
2. Terra plástica	8. Blocos cortados	15. Terra sobre engradado
3. Terra empilhada	9. Torrões de terra	16. Terra palha
4. Terra moldada	10. Terra extrudida	17. Terra de enchimento
5. Taipa	11. Adobe mecânico	18. Terra de cobertura
	12. Adobe manual	
	13. Adobe moldado	

Fonte: Autoria própria (2025)

2.1 Técnicas construtivas com terra

Diante dos diversos métodos construtivos em terra existentes, o tabique, a taipa e o adobe ganharam grande destaque pelo mundo. Isso se deu mediante as características do solo, fatores regionais e razões econômicas e climáticas, características que favoreceram o uso dessas técnicas (Giraldelli *et al.*, 2020).

2.1.1 Tabique

O tabique também conhecido como taipa de mão e pau-a-pique, se tornou uma técnica construtiva em terra conhecida como um sistema de enchimento ou revestimento, atuando como um elemento secundário em uma estrutura de suporte, que na maioria dos casos é de madeira (Pinto *et al.*, 2010). Nesse sistema, a madeira é responsável pela resistência estrutural, enquanto a terra desenvolve papel de enchimento e revestimento (Figura 3), além de exercer o papel de proteção da madeira, contra os fatores climáticos e ambientais.

Figura 3 - Habitação antiga com parede exterior em pedra no piso inferior, seguida de parede em tabique no andar superior



Fonte: <http://fringosa.blogspot.com/2011/09/portela-santa-comba-dao.html>

É um método de baixo custo e simples execução, fundamentada basicamente na aplicação de uma mistura envolvendo terra crua argilosa ou siltosa vinculada com fibras vegetais que podem ser palhas ou casulos de espigas de milho, sobre uma estrutura composta de madeira (Pinto *et al.*, 2010), que podem estar arrançadas de forma vertical, horizontal ou inclinada (Figura 4).

Figura 4 - Parede de tabique moderna

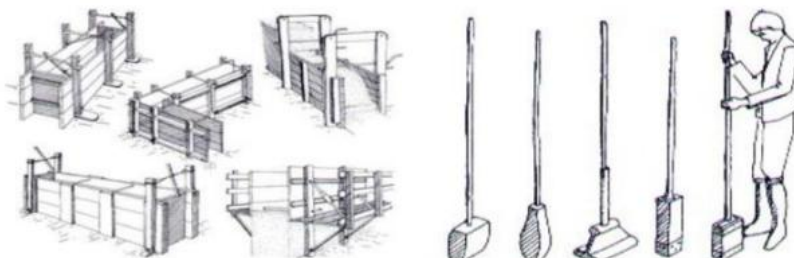


Fonte: <http://eartharchitecture.org/?cat=80>

2.1.2 Taipa de pilão

Técnica de construção monolítica, de grande popularidade em Portugal, com maior destaque nas regiões de Alentejo e Algarve, em edificações simples, armazéns e estábulos. Caracterizada por não exigir muita água na sua elaboração, permite o uso de solo com reduzida percentagem de argila e é ideal para climas quentes e secos (Pereira, 2013). O modelo resume-se basicamente no enchimento e compactação de finas camadas de solo com auxílio de um pilão manual ou equipamentos mecânicos, dispostos entre taipais de madeira (Figura 5), que exercem a função de formas apoiadas primitivamente sobre fundações de pedra prevenindo algum tipo de umidade. Esse procedimento é repetido continuamente até ser atingido a altura desejada, resultando em paredes monolíticas resistentes e duráveis (Houben; Guillaud, 1994).

Figura 5 - Taipal e pilões para produção de paredes de taipa



Fonte: <https://saomarcosdaserra.com/a-way-of-life.php>

Um método adotado nesse sistema com o intuito de elevar a estabilidade entre as paredes

exteriores foi a construção de contrafortes, elementos maciços na maioria dos casos feitos em alvenaria ou terra compactada, dispostos de forma perpendicular às paredes (Figura 6), proporcionando um maior equilíbrio das paredes. Esse sistema tomou destaque por propiciar paredes lisas, dispensando a necessidade de reboco (Figura 7), além de possuir reduzido custo e excelentes características térmicas e acústicas (Houben; Guillaud, 1994).

Figura 6 - Contraforte construído em uma casa feita de taipa



Fonte: <https://ciipcacela.wordpress.com/pessoas-objectos-lugares-e-paisagens/>

Figura 7 - Paredes executadas de taipa em uma edificação moderna



Fonte: <https://sustentarqui.com.br/casa-de-terra-eco-eficiente/>

2.1.3 Adobe

Modelo pertencente ao grupo das alvenarias portantes, sistema no qual as paredes sustentam a edificação exercendo função estrutural, sendo caracterizado pela simples fabricação, reduzido custo e facilidade de execução. Essa técnica se tornou dentro da metodologia das construções com terra, uma das mais tradicionais do mundo (Santos; Bessa, 2020).

Os adobes são blocos de terra feitos através da combinação de solo e água e secos ao sol, são moldados à mão ou em moldes de madeira que dão ao bloco a forma desejada sem necessidade de cozedura (Figura 8). Após a sua desmoldagem, os blocos continuam em fase de secagem até alcançar a resistência objetivada para uso, é comum reforçar a mistura com fibras naturais, como palhas, com o intuito de reduzir retrações e fissuras durante sua secagem, além de possibilitar o aumento da resistência mecânica do material (Rocco *et al.*, 2024).

Figura 8 - Blocos de adobe



Fonte: <https://ecodhome.wordpress.com/2011/06/06/construcao-com-terra-crua/>

Posteriormente à secagem, os blocos são usados como alvenaria para construção de paredes, arcos, cúpulas e abóbadas. Esses elementos exibem bom desempenho térmico e acústico. Na construção, o bloco de adobe tem a sua primeira fiada disposta sobre fundações de pedra ou alvenaria cerâmica (Figura 9), com uma base em torno de 50 cm de altura com o objetivo de reduzir qualquer risco de umidade, sendo empregada argamassa a base de terra com o intuito de se adquirir um melhor desempenho de ligação entre os materiais e uma concordância de retração e expansão dos blocos (Cocco *et al.*, 2022).

Figura 9 - Construção de paredes em adobe, sobre uma fundação em tijolo cerâmico



Fonte: <https://azadaybarro.wordpress.com/bioconstruccion/construccion-con-tierra/>

2.2 Construções de terra pelo mundo

As construções com terra crua são resultado da acumulação de conhecimentos

milenares, que fazem proveito de suas características naturais. Esses métodos são oriundos de diferentes civilizações e se propagaram pelo mundo, motivados por processos históricos e culturais. Com o passar dos anos foram realizadas adaptações e combinações mediante as condições geográficas, naturais, culturais, climáticas e econômicas, processos em que foram atribuindo a essa técnica construtiva identidade própria, buscando assim construções eficientes e harmônicas (Sánchez-Calvillo *et al.*, 2024).

Existe na atualidade espalhados pelo mundo inúmeros exemplos de construções que têm como matéria-prima a terra, com milhares de anos, que evidentemente resistiram aos diversos desafios que lhes foram acometidos com o passar dos séculos, conservando-se em perfeito estado de preservação (Rosenberg *et al.*, 2020).

A Cidade de Shibam, no Lêmen (Figura 10), reconhecida como Patrimônio Mundial pela UNESCO, possui arquitetura com construções feitas de tijolos de terra secos ao sol, os edifícios que deram origem à cidade datam do século XVI, formando grande parte da cidade. Considerada um dos grandes exemplos de planejamento urbano baseado em construção com terra, preservado até os dias atuais (UNESCO, s.d.).

Figura 10 - Cidade de Shibam, Lêmen



Fonte: <https://socks-studio.com/2012/08/12/the-walled-city-of-shibam-a-manchattan-of-the-desert/>

Pueblo de Taos, localizado no Novo México (EUA), povoado tradicional que possui o adobe como matéria-prima, apresenta fibras vegetais como reforço e coberto com argila (Figura 11). Atualmente ainda possui habitantes, sendo eles descendentes dos antigos povos nativos americanos que foram responsáveis pelo processo construtivo da cidade, esse local foi classificado como Patrimônio Mundial pela UNESCO (UNESCO, s.d.).

Figura 11 - Pueblo de Taos, Novo México



Fonte: <https://everywhereonce.com/2012/01/04/a-toast-to-taos/>

2.3 Vantagens da construção com terra crua

O uso da terra crua permite construções sustentáveis, resguardando os recursos naturais e apresenta inúmeras outras vantagens (Mora-Ruiz *et al.*, 2025), como:

- Diminuição das consequências ambientais, atreladas diretamente a queima de materiais;
- Minimização de forma considerável dos custos com o processo produtivo, visto que não é necessário passar por estágios de transformação industrial;
- Redução da deficiência habitacional, por conta de ser um método barato e de maior acessibilidade;
- Técnica adaptável tanto à cultura como também à região em que será utilizada.

Essas estruturas manifestam reduzida pegada de carbono pelo fato de usarem materiais pouco processados e que necessitam principalmente do trabalho manual (Arduin *et al.*, 2022). Assim os problemas para o ambiente acarretado pelo uso da terra crua são inexpressivos, pois o material gera baixos índices de CO₂ e requer o mínimo de processamento, tornando-se uma técnica construtiva atrativa por conta do seu baixo impacto ambiental.

2.4 Terra crua para impressão 3D

A terra crua tem ganhado destaque na construção civil por seu potencial sustentável e ambiental. Tradicionalmente usada em técnicas como adobe, taipa, demonstra boa viabilidade e adaptação a diversos contextos (Zhang *et al.*, 2024).

Com o avanço das tecnologias digitais, esse material vem sendo revalorizado e aplicado em novos métodos construtivos, especialmente na impressão 3D (manufatura aditiva). Esse

processo consiste na deposição sucessiva de camadas de uma mistura terrosa extrudada, controlada digitalmente por um equipamento automatizado, possibilitando precisão geométrica, formas complexas e menor desperdício. Uma técnica sustentável, pois utiliza material natural, sem queima e de origem local, reduzindo o consumo energético e as emissões de carbono (Rael; San Fratello, 2018).

O sucesso da impressão 3D com terra crua depende da correta caracterização do solo, essencial para controlar o comportamento da mistura durante a extrusão e a secagem. A granulometria influencia diretamente a plasticidade, coesão e estabilidade do material, sendo que solos muito argilosos retraem e fissuram, enquanto os arenosos têm baixa coesão (Ji *et al.*, 2023). Logo a caracterização é essencial para formular misturas adequadas à impressão 3D com terra crua. Além disso, o controle da umidade do solo é fundamental para a estabilidade da extrusão, pois influencia a pressão de deposição, o tempo de secagem e a aderência entre camadas garantindo que o material mantenha a forma sem colapsar ou fissurar (Buson *et al.*, 2024).

A distribuição granulométrica mostra-se um fator relevante para a formação de massas de terra crua para uso em impressão 3D por extrusão, seus componentes tais como argila, areia e silte influenciam diretamente nesse processo. Torna-se imprescindível que a composição do solo destinado para impressão esteja de acordo com parâmetros estabelecidos pela literatura, com o intuito de garantir estabilidade, coesão adequada e resistência inicial suficiente para sustentar a sobreposição das camadas. Ji *et al.*, (2023), estudo sobre materiais terrosos imprimíveis, indica conforme apresentado na Tabela 2, faixas granulométricas consideradas adequadas para o uso de solos em processos de impressão 3D, valores que se mostraram coerentes com os requisitos exigidos pela tecnologia.

Tabela 2 - Composição granulométrica ideal de acordo com a literatura

Componente	Faixa (%)
Areia	40 – 70
Silte	10 – 40
Argila	10 – 30

Fonte: Ji *et al.*, (2023)

Além desses parâmetros, os índices de consistência, como os limites de Atterberg, são fatores determinantes para garantir a trabalhabilidade e desempenho do material. Verificações experimentais realizadas por Faleschini *et al.*, (2023), apontam que o limite de liquidez situado

entre as faixas de 20 a 40%, são teores que demonstram desempenho satisfatório do material para uso na tecnologia.

Os estudos citados apontam que solos com valores dentro desses intervalos, apresentam boa extrudabilidade, manutenção da forma após a deposição e estabilidade geométrica adequada. Logo, tais parâmetros são referências viáveis para a formulação de massas de terra crua destinadas à impressão 3D.

Portanto, a caracterização do material, incluindo composição granulométrica, constitui a base para a produção de materiais de terra crua de alto desempenho. A integração entre o conhecimento tradicional da construção em terra e as exigências tecnológicas da manufatura aditiva possibilita o desenvolvimento de soluções construtivas sustentáveis, eficientes, resistentes e com liberdade de design arquitetônico, consolidando a impressão 3D com terra crua como um campo promissor na construção civil contemporânea.

2.5 Edificações de terra crua por impressão 3D

A produção de edificações de terra crua por impressão 3D é uma tecnologia emergente e sustentável que combina um dos materiais de construção mais antigos, com uma inovadora técnica de fabricação digital. O processo utiliza impressoras 3D em larga escala para extrudar misturas à base de terra, construindo paredes e estruturas de forma automatizada, camada por camada. Mesmo que a aplicação dessa tecnologia na construção civil esteja ainda em fase experimental, o solo se destaca por conta da sua alta disponibilidade, baixo custo e de seu reduzido impacto ambiental, particularidades que o tornam um material atrativo para modelos construtivos baseados na manufatura aditiva (Perrot *et al.*, 2018).

A etapa de modelagem digital consiste na produção do projeto da edificação por meio de software de modelagem tridimensional. A partir desse modelo, a impressão é executada de maneira automatizada, com extrusão do material seguindo trajetórias anteriormente definidas. De acordo com Lopes (2016), sistemas robóticos de impressão 3D, como o Crane WASP, constroem as paredes diretamente no local, com a deposição contínua de filetes de terra, que se solidifica à medida que a água evapora, podendo ser utilizados aditivos químicos em ambiente mais frios, para acelerar a solidificação. Após a impressão, tem-se etapa de cura, onde as paredes de terra secam naturalmente, ao contrário do concreto, a terra crua obtém sua resistência principalmente através da secagem, um processo com menor impacto ambiental.

Como exemplo, a edificação mostrada na Figura 12 foi construída por uma impressora utilizando terra crua, destacando o potencial da técnica para elementos com geometrias

complexas.

Figura 12 - Edificação de terra crua construída por impressão 3D



Fonte: <https://noticias.r7.com/tecnologia-e-ciencia/fotos/megaimpressora-usa-terra-crua-e-constro-i-casa-de-60-m-em-8-dias-26052021/>

A impressão 3D com terra crua apresenta diversas vantagens, como sustentabilidade, por reduzir o uso de materiais industrializados e gerar poucos resíduos, as estruturas produzidas possuem boa estabilidade térmica, oferecendo isolamento natural, além de possibilitar designs flexíveis (Banihashemi *et al.*, 2025).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Os solos utilizados neste estudo foram retirados do terreno que contorna os prédios do Campus da Universidade Federal do Ceará em Crateús-Ce. O Solo A foi retirado em uma região delimitada localizada próxima ao bloco administrativo. O solo B foi obtido da escavação da construção do prédio dos laboratórios em execução no período.

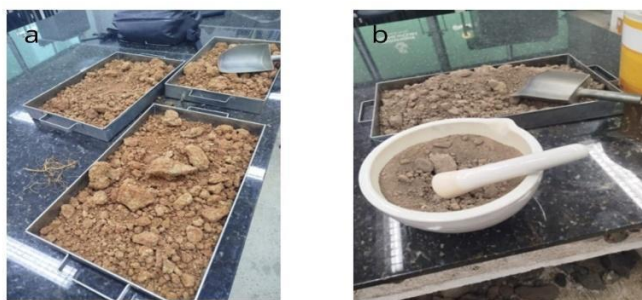
Esse procedimento está em conformidade com a NBR 9604 (ABNT, 2016), que trata da abertura de poços e trincheiras e da retirada de amostras deformadas e indeformadas. O material recolhido foi armazenado em sacos e transportado para o laboratório. Antes da utilização foram secos naturalmente e armazenados.

3.1.1 Caracterização do solo

a. Análise tátil visual

Após a secagem natural, foi realizada uma análise tátil-visual para obter uma avaliação inicial do solo e orientar os ensaios laboratoriais. Seguindo as orientações de Pinto (2006), observou-se a textura, cor, umidade, plasticidade, dispersão e outros aspectos visuais conforme as (Figuras 13a e 13b). A observação a olho nu permitiu estimar o tamanho das partículas e a proporção entre areia, silte e argila.

Figura 13 - 13a) Solo A; 13b) Solo B

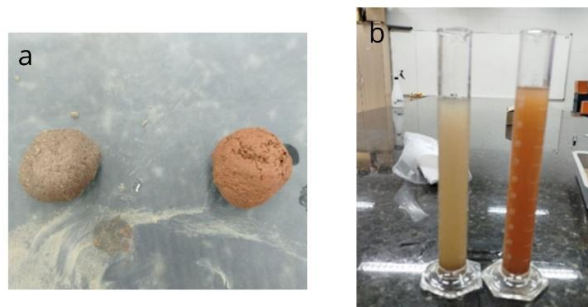


Fonte: Autoria própria (2025)

Em seguida, foi adicionada água ao solo para moldar uma esfera (Figura 14a), que foi cortada ao meio, avaliando a presença de argila. A amostra úmida também foi friccionada entre as mãos para indicar o teor de argila. Complementarmente, realizou-se o teste de dispersão em

água (Figura 14b), utilizado para identificar se o solo apresenta características mais siltosas, argilosas ou arenosas conforme o tempo de dispersão.

Figura 14 - 14a) Análise visual dos dois tipos de solos; 14b) Análise de dispersão em água



Fonte: Autoria própria (2025)

b. Análise Granulométrica dos solos

O ensaio granulométrico, conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016), permite classificar as frações do solo em cascalho, areia, silte e argila. As amostras foram previamente secadas ao ar e destorroadas. Em seguida, realizou-se o peneiramento com peneira de 2 mm, o material retido foi usado para determinar a fração grossa e o que passou serviu para os ensaios de sedimentação e granulometria da fração fina (Figura 15). O procedimento envolve três etapas principais: peneiramento grosso, peneiramento fino e sedimentação.

Figura 15 - Material utilizado para ensaios de granulometria da fração grossa, fração fina e sedimentação



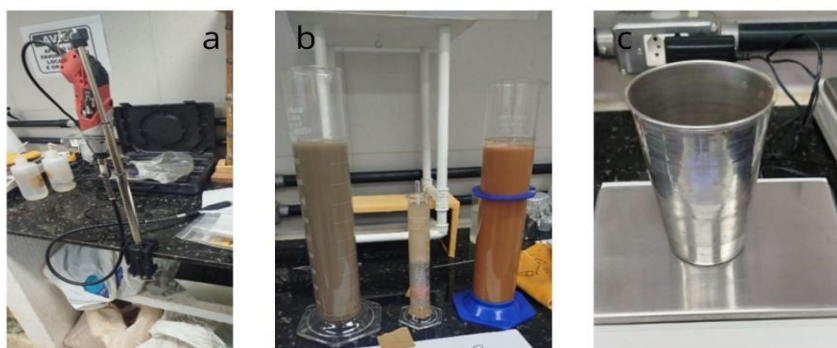
Fonte: Autoria própria (2025)

I. Sedimentação

Do material passante na peneira de 2 mm, foram separados cerca de 70 g de cada solo

para os ensaios de sedimentação e peneiramento fino. As amostras foram misturadas com solução de hexametáfosphato de sódio, agitadas, deixadas em repouso por 24 horas, então foram transferidas para o copo de dispersão e submetidas à ação do aparelho dispersor por 15 minutos (Figura 16a). Em seguida, transferidas para as provetas de 1 litro, completadas com água destilada e agitadas por 1 minuto para iniciar a sedimentação (Figura 16b). As leituras de densidade foram feitas com densímetro em intervalos pré-determinados e acompanhadas da medição de temperatura. Após o ensaio, as amostras foram lavadas sobre a peneira de 0,075 mm, e o material que ficou retido na peneira foi levado para a estufa para secagem e posteriormente será usado para a determinação da granulometria da fração fina.

Figura 16 - 16a) Aparelho dispersor utilizados no ensaio; 16b) Proveta com os materiais; 16c) Copo de dispersão

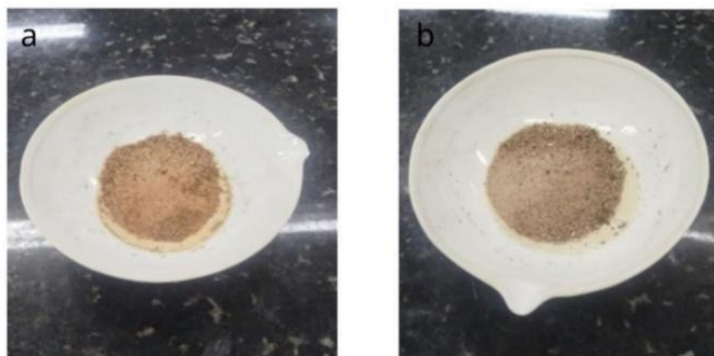


Fonte: Autoria própria (2025)

II. Peneiramento Fino

Conforme as orientações da NBR 7181 (ABNT, 2016), com as amostras secas em estufa dos solos que ficaram retidos na peneira de abertura de 0,075 mm (Figuras 17a e 17b), ocorreu a disposição desses materiais no conjunto de peneiras com as aberturas de (1,2 mm; 0,6 mm; 0,42 mm; 0,25 mm; 0,15 mm e 0,075 mm), passou pelo processo de agitação por um determinado período e posteriormente foi pesado o que ficou retido de solo em cada peneira para que fosse determinada a porcentagem passante de cada solo.

Figura 17 - Material retido na peneira de abertura de 0,075 mm 17a) Solo A; 17b) Solo B

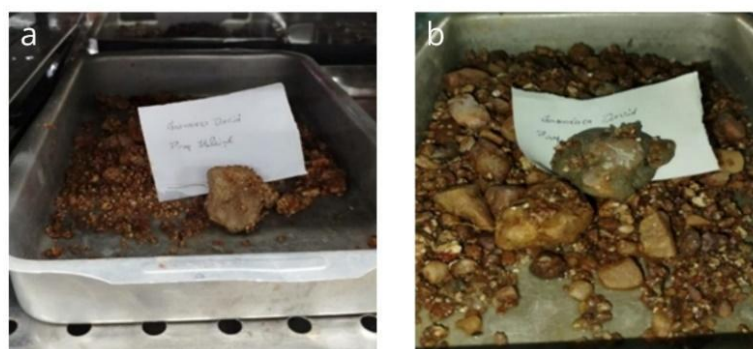


Fonte: Autoria própria (2025)

III. Peneiramento Grosso

O peneiramento da fração grossa dos solos foi feito com o material retido na peneira de 2 mm, que após lavagem e secagem em estufa por 24 horas (Figuras 18a e 18b), foi peneirado no conjunto com aberturas de 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm e 4,8 mm. O material retido em cada peneira foi pesado para calcular o percentual passante. Assim, os peneiramentos finos e grossos permitiram determinar a granulometria completa dos solos.

Figura 18 - Material retido na peneira de 2 mm submetido a lavagem 18a) Solo A; 18b) Solo B



Fonte: Autoria própria (2025)

c. Classificação dos Solos

Com o intuito de identificar o comportamento dos solos, é necessário agrupá-lo em grupos compostos de solos que apresentam características semelhantes, de acordo com Pinto (2006). Dispondo dos inúmeros modos de classificação, o adotado neste trabalho foi pela forma de comportamento das partículas constituintes. Com base na distribuição granulométrica, o solo foi categorizado por sua fração dominante como o primeiro nome, e porção subdominante como segundo nome, seguido do nome do sufixo (oso, osa). Foi feita somente essa classificação, visto que o objetivo de maior relevância é tomar conhecimento da distribuição granulométrica do solo.

d. Ensaios para determinar os limites de liquidez e plasticidade dos solos

Para os ensaios de limite de liquidez e plasticidade, as amostras secas e destorroadas foram peneiradas conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016), utilizando o material passante na peneira de 0,42 mm. Foram separados cerca de 70 g de cada solo para o ensaio de limite de liquidez e 50 g para o de limite de plasticidade. A Figura 19 mostra o solo que foi usado para fazer o ensaio.

Figura 19 - Solos utilizados nos ensaios de determinação do limite de liquidez e plasticidade



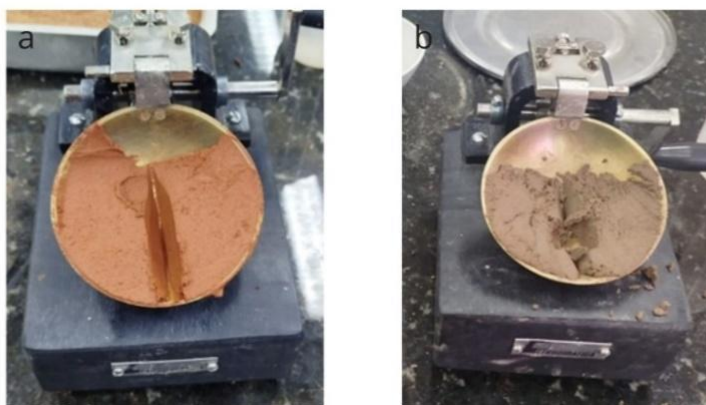
Fonte: Autoria própria (2025)

I. Limite de Liquidez

No ensaio de limite de liquidez, conforme a NBR 6459 (ABNT, 2016), as amostras destorroadas e peneiradas foram misturadas com água destilada até formar uma massa homogênea. Parte do material foi colocada no aparelho de Casagrande, nivelada pelo gabarito

e dividida ao meio com um cinzel. O aparelho foi acionado até o fechamento da ranhura (Figura 20a), em seguida foi coletada uma amostra de cada um dos solos ao entorno do local de fechamento e encaminhada à estufa (Figura 20b). Esse procedimento foi realizado mais quatro vezes, totalizando cinco amostras. Todas permaneceram na estufa por 24 horas, com o propósito de determinar o teor de umidade do solo, de acordo com os parâmetros da norma NBR 6459 (ABNT, 2016).

Figura 20 - 20a) Solo A na concha de Casagrande após os golpes; 20b) Solo B após a retirada do material para a estufa



Fonte: Autoria própria (2025)

II. Limite de Plasticidade

Para a determinação do limite de plasticidade, seguiram-se os padrões da norma NBR 7180 – Solo – Determinação do limite de plasticidade (ABNT, 2016). Foi pega uma amostra dos solos já peneirada, que foi umedecida com água até atingir uma consistência ideal para a formação de pequenos cilindros com aproximadamente 3 mm de diâmetro, como mostrado nas Figuras 21a e 21b. Cinco amostras foram moldadas, em seguida, cada uma delas foi pesada e colocada em estufa, com o objetivo de determinar o teor de umidade correspondente a cada amostra.

Figura 21 - Realização do ensaio do limite de plasticidade 21a) Solo A; 21b) Solo B.



Fonte: Autoria própria (2025)

e. Determinação da Densidade Real do Solos

Seguindo as orientações da Norma Rodoviária (DNER-ME 093/94), foram utilizados cinco picnômetros para cada solo. Inicialmente, os equipamentos foram pesados individualmente e, em seguida, adicionaram-se 10 g de solo e água destilada até cobrir a amostra. Os picnômetros foram fervidos por 15 minutos para eliminar o ar, resfriados e completados com água destilada. Após equilibrar a temperatura em banho com água por 15 minutos (Figura 22), registrou-se a temperatura e os picnômetros foram secos externamente, posteriormente pesados com o conteúdo. Por fim, o solo foi removido, o equipamento lavado, preenchido apenas com água destilada e novamente pesado.

Figura 22 - Picnômetros em banhos de água a temperatura ambiente



Fonte: Autoria própria (2025)

3.1.2 Composição da massa de terra crua para impressão 3D

Com o intuito de garantir um desempenho satisfatório para uso em impressão 3D por extrusão, posteriormente aos ensaios feitos com os solos individualmente, seguiu-se o direcionamento da literatura sobre solos imprimíveis. Dessa forma, os solos foram misturados para atender as faixas granulométricas ideais indicadas por *Ji et al.*, (2023), como também aos valores considerados adequados para o limite de liquidez apresentados por *Faleschini et al.*, (2023).

A proporção ideal para os dois solos utilizados foi de 35% do solo A e 65% do solo B, definida a partir de uma processo de compatibilização granulométrica. Foram analisadas as porcentagens passantes dos solos A e B nas peneiras de 2,0 mm, 0,42 mm e 0,075 mm (Tabela 3), através desses valores testaram-se combinações até se obter uma composição cujo sua granulometria se enquadrasse nas faixas recomendadas para solos imprivíveis, conforme o trabalho de *Ji et al.*, (2023).

Esta composição foi caracterizada como uma terceira amostra de solo, denominada mistura terrosa para impressão 3D e sua viabilidade foi validada através dos resultados dos ensaios de caracterização realizados.

Tabela 3 – Percentuais passantes e composição granulométrica da mistura obtida a partir dos solos A e B

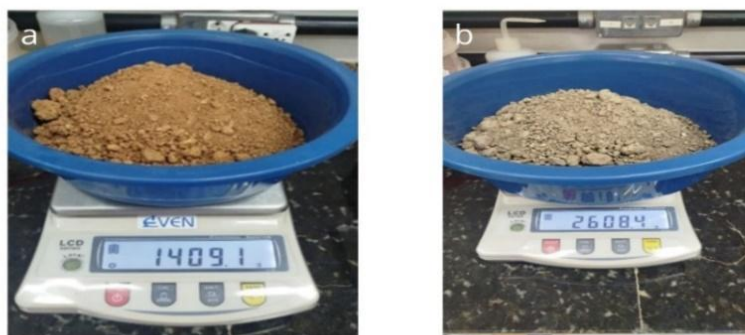
Passante nas peneiras	Solo A (%)	Solo B (%)	Mistura (35% Solo A; 65% Solo B)
2	83%	64,7%	71,11%
0,42	67,4%	42,3%	51,09%
0,075	44,7%	19,0%	28,00%

Fonte: Autoria própria (2025)

Para a caracterização, os solos foram apenas destorroados antes da mistura, sem peneiramento prévio, antes da formulação da composição. A caracterização granulométrica foi feita posteriormente nos testes laboratoriais. Nas análises, todos os ensaios realizados com os solos de forma individual (análise granulométrica, sedimentação, densidade real dos solos,

limites de liquidez e plasticidade), foram repetidos para a mistura. Referente ao limite de liquidez, também foi verificado o teor de água da mistura, observando a quantidade de água ideal para que a massa mantenha coesão a trabalhabilidade adequada.

Figura 23 - Solos utilizados nos procedimentos 23a) Solo A; 23b) Solo B



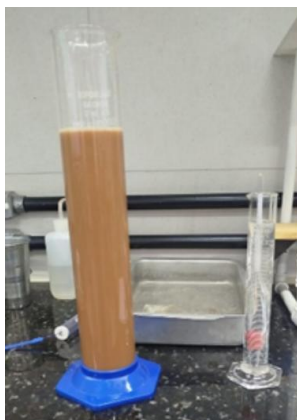
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 24 - 24a) Mistura dos dois tipos de solo; 24b) Material usado na granulometria da fração fina; 24c) Material usado na granulometria da fração grossa



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 25 - Ensaio de sedimentação da mistura



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 26 - Densidade real dos solos da mistura



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 27 - 27a) Ensaio do Limite de liquidez; 27b) Ensaio do Limite de Plasticidade



Fonte: Autoria própria (2025)

3.1.3 *Análise da massa de terra crua para extrusão*

Para a realização do teste de extrusão, a massa de terra crua seca passou pelo corte granulométrico na peneira de 2,0 mm, com o intuito de permitir a mistura e uso na extrusora manual.

A mistura da massa de terra crua foi realizada no Reômetro Pheso do Laboratório de Materiais de Construção Civil - UFC. Após a mistura, a massa de terra crua foi submetida ao ensaio de consistência e plasticidade na mesa de consistência (Flow Table Test) mostrada na Figura 28, com o intuito de analisar a trabalhabilidade e consistência, adaptado da norma NBR ABNT 13276 (2016) de argamassas. Utilizou-se esse ensaio para comparar com dados obtidos de materiais tipicamente impressos 3D, como a argamassa de cimento Portland.

Figura 28 - Mesa de consistência



Fonte: [https://solotest.com.br/novo/produtos/mesa-de-fluidez-refratario-\(flow-table\)/1.516.001](https://solotest.com.br/novo/produtos/mesa-de-fluidez-refratario-(flow-table)/1.516.001)

O teste de extrusão manual foi realizado com uma pistola de extrusão de argamassa com o objetivo de verificar a extrudabilidade do material, na Figura 29 mostra-se o equipamento e as 04 bocas disponíveis para uso. Foram utilizados o bico retangular de 42 mm e os bicos circulares de 24 mm e 16 mm, para construir corpos de prova em torno de 12 cm de altura e 20 de comprimento compostos de 4 camadas.

Figura 29 - Pistola de extrusão



Fonte: Veras (2024)

No estado endurecido, os corpos de provas foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão na Máquina Universal de Ensaios EMIC DL conforme apresentado na Figura 30 , para isso foram moldados 06 corpos de provas cúbicos de 4 cm de arestas, sendo rompidos 03 unidades aos 7 dias e as outras unidades aos 28 dias.

Figura 30: Rompimento do corpo de prova



Fonte: Autoria própria (2025)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

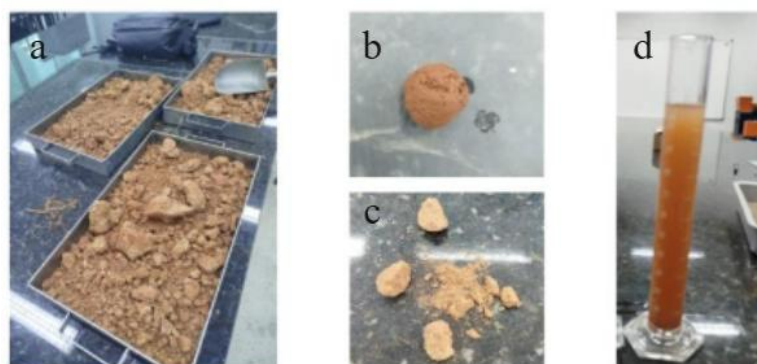
Esta seção apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados com os solos A e B de forma individual, assim como da mistura terrosa para para extrusão em impressora 3D. Juntamente com a análise e discussão desses resultados.

4.1 Caracterização do solo A

4.1.1 Análise tátil-visual

Na Figura 31 estão expostos os resultados da análise tátil-visual do solo A.

Figura 31 - Resultado da análise tátil-visual do solo: 31a) Solo analisado; 31b) Testa da bola; 31c) Teste de desagregação; 31d) Teste de dispersão em água.



Fonte: Autoria própria (2025)

As observações tátil-visuais indicam que o solo A possui grande predominância argilosa, comprovada pela fragmentação em torrões coesos e pela formação de um pó fino, mostrando uma presença considerável de finos, além da falta de fragmentos visíveis de areia de dimensões médias e grossas. No teste de dispersão em água, apresentou turbidez e lenta sedimentação, características comuns de solos argilosos, devido a sua capacidade de conservar suas partículas suspensas por mais tempo.

A análise do solo, conforme observado nas imagens, confirma a predominância de frações finas e característica argilosa, condições que dificultam a capacidade de impressão por extrusão, ao aumentar a coesão, retenção água e sensibilidade a umidade (Gyawali *et al.*, 2024). Além disso, é visível a reduzida presença de areia média e grossa, componente crucial para melhorar o empacotamento e a estabilidade do filamento extrudado.

Apesar dessa análise exibir uma primeira impressão sobre as características do solo, ela não é suficiente para definir sua capacidade de impressão, pois é uma avaliação limitada e subjetiva. Essa aptidão depende de dados laboratoriais, como por exemplo a granulometria e os limites de Atterberg, que determinam plasticidade, características granulométricas e comportamento na extrusão.

4.1.2 Ensaios de granulometria da fração grossa, fração fina e sedimentação

Na Tabela 4 está apresentado o resumo granulométrico do solo A, com os resultados dos ensaios.

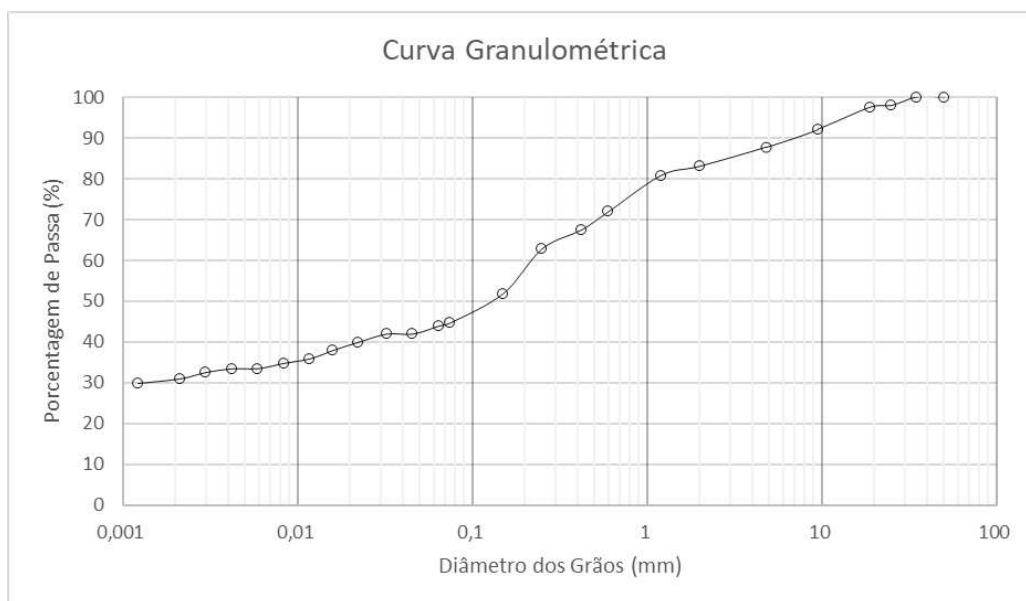
Tabela 4 - Resumo da granulometria do solo

Resumo Granulométrico (ABNT)		
Ar. Grossa (2,0 mm - 0,6 mm)	11,1	
Ar. Média (600 μ m - 200 μ m)	14,6	40,7
Ar. Fina (200 μ m - 60 μ m)	15,0	
Silte (60 μ m - 2 μ m)	12,4	
Argila (< 2 μ m)	29,9	

Fonte: Autoria própria (2025)

A análise granulométrica do solo A, realizada conforme orientações da NBR 7181 (ABNT, 2016), revela uma distribuição composta majoritariamente por frações finas, com presença moderada de areia e baixa existência de pedregulhos, conforme mostrado na Tabela 4. Nos intervalos correspondentes às areias, observa-se um percentual acumulado em torno de 40,7%, quantidade que deixa o material quase fora da faixa sugerida pela literatura. Aproximadamente 45% do solo passa pela peneira de 0,075 mm, mostrando que quase metade do material é composta por silte e argila, como mostrado na Tabela 1 do apêndice A. Essa quantidade elevada de finos deixa o solo mais coeso, mais pegajoso e com maior retenção de água, características típicas de solos argilosos. O resumo granulométrico confirma isso ao indicar 12,4% de silte e 29,9% de argila. Na Figura 32 está mostrada a curva de distribuição granulométrica do solo A, obtida após os ensaios de granulometria e sedimentação.

Figura 32 - Curva de distribuição granulométrica



Fonte: Autoria própria (2025)

A curva granulométrica adquirida mostra uma disposição contínua, mas apresenta predisposição a concentrações altas de finos, caracterizando um solo mal graduado. Ela apresenta percentuais passantes que se mantêm nas faixas entre 30% e 45% ao longo dos valores correspondentes às frações de argila e silte, demonstrando um maior crescimento a partir de diâmetros superiores a 0,1 mm, momento que ultrapassa 50% e segue em elevação até alcançar valores próximos a 100% referente às frações arenosas médias e grossas.

Os resultados obtidos demonstram que o solo A contém uma composição inadequada para os procedimentos de impressão 3D por extrusão. A quantidade de argila encontrado de (29,9%) localiza-se no limite máximo proposto, demonstrando um solo com elevada coesão e reduzida quantidade de grãos de granulometria média. Solos com granulometria que possuem exacerbada concentração de partículas finas, mostram comportamento altamente plástico, elevada tendência à retração após a etapa de deposição das camadas e baixa estabilidade dimensional.

Solos para impressão 3D exigem proporções mais elevadas de areia, com o intuito de garantir estabilidade rápida logo após a deposição das camadas e diminuir a retração na secagem (Ji *et al.*, 2023). Nesse contexto, essa granulometria desequilibrada com excesso de finos e escassez de partículas médias, exhibe que o material não satisfaz as condições mínimas exigidas pela tecnologia.

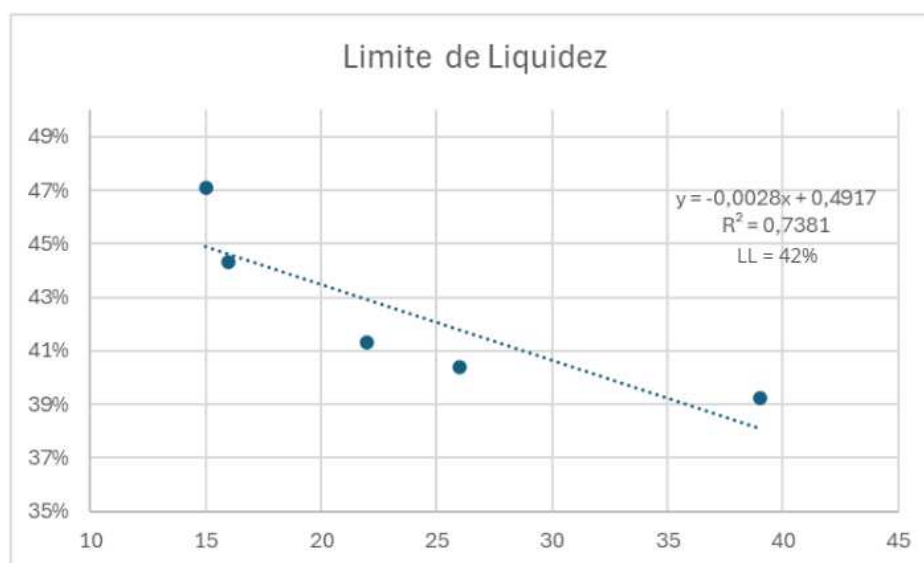
De acordo com a Tabela 4 do resumo granulométrico, o solo A indica o predomínio de areia (40,7%), seguida por argila (29,9%) e silte (12,4%), o que possibilita classificá-lo como

areia-argilosa.

4.1.3 Ensaios dos limites de liquidez e plasticidade do solo

Na Figura 33 estão apresentados os resultados do ensaio do limite de liquidez do solo A.

Figura 33- Gráfico do limite de liquidez



Fonte: Autoria própria 2025

O ensaio do limite de liquidez (LL) do solo mostrou umidades variando em torno de 39% a 47%, valores relacionados a número de golpes entre 15 e 39 de acordo com o exibido na Tabela 4 do apêndice A, demonstrando coerência com relação ao aumento da umidade e a do número de golpes necessários para o fechamento da ranhura no aparelho de Casagrande. Os resultados encontrados apresentam variações controladas entre as massas úmidas, secas e tara. Através da curva exibida, verificou-se um LL de 42%, conforme apresentado no gráfico. Os pontos experimentais mostram coerência com a regressão linear ($R^2 = 0,7381$), possibilitando estimar o valor final do limite de liquidez. Esses valores apontam que o solo possui uma quantidade significativa de fração argilosa ativa, visto que é uma característica desse tipo de solo apresentar LL elevados, com elevada capacidade de reter água e elevar a umidade necessária para que o material adquira um comportamento fluido.

O valor obtido para o solo (LL = 42%) está fora da faixa habitualmente recomendada para misturas plásticas (20% a 40%), esse valor está interligado a solos com alta quantidade de finos, a dispersão dos pontos e o coeficiente ($R^2 \approx 0,74$) propõem que o solo não tem um

comportamento uniforme, atributo que pode prejudicar o processo de extrusão. Além disso, altos teores de finos e LL elevado mostram maior sensibilidade a variações de umidade, afetando a estabilidade dimensional ao longo da etapa de deposição das camadas (Buson *et al.*, 2024). Apesar de seguir com os processos estabelecidos pela ABNT NBR 6459 (ABNT, 2016), os resultados exibem que sozinho o solo A, não demonstra comportamento satisfatoriamente estável para ser aplicado em impressão 3D. Na Tabela 5 estão representados os resultados do ensaio do limite de plasticidade do solo A.

Tabela 5 - Resultados do limite de plasticidade do Solo

Limite de plasticidade do solo A	
Média da umidade	26%
Limite de plasticidade	26%
Índice de plasticidade	16%

Fonte: Autoria própria (2025)

O ensaio do limite de plasticidade feito para o solo A demonstrou valores de umidade entre 23% e 28%, obtidos a partir de cinco cápsulas analisadas que apresentaram valores de (23%, 26%, 26%, 25% e 28%) respectivamente, como mostrado na Tabela 5 do apêndice A, diante dessas verificações a média calculada do limite de plasticidade é de 26%, indicando o teor de umidade em que o solo passa do estado plástico para o semissólido, quando moldado em pequenos cilindros com espessura de 3 mm de diâmetro.

Nesse contexto, quando combinado com o limite de liquidez alcançado de 42%, o índice de plasticidade (IP) do solo A foi determinado em 16%, descrevendo um material de plasticidade média. Logo, para uso em aplicações de impressão 3D por extrusão, o IP adquirido mostra que o solo no estado natural possui dependência moderada do teor de umidade, comportamento que indica que variações na quantidade de água modificam de forma significativa a consistência do material, demonstrando que o material não é adequado para impressão 3D sem alterações granulométricas ou estabilização (Rückrich *et al.*, 2024).

4.1.4 Ensaio de densidade real dos solos

Na Tabela 6 está demonstrado os resultados da densidade real do solo A.

Tabela 6 - Resultados da densidade real dos solos

Densidade Real dos Solos - Solo A	
Densidade real	2,664 g/cm ³

Fonte: Autoria própria (2025)

A obtenção da densidade real do solo A, ensaio realizado através de cinco picnômetros, apresentou valores entre 2,584 g/cm³ e 2,675 g/cm³, com maior regularidade nas medidas que resultaram em 2,660 g/cm³ e 2,668 g/cm³ valores representados na Tabela 6 do apêndice A. Foi alcançada uma densidade média de 2,664 g/cm³, números compatíveis com solos que exibem características siltosas e argilosas.

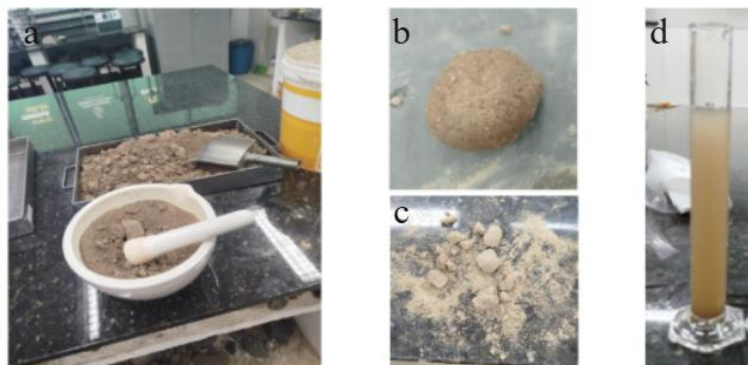
Essa densidade real de 2,664 g/cm³, apresenta valor compatível com solos de composição siltosa a argilosa, fatores que podem acarretar elevada coesão e alta plasticidade, entretanto esse indicador de forma isolado não se torna suficiente para comprovar a viabilidade do material para impressão por extrusão. Embora a densidade dos sólidos influencie a massa específica e o comportamento do material, o desempenho de impressão decorre principalmente da composição granulométrica e dos limites de Atterberg (Rocha *et al.*, 2024).

4.2 Caracterização do solo B

4.2.1 Análise tátil-visual

Na Figura 34 estão expostos os resultados da análise tátil-visual do solo B.

Figura 34 - Resultado da análise tátil-visual do solo: 34a) Solo analisado; 34b) Testa da bola; 34c) Teste de desagregação; 34d) Teste de dispersão em água.



Fonte: Autoria própria (2025)

A análise visual do solo B mostrou um material com predominância arenosa, com tonalidade clara e amarelada, textura áspera e baixa coesão no estado seco, fragmentando-se facilmente quando submetido a pequena pressão manual. Quando úmido, não demonstra plasticidade significativa, característica observada quando foram formados aglomerados frágeis, como é o caso da esfera, que se rompeu facilmente. Também ocorreu a rápida sedimentação das partículas maiores e reduzida sustentação de material em suspensão, evidenciando reduzida presença de frações finas.

Essas observações indicam um material de caráter arenoso, com baixa coesão, reduzida plasticidade e deficiência de porções finas ativas. Solos com esses comportamentos tendem a mostrar ruptura dos filamentos, segregação de partículas e baixa aderência entre as camadas, tornando inviável a deposição do material sem alguma correção granulométrica (Perrot *et al.*, 2018). Entretanto, como já destacado anteriormente, essa análise apesar de aportar uma indicação inicial sobre o comportamento do material estudado, não é suficiente para definir de maneira conclusiva sua viabilidade para impressão 3D.

4.2.2 Ensaios de granulometria da fração grossa, fração fina e sedimentação

Na Tabela 7 está representado o resumo granulométrico do solo B.

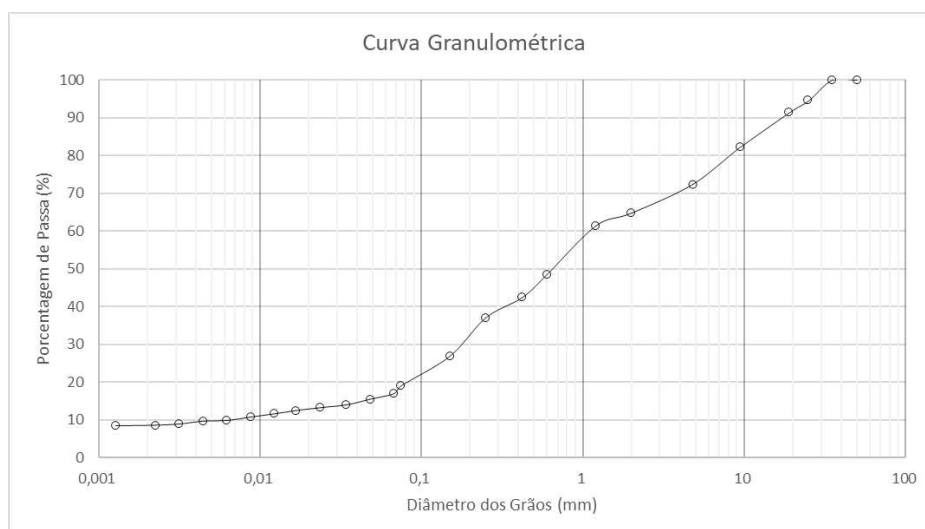
Tabela 7 - Resumo da granulometria do solo

Resumo Granulométrico		
Ar. Grossa (2,0 mm - 0,6 mm)	16,2	
Ar. Média (600 μ m - 200 μ m)	16,6	48,7
Ar. Fina (200 μ m - 60 μ m)	15,9	
Silte (60 μ m - 2 μ m)	7,6	
Argila (< 2 μ m)	8,4	

Fonte: Autoria própria (2025)

Os valores obtidos após o estudo granulométrico do material, indicam que a porção grossa do solo B possui forte predominância de partículas arenosas, ou seja, confirmado um solo de caráter arenoso. Cerca de 48,7% dizem respeito a fração arenosa total correspondente às classes fina, média e grossa, expondo um material com maior permeabilidade e baixa coesão. A parcela fina do material apresenta pequenos teores de argila (8,4%) e de silte (7,6%), resultando em um solo com plasticidade reduzida e pequena capacidade de ligação das partículas. A Figura 35 mostra a curva de distribuição granulométrica do solo B.

Figura 35 - Curva de distribuição granulométrica



Fonte: Autoria própria (2025)

A curva de distribuição granulométrica comprova que o Solo B tem comportamento arenoso. A maior parte do material enquadra-se entre as faixas de 0,1 mm a 10 mm, indicando

alta proporção de areia, enquanto a parcela referente aos finos permanece baixa, com subida lenta da curva na região. Esse modelo mais inclinado e deslocado para a direita caracteriza um material com reduzida coesão e baixa plasticidade, particularidades de solos com déficit de silte e argila.

É evidente que o solo tem predominância arenosa em sua composição com pequena quantidade de finos, provocando elevada permeabilidade e baixa coesão. Condição que torna o material desfavorável para processos de impressão 3D por extrusão, o solo fica tendencioso a perder água rapidamente, prejudicando o controle de consistência, a continuidade e a estabilidade do filamento extrudado.

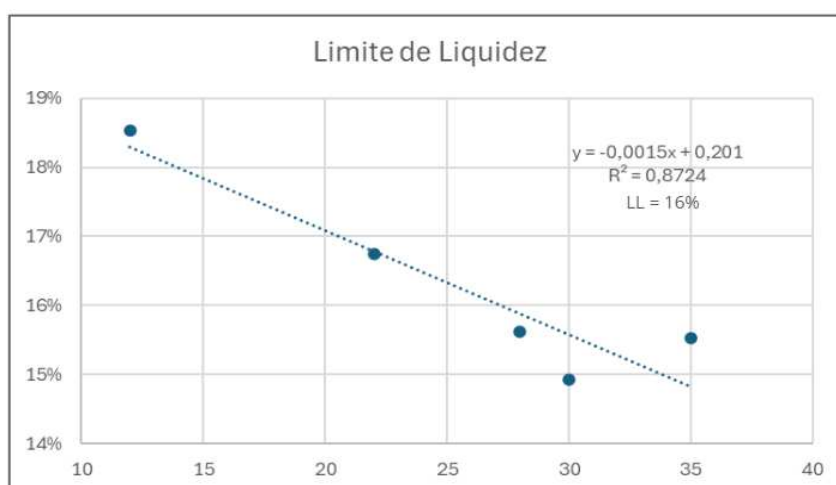
Misturas com excesso de areia são propícias a ter falhas na extrusão, reduzida adesão entre as camadas e instabilidade geométrica ao longo da impressão, mesmo quando a retração é reduzida (Perrot *et al.*, 2018). Diante do que foi discutido é observado que o solo em sua condição natural, não atende às condições exigidas para a tecnologia, tornando inviável o seu uso para o processo de impressão por extrusão.

Conforme o resumo granulométrico da Tabela 7, observa-se a predominância em maior quantidade de areia, acompanhada posteriormente de argila. Seguindo o critério adotado nesse estudo baseado no comportamento das partículas que constituem o material, podemos classificar o solo como areia-argilosa.

4.2.3 Ensaios dos limites de liquidez e plasticidade do solo

Na Figura 36 estão representados os resultados do ensaio do limite de liquidez do solo B.

Figura 36 - Gráfico do Limite de liquidez



Fonte: Autoria própria (2025)

O ensaio do Limite de Liquidez para o solo B mostrou valores de umidade variando de 15% a 19% para diferentes números de golpes conforme exibido na Tabela 4 do apêndice B. A partir da curva de fluxo visualizada, foi alcançado um LL em torno de 16%, apontando um material com baixa plasticidade, marcado pelo predomínio de porções arenosas e baixa presença de silte e argila.

Os resultados do ensaio apontaram um LL em torno de 16%, isso evidencia um material incompatível com os requisitos exigidos da impressão por extrusão. Valores reduzidos do limite de liquidez acarretam misturas com baixa coesão, dificuldades na extrusão e imperfeições na aderência entre as camadas, prejudicando a estabilidade geométrica da peça impressa (Ji *et al.*, 2023). Valores baixos de LL podem acarretar materiais inadequados para uso, necessitando de correções granulométricas para torná-lo um solo viável para uso.

Com referência ao limite de plasticidade, esse solo não permitiu a obtenção de um valor válido, o material não demonstrou plasticidade, rompendo-se e se desagregando anteriormente a formação de cilindros com diâmetro em torno de 3 mm.

A ausência do limite de plasticidade aponta uma limitação considerável, pois materiais sem esse parâmetro não demonstram comportamento adequado para formação e manutenção do filamento extrudado. Solos com inexistência de plasticidade mostra fluxo descontínuo, baixa aderência e pode gerar colapso imediato entre as camadas, além de comprometer a estabilidade geométrica da peça (Rückrich *et al.*, 2024). Desse modo, essa é uma incompatibilidade que tornou o material inviável para ser utilizado em extrusão.

4.2.4 Ensaio de densidade real dos solos

Na Tabela 8 está demonstrado os resultados da densidade real do solo B.

Tabela 8 - Resultados da densidade real dos solos

Densidade Real dos Solos - Solo B	
Densidade real	2,649 g/cm ³

Fonte: Autoria própria (2025)

Os valores da densidade real do solo B, conforme exposto na Tabela 5 do apêndice B,

variaram entre 2,621 g/cm³ e 2,678 g/cm³, com uma boa regularidade dos resultados, em que os números intermediários utilizados como parâmetro para obter a densidade real foi o de 2,646 g/cm³ e 2,652 g/cm. Obteve-se uma densidade real média de cerca de 2,649 g/cm³.

O valor obtido da densidade do solo B de 2,65 g/cm³, se mostra compatível com solos de predominância arenosa. Essa densidade quando relacionada a baixos teores de finos e reduzida plasticidade que no caso desse solo ela é inexistente, apresenta partículas pouco interativas e pequena capacidade de reter água, mesmo o material tendo densidade compatível com suas características, solos com alto excesso de areia tendem a demonstrar baixa coesão, dificuldades na manutenção da geometria do filamento extrudado e incompatibilidades nas deposições das camadas, tornando o material inviável para ser utilizado no processo de extrusão (Bhusal *et al.*, 2023).

Portanto, foram realizados inúmeros ensaios de caracterização para os dois tipos de solos, de forma a garantir uma visão abrangente do comportamento dos materiais. Entretanto, para os objetivos deste estudo, direcionado a verificar a viabilidade dos materiais para aplicação na impressão 3D por extrusão para terra crua, os parâmetros utilizados como referência foi a análise granulométrica, com destaque nas proporções de argila, silte e areia, e os limites de Atterberg, com foco no limite de liquidez.

4.3 Caracterização da mistura de terra crua

4.3.1 Ensaios de granulometria da fração grossa, fração fina e sedimentação

Na Tabela 9 do resumo granulométrico estão apresentados os resultados dos ensaios de granulometria realizados com a mistura.

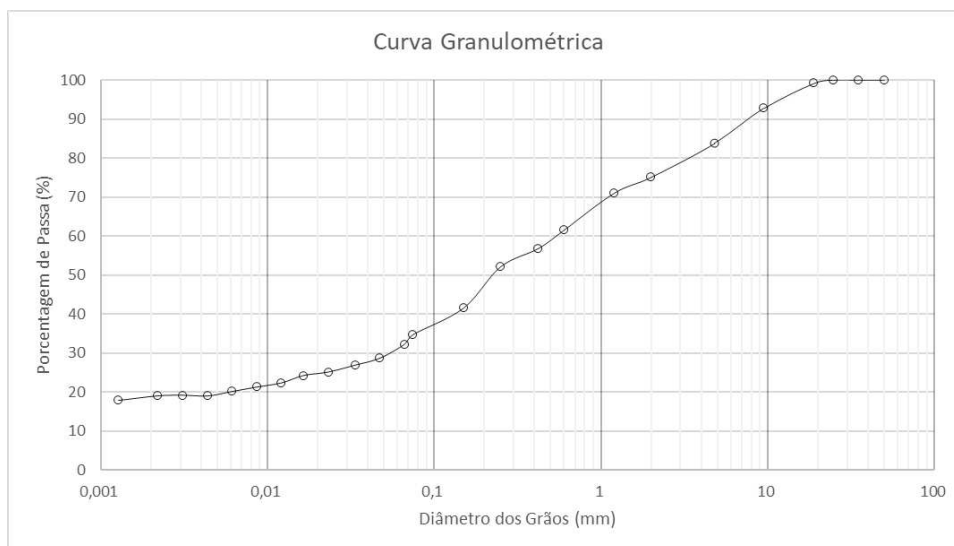
Tabela 9 - Resumo da granulometria da mistura

Resumo Granulométrico		
Ar. Grossa (2,0 mm - 0,6 mm)	13,6	
Ar. Média (600 µm - 200 µm)	14,7	45,3
Ar. Fina (200 µm - 60 µm)	17,0	
Silte (60 µm - 2 µm)	11,8	
Argila (< 2 µm)	18,0	

Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados obtidos referente ao estudo da granulometria da mistura, mostram domínio da fração arenosa com (45,3%), dividida em areia fina, média e grossa. No que trata da porção fina, a mistura apresenta 11,8% de silte e 18,0% de argila, números compatíveis com as composições indicadas pela literatura, os valores obtidos a partir das análises, apontam uma distribuição coerente entre as partículas grossas e finas. Na Figura 37 está mostrada a curva de distribuição granulométrica da mistura.

Figura 37 - Curva de distribuição granulométrica



Fonte: Autoria própria (2025)

Essa curva granulométrica aponta uma distribuição contínua e bem graduada, mostra um crescimento progressivo da porcentagem passante conforme ocorre o aumento do diâmetro dos grãos do material. Nos valores referentes às partículas finas, a curva inicia em torno de aproximadamente 18%, apontando a presença adequada de argila e silte, enquanto o aumento da inclinação de forma progressiva ao longo das faixas de areia, destaca a presença de partículas arenosas na composição do solo.

A mistura estudada demonstra composições granulométricas adequada para uso, a porção arenosa do solo representa a maior parte da composição do material, fator que favorece um bom empacotamento das partículas, além de fornecer uma boa estabilidade geométrica após a etapa de deposição das camadas, condições que colaboram para uma boa permeabilidade é reduzida retração durante a secagem (JI *et al.*, 2023).

Paralelamente, a presença equilibrada de finos, composta por silte e argila, garante coesão adequada para a formação dos filamentos contínuos, sem excesso de plasticidade que prejudique o processo de extrusão (Rocha *et al.*, 2024). Logo, a composição visualizada aponta

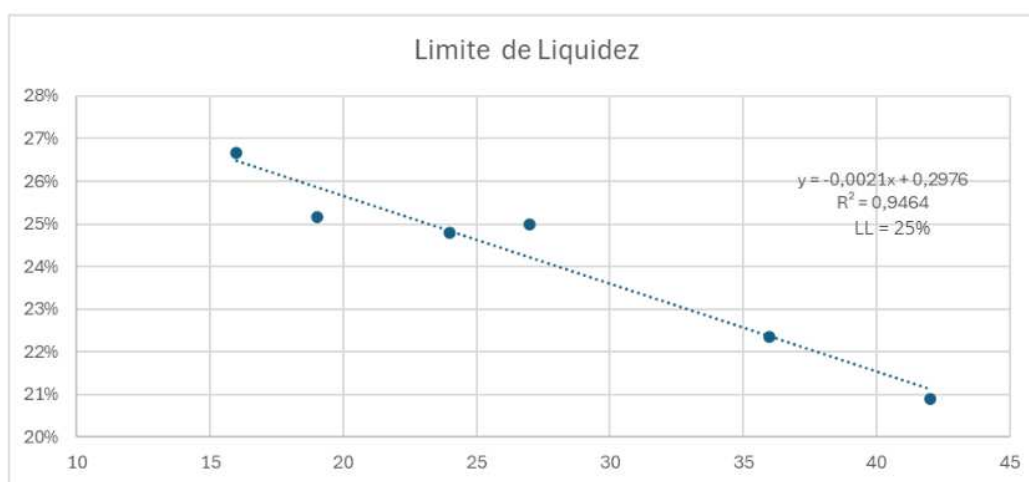
que a mistura está dentro dos requisitos granulométricos geralmente associados a viabilidade solos imprimíveis, confirmando a sua adequação para o uso na produção de blocos de terra crua através da impressão.

Utilizando os mesmos critérios de classificação adotados para os dois tipos de solos, a mistura também é classificada como areia-argilosa. Pois ela tem em sua composição o predomínio de areia com 45,3%, seguido de argila com 18%.

4.3.2 Ensaio dos limites de liquidez e plasticidade da mistura

Na Figura 38 estão apresentados os resultados do ensaio do limite de liquidez da mistura.

Figura 38 - Gráfico do Limite de liquidez



Fonte: Autoria própria (2025)

Os números obtidos no limite de liquidez da mistura apontam valores de umidade entre 21% e 27%, conseguidos a partir das análises com números de golpes variando de 16 a 42, esses percentuais também são iguais aos dos teores de água conforme mostrado na Tabela 4 do apêndice C. O LL médio encontrado de 25% é igual a média do teor de água da mistura, fator que confirma uma correta execução do ensaio e reforça a confiabilidade dos resultados. Com relação ao gráfico adquirido, ele mostra uma tendência linear coerente entre número de golpes e o teor de umidade, com alto coeficiente de determinação, garantindo dessa forma a obtenção confiável do Limite de Liquidez.

Os resultados demonstram um material adequado para processos de extrusão, valores nessas faixas facilitam a passagem de material pelo bico de impressão sem prejudicar a

estabilidade geométrica após sua deposição. O gráfico demonstra boa linearidade com coeficiente elevado ($R^2 = 0,95$), fator que facilita controle do processo e maior previsibilidade da mistura. O valor do índice de plasticidade ($IP = 9\%$), classifica a mistura de baixa e média plasticidade, comportamento propício para impressão 3D com terra, pois diminui os riscos de colapso das camadas e retrações excessivas no período de secagem, além de manter coesão suficiente entre os filamentos.

Mistura com LL moderado, como obtido no ensaio, IP reduzido e teor de água ajustado apontam excelente equilíbrio entre o processo de extrusão e estabilidade dimensional, compatíveis com uso em manufatura aditiva (Buson *et al.*, 2024). Logo, esses resultados indicam um material com particularidades que torna viável para uso na impressão 3D por extrusão. Na Tabela 10 está representado os resultados do ensaio do limite de plasticidade da mistura.

Tabela 10 - Resultados do limite de plasticidade da mistura

Limite de plasticidade da mistura	
Média da umidade	16%
Limite de plasticidade	16%
Índice de plasticidade	9%

Fonte: Autoria própria (2025)

O Limite de Plasticidade (LP) tem valores de umidade nas faixas de 14% a 17%, resultados obtidos para as amostras ensaiadas, como observado na Tabela 5 do apêndice C. Diante desses valores, atingiu-se um LP médio de aproximadamente 16%, valor no qual o material deixa de se comportar de forma plástica e passa a apresentar o início de fissuras quando sujeito a moldagem manual.

O valor de LP mostra um solo com plasticidade moderada e facilidade de moldagem contínua. Valores nessa faixa são ideais para processos de extrusão, pois demonstram equilíbrio entre coesão e a capacidade de deformação, diminuindo o aparecimento de fissuras durante a moldagem do filamento, além do material apresentar maior controle dimensional depois da etapa de deposição, haja vista que não necessitam de teores elevados de água para atingir a plasticidade necessária. Solos com limite de plasticidade baixo se associa a ruptura do filamento, enquanto o limite alto favorece deformações e perda de estabilidade das camadas (Bhusal *et al.*, 2023). Logo esses dados apontam que a mistura tem atributos que a torna

favorável para seu uso na extrusão.

4.3.3 Ensaio de densidade real da mistura

Na Tabela 11 está demonstrado os resultados da densidade real da mistura.

Tabela 11 - Resultados da densidade real da mistura

Densidade Real dos Solos - Mistura	
Densidade real	2,575 g/cm ³

Fonte: Autoria própria

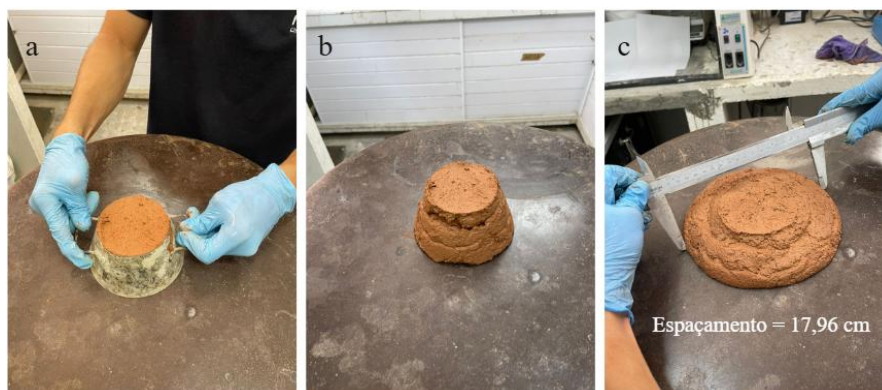
O ensaio de densidade real da mistura de terra crua apresenta valores que estão situados entre 2,427 g/cm³ e 2,578 g/cm³ como visto na Tabela 6 do apêndice C, uma vez que os números usados como referência para obter a densidade real foram de 2,572 g/cm³ e 2,578 g/cm³, através desses valores foi obtido um valor médio para a mistura de 2,575 g/cm³.

Esses são dados típicos de solos composto principalmente de partículas de quartzo e argilominerais, evidenciando uma composição compatível com materiais terrosos comumente usados em aplicações construtivas. O valor médio de densidade obtido de 2,575 g/cm³, verificou-se uma proximidade entre os valores encontrados apontando uma baixa dispersão dos resultados, destacando a uniformidade e a constância dos resultados, aspectos essenciais para os processos de impressão 3D, em que a regularidade das propriedades físicas influencia a estabilidade e regularidade do filamento extrudado (Ji *et al.*, 2023).

4.3.4 Análise da consistência e plasticidade da massa terra crua

Na Figura 39 mostra-se o material na mesa de consistência com o espaçamento obtido após o fim do procedimento.

Figura 39 - Ensaio de consistência e plasticidade da mistura 39a) Material colocado no cone; 39b) Após a retirada do cone; 39c) Após o espalhamento



Fonte: Autoria própria (2025)

Esse ensaio demonstra que a mistura de terra crua apresentou um espalhamento de 17,96 cm, indicando capacidade de deformação sob a ação dos golpes da mesa sem provocar colapso brusco. Após a retirada do tronco-cônico foi possível observar que o solo possui coesão favorável para manter sua integridade, além de expressar capacidade de escoamento controlado.

Misturas direcionadas para uso em impressão 3D por extrusão apontam que materiais com consistência intermediária, que trata-se da condição em que o material não demonstra rigidez excessiva que impossibilite a extrusão, nem elevada fluidez que acarrete colapso das camadas, tem melhor equilíbrio entre extrudabilidade e a estabilidade dimensional (Bhusal *et al.*, 2023). Segundo Tay *et al.*, (2019) com base nas análises experimentais, valores de espaçamento abaixo de 13 cm dificultam a extrusão contínua, enquanto que valores altos acima de 21 cm comprometem a manutenção da forma do material após a deposição, logo a faixa intermediária que gira em torno de 13 a 21 cm proporciona equilíbrio entre extrudabilidade e estabilidade geométrica.

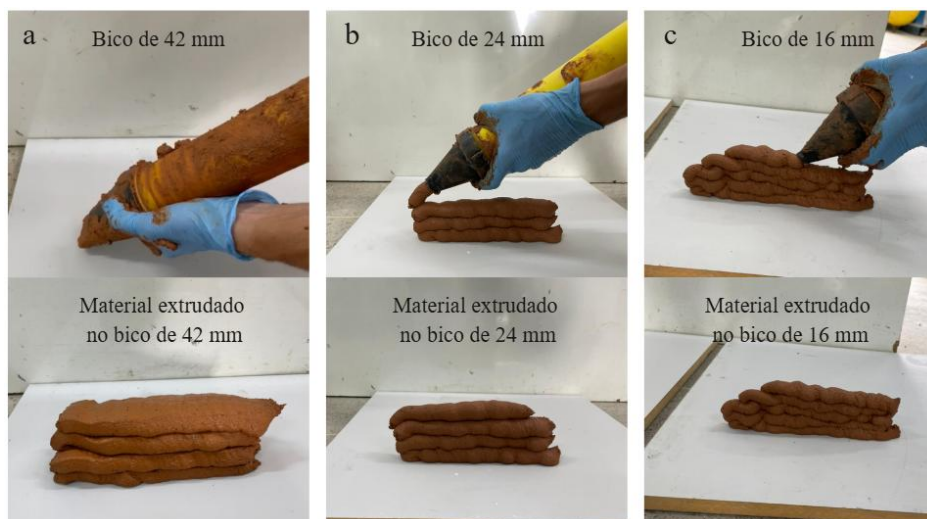
Comparando com a argamassa de referência estudada por Veras (2024), que mostrou espalhamento de 20,92 cm, a massa de terra crua analisada, com 17,96 cm possui valor um pouco menor, mas ainda está dentro da faixa considerada adequada para trabalhabilidade, promovendo equilíbrio satisfatório entre resistência ao escoamento e capacidade de deformação. Entretanto, com base na própria análise de Veras (2024), somente a avaliação do espalhamento não é um parâmetro suficiente para comprovar a viabilidade da mistura para impressão 3D.

4.3.5 Teste de Extrusão

Na Figura 40 é mostrado os resultados obtidos no ensaio de extrusão, utilizando a pistola

e os bicos de 42, 24 e 16mm.

Figura 40 - Ensaio de extrusão 40a) Material extrudado no bico de 42 mm; 40b) Material extrudado no bico de 24 mm; 40c) Extrudado no bico de 16 mm.



Fonte: Autoria própria (2025)

O ensaio evidenciou que o material de terra crua exibiu um comportamento extrudável, possibilitando a formulação de filamentos contínuos. O solo extrudado pelo bico de 42 mm resultou em filamentos com largura maior e boa uniformidade ao longo do seu comprimento, permitindo a formação de quatro camadas com aproximadamente 12 cm de altura, sem o surgimento de rupturas imediatas. Paralelamente, o bico de 24 mm gerou filamentos mais finos, porém permaneceram contínuos e regulares mantendo sua adequação geométrica durante a deposição das camadas. O bico de 16 mm apesar de possibilitar a extrusão contínua, mostrou menor estabilidade das camadas, com maior tendência a deformação após a deposição do material, quando comparado com os bicos de 42 e 24 mm.

Considerando a regularidade do filamento, estabilidade e controle geométrico, o bico de 24 mm apresenta-se o mais adequado para a extrusão do solo analisado, nele é possível observar um bom equilíbrio entre volume extrudado e a estabilidade do material.

Essas características demonstram que o material tem equilíbrio satisfatório entre coesão e capacidade de escoamento, nos três casos analisados não foi observado colapso, segregação do material ou descontinuidades no fluxo durante a extrusão. Embora o bico de 16 mm tenha indicado estabilidade inferior quando comparado aos demais, seu desempenho não é considerado inadequado, pois permitiu a formação contínua do filamento e a deposição das camadas sem falhas bruscas. Misturas extrudáveis devem possuir resistência suficiente para

assegurar sua forma após a etapa de deposição, sem afetar a continuidade do processo, fatores associados à plasticidade, teor de finos e consistência do solo (Perrot *et al.*, 2018). Nesse caso, o elemento avaliado atende as exigências mínimas de extrudabilidade e estabilidade no estado fresco, tornando-se adequado para uso em extrusão.

4.3.6 Ensaio de resistência à compressão

Na Tabela 12 está representado os valores dos ensaios de resistência a compressão realizados com os corpos de prova com 7 dias e 28 dias.

Tabela 12 - Resistência a compressão aos 7 e 28 dias

Resistência a Compressão		
Dias	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
7 dias	1,62	0,05
28 dias	1,83	0,0818

Fonte: Autoria própria (2025)

Mediante os resultados observados na Tabela 12, quando submetidos ao ensaio de resistência à compressão, os corpos de prova mostraram valores de 1,62 MPa aos 7 dias e 1,83 MPa aos 28 dias. Nota-se um aumento gradual da resistência ao longo do tempo de cura, apontando uma evolução gradativa do desempenho do material no estado endurecido. Os valores obtidos para o desvio padrão foram de 0,05 MPa para 7 dias e de 0,0818 para 28 dias, indicando pequena dispersão dos resultados.

Os valores encontrados destacam o comportamento típico de materiais à base de terra crua, que demonstram baixa resistência à compressão quando comparados com materiais cimentícios. Essa limitação estrutural acarreta restrições para o uso da terra crua em elementos de maior altura e com elevadas solicitações, uma vez que esse constituinte não pode suportar tensões elevadas, desse modo torna-se crucial a adoção de estabilizantes para a melhoria do seu desempenho estrutural (Houben & Guillaud, 1994).

Para a manufatura aditiva visando o aumento da coesão, resistência e da capacidade de empilhamento das camadas o uso de estabilizantes, como cal, cimento, polímeros naturais é fundamental para o bom funcionamento do processo. Logo, apesar do solo analisado possuir viabilidade para extrusão, sua aplicação em elevadas camadas demanda ajustes em sua

formulação a fim de garantir bom desempenho mecânico e estabilidade geométrica adequada.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho realizou-se a caracterização da terra crua para uso em impressão 3D por extrusão, a partir de solos coletados na cidade de Crateús. Os resultados mostraram que o bom funcionamento da massa no processo de extrusão está inteiramente ligado ao equilíbrio entre as partes granulométricas e a plasticidade do material.

O solo A, com alto teor de argila, demonstrou alta coesão, elevada plasticidade e tendência à retração, comportamento inadequado para garantir uma boa estabilidade durante a impressão. O solo B, com característica arenosa e sem plasticidade, expressou baixa coesão, fator que dificulta a extrusão contínua do material. Logo, os dois solos, quando estudados isoladamente, não apresentaram viabilidade para o uso em impressão 3D em seu estudo natural.

A mistura formulada a partir da combinação dos dois solos, indicou distribuição granulométrica equilibrada e índices de plasticidade compatíveis com os valores recomendados pela literatura para a formulação de uma massa de terra crua adequada para extrusão, mostrando assim viabilidade da mistura para aplicação em procedimentos da manufatura aditiva.

Portanto, a caracterização e o ajuste da massa dentro dos critérios recomendados, são etapas de grande importância e fundamentais para garantir boa extrudabilidade e estabilidade do material na impressão 3D. O estudo reforçou que a elaboração adequada da mistura permitiu transformar solos em seu estado natural em massas compatíveis com essa tecnologia construtiva, além de destacar o potencial do uso da terra para a impressão 3D como uma metodologia promissora para uso na construção civil.

5.1 Limitações do trabalho

- O tempo foi limitado para caracterizar uma maior quantidade de solos.
- Não foi possível o uso de impressora 3D para a impressão de um bloco para melhorar a avaliação da extrusão.
- Não foram investigados os efeitos do uso de estabilizantes na massa de terra crua.

5.2 Recomendações de trabalhos futuros

- Avaliar misturas de solo-cimento aplicadas à impressão 3D.
- Realizar ensaios de impressão 3D em escala real.

- Avaliar o desempenho do material em condições ambientais reais, considerando variações de temperatura, umidade e tempo de cura.
- Avaliar o uso de estabilizantes na terra crua para melhorar resistência, estabilidade e durabilidade para a impressão 3D.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2016.
- ARDUIN, D.; CALDAS, L. R.; PAIVA, R. D. L. M.; ROCHA, F. **Life Cycle Assessment (LCA) in earth construction: a systematic literature review considering five construction techniques.** *Sustainability*, v. 14, n. 20, p. 13228, 2022. <https://doi.org/10.3390/su142013228>
- BANIHASHEMI, S.; AKBARNEZHAD, A.; SHEIKHKHOSHKAR, M.; EL HAOUZI, H. B.; ROLFE, B. **3D printing in construction: sustainable technology for building industry.** *Progress in Additive Manufacturing*, v. 10, p. 11729–11762, 2025. <https://doi.org/10.1007/s40964-025-01314-y>
- BHUSAL, S.; SEDGHI, R.; HOJATI, M. **Evaluating the printability and rheological and mechanical properties of 3D printed earthen mixes for carbon neutral buildings.** *Sustainability*, v. 15, n. 21, p. 15617, 2023. <https://doi.org/10.3390/su152115617>
- BUSON, M. A.; VARUM, H.; REZENDE, M. A. **First impressions on three dimensional printing with earth based mortar at the Faculty of Engineering of the University of Porto.** *Buildings*, v. 14, n. 2, art. 312, 2024. <https://doi.org/10.3390/buildings14020312>
- BUSWELL, R. A.; LEAL DE SILVA, W. R.; JONES, S. Z.; DIRRENBARGER, J. **3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research.** *Cement and Concrete Research*, v. 112, p. 37–49, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>
- CARBONARI, L. T.; TORALLES, B. M.; LIBRELOTTO, L. I.; FILGUEIRAS, M. B.; GIGLIO, T. G. F. **3D printing with natural materials in civil construction: applications for the thermal performance of buildings.** *Revista MIX Sustentável*, v. 10, n. 4, p. 17–29,

2024. <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2024.v10.n4.17-29>

CARROBÉ, A.; RINCÓN, L.; MARTORELL, I. **Thermal monitoring and simulation of earthen buildings: a review.** *Energies*, v. 14, n. 8, p. 2080, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14082080>

COCCO, G.; BRANDO, G.; SPACONE, E. **A review of local construction practices applied on unreinforced adobe buildings in South America.** *Frontiers in Built Environment*, v. 8, art. 974005, 2022. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.974005>

DANTAS, J. L. **Impermeabilização em blocos de terra compactados: estudo comparativo entre as resinas das marcas Hydronorth® e a Viapol®.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Arquitetura e Urbanismo) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/15719>

El-Sayegh, S., Romdhane, L. & Manjikian, S. **A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks.** *Arch. Civ. Mech. Eng.* 20, 34 (2020). <https://doi.org/10.1007/s43452-020-00038-w>

FALESCHINI, F.; TRENTO, D.; MASOOMI, M.; PELLEGRINO, C.; ZANINI, M. A. **Sustainable mixes for 3D printing of earth-based constructions.** *Construction and Building Materials*, v. 398, p. 132496, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132496>

FUNCEME – FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. **Atlas climatológico do Ceará.** Fortaleza: FUNCEME, 2019.

GIRALDELLI, M. A. et al. **Construção com terra: breve histórico e técnicas.** *Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde*, v. 24, n. 4, p. 357–364, 2020. <https://doi.org/10.17921/1415-6938.2020v24n4p357-364>

GYAWALI, B.; HAGHNAZAR, R.; AKULA, P.; NASIR, V. **A review on 3D printing with clay and sawdust/natural fibers: printability, rheology, properties, and applications.** *Journal of Building Engineering*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103024>

HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. **Traité de construction en terre.** Marseille: CRATerre EAG; Parenthèses, 1989.

HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. **Earth construction: a comprehensive guide.** London: Intermediate Technology Publications, 1994.

JI, Y.; POUILLAIN, P.; LEKLOU, N. **The selection and design of earthen materials for 3D printing.** *Construction and Building Materials*, v. 404, art. 133114, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133114>

JO, J. H. et al. **Development of a 3D printer for concrete structures: laboratory testing of cementitious materials.** *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2020. <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0388-2>

LOPES, G. T. F. **Exploração das possibilidades da impressão 3D na construção civil**. 2016. 92 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2016. Disponível em: https://sigarra.up.pt/feup/pt/pub_geral.show_file?pi_gdoc_id=729932. Acesso em: 13 out. 2025.

MORA RUIZ, V.; SOTO PAZ, J.; ATTIA, S.; MEJÍA PARADA, C. **Sustainable earthen construction: a meta analytical review of environmental, mechanical, and thermal performance**. *Buildings*, v. 15, n. 6, p. 918, 2025. <https://doi.org/10.3390/buildings15060918>

NASRABADI, M. T.; LARIMIAN, T.; TIMMIS, A.; YIGITCANLAR, T. **Mapping four decades of housing inequality research: Trends, insights, knowledge gaps, and research directions**. *Sustainable Cities and Society*, v. 113, art. 105693, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105693>

NINA, J. F.; EIRES, R.; OLIVEIRA, D. V. **Earthen construction: acceptance among professionals and experimental durability performance**. *Construction Materials*, v. 3, n. 2, p. 143–163, 2023. <https://doi.org/10.3390/constrmater3020010>

PACILLO, G. A.; RANOCCHIALI, G.; LOCCARINI, F.; FAGONE, M. **Additive manufacturing in construction: a review on technologies, processes, materials, and their applications of 3D and 4D printing**. *Material Design & Processing Communications*, v. 3, n. 9, 2021. <https://doi.org/10.1002/mdp2.253>

PEREIRA, J. P. **Análise do comportamento térmico de paredes de taipa**. 2013. Dissertação – Universidade de Évora, Évora, 2013.

PERROT, A.; RANGEARD, D.; PIERRE, A. **3D printing of earth-based materials: processing aspects**. *Construction and Building Materials*, v. 172, p. 108–118, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.017>

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. v. 3.

PINTO, J.; VARUM, H.; CEPEDA, A.; TAVARES, P.; LOUSADA, J.; SILVA, P.; VIEIRA, J. **Study of the traditional tabique constructions in the Alto Tâmega region**. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, v. 142, p. 299–307, 2010. <https://doi.org/10.2495/SW100281>

RAEL, R.; SAN FRATELLO, V. **Printing architecture: innovative recipes for 3D printing**. New York: Princeton Architectural Press, 2018.

RAVINDER, B. **Assessing The Environmental Impact Of The Construction Industry: Insights For Environmental Science And Sustainable Development**. *International Journal of Environmental Sciences*, v. 11, p. 2248–2260, 2025. <https://doi.org/10.64252/km0nnc24>

ROCCO, A. et al. **Adobe blocks reinforced with vegetal fibres: mechanical and thermal characterisation**. *Buildings*, v. 14, n. 8, p. 2582, 2024. <https://doi.org/10.3390/buildings14082582>

ROCHA, D.; FARIA, P.; LUCAS, S. S. **Additive manufacturing of earth-based materials: a literature review on mortar composition, extrusion, and processing earth**. *Materials*, v. 17, n.

1, art. 202, 2024. <https://doi.org/10.3390/ma17010202>

ROSENBERG, D.; LOVE, S.; HUBBARD, E.; KLIMSCHA, F. **7,200 years old constructions and mudbrick technology: the evidence from Tel Tsaf, Jordan Valley, Israel.** *PLOS ONE*, v. 15, n. 1, e0227288, 2020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227288>

RÜCKRICH, S. et al. **Evaluating clay characteristics for printable geo-materials: a case study of clay–sand mixes.** *Buildings*, 2024. <https://doi.org/10.3390/buildings14061576>

SÁNCHEZ CALVILLO, A.; RINCÓN, L.; HAMARD, E.; FARIA, P. **Bibliometric analysis on earthen building: approaches from the scientific literature and future trends..** *Buildings*, v. 14, n. 12, p. 3870, 2024. <https://doi.org/10.3390/buildings14123870>

SAMPAIO, A. L. P. et al. **Panorama técnico, socioambiental, estrutural e termoacústico de construções em terra: uma revisão bibliográfica.** *Principia*, n. 51, p. 75–85, 2020. <https://doi.org/10.18265/1517-0306a2020v1n51p75-85>

SANTOS, D. P.; BESSA, S. A. L. **O uso do adobe no Brasil: uma revisão de literatura.** *Mix Sustentável*, v. 6, n. 1, p. 53–66, 2020. <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/3741/0>

TAY, Y. W. D.; QIAN, Y.; TAN, M. J. **Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test.** *Composites Part B: Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106968>

UNESCO WORLD HERITAGE CENTRE. **Old Walled City of Shibam.** Disponível em: <https://whc.unesco.org/en/list/192/>.

UNESCO WORLD HERITAGE CENTRE. **Taos Pueblo.** Disponível em: <https://whc.unesco.org/en/list/492/>.

VERAS, V. C. P. **Desenvolvimento de projeto de mistura de compósito cimentício para aplicações de impressão 3D.** *Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil)* — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/78956>

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*, v. 16, n. 2, p. 670, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16020670>

APÊNDICE A

Tabela 1 - Fração grossa do solo A

Fração Grossa				
Peneira		Peso retido (g)	Peso retido acum. (g)	% que passa
Pol./Nº	mm			
2"	50,0	0	0	100,0
1 1/2"	35,0	0	0	100,0
1"	25,0	80,98	80,98	97,9
3/4"	19,0	14,91	95,89	97,5
3/8"	9,5	211,08	306,97	92,2
#4	4,8	172,68	479,65	87,7
#10	2,0	184,42	664,07	83,0

Tabela 2 - Fração fina do solo A

Fração Fina				
Peneira		Peso retido (g)	Peso retido acum. (g)	% que passa
Pol./Nº	mm			
#16	1,2	1,82	1,82	80,8
#30	0,6	7,21	9,03	71,9
#40	0,42	3,64	12,67	67,4
#150	0,25	3,75	16,42	62,8
#100	0,15	8,9	25,32	51,8
#200	0,075	5,81	31,13	44,7

Tabela 3 - Resultados do ensaio de sedimentação do solo A

Sedimentação						
Tempo decorrido (s)	Leitura (L)	Temp. (°C)	Leitura (Ld)	Altura de Queda (cm)	Diâmetro (mm)	Porc. Passante (%)
30	1,024	24,8	1,002	12,47	0,064	43,9
60	1,023	24,8	1,002	12,60	0,046	41,9
120	1,023	24,8	1,002	12,60	0,032	41,9
240	1,022	24,8	1,002	12,06	0,022	39,9
480	1,021	24,7	1,002	12,19	0,016	37,9
900	1,02	24,5	1,002	12,31	0,012	35,8
1800	1,0195	24,3	1,002	12,38	0,008	34,7
3600	1,019	23,7	1,002	12,44	0,006	33,4
7200	1,019	23,6	1,002	12,44	0,004	33,4
14400	1,0185	23,8	1,002	12,50	0,003	32,5
28800	1,018	22,7	1,002	12,56	0,002	30,9
86400	1,017	24,3	1,002	12,69	0,001	29,8

Tabela 4 - Resultados do limite de liquidez do solo A

Limite de Liquidez – Solo A					
Cápsula	101	39	40	23	20
Nº de golpes	39	26	22	16	15
Peso Bruto Úmido	18,62	16,42	15,64	15,08	15,54
Peso Bruto Seco	16,36	14,3	13,5	13,2	13,34
Tara	10,6	9,05	8,32	8,96	8,67

Peso de Água	2,26	2,12	2,14	1,88	2,2
Peso do Solo Seco	5,76	5,25	5,18	4,24	4,67
Umidade	39%	40%	41%	44%	47%

Tabela 5 - Resultados do limite de plasticidade do solo A

Limite de Plasticidade – Solo A					
Cápsula	75	12	2	36	13
Peso Bruto Úmido	11,37	10,98	13,18	10,3	11,92
Peso Bruto Seco	10,99	10,6	12,58	10,08	11,35
Tara	9,33	9,14	10,27	9,19	9,32
Peso de Água	0,38	0,38	0,6	0,22	0,57
Peso do Solo Seco	1,66	1,46	2,31	0,89	2,03
Umidade	23%	26%	26%	25%	28%

Tabela 6 - Resultados da densidade real dos solos - solo A

Densidade Real dos Solos - Solo A						
Picnômetro	P1	P2	P3	P4	Dt	Dr
5	31,15	41,2	86,96	80,8	2,584	
2	29,36	39,63	86,76	80,41	2,620	
1	30,79	41,03	87,28	80,89	2,660	2,664
3	29,01	39,04	85,52	79,25	2,668	
4	29,96	40,1	86,39	80,04	2,675	

APÊNDICE B

Tabela 1 - Fração grossa do solo B

Fração Grossa				
Peneira		Peso retido (g)	Peso retido acum. (g)	% que passa
Pol./Nº	mm			
2"	50,0	0	0	100,0
1 1/2"	35,0	0	0	100,0
1"	25,0	237,25	237,25	94,5
3/4"	19,0	136,73	373,98	91,4
3/8"	9,5	393,73	767,71	82,3
#4	4,8	426,96	1194,67	72,4
#10	2,0	331,45	1526,12	64,7

Tabela 2 - Fração fina do solo B

Fração Fina				
Peneira		Peso retido (g)	Peso retido acum. (g)	% que passa
Pol./Nº	mm			
#16	1,2	3,65	3,65	61,3
#30	0,6	13,77	17,42	48,5
#40	0,42	6,62	24,04	42,3
#150	0,25	5,73	29,77	37,0
#100	0,15	10,91	40,68	26,8
#200	0,075	8,39	49,07	19,0

Tabela 3 - Resultados do ensaio de sedimentação do solo B

Sedimentação						
Tempo decorrido (s)	Leitura (L)	Temp. (°C)	Leitura (Ld)	Altura de Queda (cm)	Diâmetro (mm)	Porc. Passante (%)
30	1,013	25,1	1,002	13,85	0,068	16,9
60	1,012	25,1	1,002	13,98	0,048	15,4
120	1,011	25,1	1,002	14,10	0,034	13,9
240	1,0105	25,1	1,002	13,50	0,024	13,1
480	1,01	25,1	1,002	13,57	0,017	12,4
900	1,0095	24,8	1,002	13,63	0,012	11,5
1800	1,009	24,5	1,002	13,69	0,009	10,7
3600	1,0085	24,1	1,002	13,75	0,006	9,8
7200	1,0085	23,6	1,002	13,75	0,004	9,6
14400	1,008	23,6	1,002	13,82	0,003	8,8
28800	1,008	22,8	1,002	13,82	0,002	8,5
86400	1,0075	24,3	1,002	13,88	0,001	8,3

Tabela 4 - Resultados do limite de liquidez do solo B

Limite de Liquidez – Solo B					
Cápsula	24	9	20	250	42
Nº de golpes	35	30	28	22	12
Peso Bruto Úmido	14,42	14,45	12,14	17,18	16,11
Peso Bruto Seco	13,74	13,76	11,67	16,03	14,92
Tara	9,36	9,14	8,66	9,16	8,5

Peso de Água	0,68	0,69	0,47	1,15	1,19
Peso do Solo Seco	4,38	4,62	3,01	6,87	6,42
Umidade	16%	15%	16%	17%	19%

Tabela 5 - Resultados da densidade real dos solos - solo B

Densidade Real dos Solos - Solo B						
Picnômetro	P1	P2	P3	P4	Dt	Dr
6	30,69	40,78	87,2	80,96	2,621	2,649
8	30,79	40,89	87,07	80,81	2,630	
7	30,9	41,06	87,54	81,22	2,646	
9	30,83	40,96	87,71	81,4	2,652	
10	31,01	41,08	87,68	81,37	2,678	

APÊNDICE C

Tabela 1 - Fração grossa da mistura

Fração Grossa				
Peneira		Peso retido (g)	Peso retido acum. (g)	% que passa
Pol./Nº	mm			
2"	50,0	0	0	100,0
1 1/2"	35,0	0	0	100,0
1"	25,0	0	0	100,0
3/4"	19,0	32,53	32,53	99,2
3/8"	9,5	255,38	287,91	92,7
#4	4,8	357,11	645,02	83,7
#10	2,0	343,79	988,81	75,0

Tabela 2 - Fração fina da mistura

Fração Fina				
Peneira		Peso retido (g)	Peso retido acum. (g)	% que passa
Pol./Nº	mm			
#16	1,2	3,77	3,77	70,9
#30	0,6	8,78	12,55	61,4
#40	0,42	4,38	16,93	56,7
#150	0,25	4,33	21,26	52,0
#100	0,15	9,79	31,05	41,4
#200	0,075	6,25	37,3	34,7

Tabela 3 - Resultados do ensaio de sedimentação da mistura

Sedimentação						
Tempo decorrido (s)	Leitura (L)	Temp. (°C)	Leitura (Ld)	Altura de Queda (cm)	Diâmetro (mm)	Porc. Passante (%)
30	1,0195	26,5	1,001	13,04	0,066	32,1
60	1,0175	26,5	1,001	13,29	0,047	28,6
120	1,0165	26,5	1,001	13,41	0,034	26,8
240	1,0155	26,5	1,001	12,88	0,023	25,0
480	1,015	26,5	1,001	12,94	0,017	24,1
900	1,014	26,2	1,001	13,06	0,012	22,2
1800	1,0135	25,8	1,002	13,13	0,009	21,2
3600	1,013	25,3	1,002	13,19	0,006	20,0
7200	1,0125	24,7	1,002	13,25	0,004	18,9
14400	1,0125	25,1	1,002	13,25	0,003	19,1
28800	1,0125	24,7	1,002	13,25	0,002	18,9
86400	1,012	24,1	1,002	13,32	0,001	17,7

Tabela 4 - Resultados do limite de liquidez da mistura

Limite de Liquidez - Mistura						
Cápsula	10	14	33	49	225	46
Nº de golpes	42	36	27	24	19	16
Peso Bruto Úmido	14,12	14,15	15,13	15	16,3	13,96
Peso Bruto Seco	12,97	13,18	13,84	13,77	14,73	12,76
Tara	7,47	8,84	8,68	8,81	8,49	8,26

Peso de Água	1,15	0,97	1,29	1,23	1,57	1,2
Peso do Solo Seco	5,5	4,34	5,16	4,96	6,24	4,5
Peso do Solo Úmido	6,65	5,31	6,45	6,19	7,81	5,7
Umidade	21%	22%	25%	25%	25%	27%
Teor de Água	21%	22%	25%	25%	25%	27%
Média do Teor de Água	25%					

Tabela 5 - Resultados do limite de plasticidade da mistura

Limite de Plasticidade - Mistura					
Cápsula	5	51	20	19	24
Peso Bruto Úmido	11,28	11,45	10,52	10,28	11,81
Peso Bruto Seco	10,87	11,08	10,26	10	11,47
Tara	8,41	8,61	8,62	8,05	9,37
Peso de Água	0,41	0,37	0,26	0,28	0,34
Peso do Solo Seco	2,46	2,47	1,64	1,95	2,1
Umidade	17%	15%	16%	14%	16%

Tabela 6 - Resultados da densidade real dos solos – mistura

Densidade Real dos Solos - Mistura							
Picnômetro	P1	P2	P3	P4	Dt	D20	D20
2	29,34	39,35	86,29	80,4	2,430	2,427	
5	31,4	40,88	87,31	81,71	2,443	2,441	
9	30,82	41,37	87,68	81,41	2,465	2,463	
7	30,64	40,86	86,54	80,29	2,574	2,572	
10	31,03	41,25	87,61	81,35	2,581	2,578	2,575