



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CAMPUS UFRJ-MACAÉ
Professor Aloísio Teixeira



EFEITO DA UMIDADE DE FABRICAÇÃO NA RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO DE TIJOLOS SOLO-CIMENTO

GABRIEL MARTINS LOBO

Macaé
Fevereiro/2019



Efeito da Umidade de fabricação na resistência à compressão de tijolos solocimento

Gabriel Martins Lobo

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro – Campus Macaé, como requisito parcial para aquisição do título de engenheiro civil.

Orientador: Gustavo Vaz de Mello Guimarães

EFEITO DA UMIDADE DE FABRICAÇÃO NA RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO DE TIJOLOS SOLO-CIMENTO

GABRIEL MARTINS LOBO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO APRESENTADO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO –
CAMPUS MACAÉ, COMO REQUISITO PARCIAL PARA AQUISIÇÃO DO GRAU
DE ENGENHEIRO CIVIL.

Macaé, _____ de _____ 2019

Examinado por:

Prof. Gustavo Vaz de Mello Guimarães, D.Sc.

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Leandro Tomaz Knopp, M.Sc

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Marcelo Costa Cardoso, D.Sc.

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Márcio José de Medeiros, D.Sc.

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Leandro Torres Di Gregório, D.Sc.

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Lobo, Gabriel Martins

Efeito da Umidade de fabricação na resistência à compressão de tijolos solo-cimento/ Gabriel Martins Lobo – Macaé: UFRJ/Campus UFRJ – Macaé 2019.

107 p.: il. Color.; 29,7 cm.

Orientador: Gustavo Vaz de Mello Guimarães

Projeto de Graduação – UFRJ/Macaé/Curso de Engenharia Civil, 2018.

Referências Bibliográficas p. 74-77.

1. Introdução. 2. Revisão Bibliográfica. 3. Materiais e Métodos. 4. Apresentação e análise dos resultados. 5. Conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

I. Guimarães, Gustavo Vaz de Mello, II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, Curso de Engenharia Civil. III. Efeito da Umidade na resistência à compressão de tijolos solo-cimento

"Data! Data! Data!" I can't make bricks without clay.

(Arthur Conan Doyle)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, por todo apoio durante essa caminhada.

Ao professor Gustavo Guimarães por toda a orientação, pelos ensinamentos dentro e fora de sala de aula e pela dedicação e disponibilidade sempre que precisei.

Ao Professor Márcio Medeiros por ter sido um orientador acadêmico sempre presente durante a minha graduação e, ainda pelo apoio na parte de análises estatísticas desse trabalho.

Ao Professor Marcelo Cardoso pela disponibilidade e suporte na realização dos ensaios à compressão realizados para esse trabalho.

Aos integrantes do #inovareaprender, não só pela cessão do container para construção da câmara úmida, mas, especialmente Luemy, Rodrigo, Thiago, Ramon, Cristiane, Peterson que direta ou indiretamente contribuíram para que eu chegasse até aqui.

Ao eng^o mecânico Newton que me ajudou seja consertando algum equipamento ou me ajudando a utilizar.

Aos membros do projeto SHS e ao professor Leandro Gregório.

Aqueles que me ajudaram de alguma forma e não foram citados aqui.

Por último e não menos importante ao Alfeu Rocha, Tales Paiva, Lucas Alcântara, Raphael Pereira, Julião Silva, Tales Braga, Gustavo Fernandes, Cleyton, Lucas Marques pela ajuda durante a realização de algumas etapas desse TCC.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à UFRJ – Macaé como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

EFEITO DA UMIDADE DE FABRICAÇÃO NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE TIJOLOS SOLO-CIMENTO

Gabriel Martins Lobo

Fevereiro/2019

Orientador: Gustavo Vaz de Mello Guimarães

Curso: Engenharia Civil

Neste trabalho, através de uma metodologia experimental, foram analisados aspectos de tijolos modulares compostos por misturas solo-cimento produzidos em prensa manual, com a finalidade de encontrar relações entre a resistência dos tijolos e a variação em alguns parâmetros das normas específicas. A umidade ótima dos tijolos foi obtida através de um ensaio de compactação tipo Proctor Normal. Os tijolos foram rompidos em diferentes máquinas de ensaio a compressão, sendo alguns imersos previamente em água e outros não. A análise dos resultados obtidos foi feita utilizando ferramentas estatísticas. Os resultados permitem observar o impacto de algumas variáveis na resistência à compressão dos tijolos, além de informações para a elaboração de um portfólio para futuras práticas laboratoriais e produção de tijolos modulares de solo-cimento.

Palavras-chave: Tijolo modular, Solo-cimento, Análise estatística, SHS.

Abstract of the Undergraduate Project presented to UFRJ - Macaé as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Civil Engineer.

EFFECT OF MANUFACTURING UMIDITY ON COMPRESSIVE STRENGTH OF SOIL CEMENT BRICKS

Gabriel Martins Lobo

February/2019

Advisor: Gustavo Vaz de Mello Guimarães.

Course: Civil Engineering

In this work, through an experimental methodology, aspects of modular bricks composed of soil-cement mixtures produced in a manual press were analyzed, in order to find relationships between the resistance of the bricks and the variation in some parameters of the specific standards. The optimal moisture of the bricks was obtained through a Proctor Normal type compaction test. Some bricks were previously immersed in water and others not, and broken in different compression testing machines. The analysis of the obtained results was done using statistical tools. The results allow to observe the impact of some variables on the compressive strength of the bricks, as well as information for the elaboration of a portfolio for future laboratory practices and the production of modular soil-cement bricks.

Keywords: Modular brick, Soil-cement, Statistical analysis, SHS.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivos Gerais	2
1.1.2	Objetivos Específicos.....	2
1.2	Metodologia	3
1.3	Estrutura do trabalho.....	3
2	Revisão Bibliográfica.....	4
2.1	Solo.....	4
2.1.1	Origem dos Solos	4
2.1.2	Composição Química e mineralógica	7
2.1.3	A estrutura do solo.....	8
2.1.4	Compactação do solo	10
2.2	Cimento Portland	11
2.3	Estabilização dos solos.....	15
2.3.1	Solo-cimento.....	17
2.3.2	Fatores que condicionam a qualidade da mistura de solo-cimento	19
2.3.3	Métodos de dosagem da mistura de solo-cimento.....	20
2.4	O solo como material de construção.....	21
2.4.1	Histórico.....	21
2.4.2	Métodos construtivos	23
2.5	Tijolo Solo-cimento.....	24
2.5.1	O projeto SHS.....	27
3	Materiais e Métodos	29
3.1	Materiais utilizados.....	29
3.1.1	Solo.....	29
3.1.2	Cimento	32
3.1.3	Água	32
3.2	Composição das misturas.....	32
3.3	Ensaio de Compactação	33
3.4	Fabricação dos tijolos de solo-cimento	40
3.4.1	Armazenamento dos componentes	41
3.4.2	Determinação do teor de umidade de solos	42
3.4.3	Preparação da mistura.....	43
3.4.4	Moldagem dos tijolos	45

3.4.5 Cura	47
3.5 Ensaio de compressão.....	50
3.6 Análises estatísticas.....	54
4 Apresentação e Análise dos resultados	56
4.1 Ensaio de Compactação	56
4.1.1 Ensaio de Compactação sem cimento.....	56
4.1.2 Ensaio de Compactação com cimento.....	57
4.1.3 Comparação entre os ensaios	58
4.1.4 Dificuldades Associadas a adição do cimento no ensaio.....	61
4.2 Ensaio de Resistência à compressão simples	62
4.2.1 Máquina de Ensaio à compressão elétrica versus Máquina de ensaio à compressão hidráulica	63
4.2.1 Ensaio imerso versus não imerso	65
4.2.3 Dificuldades Associadas a fabricação do tijolo solo-cimento	70
5 Conclusões e sugestões para futuras pesquisas	73
5.1 Principais conclusões.....	73
5.1.1 Comparação entre os ensaios de compactação tipo Proctor normal com e sem adição de cimento	73
5.1.2 Ensaio à compressão simples realizado na máquina de ensaio à compressão hidráulica versus máquina de ensaio à compressão elétrica	73
5.1.3 Efeito da imersão prévia dos tijolos em água na resistência à compressão dos tijolos solo-cimento.....	73
5.1.4 Efeito da umidade de fabricação na resistência à compressão dos tijolos solo-cimento	74
5.2 Sugestões para o prosseguimento da pesquisa	74
Referências	75
Apêndice 1: Ensaio de compactação	79
1 Ensaio de compactação sem cimento.....	79
2 Ensaio de compactação com cimento.....	80
Apêndice 2: Umidade dos solos utilizados	82
Apêndice 3: Dados Gerais dos tijolos produzidos.	84
Apêndice 4: Programas gerados em Python	86
1 Regressão polinomial.....	86
2 Análise estatística	88
Apêndice 5: Fotos boas demais para não serem incluídas em um trabalho experimental.....	91

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Estrutura do Solo (SENÇO, 2007).....	4
Figura 2: Horizontes do Solo (PENA,2017).....	6
Figura 3:Esquema Simplificado de Fabricação de Cimento Portland (PINHO, 2012).	14
Figura 4: Mastaba do faraó Shepsekaf, 2510 A.C. (EGYPT ARCHIVE, 2007 apud WIKIPEDIA, 2019).....	22
Figura 5: Velha cidade Murada de Shibam (UNESCO, 2006 apud WIKIPEDIA, 2019)	23
Figura 6: Localização das Jazidas de Solo (GOOGLE, 2018).....	29
Figura 7: Coleta de solo na Jazida de solo 1.....	30
Figura 8: Solo 1 à esquerda e Solo 2 à direita (SOUSA, 2018).....	30
Figura 9: Curva granulométrica dos solos 1 e 2 (SOUSA, 2018)	31
Figura 10: Ajuste para obtenção dos limites de liquidez dos solos 1 e 2 (SOUSA,2018)	32
Figura 11: Equipamentos e materiais utilizados no ensaio de compactação	34
Figura 12: Processo de preparação da amostra	35
Figura 13: Pesagem do molde.	36
Figura 14: Processo de homogeneização da mistura	36
Figura 15: Preenchimento e compactação do molde.	37
Figura 16: Escarificação da amostra	37
Figura 17: Arrasamento do solo em excesso.	38
Figura 18:Retirada de amostras para determinação da umidade.....	39
Figura 19: Prensa manual e triturador de solo (VIMAQ PRENSAS apud SOUSA, 2018)	40
Figura 20: Formas de armazenar o solo	41
Figura 21: Armazenamento do cimento.	42
Figura 22:Sequência de preparação da mistura.....	44
Figura 23:Local protegido da chuva e da luz direta do sol onde foram fabricados os tijolos.	45
Figura 24: Abertura da prensa para colocação do solo.....	46
Figura 25: Processo de Prensagem do solo.....	46
Figura 26: Etapa de desmoldagem do solo	47
Figura 27: Container utilizado como câmara úmida	49
Figura 28: Corte dos corpos de prova utilizando uma serra policorte	51
Figura 29: Colocação da pasta de cimento	51
Figura 30: Planificação dos corpos de prova.....	52
Figura 31: Imersão dos corpos de prova	52
Figura 32: Utilização de peças metálicas para uniformizar a carga	53
Figura 33: Painel da máquina de ensaio à compressão hidráulica, com destaque para a válvula que inicia o carregamento	54
Figura 34: Corpo de prova rompido à compressão	54
Figura 35: Umidade (%) versus Massa específica seca (g/cm ³) na mistura Solo 1 e Solo 2.	57

Figura 36: Umidade (%) versus Massa específica seca (g/cm^3) na mistura Solo 1, Solo 2 e cimento.....	58
Figura 37: Comparação entre os ensaios realizados	59
Figura 38: Ataque da argila pela cal. (INGLES, 1970 apud MARCONDES, 1992) ...	60
Figura 39: Falha na retirada do colarinho na mistura de solo-cimento.....	61
Figura 40: Lubrificação do colarinho com vaselina.....	62
Figura 41: Retirada do colarinho, para finalização do procedimento.....	62
Figura 42: Deformação versus Tensão à compressão em tijolo rompido na Máquina de ensaio à compressão "elétrica"	64
Figura 43: Distribuição da resistência à compressão dos tijolos nas duas máquinas de ensaio à compressão	65
Figura 44: Distribuição da resistência à compressão dos tijolos com e sem imersão prévia.	66
Figura 45: Comparação da resistência à compressão para distintos grupos de umidades.....	68
Figura 46: Gráfico de dispersão - Umidade versus Resistência à compressão (MPa)	68
Figura 47: Curva de otimização - Umidade versus Resistência à compressão média (MPa)	69
Figura 48: Peças do destorroador desmontado.	71
Figura 49: Prensagem de mistura mais seca.	72
Figura 50: Tijolo retirado de forma errada	72
Figura 51: Ensaio Proctor Normal com 24,37% de umidade.....	91
Figura 52: Mistura Solo 1 mais Solo 2 com 27,38% de umidade	92
Figura 53: Tijolo rompido na máquina de ensaio à compressão "elétrica".	92
Figura 54: Tijolo rompido na máquina de ensaio à compressão "hidráulica"	93
Figura 55: numeração dos tijolos, para auxiliar na identificação	93
Figura 56: Solos com diferentes pontos de umidade	94

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1: Limite das frações de solo pelo tamanho dos grãos (ABNT, 1995).....</i>	<i>8</i>
<i>Tabela 2: Diferentes formas dos grãos (SENÇO, 2007).</i>	<i>9</i>
<i>Tabela 3: Aspectos da água presente no solo (SENÇO, 2007).</i>	<i>10</i>
<i>Tabela 4: Composição mineralógica do clínquer e suas propriedades (COSTA,2015 apud SOUSA, 2018; GRANDE 2003).</i>	<i>13</i>
<i>Tabela 5: Produtividade das prensas para componentes de solo estabilizado (GRANDE, 2003).....</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 6: Critérios para a seleção de solos de acordo com a NBR 10833/2012</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 7: Limites especificados para controle de qualidade de tijolos solo cimento ..</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 8: Critérios para a seleção de solos de acordo com a NBR 10833/2012</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 9: Divisão dos tijolos em relação a umidade</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 10: Grupos utilizados na realização do ensaio à compressão simples.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 11: Relação umidade versus Massa específica seca da mistura Solo 1 e Solo 2</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 12: Relação umidade versus Massa específica seca da mistura Solo 1, Solo 2 e cimento.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 13: Medidas descritivas das amostras dos grupos "elétrica e hidráulica"</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 14: Medidas descritivas dos grupos "imerso" e "não imerso"</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 15: Medidas descritivas das amostras com diferentes umidades.....</i>	<i>67</i>

1 INTRODUÇÃO

O solo certamente é um dos materiais mais antigos já registrados e ainda é amplamente utilizado como material de construção por todo o planeta. Cerca de 30% da população mundial utiliza o solo como matéria prima em suas habitações (adaptado de SANTIAGO, 2001).

No entanto, PINTO (2000) apresenta que algumas dificuldades são encontradas ao se trabalhar com solos, pois, o mesmo, encontra-se disposto em depósitos heterogêneos, o que torna difícil a aplicação de leis teóricas para conhecer o comportamento do material, ao contrário do que ocorre em materiais mais bem definidos como o aço e o concreto.

Apesar dessa dificuldade, SANTIAGO (2001) considera o solo um dos materiais do futuro, pois permite uma redução de custos com transporte, energia e mão-de-obra em relação a outros materiais de construção.

Embora o solo seja um dos materiais mais antigos utilizados como material de construção, a ciência que estuda os solos iniciou com Karl Von Terzaghi, e sua primeira publicação ocorreu em 1925 (LLORENTE, 2015).

Sendo assim, comparado a outras grandes áreas da ciência, a Mecânica dos Solos é extremamente nova (e.g. mecânica dos fluidos, materiais de construção) e, embora já tenha alcançado muitos avanços, possui muitos campos inexplorados, ou com pouca informação. Vale ressaltar alguns autores que exerceram grande influência nessa ciência como Karl Terzaghi, Arthur Casagrande, Alec Skempton, Ralph Peck e Laurits Bjerrum, (LLORENTE,2015)

O Brasil possui grandes extensões de solo tropical que, geralmente, possuem um bom comportamento quando compactados. Estes solos muitas vezes são utilizados no projeto de estradas. Em contrapartida, no Brasil o déficit de residências segundo DOMINGOS (2017) era de aproximadamente 6 milhões de moradias em 2014 com tendência de crescimento.

A necessidade de suprir esse déficit, sem deixar de lado a sustentabilidade (redução de desperdícios, menor geração de resíduos), baixo custo e melhoria de produtividade impulsionam a busca por novas técnicas construtivas e o uso de materiais alternativos.

O tijolo compactado de solo-cimento, produzido por prensas mecânicas ou hidráulicas, vêm se mostrando ao longo dos anos, uma solução possível, em alguns solos brasileiros, para resolver parte do déficit habitacional.

Contudo, ainda existem muitas barreiras a serem vencidas para que essa solução seja generalizada e usada amplamente. Em razão das muitas variáveis associadas ao solo surgem dificuldades na utilização do mesmo.

Portanto, torna-se necessário, começar a isolar e analisar cada uma das variáveis para entender a influência das mesmas no tijolo solo-cimento. Essas variáveis podem ser obtidas a partir de ensaios experimentais e, analisadas utilizando ferramentas da estatística.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

- Estudar as características dos tijolos solo-cimento produzidos em prensa manual, submetendo-os a ensaios de resistência à compressão simples, em duas máquinas de ensaio à compressão distintas, com e sem imersão prévia em água;
- Auxiliar na continuidade do estudo de tijolos solo-cimento no Campus UFRJ-Macaé.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Auxiliar na construção de uma câmara úmida para cura dos tijolos solo-cimento;
- Avaliar a resistência à compressão simples dos tijolos produzidos;
- Comparar o resultado do ensaio à compressão simples dos tijolos em máquinas de ensaio à compressão distintas;
- Analisar a influência da imersão prévia em água dos tijolos solo-cimento na resistência à compressão;

- Analisar o efeito da umidade de fabricação dos tijolos solo-cimento na resistência à compressão.

1.2 Metodologia

O trabalho foi desenvolvido com base em uma pesquisa exploratória através da fabricação de tijolos solo-cimento, com algumas adaptações em relação a alguns pontos das normas técnicas específicas.

Além disso, uma variação na umidade de fabricação dos tijolos foi realizada na tentativa de obter uma relação entre esse fator e a resistência à compressão dos tijolos.

A apreciação dos resultados foi realizada à partir de análises quantitativas com o auxílio de ferramentas estatísticas.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho divide-se em 5 capítulos: Introdução, Revisão bibliográfica, Materiais e Métodos, Apresentação e Análise dos resultados e Conclusão.

O presente capítulo apresenta o tema escolhido, os objetivos e a metodologia utilizada.

O segundo capítulo apresenta referências na literatura dos principais conceitos adotados no trabalho a respeito do tijolo solo-cimento e os materiais que o compõe.

No terceiro capítulo são abordados os materiais utilizados especificamente neste trabalho, suas características e as metodologias adotadas.

Já no quarto capítulo são apresentados os resultados dos ensaios, tais como a análise e interpretação dos mesmos.

Por último, no quinto capítulo é apresentada a conclusão do trabalho, juntamente com sugestões para futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Solo

"O solo é o mais antigo, mais usado, mais complexo e mais desconhecido dos materiais de construção." (SENÇO, 2007)

O conceito de solo é complexo, pois cada atividade humana ou científica determina seu significado de acordo com o seu ponto de vista.

Segundo CRAIG (1983) o solo é composto por partículas minerais não cimentadas ou levemente cimentadas, formadas pelo intemperismo de rochas, com espaços vazios preenchidos por água e/ou ar.

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, EMBRAPA (2013) define que o solo é formado por corpos naturais nos estados sólido, líquido e gasoso, tridimensionais, compostos por minerais e materiais orgânicos, e eventualmente podem ter sido modificados por interferências antrópicas.

PINTO (2000) define o solo como um conjunto de partículas sólidas, líquidas e gasosas, conforme ilustrado na Figura 1.

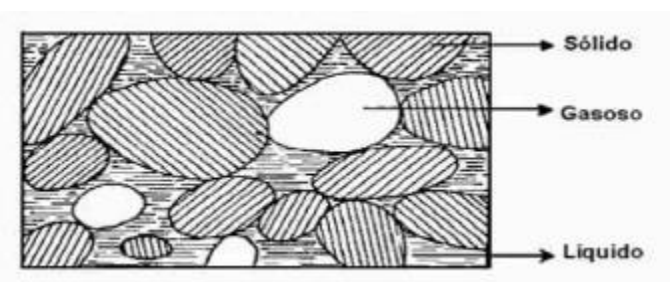


Figura 1: Estrutura do Solo (SENÇO, 2007)

No geral, as partículas encontram-se livres para deslocar entre si, e o comportamento do solo depende do movimento das mesmas.

Além disso, o solo encontra-se em depósitos heterogêneos, o que dificulta a aplicação de leis teóricas para conhecer o comportamento desse material, ao contrário do que ocorre em materiais mais bem definidos como o aço e o concreto (PINTO, 2000).

2.1.1 Origem dos Solos

Todos os solos são formados a partir da decomposição das rochas da crosta terrestre (PINTO, 2000). De acordo com a Associação Brasileira de Normas técnicas

(ABNT) na NBR 6502/1995 - "Rochas e Solos", as rochas são materiais sólidos, consolidados e constituídos por um ou mais minerais. TERZAGHI (1961) acrescenta ainda que esses minerais estão ligados por intensas forças coesivas e permanentes.

Além disso, GRANDE (2003) define que os minerais são elementos químicos que atendem aos seguintes requisitos:

- são constituintes da crosta terrestre;
- processo de formação natural e inorgânico;
- composição química e suas propriedades físicas são bem definidas ou dentro de limites estabelecidos.
- estrutura atômica/molecular organizada;
- formação externa poliédrica, em condições especiais de formação.

Por sua vez, as rochas podem ser classificadas em ígneas, sedimentares e metamórficas.

Esse processo de formação do solo se dá de maneira complexa, sendo que a maior parte é formada a partir da desintegração de rochas por meio do processo de intemperismo físico ou químico (SCOTT, 1984).

O Intemperismo físico é a fragmentação da rocha mãe a partir de forças físicas tais como a ação do vento, água, variações de temperatura ou ainda pela alternância entre gelo e degelo nas fissuras da rocha. Já o químico ocorre através da presença de fauna, flora, que conseqüentemente atacam os minerais por meio de hidratação, hidrólise, oxidação, carbonatação, etc.

O conjunto desses processos, leva à formação de solos, formados pela mistura de partículas pequenas, com tamanhos e composições químicas diferentes. A composição química da rocha que deu origem ao solo é responsável pelo tipo de partículas presentes no mesmo.

Segundo TERZAGHI & PECK (1961 apud GRANDE 2003) se os produtos da rocha alterada permanecerem no local da desagregação, este é chamado de solo residual, se não, é chamado de solo transportado, independente do agente que realizou o transporte.

Em solos residuais tropicais, o intemperismo ocorre de forma mais acentuada, sendo o perfil do intemperismo composto por camadas denominadas horizontes, sendo estes ilustrados na Figura 2 e descritos abaixo:

- Camada O: Camada superficial de matéria orgânica;
- horizonte A: Caracterizado pelo acúmulo de materiais dissolvidos e suspensos;
- horizonte B: Caracterizado por conter materiais orgânicos em mistura com óxidos ferrosos e argilas;
- horizonte C: Material de origem residual;
- Rocha-mãe: Rocha que deu origem ao solo.

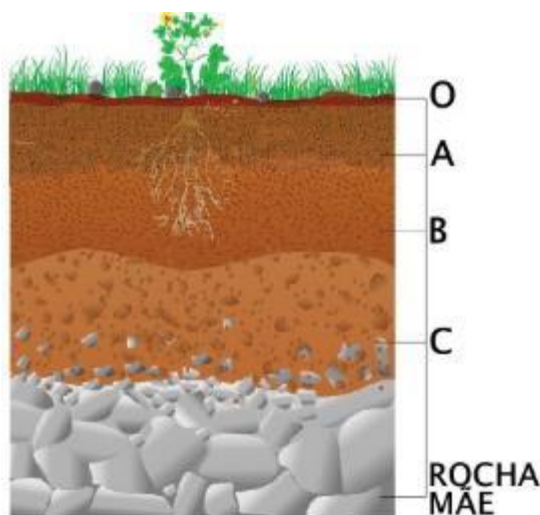


Figura 2: Horizontes do Solo (PENA,2017)

De acordo com GRANDE (2003), o conhecimento do perfil do solo e de sua subdivisão em horizontes permite algumas observações relevantes ao uso prático do solo-cimento, quanto ao emprego dos solos provenientes desses perfis.

O horizonte A, em geral, possui espessura em torno de 20 e 30 cm e sua cor é cinza escura. Nesse horizonte podem existir celulose e húmus. A celulose é inerte, porém o húmus é um ácido orgânico que tem grande afinidade química com a cal livre (CaO) liberada na hidratação do cimento e, mesmo em baixas concentrações, pode afetar a resistência do material. Em alguns casos, quando não há mais alternativas, é recomendável adicionar cal nos solos do horizonte A antes da adição de cimento, porém esse procedimento envolve outras variáveis como o teor de cal necessário e o custo dessa operação.

Os solos do horizonte B são, em geral, argilosos com predominância de caulinita, uma vez que esse horizonte se forma em ambientes de boa drenagem. São solos de difícil pulverização (destorroamento) e isso é um grande problema na homogeneização da mistura de solo-cimento.

No Horizonte C os solos são arenosos e de fácil pulverização, o que indica preferência em emprego em solo-cimento. Mesmo assim, devido à sua composição mineralógica de origem, que pode conter partículas friáveis, havendo a necessidade de um estudo de dosagem antes da utilização.

2.1.2 Composição Química e mineralógica

O comportamento mecânico de um solo depende, no geral, da granulometria, ou seja, a distribuição e configuração dos diversos tamanhos de partículas constituintes do solo.

Segundo SENÇO (2007), as partículas maiores do solo, como os pedregulhos e areias, são constituídas por fragmentos de rocha que podem incluir em sua composição um ou mais minerais. No entanto, segundo PINTO (2000) é mais comum que as partículas sejam constituídas de apenas um mineral.

Os grãos de areia são compostos por minerais resistentes ao intemperismo, principalmente quartzo (SiO_2 cristalina). De acordo com GRANDE (2003) a estabilização de solos arenosos depende de um teor menor de cimento por apresentarem melhor comportamento mecânico.

As partículas de argila são compostas de um único mineral chamados argilominerais, que são no geral, silicatos hidratados de alumínio. Os mais comuns a caulinita, illita e a montmorilonita, e apresentam comportamentos bem distintos na presença de água.

A caulinita por exemplo, é menos suscetível a variações de volume por absorção de água, devido a sua estrutura iônica e possui menos capacidade de troca catiônica que as illitas, essas por sua vez são as mais instáveis segundo GRANDE (2003), pois, possuem grande quantidade de cargas elétricas disponíveis para reagir com água, expandindo-se em mais de uma dezena de vezes.

As variações de volume por absorção de água estão diretamente ligadas aos Limites de Atterberg do solo, que são utilizados para descrever os estados físicos do solo:

- Limite de Liquidez (LL) é a quantidade de água que, adicionada ao solo é capaz de causar perda de coesão de partículas.
- Limite de Plasticidade (LP) é a retirada de umidade do solo até que ele passe do estado plástico para o estado semissólido.
- Índice de Plasticidade (IP) é o intervalo de umidade que torna o solo plástico, entre o LL e o LP.

2.1.3 A estrutura do solo

A estrutura do solo é o termo que designa o arranjo das partículas, sua alteração pode acarretar em mudança nas propriedades do mesmo (SENÇO, 2007).

O tamanho das partículas que compõem os solos é uma das características que os diferencia. De modo que embora alguns possuem grãos perceptíveis a olho nu, outros não permitem a visualização das partículas de forma individual quando molhados.

Existe uma variedade enorme de tamanhos, normalmente os solos possuem uma diversidade de grãos de diferentes dimensões. Para facilitar a classificação existem diferentes terminologias específicas para diversas faixas de grãos como a classificação da NBR 6502/1995 “Rochas e Solos” disposta na Tabela 1.

Tabela 1: Limite das frações de solo pelo tamanho dos grãos (ABNT, 1995).

Fração	Limites definidos pela NBR 6502/1995
Matacão	25 cm a 1 m
Pedra	7,6 cm a 25 cm
Pedregulho	4,8 mm a 7,6 cm
Areia grossa	2 mm a 4,8 mm
Areia média	0,42 mm a 2 mm
Areia fina	0,05 mm a 0,42 mm
Silte	0,005 mm a 0,05 mm
Argila	inferior a 0,005 mm

Outro fator importante nos solos é o formato dos grãos, que dependem predominantemente da natureza da rocha originária e dos agentes que atuaram na formação do solo.

Os minerais mais facilmente alteráveis são, em geral, constituídos por cristais que, ao se decomporem, dão origem a cristais lameliformes, por isso as porções mais finas do solo são constituídas por partículas escamosas. As diferentes formas para cada fração de solo podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2: Diferentes formas dos grãos (SENÇO, 2007).

Fração	Forma
Pedregulho	grãos angulares, arredondados ou menos achatados.
Areias	grãos angulares ou arredondados; algumas areias contêm porcentagem relativamente elevada de partículas lamelares de mica.
Siltes	grãos angulares e escamosos, notando-se ausência quase absoluta de grãos arredondados.
Argilas	constituídas quase exclusivamente por partículas escamosas.

Terzaghi explica as diferenças essenciais entre areias e argilas com base na forma lamelar das partículas, em conjunto com diâmetro reduzido das mesmas (SENÇO, 2007).

Além disso, a fase líquida não pode ser analisada de forma independente, pois a água se apresenta no solo sob diversos aspectos, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3: Aspectos da água presente no solo (SENÇO, 2007).

Tipo	Definição
água de constituição	É um dos componentes da argila, sua eliminação ou variação acarreta alteração nas propriedades da mesma
água absorvida	Constitui-se na película fixada na superfície dos grãos.
água higroscópica	Se encontra no solo, ao ar livre, ou seja, em equilíbrio com o vapor de água da atmosfera úmida, e é cedida em uma atmosfera seca.
água capilar	Nos solos de grãos finos, sobe pelos interstícios capilares deixados pelas partículas sólidas, além do plano determinado pela água livre.
água livre	Possui características físicas da água comum, regendo-se seu comportamento pelas leis da Hidráulica. Quanto maior a porosidade do solo, maior a quantidade de água que poderá conter em seus vazios.

“A compreensão sobre a relevância da água na configuração da estrutura do solo permite equacionar incidências patológicas bastante características do solo cimento, como por exemplo, o surgimento de fissuras devido à retração por secagem.” (GRANDE, 2003 apud SOUSA, 2018).

A fase gasosa consiste nos vazios deixados pelas fases sólida e líquida, e é preenchida por ar, vapor d’água e carbono combinado (SENÇO, 2007).

2.1.4 Compactação do solo

O processo de compactação do solo busca aumentar o contato entre os grãos, conseqüentemente reduzir o número de vazios, de forma que a rigidez e a resistência do solo aumentem.

“A compactação do solo é o processo pelo qual as suas partículas são forçadas a agruparem-se mais estreitamente, através da redução nos vazios de ar, geralmente por meios mecânicos.” (BLÜCHER, 1951 apud GRANDE, 2003).

A quantidade de partículas e água são constantes, o que ocorre é a redução de volume, devido a diminuição dos vazios e, assim, há um aumento da massa específica do solo.

Segundo GUIMARÃES (2016), a compactação é um dos métodos mais econômicos e populares para aumento da resistência do solo, sendo assim, um dos processos mais utilizados no mundo.

Em 1933, na Califórnia, Ralph R. Proctor observou uma relação entre o peso específico atingido pelo solo e a umidade no processo de compactação. A partir dessas análises, seus estudos enunciaram um dos mais importantes princípios de Mecânica dos Solos, que a densidade de um solo compactado é função do teor de umidade ao ser compactado.

Ao adicionar água, para uma energia de compactação constante, Proctor percebeu que a densidade do solo aumentava até um limite, chamado de umidade ótima. Nesse ponto, obtém-se a máxima massa específica aparente seca para essa energia de compactação, pois, ao ultrapassar esse valor, a densidade começava a diminuir.

O que ocorre é que o teor ótimo promove uma lubrificação das partículas, facilitando, quando se imprime uma energia de compactação constante, o preenchimento de todos os vazios (GRANDE, 2003).

O conhecimento do comportamento do solo no processo de compactação e compactado é de fundamental importância para projetos envolvendo a utilização de solos. Sua importância está ligada a razões de segurança, aponta SENÇO (2007).

No decorrer do trabalho será detalhada a execução do ensaio de Proctor.

2.2 Cimento Portland

“A palavra cimento origina do latim caementu, que designava para os romanos uma espécie de pedra natural de rochedos e não entalhadas e sua descoberta remonta há cerca de 4.500 anos (BATTAGIN, 2009).

Gregos e romanos utilizaram solos de origem vulcânica da ilha grega de Santorino ou das proximidades de Pozzuoli, que possuíam propriedades de endurecimento sob a ação da água para a construção de grandes obras como o Panteão e o Coliseu.

Em 1756 o inglês John Smeaton, buscou um aglomerante que endurecesse na presença de água e, conseguiu a partir da calcinação de calcários moles e argilosos,

obter um produto de alta resistência para construção de um farol da Inglaterra. Em 1818 o francês Vicat, conhecido como inventor do cimento artificial, obteve resultados semelhantes aos de Smeaton, ao misturar componentes argilosos e calcários.

No ano de 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin obteve um pó fino ao queimar conjuntamente pedras calcárias e argila. Essa mistura não se dissolvia em água depois de endurecer. A criação recebeu o nome de cimento Portland em homenagem a semelhança na cor e dureza com as pedras de Portland, muito comum nas construções da época e foi patenteada por Aspdin no mesmo ano. No entanto, o cimento era bem diferente do atual, devido as implementações tecnológicas (GRANDE, 2003; ABCP, 2002; BATTAGIN, 2009). O cimento portland é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água. Depois de endurecido não se decompõe mais em presença de água (ABCP, 2002).

Ou em termos mais técnicos, o cimento é um aglomerante hidráulico, obtido pela moagem do clínquer, com adição de gesso e outras substâncias que determinam seu tipo. O clínquer é uma mistura de calcário, argilas e minério de ferro, submetida ao processo de clinquerização (GRANDE, 2003).

Há tempos no Brasil existia apenas um tipo de cimento Portland. Com o avanço das tecnologias e evolução do conhecimento técnico, outros tipos foram produzidos. No entanto, vale ressaltar que a maioria dos cimentos disponíveis no mercado atendem ao uso geral, embora alguns tipos possuam características e propriedades que os tornam mais adequados para determinados usos (ABCP, 2002).

As propriedades e características finais do cimento Portland estão diretamente relacionadas às matérias primas e ao processo de produção. O cimento Portland é composto do clínquer e adições minerais. Em geral, são as adições minerais que definem os diferentes tipos de cimento Portland.

O clínquer é formado pelo calcário e argila. A rocha calcária é britada, moída e depois misturada com a argila moída. A mistura passa por um forno giratório que atinge até 1450 °C. Então o calor transforma a mistura no material chamado clínquer. Após esse processo o clínquer passa por uma moagem fina, de modo a ser transformado em pó. Sua propriedade mais importante é ser um ligante hidráulico,

pois, ao entrar em contato com a água torna-se pastoso e depois endurece adquirindo elevada resistência e durabilidade.

A Tabela 4 apresenta a composição mineralógica do clínquer e seus valores médios no cimento brasileiro.

Tabela 4: Composição mineralógica do clínquer e suas propriedades (COSTA,2015 apud SOUSA, 2018; GRANDE 2003).

Componente	Propriedades	Proporção (%)
Silicato tricálcico ((CaO) ₃ SiO ₂)	Propicia o desenvolvimento de resistência nas idades iniciais e alto desprendimento de calor, libera cerca de 40% em massa de hidróxido de cálcio (Ca(OH) ₂);	50 – 65
Silicato dicálcico ((CaO) ₂ SiO ₂)	Proporciona o desenvolvimento de resistência em idades mais avançadas, com baixa liberação de calor, produz cerca de 18% de Ca(OH) ₂ ;	15 – 25
Aluminato tricálcico ((CaO) ₃ Al ₂ O ₃)	Reage nos primeiros minutos e ocasiona elevado calor de hidratação	6 – 10
Ferroaluminato tetracálcico ((CaO) ₄ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃)	Desenvolvimento lento e pequeno de resistência mecânica e boa resistência ao ataque por sulfatos.	3 – 8

A adição de gesso tem a função de controlar o tempo de pega, sem a sua presença o cimento endureceria de maneira quase instantânea, sendo assim, o gesso está presente em todos os tipos de cimento Portland. Normalmente a proporção é de 3% de gesso para 97% de clínquer em massa.

Após a adição de água, o processo de hidratação do cimento inicia de forma imediata. Esse processo consiste em transformar compostos anidros mais solúveis em compostos menos solúveis. Como cada composto apresenta propriedades distintas, sua reação é diferente na presença de água e, o conjunto deles determina as características finais do cimento.

O processo de hidratação do cimento é bastante complexo e representado por várias reações químicas simultâneas e que interferem umas nas outras. É fato que o comportamento da hidratação (velocidade, distribuição e formação dos produtos hidratados) é função do tamanho dos grãos do cimento (superfície específica), temperatura, quantidade de água disponível e procedimentos de mistura. (GRANDE, 2003 apud SOUSA, 2018).

Outros materiais como escórias de alto-forno e a pozolana (cinza vulcânica), são misturados ao clínquer na moagem final servem como adições ou “fillers”, isto é, materiais de custo mais baixo que o clínquer e que, tendo também características ligantes, podem substituí-lo parcialmente. O produto dessa moagem final é o cimento e na Figura 3 é possível observar um esquema resumido do processo de fabricação.

As escórias de alto-forno também possuem propriedades de ligante hidráulico e, sua adição a mistura de clínquer e gesso aumenta a durabilidade e resistência final do cimento.

Da mesma forma como ocorre com a escória de alto-forno, as pozolanas também possuem propriedades de ligante hidráulico quando moídas, no entanto, precisam estar na presença de materiais específicos para ativar essa propriedade, como é o caso do clínquer que ao ser hidratado libera Hidróxido de Cálcio que reage com a pozolana.

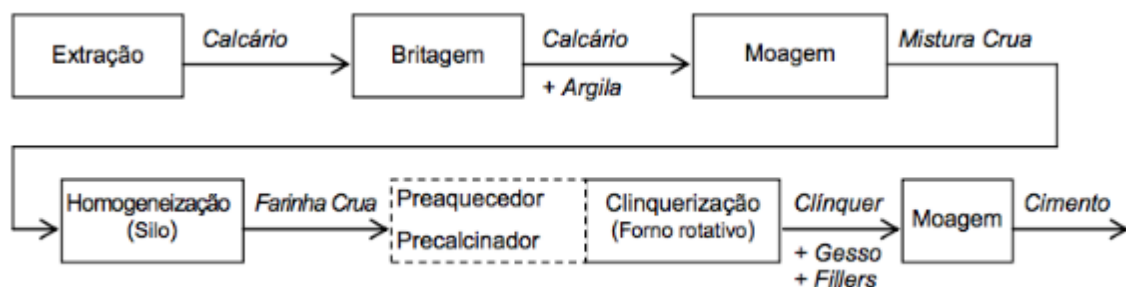


Figura 3: Esquema Simplificado de Fabricação de Cimento Portland (PINHO, 2012).

O Quadro 1 representa de acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), os principais tipos de cimento Portland, suas composições e a norma brasileira correspondente a cada um.

Quadro 1: Classificação dos Tipos de Cimento Portland Segundo as Normas da ABNT (adaptado de ABCP, 2002):

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno (sigla E)	Material pozolânico (sigla Z)	Material carbonático (sigla F)	
Comum	CP I	100	-	-	-	NBR 5732
	CP I-S	99-95	-	1-5	-	
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100-95	-	-	0-5	NBR 5733
Branco estrutural	CPB-25	100-75	-	-	0-25	NBR 12989
	CPB-32					
	CPB-40					
Branco não estrutural	CPB	74-50	-	-	26-50	

Acrescenta-se ainda que o alto consumo energético durante o processo de fabricação do cimento, aliado aos avanços tecnológicos, possibilita a introdução de escórias e materiais pozolânicos no cimento, reduzindo assim a quantidade de clínquer necessária. Atualmente, a maior parte dos cimentos produzidos são compostos.

2.3 Estabilização dos solos

Conforme exposto anteriormente, o solo possui características muito complexas e heterogêneas, por isso, seu uso como material de construção exige cuidados.

O processo de estabilização de acordo com SENÇO (2007) busca melhorar as características em relação ao solo natural, seja estabilidade granulométrica, aumento da resistência mecânica, durabilidade, redução da permeabilidade, etc.

Esse processo pode ser conseguido por meio de uma estabilização granulométrica, que é a adequação da distribuição das diversas porções de diâmetro dos grãos. Pois, os vazios dos grãos maiores são preenchidos pelas partículas médias e os vazios dessas ocupados pelos grãos menores. Ocorre um aumento da massa específica aparente, responsável pelo aumento da resistência e redução da permeabilidade. Além disso, no caso de adição de algum aglomerante, o consumo deste é reduzido. Então, a estabilização promove:

- Redução do volume dos vazios;
- Alteração na permeabilidade do solo;
- Aumento da resistência mecânica do solo.

Segundo ABIKO (1983, apud GRANDE, 2003) o homem utiliza técnicas para melhorar o comportamento do solo desde as eras mais remotas para torná-lo mais resistente ao intemperismo. Para isso, foram utilizados diversos materiais, como asfalto, cal, fibras vegetais, excremento de gado, óleo de baleia, entre outros.

INGLES E METCALF (1972 apud GRANDE, 2003) estabelece que a estabilização dos solos pode ser dividida em três métodos principais, são eles:

- Estabilização mecânica;
- Estabilização física;
- Estabilização química.

Na estabilização mecânica é realizada a compactação do solo por meio da aplicação de uma energia mecânica. Afeta a compressibilidade, resistência mecânica, permeabilidade, a porosidade e a densidade do solo.

No caso da física, também conhecida como estabilização granulométrica, são adicionadas frações de diferentes granulometrias de solo de forma a otimizar a proporção areia, silte e argila, tornando o empacotamento dos grãos melhor. Segundo a ABCP (1960), a composição granulométrica do solo é fator determinante na estabilização do solo com cimento, pois, relaciona teor de cimento e viabilidade econômica.

A estabilização química ocorre “quando outros materiais são adicionados ao solo, modificando suas propriedades ou por reação físico-química entre os grãos e o material, ou criando uma matriz que aglutina e cobre os grãos” (SILVA, 2001 apud GRANDE, 2003) Os principais materiais utilizados são: cimento Portland, cal, betume e fibras.

Na construção civil são utilizados todos os tipos de estabilização, em algumas vezes mais de uma de forma simultânea. Segundo GUIMARÃES (1998 apud GRANDE, 2003) a escolha do tipo de estabilização depende de uma série de fatores como:

- viabilidade econômica;
- finalidade da obra;
- características dos materiais;
- propriedades que se deseja corrigir.

2.3.1 Solo-cimento

O solo-cimento é o material obtido pela mistura de solo, cimento Portland e água.

Segundo BALBO (2015), solo-cimento é o material resultante da mistura de solo com um dado teor de cimento que resulta, após a compactação e hidratação do ligante hidráulico, em mistura com expressiva rigidez.

MARCONDES (1992) define solo-cimento como um material produzido pela combinação, compactação e cura de uma mistura de solo/agregado, cimento Portland e água no intuito de formar um material com propriedades específicas de engenharia.

O efeito do cimento na mistura, diferentemente do caso dos agregados, é criar envoltórias nos grãos de solo (menores que os cristais hidratados do cimento), criando uma barreira contra água e evitando, em decorrência disso, a expansão de solos sensíveis a umidade.

Segundo CASANOVA (1988) o processo de interação solo-cimento é tão complexo, que ao ser feita uma análise estatística onde a variável dependente foi a % de cimento (dosado pelo método físico-químico) e as variáveis independentes foram pH (solo), S (Σ bases), Al⁺ trocável, H⁺ trocável, T = CTC, K_i, K_r, % argila, %Fe₂O₃ (livre), IP, LL, Matéria orgânica, não foi possível obter nenhuma correlação linear significativa (MARCONDES, 1992).

Segundo ABIKO (1983 apud GRANDE, 2003) o solo-cimento foi empregado pela primeira vez em 1915 pelo engenheiro Bert Reno, que pavimentou uma rua com uma mistura de areia de praia, cimento Portland e conchas. No entanto, a Portland Cement Association (PCA) só iniciou suas pesquisas em 1935.

Embora o solo-cimento seja empregado principalmente na pavimentação, ROCHA (1996 apud GRANDE, 2003), relata a utilização deste produto em diversas aplicações, inclusive em alvenarias de tijolos, blocos prensados e painéis de paredes monolíticas para construção de moradias.

O solo-cimento tornou-se alvo de diversas pesquisas, principalmente da ABCP, do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento do Estado da Bahia (CEPED) e do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), a partir da década de 1970 segundo MERCADO (1990, apud GRANDE 2003).

De acordo com SOUZA et al. (2008), o solo é o material de maior proporção na mistura, devendo ser selecionado de forma a reduzir ao máximo o consumo de cimento. Para PINTO (1980 apud SOUZA, 2008), o solo ideal deve conter 15% de silte mais argila, 20% de areia fina, 30% de areia grossa e 35% de pedregulho.

PCA (1969 apud GRANDE, 2003), considera excelentes os solos arenosos e pedregulhosos, com 65% a 90% de areia e silte + argila variando de 10% a 35%.

“No solo-cimento, assim como em concretos e argamassas, a natureza do cimento deve ser considerada para a proposta de desenvolvimento de pesquisas que visam melhorar o desempenho desse material”. (GRANDE, 2003).

A adição de cimento ao solo permite obter as seguintes vantagens:

- o material não se deteriora submerso em água;
- há aumento da resistência à compressão;
- a absorção e perda de umidade não causam variações volumétricas consideráveis;
- menor permeabilidade;
- maior durabilidade.

2.3.2 Fatores que condicionam a qualidade da mistura de solo-cimento

Segundo LIMA (2006 apud PINTO, 2015) diversas variáveis podem influenciar na qualidade final do produto de solo-cimento. Destacam-se as mais importantes:

- O tipo de solo;
- O teor de cimento;
- Teor de umidade de compactação;
- Grau de homogeneidade;
- Processo de cura.

De todos, o tipo de solo é o fator que exerce maior influência, pois, se for inadequado será difícil obter um produto adequado. Além disso, MERCADO (1990, apud GRANDE, 2003) acrescenta que o tipo de solo determina se a estabilização com cimento é viável economicamente.

CASANOVA (2004 apud LIMA, 2018) recomenda que solos de cores escuras como cinza, preto, castanho claro e escuro ou acinzentada, esverdeada e azulada devem ser evitados.

Autores como MOURA (1987), PARENTE (1982), ROCHA (1996) após realizarem diversos ensaios concordam que o aumento do teor de cimento aumenta a resistência do solo, independentemente do tipo de solo. No entanto, SABBAG (1980) alerta que se o teor de cimento for muito elevado e/ou as condições de cura não forem adequadas, o material poderá sofrer fissuras causadas pela retração por secagem. (Adaptado de GRANDE 2003)

O procedimento de mistura de solo-cimento deve seguir a ordem:

1. preparação do solo (destorroamento, pulverização e peneiramento);
2. preparação da mistura (homogeneização seca e homogeneização da umidade);
3. moldagem (uso efetivo).

(POÇO & BONASSI, 1988 apud ROCHA, 1996) e (MINKE, 1998 apud SILVA, 2001) afirmam que a resistência a compressão da mistura é diretamente ligada ao grau de compactação e isso independe do valor de cimento (Adaptado de GRANDE,

2003). Para haver uma compactação adequada é importante conhecer o teor de umidade ideal para a mistura.

Conforme relata SILVEIRA (1966 apud GRANDE, 2003) uma redução de 5% na massa do material compactado provoca um decréscimo equivalente a redução de 15% de cimento na mistura, exceto quando em solos com maior presença granulométrica de areia, na qual a resistência é maior abaixo da umidade ótima.

A umidade necessária para hidratar o cimento, pode ser satisfatoriamente suprida pela umidade ótima de compactação. No entanto, é importante a correta homogeneização do solo, de forma que todo o cimento entre em contato com umidade suficiente (GRANDE, 2003). Outro fator que não deve ser desprezado durante o processo é a cura, pois essa é de fundamental importância para a qualidade do solo-cimento. É recomendável que a cura do solo-cimento seja realizada em ambiente protegido da luz direta do sol, se possível com umidade controlada.

2.3.3 Métodos de dosagem da mistura de solo-cimento

De acordo com a ABCP (1980) a dosagem do solo - cimento consiste em diversos ensaios, seguida de uma interpretação por meio de critérios estabelecidos na experiência. De acordo com SENÇO (2007), o primeiro requisito para se obter uma boa mistura de solo-cimento é a utilização de um teor conveniente de cimento Portland misturado com o solo destorroado e peneirado. Além disso, a mistura deve ser feita com o teor ótimo de umidade, produzindo uma mistura que, antes da hidratação do cimento, possa ser devidamente compactada, atingindo a massa específica máxima.

Assim, verifica-se que a partir da escolha do solo, deve-se determinar os teores ideais de cimento e água para execução.

Em um exame genérico, pode-se dizer que solos de boa qualidade podem adquirir resistência elevada, com baixos teores de cimento. A dosagem e a execução também podem ser controladas com razoável eficiência.

Existem diversos métodos de dosagem, como o método simplificado, método geral e o método Físico-Químico. O Método Simplificado é uma dosagem recomendada para solos arenosos. Nesse método são utilizadas tabelas e ábacos resultantes da experiência adquirida com solos arenosos, eliminando-se alguns ensaios e reduzindo-se o trabalho e o tempo de pesquisa.

Admitindo de início a utilização de solos arenosos, os mesmos devem satisfazer os seguintes requisitos:

- Ter no máximo 50% de silte mais argila;
- Ter menos de 20% de argila;
- Não ter porcentagens significativas de impurezas e matéria orgânica.
- Limites quanto aos índices físicos:
 - $LL < 40\%$;
 - $IP < 18\%$

O Método geral é aplicável a qualquer tipo de solo (exceto os orgânicos) e seu critério de dosagem é baseado na perda de massa de corpos de prova submetidos a 12 ciclos de ensaio de durabilidade por molhagem e secagem

Já o Método Físico-Químico de Dosagem é baseado na interação elétrica entre as partículas de cimento e de argila contidas no solo.

É importante ressaltar que o método de dosagem, por mais rigoroso que seja, não implicará necessariamente na obtenção de uma mistura de boa qualidade, uma vez que para isso devem ser observados outros fatores intervenientes, como: teor de umidade da mistura, operações de mistura e de compactação, tempo e condições de cura.

Em misturas de solo-cimento destinadas a moldagem de tijolos, a dosagem está condicionada a obedecer aos requisitos das normas técnicas em relação a resistência à compressão e absorção de água.

2.4 O solo como material de construção

2.4.1 Histórico

A terra crua, solo não submetido à transformação por fogo, corresponde a matéria prima em que habita cerca de 30% da população mundial. (SANTIAGO, 2001). Além disso, CYTRYN (1957 apud GRANDE, 2003) afirma que a construção de terra foi a primeira solução que o homem encontrou para superar as intempéries e construir abrigos em locais onde era difícil encontrar madeira e pedras. De fato, serão

apresentadas construções feitas pela humanidade com a utilização do solo há milhares de ano.

De acordo com SANTIAGO (2001) a utilização como material de construção data de 5000 A.C. para construção de mastabas (ilustrado pela Figura 4) com adobe, tijolos de terra crua pelos egípcios. Construções com adobe foram muito utilizadas no Novo Império (150 - 525 A.C.), os depósitos do Ramesseum de Ramsés II possuíam abóbadas executadas em tijolos cozidos e adobes.



Figura 4: Mastaba do faraó Shepseskaf, 2510 A.C. (EGYPT ARCHIVE, 2007 apud WIKIPEDIA, 2019)

Na década de 1980 na África foi executado o maior programa de construção econômica em terra crua do mundo, cerca de 5000 casas utilizando somente produtos locais. Além disso, foi desenvolvido um programa de construção de escolas experimentais em terra. (SANTIAGO, 2001)

No Oriente Próximo e Médio, diversas escavações arqueológicas mostram indícios de utilização da terra nas habitações. No Iêmen, em cidades como Shibam, conforme a Figura 5 e Sanaa possuem suas edificações usando o solo como material de construção



Figura 5: Velha cidade Murada de Shibam (UNESCO, 2006 apud WIKIPEDIA, 2019)

Na Alemanha após a Segunda Guerra Mundial, a escassez de recursos e materiais, levou ao uso de terra crua para construção de habitações com o objetivo de realocar os desabrigados. Na França, no século XIX, o uso da taipa foi muito difundido e, ainda hoje cerca de 15% das edificações do país utilizam o solo como material de construção. Em cidades como Ouro Preto, Diamantina e Paraty no Brasil, utiliza-se taipa há cerca de 400 anos nas construções. (SANTIAGO, 2001)

O homem fez diversas adições no solo, de forma a torná-lo mais adequado a utilização nas construções. Os egípcios por exemplo, melhoravam o adobe com palha e bambu, na Babilônia era adicionado asfalto natural, que melhorava a resistência aos intemperismos. (CUNHA, 1978 apud GRANDE, 2003)

A estabilização do solo com cimento começou a ser difundida a partir de 1940 quando a ABCP já possuía um método de dosagem para uso em obras de pavimentação, inspirado *Portland Cement Association (PCA)*.

Desde a década de 1970 diversos pesquisadores defendem o uso da terra na construção civil, principalmente pgrelos impactos ambientais causados pela construção civil.”.

2.4.2 Métodos construtivos

Segundo CUNHA (1978 apud GRANDE, 2003), os principais métodos construtivos com solo são:

- Adobes: mistura de barro úmido, colocada em formas e, depois seca ao sol;
- Taipa de pilão: Esse método consiste em moldar a parede “in situ”, comprimindo o solo dentro de fôrmas móveis em sucessivas camadas. CYTRYN (1957 apud GRANDE, 2003), descreve detalhadamente esse sistema construtivo;
- Taipa de mão: Consiste em preencher com barro úmido uma trama de madeira que estrutura o painel da parede;
- Bolas: Consiste em empilhar bolas de barro, formando a parede;
- Leivas: Corta-se o solo superficial em blocos e depois um é empilhado sobre o outro formando a parede.
- Tijolos Prensados: Esses tijolos são prensados utilizando um dispositivo mecânico para submeter o material a pressões elevadas.

2.5 Tijolo Solo-cimento

O processo de estabilização do solo compreende variáveis complexas e produzir um material de qualidade exige conhecimento e controle tecnológico.

Conforme exposto anteriormente, a qualidade do produto do solo estabilizado depende primordialmente do solo utilizado. FARIA (1990 apud GRANDE, 2003) cita algumas patologias comuns de ocorrer mesmo após a estabilização do solo, são elas:

- variações volumétricas a partir da reação da água com aditivos;
- degradação do material devido à presença de sais solúveis em água, de matéria orgânica, materiais expansivos ou partículas friáveis.
- propriedades heterogêneas na série produzida devido a descontinuidade das características da matéria prima.

Os tijolos de solo-cimento têm suas características definidas pelo entrosamento dos grãos do solo compactado. Como o entrosamento dos grãos está ligado diretamente a energia de compactação, o equipamento utilizado na moldagem impacta bastante no resultado.

A Tabela 5 resume a produtividade de algumas prensas disponíveis no mercado:

Tabela 5: Produtividade das prensas para componentes de solo estabilizado (GRANDE, 2003)

Tipo de Prensa		Energia de compactação (MPa)	Taxa de compactação do solo (MPa)*	Produção (tijolos/dia)
Manual	Mecânica	1,5 - 2,0	1,38	300 a 1200
	Hidráulica	2,0 - 10,0	1,65	2000 a 2800
Motorizada	Mecânica	4,0 - 24,0	>1,65	1600 a 12000
	Hidráulica	>20,0	>2,0	-

A prensa auxilia na uniformidade do tijolo solo-cimento, possibilitando a redução no uso de argamassa de assentamento e revestimento, em alguns casos não há necessidade nem de uso, devido a possibilidade de execução de modulações e encaixes.

Uma grande vantagem do tijolo de solo-cimento é a ausência de queima no processo, conseqüentemente há redução nos danos ambientais.

A ABCP (1988) cita as seguintes vantagens no uso do tijolo de solo-cimento:

- Redução no custo do transporte, pois, no geral pode ser construído com solo local;
- Equipamentos simples, de baixo custo;
- Não consome combustível na fabricação;
- a regularidade geométrica permite a redução no uso de argamassas de assentamento e de revestimento;
 - pode dispensar o uso de revestimento, desde que protegido da ação direta da água;
 - não necessita mão-de-obra especializada;
 - sua resistência à compressão simples é similar a do tijolo cerâmico.

Recomenda-se que os solos sejam testados em laboratório, a partir dos seguintes ensaios:

- Preparação de Amostra de Solo para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização (NBR 6457/2016);

- Determinação da Massa Específica dos Grãos de Solos (NBR 6508);
- Solo - Determinação do Limite de Liquidez (NBR 6459);
- Solo - Determinação do Limite de Plasticidade (NBR 7180);
- Solo - Análise Granulométrica (NBR 7181).

Segundo a NBR 10833/2012: “Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimento”, os solos adequados para a fabricação de componentes de alvenaria são os que possuem as seguintes características apresentadas na Tabela 6:

Tabela 6: Critérios para a seleção de solos de acordo com a NBR 10833/2012

Característica	Requisitos
passando na peneira ABNT 4,8 mm (n°4)	100%
passando na peneira ABNT 0,075 mm (n°200)	10% a 50%
limite de liquidez	≤45%
limite de plasticidade	≤18%

No caso de produção diária superior a 10.000 tijolos, ABCP (1988) recomenda moldar tijolos com proporções, em volume, 1:10, 1:12 e 1:14 (cimento: solo). A escolha do “traço adequado” deve ser a que apresentar menor consumo de cimento e atender aos critérios de resistência à compressão e absorção de água estabelecidos na NBR 8491/2012: “Tijolo de solo-cimento – Requisitos”, dispostos na Tabela 7:

Tabela 7: Limites especificados para controle de qualidade de tijolos solo cimento

Característica	Nº de amostras	Limites definidos pela NBR 8491/2012	
Variação dimensional	-	± 3 mm	
Resistência à compressão	7	Valor médio	≥ 2,0 MPa
		Valor individual	≥ 1,7 MPa
Absorção de água	3	Valor médio	≤ 20%
		Valor individual	≤ 22%

A fabricação do tijolo de solo-cimento pode ser realizada a partir das seguintes etapas segundo a ABCP (1988) e SOUSA (2018):

1. Escolha de um solo adequado, ou seja, que atenda aos requisitos supracitados, preferencialmente com análise em laboratório do solo;
2. Destorroar, peneirar, misturar e armazenar em local com sombra;
3. Preparo da mistura: adição de cimento ao solo preparado e realiza-se uma mistura com os materiais secos. Após a homogeneização adiciona-se água e mistura-se novamente o material até uniformizar a umidade no solo;
4. Moldagem dos tijolos na prensa;
5. Cura e armazenamento: após 6 horas de moldados e durante os sete primeiros dias, os tijolos devem ser mantidos úmidos por meio de sucessivas molhagens.

2.5.1 O projeto SHS

Diversos projetos sociais utilizam a alvenaria estrutural de tijolos solo-cimento para construção de moradias de baixo custo. De forma a reduzir os custos e acelerar a execução a obra em regime de mutirão, com apoio da equipe de projeto na supervisão e capacitação das pessoas que contribuirão na construção. (SOUSA, 2018).

Cabe ressaltar o projeto “SHS - Solução Habitacional Simples: Reconstruindo Após Desastres e Conflitos” ação de extensão da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que conta com aproximadamente 90 voluntários, dentre eles alunos, técnicos e professores. (LIMA,2018)

O projeto tem como objetivo apresentar um suporte, por meio de materiais didáticos, para reconstrução de áreas afetadas por desastres e conflitos.

No período de confecção deste trabalho, o projeto já concluiu algumas etapas, como o estudo sobre construções em mutirão, aprimoramento do material didático, criação de um canal no Youtube. As informações detalhadas do projeto bem como slide das aulas, vídeos e projetos das casas estão no site, que pode ser acessado no seguinte endereço:www.shs.poli.ufrj.br

Esse trabalho visa validar ainda mais os resultados obtidos anteriormente, com amostras maiores, para entender melhor o material.

Além deste, estão sendo estudados por outros autores a análise de redução de danos por sismos nas construções, estudo da liquefação do solo e um ensaio alternativo de resistência à compressão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse tópico são apresentados os materiais utilizados na pesquisa e a descrição dos ensaios realizados. Todos os ensaios deste trabalho foram realizados no laboratório de Engenharia Civil da UFRJ/Macaé, no entanto, alguns ensaios de caracterização desse solo foram realizados no Núcleo de Materiais e Tecnologias Sustentáveis da Escola Politécnica/COPPE (NUMATS) no Centro de Tecnologia da UFRJ na Ilha do Fundão e aqui serão apresentados apenas os resultados.

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 Solo

O solo utilizado como matéria-prima para a fabricação dos tijolos foi retirado de duas jazidas localizadas nas proximidades do laboratório de Engenharia Civil, situado na Av. Aloísio da Silva Gomes, 50 - Novo Cavaleiros, Macaé - RJ.

A partir desse momento o solo mais próximo ao laboratório de Engenharia civil (identificado na Figura 6 pelo pino amarelo) será chamado de Solo 1 e o outro de Solo 2. A região de localização de ambas está representada na Figura 6 pelo retângulo laranja:



Figura 6: Localização das Jazidas de Solo (GOOGLE, 2018)

A coleta do solo foi feita manualmente conforme a Figura 7. A coleta foi realizada com o auxílio de ferramentas básicas, tais como: pá enxada, picareta, baldes e carrinho de mão. Cerca de 30 kg de solo eram transportados por vez.



Figura 7: Coleta de solo na Jazida de solo 1

A Figura 8 apresenta os dois tipos de solo existentes nas duas jazidas, que embora próximas, pela análise táctil-visual é possível observar que são distintos. Além disso, ambos podem ser lateríticos, sendo um aparentemente mais fino que o outro.

Importante ressaltar que estes solos em muitos casos são utilizados em obras de pavimentação, pois apresentam um bom ganho de resistência quando compactados.



Figura 8: Solo 1 à esquerda e Solo 2 à direita (SOUSA, 2018)

Os requisitos para fabricação de tijolos solo-cimento utilizando o solo escolhido são baseados nas normas ABNT NBR 10832:2012 - “Fabricação de Tijolo Maciço e

vazado de solo com utilização de prensa manual ou hidráulica” e NBR 10833:2012 e podem ser vistos novamente na Tabela 8.

Tabela 8: Critérios para a seleção de solos de acordo com a NBR 10833/2012

Característica	Requisitos
passando na peneira ABNT 4,8 mm (n°4)	100%
passando na peneira ABNT 0,075 mm (n°200)	10% a 50%
limite de liquidez	≤45%
limite de plasticidade	≤18%

A partir da curva granulométrica na Figura 9 , é possível observar que os dois solos são bem graduados. Os dados do ensaio e maiores informações podem ser encontradas em SOUSA (2018).

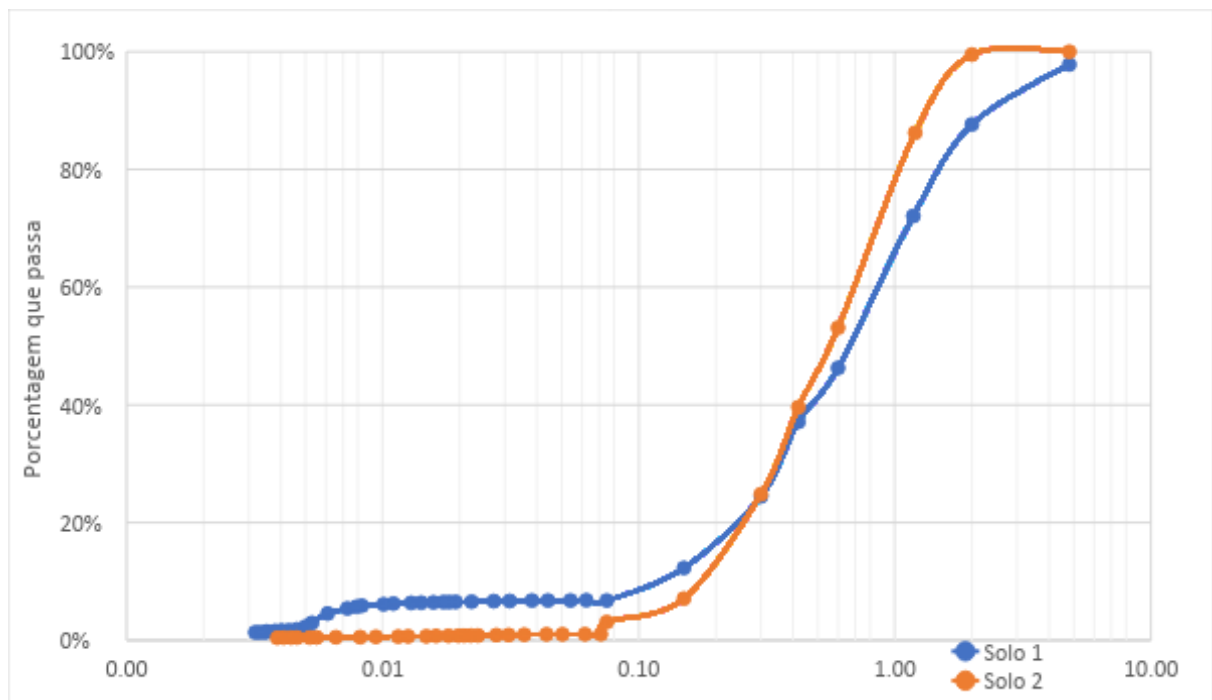


Figura 9: Curva granulométrica dos solos 1 e 2 (SOUSA, 2018)

O limite de liquidez dos solos foi verificado sendo o valor encontrado de 43,1% e 40,5% respectivamente para os solos 1 e 2. A Figura 10 apresenta o ajuste realizado para a determinação do limite de liquidez dos solos 1 e 2.

O limite de plasticidade não pôde ser verificado devido a incompatibilidade dos resultados do ensaio.

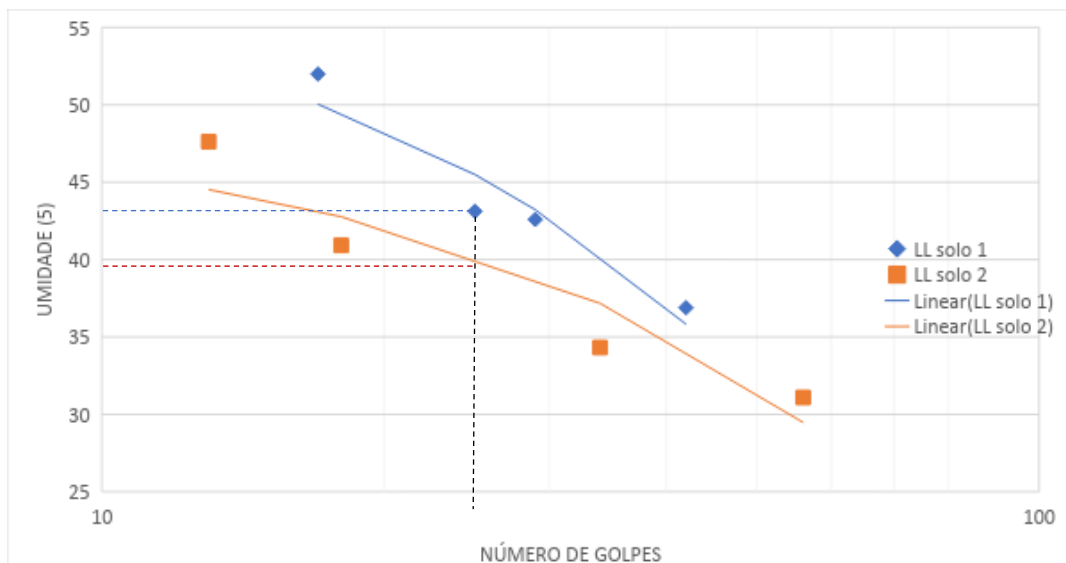


Figura 10: Ajuste para obtenção dos limites de liquidez dos solos 1 e 2 (SOUSA,2018)

A densidade real dos grãos é de $2,719 \text{ g/cm}^3$ e $2,705 \text{ g/cm}^3$ nos solos 1 e 2, respectivamente (SOUSA, 2018).

3.1.2 Cimento

O cimento utilizado foi o Cimento CP III 40 RS devido a disponibilidade no laboratório, no entanto, suas características físicas, químicas e mecânicas atendem aos requisitos da norma de tijolos maciços de solo cimento NBR 10833 (ABNT, 2012).

3.1.3 Água

Durante toda a construção dos tijolos foi utilizada água da CEDAE, classificada como potável, respeitando assim, os parâmetros estabelecidos pela NBR 10833:2012.

3.2 Composição das misturas

Considerando que, até agora, nos trabalhos de LIMA (2018) e SOUSA (2018) foram encontrados resultados satisfatórios para os tijolos de solo-cimento com as proporções de 1:8 e 1:6, optou-se por eleger uma das dosagens estudadas: 1:6. Cabe ressaltar, que assim como nas pesquisas anteriores, o solo utilizado foi uma mistura do solo 1 com o solo 2 na mesma proporção.

A partir da escolha da dosagem foram executadas 05 misturas com umidades diferentes para determinar o papel da umidade na resistência do tijolo de solo-cimento.

3.3 Ensaio de Compactação

Foi realizado o Ensaio de Compactação de acordo com a ABNT NBR 12023/2012 - “Solo-cimento - ensaio de Compactação” e a ABNT NBR 7182/2016: “Solo – ensaio de compactação” com a finalidade de encontrar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca da mistura solo-cimento.

Conforme já citado, a umidade exerce papel importante na mistura, pois, uma redução de 5% na massa do material compactado provoca um decréscimo equivalente a redução de 15% de cimento na mistura. Sendo assim, foram realizados ensaios apenas com a mistura de solo (Solo 1 mais Solo 2) e com a mistura de solo-cimento (Solo 1 mais Solo 2 mais Cimento).

O resultado desses ensaios possibilita a comparação entre as duas curvas geradas, e, a escolha da umidade ótima para execução dos tijolos de solo-cimento.

Para realização desses ensaios foi utilizada a seguinte aparelhagem, ilustrada conforme numeração na Figura 11.

1. balanças que permitem pesar 10 kg e 200 g, com resoluções de 1 g e 0,01 g, respectivamente;
2. peneira de 4,8 mm;
3. estufa capaz de manter a temperatura entre 105° C e 110° C;
4. cápsulas metálicas para determinação da umidade;
5. bandejas metálicas;
6. régua de aço biselada;
7. espátulas de lâmina flexível;
8. cilindro metálico pequeno (cilindro de proctor)
9. soquete pequeno
10. conchas metálicas;
11. papel-filtro;
12. Vaselina Sólida.



Figura 11: Equipamentos e materiais utilizados no ensaio de compactação

Após a separação dos materiais as amostras de solo foram coletadas, destorroadas e peneiradas, conforme a Figura 12. Cabe ressaltar que durante a preparação das amostras o destorroador mecânico foi utilizado. Este procedimento vai em desacordo com a NBR 6457/2016, onde a amostra deveria ser destorroada com o almofariz e mão de gral. Porém na tentativa de simular a preparação do tijolo solo-cimento a amostra do ensaio de compactação foi submetida ao mesmo processo de destorroamento mecânico utilizado na fabricação do tijolo. Com efeito, esse processo permite um aumento muito bom na produtividade, fator importante para o caso da produção de tijolos solo-cimento.



Figura 12: Processo de preparação da amostra

Depois da preparação da amostra foram feitas as dosagens para realização do ensaio. Nesse ponto é importante ressaltar que as misturas foram realizadas de forma separada. Esse cuidado foi necessário, pois somente no caso da mistura de solo 1 mais solo 2 o processo pôde ser executado com a dosagem de todo o material que seria utilizado no ensaio de compactação (cerca de 15 kg).

No entanto, no caso do ensaio de compactação com a mistura de solo-cimento a NBR 12023/2012: “Solo-cimento: Ensaio de compactação” recomenda que a dosagem de cada ponto seja feita de forma separada (aproximadamente 2,5 kg), pois, em caso de excesso de água, devido a presença do cimento, ocorreria a perda de toda a amostra.

O processo de compactação adaptado da NBR 12023/2012 consiste em:

- separar amostra de solo em 05 frações, sendo a primeira com umidade cerca de 5% abaixo da umidade ótima, e, as outras com 2% de umidade a mais que a anterior (ressalta-se que para a presente pesquisa a umidade natural do solo era semelhante ao valor inicial solicitado por norma).
- fixar o molde cilíndrico à sua base, acoplar o cilindro complementar e apoiar o conjunto todo em uma base rígida. Adicionar uma folha de papel filtro ao fundo para evitar aderência do solo ao molde;
- Realizar a pesagem do molde sem solo e sem colarinho (Figura 13);

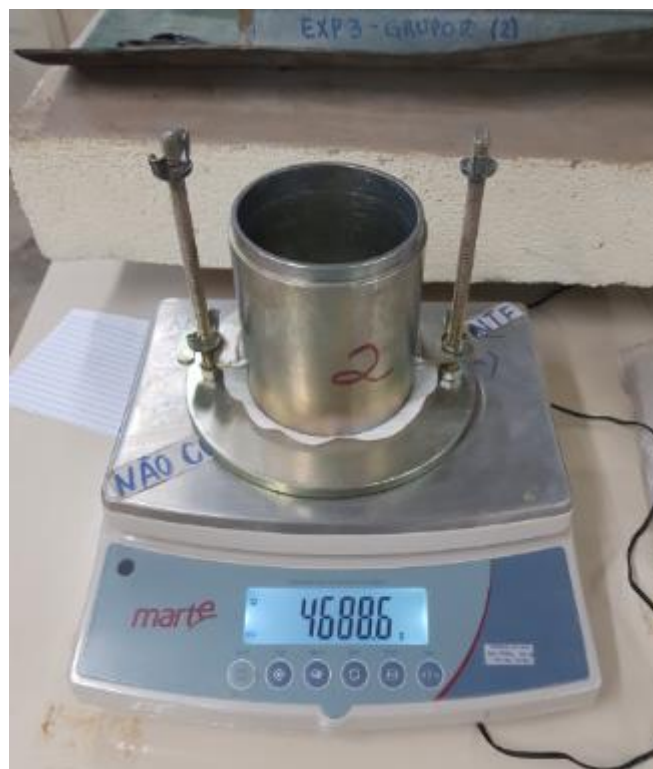


Figura 13: Pesagem do molde.

- adicionar água até obter a umidade desejada para a fração;
- homogeneizar a mistura (Figura 14);



Figura 14: Processo de homogeneização da mistura

Preencher o molde com solo e utilizar o soquete para compactá-lo, conforme Figura 15, sendo 26 golpes por camada com o total de 03 camadas. Recomenda-se que os golpes sejam dados de forma circular e, a cada duas voltas completas, sejam dados 02 golpes no meio, de forma a garantir a uniformidade na compactação. Além disso, escarificar o solo entre as camadas auxilia na aderência entre as mesmas;



Figura 15: Preenchimento e compactação do molde.

- Após a compactação da última camada, escarificar a parede do colarinho para remover o solo em contato, depois, é necessário remover o colarinho¹. (Figura 16).



Figura 16: Escarificação da amostra

¹ O processo de retirada do colarinho na mistura de solo-cimento foi extremamente difícil devido a aderência do solo com a parede metálica do molde, sendo assim, diferente do que recomenda a NBR 12023/2012, optou-se por utilizar vaselina no colarinho para facilitar a retirada após o ensaio.

- O solo em excesso acima do molde deve ser arrasado com o auxílio da régua biselada, de acordo com a Figura 17.



Figura 17: Arrasamento do solo em excesso.

- Pesar o conjunto e subtrair da massa do molde;
- retirar ao menos 03 amostras de solo da parte central do corpo de prova², colocando-as em cápsulas para determinação da umidade na estufa (Figura 18).

² É importante retirar, pelo menos, três amostras para determinação da umidade. Menciona-se que durante a realização dos ensaios desta pesquisa ocorreu um incidente com uma das amostras, no entanto, como havia três, a amostra duvidosa pôde ser descartada e os resultados não foram comprometidos..



Figura 18:Retirada de amostras para determinação da umidade.

- Repetir o procedimento para as 05 frações.

Após a coleta de todas as amostras de solo, é necessário esperar ao menos 24h (ou constância de peso) na estufa para conhecer a umidade do solo.

A massa específica aparente seca pode ser determinada pela seguinte equação:

$$\rho_d = \frac{100M_u}{V(100 + w)}, \text{ onde :}$$

ρ_d é a massa específica seca aparente expressa em gramas por centímetros cúbico.

M_u é a massa úmida do solo compactado em gramas.

V é o volume útil do molde cilíndrico em centímetros cúbicos.

w é o teor de umidade do solo compactado em percentual.

A partir desses resultados será gerada uma curva de compactação (umidade versus massa específica seca). Desta curva pode ser obtido o ponto com a massa específica seca máxima e a umidade ótima.

3.4 Fabricação dos tijolos de solo-cimento

Para a produção de tijolos foi utilizada uma prensa manual com moldes de dimensões 12,5 cm x 25 cm x 6,5 cm (largura x comprimento x espessura) e encaixes que permitem a amarração direta entre os componentes na execução da alvenaria.

A produção dos tijolos ocorreu no laboratório de Engenharia Civil em Macaé/RJ.

A Figura 19 apresenta a prensa manual e o triturador de solo utilizados, ferramentas que foram essenciais na produção dos tijolos de solo-cimento.



Figura 19: Prensa manual e triturador de solo (VIMAQ PRENSAS apud SOUSA, 2018)

Prensa:

- Tipo: modular 12,5 x 25;
- Produz tijolos de encaixes universais de solo-cimento vazados, com 12,5 cm de largura, 25 cm de comprimento, 6,5 cm de espessura e furos internos de 6,8 cm de diâmetro, indicados para edificações de alvenaria em geral.
- Massa: aproximadamente 80 kg;
- Capacidade de Produção: 250 a 300 tijolos por hora;
- Peças por m² de parede: 70 tijolos somente encaixados;
- Acessórios: dispositivo para a produção de ½ tijolo, indicado para acabamentos de portas e janelas; canaleta, para a execução de vergas e cintas de amarração;
- Tensão de Compactação: 2,0 MPa a 3,0 MPa, segundo o fabricante.

Triturador:

Tipo: Triturador.

- Máquina destinada a destorroar a mistura de solo-cimento. Proporciona uma melhor homogeneização da umidade;
- Massa: aproximadamente 100 kg;
- Dispositivo: motor de 2 HP e lâmina de trituração.

3.4.1 Armazenamento dos componentes

O solo em diversos momentos foi armazenado em sacos plásticos, depois de ser destorroado e peneirado, de acordo com o ilustrado na Figura 20a. Esse processo auxilia no controle de umidade, pois, reduz a variação da mesma. Outro modo de armazenar solo é utilizando um recipiente grande, como por exemplo uma caixa d'água (Figura 20b), que nesse caso possuía 250 litros. A vantagem é que se consegue armazenar mais solo junto evitando assim possíveis erros associados a diferenças de umidade e tipos de solo.



Figura 20: Formas de armazenar o solo

O cimento deve ser guardado em ambiente seco, conforme a Figura 21, para não ficar “empedrado”, o que prejudica a qualidade da mistura.



Figura 21: Armazenamento do cimento.

É importante destacar que tanto o solo quanto o cimento devem ser armazenados em local coberto e protegidos de outros materiais ou impurezas.

3.4.2 Determinação do teor de umidade de solos

A ABNT 6457 - “Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização” em seu Anexo A traz a forma como deve ser feita a determinação do teor de umidade de solos.

Os equipamentos necessários são:

- balança que permita pesar 200g, com resolução de 0,01g;
- estufa capaz de manter a temperatura entre 105° C e 110° C;
- dessecador contendo sílica gel;
- cápsulas metálicas.

O procedimento adotado foi o seguinte:

1. Retirada de uma amostra do solo capaz de encher 03 cápsulas metálicas;
2. Pesagem das cápsulas vazias;
3. Pesagem das cápsulas com a amostra de solo;
4. A seguir, as cápsulas são colocadas na estufa por pelo menos 24h ou quando a massa não variar mais;
5. Retirar as amostras da estufa e colocar no dessecador para resfriar;
6. Pesagem das amostras após o tempo na estufa.

Após a realização do procedimento acima, foi utilizada a seguinte equação para determinação do teor de umidade (w):

$$w = 100 \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3}, \text{ onde :}$$

w é o teor de umidade, expresso em porcentagem.

M_1 é a massa do solo úmido mais a massa do recipiente, em gramas.

M_2 é a massa do solo seco mais a massa do recipiente, em gramas.

M_3 é a massa do recipiente, em gramas.

Depois é necessário calcular a média dos 03 valores encontrados para definir o valor de umidade da amostra.

3.4.3 Preparação da mistura

1. O processo de preparação da mistura foi iniciado a partir da dosagem, considerando a relação 1:6 (cimento: solo), e a umidade do solo (w) no momento.
2. O processo de homogeneização da mistura é importante para garantir a uniformidade do material, então, de acordo com o que está exibido na Figura 22, o procedimento foi realizado da seguinte forma:
 - a. Adição de Solo 1 mais Solo 2 na masseira, com mesma proporção, seguido da homogeneização da mistura;
 - b. Adição do cimento, e novamente o material foi revolvido;
 - c. Adição da água necessária, definida a partir do resultado do ensaio de compactação para o traço utilizado.
 - d. Depois a mistura foi levada ao destorroador novamente para garantir maior homogeneidade.



Figura 22: Sequência de preparação da mistura

É importante notar que a execução desse procedimento deve ser realizada em local arejado, sem incidência direta da luz solar ou chuva, pois, pode alterar o resultado da dosagem. A Figura 23 mostra o galpão utilizado para a fabricação dos tijolos solo-cimento.

O processo de mistura dos componentes dos tijolos solo-cimento se mostrou muito susceptível a variações climáticas durante a pesquisa. Percebeu-se, mas não se quantificou, que em dias mais quentes este processo tinha que ser realizado com

menos tempo, pois a mistura perdia água rapidamente. Por outro lado, em dias mais úmidos a mistura havia mais tempo para executar as mesmas tarefas.



Figura 23:Local protegido da chuva e da luz direta do sol onde foram fabricados os tijolos.

3.4.4 Moldagem dos tijolos

O processo de moldagem dos tijolos utilizou a prensa descrita no item 3.4, e cada tijolo utilizou cerca de 2,5 L da mistura. Foi executado, pelos motivos, no mesmo galpão citado anteriormente.

O procedimento adotado para execução da mistura foi o seguinte:

1. Colocação de um balde (cerca de 10 L) no silo da prensa;
2. O mecanismo é aberto para colocação do solo que será prensado (Figura 24)



Figura 24: Abertura da prensa para colocação do solo

3. Após o preenchimento total da cavidade com solo, foi iniciado o processo de prensagem, conforme a Figura 25



Figura 25: Processo de Prensagem do solo

4. Após a prensagem, os tijolos foram retirados com cuidado da prensa, de forma a evitar que alguma parte fique presa na prensa (Figura 26).



Figura 26: Etapa de desmoldagem do solo

5. Depois da execução os tijolos foram levados para a câmara úmida.

3.4.5 Cura

O processo de cura dos tijolos vem se mostrando essencial para obter a resistência à compressão desejada, no entanto, esse processo demanda estrutura, pois, o ideal é a existência de uma câmara úmida com controle de temperatura e umidade. Como a UFRJ-Macaé não possui uma, foi iniciado o processo de execução de uma câmara úmida como tentativa de melhorar o controle tecnológico na construção do tijolo de solo-cimento.

Os seguintes equipamentos e materiais foram utilizados para confecção da câmara úmida:

- Uma caixa d'água de 250 L;
- Uma caixa d'água de 500 L;
- 20 m de mangueira de ¼" furada a cada 30cm;
- Um container de 10 pés.
- Uma agulha;
- Um isqueiro;
- Um registro de esfera;
- Um adaptador para caixa d'água;
- 1 furadeira à bateria.

O processo de execução da câmara úmida se deu da seguinte forma:

1. Primeiro foi feito um furo na lateral superior do container (para isso foi utilizada uma broca para furar chapas e uma furadeira) para a passagem da mangueira.
2. Foram realizados furos na mangueira a cada 30cm aproximadamente, utilizando uma agulha e um isqueiro, para facilitar a perfuração do plástico.
3. Para fixação da mangueira no teto do container foram aproveitados os próprios ganchos existentes.
4. Foi colocada uma caixa d'água de 500 L em cima do container para alimentar a mangueira.
5. Na ligação entre a caixa d'água superior e a mangueira, foi utilizado um registro para impedir a circulação de água caso seja necessário.
6. Para aumentar a umidade dentro do container, foi colocada uma caixa d'água de 250L cheia, sem tampa.

O sistema funciona basicamente a partir da abertura do registro conectado na caixa d'água superior, que possui 500 L, (conforme Figura 27) e a água pinga dentro do container pelos furos da mangueira. Enquanto isso, a caixa d'água de 250 L permanece cheia dentro do container para tentar manter a umidade um pouco maior.



Figura 27: Container utilizado como câmara úmida

A Tabela 9 traz a divisão da quantidade de tijolos executados, em relação a umidade. No total foram executados 64 tijolos, divididos em 05 grupos.

Tabela 9: Divisão dos tijolos em relação a umidade

Quantidade	Umidade (%)
24	22,40%
18	19,06%
9	19,57%
8	23,72%
5	25,57%

Os tijolos considerados nas análises foram fabricados com um intervalo de uma semana em sua fabricação. Na ocasião, o clima se encontrava praticamente estável, com insignificante variação de temperatura e umidade.

3.5 Ensaio de compressão

O ensaio de compressão simples foi realizado de duas formas: a primeira de acordo com a NBR 8492/2012: “Tijolo maciço de solo-cimento – Determinação da resistência à compressão e da absorção de água”, e a segunda com algumas adaptações.

A seguir estão apresentados os procedimentos adotados:

1. Todos os tijolos foram utilizados para realização do ensaio e, divididos em 04 categorias:
 - a. Máquina de ensaio à compressão hidráulica - Tijolos rompidos na máquina de ensaio à compressão do laboratório de engenharia civil da UFRJ/Macaé, sem controle refinado de aplicação de carga;
 - b. Máquina de ensaio à compressão elétrica - Tijolos rompidos na Máquina Universal de ensaios EMIC 100KN do laboratório de engenharia mecânica da UFRJ/Macaé, com controle refinado de aplicação de carga;
 - c. Imerso - Tijolos que ficaram imersos em água por 18h;
 - d. Não imerso - Tijolos que não ficaram imersos em água para realização do ensaio.

A Tabela 10 traz a quantidade de tijolos utilizada em cada grupo.

Tabela 10: Grupos utilizados na realização do ensaio à compressão simples

Quantidade	Umidade	Máquina de ensaio à compressão hidráulica		Máquina de ensaio à Compressão elétrica	
		Imerso	Não Imerso	Imerso	Não Imerso
24	22.40%	6	6	4	8
18	19.06%	4	4	7	3
9	19.57%	-	-	-	9
8	23.72%	-	-	-	8
5	25.57%	-	-	-	5

2. Os corpos de prova foram cortados ao meio, utilizando uma serra do tipo poli corte, perpendicularmente à sua maior dimensão (Figura 28).



Figura 28: Corte dos corpos de prova utilizando uma serra policorte

3. Os tijolos foram superpostos com as superfícies cortadas invertidas, e ligadas por uma pasta de cimento Portland (Figura 29). Durante este procedimento observou-se a necessidade de umedecer os tijolos antes de aplicar a pasta de cimento Portland. Assim, os tijolos eram completamente imersos em um recipiente com água antes da colagem.



Figura 29: Colocação da pasta de cimento

4. Foi realizada a planificação dos corpos de prova, retirando com um estilete as partes mais altas. (Figura 30)



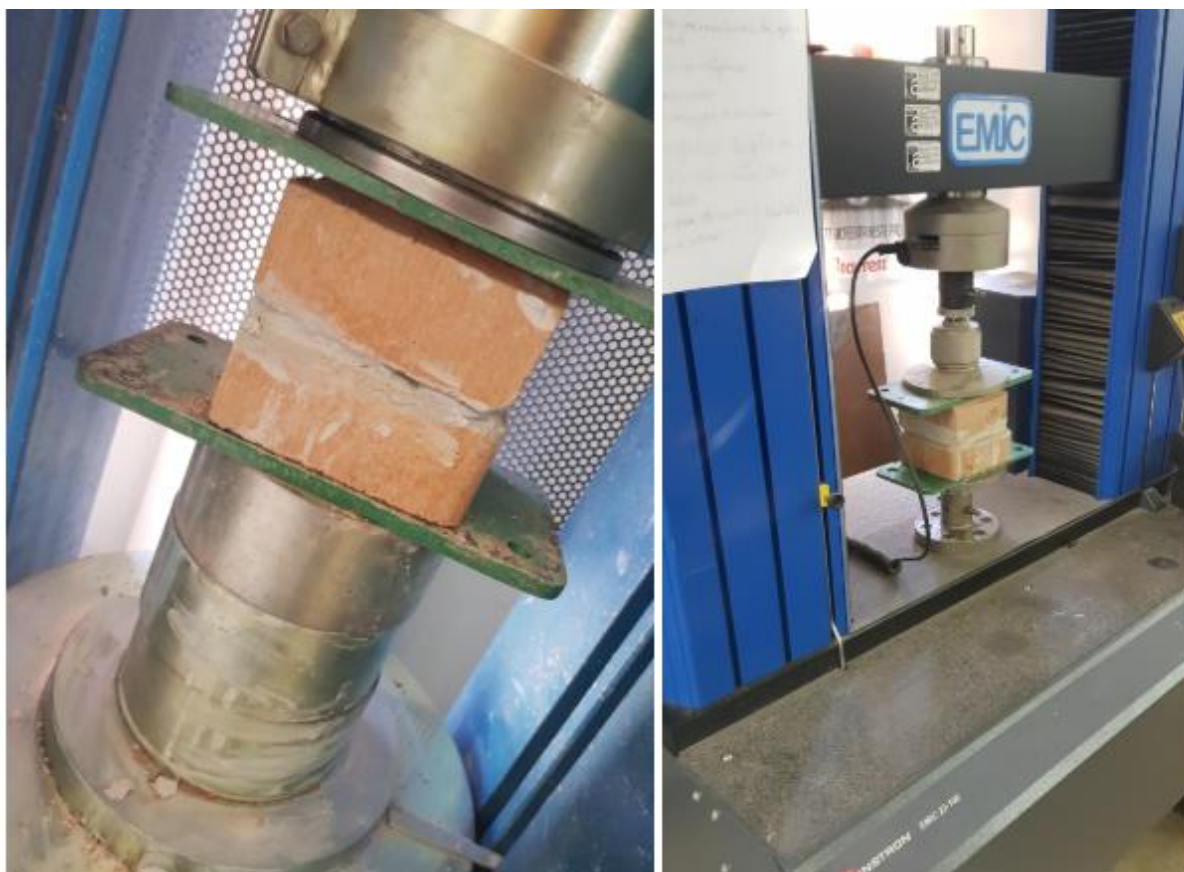
Figura 30: Planificação dos corpos de prova

5. Parte dos corpos de prova ficaram totalmente submersos em água por cerca de 18h (Figura 31)



Figura 31: Imersão dos corpos de prova

6. Foram utilizadas placas de aço entre o prato da máquina e o corpo de prova para uniformizar a aplicação da carga sobre o tijolo. A Figura 32a e Figura 32b mostram os corpos de prova, com as placas de aço, instalados nas máquinas de ensaio à compressão hidráulica e elétrica, respectivamente.



(a)

(b)

Figura 32: Utilização de peças metálicas para uniformizar a carga

7. De acordo com a NBR 8492/2012 a aplicação da carga deve ser uniforme e à razão de 500 N/s (50 kgf/s). Isto só foi possível de ser realizado na máquina de ensaio à compressão elétrica. No caso da hidráulica foi definido um valor fixo de 30 u.V. para a velocidade de avanço da máquina. A Figura 33 apresenta o painel da máquina de ensaio à compressão hidráulica onde é possível observar a válvula que libera o fluido para início do carregamento. Neste momento, vale destacar que, o modo como a aplicação do carregamento é realizado nessa máquina “hidráulica” não é de conhecimento da equipe envolvida. De fato, a válvula só menciona a palavra “velocidade”, como destacado na Figura 33. Diversas vezes já tentou-se obter uma relação precisa da aplicação do carregamento no equipamento – sem sucesso.



Figura 33: Painel da máquina de ensaio à compressão hidráulica, com destaque para a válvula que inicia o carregamento

8. Carga elevada gradualmente até ocorrer a ruptura do corpo de prova. (Figura 34)



Figura 34: Corpo de prova rompido à compressão

3.6 Análises estatísticas

Foram realizadas análises estatísticas com base em medidas descritivas (média, mediana, desvio padrão, valor mínimo e valor máximo.), e, calcados nesses valores, foram gerados gráficos e tabelas.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado com o intuito de verificar três hipóteses a respeito dos tijolos solo-cimento, são elas:

- I. A utilização da máquina de ensaio à compressão hidráulica ou elétrica não interfere no resultado do ensaio à compressão dos tijolos;
- II. A resistência à compressão dos corpos de prova não apresenta diferenças ao realizar o ensaio com e sem imersão em água;
- III. A umidade da mistura na confecção dos tijolos não altera a resistência a compressão dos mesmos.

Todos os tijolos executados foram ensaiados à compressão simples, depois, divididos em grupos, de forma conveniente para testar as hipóteses formuladas anteriormente. A resistência à compressão dos tijolos e seus respectivos grupos, encontram-se no Apêndice 3: Dados Gerais dos tijolos produzidos.

Em termos gerais, para testar as hipóteses utilizou-se tanto uma análise univariada como bivariada. Ou seja, foram utilizados gráficos, assim como algumas estatísticas como, por exemplo, a média e a mediana.

Na comparação de grupos, utilizou-se os testes não paramétricos Kruskal-Wallis (três ou mais grupos) e Mann-Whitney (dois grupos). Esses testes foram realizados considerando um nível de significância de 0,05. Sendo assim as hipóteses iniciais são rejeitadas se p-valor menor que 0,05.

As análises foram realizadas utilizando a linguagem de programação Python, o código encontra-se no Apêndice 4: Programas gerados em Python

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Ensaio de Compactação

O resultado do ensaio de compactação foi essencial para determinação da umidade ideal de fabricação dos tijolos, sendo assim, foram analisados ensaios com cimento e sem cimento a fim de comparação.

4.1.1 Ensaio de Compactação sem cimento

Os resultados dos ensaios podem ser vistos na Tabela 11

Tabela 11: Relação umidade versus Massa específica seca da mistura Solo 1 e Solo 2

Umidade	Massa específica seca (MPa)
15.76%	1.573
18.52%	1.640
19.57%	1.660
21.23%	1.67
24.37%	1.587
27.38%	1.510

A partir desses dos valores obtidos no ensaio tipo Proctor Normal foi traçada a curva de compactação Figura 35. Cabe ressaltar que a NBR 7182:2016, define que a curva resultante deve ter um formato aproximadamente parabólico, sendo assim, embora a curva tenha sido gerada por um polinômio de 6° grau, nos pontos de interesse, possui um comportamento parabólico.

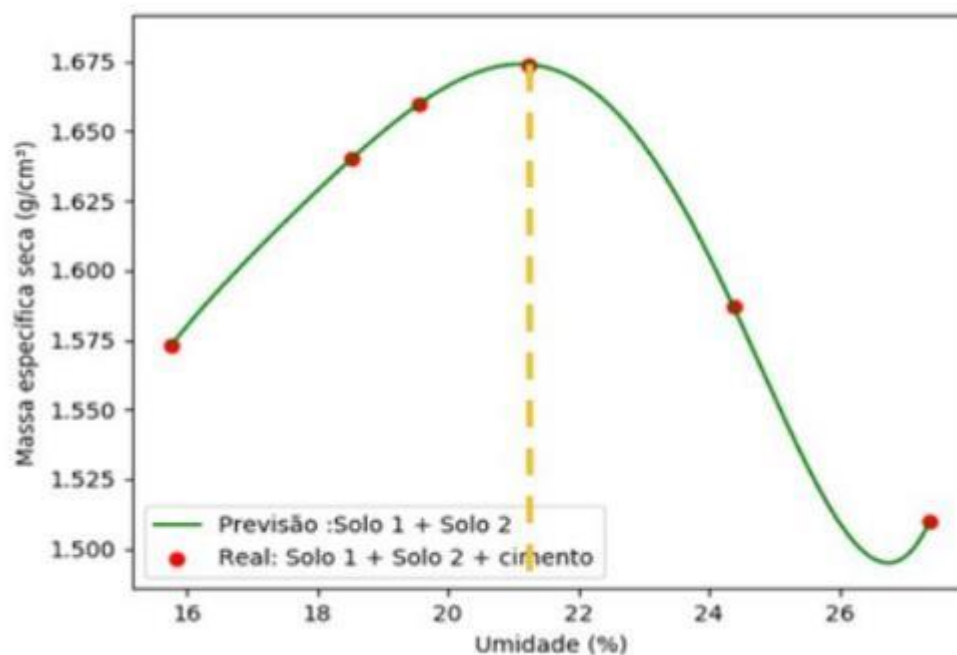


Figura 35: Umidade (%) versus Massa específica seca (g/cm³) na mistura Solo 1 e Solo 2.

A análise da curva permite estabelecer a umidade ótima associada a massa específica seca máxima. Neste caso a umidade ótima foi de 21,23%, enquanto a massa específica seca máxima foi de 1.674 g/cm³.

4.1.2 Ensaio de Compactação com cimento

Naturalmente o ensaio de compactação realizado com cimento obedeceu a mesma proporção definida anteriormente para a fabricação dos tijolos solo-cimento, ou seja, 1:6 (cimento-água). Os resultados dos ensaios podem ser vistos na

Tabela 12: Relação umidade versus Massa específica seca da mistura Solo 1, Solo 2 e cimento.

Umidade	Massa específica seca (Mpa)
15.44%	1.604
16.61%	1.623
18.71%	1.626
22.41%	1.634
23.13%	1.618
24.81%	1.579
29.03%	1.462

A partir desses dos valores obtidos no ensaio tipo Proctor Normal foi traçada a curva de compactação Figura 36. Neste caso, a curva de compactação foi gerada a partir de um polinômio de 4° grau.

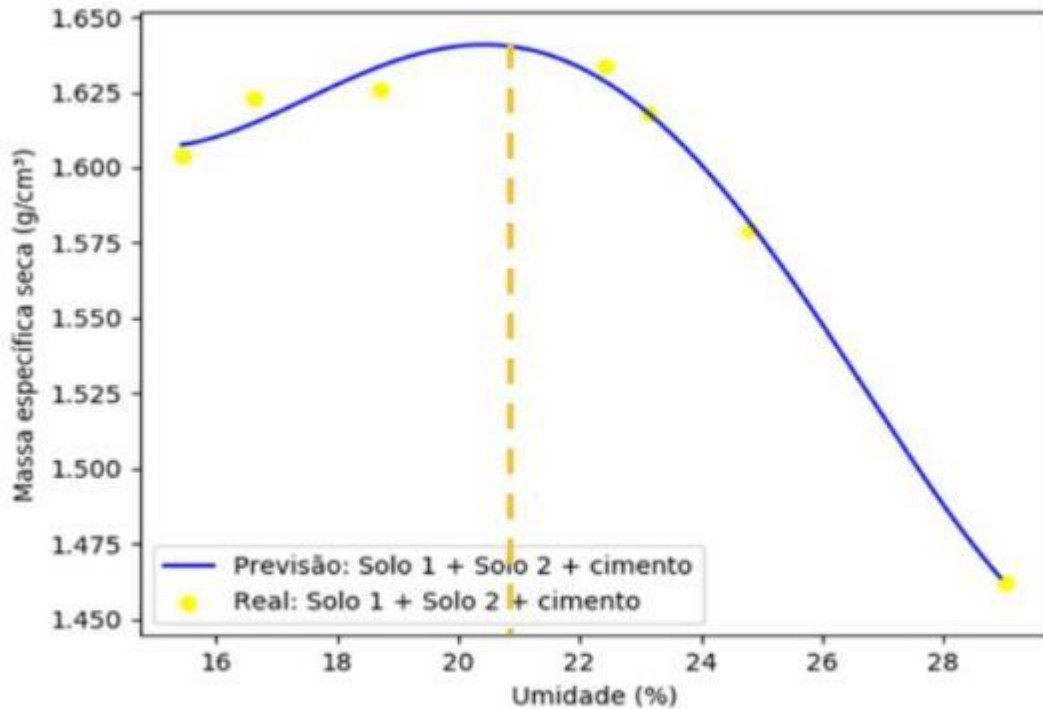


Figura 36: Umidade (%) versus Massa específica seca (g/cm³) na mistura Solo 1, Solo 2 e cimento.

A partir do ajuste realizado considerou-se a massa específica seca máxima de 1.640 g/cm³ e a umidade ótima 21 %.

4.1.3 Comparação entre os ensaios

Uma comparação entre as curvas de compactação realizadas com e sem a adição de cimento foi realizada. A Figura 37 apresenta as curvas plotadas em um mesmo gráfico.

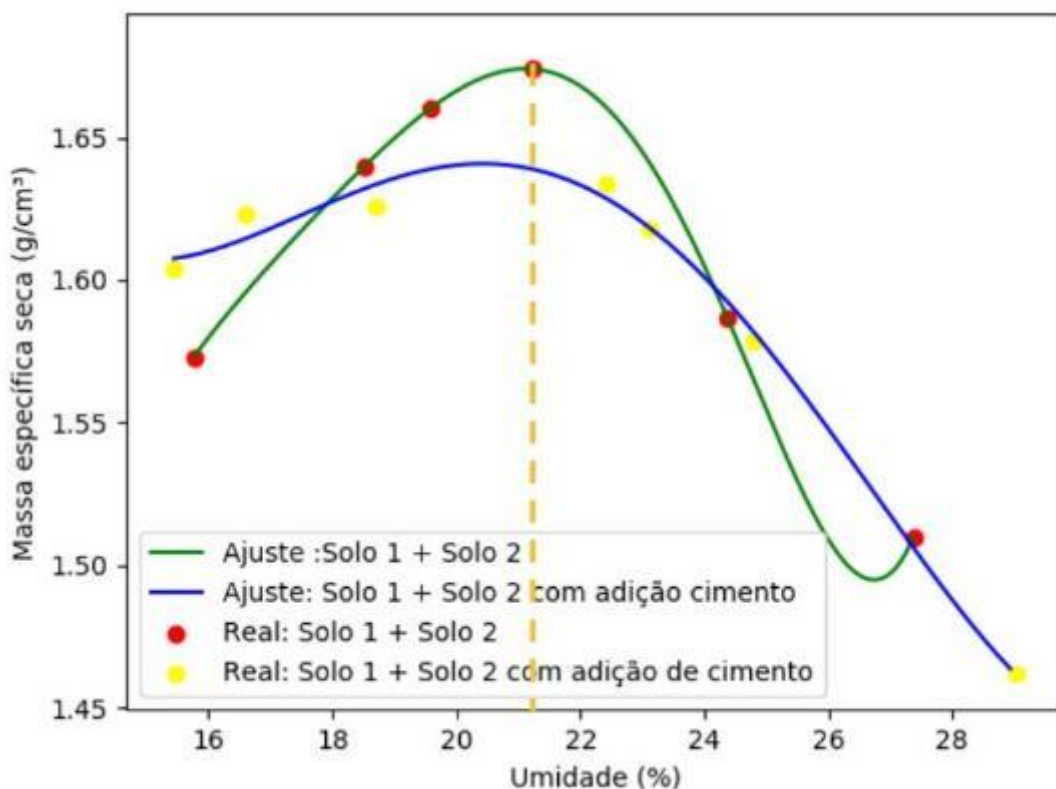


Figura 37: Comparação entre os ensaios realizados

Com relação aos pontos de massa específica seca máxima e umidade ótima a comparação permite observar que a massa específica seca máxima da mistura sem adição de cimento é maior que a massa específica seca máxima da mistura com adição de cimento. Por outro lado, a umidade ótima dos dois ensaios é muito parecida. De fato, GRANDE (2003) afirma que a umidade necessária para hidratar o cimento, pode ser suprida pela umidade ótima de compactação da mistura de solo.

Com relação aos outros pontos das curvas cabe observar dois comportamentos distintos: um no ramo seco e outro no ramo úmido.

Com relação ao ramo seco, para a curva de compactação sem a adição de cimento fica nítida a tendência de redução da massa específica seca com a diminuição da umidade. Já para a curva de compactação com adição de cimento a tendência não é tão acentuada. Como no ramo seco a presença de água é pequena uma possível explicação estaria associada ao tamanho e formato dos grãos de solo e as partículas do cimento. O cimento possui boa parte de suas partículas classificadas como material fino. Essas partículas, muito provavelmente, ocupam os espaços vazios da massa de solo, fazendo com que a massa específica seja mais alta.

Com relação ao ramo úmido para as duas curvas fica nítida a redução da massa específica seca com o aumento da umidade. Um detalhe que chama a atenção é que no caso da curva realizada com a adição de cimento a redução é relativamente maior que na curva sem a adição do cimento. Uma explicação plausível para este fato pode estar associada ao diferente formato dos grãos de solo e das partículas de cimento. No caso das partículas de cimento devido à grande superfície específica uma certa quantidade de água adsorvida pode acabar fazendo com que, durante o processo de compactação, algum ar ocluso fique remanescente na mistura. Este ar ocluso acabaria por tornar o processo de compactação menos eficaz. Outra explicação poderia estar associada a possíveis reações físico-químicas entre o cimento e a água. Neste caso, semelhante a explicação anterior poderiam surgir bolhas de ar ocluso devido a água adsorvida nas partículas de cimento como pode ser observado na Figura 38.

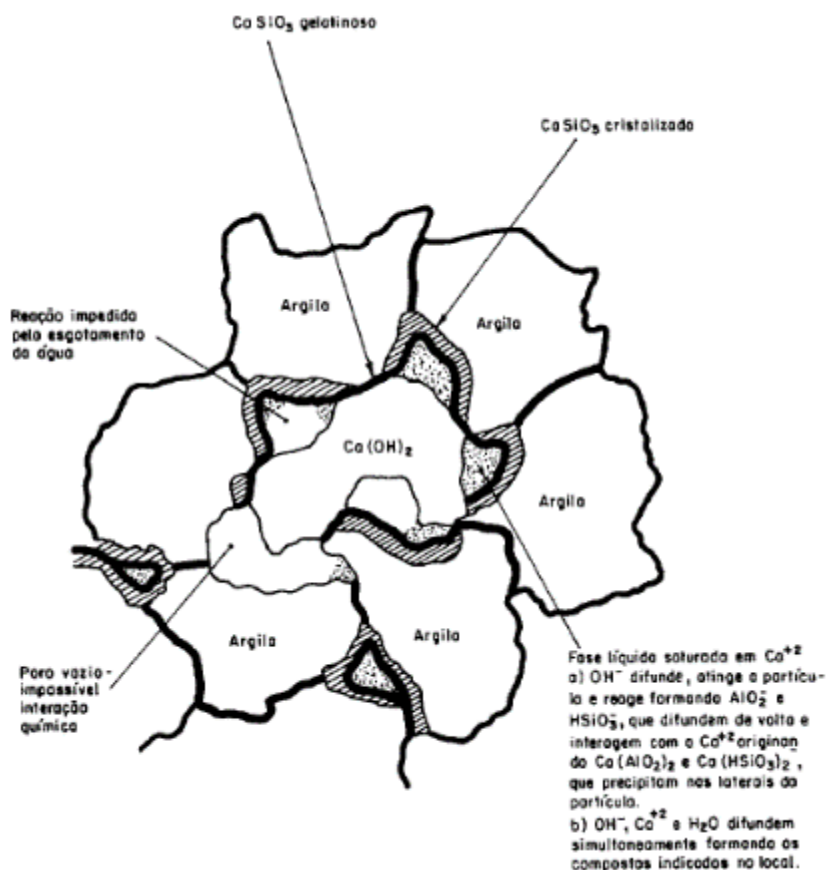


Figura 38: Ataque da argila pela cal. (INGLES, 1970 apud MARCONDES, 1992)

4.1.4 Dificuldades Associadas a adição do cimento no ensaio

O ensaio de compactação utilizando cimento na composição necessitou de cuidados especiais para realização. Vale ressaltar os dois principais:

- Por ter cimento na mistura, a amostra deve ser separada em partes de aproximadamente 3kg para realização de cada ponto, do contrário, em caso de adição de água em excesso, não é possível aguardar a diminuição da umidade sem comprometer o ensaio.
- Outro ponto que resultou em dificuldades foi a hora de retirar o colarinho da amostra, pois a mistura ficou aderida a parede do mesmo, conforme observado na Figura 39.



Figura 39: Falha na retirada do colarinho na mistura de solo-cimento

A solução encontrada para o segundo problema foi passar vaselina na parte interna do colarinho, para reduzir o atrito do solo com a parede metálica, e assim, facilitar a retirada do solo, após a escarificação com a espátula, conforme Figura 40.



Figura 40: Lubrificação do colarinho com vaselina.

O resultado atingido foi satisfatório, possibilitando assim, a retirada do colarinho sem prejudicar o ensaio. O processo final pode ser visto na Figura 41.



Figura 41: Retirada do colarinho, para finalização do procedimento.

4.2 Ensaio de Resistência à compressão simples

O ensaio de resistência à compressão foi realizado com o intuito de verificar três hipóteses a respeito dos tijolos solo-cimento, são elas:

- I A utilização da máquina de ensaio à compressão hidráulica ou elétrica não interfere no resultado do ensaio à compressão dos tijolos;
- II A resistência à compressão dos corpos de prova não apresenta diferenças ao realizar o ensaio com e sem imersão em água;
- III A umidade da mistura na confecção dos tijolos não altera a resistência a compressão dos mesmos.

Todos os tijolos executados foram ensaiados à compressão simples, depois, divididos em grupos, de forma conveniente para testar as hipóteses formuladas anteriormente. A resistência à compressão dos tijolos e seus respectivos grupos, encontram-se no apêndice.

Esses ensaios foram realizados considerando um nível de significância de 0,05. Sendo assim as hipóteses iniciais são rejeitadas se p-valor menor que 0.05.

4.2.1 Máquina de Ensaio à compressão elétrica versus Máquina de ensaio à compressão hidráulica

A Máquina de ensaio à compressão existente no laboratório de Engenharia Civil do Campus - Macaé não possibilita a escolha precisa da forma de aplicação da carga nos ensaios, conforme recomendação da NBR 8492/2012, no entanto, os ensaios sempre são realizados nela, colocando uma velocidade de avanço 30 u.V, conforme o painel da máquina. Conforme definido anteriormente, essa máquina será tratada neste trabalho como “hidráulica”.

Além disso, o laboratório de Engenharia Mecânica do Campus possui uma Máquina de ensaio à compressão que permite configuração de diversos parâmetros, entre eles, a aplicação de carga. Apresenta ainda uma saída de dados em forma de planilha e um gráfico de deslocamento versus resistência à compressão (e.g. Figura 42). Conforme definido anteriormente, essa será chamada de máquina “elétrica”.

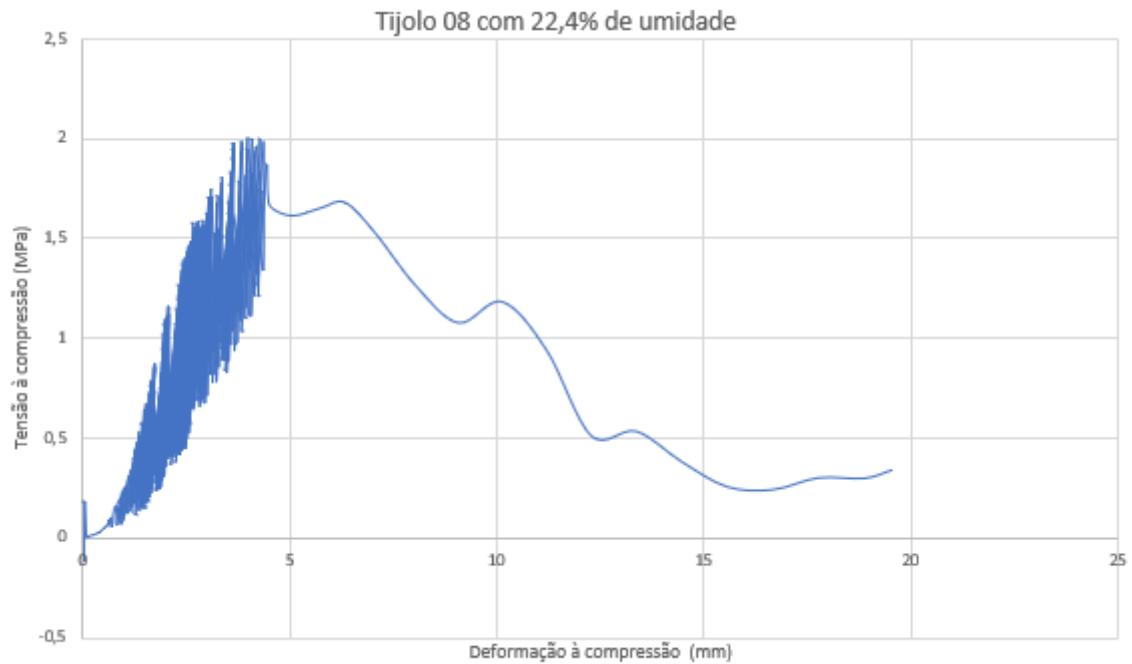


Figura 42: Deformação versus Tensão à compressão em tijolo rompido na Máquina de ensaio à compressão "elétrica"

Como pode ser observado na Tabela 13 para realização dessa análise foram considerados todos os tijolos que possuem 22,4% e 19,0% de umidade a fim de comparar se há diferença significativa nos resultados encontrados.

Tabela 13: Medidas descritivas das amostras dos grupos "elétrica e hidráulica".

Grupo	Qtd.	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Mediana (MPa)	Valor min. (MPa)	Valor máx. (MPa)
elétrica	22	1.43	0.60	1.22	0.51	2.48
hidráulica	20	1.51	0.53	1.58	0.63	2.40

A visualização desses parâmetros de cada grupo e sua comparação visual pode ser feita a partir da ferramenta conhecida como "box plot", conforme ilustra a Figura 43.

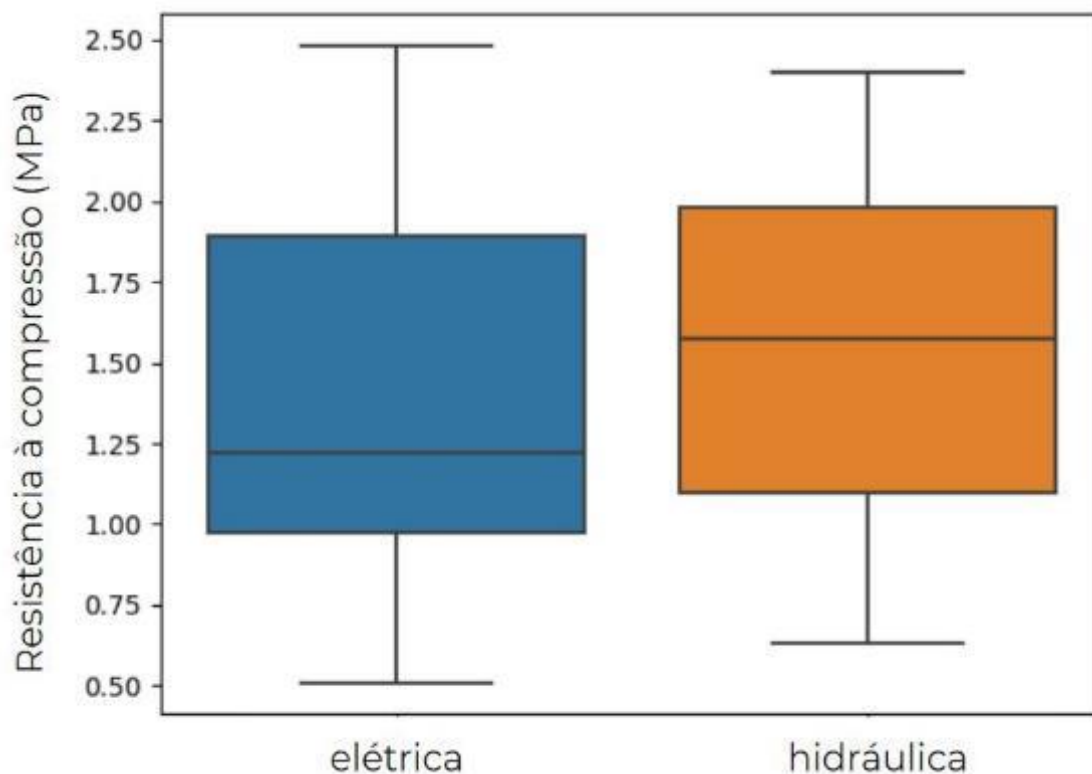


Figura 43: Distribuição da resistência à compressão dos tijolos nas duas máquinas de ensaio à compressão

Visualmente é possível observar que os grupos são semelhantes. De fato, a análise pelo Teste U de Mann-Whitney obteve um p-valor igual a 0.3296.

Sendo assim, como o p-valor é maior que 0.05, a hipótese inicial foi aceita, ou seja, não foram encontradas diferenças significativas no resultado do ensaio à compressão dos tijolos solo-cimento ao utilizar as máquinas de ensaio à compressão.

Com base nessa análise, as considerações e testes posteriores não diferenciam os resultados das duas máquinas em grupos distintos.

4.2.1 Ensaio imerso versus não imerso

A NBR 8492/2012 define que os corpos de prova devem ser imersos em água por pelo menos 06 horas antes da realização do ensaio à compressão simples. No entanto, SOUSA (2018) observou que a imersão prévia dos corpos de prova resultou em uma redução significativa na resistência à compressão dos tijolos.

Dito isto, este trabalho considerou pertinente verificar a existência desse fenômeno com um número maior de ensaios. Sendo assim, foram preparados corpos de prova com imersão em água por 18h antes do ensaio e, sem imersão prévia.

Como pode ser observado na Tabela 14, foram considerados todos os tijolos que possuem 22.4% e 19.0% de umidade a fim de comparar se há diferença significativa nos resultados encontrados.

Tabela 14: Medidas descritivas dos grupos "imerso" e "não imerso".

Grupo	Qtd.	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Mediana (MPa)	Valor min. (MPa)	Valor máx. (MPa)
imerso	21	1.05	0.35	1.03	0.51	1.96
não imerso	21	1.88	0.40	1.91	1.08	2.48

A análise dos parâmetros de cada grupo e sua comparação visual pode ser feita a partir da ferramenta "box plot" na Figura 44.

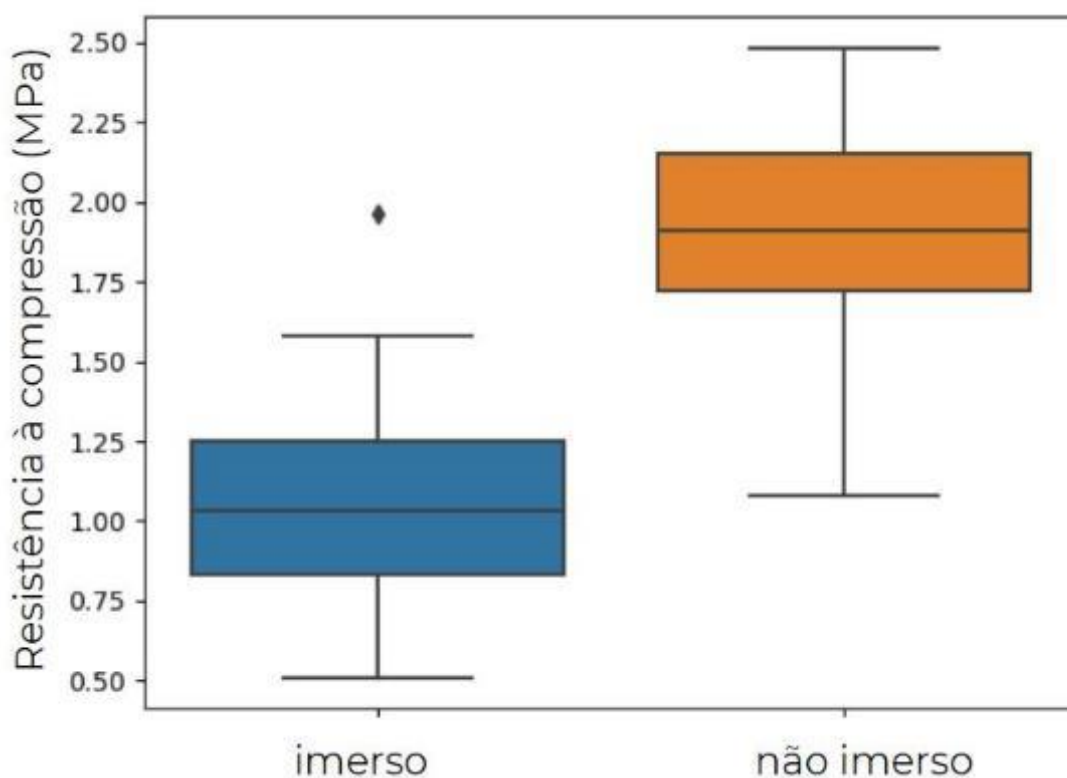


Figura 44: Distribuição da resistência à compressão dos tijolos com e sem imersão prévia.

Os valores de resistência encontrados para os corpos de prova que foram submetidos a imersão em água, possuem uma redução de aproximadamente 44% na resistência à compressão média dos tijolos que não foram imersos.

Foi analisada a hipótese dos grupos não possuírem diferenças significativas pelo Teste U de Mann-Whitney. O valor encontrado para p-valor <0.0001, ou seja, o p-valor é menor que 0.05.

Com base nesses resultados, foi verificado que a imersão prévia realmente impacta negativamente na resistência à compressão dos tijolos.

4.2.2 Variação da umidade inicial na resistência à compressão

A água exerce um papel importante na mistura dos tijolos solo-cimento, e, possivelmente na resistência à compressão dos tijolos. Com base nesse pressuposto os tijolos produzidos foram divididos em grupos de acordo com a umidade no processo de execução, a fim de verificar essa suposição.

Esses grupos não fizeram distinção em relação aos tijolos terem sido rompidos na máquina de ensaio à compressão hidráulica ou elétrica com base no resultado obtido anteriormente.

Por outro lado, no caso dos tijolos imersos versus não imersos, verificou-se que deve haver distinção entre eles.

Por conseguinte, os tijolos imersos em água não foram considerados na composição dos grupos desta análise.

A Tabela 15: Medidas descritivas das amostras com diferentes umidades. apresenta as medidas de tendência central (média e mediana) e de dispersão (desvio padrão, valor mínimo e máximo) de cada grupo.

Tabela 15: Medidas descritivas das amostras com diferentes umidades.

Umidade	Qtd.	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Mediana (MPa)	Valor min. (MPa)	Valor máx. (MPa)
19.06%	7	1.50	0.36	1.57	1.04	2.04
19.57%	9	1.91	0.60	1.64	1.24	2.89
22.40%	14	2.08	0.26	2.04	1,72	2.48
23.72%	8	2.07	0.44	2.10	1.41	2.87
25.57%	5	1.67	0.55	1.97	0.92	2.15

A análise dos parâmetros de cada grupo e sua comparação visual pode ser feita a partir do diagrama “box plot” na Figura 45e a dispersão dos valores com nível de significância de 0,05 encontram-se na Figura 46.

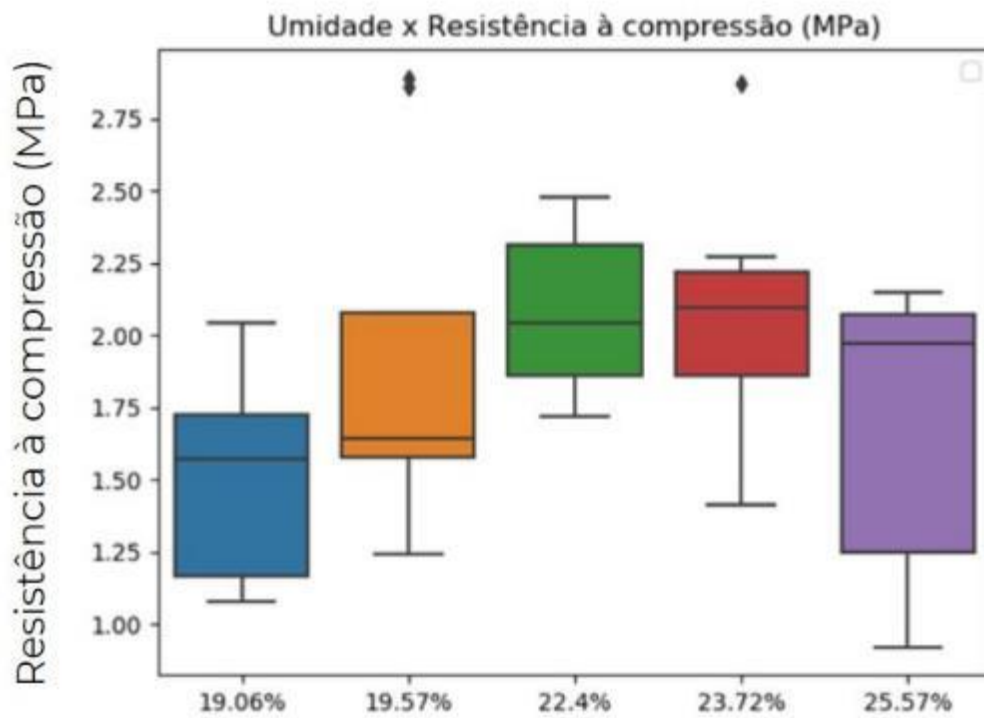


Figura 45: Comparação da resistência à compressão para distintos grupos de umidades

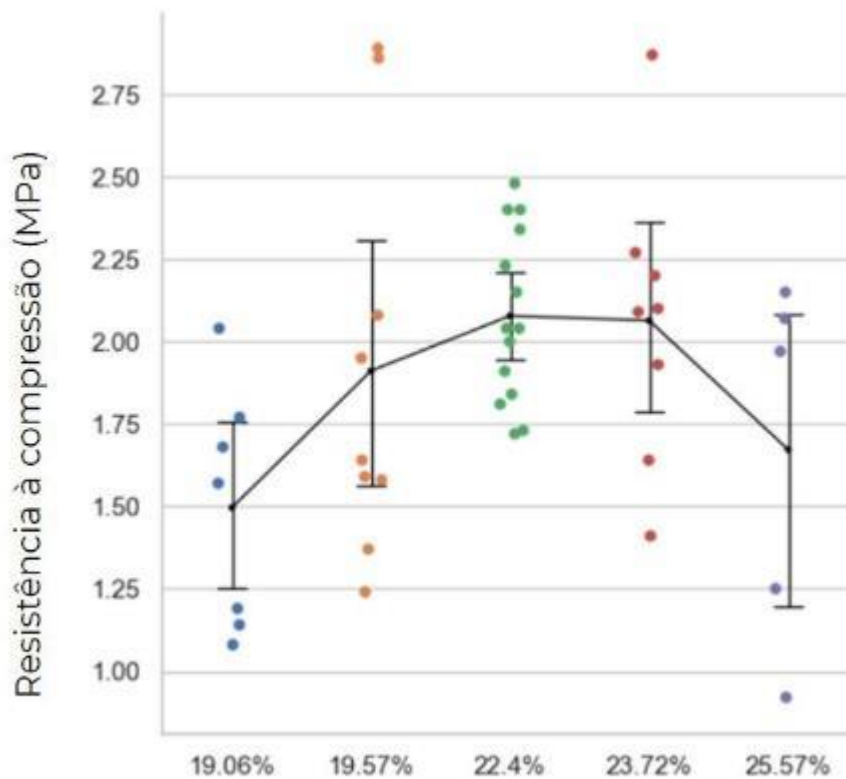


Figura 46: Gráfico de dispersão - Umidade versus Resistência à compressão (MPa)

O teste de Kruskal Wallis foi utilizado para comparar os grupos e analisar se há diferença considerável entre eles.

O p-valor encontrado foi 0.036, sendo assim, a hipótese de as amostras serem iguais foi descartada.

No entanto, esse teste não detecta onde existe diferença. Por isso, foi realizado o Teste de Wilcoxon para comparar cada grupo par a par. Os resultados de p-valor para cada comparação estão resumidos no Quadro 2.

Quadro 2: p-valor para a par pelo Teste de Wilcoxon

	19.06%	19.57%	22.40%	23.72%
19.57%	0.1530	-	-	-
22.40%	0.0028	0.1658	-	-
23.72%	0.0206	0.2685	0.8914	-
25.57%	0.3718	0.7389	0.2114	0.1877

É possível observar um efeito parabólico na resistência à compressão média dos grupos, como pode ser observado na Figura 47, em que foi feita uma regressão polinomial utilizando os pares de pontos umidade e resistência à compressão média (x,y).

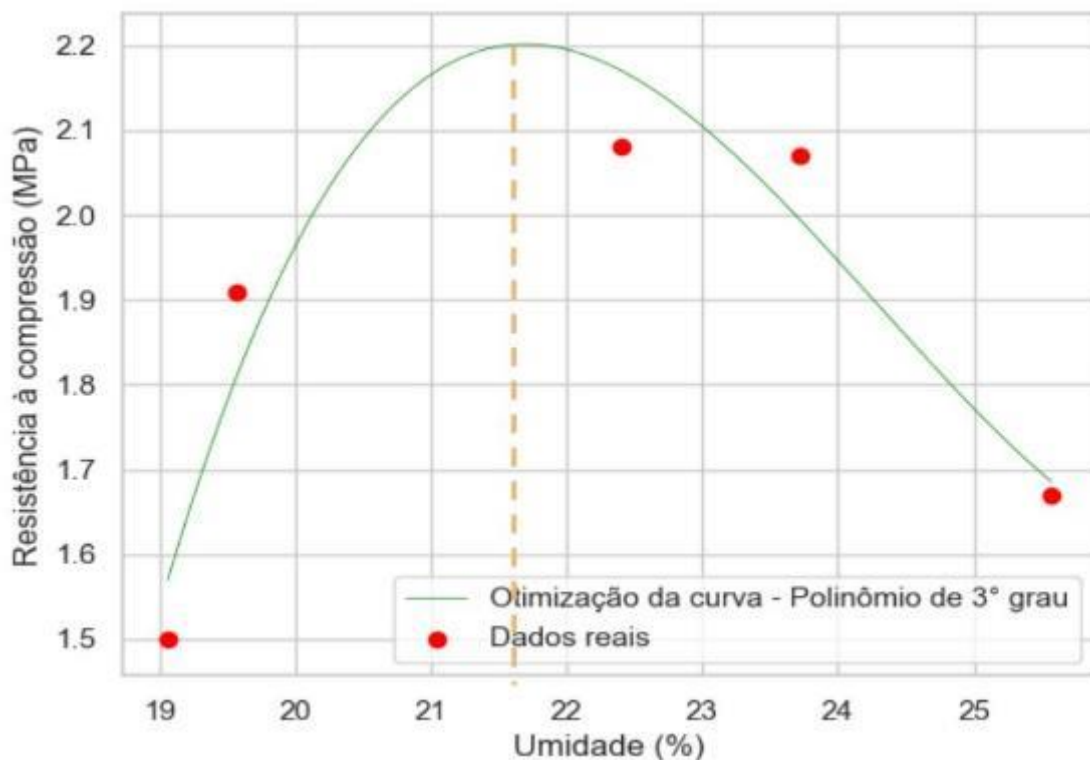


Figura 47: Curva de otimização - Umidade versus Resistência à compressão média (MPa)

É interessante observar que o maior valor de resistência à compressão encontrado no gráfico corresponde ao valor de umidade de aproximadamente 21,69%, ou seja, bem próximo do valor de umidade ótima (21.4%) encontrado anteriormente.

Em relação a Resistência à compressão, a NBR 8491/2012 define que são requisitos básicos:

- I. A média dos valores de resistência à compressão não pode ser inferior a 2,0 MPa.
- II. Nenhum valor de resistência à compressão pode ser inferior a 1,7 MPa.

Ao comparar os tijolos com os requisitos listados acima, o item I é respeitado pelos grupos com umidade 22,4% e 23,72%. No entanto, o grupo de 23,72% não atende aos requisitos do item II, pois, 02 dos seus tijolos não atendem aos requisitos mínimos de 1,7 MPa.

Sendo assim, o único grupo que atende os requisitos da norma é o que possui umidade mais próxima da ótima, com 22,4%.

4.2.3 Dificuldades Associadas a fabricação do tijolo solo-cimento

O processo de fabricação dos tijolos exige certos cuidados para uma execução correta. Alguns procedimentos trazem mais dificuldade para realização, desses, merecem destaque os seguintes pontos:

Durante o processo de preparação e fabricação do solo o destorroador utilizado foi bastante exigido, principalmente nas misturas mais úmidas, ocasionando a desmontagem da pá em alguns momentos (vide Figura 48). Outra questão importante diz respeito ao sentido de rotação do mesmo, pois, em algum momento durante a execução deste trabalho houve inversão nas fases elétricas. Sendo assim, ao ser ligado o destorroador afrouxava a pá em vez de mantê-la fixada.



Figura 48: Peças do destorroador desmontado.

A adição da água na mistura exige cuidado, pois, a adição de água de forma descuidada pode formar torrões de solo e dificultar a homogeneização da mistura. Uma forma encontrada para facilitar esse processo foi a utilização do destorroador para auxiliar nessa equalização.

As misturas muito secas ou muito úmidas exigiam mais força do operador para execução (e.g Figura 49). Nos casos em que a umidade estava mais próxima da ótima por sua vez, a prensagem ocorreu de forma mais fácil.



Figura 49: Prensagem de mistura mais seca.

A retirada do tijolo da forma exige cuidado, pois, caso não seja feita corretamente resulta em material preso na prensa, conforme Figura 50.



Figura 50: Tijolo retirado de forma errada

Nesses casos, aconselha-se colocar o tijolo “defeituoso” no destorroador e agregar novamente a mistura de solo-cimento, para evitar desperdício de material.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

5.1 Principais conclusões

Em termos gerais, conclui-se que as ferramentas estatísticas utilizadas auxiliaram a conclusão de uma série de fatores. Nesse sentido, as principais conclusões acerca desse trabalho encontram-se divididas em tópicos para melhor visualização.

As principais conclusões acerca desse trabalho encontram-se divididas em tópicos para melhor visualização.

5.1.1 Comparação entre os ensaios de compactação tipo Proctor normal com e sem adição de cimento

Com relação aos pontos de massa específica seca máxima e umidade ótima a comparação permite observar que a massa específica seca máxima da mistura sem adição de cimento é maior que a massa específica seca máxima da mistura com adição de cimento. Por outro lado, a umidade ótima dos dois ensaios é muito parecida, conforme observado na literatura.

5.1.2 Ensaio à compressão simples realizado na máquina de ensaio à compressão hidráulica versus máquina de ensaio à compressão elétrica

A utilização da máquina de ensaio à compressão “hidráulica” ou da “elétrica” não apresentou diferenças significativas no resultado. A média da resistência à compressão dos tijolos rompidos na máquina elétrica é cerca de 5% inferior à média dos resultados da hidráulica. Essa pequena diferença pode estar relacionada a presença de 02 tijolos submetidos a imersão prévia em água a mais no grupo “elétrica” em relação ao grupo “hidráulica”.

5.1.3 Efeito da imersão prévia dos tijolos em água na resistência à compressão dos tijolos solo-cimento

A imersão prévia dos tijolos solo-cimento em água, para realização do ensaio à compressão simples, resultou em uma redução média na resistência dos tijolos em cerca de 55%. Esse valor impõe uma penalização muito grande na resistência dos corpos de prova. Assim como SOUSA (2018) aponta, essa diferença traz um questionamento a cerca desse procedimento, pois, é usual que as alvenarias sofram

algum processo de impermeabilização. Ou seja, dificilmente os tijolos serão sujeitos a tal condição na prática.

5.1.4 Efeito da umidade de fabricação na resistência à compressão dos tijolos solo-cimento

Em relação a influência da umidade de fabricação na resistência dos tijolos solo-cimento que não foram imersos em água, os resultados exibiram um comportamento aproximadamente parabólico, com valor de resistência máxima próximo a umidade ótima.

Destes tijolos, o único grupo que atendeu aos requisitos de resistência da NBR 8491/2012 foi o que apresenta umidade inicial de 22,4%.

5.2 Sugestões para o prosseguimento da pesquisa

- Avaliar como o controle de umidade poderia ser incorporado no processo de fabricação de rotinas dos tijolos, de forma factível e prática;
- Modificar a proporção da mistura Solo 1 mais Solo 2 para encontrar o fator ideal da mistura;
- analisar a influência da proporção de cimento no tijolo solo-cimento e tentar encontrar o fator ideal para a mistura;
- construir um mecanismo de prensagem dos tijolos que possibilite a aplicação de força constante e sua medição;
- implementar melhorias na câmara úmida, como sistemas de medição e controle de umidade e temperatura da câmara;
- realizar o ensaio de Proctor Normal considerando a mistura por volume e não por massa, conforme execução prática.
- estudar as propriedades mecânicas de tijolos em condições de cura e armazenamento distintos;
- analisar a influência de diferentes tipos de cimento Portland na resistência dos tijolos solo-cimento.
- avaliar a resistência dos tijolos solo-cimento ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

NBR 10832:2012: Fabricação de Tijolo Maciço e vazado de solo com utilização de prensa manual ou hidráulica.

NBR 10833/2012: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – Procedimento (versão corrigida 04.04.2013)

NBR 11578/1991: Cimento Portland Composto

NBR 12023/2012: Solo-cimento - ensaio de Compactação

NBR 12989/1994: Cimento Portland Branco

NBR 5732/1991: Cimento Portland Comum

NBR 5733/1991: Cimento Portland com alta resistência inicial

NBR 5735/1991: Cimento Portland de alto forno

NBR 5736/1980: Cimento Portland Pozolânico

NBR 6457/2016: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização

NBR 6459/2016: Determinação do Limite de Liquidez.

NBR 6502/1995: Rochas e Solos

NBR 6508/2016: Determinação da massa específica dos grãos de Solos

NBR 7180/2016: Determinação do Limite de Plasticidade.

NBR 7182/2016: Solo – ensaio de compactação

NBR 8491/2012: Tijolo de solo-cimento – Requisitos

NBR 8492/2012: Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio. São Paulo, ABCP, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Evolução das pesquisas de laboratório sobre solo-cimento. São Paulo, ABCP, 1960.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais: prática recomendada. São Paulo, ABCP, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do cimento Portland. Boletim Técnico – BT 106. São Paulo, ABCP, 2002, 27p.

BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto, e restauração. Oficina de Textos, 2015. ISBN 8579751039.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. Uma breve história do cimento Portland. São Paulo: Associação Brasileira de, 2009.

COSTA, Bruno Barzellay Ferreira da. Tecnologia do concreto: Notas de Aula. 01 aug. 2015, 12 dec. 2015. 246 p. Notas de Aula.

CRAIG, Robert F. Soil mechanics. Springer, 1983.

DETHIER, J..(1993) Arquiteturas de terra ou o futuro de uma tradição milenar. . Europa Terceiro Mundo. Estados Unidos.10ed Lisboa: Litografia Tejo.

DOMINGOS, Nadion Florindo; JUNIOR, Valtair Fernandes. O DÉFICIT HABITACIONAL NO BRASIL FRENTE ÀS POLÍTICAS PÚBLICAS DE HABITAÇÃO. Anais do Seminário Científico da FACIG, n. 2, 2017.

EMBRAPA (2013). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3ª edição. Brasília-DF.

GOOGLE. Google Earth V 7.3.2.5495. 2019. Macaé-RJ. Disponível em: <<http://www.earth.google.com>>. Acesso em: (janeiro, 2019)

GRANDE, Fernando Mazzeo. Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GUIMARÃES, Gustavo Vaz de Mello. Aula 6 de Mecânica dos Solos. 2016. 54 slides.

LIMA, D. A. S. M. F. Avaliação do tijolo modular de solo-cimento fabricado em prensa manual como material para construção de baixo custo com mão de obra comunitária. 2018. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

LLORENTE, Gonzalo Guillán. Contribución al conocimiento de los primeros geotécnicos del siglo XX. 2015. Tese de Doutorado. Universidad Politécnica de Madrid.

MARCONDES, M. G. Contribuição ao Estudo do Método Físico-Químico de Dosagem do Solo-Cimento. 1992. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

MASTABA. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2019. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Mastaba&oldid=51386983>>. Acesso em: 28 jan. 2019.

PEREIRA, Dayane Baloni; PEZZUTO, Claudia Cotrim. Estudo do solo-cimento para a fabricação de tijolos ecológicos. Encontro de iniciação científica, v. 15, 2010.

PINHO, Marcelo & Faria, Lourenço. (2012). Economia de Baixo Carbono: Indústria do Cimento. 10.13140/RG.2.2.22729.13929.

PINTO, Carlos de Souza. Curso básico de mecânica dos solos. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

PINTO, Lucas Mazzoleni. Estudo de Tijolo solo-cimento com adição de resíduo de construção civil. Santa Maria: UFSM-RS, 2015.

SANTIAGO, Cybèle Celestino. O solo como material de construção. 2001.

SCOTT, Charles Robin. Soil mechanics and foundations. Applied Science, 1984.

SENÇO, Wlastermiler de. Manual técnico de pavimentação: volume 1. 2007.

SOUSA, Julião Ferreira de. Estudo de tijolos de solo-cimento com e sem adição de pó de pedra . 2018. 65 p. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil)- Universidade federal do Rio de Janeiro, Macaé, 2018.

SOUZA, M. I.; SEGANTINI, A. A.; PEREIRA, J. A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, p. 205-212, 2008. ISSN 1415-4366.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. (1961). Mecânica dos solos na prática da engenharia. Rio de Janeiro, Sedegra.

XIBAM. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2019. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Xibam&oldid=54223334>>. Acesso em: 28 jan. 2019.

APÊNDICE 1: ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

1 Ensaio de compactação sem cimento

Cilindro	Cápsula n°	Tara (g)	Tara+Solo+Água (g)	Tara+Solo (g)	Água (g)	Solo (g)	Umidade (%)	Umidade média (%)
2	DH	5.829	16.793	15.089	1.704	9.260	18.40%	18.52%
	BC	6.081	17.052	15.331	1.721	9.250	18.61%	
	DE	5.830	17.452	15.633	1.819	9.803	18.56%	
2	CC	6.211	16.474	14.788	1.686	8.577	19.66%	19.57%
	K3	5.956	14.512	13.114	1.398	7.158	19.53%	
	BB	6.272	12.935	11.846	1.089	5.574	19.54%	
2	BI	5.686	22.381	19.455	2.926	13.769	21.25%	21.23%
	BP	6.306	18.706	16.549	2.157	10.243	21.06%	
	BG	6.071	18.947	16.678	2.269	10.607	21.39%	
2	BO	6.081	21.94	18.823	3.117	12.742	24.46%	24.37%
	DI	5.698	16.435	14.316	2.119	8.618	24.59%	
	BL	5.663	22.344	19.109	3.235	13.446	24.06%	
2	DA	5.886	33.219	27.294	5.925	21.408	27.68%	27.38%
	DF	5.925	24.517	20.547	3.97	14.622	27.15%	
	BM	6.037	24.924	20.873	4.051	14.836	27.31%	
2	K1	7.278	18.938	16.474	2.464	9.196	26.79%	15.76%
	J1	6.088	18.786	17.062	1.724	10.974	15.71%	
	J3	5.966	22.605	20.333	2.272	14.367	15.81%	

Cilindro n°	2	2	2	2	2	2
Massa do Cilindro (g)	4687.8	4687.8	4687.5	4689.0	4689.9	4687.2
Diâmetro do Cilindro (cm)	10	10	10	10	10	10
Altura do Cilindro (cm)	12.73	12.73	12.73	12.73	12.73	12.73
Volume do Cilindro (cm³)	999.81	999.81	999.81	999.81	999.81	999.81
Massa do Cilindro + Solo + Água (g)	6630.8	6672.5	6717.0	6663.0	6612.8	6508.3
Massa do Solo + Água (g)	1943.0	1984.7	2029.5	1974.0	1922.9	1821.1
Massa Específica Natural (g/cm³)	1.943	1.985	2.030	1.974	1.923	1.821
Massa Específica Seca (g/cm³)	1.640	1.660	1.67	1.587	1.510	1.573
Umidade	18.52%	19.57%	21.23%	24.37%	27.38%	15.76%

umidade	Massa específica seca
15.76%	1.573
18.52%	1.640
19.57%	1.660
21.23%	1.67
24.37%	1.587
27.38%	1.510

2 Ensaio de compactação com cimento

Cilindro	Cápsula n°	Tara (g)	Tara+Solo+Água (g)	Tara+Solo (g)	Água (g)	Solo (g)	Umidade (%)	Umidade média (%)
2	BA	5.577	18.452	16.745	1.707	11.168	15.28%	15.44%
	BH	6.456	19.573	17.819	1.754	11.363	15.44%	
	BM	6.038	24.089	21.653	2.436	15.615	15.60%	
2	BE	6.184	17.689	16.079	1.610	9.895	16.27%	16.61%
	BD	5.533	14.392	13.132	1.260	7.599	16.58%	
	BC	6.081	19.689	17.713	1.976	11.632	16.99%	
2	K3	5.956	15.358	13.86	1.498	7.904	18.95%	18.71%
	DF	5.926	15.227	13.768	1.459	7.842	18.60%	
	CA	5.514	12.842	11.694	1.148	6.180	18.58%	
2	BP	6.305	15.816	14.101	1.715	7.796	22.00%	22.41%
	CC	6.213	17.024	15.019	2.005	8.806	22.77%	
	BO	6.076	15.392	13.683	1.709	7.607	22.47%	
2	DA	5.893	15.374	13.494	1.880	7.601	24.73%	24.81%
	DC	6.195	16.881	14.756	2.125	8.561	24.82%	
	DE	5.831	17.156	14.901	2.255	9.070	24.86%	
2	BB	6.301	23.713	19.851	3.862	13.550	28.50%	29.03%
	BG	6.092	19.636	16.602	3.034	10.510	28.87%	
	BL	5.685	23.812	19.716	4.096	14.031	29.19%	
2	C2	4.584	12.25	10.806	1.444	6.222	23.21%	23.13%
	D2	4.587	10.673	9.525	1.148	4.938	23.25%	
	D3	4.731	12.882	11.357	1.525	6.626	23.02%	

Massa específica - Ensaio de Compactação							
Cilindro n°	2	2	2	2	2	2	2

Peso do Cilindro (g)	4921.7	4922.0	4922.0	4921.9	4922.0	4922.0	4923.0
Diâmetro do Cilindro (cm)	10	10	10	10	10	10	10
Altura do Cilindro (cm)	12.73	12.73	12.73	12.73	12.73	12.73	12.73
Volume do Cilindro (cm ³)	999.81	999.81	999.81	999.81	999.81	999.81	999.81
Peso do Cilindro + Solo + Água (g)	6772.8	6814.6	6851.8	6921.2	6892.9	6808.2	6914.9
Peso do Solo + Água (g)	1851.1	1892.6	1929.8	1999.3	1970.9	1886.2	1991.9
Peso Especifico Natural (g/cm ³)	1.851	1.893	1.930	2.000	1.971	1.887	1.992
Peso Especifico Seco (g/cm ³)	1.604	1.623	1.626	1.634	1.579	1.462	1.618

umidade Massa específica seca

15.76%	1.573
18.52%	1.640
19.57%	1.660
21.23%	1.67
24.37%	1.587
27.38%	1.510

APÊNDICE 2: UMIDADE DOS SOLOS UTILIZADOS

Solo Armazenado

Data	Solo	Cápsula n°	Tara (g)	Tara+Solo+Água (g)	Tara+Solo (g)	Água (g)	Solo (g)	Umidade (%)	Umidade média (%)
18/12	1	AM	12.730	88.506	76.868	11.638	64.138	18.15%	18.03%
		AE	12.298	61.746	54.169	7.577	41.871	18.10%	
		\$X	13.071	69.347	60.827	8.520	47.756	17.84%	
	2	AP	12.725	84.815	73.992	10.823	61.267	17.67%	17.54%
		AA	12.668	68.632	60.334	8.298	47.666	17.41%	
		AB	13.016	85.897	75.011	10.886	61.995	17.56%	
8/1	1	AM	12.742	53.324	45.748	7.576	33.006	22.95%	22.73%
		AE	12.306	54.766	46.950	7.816	34.644	22.56%	
		\$X	13.083	58.230	49.884	8.346	36.801	22.68%	
	2	AP	12.734	59.085	50.437	8.648	37.703	22.94%	22.89%
		AA	12.673	36.734	32.272	4.462	19.599	22.77%	
		AB	13.043	61.527	52.468	9.059	39.425	22.98%	

Data	Cápsula nº	Tara (g)	Tara+Solo+Água (g)	Tara+Solo (g)	Água (g)	Solo (g)	Umidade (%)	Umidade média (%)
18/12/2018	AA	12.675	101.050	84.858	16.192	72.183	22.43%	
	AE	12.336	77.412	65.446	11.966	53.110	22.53%	22.40%
	AM	12.734	93.879	79.120	14.759	66.386	22.23%	
19/12/2018	AA	12.669	82.687	71.429	11.258	58.760	19.16%	
	AE	12.313	95.698	82.548	13.150	70.235	18.72%	19.06%
	AM	12.759	97.243	83.574	13.669	70.815	19.30%	
27/12/2018	AA	12.674	71.127	61.529	9.598	48.855	19.65%	
	AE	12.310	61.758	53.74	8.018	41.430	19.35%	19.57%
	AM	12.751	52.022	45.559	6.463	32.808	19.70%	
28/12/2018	AA	12.672	47.545	40.862	6.683	28.190	23.71%	
	AE	12.310	48.699	41.75	6.949	29.440	23.60%	23.72%
	AM	12.744	75.483	63.403	12.080	50.659	23.85%	
28/12/2018	AP	12.738	51.082	43.296	7.786	30.558	25.48%	
	\$X	13.124	86.427	71.443	14.984	58.319	25.69%	25.57%
	AB	13.021	89.764	74.15	15.614	61.129	25.54%	

APÊNDICE 3: DADOS GERAIS DOS TIJOLOS PRODUZIDOS.

Numeração	Data de Fabricação	Data de ruptura	Tipo de Prensa	Imerso em água 18h	Peso (g)	Umidade Inicial (%)	Carga de Ruptura (tonf)	Área (cm ²)	Tensão de ruptura (Mpa)
1	18/12	17/01	Elétrica	Não	2223.6	22.4	2.25	122.32	1.84
2	18/12	17/01	Elétrica	Não	2228.2	22.4	2.94	122.32	2.40
5	18/12	17/01	Elétrica	Não	2235.9	22.4	2.21	122.32	1.81
8	18/12	17/01	Elétrica	Não	2334.6	22.4	2.45	122.32	2.00
10	18/12	17/01	Elétrica	Não	2359.5	22.4	2.34	122.32	1.91
14	18/12	17/01	Elétrica	Não	2329.5	22.4	3.03	122.32	2.48
23	18/12	17/01	Elétrica	Não	2376.7	22.4	2.63	122.32	2.15
24	18/12	17/01	Elétrica	Não	2348.3	22.4	2.73	122.32	2.23
8	19/12	17/01	Elétrica	Não	2279.0	19.06	2.17	122.32	1.77
9	19/12	17/01	Elétrica	Não	2235.0	19.06	1.46	122.32	1.19
13	19/12	17/01	Elétrica	Não	2562.0	19.06	1.32	122.32	1.08
1	27/12	25/01	Elétrica	Não	2315.4	19.57	1.67	122.32	1.37
2	27/12	25/01	Elétrica	Não	2406.7	19.57	1.93	122.32	1.58
3	27/12	25/01	Elétrica	Não	2259.2	19.57	1.52	122.32	1.24
4	27/12	25/01	Elétrica	Não	2377.6	19.57	2.387	122.32	1.95
5	27/12	25/01	Elétrica	Não	2328.3	19.57	2.54	122.32	2.08
6	27/12	25/01	Elétrica	Não	2294.5	19.57	2.01	122.32	1.64
7	27/12	25/01	Elétrica	Não	2218.2	19.57	1.95	122.32	1.59
8	27/12	25/01	Elétrica	Não	2455.7	19.57	3.54	122.32	2.89
9	27/12	25/01	Elétrica	Não	2404.4	19.57	3.5	122.32	2.86
10	28/12	25/01	Elétrica	Não	2293.3	23.72	2.78	122.32	2.27
11	28/12	25/01	Elétrica	Não	2173.6	23.72	2.69	122.32	2.20
12	28/12	25/01	Elétrica	Não	2297.2	23.72	2.56	122.32	2.09
13	28/12	25/01	Elétrica	Não	2134.9	23.72	1.73	122.32	1.41
14	28/12	25/01	Elétrica	Não	2276.2	23.72	2.01	122.32	1.64
15	28/12	25/01	Elétrica	Não	2173.5	23.72	2.36	122.32	1.93
16	28/12	25/01	Elétrica	Não	2241.6	23.72	3.51	122.32	2.87
17	28/12	25/01	Elétrica	Não	2174.1	23.72	2.57	122.32	2.10
18	28/12	25/01	Elétrica	Não	2274.3	25.57	2.63	122.32	2.15
19	28/12	25/01	Elétrica	Não	2262.2	25.57	2.41	122.32	1.97
20	28/12	25/01	Elétrica	Não	2306.8	25.57	2.53	122.32	2.07
21	28/12	25/01	Elétrica	Não	2343.0	25.57	1.13	122.32	0.92

22	28/12	25/01	Elétrica	Não	2268.3	25.57	1.53	122.32	1.25
4	18/12	17/01	Elétrica	Sim	2296.3	22.4	1.46	122.32	1.19
9	18/12	17/01	Elétrica	Sim	2286.8	22.4	1.53	122.32	1.25
13	18/12	17/01	Elétrica	Sim	2265.4	22.4	1.25	122.32	1.02
15	18/12	17/01	Elétrica	Sim	2299.0	22.4	1.72	122.32	1.41
1	19/12	17/01	Elétrica	Sim	2356.5	19.06	1.18	122.32	0.96
4	19/12	17/01	Elétrica	Sim	2281.5	19.06	1.18	122.32	0.96
5	19/12	17/01	Elétrica	Sim	2325.0	19.06	1.26	122.32	1.03
7	19/12	17/01	Elétrica	Sim	2192.0	19.06	0.62	122.32	0.51
11	19/12	17/01	Elétrica	Sim	2348.5	19.06	1.01	122.32	0.83
17	19/12	17/01	Elétrica	Sim	2261.0	19.06	0.67	122.32	0.55
18	19/12	17/01	Elétrica	Sim	2230.5	19.06	1.02	122.32	0.83
3	18/12	17/01	Hidráulica	Não	2380.8	22.4	2.94	122.32	2.40
7	18/12	17/01	Hidráulica	Não	2447.0	22.4	2.86	122.32	2.34
11	18/12	17/01	Hidráulica	Não	2274.6	22.4	2.50	122.32	2.04
12	18/12	17/01	Hidráulica	Não	2299.7	22.4	2.10	122.32	1.72
16	18/12	17/01	Hidráulica	Não	2320.9	22.4	2.50	122.32	2.04
20	18/12	17/01	Hidráulica	Não	2240.6	22.4	2.12	122.32	1.73
3	19/12	17/01	Hidráulica	Não	2278.5	19.06	1.92	122.32	1.57
12	19/12	17/01	Hidráulica	Não	2357.5	19.06	2.49	122.32	2.04
14	19/12	17/01	Hidráulica	Não	2491.5	19.06	2.05	122.32	1.68
15	19/12	17/01	Hidráulica	Não	2427.5	19.06	1.40	122.32	1.14
6	18/12	17/01	Hidráulica	Sim	2290.0	22.4	1.15	122.32	0.94
17	18/12	17/01	Hidráulica	Sim	2404.0	22.4	1.53	122.32	1.25
18	18/12	17/01	Hidráulica	Sim	2334.6	22.4	2.4	122.32	1.96
19	18/12	17/01	Hidráulica	Sim	2206.1	22.4	0.82	122.32	0.67
21	18/12	17/01	Hidráulica	Sim	2270.8	22.4	1.93	122.32	1.58
22	18/12	17/01	Hidráulica	Sim	2307.8	22.4	1.53	122.32	1.25
2	19/12	17/01	Hidráulica	Sim	2335.0	19.06	0.77	122.32	0.63
6	19/12	17/01	Hidráulica	Sim	2455.0	19.06	1.32	122.32	1.08
10	19/12	17/01	Hidráulica	Sim	2294.5	19.06	1.35	122.32	1.10
16	19/12	17/01	Hidráulica	Sim	2294.0	19.06	1.15	122.32	0.94

APÊNDICE 4: PROGRAMAS GERADOS EM PYTHON

1 Regressão polinomial

```
# Polynomial Regression
```

```
# Importing the libraries
```

```
import numpy as np
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
import pandas as pd
```

```
# Importing the dataset
```

```
dataset = pd.read_csv('PS1S2.CSV')
```

```
w_1 = dataset.iloc[:,0:1].values
```

```
pes_1 = dataset.iloc[:, 1].values
```

```
dataset = pd.read_csv('PS1S2C.CSV')
```

```
w_2 = dataset.iloc[:,0:1].values
```

```
pes_2 = dataset.iloc[:, 1].values
```

```
# Fitting Linear Regression to the dataset
```

```
from sklearn.linear_model import LinearRegression
```

```
lin_reg_1 = LinearRegression()
```

```
lin_reg_1.fit(w_1, pes_1)
```

```
from sklearn.linear_model import LinearRegression
```

```
lin_reg_2 = LinearRegression()
```

```
lin_reg_2.fit(w_2, pes_2)
```

```
#Fitting Polynomial Regression to the dataset
```

```
from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures
```

```

poly_reg_1 = PolynomialFeatures(degree = 6)
X_poly_1 = poly_reg_1.fit_transform(w_1)
lin_reg_3 = LinearRegression()
lin_reg_3.fit(X_poly_1, pes_1)

poly_reg_2 = PolynomialFeatures(degree = 4 )
X_poly_2 = poly_reg_2.fit_transform(w_2)
lin_reg_4 = LinearRegression()
lin_reg_4.fit(X_poly_2, pes_2)

# Visualising the Polynomial Regression results
X_grid_1 = np.arange(min(w_1), max(w_1) , 0.01)
X_grid_1 = X_grid_1.reshape((len(X_grid_1), 1))
plt.scatter(w_1, pes_1, color ='red',label ='Real: Solo 1 + Solo 2 + cimento')
plt.plot(X_grid_1,lin_reg_3.predict(poly_reg_1.fit_transform(X_grid_1)), color ='green'
, label = 'Previsão :Solo 1 + Solo 2')

X_grid_2 = np.arange(min(w_2), max(w_2) , 0.1)
X_grid_2 = X_grid_2.reshape((len(X_grid_2), 1))
plt.scatter(w_2, pes_2, color ='yellow', label = 'Real: Solo 1 + Solo 2 + cimento')
plt.plot(X_grid_2,lin_reg_4.predict(poly_reg_2.fit_transform(X_grid_2)), color ='blue'
,label = 'Previsão: Solo 1 + Solo 2 + cimento')

plt.xlabel('Umidade (%)')
plt.ylabel('Massa específica seca (g/cm³)')
plt.legend()
plt.show()

# Valor Máximo Regressão Polinomial

```

```

a = 15; b = 15
while a<25:
    if(lin_reg_3.predict(poly_reg_1.fit_transform([[a]]))
       >lin_reg_3.predict(poly_reg_1.fit_transform([[b]]))):
        b = a
        a += 0.01
print (b,lin_reg_3.predict(poly_reg_1.fit_transform([[b]])))

```

```

a = 15; b = 15
while a<25:
    if(lin_reg_4.predict(poly_reg_2.fit_transform([[a]]))
       >lin_reg_4.predict(poly_reg_2.fit_transform([[b]]))):
        b = a
        a += 0.01
print (b,lin_reg_4.predict(poly_reg_2.fit_transform([[b]])))

```

2 Análise estatística

```

import seaborn as sns
import pandas as pd
import numpy as np

```

```

grupos = pd.read_csv("grupos.csv")

```

```

#Gera o Boxplot com os dados importados
sns.boxplot( data=grupos)

```

```

sns.set(style="whitegrid",rc={"lines.linewidth": 0.5})
sns.catplot(data=grupos)

```

```
sns.pointplot(data=grupos,ci=95,capsize= .2, color="black")
```

```
# kruskal test
```

```
from scipy.stats import stats
```

```
Col_1 = grupos['19.06 %']
```

```
Col_2 = grupos['19.57%']
```

```
Col_3 = grupos['22.4 %']
```

```
Col_4 = grupos['23.72%']
```

```
Col_5 = grupos['25.57%']
```

```
""" remove os valores nulos dos dados """
```

```
Col_1 = Col_1[~np.isnan(Col_1)]
```

```
Col_2 = Col_2[~np.isnan(Col_2)]
```

```
Col_3 = Col_3[~np.isnan(Col_3)]
```

```
Col_4 = Col_4[~np.isnan(Col_4)]
```

```
Col_5 = Col_5[~np.isnan(Col_5)]
```

```
stats.kruskal(Col_1,Col_2,Col_3,Col_4,Col_5)
```

```
H, pval = stats.kruskal(Col_1,Col_2,Col_3,Col_4,Col_5)
```

```
print("H-statistic:", H)
```

```
print("P-Value:", pval)
```

```
if pval < 0.05:
```

```
    print("Reject NULL hypothesis - Significant differences exist between groups.")
```

```
if pval > 0.05:
```

```
    print("Accept NULL hypothesis - No significant difference between groups.")
```

stats.ranksums(Col_1,Col_2)

stats.ranksums(Col_1,Col_3)

stats.ranksums(Col_1,Col_4)

stats.ranksums(Col_1,Col_5)

stats.ranksums(Col_2,Col_3)

stats.ranksums(Col_2,Col_4)

stats.ranksums(Col_2,Col_5)

stats.ranksums(Col_3,Col_4)

stats.ranksums(Col_3,Col_5)

stats.ranksums(Col_4,Col_5)

APÊNDICE 5: FOTOS BOAS DEMAIS PARA NÃO SEREM INCLUÍDAS EM UM TRABALHO EXPERIMENTAL



Figura 51: Ensaio Proctor Normal com 24,37% de umidade



Figura 52: Mistura Solo 1 mais Solo 2 com 27,38% de umidade



Figura 53: Tijolo rompido na máquina de ensaio à compressão "elétrica".



Figura 54: Tijolo rompido na máquina de ensaio à compressão "hidráulica"



Figura 55: numeração dos tijolos, para auxiliar na identificação



Figura 56: Solos com diferentes pontos de umidade