

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E DA ABSORÇÃO DE  
ÁGUA EM TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO SUBSTITUÍDOS  
PARCIALMENTE POR CAL HIDRATADA

**BRUNO SANCHES DA SILVA**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

FEVEREIRO/2022



ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E DA ABSORÇÃO DE  
ÁGUA EM TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO SUBSTITUÍDOS  
PARCIALMENTE POR CAL HIDRATADA

**BRUNO SANCHES DA SILVA**

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.”

Orientador: Prof, D.Sc. Jonas Alexandre

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

FEVEREIRO/2022

**FICHA CATALOGRÁFICA**

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

S586

Silva, Bruno Sanches da.

Análise da resistência à compressão e da absorção de água em tijolos de solo-cimento substituídos parcialmente por cal hidratada / Bruno Sanches da Silva. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2022.

123 f. : il.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2022.

Orientador: Jonas Alexandre.

1. Tijolo de solo-cimento. 2. Cal hidratada. 3. Tijolo de encaixe. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E DA ABSORÇÃO DE  
ÁGUA EM TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO SUBSTITUÍDOS  
PARCIALMENTE POR CAL HIDRATADA

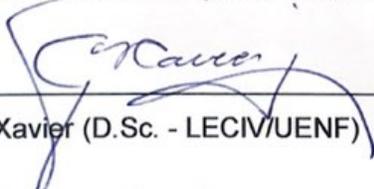
**BRUNO SANCHES DA SILVA**

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.”

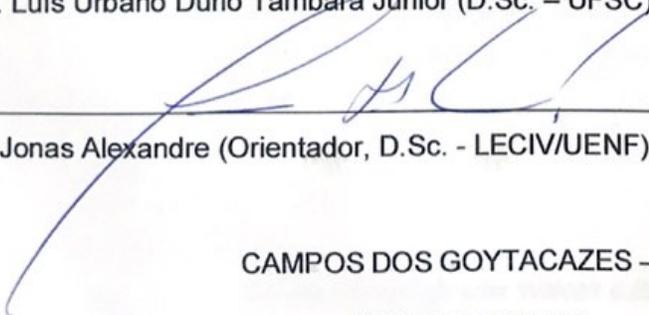
Aprovada em 23 de fevereiro de 2022.

Comissão Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof, Afonso Rangel Garcez de Azevedo (D.Sc. - LECIV/UENF)

  
\_\_\_\_\_  
Prof, Gustavo de Castro Xavier (D.Sc. - LECIV/UENF)

  
\_\_\_\_\_  
Pesq. Luís Urbano Durlo Tambara Júnior (D.Sc. – UFSC)

  
\_\_\_\_\_  
Prof, Jonas Alexandre (Orientador, D.Sc. - LECIV/UENF)

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

FEVEREIRO/2022

## DEDICATÓRIA

*A Deus, aos meus pais Walceir e Brígida e minha esposa Larissa,  
com todo meu amor e dedicação!*

## AGRADECIMENTOS

*“Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos.”*

Provérbios 16.3

Desde a graduação entreguei a Deus meu sonho de realizar o Mestrado, e ao olhar para trás percebo os cuidados dEle com minha vida durante todo o percurso da minha formação. Sou grato a Deus por me proporcionar esses momentos, me direcionando e fortalecendo para conseguir mais essa conquista. No dia em que realizei a prova para o mestrado no PPGEC da UENF, senti no meu coração a paz de estar vivendo a vontade de Deus para minha vida! Expresso aqui, minha gratidão a todos que fizeram parte, de alguma forma, desses momentos comigo. Sou grato:

Aos meus pais Walceir e Brígida, por sempre acreditarem em meu potencial, sendo meus grandes apoiadores.

À minha esposa Larissa, por todo o incentivo, paciência e ajuda, tendo vivido esse sonho junto comigo.

À minha irmã Walquíria e meu cunhado Rafael, por sempre estarem dispostos a me ouvirem, aconselhando e torcendo por mim.

Aos meus sogros Adilton e Neuza, e meus cunhados Pâmela, João Gabriel, Jéssika e Evaldo pelo incentivo.

Aos meus amigos Natália e Fabrício, pela contribuição e por compartilharem a rotina da pesquisa.

À UENF, em especial ao PPGEC, e a todos que trabalham em prol do programa, a qual demonstro meu enorme carinho, pela oportunidade de cursar o mestrado.

Ao meu orientador, D.Sc. Jonas Alexandre, pela confiança, paciência, orientação e conhecimentos transmitidos.

Ao professor D.Sc. Alexandre pela contribuição na pesquisa.

Ao técnico do laboratório Gelcimar, pela ajuda na execução da parte experimental e pelo suporte.

Aos técnicos dos laboratórios Milton e Vanúzia, pelo apoio e auxílio na execução dos ensaios.

À empresa Arte Cerâmica Sardinha, pela parceria, disponibilidade do ambiente físico e pelos materiais doados.

A todos vocês, o meu muito obrigado!

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos .....	1
1.2	Justificativa.....	2
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
2.1	A construção civil no Brasil.....	4
2.2	Solo.....	7
2.2.1	Propriedades dos solos.....	8
2.2.2	Composição do solo.....	10
2.3	Índice de vazios mínimos - Fator de empacotamento de partículas.....	11
2.3.1	Modelos matemáticos de empacotamento de partículas.....	12
2.3.2	Elkem Material Mix Analyzer - EMMA .....	13
2.4	Estabilização dos solos .....	13
2.4.1	Cimento Portland .....	14
2.4.2	Cal .....	15
2.5	Tijolo de solo-cimento.....	17
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
3.1	Materiais.....	22
3.2	Métodos.....	23
3.2.1	Preparação e caracterização física e química do solo.....	23
3.2.2	Definição do percentual de areia (10%, 20%, 30%, 40% ou 50%) em substituição parcial do solo cedido para a pesquisa. ....	27
3.2.3	Definição da composição das misturas da pesquisa .....	29
3.2.4	Determinar o tipo de cura utilizada na pesquisa .....	29
3.2.5	Preparação da mistura nos traços determinados, moldagem e cura dos tijolos em câmara úmida. ....	33
3.2.6	Determinar a força de prensagem para a produção dos tijolos.....	36
3.2.7	Análise das propriedades tecnológicas dos tijolos.....	36
3.2.8	Análise estatística dos resultados experimentais .....	39

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>41</b>
4.1	Caracterização física e química do solo cedido .....	41
4.1.1	Análise granulométrica.....	41
4.1.2	Limites de consistência – limites de Atterberg.....	42
4.1.3	Ensaio de compactação Proctor normal.....	42
4.1.4	Caracterização química.....	43
4.2	Definição do percentual de areia .....	44
4.2.1	Método de empacotamento de partículas.....	44
4.2.2	Verificação da moldagem dos tijolos .....	52
4.3	Características da moldagem dos tijolos.....	53
4.4	Determinar o tipo de cura utilizada na pesquisa .....	53
4.4.1	Análise dimensional dos CPs produzidos.....	53
4.4.2	Ensaio de absorção de água dos CPs produzidos .....	54
4.4.3	Ensaio de resistência à compressão dos CPs produzidos .....	55
4.5	Determinação da força de prensagem para produção dos tijolos.....	57
4.6	Análise das propriedades tecnológicas dos tijolos .....	57
4.6.1	Análise dimensional dos tijolos.....	58
4.6.2	Ensaio de absorção de água.....	59
4.6.3	Ensaio de resistência à compressão .....	64
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>71</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>73</b>
	<b>ANEXOS – ANOVA E TESTE DE TUKEY .....</b>	<b>78</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Resíduos da construção civil, em (a) resíduo proveniente de rocha e em (b) resíduo cerâmico .....	5
Figura 2-2 - Percentual relativo do déficit habitacional decorrente das unidades da Federação – Brasil dos anos de 2016 a 2019.....	6
Figura 2-3 - Ciclo natural da construção com terra e classificação pedológica dos solos.....	8
Figura 2-4 - Limites de Atterberg dos solos.....	9
Figura 2-5 - Tijolo de solo-cimento com as mesmas dimensões que serão produzidas na pesquisa .....	17
Figura 3-1 - Fluxograma dos procedimentos experimentais para preparação e caracterização física e química do solo .....	24
Figura 3-2 - Execução do ensaio de compactação Proctor normal .....	26
Figura 3-3 - Equipamento Shimadzu EDX-700 do LECIV/UENF.....	26
Figura 3-4 - Fluxograma dos procedimentos experimentais para determinação do tipo de cura utilizada na pesquisa .....	30
Figura 3-5 - Procedimentos e equipamentos utilizados para mistura e moldagem os CPs ..	31
Figura 3-6 - Tipos de cura analisados: sem cura (referência), lâmina-d'água e aspersão....	32
Figura 3-7 - Procedimentos e equipamentos utilizados para avaliação e análise dos CPs ..	33
Figura 3-8 - Fluxograma para realização da 5ª, 6ª e 7ª etapa da metodologia.....	33
Figura 3-9 - Prensa hidráulica utilizada na pesquisa para fabricação de tijolos de solo-cimento.....	35
Figura 3-10 - Manômetro da prensa hidráulica.....	36
Figura 3-11 - Procedimentos do ensaio de resistência à compressão .....	38
Figura 3-12 - Procedimentos do ensaio de absorção de água .....	39
Figura 4-1 - Análise granulométrica do solo A .....	41
Figura 4-2 - Limites de Atterberg .....	42
Figura 4-3 - Ensaio de compactação Proctor normal .....	43
Figura 4-4 - Análise granulométrica areia proveniente do Rio Paraíba do Sul.....	45
Figura 4-5 - Formulações do Traço 1 (90:10) com $q = 0,1$ , $q = 0,2$ , $q = 0,3$ e $q = 0,4$ .....	46
Figura 4-6 - Formulações do Traço 2 (80:20) com $q = 0,1$ , $q = 0,2$ , $q = 0,3$ e $q = 0,4$ .....	47
Figura 4-7 - Formulações do Traço 3 (70:30) com $q = 0,1$ , $q = 0,2$ , $q = 0,3$ e $q = 0,4$ .....	48
Figura 4-8 - Formulações do Traço 4 (60:40) com $q = 0,1$ , $q = 0,2$ , $q = 0,3$ e $q = 0,4$ .....	49
Figura 4-9 - Formulações do Traço 5 (50:50) com $q = 0,1$ , $q = 0,2$ , $q = 0,3$ e $q = 0,4$ .....	50
Figura 4-10 - Formulações do Traço 1, Traço 2, Traço 3, Traço 4 e Traço 5 com melhor respectivo coeficiente de distribuição ( $q$ ) .....	51
Figura 4-11 - Resultados do ensaio de absorção de água em CPs cilíndricos.....	55

Figura 4-12 - Resultados do ensaio de resistência à compressão em CPs cilíndricos .....	56
Figura 4-13 - Resultados do ensaio de absorção de água nos tijolos do grupo 1.....	60
Figura 4-14 - Resultados do ensaio de absorção de água nos tijolos do grupo 2.....	62
Figura 4-15 - Resultados do ensaio de absorção de água nos tijolos do grupo 3.....	63
Figura 4-16 - Resultados do ensaio de resistência à compressão nos tijolos do grupo 1 .....	66
Figura 4-17 - Resultados do ensaio de resistência à compressão nos tijolos do grupo 2.....	68
Figura 4-18 - Resultados do ensaio de resistência à compressão nos tijolos do grupo 3.....	69
Figura B-1 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de AA nos CPs cilíndricos aos 7.	97
Figura B-2 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de AA nos CPs cilíndricos aos 28	97
Figura B-3 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de RC nos CPs cilíndricos aos 7	97
Figura B-4 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de RC nos CPs cilíndricos aos 28	97
Figura B-5 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de AA nos tijolos do grupo 1 aos 7	98
Figura B-6 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de AA nos tijolos do grupo 1 aos 28	98
Figura B-7 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de AA nos tijolos do grupo 2 aos 7	98
Figura B-8 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de AA do grupo 2 aos 28.....	99
Figura B-9 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de AA do grupo 3 – 1 aos 7 dias	99
Figura B- 10 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de AA do grupo 3 - 1 aos 28 dias	99
Figura B-11 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de AA do grupo 3 – 2 aos 7.....	99
Figura B- 12 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de AA nos tijolos do grupo 3 – 2	100
Figura B-13 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de RC nos tijolos do grupo 1 ..	100
Figura B-14 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de RC nos tijolos do grupo 1 ..	100
Figura B-15 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de RC nos tijolos do grupo 2 ..	100
Figura B-16 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de RC nos tijolos do grupo 2 ..	101
Figura B-17 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de RC do grupo 3 - 1 aos 7 dias	101
Figura B-18 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de RC do grupo 3 - 1 aos 28 dias	101
Figura B-19 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de RC do grupo 3 - 2 aos 7 dias	101

Figura B-20 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de RC do grupo 3 - 2 aos 28 dias .....	101
Figura B-21 - Resultados do teste de Tukey do traço TR1 analisando a AA .....	102
Figura B-22 - Resultados do teste de Tukey do traço T1 analisando a AA.....	102
Figura B-23 - Resultados do teste de Tukey do traço T2 analisando a AA.....	102
Figura B-24 - Resultados do teste de Tukey do traço TR2 analisando a AA .....	102
Figura B-25 - Resultados do teste de Tukey do traço T3 analisando a AA.....	102
Figura B-26 - Resultados do teste de Tukey do traço T4 analisando a AA.....	103
Figura B-27 - Resultados do teste de Tukey do traço T4 analisando a AA.....	103
Figura B-28 - Resultados do teste de Tukey do traço T4 analisando a AA.....	103
Figura B-29 - Resultados do teste de Tukey do traço TR1 analisando a RC.....	103
Figura B-30 - Resultados do teste de Tukey do traço T1 analisando a RC .....	103
Figura B-31 - Resultados do teste de Tukey do traço T2 analisando a RC .....	104
Figura B-32 - Resultados do teste de Tukey do traço TR2 analisando a RC.....	104
Figura B-33 - Resultados do teste de Tukey do traço T3 analisando a RC .....	104
Figura B-34 - Resultados do teste de Tukey do traço T4 analisando a RC .....	104
Figura B-35 - Resultados do teste de Tukey do traço T3 cal 24h analisando a RC.....	104
Figura B-36 - Resultados do teste de Tukey do traço T4 cal 24h analisando a RC.....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Classificação de solos e rochas de acordo com seu diâmetro ( $\phi$ ).....	8
Tabela 2-2 - Classificação do Cimento Portland de acordo com a sua composição.....	15
Tabela 3-1 - Requisitos para seleção de solo .....	25
Tabela 3-2 - Traços em volume e o consumo de cada material em kg para 1m <sup>3</sup> de mistura	28
Tabela 3-3 - Determinação dos traços da pesquisa: .....	29
Tabela 3-4 - Exigências para avaliação de solo-cimento .....	31
Tabela 4-1 - Composição química do solo .....	43
Tabela 4-2 - Umidade média por traço da produção dos tijolos da pesquisa .....	53
Tabela 4-3 - Dimensões médias dos CPs ensaiados .....	54
Tabela 4-4 - Resultados do ensaio de absorção de água nos CPs em 7 e 28 dias de cura .	54
Tabela 4-5 - Resultados do ensaio de resistência à compressão nos CPs em 7 e 28 dias de cura .....	56
Tabela 4-6 - Grupo dos traços que apresentam 5% de cimento (grupo 1) .....	58
Tabela 4-7 Grupo dos traços que apresentam 10% de cimento (grupo 2) .....	58
Tabela 4-8 - Grupo para análise da adição da cal no solo 24 horas antes de adicionar cimento (grupo 3-1) .....	58
Tabela 4-9 - Grupo para análise da adição da cal no solo 24 horas antes de adicionar cimento (grupo 3-2) .....	58
Tabela 4-10 - Resultados das dimensões médias dos tijolos ensaiados .....	59
Tabela 4-11 - Resultados do ensaio de absorção de água em 7 e 28 dias de cura .....	59
Tabela 4-12 - Composições e resultados do ensaio de absorção de água (grupo 1) .....	60
Tabela 4-13 - Composições e resultados do ensaio de absorção de água (grupo 2) .....	61
Tabela 4-14 - Composições e resultados do ensaio de absorção de água (grupo 3-1) .....	63
Tabela 4-15- Composições e resultados do ensaio de absorção de água (grupo 3-2) .....	63
Tabela 4-16 - Resultados do ensaio de resistência à compressão em 7 e 28 dias de cura..	65
Tabela 4-17 - Composições e resultados do ensaio de resistência à compressão (grupo 1)	65
Tabela 4-18 - Composições e resultados do ensaio de resistência à compressão (grupo 2)	67
Tabela 4-19 - Composições e resultados do ensaio de resistência à compressão (grupo 3-1) .....	69
Tabela 4-20 - Composições e resultados do ensaio de resistência à compressão (grupo 3-2) .....	69
Tabela A-1 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA nos CPs cilíndricos aos 7 dias ...	79
Tabela A-2 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA nos CPs cilíndricos aos 28 dias .	79
Tabela A-3 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tipo de cura “sem cura” .....	80

Tabela A-4 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tipo de cura “aspersão” .....	80
Tabela A-5 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tipo de cura “lâmina-d’água” .	80
Tabela A-6 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC nos CPs cilíndricos aos 7 dias...	81
Tabela A-7 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC nos CPs cilíndricos aos 28 dias.	81
Tabela A-8 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tipo de cura “sem cura” .....	82
Tabela A-9 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tipo de cura “aspersão” .....	82
Tabela A-10 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tipo de cura “lâmina-d’água”	82
Tabela A-11 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA dos tijolos do grupo 1 aos 7 dias .....	83
Tabela A-12 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA dos tijolos do grupo 1 aos 28 ...	83
Tabela A-13 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA dos tijolos do grupo 2 aos 7 dias .....	84
Tabela A-14 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA dos tijolos do grupo 2 aos 28 dias .....	84
Tabela A-15 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA dos tijolos do grupo 3-1 aos 7..	85
Tabela A-16 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA dos tijolos do grupo 3-1 aos 28	85
Tabela A-17 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA dos tijolos do grupo 3-2 aos 7..	86
Tabela A-18 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA dos tijolos do grupo 3-2 aos 28	86
Tabela A-19 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC dos tijolos do grupo 1 aos 7 dias .....	87
Tabela A-20 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC dos tijolos do grupo 1 aos 28...	87
Tabela A-21 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC dos tijolos do grupo 2 aos 7 dias .....	88
Tabela A-22 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC dos tijolos do grupo 2 aos 28 dias .....	88
Tabela A-23 -Resultados da ANOVA para o ensaio de RC dos tijolos do grupo 3-1 aos 7 dias .....	89
Tabela A-24 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC dos tijolos do grupo 3-1 aos 28 dias.....	89
Tabela A-25 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC dos tijolos do grupo 3-2 aos 7 dias.....	90
Tabela A-26 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC dos tijolos do grupo 3-2 aos 28 dias.....	90
Tabela A-27 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tijolo de traço Tr1 .....	91
Tabela A-28 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tijolo de traço T1 .....	91
Tabela A-29 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tijolo de traço T2 .....	92
Tabela A-30 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tijolo de traço Tr2 .....	92

Tabela A-31 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tijolo de traço T3 .....	92
Tabela A-32 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tijolo de traço T4 .....	93
Tabela A-33 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tijolo de traço T3 24h .....	93
Tabela A-34 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tijolo de traço T4 24h .....	93
Tabela A-35 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tijolo de traço Tr1.....	94
Tabela A-36 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tijolo de traço T1.....	94
Tabela A-37 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tijolo de traço T2.....	94
Tabela A-38 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tijolo de traço Tr2.....	95
Tabela A-39 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tijolo de traço T3.....	95
Tabela A-40 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tijolo de traço T4.....	95
Tabela A-41 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tijolo de traço T3 24h.....	96
Tabela A-42 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tijolo de traço T4 24h.....	96

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, SÍMBOLOS E UNIDADES

UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
LECIV	Laboratório de Engenharia Civil
CPs	corpos de prova
tnf	toneladas-força
MPa	Mega Pascal
FJP	Fundação João Pinheiro
MCMV	Minha Casa Minha Vida
CBIC	Câmara Brasileira de Indústria da Construção
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
RCC	resíduos da construção civil
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
kg	quilograma
hab	habitantes
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CDHU	Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano de São Paulo
NBR	Norma Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
m	metro
mm	milímetro
LP	Limite de plasticidade
LL	Limite de liquidez
IP	Índice de plasticidade
$\varphi$	letra grega phi (tamanho de partícula)
$\alpha$	letra grega alfa (nível de significância)
q	coeficiente de distribuição
EMMA	Elkem Material Mix Analyzer
CP II – E	Cimento Portland composto com escória
PET	Poli (tereftalato de etileno)

RC	Resistência à compressão
AA	Absorção de água
Bar	Unidade de pressão (do grego barys, significando "pesado")
Psi	Unidade de pressão (libra-força por polegada quadrada)
ANOVA	Análise de Variância
SiO <sub>2</sub>	Sílica
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumina
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Ferro
K <sub>2</sub> O	Potássio
SO <sub>3</sub>	Tróxido de Enxofre
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de Titânio
CaO	Óxido de cálcio
MnO	Óxido de manganês
ZrO <sub>2</sub>	Dióxido de zircônio
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de vanádio
CuO	Óxido de cobre
ZnO	Óxido de zinco
SrO	Óxido de estrôncio
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . 2SiO <sub>2</sub> . 2H <sub>2</sub> O	caulinita
Al(OH) <sub>3</sub>	gibbsita
P	Probabilidade de significância

## RESUMO

A busca por materiais alternativos de menor impacto ambiental é pauta fundamental para uma constante evolução da construção civil e sociedade, tendo se tornado cada vez mais recorrente. Para ter oportunidade de maior uso no mercado, é necessário que o tijolo de solo-cimento ganhe mais confiança e credibilidade, que até então não possui de forma expressiva. Dessa forma, o presente trabalho se propôs a analisar a resistência à compressão e a absorção de água em tijolos de solo-cimento substituídos parcialmente (5% e 10%) por cal hidratada, com teores de cimento em 5% e 10%. Para proceder, foi realizada a caracterização das propriedades físicas e químicas do solo: as características físicas não atenderam às questões normativas de solo-cimento, devido à grande presença de finos (argila e silte – 60%); foi feito então, um estudo de dosagem de areia, pelo método de empacotamento de partículas e verificação da moldagem dos tijolos, obtendo o percentual de 30% de areia, que substituiu parcialmente o solo da pesquisa; foi feito um estudo comparativo de cura por aspersão e lâmina-d'água em CPs cilíndricos, como resultado, a cura por lâmina-d'água apresentou diferença significativa ( $\alpha = 0,05$ ) nas duas variáveis dependentes (ensaio de absorção de água e de resistência à compressão) e nos dois tempos de cura analisados (7 e 28 dias), sendo, por isso, a cura adotada na produção dos tijolos; visando a produção dos tijolos, os componentes das misturas da presente pesquisa foram pesados e já ensacados com a identificação do traço em que fazem parte, sendo que o solo foi passado no triturador antes; para a prensagem dos tijolos foi utilizado a prensa hidráulica 7000 turbo II da Eco Máquinas, com uma pressão de 15 Mpa; após a prensagem os tijolos foram submetidos ao processo de cura por lâmina-d'água, sendo armazenados em pallets e cobertos com uma lona plástica, com um balde na parte interna para umedecer toda a área; por fim, os tijolos nas diferentes composições de solo-cimento e cal foram avaliados quanto a absorção de água e a resistência à compressão. Como resultados o traço T<sub>4</sub> (10% de cimento e 10% de cal) foi o que obteve os melhores resultados de absorção de água e resistência à compressão aos 28 dias, e o traço Tr<sub>1</sub> (5% cimento e 95% solo) foi o traço mais econômico estudado, atendendo os critérios normativos (7 e 28 dias).

**Palavras-chave:** Tijolo de solo-cimento; Cal hidratada; Tijolo de encaixe.

## ABSTRACT

The search for alternative materials with less environmental impact is a fundamental agenda for a constant evolution of civil construction and society, having become increasingly recurrent. In order to have the opportunity of greater use in the market, it is necessary for the soil-cement brick to gain more confidence and credibility, which until then it does not have in an expressive way. Thus, the present work aimed to analyze the compressive strength and water absorption in soil-cement bricks partially replaced (5% and 10%) by hydrated lime, with cement contents at 5% and 10%. In order to proceed, the characterization of the physical and chemical properties of the soil was carried out: the physical characteristics did not meet the normative issues of soil-cement, due to the large presence of fines (clay and silt – 60%); a study of sand dosage was then carried out, using the particle packing method and verification of the molding of the bricks, obtaining the percentage of 30% of sand, which partially replaced the research soil; a comparative study of spray and water depth curing in cylindrical CPs was carried out, as a result, the water depth curing showed a significant difference ( $\alpha = 0.05$ ) in the two dependent variables (water absorption test and compressive strength) and in the two curing times analyzed (7 and 28 days), being, therefore, the curing adopted in the production of bricks; aiming at the production of bricks, the components of the mixtures of the present research were weighed and already bagged with the identification of the trace in which they are part, and the soil was passed in the crusher before; To press the bricks, the Eco Máquinas 7000 turbo II hydraulic press was used, with a pressure of 15 Mpa; after pressing, the bricks were subjected to a curing process using a water slide, being stored on pallets and covered with a plastic tarp, with a bucket inside to moisten the entire area; finally, the bricks in the different soil-cement and lime compositions were evaluated for water absorption and compressive strength. As a result, mix T4 (10% cement and 10% lime) was the one that obtained the best results in terms of water absorption and compressive strength at 28 days, and mix Tr1 (5% cement and 95% soil) was the best. most economical trait studied, meeting the normative criteria (7 and 28 days).

**Keywords:** Soil-cement brick; hydrated lime; Fitting brick.

## **1 INTRODUÇÃO**

Em meio a esse cenário de grande preocupação ambiental, a estabilização de solo com destino à utilização na construção civil, como na produção de tijolos de solo-cimento, surge como uma alternativa viável, factível e de menor impacto ambiental face aos métodos construtivos já consolidados. Para ter oportunidade de maior uso no mercado, é necessário que o tijolo de solo-cimento conquiste mais confiança e credibilidade, que até então não possui de forma expressiva.

Na construção civil, além dos problemas ambientais, há o problema do déficit habitacional no Brasil; um estudo publicado pela Fundação João Pinheiro (FJP), relata que o déficit habitacional estimado no território Brasileiro para o ano de 2019 foi de 5,876 milhões de domicílios; o que representa, em percentual relativo, 8% do total de domicílios particulares permanentes e improvisados do país (FJP, 2021).

Existem programas destinados à habitação social no país, como Minha Casa Minha Vida (MCMV), Pró-Moradia e Agência Paulista de Habitação Social (Casa Paulista), além de parcerias público-privadas; no entanto, ao olhar para os levantamentos estatísticos da FJP (2021) e suas perspectivas, percebe-se que os programas de habitação social ainda não são suficientes, uma vez que houve um aumento no déficit habitacional de 2016 para 2019 (4%) e é esperado um aumento para 2021 e próximos anos.

Portanto, visando uma constante evolução da construção civil e sociedade, considerando o potencial e as consequências do uso do tijolo de solo-cimento, é primordial o desenvolvimento de pesquisas com esse método construtivo, com a finalidade de adquirir uma maior confiança desse material. Nesse sentido, a presente pesquisa objetivou analisar a resistência à compressão e a absorção de água em tijolos de solo-cimento substituídos parcialmente (5% e 10%) por cal hidratada, com teores de cimento em 5% e 10%.

### **1.1 Objetivos**

O objetivo geral dessa pesquisa foi analisar a resistência à compressão e a absorção de água em tijolos de solo-cimento substituídos parcialmente (5% e 10%) por cal hidratada, com teores de cimento em 5% e 10%. A partir do objetivo principal, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Realizar a caracterização física e química do solo cedido pela Arte Cerâmica Sardinha, com intuito de verificar se o solo atende às características normativas para utilização em solo-cimento;
- Realizar um estudo de dosagem da areia, por meio do método de empacotamento de partículas e verificação da moldagem dos tijolos, para substituir parcialmente o solo cedido da pesquisa, corrigindo assim sua granulometria;
- Analisar a influência da cura por aspersão e por lâmina-d'água em mistura de solo-cimento, por meio da análise da resistência à compressão e absorção de água em CPs cilíndricos, após os períodos de 7 e 28 dias de cura;
- Analisar a resistência à compressão e a absorção de água em tijolos de solo-cimento nas diferentes composições de solo, cimento e cal estudadas, após os períodos de 7 e 28 dias de cura.

## **1.2 Justificativa**

A habitação é uma das necessidades mais básicas do ser humano, sendo garantida como direito social pela Constituição Federal (BRASIL, 1988). É um local onde é possível viver, se proteger das intempéries, realizar as atividades do dia-a-dia e ter momentos de socialização, fornecendo assim segurança e bem estar.

No Brasil, há um problema de difícil solução em relação à falta de habitação, que é o déficit habitacional. A dificuldade se encontra nos altos preços para compra de terreno e construção, ou para adquirir um imóvel, sendo muitas vezes inacessível para trabalhadores de baixa renda.

Há boa viabilidade de produção desses tijolos no município de Campos dos Goytacazes, que se localiza na região Norte do Estado do Rio de Janeiro – Brasil, uma vez que o município possui boa reserva de argila, o que influencia para a existência de cerca de 100 indústrias de cerâmica vermelha, onde são produzidas 90.000 peças por mês, sendo em sua maior parte tijolo cerâmico (XAVIER, 2019).

Apesar disso, é possível observar no município de Campos dos Goytacazes a presença de muitas construções precárias e com mínima condição de infraestrutura, onde não se utilizam materiais adequados para uma edificação.

Portanto, uma vez que o tijolo de solo-cimento ainda não possui confiança e credibilidade de forma expressiva, a presente pesquisa se propôs a melhorar as propriedades técnicas, principalmente mecânica, do tijolo de solo-cimento ao

adicionar cal. Após adquirir confiança e aceitação do mercado, o tijolo de solo-cimento pode ser utilizado como um meio alternativo ao tijolo cerâmico queimado tradicional. Em conjunto com outros materiais, pode também ser utilizado para a criação de casas populares com intuito de diminuir o déficit habitacional, seja por iniciativa do governo ou de empresas privadas.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo é apresentado a revisão bibliográfica da presente pesquisa. A estrutura desse capítulo se deu pelos seguintes tópicos: a construção civil no Brasil, solo, índice de vazios mínimos - fator de empacotamento de partículas, estabilização dos solos e tijolo de solo-cimento.

### **2.1 A construção civil no Brasil**

A Câmara Brasileira de Indústria da Construção (CBIC) descreve que a economia brasileira é dividida em três amplos setores, sendo esses da Agropecuária, Indústria e Serviços, com a Construção Civil pertencente ao setor da Indústria (CBIC, 2020).

O principal indicador para medir a representatividade do setor da Indústria e da Construção Civil na economia nacional, é a porcentagem do PIB de um país que esse segmento representa. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2020) define o PIB de um país como a soma de todos os bens e serviços finais que são produzidos por este país durante certo período, que geralmente é de um ano.

Os dados da CBIC (2020) referentes às Contas Nacionais Trimestrais 1º Trim./2021, extraídos do IBGE, mostram que o PIB do Brasil em 2020 foi de 7,45 trilhões, com o setor da indústria responsável por 20,4%, e a construção civil por 3,3%.

Os dados do parágrafo anterior demonstram como o setor da construção civil é responsável pela economia de um país e o quanto ela influencia na geração e descarte de resíduos em larga escala, consumindo e degradando o meio ambiente. Sobre esse aspecto, Pisani (2005, p. 53) salienta que “não existe construção que não gere impacto, a busca é por intervenções que o ocasionam em menor escala”.

O Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução nº 307, estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil (RCC), definindo-os como “os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos”. Os RCC são comumente também chamados de entulhos de obras (BRASIL, 2002).

Ainda de acordo com a Resolução nº 307, o CONAMA classifica os RCC em classes, como as descritas a seguir: Classe A: resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados; Classe B: resíduos recicláveis para outros destinos; Classe C: resíduos em que não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações viáveis

economicamente permitindo sua reciclagem ou recuperação; Classe D: resíduos perigosos provenientes do processo de construção (BRASIL, 2002). Na Figura 2-1 é possível observar resíduos da construção civil (Classe A), em (a) resíduo proveniente de rocha e (b) resíduo cerâmico.



Figura 2-1 - Resíduos da construção civil, em (a) resíduo proveniente de rocha e em (b) resíduo cerâmico

Fonte: Autoria própria.

Em 2019, os municípios brasileiros coletaram um total de 44,5 milhões de toneladas de Resíduos de Construção Civil (RCC), o que resulta em uma coleta per capita de 213,5 kg/hab/ano; em relação às regiões do Brasil, do total coletado, 52,19% correspondem à região Sudeste, 19,77% à região Nordeste, 13,32% à região Sul, 10,86% à região Centro-Oeste e 3,86% à região Norte (ABRELPE, 2020). Ao levar em consideração que os dados da pesquisa mencionada não incluem os resíduos coletados por empresas privadas, uma vez que os dados foram frutos da pesquisa direta da ABRELPE e dos municípios, percebe-se que há um quantitativo muito maior na geração dos RCC.

Na construção civil, além dos problemas ambientais, há o problema do déficit habitacional no Brasil; o estudo intitulado “Déficit Habitacional no Brasil”, publicado pela Fundação João Pinheiro (FJP), relata que o déficit habitacional estimado no território Brasileiro para o ano de 2019 foi de 5,876 milhões de domicílios; o que representa, em percentual relativo, 8% do total de domicílios particulares permanentes e improvisados do país (FJP, 2021).

A Figura 2-2 retrata o percentual relativo do déficit habitacional decorrente das unidades da Federação – Brasil dos anos de 2016 a 2019, do qual é possível concluir que as regiões Nordeste e Norte são as regiões que possuem o maior déficit em

termos relativos e os estados do Maranhão, Roraima e Amapá são um dos estados que possuem o maior déficit relativo (FJP, 2021).

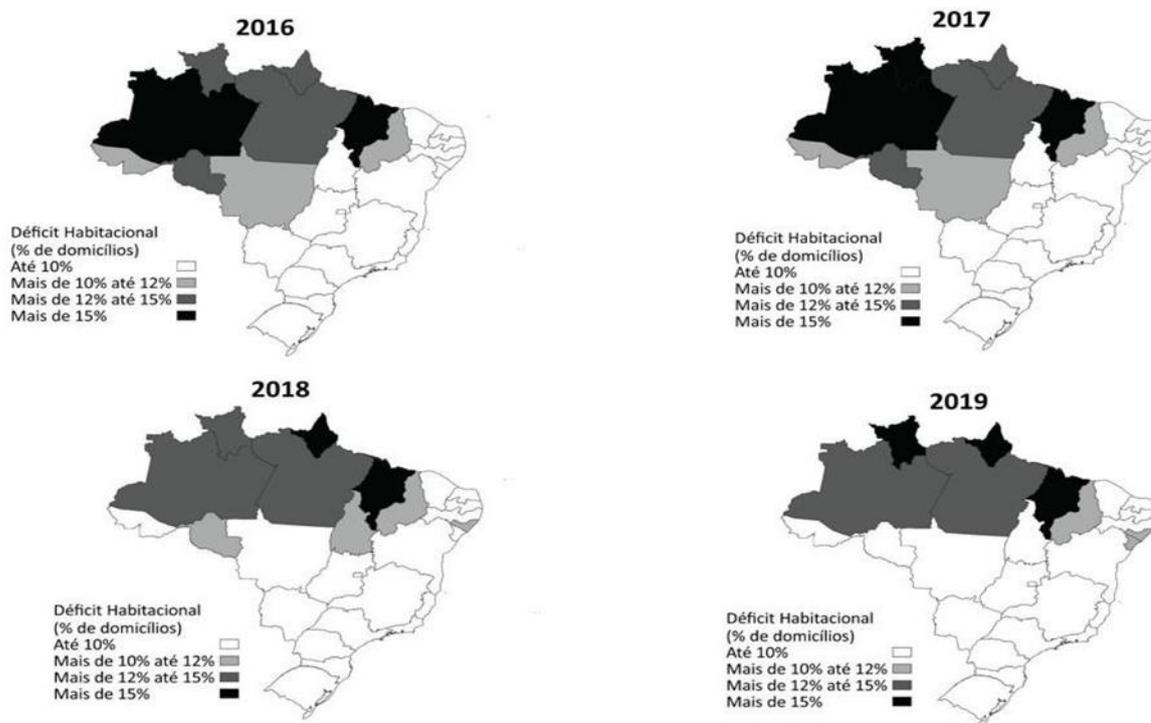


Figura 2-2 - Percentual relativo do déficit habitacional decorrente das unidades da Federação – Brasil dos anos de 2016 a 2019

Fonte: (FJP, 2021).

Existem programas destinados à habitação social no país, como Minha Casa Minha Vida (MCMV), Pró-Moradia, Agência Paulista de Habitação Social (Casa Paulista) e Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano de São Paulo (CDHU), além de parcerias público-privadas; no entanto, ao olhar para os levantamentos estatísticos da FJP (2021) e suas perspectivas, percebe-se que ainda não são suficientes, uma vez que houve um aumento no *déficit* habitacional de 2016 para 2019 (4%) e é esperado um aumento para 2021 e próximos anos.

Em meio a esse cenário de grande preocupação ambiental, dos impactos gerados pela construção civil ao meio ambiente, quer seja pelo consumo de recursos naturais ou pela geração de resíduos da construção civil, aliado ao problema do *déficit* habitacional no Brasil, a estabilização de solo com destino à utilização na construção civil, como na produção de tijolos de solo-cimento, surge como uma alternativa viável, factível e de menor impacto ambiental face aos métodos construtivos já consolidados.

Logo, para uma melhor compreensão do tijolo de solo-cimento e seus constituintes, no próximo tópico é abordado sobre o solo, componente em maior porcentagem no tijolo de solo-cimento.

## 2.2 Solo

Todos os solos se originam pela decomposição das rochas, decursivo de agentes físicos e químicos, que compunham inicialmente a crosta terrestre. Com as alterações da temperatura ao longo do dia trincas são geradas, que com a entrada da água, ataca quimicamente os minerais. A congelação da água nas trincas, dentre diversos motivos, resulta em elevadas tensões, ocorrendo assim uma maior fragmentação dessa rocha. Por causa da presença da fauna e flora ocorre ataque químico, através de lixiviação, hidratação, oxidação, hidrólise, carbonatação, troca de cátions etc. Por causa desses processos citados, que são mais frequentes em climas quentes do que frios, ocorre à formação dos solos que, nada mais são que uma combinação de pequenas partículas que se distinguem pelo tamanho e pela composição química. Em relação à proporção de cada tipo de partícula no solo depende da composição química da rocha que a originou (PINTO, 2006).

Na visão de Al-Jabri *et al.* (2017), os solos que têm uma maior quantidade de argila apresentam uma característica de comprimir mais do que os de menor quantitativo de argila. Um consenso entre os autores Balaji *et al.* (2017) e Saidi *et al.* (2018) são que ao aumentar o quantitativo de argila no tijolo de solo-cimento ocorre um aumento na condutividade térmica do material.

Não é qualquer solo que é adequado para se utilizar na construção. Os solos que são mais propícios e recomendados para construção são situados em geral no denominado horizonte B, localizados assim no subsolo, pois em suas composições são livres de matéria orgânica, conforme se observa na figura abaixo (PONTE, 2012). A Figura 2-3 remete também uma característica das construções que têm o solo em sua maior proporção, que é muitas vezes a possibilidade de reutilizar o material após a destruição ou, como no caso do tijolo de solo-cimento, sua reutilização após a prensagem caso algo não saia como planejado (como moldagem inadequada dos tijolos).

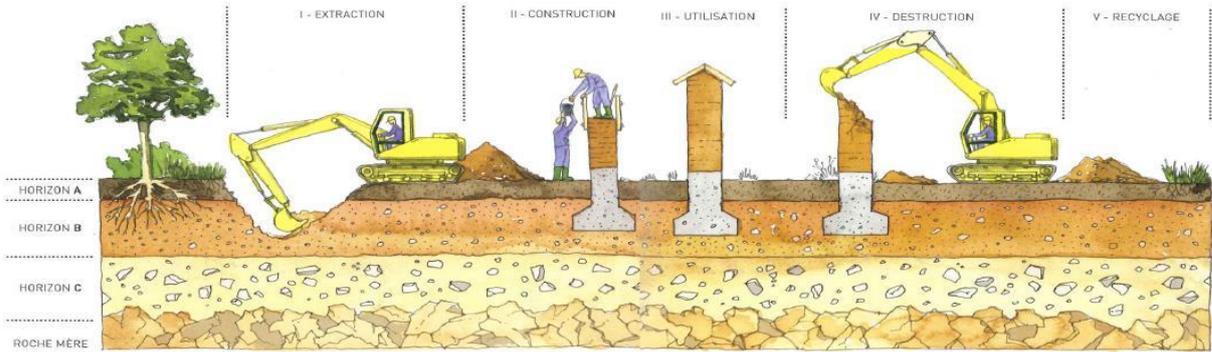


Figura 2-3 - Ciclo natural da construção com terra e classificação pedológica dos solos

Fonte: (PONTE, 2012).

O solo é o material de maior proporção na mistura de solo-cimento para a produção de tijolo de solo-cimento, para a sua escolha é preciso levar em consideração a disponibilidade do solo na região que serão fabricados os tijolos e o atendimento a norma de solo-cimento NBR 10833 (ABNT, 2013).

### 2.2.1 Propriedades dos solos

Há muitas formas de classificar o solo em função de suas múltiplas finalidades. Na engenharia e para utilização em solo-cimento, a forma mais pertinente é em relação ao tamanho das partículas, pela relação granulométrica.

A NBR 6502 (ABNT, 1995) classifica, conforme apresentado na Tabela 2-1, a terminologia de solos e rochas conforme o tamanho da partícula.

Tabela 2-1 - Classificação de solos e rochas de acordo com seu diâmetro ( $\varphi$ )

Terminologia	Tamanho da partícula ( $\varphi$ )
Bloco de rocha	$\varphi > 1 \text{ m.}$
Matacão	$200 \text{ mm} < \varphi < 1 \text{ m}$
Pedregulho Grosso	$20,0 \text{ mm} < \varphi < 60,0 \text{ mm}$
Pedregulho Médio	$6,0 \text{ mm} < \varphi < 20,0 \text{ mm}$
Pedregulho Fino	$2,0 \text{ mm} < \varphi < 6,0 \text{ mm}$
Areia Grossa	$0,60 \text{ mm} < \varphi < 2,0 \text{ mm}$
Areia Média	$0,20 \text{ mm} < \varphi < 0,60 \text{ mm}$
Areia Fina	$0,06 \text{ mm} < \varphi < 0,20 \text{ mm}$
Silte	$0,002 \text{ mm} < \varphi < 0,06 \text{ mm}$
Argila	$\varphi < 0,002 \text{ mm}$

Fonte: (ABNT, 1995).

Em relação à classificação descrita acima, a NBR 6502 (ABNT, 1995) descreve sobre as terminologias apresentadas acima, sendo: Argila: solo de granulação fina

que apresenta coesão e plasticidade; Silte: solo com pouca ou nenhuma plasticidade e com baixa resistência quando seco o ar; Areia: solo que não é nem plástico nem coesivo; Pedregulho: solo que é formado por partículas de rocha ou minerais, quando apresentam formato semiarredondados ou arredondados são nomeados como cascalho ou seixo; Matação: considerado um fragmento de rocha arredondado por abrasão ou intemperismo; Bloco de rocha: Considerado um fragmento de rocha.

Conforme Cavalcanti Filho (2016), o teor de umidade do solo pode se situar no estado líquido, plástico ou sólido, e que os limites de consistência de um solo são os limites de plasticidade (LP) e de liquidez (LL).

Sobre esse assunto, os Limites de Atterberg, Pinto (2006) disserta que os teores de umidade que correspondem às mudanças de estado líquido para o plástico e do plástico para o quebradiço, assim como é ilustrado na Figura 2-4, têm definições, a saber: Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP) dos solos, respectivamente. Fazendo a diferença do LL pelo LP encontram-se o Índice de Plasticidade (IP) do solo, que indica a faixa de umidade em que o solo se encontra no estado plástico. Normalmente são indicados apenas os valores do LL e do IP, o LP é utilizado apenas para a determinação do IP.

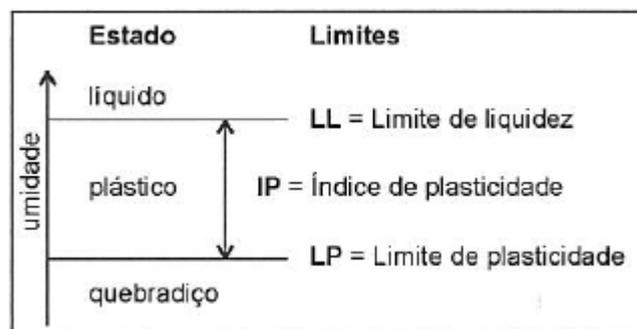


Figura 2-4 - Limites de Atterberg dos solos

Fonte: (PINTO, 2006).

Os solos também se distinguem em relação aos índices físicos: densidade aparente seca e teor de umidade, quando são sujeitos a estipuladas energias de compactação. Para cada ponto de compactação há uma umidade referente ao máximo peso específico seco, que é a umidade ótima. O solo quando apresenta sua umidade ótima, têm uma menor porosidade, o que o torna um material mais resistente e durável (CAVALCANTI FILHO, 2016).

Nesse sentido, a compactação do solo, que pode ocorrer de modo mecânico, procura diminuir as maiores partículas de solo, diminuindo o ar dos vazios. Se a

proporção de água for apropriada, a taxa de água permanece o mesmo, mas se for alta, com níveis próximos a saturação do solo, ocorre a expulsão da água. A compactação do solo tem como objetivo diminuir a permeabilidade, deformabilidade e a expansão, aumentando assim a resistência ao cisalhamento, estabilidade e a integridade da mistura de solo-cimento (CAVALCANTI FILHO, 2016; VERMA e KUMAR, 2019).

O Ensaio de Proctor ou Ensaio Normal de Compactação é normatizado, no Brasil, pela NBR 7182 (ABNT, 2016). O Ensaio de Proctor é muito utilizado em trabalhos sobre o tijolo de solo-cimento, como nas pesquisas de Souza (2019), Azevedo (2019) e Da Silva, (2021).

Esse ensaio é o método científico mais preciso para escolha de umidade do tijolo de solo-cimento, uma vez que é padronizado e normatizado, diferente de outras técnicas manuais e visuais (CAMPOS *et al.*, 2019).

### **2.2.2 Composição do solo**

Para produção de tijolo de solo-cimento, os componentes fundamentais do solo a ser considerado são a areia, silte e argila. Não sendo indicado altos teores de matéria orgânica, pois pode afetar as reações de hidratação do cimento no processo de cura dos tijolos (GRANDE, 2003).

Os autores Grande (2003) e Cavalcanti Filho (2016) definem a areia como partículas sólidas de quartzo, uma forma cristalina da sílica ( $\text{SiO}_2$ ), com formato angular ou arredondado, estando presente na fração mais grossa do solo. A areia tem a característica de oferecer resistência mecânica a mistura que utiliza cimento em sua constituição. Ainda sobre a areia, a NBR 6502 (ABNT, 1995) a define como sendo um solo que não é nem plástico nem coesivo.

Os siltes são partículas finas de origem mineral, que diferente das argilas, têm pouca ou nenhuma plasticidade. O tamanho das partículas encontradas no silte assim como a sua origem, influem nas características do solo, dando-lhe aparência mais arenosa ou argilosa (GRANDE, 2003; CAVALCANTI FILHO, 2016). A NBR 6502 (ABNT, 1995) define a silte como solo com pouca ou nenhuma plasticidade e com baixa resistência quando seco o ar.

Grande (2003) e Cavalcanti Filho (2016) definem a argila como sendo um agregado natural de constituição fina, em certas proporções de umidade apresenta certa plasticidade. Na argila compreende silicatos hidratados de magnésio, ferro e

alumínio e sílica coloidal. A NBR 6502 (ABNT, 1995) define a argila como de granulação fina que apresenta coesão e plasticidade.

De acordo com Santos (1975, apud Barbosa, 2018), as argilas são formadas especialmente por argilominerais, que são partículas cristalinas extremamente pequenas de um número exclusivo de minerais. De forma química, os argilominerais são constituídos por silicatos hidratados de ferro e alumínio com a existência preponderante de elementos alcalinos e alcalinos terrosos. As argilas podem também compreender outros materiais e minerais, como matéria orgânica, sais solúveis, quartzo, pirita, calcita, mica, dolomita e outros minerais residuais, ou minerais não-cristalinos ou amorfos.

As estruturas dos argilominerais são complexas, os argilominerais mais encontrados na natureza são a esmectita, illita e caulinita. Eles apresentam comportamentos diferentes quando em contato com a água. Há dois tipos de estruturas em relação à composição química das argilas: uma de tetraedros justapostos em um plano, em que há átomos de silício ligados a quatro átomos de oxigênio ( $\text{SiO}_2$ ); A outra é de octaedros, em que há átomos de alumínio envolvidos por oxigênio ou hidroxilas  $[\text{Al}(\text{OH})_3]$  (PINTO, 2006).

A associação de argilominerais do conjunto das caulinitas e de óxidos e hidróxidos hidratados de alumínio e/ou ferro, é causador da criação de sistemas estáveis na presença de água. Nesse modo, os óxidos e hidróxidos hidratados envolvem os argilominerais, diminuindo assim a capacidade de absorção da água deles, o que proporciona a cimentação, de forma natural, dos elementos (SANTOS e PARREIRA, 2015).

Vieira *et al.* (2006) trazem considerações mostrando que na região do município de Campos dos Goytacazes (RJ) possui predomínio de caulinita, um argilomineral natural que colabora para uma notável plasticidade da argila.

Para Ferreira *et al.* (2018) a produção de tijolo de solo-cimento com solos que tenham alto percentual de argila é imprópria, pois terá enorme absorção de água por parte da argila, ocasionando em muitas retrações no processo de secagem, o que leva ao aparecimento de fissuras.

### **2.3 Índice de vazios mínimos - Fator de empacotamento de partículas**

Uma das principais características que se almeja de um solo para produção de tijolo de solo-cimento é que ele tenha o menor número de vazios possível, sobre esse

assunto, Bahiense *et al.* (2021) em seus estudos publicados apontam que o menor índice de vazios está relacionado com o maior fator de empacotamento de partículas, através da maior densidade da partícula da mistura.

Desenvolvendo a mesma ideia, Mazzucco *et al.* (2018) afirmam que a redução do índice de vazios é o conceito básico do método de empacotamento, pretendo obter uma mistura ótima dos agregados, de forma que a quantidade de ligante e água na mistura seja minimizada.

Nos dizeres de Bala *et al.* (2020) a densidade de empacotamento dos agregados é o critério físico de misturas granulares que mais retrata as misturas granulares, combinando o tamanho de grão e morfologia.

Sobre esse assunto, Mazzucco *et al.* (2018) retratam que o empacotamento do material granular depende principalmente do tamanho e forma do agregado e do próprio método de empacotamento aplicado.

### **2.3.1 Modelos matemáticos de empacotamento de partículas**

Para conseguir a densidade de empacotamento e assim obter uma otimização das misturas granulares, foram criados modelos matemáticos que servirão de instrumentos. Tais modelos expressam a distribuição granulométrica do material granular por meio do percentual de partículas menores que uma determinada mediada, em função do coeficiente de distribuição de partículas ( $q$ ), com valor variando para cada modelo (DE CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

Sobre o coeficiente de distribuição ( $q$ ), Pinto (2021) disserta que para selecionar o valor mais apropriado é um compromisso entre a fluidez e mecânica da composição.

De acordo com Pinto *et al.* (2021), a princípio os modelos foram divididos em dois clássicos modelos: o modelo de Furnas, considerando as partículas de forma individual, e o modelo de Andreasen que considera as partículas como distribuição contínuas e infundavelmente pequenas. Ainda segundo os autores a combinação dos dois modelos citados deu origem ao modelo de Alfred.

O modelo de Furnas (1931) não apresenta uma abordagem cautelosa, pois leva em conta as partículas individualmente, não considerando composições com partículas de tamanhos diferentes. No modelo de Andreasen e Andersen (1930) é um tanto questionável, pois considera partículas excessivamente pequenas, não sendo uma representação do que se considera um agregado natural. Já o modelo de

Andreassen modificado (Alfred) possibilita que haja uma incorporação do menor tamanho de partícula, ou seja, determinando um valor mínimo do tamanho de partícula para o sistema, retratando com mais precisão sistemas reais (SARKAR, 2016).

### **2.3.2 Elkem Material Mix Analyzer - EMMA**

O software analisador de mistura de materiais utilizado foi o Elkem Material Mix Analyzer (EMMA), versão de produção 3.5.2 e versão de compilação do programa 3.5.2.11, de direito autoral da Elkem S/A 2012, foi utilizado como ferramenta de cálculo dessa pesquisa. De acordo com Fennis e Walraven (2016) e De Melo *et al.* (2019) o software EMMA é aplicado comercialmente nas indústrias de cerâmica, concreto, misturas em pó etc.

O software versátil EMMA possibilita introduzir seus próprios materiais na biblioteca para verificar o equilíbrio da mistura, com objetivo de fornecer o melhor percentual de materiais para formar uma mistura ótima, com base no melhor fator de empacotamento de partículas.

## **2.4 Estabilização dos solos**

Na concepção de Ferreira *et al.* (2018) o melhoramento ou estabilização dos solos tem como objetivo melhorar o comportamento mecânico ou físico do solo, alterando suas características, com a manutenção dessas ao longo do tempo.

Guimarães (2002) retrata que pode se obter uma estabilização dos solos pelo uso de diversas técnicas, divididas em dois grupos:

- a) Utilizando meios mecânicos, como correção da granulometria e plasticidade.
- b) Utilizando meios químicos, para modificar as características dos solos, sendo aditivos orgânicos ou inorgânicos, a exemplo: resinas, materiais betuminosos, silicatos de sódio, compostos de fósforo, cimento Portland, cal etc. (GUIMARÃES, 2002)

Escolher um dos dois grupos para realizar a estabilização dos solos depende de vários fatores, como econômicos, intuito da obra e as características e as propriedades dos materiais e do solo, respectivamente, que se deve corrigir (GUIMARÃES, 2002).

Souza *et al.* (2008) alertam para a importância da etapa de análise do solo na produção de tijolo de solo-cimento, segundo o autor caso não tenha características apropriadas, tem a possibilidade de utilizar dois ou mais tipos de estabilização, uma vez que o solo é o material de maior proporção no solo-cimento. Sugerindo, caso necessário, a adição de areia, contanto que não prejudique os resultados das propriedades tecnológicas do solo-cimento e economicamente, de forma significativa.

A estabilização do solo para a produção de tijolo de solo-cimento, visando uma nova composição, pode ser obtida por meio da distribuição do tamanho das partículas (correção granulométrica), isto é, quando se tem um solo não propício para a produção, pode-se adicionar outro solo com objetivo de ter uma nova distribuição granulométrica de modo a atender às especificações de projeto ou normativas.

Na visão de Goularte e Pedreira (2009), os materiais mais empregados para estabilização química são o cimento Portland, cal, material betuminosos, pozolanas e resinas. Já Silva (2016) aponta que, dentre todos os materiais, os materiais mais relevantes são o cimento Portland e a cal hidratada.

#### **2.4.1 Cimento Portland**

A NBR 16697 (ABNT, 2018) define cimento Portland como um ligante hidráulico que é conseguido por meio da moagem do clínquer Portland, em que é adicionado, durante o processo de fabricação, um quantitativo suficiente de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais em proporções estabelecidos na referida norma.

Existem vários tipos de cimentos Portland no Brasil, eles são classificados pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), tendo a nomenclatura da sigla CP de Cimento Portland seguido de números em romanos do I ao V, essa classificação é de acordo com a sua composição. Podem receber também após o número em romanos um valor numérico que indica a resistência mínima de compressão em MPa, como 25, 32 ou 40, alcançados após 28 dias de cura. Na Tabela 2-2 são apresentadas as nomenclaturas de alguns cimentos Portland (ABCP, 2002).

Tabela 2-2 - Classificação do Cimento Portland de acordo com a sua composição

Sigla	Nomenclatura	Norma da ABNT
CP I	Cimento Portland comum	NBR 5732, 2018
CP I - S	Cimento Portland comum com adição	NBR 5733, 2018
CP II - E	Cimento Portland composto com escória	NBR 11578, 2018
CP II - Z	Cimento Portland composto com pozolana	NBR 11579, 2012
CP II - F	Cimento Portland composto com fíler (calcário)	NBR 11580, 2003
CP III	Cimento Portland de alto-forno	NBR 5735, 2018
CP IV	Cimento Portland pozolânico	NBR 5736, 2018
CP V - ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial	NBR 5733, 2018

Fonte: (ABCP, 2002).

Acerca de tijolo de solo-cimento, o acréscimo de cimento ao solo resulta em um aumento da umidade ideal da composição se comparado apenas ao solo (FERREIRA *et al.*, 2018).

Murmu e Patel (2018) destacam que tijolo de solo-cimento com proporção de cimento maior que 10% acaba não sendo economicamente viável, no entanto com proporção de cimento menor de 5% afeta negativamente as propriedades do tijolo.

#### 2.4.2 Cal

A decomposição térmica, ou seja, a calcinação dos calcários/conchas calcárias/dolomitos tem como resultado a formação de dois produtos, a cal e o dióxido de carbono. A reação descrita é quimicamente bem estabelecida em relação às massas moleculares e sua equação estequiométrica é reversível tanto para os carbonatos de magnésio como também de cálcio. São fornecidas pela termodinâmica as duas informações básicas da calcinação, relacionadas com a reação e ligadas às condições de temperatura, calor e pressão (GUIMARÃES, 2002).

Em sua obra Guimarães (2002) retrata que o resultado da calcinação dos carbonatos de cálcio e de cálcio-magnésio são, respectivamente, os óxidos de cálcio (CaO) e cálcio-magnésio (CaO-MgO), denominados, de forma genérica, como cal virgem, área ou viva. Tal formação é possível ser visualizada pelas equações estequiométricas reversíveis abaixo, com a formação de cal virgem acontecendo em fornos operando de 900°.

- Cal cálcica:  $\text{CaCO}_3 + \text{calor} \leftrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- Cal domilítica:  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3 + \text{calor} \leftrightarrow \text{CaO} \cdot \text{MgO} + 2\text{CO}_2$

A qualidade química do produto depende primeiramente das características e das impurezas contidas na rocha que lhe deu origem (matriz/mãe). Assim recebe o nome de cal cálcica o produto com grande teor em óxido de cálcio; cal dolomítica, quando possui a relação entre os óxidos de cálcio e de magnésio igual a molecular  $\text{CaO/MgO}$ ; e de cal magnesiana quando possui teores de óxido de magnésio intermediário entre a cal cálcica e a cal dolomítica (GUIMARÃES, 2002).

A cal hidratada é resultado da continuidade do processo industrial que se origina na cal virgem. Na presença de água, a reação química que a produz é bem conhecida, sendo uma clássica “reação de fases sólido-líquida”. Em função do volume de água utilizada na reação, obtém-se um produto final que pode ser seco ou com aspectos de leite, lama, creme ou solução saturada. A cal hidratada é adjetivada, sendo que a sua composição química varia de acordo com as características da cal virgem que a formou (GUIMARÃES, 2002).

A utilização da cal tem maior expressão devido ao extenso leque de setores sociais e industriais que a utilizam, muito em função da sua dupla capacidade, aglomerante-ligante e reagente químico. Em relação à estabilização de solo, a adição de cal no solo é um dos mais antigos métodos conhecidos (GUIMARÃES, 2002).

Nóbrega (1985, apud Rosa, 2006) retrata que a estabilização solo com a cal, gera dois tipos de reações: uma de forma instantânea, em função da floculação-aglomeração e da troca catiônica; e outra de forma mais longa, definida pelas reações pozolânicas e carbonatação e, que provocam um ganho de resistência em função da formação de produtos cimentantes.

Sobre materiais pozolânicos, a NBR 12653 (ABNT, 2014) os define como:

materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes (ABNT, 2014).

Logo, a reação pozolânica ocorre essencialmente entre o material pozolânico, o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e a pozolanicidade das argilas depende da Sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Segundo Mehta e Monteiro (2014) a reação pozolânica se desenvolve em velocidade lenta e, portanto, o desenvolvimento de resistência mecânica se dá de forma lenta, com baixa liberação de calor na hidratação.

Segundo Garcia *et al.* (2015) a reação pozolânica sofre significativa influência pela granulometria do material que, quanto mais finamente particulado, maior a reatividade desenvolvida.

## 2.5 Tijolo de solo-cimento

O tijolo de solo-cimento é definido pela NBR 8491 (ABNT, 2012) como sendo um componente de alvenaria que é formado por uma mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento Portland e água e, ocasionalmente, pigmentos e/ou aditivos com proporções que atendem aos requisitos da referida norma. Na Figura 2-5 há um exemplo de tijolos de solo-cimento, estes com as mesmas dimensões que foi produzido na pesquisa, com 30x15x7 (comprimento x largura x espessura), em centímetros, sendo que a espessura tem uma variação de  $\pm 1,0$  cm, apresentando 2 furos de 8,67 cm de diâmetro.



Figura 2-5 - Tijolo de solo-cimento com as mesmas dimensões que serão produzidas na pesquisa

Fonte: Autoria própria.

De acordo com França *et al.* (2018), o tijolo de solo-cimento é uma alvenaria de vedação (sem função estrutural) que tem potencial para uso em edifícios de pequeno e médio porte, apresentando um baixo custo financeiro.

O tijolo de solo-cimento trabalha com o cimento atuando na ligação entre as partículas do solo. A hidratação das partículas do cimento faz com que cristais sejam gerados, esses cristais são eficientes em interligar-se entre si, o que gera um aumento na resistência à compressão. À medida que o cimento adentra no solo, vai preenchendo seus vazios, diminuindo assim o índice de vazios do solo. Após o

endurecimento do cimento, há um crescimento no seu peso específico, como também na capacidade de carga e na resistência ao cisalhamento (AFRIN, 2017).

Piani *et al.* (2020) retratam que o quantitativo de água na mistura para fabricação de tijolo de solo-cimento tem uma consequência importante no desempenho mecânico dos tijolos. O autor acrescenta que cada componente do tijolo cumpre um papel e a interação entre os componentes e as propriedades mineralógicas, assim como os processos de produção vão determinar a força geral do sistema.

Um estudo de relevância foi realizado por Azevedo *et al.* (2019), em suas pesquisas, os autores incorporaram lodo da indústria de papel e celulose em tijolos de solo-cimento com 10% de cimento e 90% de solo compensado. Na composição do solo foram incorporados areia e 5%, 10% e 15% de resíduos em massa. As características avaliadas foram a resistência à compressão, absorção de água e durabilidade. Os resultados apontaram que a incorporação de resíduos de até 10% atendeu aos requisitos técnicos normativos, viabilizando sua utilização na construção civil. Os autores utilizaram em sua pesquisa a mesma prensa hidráulica, Eco Máquinas 7000 Turbo II, que foi utilizada nessa pesquisa.

França *et al.* (2018) realizaram uma pesquisa em que foi incorporado resíduos de calcário do beneficiamento do mármore, adicionando 30%, 40% e 50% em volume de resíduo no solo-cimento e analisando às propriedades físicas, químicas e mineralógicas. Como resultado, os autores provaram ser viável a incorporação desse resíduo para a produção de tijolo de solo-cimento, com o teor de 30% apresentando melhor resultado. Os autores utilizaram em sua pesquisa a mesma prensa hidráulica, Eco Máquinas 7000 Turbo II, que foi utilizada nessa pesquisa.

Em seu trabalho Da Silva *et al.* (2021) adicionaram resíduos de PET descartados em tijolo de solo-cimento, avaliando a resistência à compressão e absorção de água. Para a resistência à compressão os autores não atingiram o padrão normativo, apesar dos resíduos de PET ter aumentado a resistência comparado com o de referência (sem resíduo); para absorção de água os resultados foram todos satisfatório, cumprindo os padrões normativos.

Assim como os autores anteriores, Paschoalin Filho *et al.* (2016) adicionaram PET a misturas de solo-cimento, oriundo da moagem de garrafas de bebidas. A mistura de solo-cimento dos autores em questão, contou com um solo classificado como Latossolo vermelho, de textura argilosa e poroso e o cimento Portland II E-32.

Ao verificar a resistência à compressão simples dos tijolos produzidos, identificaram que a composição não atendeu o mínimo normativo recomendado.

Salomão *et al.* (2019) estudaram a análise química do solo, adicionando cimento e cal, com o solo de 45% de areia 30% de silte e 25% de argila, objetivando ter uma melhora mecânica no solo para utilização em tijolos ecológicos de solo-cal-cimento. Para os traços variou-se a porcentagem de cimento e de cal em proporções de 0 a 13% em relação à massa de solo. A metodologia consistiu em preparação do solo, análise de alteração volumétrica por meio e ensaio físico-químico, moldagem e rompimento dos corpos de prova para determinar a resistência à compressão após 28 dias de cura. Como resultado, em relação à variação volumétrica, as amostras com 3% de cal tiveram uma conduta regular em cima da curva de tendência, variando o percentual de cimento. Apresentando como resultados satisfatório a proporção de 3% de cal para 7% e 9% de cimento sobre massa de solo, cumprindo os requisitos normativos pela NBR 8491 (ABNT, 2012). Assim, os autores concluíram que para a fabricação de tijolo solo-cal-cimento é mais recomendado a proporção de 3% de cal para 7% de cimento em relação à massa de solo por ser mais rentável financeiramente.

Souza *et al.* (2008) estudaram a aplicação de resíduos de concreto na elaboração dos tijolos. Como o concreto triturado possui maior granulometria, a sua utilização em solos com maior teor de argila promove uma granulometria final mais equilibrada. Como resultados, foi possível acrescentar até 60% de concreto, baseado na massa de solo, mantendo as especificações necessárias pelas normas brasileiras. Também reduziu o índice de retração do solo, demonstrando, em conjunto com os resultados anteriores, o potencial do tijolo de solo-cimento na reciclagem do concreto.

Da Silva Segantini e Wada (2011) também aplicaram resíduos de construção e demolição na produção dos tijolos. Entretanto, os resíduos possuíam vários materiais em proporções desconhecidas. Dentre essa mistura, destacam-se concreto, argamassa, materiais cerâmicos, solo e frações pequenas de outros materiais de origem não mineral. Como resultado, obtiveram tijolos dentro das normas com quantias de até 60% de resíduos (em relação ao solo), o que condiz com o trabalho feito por Souza *et al.* (2008). Apesar da informação ausente da composição do resíduo, os resultados são plenamente apreciáveis, já que os resíduos de construção e demolição tendem a ser similares nas obras (argamassa, concreto, solo e materiais cerâmicos).

Rodrigues e Holanda (2013) contemplaram uma fuga dos resíduos de construção e se aproveitaram dos resíduos de tratamento de água. O lodo proveniente do tratamento de água é rico em silicatos, alumino-silicatos e matéria orgânica, além de outros componentes em menor quantidade. Vale ressaltar que o solo também é rico nesses componentes, mostrando sua compatibilidade. Mesmo com a sinergia dos materiais, o lodo só pode ser aproveitado até um valor muito baixo (1,25%). O lodo tende a interferir na hidratação do cimento. Logo, sua aplicação é limitada, mas possível.

Da mesma forma que o lodo do tratamento de água pode ser adicionado, também pode-se adicionar lodo da indústria de fibras. Kongkajun *et al.* (2020) desenvolveram os tijolos com o lodo e sobras de tijolo comum. Um solo com frações mais definidas também foi descrito, sendo grande porção de laterita e baixa de areia. Usando as sobras de tijolo para substituir parte da laterita e lodo para substituir a mistura final seca, obtiveram resistência à compressão acima dos padrões para todos os blocos, além de melhoras no isolamento e queda no peso. O fator que se opôs às melhoras foi a absorção de água, mas ainda dentro das normas para aplicações com carga. A absorção de água aumenta o volume do tijolo e possibilita o crescimento de fungos, causando danos estruturais. Com isso, o tijolo final foi satisfatório e com porcentagens de 5% e 10% de lodo. Esses valores foram muito superiores ao trabalho de Rodrigues e Holanda (2013), mostrando um reaproveitamento ainda maior dos resíduos, o que é muito positivo economicamente.

Seco *et al.* (2017) produziram tijolos com mistura de areia sillicosa e solo argilosa, o solo recebeu tratamento da cal hidráulica, cimento Portland, além de misturas de escória granulada moída e cal e um outro material aglomerante obtido da junção da escória granulada e óxido de magnésio. Os autores utilizaram parâmetros de durabilidade, para avaliar as amostras após dezoito meses às condições ambientes. Os resultados evidenciaram a consequência positiva da adição da areia na mistura, além de bons resultados da junção do óxido de magnésio com a escória granulada.

Carrasco *et al.* (2014) aferiram o efeito da adição da serragem para fabricação de tijolo de solo-cimento, avaliando o comportamento mecânico do material. Como resultado, os autores evidenciaram que teve a adição da serragem é influenciada pelo tipo de solo e da forma e arranjo dos tijolos e prismas. Com solo um solo arenoso, obteve um maior módulo de elasticidade, ductilidade e resistência à compressão. Já

com solos argilosos, ocorreu uma diminuição na resistência à compressão dos tijolos, embora, tenha acontecido um pequeno aumento no módulo de elasticidade e ductilidade.

Siqueira *et al.* (2016) fabricaram tijolo de solo-cimento com adição de casca de ovo em substituição parcial ao cimento Portland, e também, de escória de soldagem em substituição ao solo. Ao final dos 28 dias de cura, os tijolos foram submetidos aos ensaios de absorção de água, resistência à compressão, densidade aparente, durabilidade, MEV e DRX. Os obtidos pelos autores, constataram que a adição de até 30% de casca e até 15% de escória apresentaram resultados favoráveis, concluindo assim, que melhorou o empacotamento dos grãos e a densificação da microestrutura do material, além da absorção de água, resistência à compressão e durabilidade.

Campos *et al.* (2019) apresentaram uma proposta de produção de tijolo de solo-cimento com fontes alternativas de captação de água, sendo a rede de abastecimento de água, de rio e de estação de tratamento de esgoto (ETE), avaliando em três diferentes tipos de cura (natural, câmara úmida e regado) em relação à resistência à compressão. Com a utilização da água da rede aos 7 dias de cura, a cura regada obteve uma melhor resistência à compressão (5,65 MPa) do que a câmara úmida (5,36 MPa). Aos 28 dias de cura, a cura por câmara úmida obteve uma melhor resistência à compressão (6,32 MPa) do que o regado (6,11 MPa).

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

A parte experimental da presente pesquisa foi conduzida no laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) - Campos dos Goytacazes – RJ, Brasil. A seguir serão detalhados os materiais utilizados na pesquisa assim como os métodos utilizados.

#### **3.1 Materiais**

Para o estudo experimental da produção de tijolo de solo-cimento com adição de cal, foram utilizados os seguintes materiais: solo, cimento Portland, cal e água, descritos adiante.

##### **a) Solo**

O solo utilizado nessa pesquisa foi o solo cedida pela Arte Cerâmica Sardinha (solo A), proveniente de uma jazida localizada no distrito Mineiros de Campos dos Goytacazes - RJ.

Também foi utilizado uma areia proveniente do Rio Paraíba do Sul (adquirida no comercio de Campos dos Goytacazes – RJ) para a correção granulométrica do solo A, já que a mesma não possui características físicas que permitem seu uso na fabricação de tijolo de solo-cimento, com objetivo de possibilitar o seu processo de prensagem, através de uma metodologia de mistura.

##### **b) Cimento**

Foi utilizado nessa pesquisa o Cimento Portland Composto com adição de escória de alto-forno (CP II-E) da marca Mauá. A escolha do cimento CP II-E se deu por ser um dos cimentos mais utilizados nas construções da região, sendo de fácil acesso e comercialização e por ter um preço mais acessível, tornando mais viável a sua utilização.

##### **c) Cal**

Foi utilizada nessa pesquisa a Cal Hidratada CH-III da Cal Max. A escolha da Cal Hidratada em questão se deu por esse ser um produto dos mais utilizados em Campos dos Goytacazes - RJ e região.

#### **d) Água**

Utilizou-se nessa pesquisa água potável, oriunda da Concessionária Águas do Paraíba, coletada na rede de distribuição de águas do município de Campos dos Goytacazes – RJ.

### **3.2 Métodos**

Foi adotado para o desenvolvimento do presente estudo um esquema experimental, constituído de sete etapas fundamentais, as quais estão especificadas abaixo e posteriormente detalhadas.

- 1) Preparação e caracterização física e química do solo cedido (solo A);
- 2) Definição do percentual de areia (10%, 20%, 30%, 40% ou 50%) em substituição parcial do solo A para a correção granulométrica, por meio do estudo de empacotamento de partículas e verificação da moldagem dos tijolos;
- 3) Definição dos traços da pesquisa;
- 4) Determinar o tipo de cura utilizada na pesquisa, por meio da análise da influência de diferentes tipos de cura em uma mistura de solo-cimento, utilizando a cura de referência (sem cura), por aspersão e por lâmina-d'água; objetivando determinar, após o período de 7 dias de cura, o tipo de cura que foi utilizada, por meio da análise da resistência à compressão e absorção de água;
- 5) Preparação da mistura nos traços determinados, moldagem e cura dos tijolos no método de cura adotado na etapa 4;
- 6) Determinar qual a força de prensagem que a prensa hidráulica Eco Máquinas 7000 Turbo II utilizou para produzir os tijolos dessa pesquisa;
- 7) Análise das propriedades tecnológicas dos tijolos.

#### **3.2.1 Preparação e caracterização física e química do solo**

Na Figura 3-1 é apresentado um fluxograma que demonstra os procedimentos experimentais que foram realizados nessa primeira etapa da metodologia da pesquisa. A extração do solo foi realizada no distrito de Mineiros de Campos dos Goytacazes - RJ, o processo de preparação do solo foi realizado na Arte Cerâmica

Sardinha em Campos dos Goytacazes - RJ e a caracterização física e química do solo no LECIV/UENF.

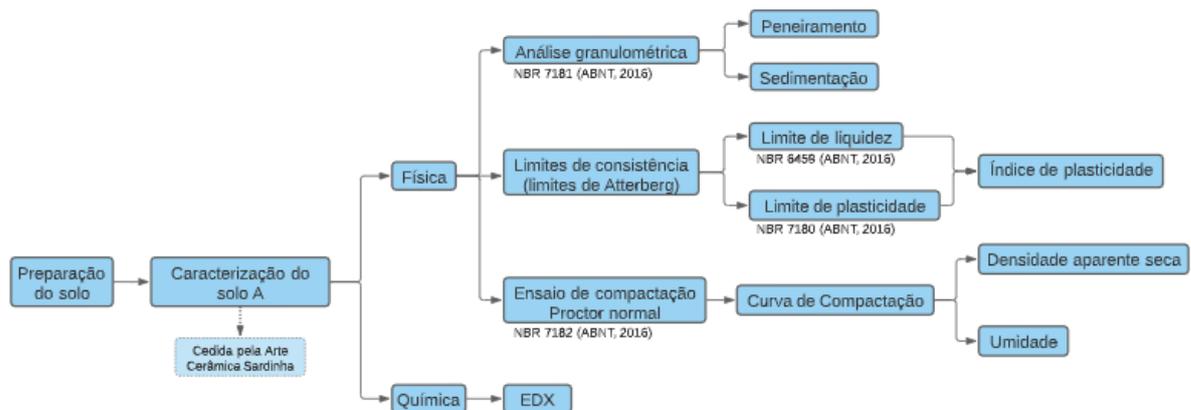


Figura 3-1 - Fluxograma dos procedimentos experimentais para preparação e caracterização física e química do solo

Fonte: Autoria própria.

Após a extração, para homogeneização e utilizado em todo o experimento, foi utilizado a fração do solo passante na peneira de 4,8 mm de abertura de malha ABNT, conforme recomendações da NBR 6457 (ABNT, 2016).

O solo foi seco ao ar livre em local com ausência de contaminantes, após o processo de secagem, o solo foi colocado em saco plástico para evitar ganho de umidade.

Foi realizado a preparação das amostras de solo para os ensaios de caracterização e de compactação, conforme a norma NBR 6457 (ABNT, 2016). Os ensaios e as caracterizações aplicadas ao solo estão listados nos tópicos seguintes.

### 3.2.1.1 Análise granulométrica

A curva da distribuição granulométrica do solo A foi realizada no Laboratório de Solos do LECIV da UENF, em duas etapas, primeiro foi feito um peneiramento do solo e depois a sedimentação, de acordo com os procedimentos da NBR 7181 (ABNT, 2016).

Esse ensaio é importante para ver a dimensão das partículas do solo e suas respectivas proporções, podendo assim conhecer melhor o solo trabalhado e definir se as características que o solo apresenta são próprias, normativamente, para produzir tijolo de solo-cimento.

Sobre esse assunto, a NBR 10833 (ABNT 2012) determina os seguintes requisitos gerais, que o solo para produção de tijolo de solo-cimento deve atender (Tabela 3-1).

Tabela 3-1 - Requisitos para seleção de solo

Características	Requisitos (%)
% passante na peneira ABNT 4,75 mm (nº4)	100
% passante na peneira ABNT 0,075 mm (nº200)	10 a 50
Limite de Liquidez (LL)	≤ 45
Índice de Plasticidade (IP)	≤ 18

Fonte: Adaptada de NBR 10833 (ABNT 2013).

### 3.2.1.2 Limites de consistência - limites de Atterberg

Os Limites de Liquidez (LL) e do Limite de Plasticidade (LP) do solo A foi realizada no Laboratório de Solos do LECIV da UENF, de acordo com as normas NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente.

Após determinar o LL e LP, foi obtido o Índice de Plasticidade (IP), utilizando na Equação 3.1:

$$IP (\%) = LL - LP \quad (\text{Eq. 3.1})$$

A determinação dos limites de consistência (limites de Atterberg) do solo utilizado na produção de tijolo de solo-cimento é importante para atender a critérios normativos de tijolos de solo-cimento (Tabela 3-1). Além de ser uma das características de solo mais importante para a engenharia, uma vez que determina o comportamento deste submetido a tensão e deformação.

### 3.2.1.3 Ensaio de compactação Proctor normal

O ensaio de compactação Proctor normal do solo A foi realizada em acordo com os procedimentos normativos da NBR 7182 (ABNT, 2016), no Laboratório de Solos do LECIV da UENF.

Determinar a curva de compactação de um solo é importante para obter uma correlação entre o teor de umidade e a densidade aparente seca, para assim determinar a umidade ótima do solo, obtida por meio da densidade aparente seca máxima.

Foi utilizado o ensaio de Próctor como parâmetro para determinar a umidade desejada dos tijolos. Na Figura 3-2 abaixo é possível observar algumas etapas da

execução do ensaio, a execução do ensaio (a) e após o ensaio para pesagem do material no recipiente cilíndrico e retirada do material para estufa (b).



Figura 3-2 - Execução do ensaio de compactação Proctor normal

Fonte: Autoria própria.

#### 3.2.1.4 Caracterização química

A caracterização química do solo A foi realizada por meio do ensaio semiquantitativo de espectroscopia de fluorescência de raios X (EDX), no equipamento Shimadzu EDX-700, do LECIV/UENF (Figura 3-3). O ensaio de EDX é uma técnica analítica para a caracterização química ou análise elementar de uma amostra.



Figura 3-3 - Equipamento Shimadzu EDX-700 do LECIV/UENF.

Fonte: Autoria própria.

### 3.2.2 Definição do percentual de areia (10%, 20%, 30%, 40% ou 50%) em substituição parcial do solo cedido para a pesquisa.

Para determinar o percentual de areia que substituiu parcialmente o solo cedido para a pesquisa foi utilizado o método de empacotamento de partículas, juntamente com a verificação da moldagem dos tijolos.

#### 3.2.2.1 Empacotamento de partículas, modelos matemáticos e EMMA.

Foi utilizado o método de empacotamento de partículas como metodologia inicial para determinar o percentual que foi adicionado no solo A.

O modelo matemático adotado para servir de instrumento na distribuição granulométrica dos materiais granulares foi o modelo de Andreassen modificado ou Alfred. A escolha desse modelo se deu por se assemelhar mais em composições reais, uma vez que é determinado um valor mínimo de tamanho de partícula para o sistema, não considerando assim tamanhos de partículas excessivamente pequenos, o que não é o caso, por exemplo, do modelo de Andreassen. Além do modelo de Alfred também considerar composições com partículas de tamanhos diferentes, o que não acontece no modelo de Furnas (SARKAR, 2016).

De acordo com Pinto *et al.* (2021), o modelo de Alfred é expresso pela equação 3.2.

$$CPFT (\%) = \left( \frac{D^q - D_s^q}{DL^q - D_s^q} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Onde:

CPFT = Percentual de partículas menores que o diâmetro D;

D = Diâmetro da partícula analisada;

DL = Diâmetro da maior partícula;

Ds = Diâmetro da menor partícula;

q = módulo de coeficiente de distribuição de partículas.

O software analisador de mistura de materiais utilizado nessa pesquisa para a análise do empacotamento de partículas foi o Elkem Material Mix Analyzer (EMMA).

Inicialmente, foi necessário fazer a análise granulométrica da areia que substituiu parcialmente o solo da pesquisa. Com posse da análise granulométrica dos materiais, foi feito um novo cadastro de materiais na biblioteca do programa, cadastrando o solo A e a areia que foi adicionada.

Após a inserção dos materiais, foi adicionado os dois materiais de análise no design da mistura; a massa específica dos materiais (obtida da análise granulométrica); o modelo de empacotamento utilizado (Alfred); o valor do diâmetro da maior partícula e da menor partícula (obtida na análise granulométrica); o consumo de cada material em  $\text{kg/m}^3$  por metro cúbico, em cada composição que se deseja analisar; o valor do coeficiente de distribuição  $q$ . Os coeficientes utilizados foram:  $q = 0,1$ ;  $q = 0,2$ ;  $q = 0,3$ ;  $q = 0,4$ .

O cálculo do consumo de cada material em  $\text{kg/m}^3$  de cada traço partiu dos traços da pesquisa. O consumo foi calculado com base em  $1\text{m}^3$  de mistura, utilizando a composição dos traços, o volume de cada componente dos traços e a massa de cada material (Tabela 3-2).

Tabela 3-2 - Traços em volume e o consumo de cada material em kg para  $1\text{m}^3$  de mistura

Traços	Solo A:areia	Consumo ( $\text{kg/m}^3$ )	
		Solo A	Areia
Traço 1	90:10	2367	264
Traço 2	80:20	2104	528
Traço 3	70:30	1841	792
Traço 4	60:40	1578	1056
Traço 5	50:50	1315	1320

Fonte: Autoria própria.

O software fornece a curva granulométrica resultante do modelo matemático teórico utilizado, tanto em formato de tabela, como na forma gráfica. Com base na curva teórica fornecida, são inseridas as quantidades de cada material utilizado, buscando um ajuste perfeito da curva da mistura à teórica, os quantitativos de materiais inseridos foram os 5 traços distintos da Tabela 3-2. Portanto, o melhor fator de empacotamento é aquele em que a curva de distribuição granulométrica mais se aproximou da fornecida pelo modelo de Alfred.

Para cada traço foram feitas simulações com 4 coeficientes de ajustes – coeficiente de distribuição - ( $q$ ), resultando em 20 formulações para definição da composição com maior fator de empacotamento.

### 3.2.2.2 Verificação da moldagem dos tijolos

A verificação da moldagem dos tijolos, juntamente com o método de empacotamento de partículas, foi o método adotado para definir o percentual de areia utilizado para substituir parcialmente o solo cedido. O método consistiu em produzir

dois tijolos, no traço de referência dessa pesquisa ( $Tr_2$ ), para cada composição de incorporação de areia (10%, 20%, 30%, 40% e 50%) e verificar se é possível compactar e moldar os tijolos.

Todos os tijolos de cada composição foram produzidos na mesma umidade, ou seja, na umidade de Proctor determinada. A pressão de prensagem utilizada pela Turbo II da Eco Máquinas foi de 150 bar (15 Mpa), o que resulta na mesma força de prensagem para a produção dos tijolos da presente pesquisa. Toda a metodologia de preparo de material seguiu de forma idêntica a metodologia adotada para a presente pesquisa. Para a análise da prensagem e moldagem dos tijolos foram produzidos 10 tijolos ao todo, 2 de cada traço.

### 3.2.3 Definição da composição das misturas da pesquisa

Para determinação dos traços da pesquisa, foram definidas duas misturas de referência: uma com 95% de solo e 5% de cimento ( $Tr_1$ ), e outra com 90% de solo e 10% de cimento ( $Tr_2$ ). Os solos das duas misturas foram então substituídos, de forma parcial, por cal hidratada (5% e 10%), formando assim  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  e  $T_4$ . Além disso, nos traços em que têm 10% de cimento, foi feito um estudo experimental ao adicionar a cal ao solo 24 horas antes da adição de cimento na mistura ( $T_{3\ 24h}$  e  $T_{4\ 24h}$ ) (Tabela 3-3).

Tabela 3-3 - Determinação dos traços da pesquisa:

Denominação	Cimento	Solo	Cal
$Tr_1$	05%	95%	-
$T_1$	05%	90%	5%
$T_2$	05%	85%	10%
$Tr_2$	10%	90%	-
$T_3$	10%	85%	5%
$T_4$	10%	80%	10%
$T_{3\ 24h}$	10%	85%	5%
$T_{4\ 24h}$	10%	80%	10%

Fonte: Autoria própria.

### 3.2.4 Determinar o tipo de cura utilizada na pesquisa

Na Figura 3-4 é apresentado um fluxograma que demonstra os procedimentos experimentais que foram realizados para determinar o tipo de cura que foi utilizada na pesquisa. O preparo da mistura de solo-cimento, a produção dos corpos de prova (CPs) e os ensaios foram realizados no LECIV/UENF.

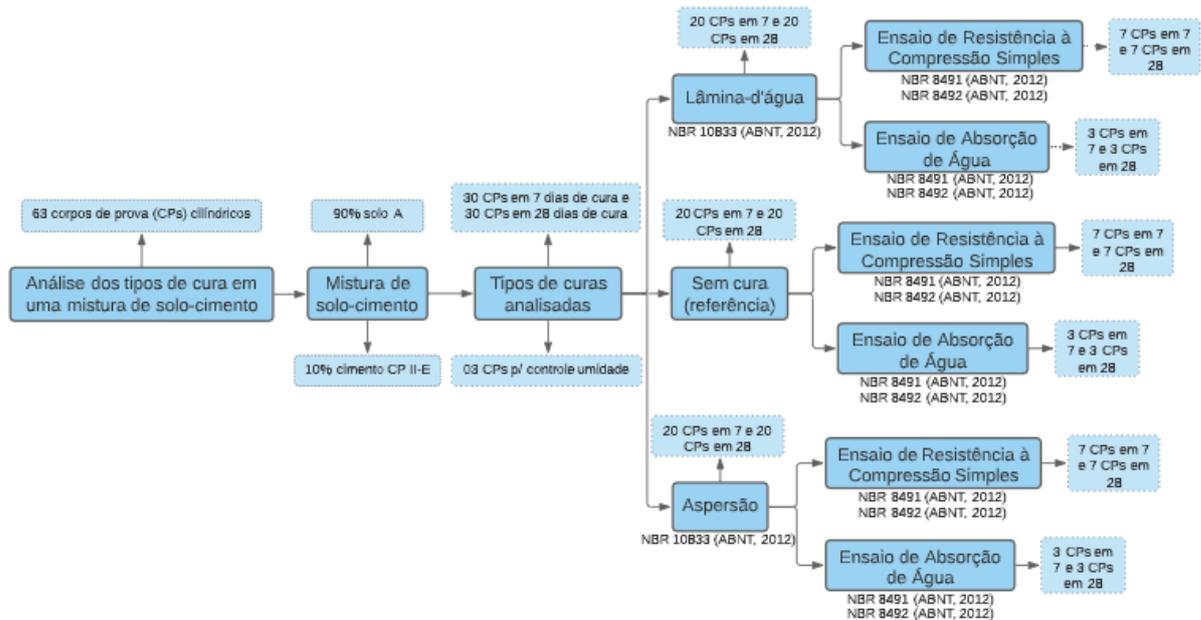


Figura 3-4 - Fluxograma dos procedimentos experimentais para determinação do tipo de cura utilizada na pesquisa

Fonte: Autoria própria.

O solo utilizado na mistura de solo-cimento foi o solo A e o cimento foi o CP II-E (3.1). O solo foi preparado e realizado a caracterização física e química (3.2.1), sendo assim foi determinado a análise granulométrica, os limites de Atterberg, o ensaio de Proctor e a caracterização química.

Foi determinado que os CPs serão avaliados na análise dimensional, resistência à compressão e absorção de água, em 7 e 28 dias de cura, por meio de três diferentes tipos de cura. Portanto, para realizar a mistura, foi levantado o quantitativo de CPs produzidos (63), 60 CPs para os ensaios de resistência à compressão e absorção de água, com todos sendo avaliados em análise dimensional e 3 CPs para a verificação da umidade. Esses parâmetros foram seguidos com base nas exigências normativas (Tabela 3-4) da NBR 8491 (ABNT, 2012) e da NBR 8492 (ABNT, 2012).

Tabela 3-4 - Exigências para avaliação de solo-cimento

Características analisadas	nº de Amostra	Exigência NBR 8491	Idade mínima
Análise dimensional	10	$\pm 1$ mm p/ cada dimensão	-
Resistência à compressão	7	Valor médio $\geq 2,0$ Mpa	7 dias de cura
		Valor individual $\geq 1,7$ Mpa	
Absorção de água	3	Valor médio $\leq 20\%$	
		Valor individual $\leq 22\%$	

Fonte: Adaptada de NBR 8491 (ABNT, 2012) e NBR 8492 (ABNT, 2012).

Com base na composição da mistura de solo-cimento (90% solo e 10% cimento), no quantitativo total de CPs (63) e com o peso estipulado que cada corpo de prova tenha 100 gramas, foi levantado o quantitativo total de material necessário para a produção.

Após a pesagem do material com a ajuda de uma balança de precisão, respeitando a proporção da mistura, os materiais foram misturados em um recipiente, adicionando a água de forma gradual, misturando os materiais, até atingir a umidade desejável (umidade de Proctor).

Após a mistura estar homogeneizada, foi iniciado o processo de produção dos corpos de prova, pesando 100 gramas da mistura por vez, e com o auxílio dos equipamentos, moldando na prensa (foi utilizada a força de 1 (uma) tonelada-força aplicada por 10 segundos para moldar cada CP). Enquanto a moldagem é realizada foi colocado um pano umedecido no recipiente da mistura, com intuito de manter a umidade da mistura, deixando todos os CPs padronizados. Na Figura 3-5 abaixo é possível visualizar a prensa utilizada para a produção dos CPs (a), assim como os equipamentos utilizados (b) e a mistura realizada (c).



Figura 3-5 - Procedimentos e equipamentos utilizados para mistura e moldagem os CPs

Fonte: Autoria própria.

Após a produção os CPs foram submetidos a três tipos de cura, de referência - sem cura (10 CPs), por lâmina-d'água (10 CPs) e por aspersão (10 CPs) durante 7 dias e o mesmo quantitativo de CPs para 28 dias de cura. Os tipos de cura analisados têm como fundamento manter os elementos úmidos, com objetivo de garantir a cura necessária, assim como recomenda a NBR 10833 (ABNT, 2013). Esse processo é essencial para misturas de solo-cimento, uma vez que a cura é necessária para hidratação do cimento e conseqüente aumento da resistência e melhoria das propriedades.

Na Figura 3-6 é possível visualizar os três tipos de cura utilizados. Na cura de referência os CPs foram armazenados em um recipiente e deixado aberto pelo tempo de cura (a). Na cura por lâmina-d'água os CPs foram armazenados em um recipiente juntamente com um mini reservatório de água e foram tampados com uma lona plástica (b), o mini reservatório de água funciona para umedecer toda a área interna, objetivando manter os CPs úmidos. Na cura por aspersão os CPs foram armazenados em um recipiente, deixado aberto, e três vezes ao dia (08h, 16h e 24h) foi adicionado água por meio de um borrifador (c), com objetivo de manter os CPs úmidos.

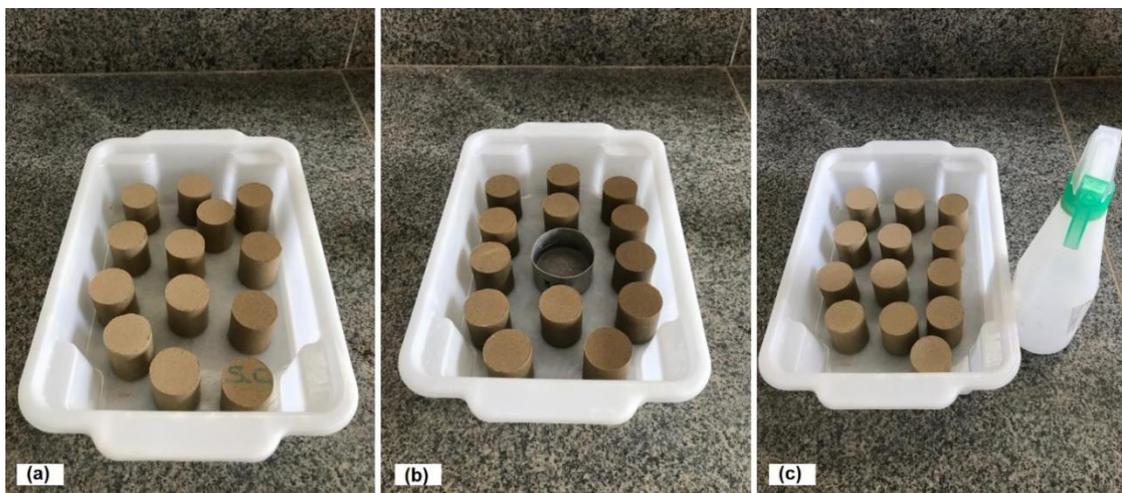


Figura 3-6 - Tipos de cura analisados: sem cura (referência), lâmina-d'água e aspersão

Fonte: Autoria própria.

Após 7 e 28 dias de cura, foram realizados ensaios nos CPs, de acordo com a NBR 8491 (ABNT, 2012) e NBR 8492 (ABNT, 2012), avaliando a resistência à compressão e absorção de água, além de ser realizado uma análise dimensional de todos os CPs ensaiados. Para a avaliação foi utilizada as exigências normativas de resistência à compressão e absorção de água (Tabela 3-4).

Na Figura 3-7 consta o paquímetro utilizado na análise dimensional (a), a realização do ensaio de absorção de água (b) e (c) e a realização do ensaio de resistência à compressão (d). A máquina utilizada para ensaio de resistência à compressão (d) é a Prensa Hidráulica Manual com Indicador Digital, da Solotest (referência 1504230 e série 13833), com capacidade de 100 toneladas-força (tnf) e com indicador eletrônico digital e bomba hidráulica manual. A carga do ensaio foi sendo elevada gradativamente até a ruptura.



Figura 3-7 - Procedimentos e equipamentos utilizados para avaliação e análise dos CPs

Fonte: Autoria própria.

### 3.2.5 Preparação da mistura nos traços determinados, moldagem e cura dos tijolos em câmara úmida.

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é apresentado um fluxograma que demonstra os procedimentos experimentais que serão realizados na quinta, sexta e sétima etapa da metodologia da presente pesquisa.

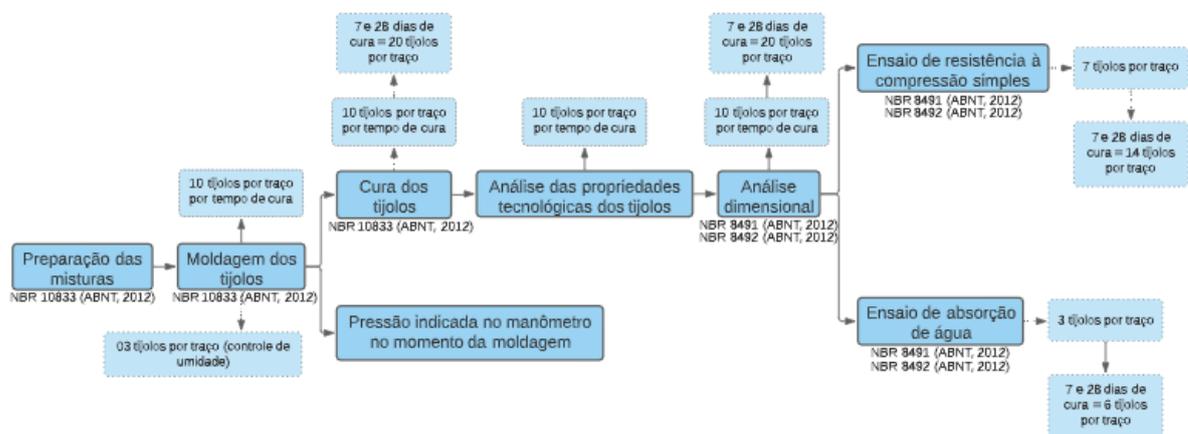


Figura 3-8 - Fluxograma para realização da 5ª, 6ª e 7ª etapa da metodologia

Fonte: Autoria própria.

### 3.2.5.1 Preparação da mistura

Com o uso de uma balança digital os componentes das misturas da presente pesquisa foram pesados e já ensacados com a identificação do traço em que fazem parte, sendo que o solo foi passado no triturador antes.

A mistura do solo-cimento é normatizada pela NBR 10833 (ABNT, 2013), a referida norma especifica que pode ser feita de forma manual ou mecânica. A mistura do presente estudo foi feita de forma mecânica, com o auxílio do triturador, obedecendo a seguinte ordem: solo (já destorroado e peneirado, 100% passante na peneira nº10), cal e cimento, tendo como objetivo formar uma massa uniforme.

A NBR 10833 (ABNT, 2013) traz mais detalhes a respeito da mistura da água na preparação do tijolo de solo-cimento, salientando que a água deve ser adicionada de forma gradual, misturando os materiais, até atingir a umidade desejável.

Para preparar a mistura dos traços determinados, a pesquisa teve auxílio do Pulverizador Costal Manual S12 12 Litros da Brudden, possuindo um gatilho que é acionado de forma suave e de fácil manuseio, ocasionando em uma pulverização constante e uniforme, além disso, possui um bico cone regulável o que proporciona uma ótima névoa de pulverização sem que haja gotejamento, o pulverizador pertence à Arte Cerâmica Sardinha. Com o auxílio do Pulverizador foi acrescentado um quantitativo de água, de forma gradual, na mistura até chegar à umidade desejada da presente pesquisa, determinada na dosagem.

### 3.2.5.2 Moldagem dos tijolos de solo-cimento

A moldagem dos tijolos de solo-cimento da presente pesquisa teve como base a NBR 10833 (ABNT, 2013), no dizer da referida norma, a fabricação dos tijolos de solo-cimento pode se dar por prensa manual ou hidráulica, e é recomendado que a mistura seja transferida, imediatamente, para o molde a fim de executar a prensagem e ao retirar os tijolos empilhá-los, à sombra, em uma superfície plana e lisa, com uma altura máxima de 1,5 m.

Para o desenvolvimento da pesquisa e produção dos tijolos de solo-cimento foi utilizado a prensa hidráulica modelo 7000 turbo II da Eco Máquinas pertencente à UENF, com capacidade para 2 tijolos, conforme a Figura 3-9. Os tijolos foram moldados com uma pressão de 150 bar (15 MPa), aplicada por três segundos e apresentando massa de 4,3 kg por tijolo; apresentam as dimensões de 30x15x7 (comprimento x largura x espessura), em centímetros, sendo que a espessura tem

uma variação de  $\pm 1,0$  cm. Os tijolos têm 2 furos, cada um com 8,67 centímetro de diâmetro, o que faz com que tenha uma área útil de 73,78%.

A força de prensagem utilizada para a produção dos tijolos foi determinada no sexto passo da metodologia.



Figura 3-9 - Prensa hidráulica utilizada na pesquisa para fabricação de tijolos de solo-cimento

Fonte: Autoria própria.

Com objetivo de determinar a umidade da produção dos tijolos por cada traço da presente pesquisa, foram prensados três tijolos em cada traço, tirado a média e o desvio padrão da umidade dos tijolos em cada traço.

Para a realização da presente pesquisa foram prensados 20 tijolos por traço (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), 10 para ensaios (7 RC e 3 AA) em 7 dias de cura e 10 para ensaios (7 RC e 3 AA) em 28 dias de cura. Além de 3 tijolos por traço para determinar a umidade de prensagem real de cada traço, totalizando 24 tijolos para controle de umidade. Portanto, como a pesquisa teve 8 traços analisados, para a realização de toda a pesquisa foram produzidos 184 tijolos, dos quais 160 foram curados para ensaios e 24 foram para controle de umidade da produção.

### 3.2.5.3 Cura dos tijolos

A metodologia de cura utilizada nessa pesquisa dependeu dos resultados do estudo comparativo de diferentes tipos de cura (quarta etapa da metodologia). Sendo assim, como a cura por lâmina-d'água obteve os melhores resultados na análise dos

diferentes tipos de cura em misturas de solo-cimento, a mesma foi adotada para a cura dos tijolos produzidos. Logo, a cura consistiu em armazenar os tijolos em pallets e os cobrir com lona plástica, com um balde com água na parte interna para umedecer toda a área, visando manter os tijolos úmidos.

A cura foi realizada 20 tijolos por traço, 10 tijolos por traço para os primeiros 7 dias de cura e 10 tijolos por traço para os 28 dias de cura, participando, assim, da cura, 160 tijolos.

### **3.2.6 Determinar a força de prensagem para a produção dos tijolos**

Na prensa hidráulica utilizada para a produção dos tijolos da presente pesquisa existe um manômetro que indica a força de pressão em bar e psi no momento em que os tijolos são prensados (Figura 3-10).



Figura 3-10 - Manômetro da prensa hidráulica

Fonte: Autoria própria.

Sabendo a pressão que os tijolos foram moldados (150 bar), com o conceito de pressão e com a área de contato da prensa com o tijolo (área da superfície do tijolo), foi calculado a força de prensagem que a prensa hidráulica utilizou para produção dos tijolos.

### **3.2.7 Análise das propriedades tecnológicas dos tijolos**

Nessa etapa foi feita as determinações e ensaios nos tijolos de solo-cimento, sendo elas: análise dimensional, ensaio de resistência à compressão simples e ensaio de absorção de água.

### 3.2.7.1 Análise dimensional

A análise dimensional foi feita para avaliar as dimensões dos tijolos após a prensagem, com a finalidade de atenderem as tolerâncias permitidas em suas dimensões. Após a retirada dos tijolos da cura para serem realizados os ensaios de resistência à compressão simples e de absorção de água os tijolos foram analisados em relação às suas dimensões.

Seguindo as diretrizes normativas da NBR 8492 (ABNT, 2012), foi utilizado para essa determinação uma escala metálica ou paquímetro com uma resolução de pelo menos 0,5 mm, com comprimento suficiente para a dimensão máxima do tijolo. A realização da análise foi feita para cada dimensão do tijolo, sendo feita pelo menos três medidas em pontos diferentes de cada face, com uma medida em cada extremidade e uma no meio do corpo de prova, com uma exatidão de 0,5 mm. O tamanho de cada face foi determinado pela média das três determinações, em décimo de unidade, na unidade de mm.

A análise dimensional foi feita em 20 tijolos por traço, 10 tijolos por traço para os primeiros 7 dias de cura e 10 tijolos por traço para os 28 dias de cura, participando, assim, desse ensaio 160 tijolos.

Sobre a análise dimensional a NBR 8491 (ABNT, 2012) regulamenta que, a amostra ensaiada com determinações da NBR 8492 (ABNT, 2012) deve satisfazer as tolerâncias que são permitidas nas dimensões nominais dos tijolos de  $\pm 1,00$  mm para o comprimento, largura e altura.

### 3.2.7.2 Ensaio de resistência à compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados em concordância com as determinações da NBR 8491 (ABNT, 2012) e NBR 8492 (ABNT, 2012). Todo o procedimento do ensaio foi realizado no LECIV/UENF.

Após o período de cura, os tijolos destinados a esse ensaio foram cortados ao meio, perpendicular à sua maior dimensão; suas faces superpostas ligando-as com uma camada fina de pasta de cimento Portland (cimento e água), de modo que os rebaxos (baixo relevo dos tijolos) fique na parte externa; após a secagem, foi feito um capeamento com a pasta de cimento Portland respeitando a espessura máxima de 3 mm; após a secagem e endurecimento do material, os tijolos foram imersos em água por 6 horas.

Após o tempo de imersão, os tijolos foram retirados da água logo antes do ensaio e enxugados superficialmente por um pano levemente umedecido; os tijolos então foram rompidos na Prensa hidráulica manual com indicador digital, da Solotest (referência 1504230 e série 13833), com capacidade de 100 toneladas-força (tnf) e com indicador eletrônico digital e bomba hidráulica manual. A carga do ensaio foi sendo elevada gradativamente até a ruptura.

Para a realização da resistência à compressão simples foram confeccionados 7 corpos de prova para cada traço estudado e para cada tempo de cura (7 e 28 dias), totalizando então 14 tijolos por traço e 112 tijolos no total.

De acordo com a NBR 8491 (ABNT, 2012), a amostra ensaiada, não pode apresentar valores médios de resistência à compressão menores do que 2,0 Mpa (20 kgf/cm<sup>2</sup>) nem um valor individual de 1,7 Mpa, no tempo de cura de, no mínimo, sete dias. A Figura 3-11 mostra os procedimentos para ao preparo do tijolo (a) e (b) e a realização do ensaio (c).

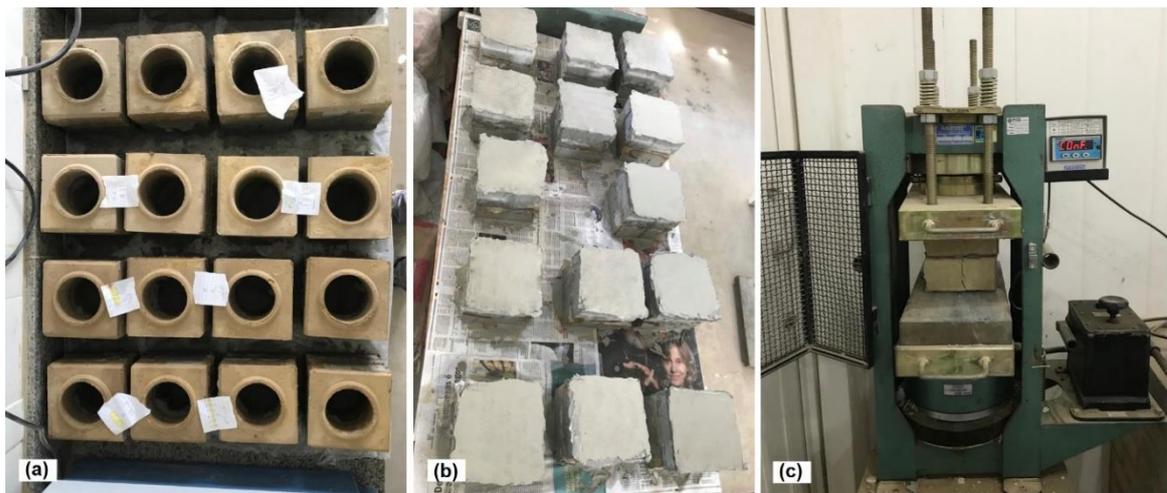


Figura 3-11 - Procedimentos do ensaio de resistência à compressão

Fonte: Autoria própria.

### 3.2.7.3 Ensaio de absorção de água

Os ensaios de absorção de água foram feitos em concordância com as determinações da NBR 8491 (ABNT, 2012) e NBR 8492 (ABNT, 2012). Todo o procedimento do ensaio foi realizado no LECIV/UENF.

Para a realização desse ensaio foi utilizado uma balança com 10 kg de capacidade e solução de 1 g, uma estufa que mantenha a temperatura entre 105 e 110 ° C e um tanque de imersão NBR 8492 (ABNT, 2012).

Após o período de cura, os tijolos foram colocados em uma estufa (105 °C), até a constância da massa, obtendo assim a  $m_1$  (massa do tijolo seco). Depois que os tijolos atingirem a temperatura ambiente, foram imersos em um tanque por 24 horas. Após a retirada dos tijolos, foi necessário enxugar, de forma superficial, com um pano um pouco umedecido e pesar antes mesmo de passar três minutos que se retirou os tijolos, obtendo assim a massa do tijolo saturado  $m_2$ . Na Figura 3-12 é possível observar os tijolos na estufa (a) e imersos em um recipiente com água (b).



Figura 3-12 - Procedimentos do ensaio de absorção de água

Fonte: Autoria própria.

O cálculo da absorção de água é expresso na Equação abaixo.

$$A (\%) = \left( \frac{m_2 - m_1}{m_1} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Para a realização da absorção de água foram confeccionados 3 corpos de prova para cada traço estudado e para cada tempo de cura (7 e 28 dias), totalizando então 6 tijolos por traço e 48 tijolos no total.

De acordo com a NBR 8491 (ABNT, 2012), a amostra ensaiada, não pode apresentar valores médios de absorção de água maiores do que 20% nem valores individuais superiores a 22%, no tempo de cura de, no mínimo, sete dias.

### 3.2.8 Análise estatística dos resultados experimentais

Para a análise estatística do estudo em questão, foi feita uma Análise de Variância (ANOVA), com intuito de verificar se existe diferença significativa entre as

médias das características analisadas, com nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ). Após a verificação ou não de diferenças significativas foi utilizado o teste de médias de Tukey, para determinar quais traços diferem entre si.

O processo de análise estatística ocorreu nos resultados dos ensaios de AA e RC no estudo dos diferentes tipos de cura em CPs cilíndricos e nos resultados dos ensaios de AA e RC no estudo das propriedades tecnológicas do tijolo de solo-cimento com adição de cal.

Para o cálculo da ANOVA foi utilizado o programa Excel da Microsoft e para auxiliar nos testes de Tukey o programa Past v. 4.03 disponibilizado por Oyvind Hammer. Todos os resultados, são apresentados nos Anexos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios experimentais da presente pesquisa.

### 4.1 Caracterização física e química do solo cedido

Os resultados da caracterização física e química do solo cedido para a realização da presente pesquisa são apresentados abaixo.

#### 4.1.1 Análise granulométrica

A Figura 4-1 representa a curva de distribuição granulométrica do solo cedido para a presente pesquisa. O solo apresenta em sua constituição 40% de areia (24% fina, 10% média e 6% grossa), 31% de silte e 29% de argila.

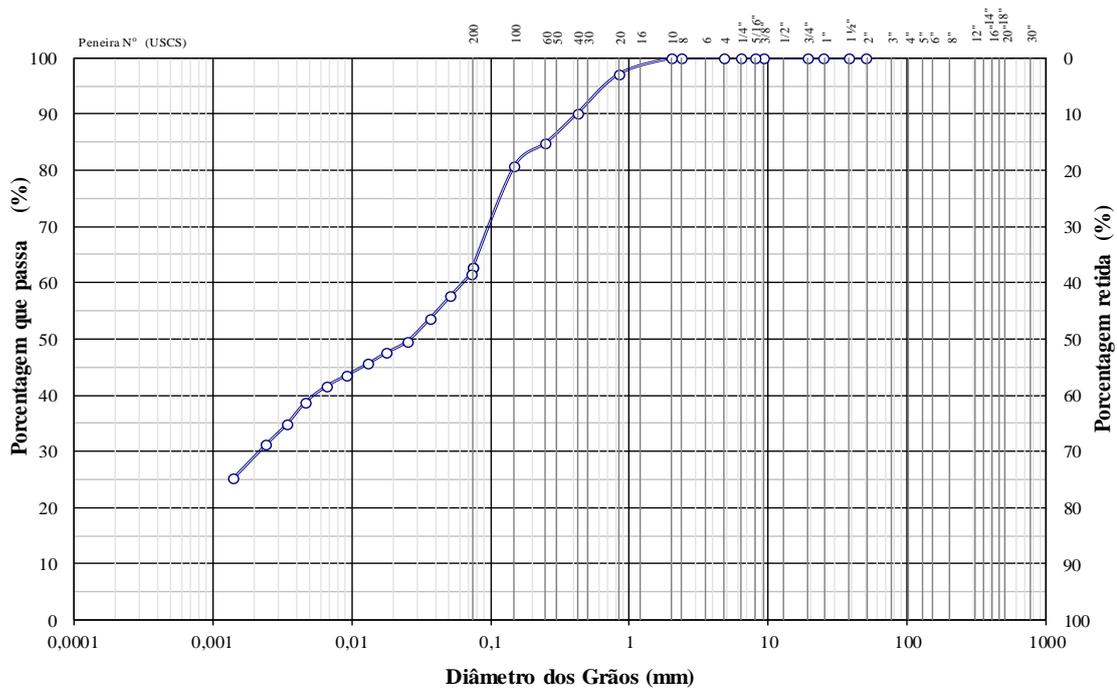


Figura 4-1 - Análise granulométrica do solo A

Apesar do solo A ter 100% do seu material passante na peneira ABNT 4,75 mm (nº4), aproximadamente 62% passa na peneira ABNT 0,075mm (nº 200), o que torna a composição do solo A não própria para produzir tijolo de solo-cimento (Tabela 3-1). Logo, para que o solo A possa ser utilizada na produção de solo-cimento, foi realizada uma substituição parcial desse solo por uma areia proveniente do Rio Paraíba do Sul, de modo a estabilizar o solo mecanicamente por meio dessa correção granulométrica. O percentual substituído foi definido em 4.2.

#### 4.1.2 Limites de consistência – limites de Atterberg

A Figura 4-2 apresenta o resultado das propriedades físicas do solo A. Sobre os limites de Atterberg, o solo apresenta um Limite de Liquidez de 39,2% e Limite de Plasticidade de 24,9%, o que ocasiona em um Índice de Plasticidade de 14,3%.

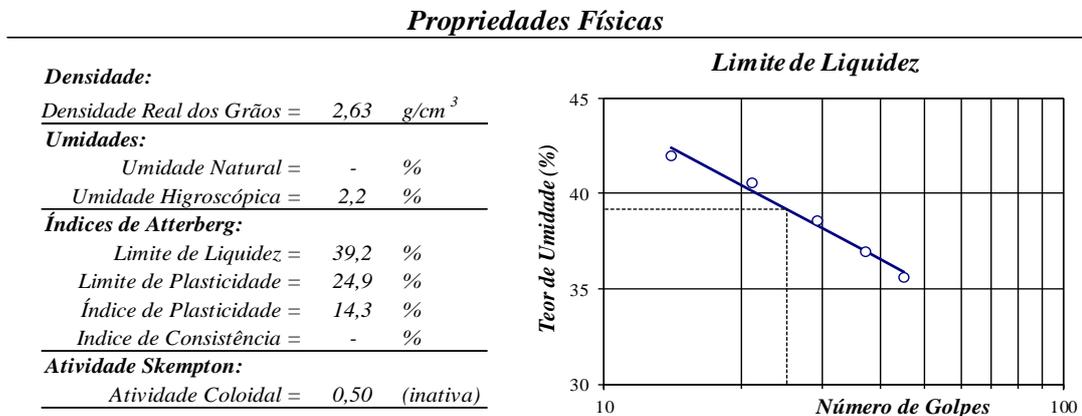


Figura 4-2 - Limites de Atterberg

Os limites de atterberg do solo A demonstram que, em relação a esses limites, o solo atende aos parâmetros normativos de tijolo de solo-cimento, uma vez que o Limite de Liquidez obtido foi 39,2%, sendo menor ou igual a 45%, e Índice de Plasticidade foi de 14,3%, com valor menor ou igual a 18% (Tabela 3-1).

#### 4.1.3 Ensaio de compactação Proctor normal

A Figura 4-3 ilustra o resultado do ensaio de Proctor normal realizado no solo A, a densidade aparente seca máxima obtida foi de 1,63 g/cm<sup>3</sup> com uma umidade ótima de 18,6%.

### *Varição da densidade aparente seca com a umidade*

*Dens. aparente seca máxima 1,630 g/cm<sup>3</sup> Umidade ótima 18,6 %*

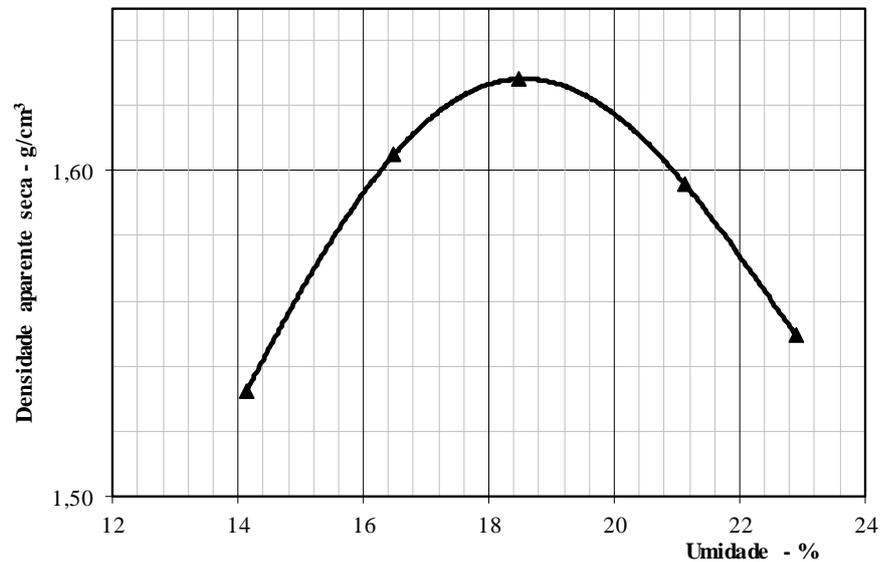


Figura 4-3 - Ensaio de compactação Proctor normal

Foi utilizado o ensaio de Próctor como parâmetro para determinar a umidade (w) desejada dos tijolos.

#### 4.1.4 Caracterização química

A caracterização química do solo A, realizada por meio do ensaio semiquantitativo de espectroscopia de fluorescência de raios X (EDX), é apresentada na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 - Composição química do solo

Composição química (%)	
SiO <sub>2</sub>	43,83
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36,85
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,46
K <sub>2</sub> O	2,73
SO <sub>3</sub>	2,07
TiO <sub>2</sub>	1,95
CaO	0,82
MnO	0,09
ZrO <sub>2</sub>	0,07
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,06
CuO	0,03
ZnO	0,03
SrO	0,01

Com os resultados do EDX pode ser observado que o solo A da presente pesquisa possui uma quantidade de 43,83% de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), implicando em uma possível existência dos argilominerais do grupo da caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e da illita, assim como a possível presença do mineral quartzo na amostra total. O quantitativo de 36,85% de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) sugere a formação de argilominerais e hidróxidos como por exemplo a gibbsita -  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . O quantitativo de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) de 80,68% indica uma possível refratariedade da matéria-prima. Consideráveis teores de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e a presença do titânio ( $\text{TiO}_2$ ) refletem a coloração marrom do solo. A existência do potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) pode estar associada a existência de feldspatos potássicos na amostra.

A presença de grande quantidade de  $\text{SiO}_2$  (sílica) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (alumina) (80,68%) é um fator positivo para a reação com a cal, uma vez que são componentes químicos fortemente influentes na pozolanicidade das argilas, sendo, portanto, reagentes essenciais do sistema “pozolana + cal + água” (2.4.2).

Um estudo de relevância de caracterização das argilas do município de Campos dos Goytacazes foi realizado por Alexandre (1997), onde das 21 amostras retiradas em jazidas, o argilomineral dominante foi do grupo da caulinita, com quantitativos relevantes de sílica e alumina, evidenciando, assim, a tipicidade do solo da região.

O solo A da presente pesquisa possui composição química parecida com solos da região de Campos dos Goytacazes, assim como é possível encontrar no estudo com tijolo de solo-cimento de Azevedo *et al.* (2019).

## **4.2 Definição do percentual de areia**

Foi realizada uma substituição parcial do solo A por uma areia proveniente do Rio Paraíba do Sul, já que o solo A da presente pesquisa não possui características, normativamente, para produzir tijolo de solo-cimento (4.1.1).

O resultado do estudo da escolha do percentual substituído é tratado ao longo dessa seção, em que foi dividida em método de empacotamento de partículas e verificação da moldagem dos tijolos.

### **4.2.1 Método de empacotamento de partículas**

Primeiramente foi determinado a análise granulométrica da areia proveniente do Rio Paraíba do Sul, apresentando em sua composição 95% de areia (6% fina, 47%

média e 42% grossa), 4% de pedregulho e 1% de silte, com uma densidade real dos grãos de 2,64 g/cm<sup>3</sup> (Figura 4-4). A análise granulométrica do solo A da presente pesquisa já foi obtida (Figura 4-1) e suas propriedades físicas (Figura 4-2).

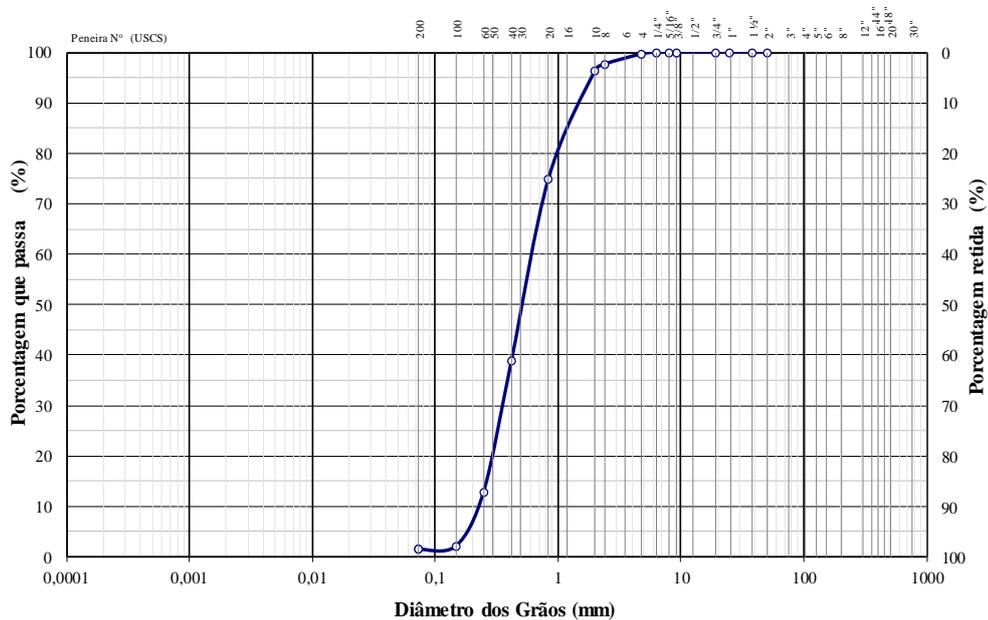


Figura 4-4 - Análise granulométrica areia proveniente do Rio Paraíba do Sul

Os dados de entrada foram inseridos no software Elkem Material Mix Analyzer (EMMA), com base em 3.2.2.1.

As curvas das dosagens demonstram o empacotamento das partículas para os componentes secos, de acordo com a granulometria, proporção e densidade a partir do modelo de Alfred. Foram definidos os seguintes valores para o módulo de coeficiente de distribuição de partículas ( $q$ ): 0,10, 0,20, 0,30, 0,40 e para cada nicho de traço (em volume) 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 e 50:50, gerando assim 5 formulações distintas com 4 coeficientes de ajustes, gerando 20 composições gráficas no total.

Utilizando o software EMMA foi possível obter a curva teórica ideal com maior empacotamento (modelo matemático de Alfred) em vermelho e as formulações obtidas para cada coeficiente de distribuição ( $q$ ) em cada traço (Traço 1, Traço 2, Traço 3, Traço 4 e Traço 5) proposto em azul, assim como é possível observar nas imagens abaixo (Figura 4-5, Figura 4-6, Figura 4-7, Figura 4-8 e Figura 4-9). Tal análise permite determinar o melhor valor do coeficiente de distribuição ( $q$ ) para cada traço.

Foi analisado também os gráficos de cada traço com o seu melhor coeficiente de distribuição ( $q$ ), para determinar o melhor fator de empacotamento entre os traços (Figura 4-10).

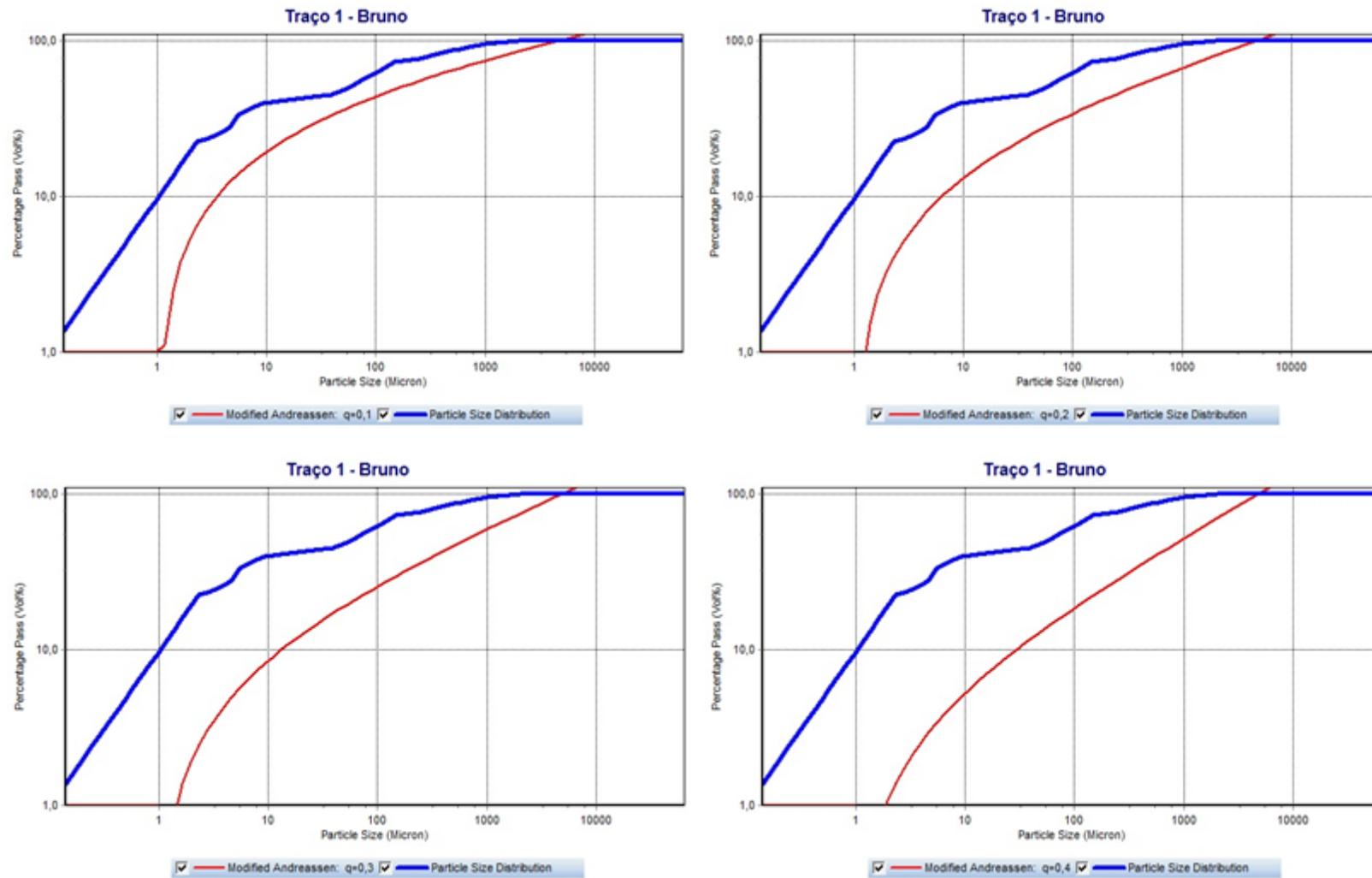


Figura 4-5 - Formulações do Traço 1 (90:10) com  $q = 0,1$ ,  $q = 0,2$ ,  $q = 0,3$  e  $q = 0,4$

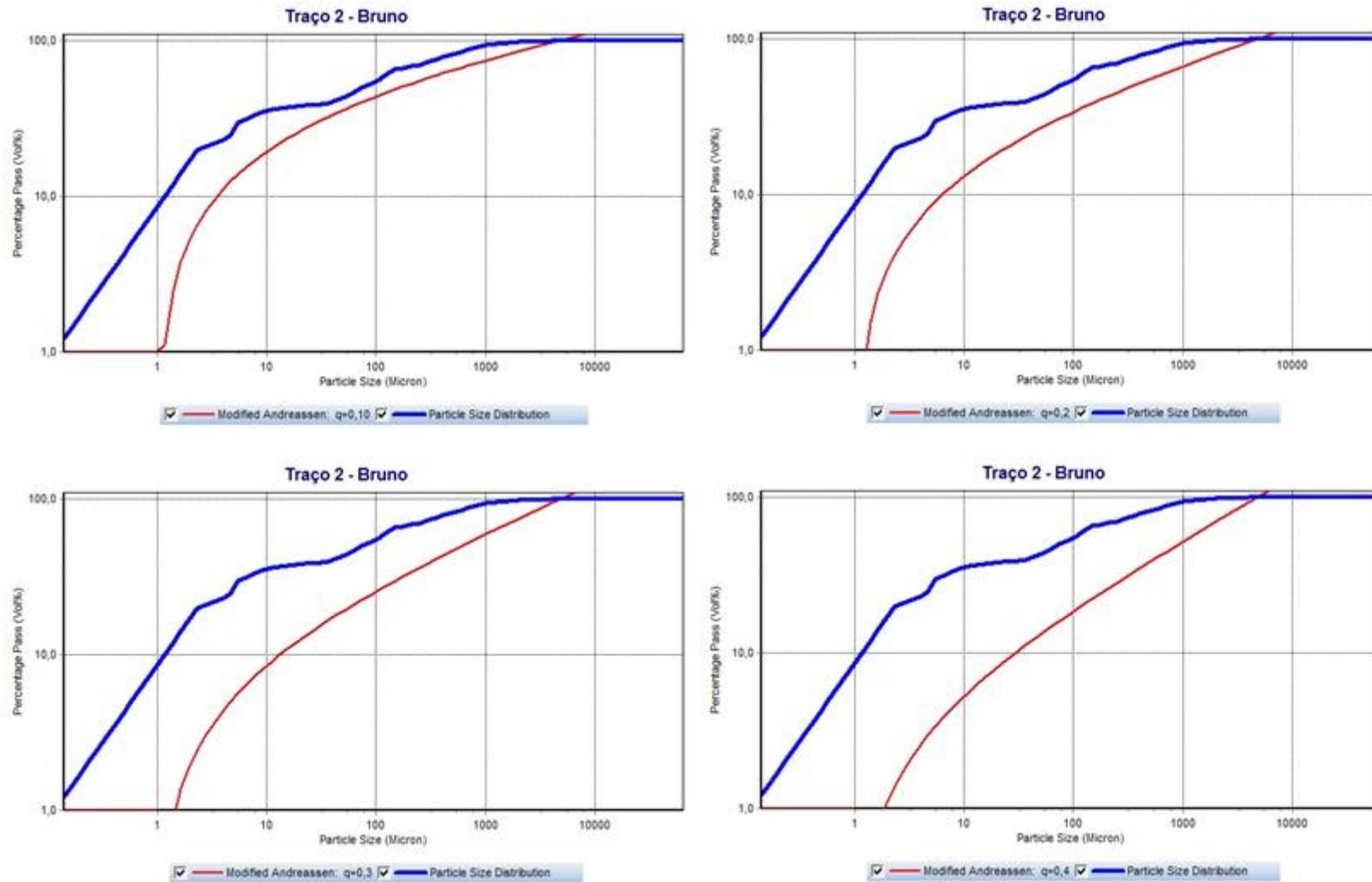


Figura 4-6 - Formulações do Traço 2 (80:20) com  $q = 0,1$ ,  $q = 0,2$ ,  $q = 0,3$  e  $q = 0,4$

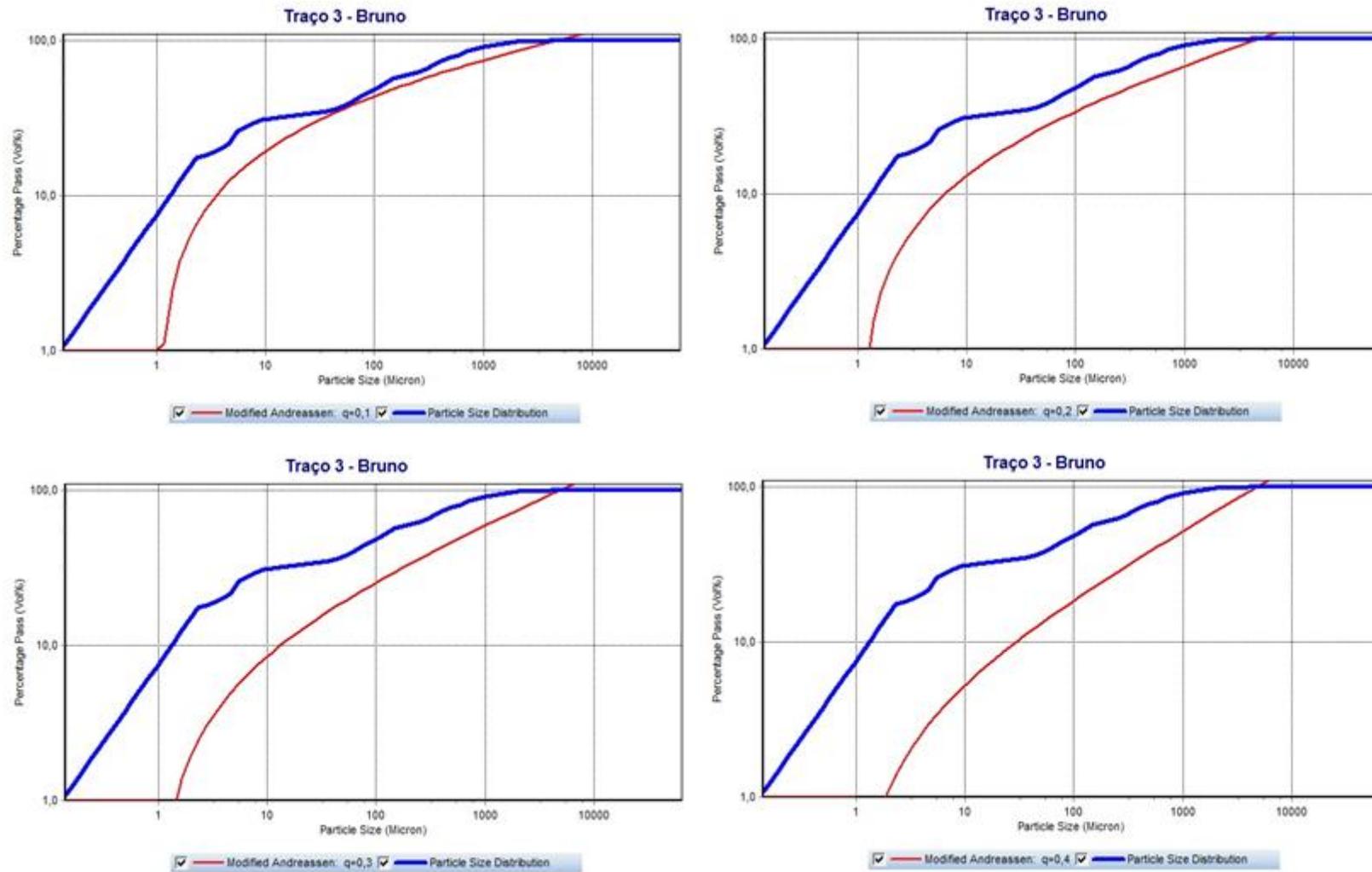


Figura 4-7 - Formulações do Traço 3 (70:30) com  $q = 0,1$ ,  $q = 0,2$ ,  $q = 0,3$  e  $q = 0,4$

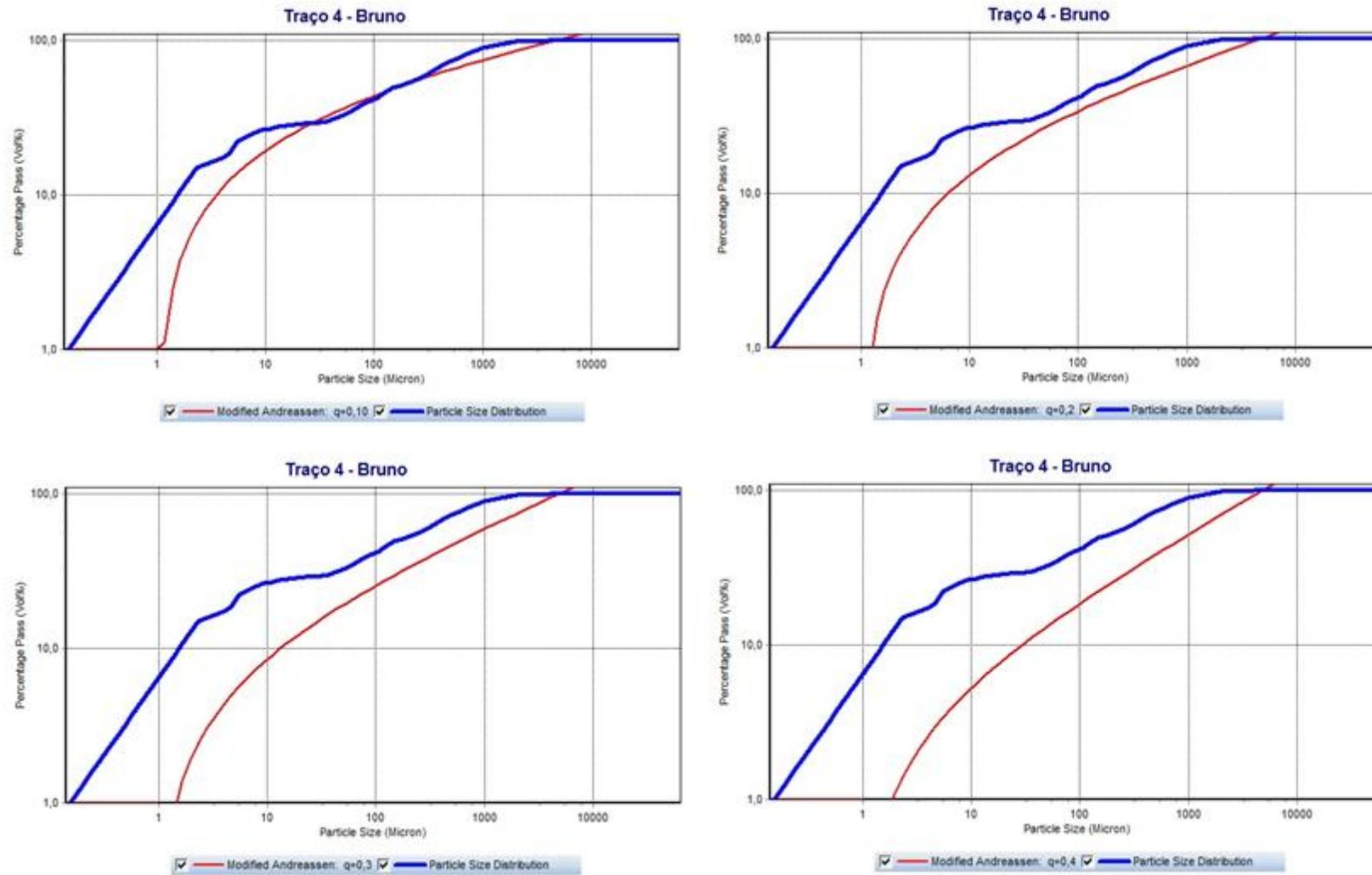


Figura 4-8 - Formulações do Traço 4 (60:40) com  $q = 0,1$ ,  $q = 0,2$ ,  $q = 0,3$  e  $q = 0,4$

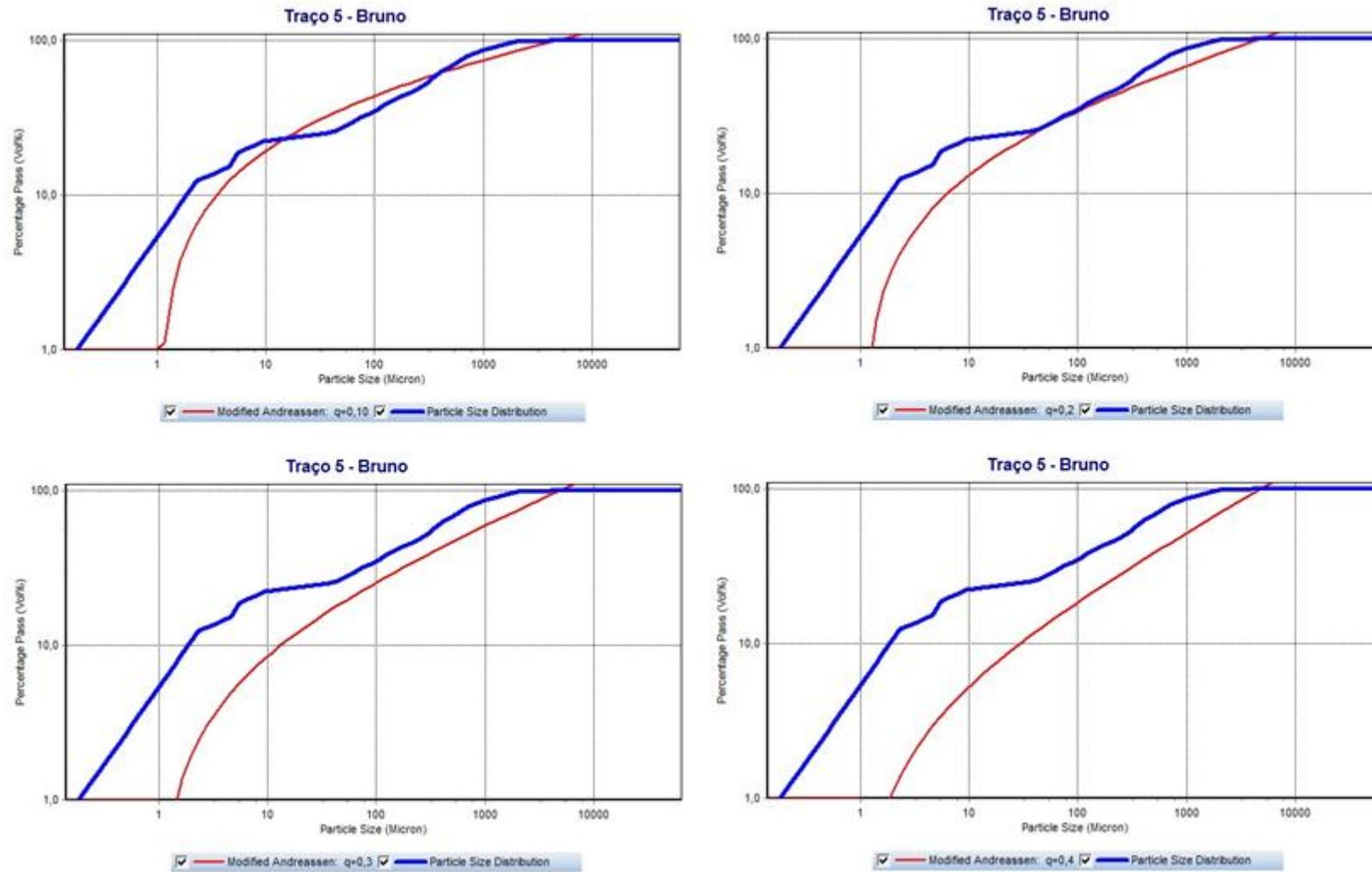


Figura 4-9 - Formulações do Traço 5 (50:50) com  $q = 0,1$ ,  $q = 0,2$ ,  $q = 0,3$  e  $q = 0,4$

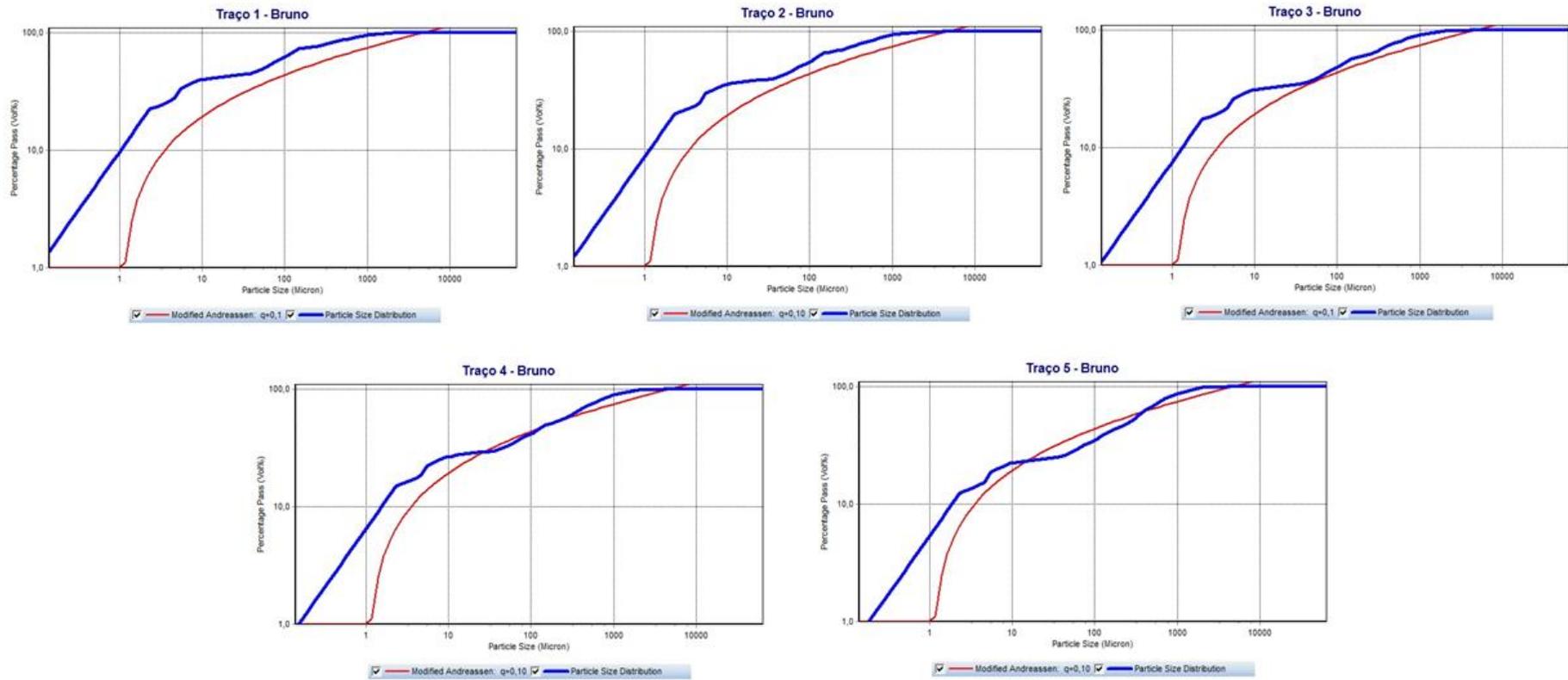


Figura 4-10 - Formulações do Traço 1, Traço 2, Traço 3, Traço 4 e Traço 5 com melhor respectivo coeficiente de distribuição ( $q$ )

Os resultados do traço 1 (Figura 4-5), com  $q = 0,1$ ,  $q = 0,2$ ,  $q = 0,3$  e  $q = 0,4$ , demonstram que o módulo do coeficiente de distribuição ( $q$ ) que mais aproximou a distribuição do tamanho da partícula proposta (em azul) da curva teórica do modelo matemático de Alfred (Andreassen modificado – em vermelho) foi o valor de  $q = 0,1$ , assim como aconteceu nos demais traços (Figura 4-6, Figura 4-7, Figura 4-8 e Figura 4-9).

Por ser os mesmos materiais de análise (solo A e areia proveniente do Rio Paraíba do Sul), mudando apenas as composições dos materiais (porcentagem na mistura), o mesmo valor do coeficiente de distribuição já era esperado.

O solo A da presente pesquisa possui um maior percentual de finos (silte e argila), onde 31% é silte e 29% é argila, o que representa 60% da amostra, além disso, a areia presente na composição tem predominância da textura fina (24% fina, 10% média e 6% grossa).

A areia proveniente do Rio Paraíba do Sul, apresenta 95% de areia, com predominância de textura média e grossa (6% fina, 47% média e 42% grossa), além de 4% de pedregulho e 1% de silte. Logo, os dois materiais se completam no empacotamento de partículas, pois frações com maiores diâmetros que faltam no solo A é complementada com a substituição parcial pela areia proveniente do Rio Paraíba do Sul.

Portanto, analisando os cenários, observa-se que a curva teórica ideal com o maior empacotamento (Alfred – em vermelho) e as formulações propostas de cada traço (em azul) pioram com o aumento do coeficiente de distribuição ( $q$ ) (Figura 4-5, Figura 4-6, Figura 4-7, Figura 4-8 e Figura 4-9) e melhoram à medida que os teores da areia são aumentados (Figura 4-10), conforme analisado no parágrafo anterior.

#### **4.2.2 Verificação da moldagem dos tijolos**

Utilizando a metodologia adotada em 3.2.2.3, com uma umidade produzida de 18,6% (igual de Proctor 4.1.3), foram produzidos os tijolos para verificação da moldagem e assim definir, juntamente com método de empacotamento de partículas, o percentual de areia utilizado para substituir parcialmente o solo cedido.

O resultado da moldagem dos tijolos para cada composição do solo A e areia proveniente do Rio Paraíba do Sul (90:10, 80:20, 70:30, 60:40 e 50:50), demonstrou que as misturas com 40% e 50% de areia não foram possíveis de serem moldadas, ficando os tijolos “esfarelando” por falta de coesão na composição, ocasionado pela

grande quantidade de areia, tornando assim difícil compactar e moldar os tijolos. Logo as composições com 50% e 40% de areia proveniente do Rio Paraíba do Sul (Traço 4 e Traço 5) foram excluídas da análise.

Portanto, como a composição do Traço 3 apresentou um melhor fator de empacotamento de partículas dentre dos traços restantes (Traço 1, Traço 2 e Traço 3) (Figura 4-10) e os traços 4 e 5 não foram possíveis de moldar, foi utilizado o Traço 3 (70:30) para a produção dos tijolos dessa pesquisa.

### 4.3 Características da moldagem dos tijolos

De acordo com a seção 4.2.2 o solo utilizado na presente pesquisa é composto de 70% do solo A e 30% da areia proveniente do Rio Paraíba do Sul.

Os tijolos dessa pesquisa foram produzidos de acordo com a Tabela 4-2, na tabela também consta a relação da umidade produzida com a de Proctor.

Tabela 4-2 - Umidade média por traço da produção dos tijolos da pesquisa

Denominação	Composição			Umidade produzida	Relação com a umidade de Proctor
	Cimento	Solo	Cal		
Tr <sub>1</sub>	05%	95%	-	18,51% ± 0,17%	-0,48%
T <sub>1</sub>	05%	90%	05%	18,84% ± 0,25%	1,29%
T <sub>2</sub>	05%	85%	10%	18,39% ± 0,19%	-1,13%
Tr <sub>2</sub>	10%	90%	-	19,12% ± 0,22%	1,88%
T <sub>3</sub>	10%	85%	05%	19,27% ± 0,18%	6,67%
T <sub>4</sub>	10%	80%	10%	19,74% ± 0,25%	8,17%
T <sub>3 24h</sub>	10%	85%	05%	18,01% ± 0,21%	-3,17%
T <sub>4 24h</sub>	10%	80%	10%	18,12% ± 0,19%	-2,58%

### 4.4 Determinar o tipo de cura utilizada na pesquisa

Os resultados da caracterização física e química do solo, ou seja, a Análise granulométrica, os limites de Atterberg, o ensaio de Proctor e a caracterização química são encontrados na seção 4.1.

A umidade de Proctor do solo A foi de 18,6, e a partir desse dado, planejou-se que os CPs ficassem com umidade 25% abaixo da encontrada no ensaio de Proctor (3.2.4), ou seja, 13,95%. Os CPs foram produzidos a 13,97% de umidade, com desvio padrão ( $\sigma$ ) = ± 0,11%.

#### 4.4.1 Análise dimensional dos CPs produzidos

A Tabela 4-3 apresenta os resultados da análise dimensional dos CPs produzidos nesse estudo, demonstrando as médias para as duas dimensões dos CPs

cilíndricos por tipo de cura e seus respectivos desvios padrões. Onde:  $\varnothing$  = diâmetro da base do cilindro; h = altura.

Tabela 4-3 - Dimensões médias dos CPs ensaiados

Tipo de cura	$\varnothing$ (mm)	h (mm)
Sem cura	36,92 $\pm$ 0,03	43,35 $\pm$ 0,02
Aspersão	37,05 $\pm$ 0,04	43,80 $\pm$ 0,02
Lâmina-d'água	37,01 $\pm$ 0,04	43,84 $\pm$ 0,03

Todos os 60 CPs produzidos tiveram resultados positivos quanto a análise dimensional, com baixos valores de desvios padrões, identificando a homogeneidade em relação às dimensões dos CPs, o que gera credibilidade no processo de produção. Um fator preponderante para a homogeneidade das amostras dessa pesquisa foi a utilização de uma prensa com padronização na força aplicada (1 (uma) tnf) e a utilização dos equipamentos mencionados (Figura 3-5), além do cuidado para não perder umidade durante a produção. A produção de CPs cilíndricos em laboratório propicia um menor volume de material, gerando assim mais controle. A padronização do peso do CP (100 gramas) e a produção com umidade planejada e pouco desvio ( $w = 13,97\% \pm 0,11\%$ ) foram outros fatores que corroboraram para os resultados encontrados.

#### 4.4.2 Ensaio de absorção de água dos CPs produzidos

A Tabela 4-4 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água (AA) nos CPs cilíndricos produzidos, em 7 e 28 dias de cura, nas três curas analisadas. Os CPs das três curas analisadas apresentaram resultados da AA, tanto o valor médio dos CPs, quanto o valor individual de cada CP, abaixo do valor máximo permitido (Tabela 3-4) pela NBR 8491 (ABNT, 2012), 20% e 22%, respectivamente (Figura 4-11).

Tabela 4-4 - Resultados do ensaio de absorção de água nos CPs em 7 e 28 dias de cura

Traços	Absorção de água (%)	
	7 dias	28 dias
Sem cura	14,82 $\pm$ 0,15 Aa	14,49 $\pm$ 0,16 Aa
Aspersão	13,70 $\pm$ 0,13 Ba	13,25 $\pm$ 0,14 Bb
Lâmina-d'água	12,97 $\pm$ 0,17 Ca	12,37 $\pm$ 0,18 Cb

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P \leq 0,05$ )

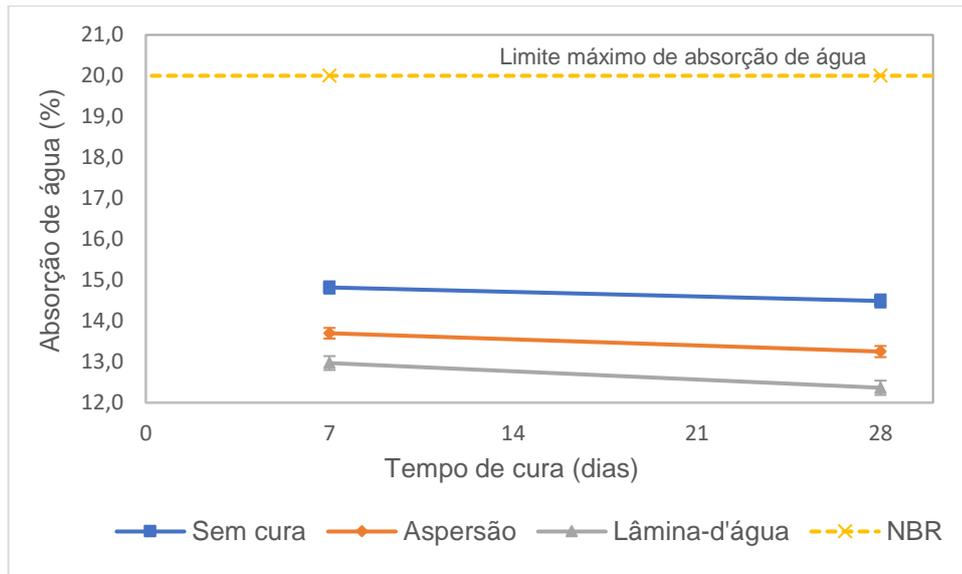


Figura 4-11 - Resultados do ensaio de absorção de água em CPs cilíndricos

De acordo com os resultados apresentados, aos 7 dias de cura, os CPs que receberam a cura por lâmina-d'água apresentaram uma menor absorção média de água ( $12,97 \pm 0,17$ ) que os outros dois comparados ( $13,70 \pm 0,13$ ) e ( $14,82 \pm 0,15$ ), respectivamente cura por aspersão e sem cura, o que representa que esse tipo de cura proporcionou uma menor porosidade para os CPs no tempo de cura mencionado.

Vedar o ambiente externo com lona plástica e manter o ambiente interno úmido por meio do mini reservatório de água fez com que os tijolos permanecem úmidos durante o período de cura, diferente da cura por aspersão que só recebiam água durante três vezes ao dia e ficava em contato com o ambiente externo. Qualitativamente, o aspecto visual dos CPs de lâmina-d'água foi melhor que os demais, e quantitativamente, o próprio peso após o período de cura, pesando os mesmos 100 gramas, com a cura por aspersão pesando 95 gramas e sem cura 90 gramas.

Aos 28 dias de cura, com a hidratação do cimento os valores da absorção reduzem e a ordem mencionada anteriormente se mantém, com o valor da absorção média de água dos CPs que receberam cura por lâmina-d'água ( $12,37 \pm 0,18$ ) inferior ao pôr aspersão ( $13,25 \pm 0,14$ ) e ao sem cura ( $14,49 \pm 0,16$ ).

#### 4.4.3 Ensaio de resistência à compressão dos CPs produzidos

A Tabela 4-5 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão nos CPs cilíndricos produzidos, em 7 e 28 dias de cura, nas três curas analisadas. Os CPs das três curas analisadas apresentaram resultados de resistência à compressão,

tanto o valor médio dos CPs, quanto o valor individual de cada CP, acima do valor mínimo permitido (Tabela 3-4) pela NBR 8491 (ABNT, 2012), 2,0 MPa e 1,7 MPa, respectivamente (Figura 4-12).

Tabela 4-5 - Resultados do ensaio de resistência à compressão nos CPs em 7 e 28 dias de cura

Traços	Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
Sem cura	3,70 ± 0,19 Aa	4,02 ± 0,24 Ab
Aspersão	4,73 ± 0,15 Ba	5,42 ± 0,18 Bb
Lâmina-d'água	5,21 ± 0,16 Ca	6,16 ± 0,18 Cb

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas nas colunas e minúsculas na linha não diferem entre pelo teste de Tukey ( $P \leq 0,05$ )

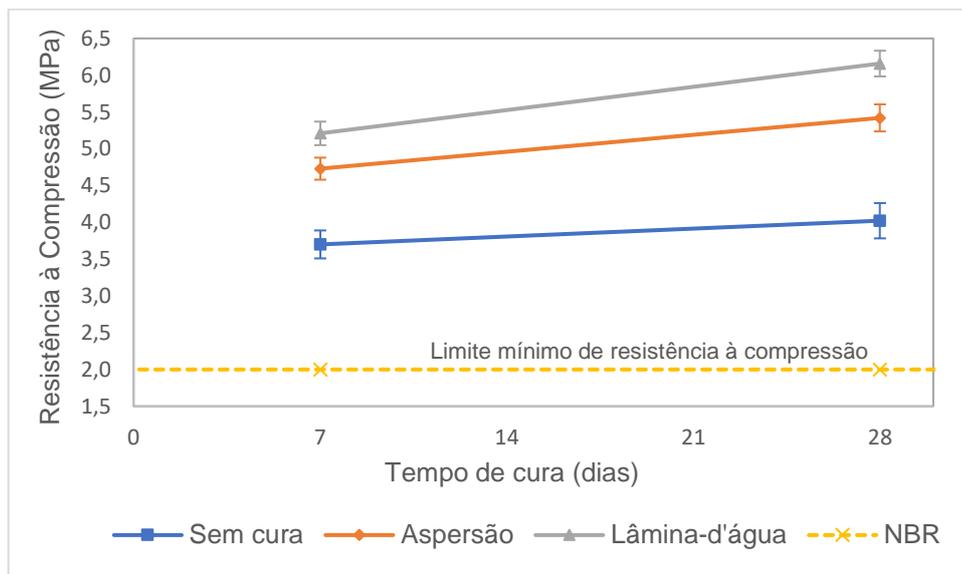


Figura 4-12 - Resultados do ensaio de resistência à compressão em CPs cilíndricos

De acordo com os resultados apresentados, aos 7 dias de cura, os CPs que receberam a cura por lâmina-d'água apresentaram uma maior resistência média de compressão ( $5,21 \pm 0,16$ ) que os outros dois comparados ( $4,73 \pm 0,15$ ) e ( $3,70 \pm 0,19$ ), respectivamente cura por aspersão e sem cura. Aos 28 dias de cura a mesma ordem é observada, com os valores de resistência da cura por lâmina-d'água em ( $6,16 \pm 0,18$ ), por aspersão ( $5,42 \pm 0,18$ ) e sem cura ( $4,02 \pm 0,24$ ).

Os resultados de Campos *et al.* (2019) corroboram com os resultados aos 28 dias dessa pesquisa, no estudo dos autores, em relação aos resultados utilizando água da rede, a cura por câmara úmida (que se assemelha a da lâmina-d'água) obteve

uma resistência à compressão de 6,32 MPa e o a curado do regado (que se assemelha a da aspersão) foi de 6,11 MPa. Logo, assim como na presente pesquisa, com utilização de água da rede (potável), a cura por câmara úmida (lâmina-d'água) apresentou melhor resultado de cura aos 28 dias.

Pode-se observar o alto valor de resistência à compressão encontrado e baixo valor da absorção de água em todos os tipos de cura. Acredita-se que o fato de o estudo ter produzido misturas de solo-cimento em corpos de prova cilíndrico e não produzido tijolos de solo-cimento, proporciona mais controle e menos interferência de fatores externos, uma vez que todo o preparo e execução do estudo foi feita no LECIV/UENF.

#### 4.5 Determinação da força de prensagem para produção dos tijolos

O cálculo para determinação da força de prensagem é demonstrado abaixo, foi utilizado os dados demonstrados em 3.2.6 para a determinação da força de prensagem em tonelada-força (tnf).

- Área de contato da prensa com o tijolo (sem descontar a parte vazada)

$$A = 30 \times 15 = 450 \text{ cm}^2$$

- Área da seção circular do tijolo (parte vazada)

$$A = 2 \times \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) = 2 \times \left( \frac{3,1416 \times 8,67^2}{4} \right) = 118,08 \text{ cm}^2$$

- Área de contato da prensa com o tijolo (descontando a parte vazada)

$$A = 450 - 118,08 = 331,92 \text{ cm}^2 = 331,92 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

- Cálculo da força de prensagem

$$P = \frac{F}{A} \Rightarrow F = P \times A = 15 \times 10^3 \times 331,92 \times 10^{-4} = 497,88 \text{ kN} = 50,78 \text{ tnf}$$

#### 4.6 Análise das propriedades tecnológicas dos tijolos

Nas seções seguintes foi apresentado a análise dimensional dos tijolos e apresentado e analisado os resultados do ensaio de resistência à compressão e absorção de água realizados nos tijolos da presente pesquisa.

Para análise dos resultados encontrados no ensaio de resistência à compressão e na absorção de água, os traços da presente pesquisa foram agrupados de acordo com a referência de análise. Sendo assim, os traços foram agrupados em três grupos, um grupo dos tijolos produzidos com 5% de cimento (grupo 1), outro com os tijolos produzidos com 10% de cimento (grupo 2) e, por fim, dois últimos grupos

para analisar o efeito da adição da cal ao solo 24 horas antes da adição do cimento na mistura (grupo 3-1) (grupo 3-2). Nas tabelas abaixo encontram-se as divisões e as respectivas proporções de cada traço (Tabela 4-6)(Tabela 4-7)(Tabela 4-8)(Tabela 4-9).

Tabela 4-6 - Grupo dos traços que apresentam 5% de cimento (grupo 1)

Grupo 1: 5% cimento	Traço (cimento: cal: solo) em %
Tr <sub>1</sub>	05:00:95
T <sub>1</sub>	05:05:90
T <sub>2</sub>	05:10:85

Tabela 4-7 Grupo dos traços que apresentam 10% de cimento (grupo 2)

Grupo 2: 10% de cimento	Traço (cimento: cal: solo) em %
Tr <sub>2</sub>	10:00:90
T <sub>3</sub>	10:05:85
T <sub>4</sub>	10:10:80

Tabela 4-8 - Grupo para análise da adição da cal no solo 24 horas antes de adicionar cimento (grupo 3-1)

Grupo 3-1: Cal 24 horas antes	Traço (cimento: cal: solo) em %
T <sub>3</sub>	10:05:85
T <sub>3 24h</sub>	10:05:85

Tabela 4-9 - Grupo para análise da adição da cal no solo 24 horas antes de adicionar cimento (grupo 3-2)

Grupo 3-2: Cal 24 horas antes	Traço (cimento: cal: solo) em %
T <sub>4</sub>	10:10:80
T <sub>4 24h</sub>	10:10:80

#### 4.6.1 Análise dimensional dos tijolos

A Tabela 4-10 apresenta os resultados da análise dimensional dos tijolos da presente pesquisa, demonstrando as médias para as três dimensões dos tijolos por traço e seus respectivos desvios padrões. Onde: C = comprimento; L = largura; h = altura.

Tabela 4-10 - Resultados das dimensões médias dos tijolos ensaiados

Traços	C (mm)	L (mm)	h (mm)
Tr <sub>1</sub>	300,21 ± 0,19	150,12 ± 0,22	65,07 ± 0,33
Tr <sub>2</sub>	300,61 ± 0,28	150,05 ± 0,29	65,51 ± 0,28
T <sub>1</sub>	300,47 ± 0,22	150,16 ± 0,27	65,41 ± 0,27
T <sub>2</sub>	300,32 ± 0,16	150,11 ± 0,12	65,57 ± 0,31
T <sub>3</sub>	300,46 ± 0,32	150,21 ± 0,10	65,32 ± 0,29
T <sub>4</sub>	300,19 ± 0,41	150,08 ± 0,23	65,39 ± 0,30
T <sub>3 24H</sub>	301,16 ± 0,34	150,85 ± 0,24	66,15 ± 0,61
T <sub>4 24H</sub>	301,31 ± 0,35	150,92 ± 0,15	66,23 ± 0,37

Os valores dos desvios padrões apresentados estão de acordo com a NBR 8491 (ABNT, 2012), com variações inferiores a  $\pm 1$  mm (Tabela 3-4). O atendimento das exigências normativas quanto a análise dimensional é muito importante pois reflete a homogeneidade física dos tijolos.

O atendimento dessas exigências normativas, na presente pesquisa, é muito em função da prensa hidráulica utilizada para produção dos tijolos, onde nela há uma matriz com dimensões pré-definidas. O fato de os tijolos terem sido moldados com a mesma pressão exercida pela máquina (15MPa) e com umidades por traço com pouca variação, reflete também no valor da análise dimensional, onde com os resultados da análise pode-se comprovar a homogeneidade física dos tijolos.

#### 4.6.2 Ensaio de absorção de água

A Tabela 4-11 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água nos tijolos da presente pesquisa em 7 e 28 dias de cura. Os tijolos analisados apresentaram resultados da absorção de água, tanto o valor médio dos tijolos, quanto o valor individual de cada tijolo, abaixo do valor máximo permitido (Tabela 3-4) pela NBR 8491 (ABNT, 2012), 20% e 22%, respectivamente.

Tabela 4-11 - Resultados do ensaio de absorção de água em 7 e 28 dias de cura

Traços	Absorção de água (%)	
	7 dias	28 dias
Tr <sub>1</sub>	15,83 ± 0,16	15,31 ± 0,21
Tr <sub>2</sub>	17,11 ± 0,14	15,17 ± 0,19
T <sub>1</sub>	16,38 ± 0,24	15,03 ± 0,28
T <sub>2</sub>	16,93 ± 0,27	14,72 ± 0,30
T <sub>3</sub>	17,69 ± 0,32	14,46 ± 0,35
T <sub>4</sub>	18,29 ± 0,25	13,86 ± 0,29
T <sub>3 24h</sub>	18,81 ± 0,17	16,50 ± 0,20
T <sub>4 24h</sub>	19,13 ± 0,35	15,94 ± 0,38

#### 4.6.2.1 Ensaio de absorção de água – Grupo 1 (5% de cimento)

A Tabela 4-12 apresenta as composições e resultados do ensaio de absorção de água dos tijolos do grupo 1 (5% de cimento), em 7 e 28 dias de cura. Os tijolos analisados apresentaram resultados de absorção de água, tanto o valor médio dos tijolos, quanto o valor individual de cada tijolo, abaixo do valor máximo permitido (Tabela 3-4) pela NBR 8491 (ABNT, 2012), 20% e 22%, respectivamente (Figura 4-13).

Tabela 4-12 - Composições e resultados do ensaio de absorção de água (grupo 1)

Grupo 1: 5% de cimento	Traço (cimento: cal: solo) em %	Absorção de água (%)	
		7 dias	28 dias
Tr <sub>1</sub>	05:00:95	15,83 ± 0,16 Aa	15,31 ± 0,21 Ab
T <sub>1</sub>	05:05:90	16,38 ± 0,24 ABa	15,03 ± 0,28 Ab
T <sub>2</sub>	05:10:85	16,93 ± 0,27 Ba	14,72 ± 0,30 Ab

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P \leq 0,05$ )

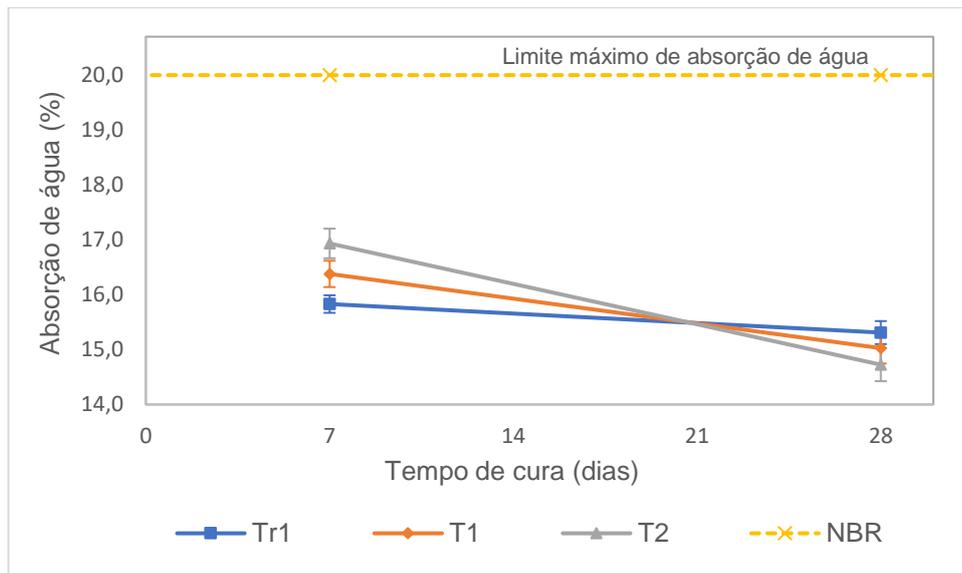


Figura 4-13 - Resultados do ensaio de absorção de água nos tijolos do grupo 1

De acordo com os resultados apresentados, aos 7 dias de cura, o traço Tr<sub>1</sub> (sem adição da cal) apresentou uma menor absorção média de água ( $15,83 \pm 0,16$ ) que os outros dois comparados ( $16,38 \pm 0,24$ ) e ( $16,93 \pm 0,27$ ), respectivamente T<sub>1</sub> e T<sub>2</sub>, o que representa que essa formulação tem uma menor porosidade no tempo de cura mencionado. Isso pode ser justificado porque as reações entre o cimento e os

minerais argilosos do solo ocorrem, por si próprio, de modo acelerado, gerando compostos hidratados que vão proporcionar o preenchimento dos poros do material, o tornando mais coeso, logo, mais difícil da água impermear (REGO, 2019).

Analisando a absorção de água ao longo dos 28 dias de cura, percebe-se que todos os três traços diminuíram a absorção. Esse declínio se justifica pela evolução da hidratação do cimento (de mesma proporção nos traços analisados), reduzindo assim os vazios e aumentando a resistência e densidade.

Aliado a hidratação do cimento, nos traços T<sub>1</sub> e T<sub>2</sub> há a presença de cal hidratada. Assim como o cimento, a cal hidratada tem propriedades aglomerantes, agindo unindo os agregados, que, por meio do contato com o ar, promove o endurecimento da composição, diminuindo a porosidade da composição, com isso a absorção de água ao longo do tempo de cura também diminui. Além de que, a cal juntamente com a areia ajuda a hidratar o cimento, de forma lenta na mistura. Por essas razões, percebe-se que o traço T<sub>2</sub> (que possui mais cal) apresenta uma taxa de decaimento maior comparado ao T<sub>1</sub> e Tr<sub>1</sub>, respectivamente. Por isso, pela ação da cal, aos 28 dias de cura, o traço T<sub>2</sub> apresenta o menor fator de absorção de água ( $14,72 \pm 0,30$ ), seguido pelo T<sub>1</sub> ( $15,03 \pm 0,28$ ) e Tr<sub>1</sub> ( $15,31 \pm 0,21$ ). Os resultados encontrados vão ao encontro com o dizer de Mehta e Monteiro (2014), assim como é possível observar no trabalho de Rego (2019).

#### 4.6.2.2 Ensaio de absorção de água – Grupo 2 (10% de cimento)

A Tabela 4-13 apresenta as composições e resultados do ensaio de absorção de água dos tijolos do grupo 2 (10% de cimento) em 7 e 28 dias de cura. Os tijolos analisados apresentaram resultados de absorção de água, tanto o valor médio dos tijolos, quanto o valor individual de cada tijolo, abaixo do valor máximo permitido (Tabela 3-4) pela NBR 8491 (ABNT, 2012), 20% e 22%, respectivamente (Figura 4-14).

Tabela 4-13 - Composições e resultados do ensaio de absorção de água (grupo 2)

Grupo 2: 10% de cimento	Traço (cimento: cal: solo) em %	Absorção de água (%)	
		7 dias	28 dias
Tr <sub>2</sub>	10:00:90	17,11 ± 0,14 Aa	15,17 ± 0,19 Ab
T <sub>3</sub>	10:05:85	17,69 ± 0,32 ABa	14,24 ± 0,35 ABb
T <sub>4</sub>	10:10:80	18,29 ± 0,25 Ba	13,86 ± 0,29 Bb

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P \leq 0,05$ )

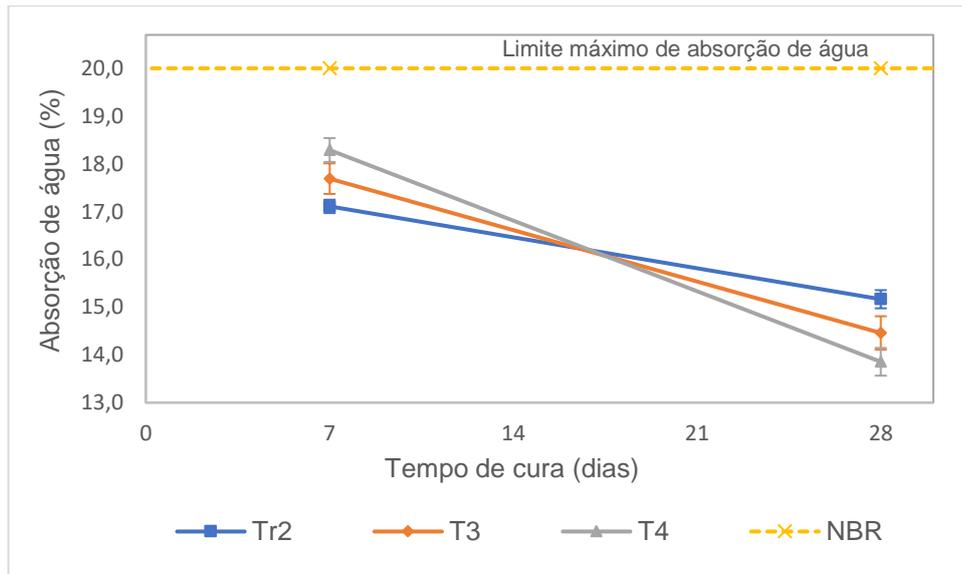


Figura 4-14 - Resultados do ensaio de absorção de água nos tijolos do grupo 2

De forma similar aos resultados do Grupo 1, o traço sem adição de cal ( $Tr_2$ ) apresentou uma melhor absorção média de água aos 7 dias de cura ( $17,11 \pm 0,14$ ), que os outros dois comparados ( $17,69 \pm 0,32$ ) e ( $18,29 \pm 0,25$ ), respectivamente  $T_3$  e  $T_4$ , justifica-se esse resultado por conta da rápida, e intrínseca, reação dos argilominerais com o cimento (REGO, 2019). Ao passo que a cal, ganha resistência por meio de reações com os argilominerais do solo, hidróxido de cálcio e cimento de forma mais lenta (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Logo, é possível que o curto período de tempo de 7 dias de cura não foi suficiente para a reação da cal surtir efeito na porosidade do material. Porém, aos 28 dias de cura, percebe-se o efeito da hidratação do cimento (mesma proporção em todos analisados) e da cal nas misturas (diferentes proporções), com a mistura com mais cal ( $T_4$ ) apresentando uma melhor absorção de água ( $13,86 \pm 0,29$ ), seguida de  $T_3$  ( $14,46 \pm 0,35$ ) e  $Tr_2$  ( $15,17 \pm 0,19$ ).

#### 4.6.2.3 Ensaio de absorção de água – Grupo 3 (cal 24 horas antes)

A Tabela 4-14 e a Tabela 4-15 apresentam os resultados do ensaio de absorção de água nos tijolos do grupo 3 (cal 24 horas antes) em 7 e 28 dias de cura, tendo como referência o  $T_3$  e  $T_4$ , respectivamente para  $T_3$  24h e  $T_4$  24h. Os tijolos dos quatro traços analisados apresentaram resultados da AA, tanto o valor médio dos tijolos, quanto o valor individual de cada tijolo, abaixo do valor máximo permitido (Tabela 3-4) pela NBR 8491 (ABNT, 2012) (Figura 4-15).

Tabela 4-14 - Composições e resultados do ensaio de absorção de água (grupo 3-1)

Grupo 3-1: cal 24 horas antes	Traço (cimento: cal: solo) em %	Absorção de água (%)	
		7 dias	28 dias
T <sub>3</sub>	10:05:85	17,69 ± 0,32 Aa	14,24 ± 0,35 Ab
T <sub>3 24h</sub>	10:05:85	18,81 ± 0,17 Ba	16,50 ± 0,20 Bb

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey (P ≤ 0,05)

Tabela 4-15- Composições e resultados do ensaio de absorção de água (grupo 3-2)

Grupo 3-2: cal 24 horas antes	Traço (cimento: cal: solo) em %	Absorção de água (%)	
		7 dias	28 dias
T <sub>4</sub>	10:10:80	18,29 ± 0,25 Aa	13,86 ± 0,29 Ab
T <sub>4 24h</sub>	10:10:80	18,13 ± 0,35 Ba	15,94 ± 0,38 Bb

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey (P ≤ 0,05)

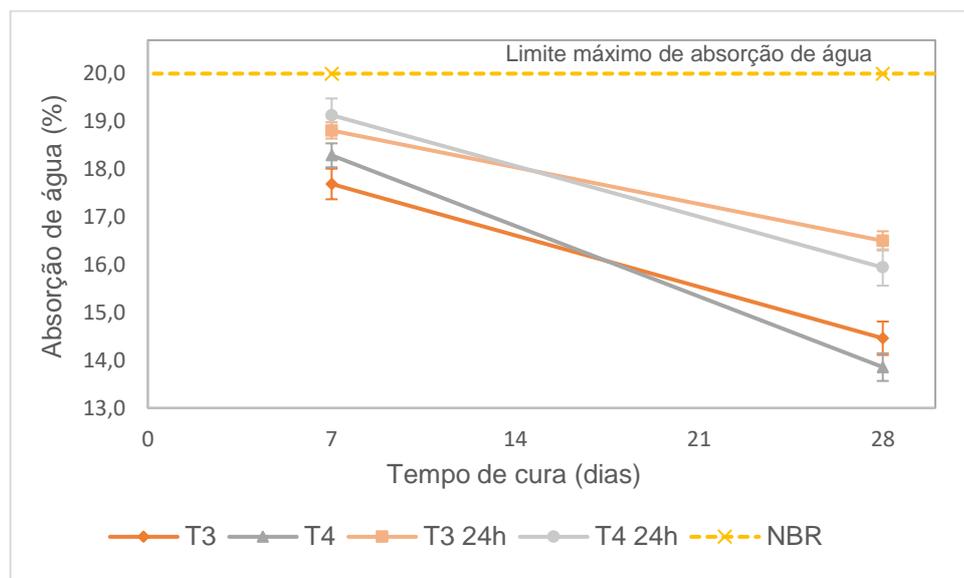


Figura 4-15 - Resultados do ensaio de absorção de água nos tijolos do grupo 3

De acordo com os resultados apresentados, aos 7 dias de cura, tanto o comparativo do T<sub>4</sub> com o T<sub>4 24h</sub>, quanto do T<sub>3</sub> com o T<sub>3 24h</sub> apresentaram resultados similares, sendo o valor da absorção média de água do T<sub>4</sub> (18,29 ± 0,25) inferior ao do T<sub>4 24h</sub> (19,13 ± 0,35) e do T<sub>3</sub> (17,69 ± 0,32) inferior ao do T<sub>3 24h</sub> (18,81 ± 0,17).

Aos 28 dias de cura, com a hidratação do cimento (mesma proporção em todos analisados) e da cal nas misturas (diferentes proporções), os valores de absorção reduzem e a ordem mencionada anteriormente se mantém, com o valor da AA do T<sub>4</sub>

( $13,86 \pm 0,29$ ) inferior ao do  $T_{4\ 24h}$  ( $15,94 \pm 0,38$ ) e do  $T_3$  ( $14,46 \pm 0,35$ ) inferior ao  $T_{3\ 24h}$  ( $16,50 \pm 0,20$ ).

O objetivo dessa análise foi verificar se a adição da cal 24 horas antes da adição do cimento melhora as propriedades do solo, reduzindo a acidez, corrigindo assim o pH e neutralizando a parte elétrica do solo, preparando assim o solo para a adição do cimento e conseqüentemente melhorar as propriedades tecnológicas dos tijolos. Só que os resultados demonstraram uma absorção de água maior, tanto aos 7 quanto aos 24 dias de cura, para as composições em que foram adicionadas cal 24 horas antes.

Uma possível justificativa para a ocorrência mencionada, foi que ao adicionar a cal 24 horas antes da adição do cimento, a cal começou a reagir com a água presente no solo, diminuindo assim a umidade do solo, conseqüentemente, a água que estava programada para ser adicionada naquela mistura teria que ser maior, tal fato não ocorreu.

De fato, ao comparar a umidade produzida do  $T_4$  com o  $T_{4\ 24h}$  é possível observar (Tabela 4-2) que o traço com adição de cal 24 horas antes foi produzido com umidade inferior ( $18,12\% \pm 0,19\%$ ) ao do  $T_4$  ( $19,74\% \pm 0,25\%$ ), de igual forma o traço  $T_{3\ 24h}$  ( $18,01\% \pm 0,21\%$ ) foi produzido com umidade inferior ao do  $T_3$  ( $19,27\% \pm 0,18\%$ ). Uma vez que não é factível afirmar se essa diferença de umidade é possível alterar os resultados, essa análise fica inconclusiva e, portanto, inviabilizada de se obter respostas na presente pesquisa, uma vez que as amostras comparadas apresentaram diferentes umidades de produção.

#### **4.6.3 Ensaio de resistência à compressão**

A Tabela 4-16 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão nos tijolos da presente pesquisa em 7 e 28 dias de cura. Aos 7 dias de cura, os tijolos dos traços  $T_1$  ( $1,99 \pm 0,06$ ),  $T_2$  ( $1,85 \pm 0,13$ ) e  $T_{3\ 24h}$  ( $1,65 \pm 0,07$ ) apresentaram valor médio menor que o mínimo permitido (2 Mpa), sendo que o traço  $T_{3\ 24h}$  ( $1,65 \pm 0,07$ ) também apresentou valor individual menor que o mínimo permitido (1,7 Mpa). Aos 28 dias de cura todos os traços analisados apresentaram resultados de resistência à compressão, tanto o valor médio dos tijolos, quanto o valor individual de cada tijolo, acima do valor máximo permitido (Tabela 3-4) pela NBR 8491 (ABNT, 2012).

Tabela 4-16 - Resultados do ensaio de resistência à compressão em 7 e 28 dias de cura

Traços	Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
Tr <sub>1</sub>	2,11 ± 0,11	2,47 ± 0,19
Tr <sub>2</sub>	2,81 ± 0,18	3,62 ± 0,28
T <sub>1</sub>	1,99 ± 0,06	2,59 ± 0,13
T <sub>2</sub>	1,85 ± 0,13	2,70 ± 0,14
T <sub>3</sub>	3,16 ± 0,21	4,86 ± 0,18
T <sub>4</sub>	3,21 ± 0,19	5,34 ± 0,15
T <sub>3</sub> 24h	1,65 ± 0,07	2,12 ± 0,24
T <sub>4</sub> 24h	2,10 ± 0,16	2,84 ± 0,21

#### 4.6.3.1 Ensaio de resistência à compressão – Grupo 1 (5% de cimento)

A Tabela 4-17 apresenta as composições e resultados do ensaio de resistência à compressão (RC) dos tijolos do grupo 1 (10% de cimento) em 7 e 28 dias de cura, com referência o Tr<sub>1</sub>. Aos 7 dias de cura, os tijolos dos traços T<sub>1</sub> (1,99 ± 0,06), T<sub>2</sub> (1,85 ± 0,13) apresentaram valor médio menor que o mínimo permitido (2 Mpa), sendo que todos os traços apresentaram valores individuais superiores ao mínimo permitido (1,7 MPa). Aos 28 dias de cura todos os traços analisados apresentaram resultados de resistência à compressão, tanto o valor médio dos tijolos, quanto o valor individual de cada tijolo, acima do valor máximo permitido (Tabela 3-4) pela NBR 8491 (ABNT, 2012) (Figura 4-16)

Tabela 4-17 - Composições e resultados do ensaio de resistência à compressão (grupo 1)

Grupo 1: 5% de cimento	Traço (cimento: cal: solo) em %	Resistência à compressão (MPa)	
		7 dias	28 dias
Tr1	05:00:95	2,11 ± 0,11 Aa	2,47 ± 0,19 Ab
T1	05:05:90	1,99 ± 0,06 ABa	2,59 ± 0,13 ABb
T2	05:10:85	1,85 ± 0,13 Ba	2,70 ± 0,14 Bb

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P \leq 0,05$ )

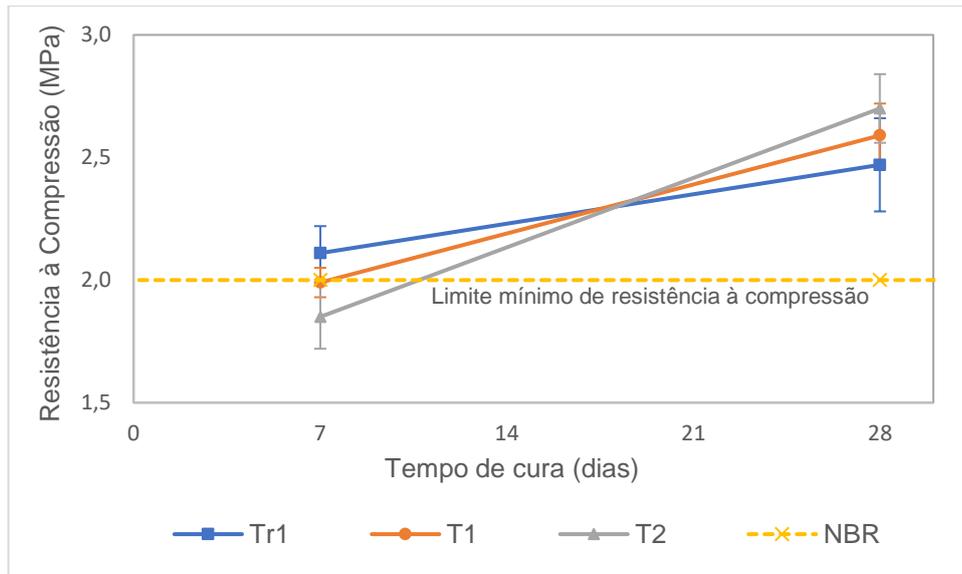


Figura 4-16 - Resultados do ensaio de resistência à compressão nos tijolos do grupo 1

De acordo com os resultados apresentados, aos 7 dias de cura, o traço Tr<sub>1</sub> (sem adição da cal) apresentou uma maior RC média ( $2,11 \pm 0,11$ ) que os outros dois comparados ( $1,99 \pm 0,06$ ) e ( $1,85 \pm 0,13$ ), respectivamente T<sub>1</sub> e T<sub>2</sub>. Isso pode ser justificado, pois provavelmente, o período de cura mencionado não foi suficiente para aumento das reações pozolânicas da reação dos argilomineirais do solo, Sílica (SiO<sub>2</sub>) e Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) presente na cal hidratada, gerando características cimentícias.

Tal situação é uma possível resposta pelos componentes químicos presentes na argila (4.1.4) e o mecanismo químico da atividade pozolânica (detalhado em 2.4.2), mesmo não determinando o índice de atividades pozolânicas da argila *in natura* em questão com a cal e com o cimento, seguindo diretrizes da NBR 5751 (ABNT, 2015), NBR 5752 (ABNT, 2014) e 12653 (ABNT, 2014), assim como apontaram Nóbrega (1985, apud Rosa, 2006) e Mehta e Monteiro (2014), a reação pozolânica se desenvolve em velocidade lenta, com o ganho de resistência mecânica de forma lenta, assim como foi possível observar nos resultados da presente pesquisa com adição de cal hidratada.

O resultado do ensaio de resistência à compressão valida e complementa o resultado de absorção de água, e vice-versa, uma vez que o traço Tr<sub>1</sub> apresentou a melhor AA que T<sub>1</sub> e que T<sub>2</sub> (nessa ordem). Assim como o Tr<sub>1</sub> apresentou a melhor RC que T<sub>1</sub> e que T<sub>2</sub> (nessa ordem). Tal fator, assim como mencionado em 4.6.2.1, é justificável por não possuir cal na composição de Tr<sub>1</sub>, com a hidratação da matriz

ocorrendo de forma rápida, sem depender do tempo de cura, o que proporciona uma maior resistência em menor tempo, e conseqüentemente uma menor porosidade da amostra.

Com o aumento do intervalo de cura, teve um maior aumento na resistência à compressão dos tijolos com adição de cal. Logo, aos 28 dias de cura o traço com mais cal em sua composição T<sub>2</sub> teve maior resistência ( $2,70 \pm 0,14$ ) comparado ao T<sub>1</sub> ( $2,59 \pm 0,13$ ) e Tr<sub>1</sub> ( $2,47 \pm 0,19$ ), explicado pela cinética de hidratação mais lenta dos argilominerais (possivelmente do grupo da Caulinita), hidróxido de cálcio (Ca(OH<sub>2</sub>)) e o cimento.

#### 4.6.3.2 Ensaio de resistência à compressão – Grupo 2 (10% de cimento)

A Tabela 4-18 apresenta as composições e resultados do ensaio de resistência à compressão (RC) dos tijolos do grupo 2 (10% de cimento) em 7 e 28 dias de cura, com referência o Tr2. Os tijolos analisados apresentaram resultados de RC, tanto o valor médio dos tijolos, quanto o valor individual de cada tijolo, superior ao valor mínimo permitido (Tabela 3-4) pela NBR 8491 (ABNT, 2012), 2,0 MPa e 1,7 MPa, respectivamente (Figura 4-17).

Tabela 4-18 - Composições e resultados do ensaio de resistência à compressão (grupo 2)

Grupo 2: 10% de cimento	Traço (cimento: cal: solo) em %	Resistência à compressão (MPa)	
		7 dias	28 dias
Tr2	10:00:90	$2,81 \pm 0,18$ Aa	$3,62 \pm 0,28$ Ab
T3	10:05:85	$3,16 \pm 0,21$ Ba	$4,86 \pm 0,18$ Bb
T4	10:10:80	$3,21 \pm 0,19$ Ba	$5,34 \pm 0,15$ Cb

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P \leq 0,05$ )

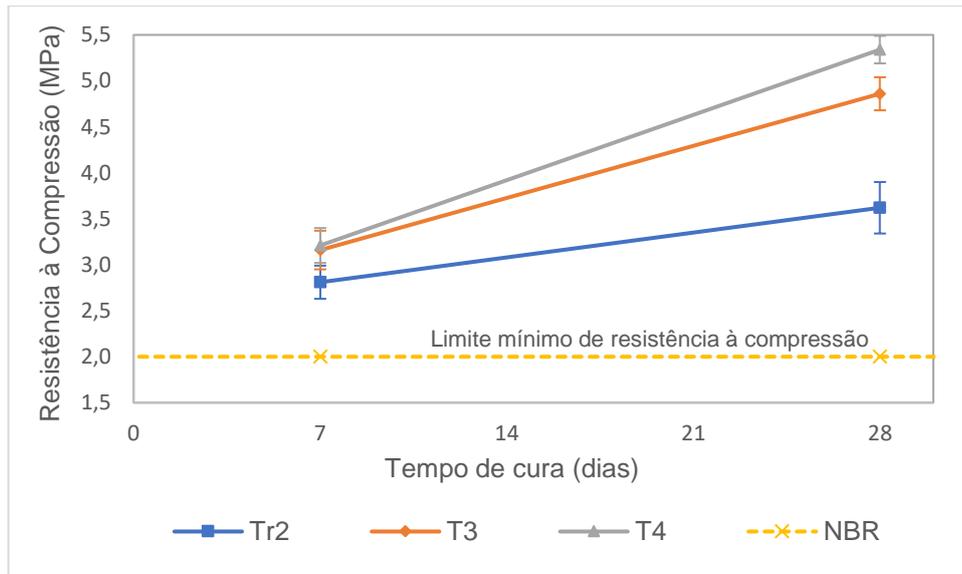


Figura 4-17 - Resultados do ensaio de resistência à compressão nos tijolos do grupo 2

Assim como os traços do grupo 1, o traço de referência (menos adição de cal) Tr2 apresentou uma melhor resistência aos 7 dias de cura ( $2,81 \pm 0,18$ ) seguido pelos traços que menos possuem cal T<sub>3</sub> ( $3,16 \pm 0,21$ ) e T<sub>4</sub> ( $3,21 \pm 0,19$ ). Aos 28 dias de cura, pela ação da cal (o que diferencia os traços) a situação se inverte, com T<sub>4</sub> tendo o valor da RC ( $5,34 \pm 0,15$ ), seguido para os traços com menor percentual de cal T<sub>3</sub> ( $4,86 \pm 0,18$ ) e Tr<sub>2</sub> ( $3,62 \pm 0,28$ ). As justificativas são as mesmas abordadas para o grupo 1 (4.6.3.1).

#### 4.6.3.3 Ensaio de resistência à compressão – Grupo 3 (cal 24 horas antes)

A Tabela 4-19 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão nos tijolos da presente pesquisa em 7 e 28 dias de cura. Aos 7 dias de cura, os tijolos do traço T<sub>3 24h</sub> ( $1,65 \pm 0,07$ ) apresentaram valor médio menor que o mínimo permitido (2 Mpa), e também apresentou valor individual ( $1,65 \pm 0,07$ ) menor que o mínimo permitido (1,7 Mpa). Aos 28 dias de cura todos os traços analisados apresentaram resultados de resistência à compressão, tanto o valor médio dos tijolos, quanto o valor individual de cada tijolo, acima do valor máximo permitido (Tabela 3-4) pela NBR 8491 (ABNT, 2012). (Figura 4-18)

Tabela 4-19 - Composições e resultados do ensaio de resistência à compressão (grupo 3-1)

Grupo 3-1: cal 24 horas antes	Traço (cimento: cal: solo) em %	Resistência à compressão (MPa)	
		7 dias	28 dias
T3	10:05:85	3,16 ± 0,21 Aa	4,86 ± 0,18 Ab
T3 24h	10:05:85	1,65 ± 0,07 Ba	2,12 ± 0,24 Bb

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P \leq 0,05$ )

Tabela 4-20 - Composições e resultados do ensaio de resistência à compressão (grupo 3-2)

Grupo 3-2: cal 24 horas antes	Traço (cimento: cal: solo) em %	Resistência à compressão (MPa)	
		7 dias	28 dias
T4	10:10:80	3,21 ± 0,19 Aa	5,34 ± 0,15 Ab
T4 24h	10:10:80	2,10 ± 0,16 Ba	2,84 ± 0,21 Bb

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P \leq 0,05$ )

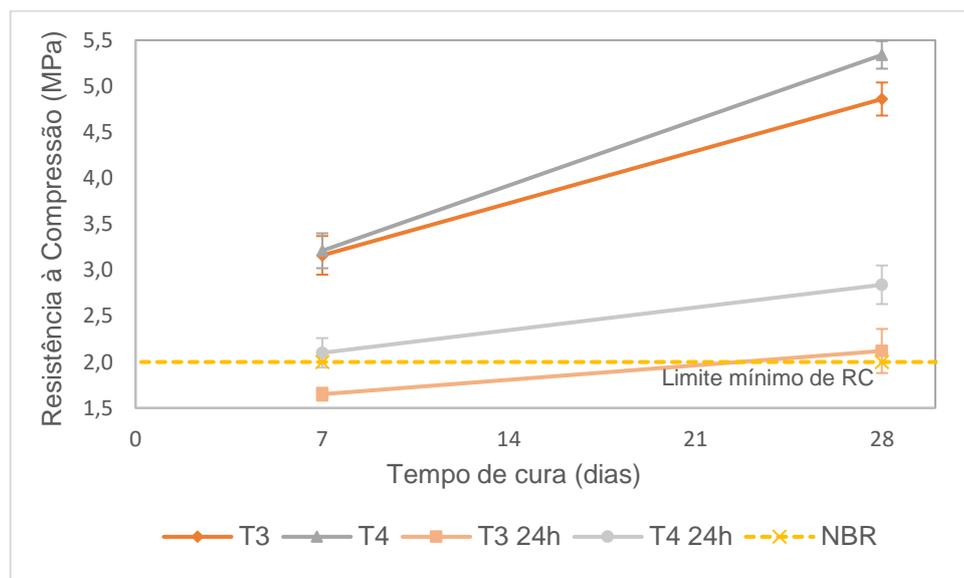


Figura 4-18 - Resultados do ensaio de resistência à compressão nos tijolos do grupo 3

De acordo com os resultados apresentados, aos 7 dias de cura, tanto o comparativo do T<sub>4</sub> com o T<sub>4 24h</sub>, quanto do T<sub>3</sub> com o T<sub>3 24h</sub> apresentaram resultados similares, sendo o valor da RC do T<sub>4</sub> (3,21 ± 0,19) superior ao do T<sub>4 24h</sub> (2,10 ± 0,16) e do T<sub>3</sub> (3,16 ± 0,21) inferior ao do T<sub>3 24h</sub> (1,65 ± 0,07).

Aos 28 dias de cura, com a hidratação do cimento (mesma proporção em todos analisados) e da cal nas misturas (diferentes proporções), os valores da RC aumentam e a ordem mencionada anteriormente se mantém, com o valor da RC do

$T_4$  ( $3,21 \pm 0,19$ ) inferior ao do  $T_{4\ 24h}$  ( $2,84 \pm 0,21$ ) e do  $T_3$  ( $4,86 \pm 0,18$ ) inferior ao  $T_{3\ 24h}$  ( $2,12 \pm 0,24$ ).

Assim como mencionado em 4.3, pela diferença da umidade produzida dos traços comparados torna-se inválida a presente análise e a possibilidade de obter respostas nessa pesquisa.

## 5 CONCLUSÕES

Por meio da realização da presente pesquisa experimental e dos resultados obtidos, assim como as discussões realizadas, pôde-se concluir que:

- Por intermédio da caracterização física do solo foi possível constatar que o solo A não é adequado para a produção de tijolo de solo-cimento. Na caracterização química do solo foi possível identificar a presença de sílica e alumina, componentes químicos essenciais para as reações pozolânicas com o hidróxido de cálcio da cal hidratada.
- Foi constatado pelo método de empacotamento de partículas que o valor de  $(q) = 0,1$  foi o melhor valor para o coeficiente de distribuição, assim como, à medida que os teores de areia foram aumentados obteve-se um melhor empacotamento.
- Por meio da moldagem dos tijolos pode-se concluir que as misturas com 50% e 40% de areia não foram possíveis de serem moldadas. Logo, a mistura com 30% de areia obteve o melhor fator de empacotamento das misturas que foram possíveis de serem moldadas, sendo, por isso, a composição utilizada para a produção dos tijolos.
- No estudo comparativo de tipos de cura, aos 7 e 28 dias de cura houve diferença significativa nos tratamentos dos tipos de cura nas duas variáveis dependentes (ensaios de absorção de água e resistência à compressão), com a cura por lâmina-d'água apresentando os melhores resultados, sendo, por isso, a cura adotada na produção dos tijolos.
- O traço T<sub>4</sub> (10% de cimento e 10% de cal) foi o que obteve melhores resultados de absorção de água e resistência à compressão aos 28 dias de cura. O traço Tr<sub>1</sub> atendeu aos critérios de absorção de água e resistência à compressão da norma, aos 7 e 28 dias de cura, sendo, portanto, o traço mais econômico estudado.
- No ensaio de absorção de água e no ensaio de resistência à compressão dos traços em geral pôde-se constatar que, aos 7 dias de cura, o traço de referência obteve melhor resultado ou resultado muito próximo aos traços com adição de cal. Já aos 28 dias de cura, os traços com maiores teores de cal apresentaram melhores resultados que o traço de referência.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante da realização da presente pesquisa, e os resultados encontrados, segue como sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar um estudo de viabilidade econômica de cada traço dessa composição, para interpretar a viabilidade técnica e financeira dos traços estudados.
- Sugere-se a utilização de outras análises no tijolo de solo-cimento em geral, que vão além dos ensaios realizados nesse estudo, como estudo do conforto acústico, conforto térmico, durabilidade e estanqueidade.
- Em tijolos de solo-cimento com cal, sugere-se a realização de ensaios e análises microestruturais, identificando a fase cristalina ao adicionar a cal.
- Em tijolos de solo-cimento com cal, sugere-se realizar o índice de atividade pozolânica da argila, tanto com a cal, tanto com o cimento, para determinar se a argila é pozolânica.
- Em tijolos de solo-cimento com cal, sugere-se acrescentar a avaliação da absorção de água e resistência à compressão aos 14 dias de cura, pois 7 dias de cura não foi suficiente em alguns traços em relação aos padrões normativos, sugere-se também realizar os ensaios depois dos 28 dias de cura.
- Realizar um estudo de solo-cimento com cal misturado no mínimo 24 horas antes da adição do cimento, com as misturas de mesmo traço, mesma umidade e força de prensagem.

## REFERÊNCIAS

AFRIN, Habiba. A review on different types soil stabilization techniques. **International Journal of Transportation Engineering and Technology**, v. 3, n. 2, p. 19-24, 2017.

ALEXANDRE, J. Caracterização das argilas do município de Campos dos Goytacazes para utilização em cerâmica vermelha. **Diss. Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ**, 1997.

AL-JABRI, Khalifa S. et al. Properties of soil-cement blocks manufactured using produced water from oil fields: a preliminary investigation. **GEOMATE Journal**, v. 13, n. 35, p. 66-72, 2017.

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2002) *Guia básico de utilização do cimento Portland*. BT-106, 7. ed., São Paulo. 28p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986) Solo – Ensaio de compactação. NBR 7182. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995) Rochas e solos. NBR 6502. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012) Tijolo de solo-cimento – Requisitos. NBR 8491. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012) Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio. NBR 8492. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013) Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento. NBR 10833. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014) Materiais pozolânicos – Determinação do índice do desempenho com cimento Portland aos 28 dias. NBR 5752. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014) Materiais pozolânicos - Requisitos. NBR 12653. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015) Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. NBR 5751. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016) Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. NBR 6457. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016) Solo – Determinação do limite de plasticidade. NBR 7180. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017) Solo – Determinação do limite de liquidez. NBR 6459. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018) Cimento Portland - Requisitos. NBR 16697. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018) Solo – Análise granulométrica. NBR 7181. Rio de Janeiro.

AZEVEDO, A. R. G. et al. Assessing the potential of sludge generated by the pulp and paper industry in assembling locking blocks. **Journal of Building Engineering**, v. 23, p. 334-340, 2019.

BAHIENSE, Alexandre Vianna et al. Dosage of interlocking paving with ornamental rock waste: An experimental design approach, particle packing and polluting potential. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. e00596, 2021.

BALA, Mokrane; ZENTAR, Rachid; BOUSTINGORRY, Pascal. Parameter determination of the Compressible Packing Model (CPM) for concrete application. **Powder Technology**, v. 367, p. 56-66, 2020.

BALAJI, Nallaval Chinnaswamy; MANI, Monto; VENKATARAMA REDDY, Byrasandra Venkataramanappa. Thermal conductivity studies on cement-stabilised soil blocks. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials**, v. 170, n. 1, p. 40-54, 2017.

BARBOSA, Victor Hugo Rodrigues; MARQUES, Maria Esther Soares; GUIMARÃES, Antônio Carlos Rodrigues. Caracterização mineralógica de um solo do Acre visando à produção de agregados artificiais de Argila Calcinada para uso em pavimentos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, 2018.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988.

CAMPOS, Alessandro; NASCIMENTO, João Batista do; BRITO, Larissa Tessari. Structural behavior of soil-cement bricks using different sources of water and healing methods. **Interações (Campo Grande)**, v. 20, p. 283-296, 2019.

CARRASCO, E. V. M.; SILVA, S. R.; MANTILLA, J. N. R. Assessment of Mechanical Properties and the Influence of the Addition of Sawdust in Soil–Cement Bricks Using the Technique of Ultrasonic Anisotropic Inspection. **Journal of materials in civil engineering**, v. 26, n. 2, p. 219-225, 2014.

CAVALCANTI FILHO, Lupercio Luizines. **Avaliação da resistência a compressão simples e absorção de água de tijolos vazados de solo-cimento produzidos a partir da substituição parcial do cimento pela cinza da lenha de algaroba**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de pernambuco.

DA SILVA SEGANTINI, Antonio Anderson; WADA, Patrycia Hanna. An evaluation of the composition of soil cement bricks with construction and demolition waste/Estudo de dosagem de tijolos de solo-cimento com adicao de residuos de construcao e demolicao. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 33, n. 2, p. 179-184, 2011.

DA SILVA, Tulane Rodrigues et al. Technological Characterization of PET—Polyethylene Terephthalate—Added Soil-Cement Bricks. **Materials**, v. 14, n. 17, p. 5035, 2021.

DE CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, Victor Carlos. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, n. 333, p. 18-32, 2009.

DE MELO, C. V. A.; GOMES, P. C. C.; MORAES, K. A. M. A study of packing parameters that influence the fresh properties of self-compacting concrete. **Cerâmica**, v. 65, p. 432-442, 2019.

FENNIS, Sonja AAM; WALRAVEN, Joost C. Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design. **Heron**, **57 (2012) 2**, 2012.

FERREIRA, Débora; LUSO, Eduarda; CRUZ, Maria. Blocos ecológicos de solo-cimento com incorporação de resíduos. **REHABEND 2018-CONSTRUCTION PATHOLOGY, REHABILITATION TECHNOLOGY AND HERITAGE MANAGEMENT**, 2018.

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

GOULART, C. L.; PEDREIRA, CL da S. Estabilização química de solo com adição de cimento ou cal como alternativa de pavimento. 2009. **Universidade Federal de Rio Grande e Universidade Católica de Pelotas, Rio Grande**, 2009.

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, José Epitácio Passos. **A cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. Pini, 2002.

KONGKAJUN, Nuntaporn et al. Soil-cement bricks produced from local clay brick waste and soft sludge from fiber cement production. **Case Studies in Construction Materials**, v. 13, p. e00448, 2020.

MAZZUCCO, G. et al. Numerical modelling of ellipsoidal inclusions. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 317-324, 2018.

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo Jose Melaragno. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. Ibracon, 2014

MURMU, Anant L.; PATEL, A. Towards sustainable bricks production: An overview. **Construction and building materials**, v. 165, p. 112-125, 2018.

PASCHOALIN FILHO, João Alexandre; STOROPOLI, João Henrique; DIAS, António Jose Guerner. < b> Evaluation of compressive strength and water absorption of soil-cement bricks manufactured with addition of pet (polyethylene terephthalate) wastes. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 38, n. 2, p. 163-171, 2016.

PIANI, T. Li et al. Dynamic behaviour of adobe bricks in compression: The role of fibres and water content at various loading rates. **Construction and Building Materials**, v. 230, p. 117038, 2020.

PINTO, Carlos de Sousa. Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. São Paulo: Oficina de textos, 2006. **Sobre os autores**.

PINTO, Fernando Batista et al. Mixture design for self-compacting concrete using a virtual particle packing method. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 50029-50049, 2021.

PISANI, Maria Augusta Justi. Um material de construção de baixo impacto ambiental: O tijolo de solo-cimento. **Sinergia, São Paulo**, v. 6, n. 1, p. 53-59, 2005.

PONTE, M. M. C. C. **Arquitetura de Terra: o desenho para a durabilidade das construções**. 2012. Tese de Doutorado. Dissertação de M. Sc, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

REGO, Rafaela Rodrigues Carvalho et al. Estudo do tijolo solo cimento em formulações com a adição da cal. 2019.

RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F. Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento. **Cerâmica**, v. 59, n. 352, p. 551-556, 2013.

ROSA, Juliane Barbosa; FERREIRA, Carla Janaína; GUIMARÃES, Renato Cabral. Estabilização de solos com cal para uso em pavimentação. **IV Seminário de Iniciação Científica**, Goiânia, Goiás, 2006.

SALOMÃO, Pedro Emílio Amador; SILVA, Breno Alcântara; BARBOSA, Flávio Alchaar. Estabilização química de solo de textura franco: adição de cal e cimento. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 5, p. 01-15, 2019.

SANTOS, Eliana Fernandes dos; PARREIRA, Alexandre Benetti. Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais. in: 44ª rapv – reunião anual de pavimentação e 18º enacor – encontro nacional de

conservação rodoviária, 2015, Foz do Iguaçu. **Reunião anual de pavimentação**. Foz do Iguaçu: Rapv, 2015. p. 1 - 12.

SARKAR, R. Particle size distribution for refractory castables: a review. **Interceram-International Ceramic Review**, v. 65, n. 3, p. 82-86, 2016.

SECO, Andres et al. Estimated and real durability of unfired clay bricks: Determining factors and representativeness of the laboratory tests. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 600-605, 2017.

SILVA, Matheus Francisco da. **Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SIQUEIRA, F. B. et al. Influence of industrial solid waste addition on properties of soil-cement bricks. **Cerâmica**, v. 62, p. 237-241, 2016.

SOUZA, Márcia IB; SEGANTINI, Antonio AS; PEREIRA, Joelma A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 205-212, 2008.

VERMA, Gaurav; KUMAR, Brind. Prediction of compaction parameters for fine-grained and coarse-grained soils: a review. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 14, n. 8, p. 970-977, 2020.

VIEIRA, C. M. F. et al. Incorporation of fine steel sludge waste into red ceramic. **Materials science and engineering: A**, v. 427, n. 1-2, p. 142-147, 2006.

XAVIER, Gustavo de Castro et al. Determination of useful life of red ceramic parts incorporated with ornamental stone waste. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 2, p. 04018381, 2019.

## ANEXOS – ANOVA E TESTE DE TUKEY

O tratamento utilizado nas análises estatísticas foram os três tipos de cura para mistura de solo-cimento analisada e também as diferentes misturas para a produção do tijolo de solo-cimento, que formam no total 8 formulações de traços, como variáveis dependentes a absorção de água e a resistência à compressão que as misturas de solo-cimento em CPs cilíndricos e os tijolos foram submetidos.

Para o estudo de cura, inicialmente foi avaliado se teve diferença entre os tipos de cura aos 7 dias de cura, depois se teve diferença significativa nos 28 dias de cura. Após essas análises foi feito uma análise para verificar a evolução das variáveis dependentes (absorção e resistência) de 7 para 28 dias, avaliando cada mistura separadamente. De mesma forma aconteceu com os estudos das variáveis dependentes (absorção e resistência) nos tijolos, inicialmente analisando aos 7 e depois aos 28 dias de cura e depois avaliando a evolução das variáveis dependentes de 7 para 28, sendo, portanto, o tratamento trocado para o tempo de cura (evolução da cura) e não a mistura nessa análise, uma vez que a mistura é constante (a mesma).

Para o a análise de variância (ANOVA) foi utilizado a ANOVA com um fator único de estudo, gerando assim apenas um valor de F, se o valor de F calculado for maior que o F crítico significa que existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para o nível de significância estudado. Para determinar quais tratamentos diferem entre si, a presente pesquisa adotou utilizado o teste de médias de Tukey,

Nos resultados do teste de Turkey é possível ver o Q de turkey abaixo da diagonal, e os valores em rosa indicam que há diferença significativa entre os tratamentos, para o nível de significância adotado.

Para a apresentação de todos os resultados estatísticos da presente pesquisa, foi dividido nas duas partes de execução, primeiros os resultados da ANOVA (item A), realizada no Excel da Microsoft, e depois o teste de Turkey (item B), com auxílio do software Past 4.03, para determinar quais tratamentos diferem entre si.

Todos os dados da análise estão demonstrado abaixo, e os resultados foram incluídos nos resultados do texto da dissertação, juntamente com as tabelas de resultados de absorção de água e resistência à compressão (Tabela 4-4, Tabela 4-5, Tabela 4-11, Tabela 4-12, Tabela 4-13, Tabela 4-14, Tabela 4-15, Tabela 4-16, Tabela 4-17, Tabela 4-18, Tabela 4-19 e Tabela 4-20)

## A – ANOVA

### A.1 – ESTUDO DOS TIPOS DE CURA EM CPS CILÍNDRICOS

#### A.1.1 - ABSORÇÃO DE ÁGUA

Analizando estatisticamente os resultados da AA nos diferentes tipos de cura em 7 dias e depois em 28 dias.

##### 7 dias

Tabela A-1 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA nos CPs cilíndricos aos 7 dias

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	5,1954	2	2,5977	115,6689	1,6157E-05	5,1433
Dentro dos grupos	0,1347	6	0,0225			
Total	5,3302	8				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

##### 28 dias

Tabela A-2 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA nos CPs cilíndricos aos 28 dias

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	6,8013	2	3,4007	131,2301	1,1164E-05	5,1433
Dentro dos grupos	0,1555	6	0,0259			
Total	6,9568	8				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

## Analizando estatisticamente a evolução da AA de cada tipo de cura (dos 7 para os 28 dias)

### Sem cura

Tabela A-3 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tipo de cura “sem cura”

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,16233	1	0,16233	6,88743	0,05852924	7,70865
Dentro dos grupos	0,09428	4	0,02357			
Total	0,2566	5				

Como  $F < F_{crítico}$  não existe significância, ou seja, não existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

### Aspersão

Tabela A-4 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tipo de cura “aspersão”

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,30786	1	0,30786	16,399	0,01548116	7,70865
Dentro dos grupos	0,07509	4	0,01877			
Total	0,38295	5				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

### Lâmina-d'água

Tabela A-5 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tipo de cura “lâmina-d'água”

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,5406	1	0,5406	17,891	0,01337246	7,70865
Dentro dos grupos	0,12087	4	0,03022			
Total	0,66147	5				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

### A.1.2 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Analizando estatisticamente os resultados da RC nos diferentes tipos de cura em 7 dias e depois em 28 dias.

#### 7 dias

Tabela A-6 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC nos CPs cilíndricos aos 7 dias

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	8,2956	2	4,14778	149,6984	6,0678E-12	3,5546
Dentro dos grupos	0,4987	18	0,02771			
Total	8,7943	20				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

#### 28 dias

Tabela A-7 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC nos CPs cilíndricos aos 28 dias

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	16,5257	2	8,2628	197,7665	5,6087E-13	3,5546
Dentro dos grupos	0,7521	18	0,0418			
Total	17,2777	20				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

## Analizando estatisticamente a evolução da RC de cada tipo de cura (dos 7 para os 28 dias)

### Sem cura

Tabela A-8 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tipo de cura “sem cura”

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,3584	1	0,3584	7,6376	0,01716364	4,74723
Dentro dos grupos	0,56311	12	0,04693			
Total	0,92151	13				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

### Aspersão

Tabela A-9 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tipo de cura “aspersão”

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,65946	1	1,65946	59,118	5,6304E-06	4,74723
Dentro dos grupos	0,33684	12	0,02807			
Total	1,9963	13				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

### Lâmina-d'água

Tabela A-10 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tipo de cura “lâmina-d'água”

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	3,18175	1	3,18175	108,828	2,2633E-07	4,74723
Dentro dos grupos	0,35084	12	0,02924			
Total	3,53259	13				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

## A2 – ESTUDO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DO TIJOLO DE SOLO-CIMENTO DO GRUPO 1, GRUPO 2, GRUPO 3-1 E GRUPO 3-2 DA PRESENTE PESQUISA.

### A2.1 Absorção de água

#### A2.1.1 – Grupo 1

Analisando estatisticamente os resultados dos traços do grupo 1 em 7 dias e depois em 28 dias.

##### 7 dias

Tabela A-11 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA dos tijolos do grupo 1 aos 7 dias

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,8371	2	0,9185	17,4961	0,00313582	5,1433
Dentro dos grupos	0,3150	6	0,0525			
Total	2,1521	8				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

##### 28 dias

Tabela A-12 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA dos tijolos do grupo 1 aos 28

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,5166	2	0,2583	3,6094	0,09351518	5,1433
Dentro dos grupos	0,4294	6	0,0716			
Total	0,9460	8				

Como  $F < F_{crítico}$  não existe significância, ou seja, não existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

### A2.1.2 – Grupo 2

**Analisando estatisticamente os resultados dos traços do grupo 2 em 7 dias e depois em 28 dias.**

#### 7 dias

Tabela A-13 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA dos tijolos do grupo 2 aos 7 dias

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,1009	2	1,0504	16,9729	0,00338876	5,1433
Dentro dos grupos	0,3713	6	0,0619			
Total	2,4722	8				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

#### 28 dias

Tabela A-14 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA dos tijolos do grupo 2 aos 28 dias

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,5643	2	1,2822	15,7474	0,00409772	5,1433
Dentro dos grupos	0,4885	6	0,0814			
Total	3,0529	8				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

### A2.1.3 – Grupo 3-1

**Analisando estatisticamente os resultados dos traços do grupo 3-1 em 7 dias e depois em 28 dias.**

#### 7 dias

Tabela A-15 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA dos tijolos do grupo 3-1 aos 7

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,9017	1	1,9017	28,5588	0,00590923	7,7086
Dentro dos grupos	0,2664	4	0,0666			
Total	2,1681	5				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

#### 28 dias

Tabela A-16 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA dos tijolos do grupo 3-1 aos 28

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	6,2628	1	6,2628	77,6864	0,00091429	7,7086
Dentro dos grupos	0,3225	4	0,0806			
Total	6,5853	5				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

### A2.1.4 – Grupo 3-2

**Analisando estatisticamente os resultados dos traços do grupo 3-2 em 7 dias e depois em 28 dias.**

#### 7 dias

Tabela A-17 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA dos tijolos do grupo 3-2 aos 7

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,0584	1	1,0584	11,5315	0,02738294	7,7086
Dentro dos grupos	0,3671	4	0,0918			
Total	1,4255	5				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

#### 28 dias

Tabela A-18 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA dos tijolos do grupo 3-2 aos 28

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	6,4624	1	6,4624	56,0653	0,00170141	7,7086
Dentro dos grupos	0,4611	4	0,1153			
Total	6,9234	5				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

## A2.2 Resistência à compressão

### A2.2.1 – Grupo 1

Analizando estatisticamente os resultados dos traços do grupo 1 em 7 dias e depois em 28 dias.

#### 7 dias

Tabela A-19 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC dos tijolos do grupo 1 aos 7 dias

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,2351	2	0,1175	10,3774	0,0010	3,5546
Dentro dos grupos	0,2039	18	0,0113			
Total	0,4389	20				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

#### 28 dias

Tabela A-20 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC dos tijolos do grupo 1 aos 28

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,1947	2	0,0973	3,9925	0,0367	3,5546
Dentro dos grupos	0,4388	18	0,0244			
Total	0,6335	20				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

### A2.1.2 – Grupo 2

**Analisando estatisticamente os resultados dos traços do grupo 2 em 7 dias e depois em 28 dias.**

#### 7 dias

Tabela A-21 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC dos tijolos do grupo 2 aos 7 dias

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,6373	2	0,3186	8,3478	0,0027	3,5546
Dentro dos grupos	0,6871	18	0,0382			
Total	1,3244	20				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

#### 28 dias

Tabela A-22 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC dos tijolos do grupo 2 aos 28 dias

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	10,9749	2	5,4874	128,268	2,239E-11	3,5546
Dentro dos grupos	0,7701	18	0,0428			
Total	11,7449	20				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

### A2.1.3 – Grupo 3-1

**Analisando estatisticamente os resultados dos traços do grupo 3-1 em 7 dias e depois em 28 dias.**

#### 7 dias

Tabela A-23 -Resultados da ANOVA para o ensaio de RC dos tijolos do grupo 3-1 aos 7 dias

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	7,9955	1	7,9955	313,021	5,8065E-10	4,7472
Dentro dos grupos	0,3065	12	0,0255			
Total	8,3020	13				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

#### 28 dias

Tabela A-24 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC dos tijolos do grupo 3-1 aos 28 dias

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	26,3040	1	26,3040	585,277	1,4966E-11	4,7472
Dentro dos grupos	0,5393	12	0,0449			
Total	26,8433	13				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

### A2.1.4 – Grupo 3-2

**Analisando estatisticamente os resultados dos traços do grupo 3-2 em 7 dias e depois em 28 dias.**

#### 7 dias

Tabela A-25 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC dos tijolos do grupo 3-2 aos 7 dias

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	4,2460	1	4,2460	132,225	7,7667E-08	4,7472
Dentro dos grupos	0,3853	12	0,0321			
Total	4,6314	13				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

#### 28 dias

Tabela A-26 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC dos tijolos do grupo 3-2 aos 28 dias

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	21,8001	1	21,8001	674,527	6,4824E-12	4,7472
Dentro dos grupos	0,3878	12	0,0323			
Total	22,1879	13				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

**A3 – ESTUDO ESTATÍSTICO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DO TIJOLO DE SOLO-CIMENTO INDIVIDUALMENTE DE CADA TRAÇO, TR1, T1, T2, TR2, T3, T4, T3 24H, T4 24H.**

**A3.1 – Absorção de água**

**Analisando estatisticamente a evolução da AA (até os 28 dias de cura) de cada composição de tijolos da presente pesquisa.**

**Tr1**

Tabela A-27 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tijolo de traço Tr1

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,39527	1	0,39527	11,2345	0,02852142	7,70865
Dentro dos grupos	0,14073	4	0,03518			
Total	0,536	5				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

**T1**

Tabela A-28 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tijolo de traço T1

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,70682	1	2,70682	39,2103	0,00331815	7,70865
Dentro dos grupos	0,27613	4	0,06903			
Total	2,98295	5				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

**T2**

Tabela A-29 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tijolo de traço T2

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	7,30407	1	7,30407	89,2009	0,00070086	7,70865
Dentro dos grupos	0,32753	4	0,08188			
Total	7,6316	5				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

**Tr2**

Tabela A-30 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tijolo de traço Tr2

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	5,6454	1	5,6454	194,669	0,00015305	7,70865
Dentro dos grupos	0,116	4	0,029			
Total	5,7614	5				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

**T3**

Tabela A-31 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tijolo de traço T3

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	15,6494	1	15,6494	138,756	0,00029721	7,70865
Dentro dos grupos	0,45113	4	0,11278			
Total	16,1005	5				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

**T4**

Tabela A-32 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tijolo de traço T4

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	29,4236	1	29,4236	402,061	3,6509E-05	7,70865
Dentro dos grupos	0,29273	4	0,07318			
Total	29,7163	5				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

**T3 24h**

Tabela A-33 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tijolo de traço T3 24h

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	8,02245	1	8,02245	233,054	0,00010738	7,70865
Dentro dos grupos	0,13769	4	0,03442			
Total	8,16015	5				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

**T4 24h**

Tabela A-34 - Resultados da ANOVA para o ensaio de AA no tijolo de traço T4 24h

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	15,2961	1	15,2961	114,263	0,00043392	7,70865
Dentro dos grupos	0,53547	4	0,13387			
Total	15,8315	5				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

### A3.1 – Resistência à compressão

Analizando estatisticamente a evolução da RC (até os 28 dias de cura) de cada composição de tijolos da presente pesquisa.

#### Tr1

Tabela A-35 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tijolo de traço Tr1

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,4536	1	0,4536	17,8834	0,00117032	4,74723
Dentro dos grupos	0,30437	12	0,02536			
Total	0,75797	13				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

#### T1

Tabela A-36 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tijolo de traço T1

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,25401	1	1,25401	124,247	1,0952E-07	4,74723
Dentro dos grupos	0,12111	12	0,01009			
Total	1,37512	13				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

#### T2

Tabela A-37 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tijolo de traço T2

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,91922	1	2,91922	188,188	1,6494E-09	4,60011
Dentro dos grupos	0,21717	14	0,01551			
Total	3,13639	15				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

**Tr2**

Tabela A-38 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tijolo de traço Tr2

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,28826	1	2,28826	42,5515	2,8386E-05	4,74723
Dentro dos grupos	0,64531	12	0,05378			
Total	2,93357	13				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

**T3**

Tabela A-39 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tijolo de traço T3

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	10,2002	1	10,2002	267,07	1,453E-09	4,74723
Dentro dos grupos	0,45831	12	0,03819			
Total	10,6585	13				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

**T4**

Tabela A-40 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tijolo de traço T4

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	15,9005	1	15,9005	539,739	2,4104E-11	4,74723
Dentro dos grupos	0,35351	12	0,02946			
Total	16,254	13				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

**T3 24h**

Tabela A-41 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tijolo de traço T3 24h

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,79683	1	0,79683	24,6751	0,00032669	4,74723
Dentro dos grupos	0,38751	12	0,03229			
Total	1,18434	13				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

**T4 24h**

Tabela A-42 - Resultados da ANOVA para o ensaio de RC no tijolo de traço T4 24h

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,90183	1	1,90183	54,3824	8,5655E-06	4,74723
Dentro dos grupos	0,41966	12	0,03497			
Total	2,32149	13				

Como  $F > F_{crítico}$  existe significância, ou seja, existe diferença entre os tratamentos para nível de significância de 0,05 ( $\alpha = 0,05$ ).

## B – TESTE DE TUKEY

### B.1 – Estudo dos tipos de cura em CPs cilíndricos

#### B.1.1 – Absorção de água

Analizando estatisticamente os resultados da AA nos diferentes tipos de cura em 7 dias e depois em 28 dias.

7 dias

	Sem cura	Aspersão	Lâmina-d'água
Sem cura		0,0002387	1,276E-05
Aspersão	12,91		0,0024
Lâmina-d'água	21,35	8,442	

Figura B-1 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de AA nos CPs cilíndricos aos 7

28 dias

	Sem cura	Aspersão	Lâmina-d'água
Sem cura		0,0001973	8,497E-06
Aspersão	13,36		0,00133
Lâmina-d'água	22,8	9,444	

Figura B-2 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de AA nos CPs cilíndricos aos 28

#### B.1.2 – Resistência à compressão

Analizando estatisticamente os resultados da RC nos diferentes tipos de cura em 7 dias e depois em 28 dias.

7 dias

	Sem cura	Aspersão	Lâmina-d'água
Sem cura		2,708E-09	4,719E-12
Aspersão	16,34		0,000116
Lâmina-d'água	23,95	7,61	

Figura B-3 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de RC nos CPs cilíndricos aos 7

28 dias

	Sem cura	Aspersão	Lâmina-d'água
Sem cura		5,316E-10	4,032E-13
Aspersão	18,07		6,478E-06
Lâmina-d'água	27,7	9,626	

Figura B-4 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de RC nos CPs cilíndricos aos 28

## B.2 – Estudo das propriedades tecnológicas do tijolo de solo-cimento levando em conta os traços presentes no grupo 1, grupo 2, grupo 3-1 e grupo 3-2.

### B.2.1 – Absorção de água

#### B.2.1.1 – Grupo 1

Analizando estatisticamente os resultados dos traços do grupo 1 em 7 dias e depois em 28 dias.

##### 7 dias

	Tr1	T1	T2
Tr1		0,05861	0,002516
T1	4,158		0,05607
T2	8,366	4,208	

Figura B-5 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de AA nos tijolos do grupo 1 aos 7

##### 28 dias

	Tr1	T1	T2
Tr1		0,4542	0,08062
T1	1,813		0,3968
T2	3,798	1,986	

Figura B-6 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de AA nos tijolos do grupo 1 aos

#### A2.1.2 – Grupo 2

Analizando estatisticamente os resultados dos traços do grupo 2 em 7 dias e depois em 28 dias.

##### 7 dias

	Tr2	T3	T4
Tr2		0,06648	0,002722
T3	4,015		0,0553
T4	8,239	4,224	

Figura B-7 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de AA nos tijolos do grupo 2 aos 7

**28 dias**

	Tr2	T3	T4
Tr2		0,0504	0,003321
T3	4,33		0,09673
T4	7,925	3,595	

Figura B-8 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de AA do grupo 2 aos 28

**A2.1.3 – Grupo 3-1**

**Analisando estatisticamente os resultados dos traços do grupo 3-1 em 7 dias e depois em 28 dias.**

**7 dias**

	T3	T3 24h
T3		0,005936
T3 24h	7,548	

Figura B-9 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de AA do grupo 3 – 1 aos 7 dias

**28 dias**

	T3	T3 24h
T3		0,0009164
T3 24h	12,46	

Figura B- 10 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de AA do grupo 3 - 1 aos 28 dias

**A2.1.4 – Grupo 3-2**

**Analisando estatisticamente os resultados dos traços do grupo 3-2 em 7 dias e depois em 28 dias.**

**7 dias**

	T4	T4 24h
T4		0,02738
T4 24h	4,802	

Figura B-11 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de AA do grupo 3 – 2 aos 7

**28 dias**

	T4	T4 24h
T4		0,001685
T4 24h	10,62	

Figura B- 12 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de AA nos tijolos do grupo 3 – 2

**B2.2 Resistência à compressão****B2.2.1 – Grupo 1**

**Analisando estatisticamente os resultados dos traços do grupo 1 em 7 dias e depois em 28 dias.**

**7 dias**

	Tr1	T1	T2
Tr1		0,1387	0,0006981
T1	2,841		0,05158
T2	6,428	3,587	

Figura B-13 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de RC nos tijolos do grupo 1

**28 dias**

	Tr1	T1	T2
Tr1		0,3193	0,02882
T1	2,106		0,3947
T2	3,994	1,888	

Figura B-14 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de RC nos tijolos do grupo 1

**B2.2.2 – Grupo 2**

**Analisando estatisticamente os resultados dos traços do grupo 2 em 7 dias e depois em 28 dias.**

**7 dias**

	Tr2	T3	T4
Tr2		0,01096	0,003997
T3	4,643		0,8883
T4	5,301	0,6577	

Figura B-15 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de RC nos tijolos do grupo 2

**28 dias**

	Tr2	T3	T4
Tr2		4,248E-09	2,185E-11
T3	15,88		0,001255
T4	21,93	6,049	

Figura B-16 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de RC nos tijolos do grupo 2

**B2.2.3 – Grupo 3-1**

**Analisando estatisticamente os resultados dos traços do grupo 3-1 em 7 dias e depois em 28 dias.**

**7 dias**

	T3	T3 24h
T3		6,214E-10
T3 24h	25,02	

Figura B-17 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de RC do grupo 3 - 1 aos 7 dias

**28 dias**

	T3	T3 24h
T3		1,116E-11
T3 24h	34,21	

Figura B-18 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de RC do grupo 3 - 1 aos 28 dias

**B2.2.4 – Grupo 3-2**

**Analisando estatisticamente os resultados dos traços do grupo 3-2 em 7 dias e depois em 28 dias.**

**7 dias**

	T4	T4 24h
T4		7,763E-08
T4 24h	16,26	

Figura B-19 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de RC do grupo 3 - 2 aos 7 dias

**28 dias**

	T4	T4 24h
T4		3,855E-12
T4 24h	36,73	

Figura B-20 - Resultados do teste de Tukey para o ensaio de RC do grupo 3 - 2 aos 28 dias

**B3 – ESTUDO ESTATÍSTICO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DO TIJOLO DE SOLO-CIMENTO INDIVIDUALMENTE DE CADA TRAÇO, TR1, T1, T2, TR2, T3, T4, T3 24H, T4 24H.**

**B3.1 - Absorção de água**

**Analisando estatisticamente a evolução da AA (até os 28 dias de cura) de cada composição de tijolos da presente pesquisa.**

**TR1**

	7 dias	28 dias
7 dias		0,02852
28 dias	4,74	

Figura B-21 - Resultados do teste de Tukey do traço TR1 analisando a AA

**T1**

	7 dias	28 dias
7 dias		0,00332
28 dias	8,856	

Figura B-22 - Resultados do teste de Tukey do traço T1 analisando a AA

**T2**

	7 dias	28 dias
7 dias		0,0007032
28 dias	13,36	

Figura B-23 - Resultados do teste de Tukey do traço T2 analisando a AA

**TR2**

	7 dias	28 dias
7 dias		0,0001575
28 dias	19,73	

Figura B-24 - Resultados do teste de Tukey do traço TR2 analisando a AA

**T3**

	7 dias	28 dias
7 dias		0,0003005
28 dias	16,66	

Figura B-25 - Resultados do teste de Tukey do traço T3 analisando a AA

**T4**

	7 dias	28 dias
7 dias		4,387E-05
28 dias	28,36	

Figura B-26 - Resultados do teste de Tukey do traço T4 analisando a AA

**T3 CAL 24 HORAS**

	7 dias	28 dias
7 dias		0,0001141
28 dias	21,52	

Figura B-27 - Resultados do teste de Tukey do traço T4 analisando a AA

**T4 CAL 24 HORAS**

	7 dias	28 dias
7 dias		0,0004367
28 dias	15,12	

Figura B-28 - Resultados do teste de Tukey do traço T4 analisando a AA

**B3.1 – Resistência à compressão**

**Analisando estatisticamente a evolução da RC (até os 28 dias de cura) de cada composição de tijolos da presente pesquisa.**

**TR1**

	7 dias	28 dias
7 dias		0,00117
28 dias	5,981	

Figura B-29 - Resultados do teste de Tukey do traço TR1 analisando a RC

**T1**

	7 dias	28 dias
7 dias		1,095E-07
28 dias	15,76	

Figura B-30 - Resultados do teste de Tukey do traço T1 analisando a RC

**T2**

	7 dias	28 dias
7 dias		5,4E-08
28 dias	16,8	

Figura B-31 - Resultados do teste de Tukey do traço T2 analisando a RC

**TR2**

	7 dias	28 dias
7 dias		2,839E-05
28 dias	9,225	

Figura B-32 - Resultados do teste de Tukey do traço TR2 analisando a RC

**T3**

	7 dias	28 dias
7 dias		1,485E-09
28 dias	23,11	

Figura B-33 - Resultados do teste de Tukey do traço T3 analisando a RC

**T4**

	7 dias	28 dias
7 dias		2,042E-11
28 dias	32,86	

Figura B-34 - Resultados do teste de Tukey do traço T4 analisando a RC

**T3 CAL 24 HORAS**

	7 dias	28 dias
7 dias		0,0003267
28 dias	7,025	

Figura B-35 - Resultados do teste de Tukey do traço T3 cal 24h analisando a RC

**T4 CAL 24 HORAS**

	7 dias	28 dias
7 dias		8,566E-06
28 dias	10,43	

Figura B-36 - Resultados do teste de Tukey do traço T4 cal 24h analisando a RC