

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

GIOVANNA GONÇALVES

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE RESÍDUO DE CINZA DE CALDEIRA EM MISTURAS
DE SOLO E CIMENTO NA ABSORÇÃO DE ÁGUA E NA RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO SIMPLES**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2021

GIOVANNA GONÇALVES

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE RESÍDUO DE CINZA DE CALDEIRA EM MISTURAS
DE SOLO E CIMENTO NA ABSORÇÃO DE ÁGUA E NA RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO SIMPLES**

**EFFECTS OF ADDING BOILER ASH RESIDUE TO MIXTURES OF SOIL AND
CEMENT ON WATER ABSORPTION AND SIMPLE COMPRESSIVE STRENGTH**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof^o. Dr^o. Angelo Marcelo Tusset
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli

PONTA GROSSA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa**



GIOVANNA GONCALVES

**EFEITOS DA ADIÇÃO DE RESÍDUO DE CINZA DE CALDEIRA EM MISTURAS DE SOLO E CIMENTO NA
ABSORÇÃO DE ÁGUA E NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestra Em Engenharia De Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Gestão Industrial.

Data de aprovação: 24 de Maio de 2021

Prof Angelo Marcelo Tuset, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschlager, Doutorado - Universidade Estadual de Ponta Grossa (Uepg)

Prof Cassiano Moro Piekarski, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 24/05/2021.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pela oportunidade, e por sempre ser luz e estar guiando meus caminhos.

Agradeço meu pai Osmar e minha mãe Izabel *in memoriam*, pelo apoio incondicional, por toda a confiança depositada em mim e por sempre estarem ao meu lado.

Aos meus irmãos Adriana, Giane e Marcos e suas famílias, por todo o apoio e por estarem sempre ao meu lado.

Ao meu noivo Robison por todo o apoio e confiança.

À minha amiga Karen, por todo o apoio e companhia.

Ao professor Angelo por toda a orientação, confiança, paciência e ensinamentos, durante o desenvolvimento do projeto.

À professora Juliana por toda a orientação, confiança, paciência e ensinamentos.

À professora Maria Helene pela orientação, confiança, paciência e ensinamentos.

Agradeço aos demais professores do PPGEF pelos ensinamentos.

Ao professor Carlos Emmanuel por seus ensinamentos, pela oportunidade de utilizar o laboratório de mecânica dos solos e rochas.

Ao técnico de laboratório Nilson, pelos ensinamentos e auxílio prestado durante os experimentos.

Ao professor Marcos Soares por seus ensinamentos e pela oportunidade em utilizar o laboratório mecânico de ensaios destrutivos e não destrutivos.

Aos amigos de mestrado Diego e Cristiane por todo o auxílio que me deram e aos demais colegas do PPGEF.

Aos colegas de mestrado Wagner e Mauricio.

Agradeço aos alunos de iniciação científica Luiz Gustavo e de mestrado Luiza por todo o auxílio prestado no desenvolvimento dos experimentos.

À UTFPR e UEPG pela disponibilização da estrutura.

À UTFPR pela bolsa de mestrado (Recursos Próprios).

RESUMO

Gonçalves, Giovanna. **Efeitos da adição de resíduo de cinza de caldeira em misturas de solo e cimento na absorção de água e na resistência à compressão simples**. 2021. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

Em virtude do crescimento industrial e da geração de resíduos e biomassa, medidas têm sido tomadas para que os resíduos tenham como disposição final a reutilização, reaproveitamento em diferentes materiais ou reciclagem. A cinza de caldeira de biomassa é um resíduo cuja destinação final é a compostagem ou o aterro sanitário. Pesquisas relacionadas ao aproveitamento de resíduos têm abordado o potencial da utilização de cinzas provenientes de diversos processos produtivos, visando sua incorporação em tijolos de solo-cimento. A técnica de solo-cimento pode ser utilizada para a confecção de tijolos, blocos, parede monolítica, pavimentação, entre outros. Na mistura, a maior parte é o solo, podendo ter suas propriedades modificadas, a fim de se obter o produto desejado. Neste trabalho a dosagem da mistura solo-cimento e resíduo será feita estabelecendo-se proporções adequadas de solo-cimento e resíduo de cinza em moldagens de corpos de prova em triplicata para cada ponto de moldagem, para verificação da influência do teor de cimento, peso específico aparente seco e relação vazios/cimento a partir de ensaio de resistência à compressão simples. O solo é composto na sua maioria por finos e argila e o resíduo de cinza possui maior fração areia em sua composição. De maneira geral verificou-se que em amostras de solo-cimento para um peso específico de 17 kN/m^3 não houve ganhos nos valores de resistência à compressão simples, à medida em que se aumentou o teor de cimento, diferente do que foi observado para os pesos específicos de 16 kN/m^3 e $16,50 \text{ kN/m}^3$. A adição de resíduo de cinza e cimento gerou um crescimento linear nos valores de resistência à compressão simples, para os três pesos específicos aparentes secos. Quanto a influência do peso específico aparente seco, nota-se que em amostras de solo-cimento o peso específico foi significativo para menores teores de cimento e em amostras de solo-cimento-resíduo de cinza a variação do peso específico não gerou ganhos de resistência à compressão simples. Verificou-se que a adição de resíduo de cinza e teor de cimento, melhoraram o desempenho da mistura, proporcionando menor dispersão nos pontos da curva de relação vazios/cimento e gerou ganhos nos valores de resistência à compressão simples. A incorporação do resíduo de cinza à mistura de solo-cimento proporcionou aos corpos de prova, menor capacidade em absorver água. A partir da análise dos resultados estatísticos estabeleceu-se as melhores dosagens para o cálculo dos custos da matéria prima para a confecção de tijolos de solo-cimento-resíduo de cinza, sendo o mais econômico o tijolo composto por solo, 30% de resíduo de cinza, 11% de cimento com peso específico de 16 kN/m^3 .

Palavras-chave: Solo-cimento, resíduo de cinza de caldeira, relação vazios/cimento, resistência à compressão simples, análise estatística

ABSTRACT

Gonçalves, Giovanna. **Effects of adding boiler ash residue to mixtures of soil and cement on water absorption and simple compressive strength.** 2021. 163 p. Thesis (Master's Degree in Production Engineering) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

Due to the industrial growth and the generation of waste and biomass, measures have been taken so that the waste has as its final disposition the reuse, reuse in different materials or recycling. Biomass boiler ash is a waste whose final destination is compost or landfill. Research related to the use of waste has addressed the potential of using ash from various production processes, aiming at its incorporation into soil-cement bricks. The soil-cement technique can be used to make bricks, blocks, monolithic walls, paving, among others. In the mixture, most of it is the soil, and its properties can be modified in order to obtain the desired product. In this work, the dosage of the soil-cement and residue mixture will be done by establishing adequate proportions of soil-cement and ash residue in triplicate specimen moldings for each molding point, to verify the influence of the cement content, weight apparent dry specificity and voids / cement ratio from simple compressive strength test. The soil is composed mostly of fines and clay and the ash residue has a higher fraction of sand in its composition. In general, it was found that in soil-cement samples for a specific weight of $17 \text{ kN} / \text{m}^3$ there were no gains in the values of resistance to simple compression, as the cement content increased, differently from what was observed for the specific weights of $16 \text{ kN} / \text{m}^3$ and $16.50 \text{ kN} / \text{m}^3$. The addition of ash and cement residue generated a linear growth in the values of resistance to simple compression, for the three dry specific weights. As for the influence of the dry apparent specific weight, it is noted that in soil-cement samples the specific weight was significant for lower cement contents and in soil-cement-ash residue samples the variation in specific weight did not generate resistance gains to simple compression. It was found that the addition of ash residue and cement content, improved the performance of the mixture, providing less dispersion in the points of the empty / cement ratio curve and generated gains in the values of resistance to simple compression. The incorporation of ash residue in the soil-cement mixture provided the specimens with less capacity to absorb water. Based on the analysis of the statistical results, the best dosages were established for calculating the costs of the raw material for making soil-cement-ash bricks, the most economical being the brick composed of soil, 30% gray, 11% cement with specific weight of $16 \text{ kN} / \text{m}^3$.

Keywords: Soil-cement, boiler ash residue, voids/cement ratio, simple compressive strength, statistical analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fotografia 1– A (aspecto da ranhura antes da aplicação dos golpes); B (aspecto da amostra após a aplicação dos golpes); C (aspecto do fechamento da ranhura).....	60
Fotografia 2- Placa de vidro e gabarito usados no ensaio de plasticidade.....	62
Fotografia 3- Aspecto das amostras do ensaio de plasticidade	63
Fotografia 4– A (solução de água destilada e solo); B (solução de água destilada e solo em agitação no fogo).....	64
Fotografia 5– Preparação de solução de hexametáfosfato de sódio	65
Fotografia 6- A (dispersor); B (solução de solo no início da sedimentação)	66
Fotografia 7 – Amostras de solo preparadas	70
Fotografia 8– Corpo de prova de solo-cimento (A) e corpo de prova de solo-cimento e resíduo de cinza (B)	73
Fotografia 9– Corpo de prova submetido ao ensaio de compressão simples	74
Fotografia 10 – Corpo de prova de solo-cimento (A) e corpo de prova de solo-cimento-resíduo de cinza (B) em banho de água	75
Fotografia 11 – Comparação de coloração entre os filtrados de solo	93
Fotografia 12– Comparação de coloração entre os filtrados de solo	93
Figura 1 – Aplicação do conceito de economia circular aplicada à utilização do resíduo de cinza.....	23
Figura 2- Limites de Consistência do Solo	38
Figura 3 - Presença de hidróxido de cálcio e silicato de cálcio hidratado	44
Figura 4 – Nomenclatura corpos de prova de solo-cimento.....	78
Figura 5– Nomenclatura corpos de prova de solo-cimento-resíduo de cinza.....	79
Figura 6 - Superfície de resposta teor de cimento <i>versus</i> peso específico aparente seco	97
Figura 7- Exemplificação “ <i>box plot</i> ”	119
Figura 8 - Resistência à compressão simples (N/mm ²) para as amostras (a, b, c).....	121
Figura 9- Resistência à compressão simples (N/mm ²) para as amostras (d, e, f).....	122
Figura 10 - Resistência à compressão simples (N/mm ²) para as amostras (a, b, c, d, e, f).....	123
Figura 11 - Resistência à compressão simples (N/mm ²) para as amostras (a, d).....	125
Figura 12 - Resistência à compressão simples (N/mm ²) para as amostras (b, e).....	126

Figura 13- Resistência à compressão simples (N/mm ²) para as amostras (c, f)	127
Figura 14- Resistência à compressão simples (N/mm ²) para as amostras (e, f)	128
Figura 15- Resistência à compressão simples (N/mm ²) para as amostras (a, b, c)	130
Figura 16 - Resistência à compressão simples (N/mm ²) para as amostras (d, e, f)	131
Figura 17- Resistência à compressão simples (N/mm ²) para as amostras (a, b, c, d, e, f)	132
Figura 18- Resistência à compressão simples (N/mm ²) para as amostras (a, d)	134
Figura 19- Resistência à compressão simples (N/mm ²) para as amostras (b, e)	135
Figura 20- Resistência à compressão simples (N/mm ²) para as amostras (c, f)	136
Figura 21- Resistência à compressão simples (N/mm ²) para as amostras (a, b)	137
Figura 22- Resistência à compressão simples (N/mm ²) para as amostras (a, c)	138
Figura 23- Resistência à compressão simples (N/mm ²) para as amostras (b, c)	139
Figura 24- Resistência à compressão simples (N/mm ²) para as amostras (d, e)	140
Figura 25- Resistência à compressão simples (N/mm ²) para as amostras (d, f)	141
Figura 26- Resistência à compressão simples (N/mm ²) para as amostras (e, f)	142
Gráfico 1- Principais áreas relacionadas ao tema solo-cimento	23
Gráfico 2 - Destinação dos resíduos sólidos industriais no Paraná	30
Gráfico 3 - Destinação dos resíduos sólidos industriais por grupo final no Paraná	30
Gráfico 4 - Destinação regional dos resíduos sólidos industriais em Ponta Grossa ...	31
Gráfico 5 – Curva de compactação de um solo Argilo-Siltoso	40
Gráfico 6– Relação vazios/cimento e resistência à compressão simples	48
Gráfico 7– Curva de ajuste da relação vazios/cimento e resistência à compressão simples	50
Gráfico 8 – Relação vazios/agente cimentante expresso em termos de porosidade e teor volumétrico de agente cimentante para diferentes períodos de cura.	51
Gráfico 9 – Curva de ajuste relação vazios/cimento e resistência à compressão simples para corpos de prova de solo-cimento	52
Gráfico 10– Curva de ajuste relação vazios/cimento e resistência à compressão simples para corpos de prova de solo-cimento e adição de RCD	52
Gráfico 11 – Efeitos da adição do cimento sobre à resistência à compressão simples para diferentes tipos de solo estabilizados com cimento Portland e curados por 7 dias.	56
Gráfico 12 - Gráfico do Limite de Liquidez	61

Gráfico 13– Pontos escolhidos para moldagem.....	76
Gráfico 14– Limite de liquidez do solo.....	84
Gráfico 15– Curva granulométrica do solo.....	87
Gráfico 16– Curva granulométrica do resíduo de cinza	88
Gráfico 17 – Curvas granulométricas do solo e resíduo de cinza juntas.....	89
Gráfico 18– Curva de compactação e saturação do solo.....	90
Gráfico 19– Curvas de compactação do solo + 30% resíduo de cinza e saturação.....	90
Gráfico 20– Curvas de compactação juntas.....	91
Gráfico 21– Resistência à compressão <i>versus</i> umidade.....	95
Gráfico 22 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a resistência à compressão simples	98
Gráfico 23 - Gráfico dos valores esperados <i>versus</i> valores observados para a resistência à compressão simples.....	99
Gráfico 24– Efeito do teor de cimento sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento para o peso específico aparente seco de 17 kN/m ³	102
Gráfico 25– Efeito do teor de cimento sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento para o peso específico aparente seco de 16,50 kN/m ³	103
Gráfico 26– Efeito do teor de cimento sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento para o peso específico aparente seco de 16 kN/m ³	104
Gráfico 27– Efeito do teor de cimento sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento e resíduo de cinza para o peso específico aparente seco de 17 kN/m ³	105
Gráfico 28– Efeito do teor de cimento sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento e resíduo de cinza para o peso específico aparente seco de 16,50 kN/m ³	105
Gráfico 29– Efeito do teor de cimento sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento e resíduo de cinza para o peso específico aparente seco de 16 kN/m ³	106
Gráfico 30– Efeito do peso específico aparente seco sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento para o teor de cimento de 7%	107
Gráfico 31 – Efeito do peso específico aparente seco sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento para o teor de cimento de 11%	108
Gráfico 32– Efeito do peso específico aparente seco sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento para o teor de cimento de 14%	109

Gráfico 33– Efeito do peso específico aparente seco sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento resíduo de cinza para o teor de cimento de 7%	110
Gráfico 34 - Efeito do peso específico aparente seco sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento resíduo de cinza para o teor de cimento de 11%	111
Gráfico 35 - Efeito do peso específico aparente seco sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento resíduo de cinza para o teor de cimento de 14%	112
Gráfico 36-Relação vazios/cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples para corpos de prova de solo-cimento sem ajuste	113
Gráfico 37– Relação vazios/cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples para corpos de prova de solo-cimento-resíduo de cinza sem ajuste.....	114
Gráfico 38– Relação vazios/cimento <i>versus</i> resistência à compressão simples para corpos de prova de solo-cimento-resíduo de cinza com ajuste.....	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios para a seleção de solos	36
Tabela 2 – Tipos e composição do cimento Portland	45
Tabela 3– Dosagem solo-cimento.....	77
Tabela 4 – Composição mistura de solo-cimento	78
Tabela 5 – Dosagem solo-cimento-resíduo de cinza	79
Tabela 6– Dosagem solo-cimento-resíduo de cinza	80
Tabela 7 – Matriz do planejamento experimental 2^2 com três pontos centrais	81
Tabela 8 - Ordem dos ensaios do planejamento experimental 2^2 com três pontos centrais	81
Tabela 9– Umidade do solo pelo método da estufa	83
Tabela 10– Umidade do resíduo de cinza pelo método da estufa	83
Tabela 11 – Limite de liquidez do solo	84
Tabela 12– Limite de plasticidade do solo	85
Tabela 13 – Peso específico real dos grãos de solo	86
Tabela 14– Peso específico real do resíduo de cinza	86
Tabela 15– Teor de matéria orgânica do solo	92
Tabela 16 – Teor de matéria orgânica do resíduo de cinza	92
Tabela 17– Valores de tensão máximas obtidos para cada corpo de prova	94
Tabela 18– Valores de tensão máximas obtidos para os corpos de prova de solo-cimento	96
Tabela 19– ANOVA do planejamento experimental para a resistência à compressão simples de corpos de prova de solo-cimento	96
Tabela 20– Dados obtidos das moldagens dos corpos de prova de solo-cimento.....	100
Tabela 21 - Dados obtidos das moldagens dos corpos de prova de solo-cimento-resíduo de cinza.....	101
Tabela 22- Resultados ensaio de absorção de água para corpos de prova de solo-cimento e solo-cimento resíduo de cinza	116
Tabela 23 – Tabela ANOVA.....	120
Tabela 24 - Variações da resistência à compressão simples (N/mm^2) para dados sem ajustes.....	120
Tabela 25 – Estatísticas das variações da resistência à compressão simples (N/mm^2) para dados sem ajustes	121

Tabela 26 – Tabela ANOVA para as amostras (a, b, c)	122
Tabela 27– Tabela ANOVA para as amostras (d, e, f)	123
Tabela 28– Tabela ANOVA para as amostras (a, b, c, d, e, f)	124
Tabela 29– Tabela ANOVA para as amostras (a, d)	125
Tabela 30– Tabela ANOVA para as amostras (b, e)	126
Tabela 31-Tabela ANOVA para as amostras (c, f)	127
Tabela 32– Tabela ANOVA para as amostras (e, f)	128
Tabela 33– Resumo dos resultados ANOVA para os dados sem ajustes.....	129
Tabela 34 - Variações da resistência à compressão simples (N/mm ²) para dados ajustados	130
Tabela 35– Estatísticas das variações da resistência à compressão simples (N/mm ²) para dados ajustados	130
Tabela 36– Tabela ANOVA para as amostras (a, b, c)	131
Tabela 37 – Tabela ANOVA para as amostras (d, e, f)	132
Tabela 38– Tabela ANOVA para as amostras (a, b, c, d, e, f)	133
Tabela 39– Tabela ANOVA para as amostras (a, d)	134
Tabela 40– Tabela ANOVA para as amostras (b, e)	135
Tabela 41– Tabela ANOVA para as amostras (c, f)	136
Tabela 42– Tabela ANOVA para as amostras (a, b)	137
Tabela 43– Tabela ANOVA para as amostras (a, c)	138
Tabela 44– Tabela ANOVA para as amostras (b, c)	139
Tabela 45– Tabela ANOVA para as amostras (d, e)	140
Tabela 46– Tabela ANOVA para as amostras (d, f)	141
Tabela 47– Tabela ANOVA para as amostras (e, f)	142
Tabela 48- Resumo dos resultados ANOVA para os dados com ajustes	143
Tabela 49 – Custo da matéria-prima para tijolos solo-cimento-resíduo de cinza com peso específico aparente seco de 17 kN/m ³	145
Tabela 50 – Custo da matéria-prima para tijolos solo-cimento-resíduo de cinza com peso específico aparente seco de 16,50 kN/m ³	145
Tabela 51 – Custo da matéria-prima para tijolos solo-cimento-resíduo de cinza com peso específico aparente seco de 16 kN/m ³	146
Tabela 52 – Custo da matéria-prima para tijolos solo-cimento-areia com peso específico aparente seco de 17 kN/m ³	147

Tabela 53– Custo da matéria-prima para tijolos solo-cimento-areia com peso específico aparente seco de 16,50 kN/m ³	147
Tabela 54– Custo da matéria-prima para tijolos solo-cimento-areia com peso específico aparente seco de 16,00 kN/m ³	148

LISTA DE SIGLAS, ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AASHTO – American Association of State Highway Officials
 Al_2O_3 – Óxido de alumínio
 C_2S - Silicato bicálcico
 C_3A - Aluminato tricálcico
 C_3S - Silicato tricálcico
 C_4AFe - Ferro aluminato tetracálcico
 $\text{C}_7\text{H}_5\text{O}_4$ – Ácido Tânico
 CaO – Óxido de cálcio
CAP - cimento asfáltico de petróleo
CH - Hidróxido de cálcio
CO - Monóxido de carbono
 CO_2 – Dióxido de carbono
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
CSH - Silicato de cálcio hidratado
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
 Fe_2O_3 – Óxido de ferro
 H_2O_2 - Peróxido de hidrogênio
IAT – Instituto Água e Terra
IP – Índice de Plasticidade
ICPA - Instituto del Cemento Portland Argentino
 K_2O – Óxido de potássio
LL - Limite de Liquidez
LP- Limite de Plasticidade
 MgO – Óxido de magnésio
 Na_2O – Óxido de sódio
NBR – Norma Brasileira
NaOH - Hidróxido de sódio
 P_2O_5 – Óxido de fósforo
PCA – Portland Cement Association
PERS/PR - Plano de Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná

PET – Poli (Tereftalato de Etileno)
PNRS - Plano Nacional de Resíduos Sólidos
RCD – Resíduo de construção e demolição
SiO₂ – Dióxido de silício/ quartzo
SO₃ – Anidrido sulfúrico
SISNAMA – Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNVS – Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SUASA – Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária
SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos
TiO₂ – Óxido de titânio

LISTA DE SÍMBOLOS

atm – Atmosfera padrão
°C – Graus Celsius
d – Diâmetro das partículas de solo em suspensão
D_T – Densidade real do solo
D₂₀ - Densidade real do solo a 20 °C
k₂₀ – Razão entre a densidade relativa da água determinada temperatura (T) e densidade relativa da água a 20 °C
D_t – Densidade real do solo a temperatura T
h – Teor de umidade em %
L - Leitura do densímetro na suspensão
Ld - Leitura do densímetro no meio dispersor
Q_g – Porcentagem de material passante em cada peneira
Q_s - Porcentagem de solo presente na solução no momento da leitura do densímetro
Q_f – Porcentagens dos materiais que passam nas peneiras de nº 16, nº 30, nº 40, nº 50, nº 100 e nº 200.
N – Porcentagem de material passante na peneira de 2,0 mm
m – Massa da cápsula
m_{bu} – Massa bruta úmida
m_{bs} – Massa bruta seca
MPa – Megapascal

w - Teor de umidade higroscópica em %

z - Altura da queda das partículas, referente à leitura do densímetro em cm

ρ_{md} - Massa específica do meio dispersor na temperatura de inspeção do densímetro a 20 °C

ρ_s - Massa específica dos grãos de solo em [g/cm³]

ρ_d - Massa específica aparente seca [g/cm³ ou kg/m³]

ρ_{wc} - Massa específica da água (considerar 1 g/cm³)

t é o tempo de sedimentação em segundos (s)

$\omega_{ót}$ - Umidade ótima em %.

μ - Coeficiente de viscosidade do meio dispersor à temperatura do ensaio em [g x s/cm²]

ϕ - diâmetro do cilindro

V_v - Volume absoluto de vazios (ar+água)

V_c - Volume de cimento

V_{ci} - Volume de cimento

n - Porosidade

C_{iv} - Teor volumétrico de cimento

q_u - Resistência à compressão simples

N/mm² - Newton por milímetro quadrado

kPa - Quilopascal

γ_d - Peso específico aparente seco

kN/m³ - Quilonewton por metro cúbico

γ - Peso específico do solo

P - Peso do solo compactado

V - Volume do solo (molde cilíndrico)

kgf - Quilograma-força

A - Absorção de água do corpo de prova em %

\bar{X} - Média das amostras

μ - Desvio padrão da amostra

S' - Intervalo de confiança

IC - Intervalo de confiança

α - Nível de significância

n - Tamanho da amostra

t - Distribuição T-Student

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	20
1.1 OBJETIVOS	21
1.1.2 Objetivo geral	21
1.1.3 Objetivos específicos	21
1.2 JUSTIFICATIVA	22
1.3 ADERÊNCIA DO TEMA NA ENGENHARIA DE PRODUÇÃO	23
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	24
2. REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1 ECONOMIA CIRCULAR	25
2.2 RESÍDUO SÓLIDO	26
2.2.2 Resíduo sólido industrial	28
2.2.3 Resíduos sólidos no estado do Paraná	29
2.3 CINZA DE CALDEIRA DE BIOMASSA	31
2.4 VISÃO GERAL E MATERIAIS UTILIZADOS NA TÉCNICA DE SOLO-CIMENTO .	33
2.4.1 Visão geral sobre a técnica de solo-cimento	33
2.4.2 Materiais utilizados na técnica de solo-cimento	34
2.4.2.1 Solo	34
2.4.2.1.1 Granulometria Norma NBR 7181 (ABNT, 2016)	36
2.4.2.1.2 Principais constituintes do solo	37
2.4.2.1.3 Consistência dos solos Normas NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016)	37
2.4.2.1.4 Compactação Norma NBR 7182 (ABNT, 2016)	38
2.4.2.1.5 Estabilização do solo	41
2.4.3 Cimento Portland	42
2.4.4 Adições	45
2.5 METODOLOGIA DE DOSAGEM DO SOLO-CIMENTO	46
2.6 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	53
2.7 FATORES DETERMINANTES DO COMPORTAMENTO DO SOLO-CIMENTO ...	54
2.7.1 Efeito do teor de cimento	55
2.7.2 Efeito da densidade e compactação	55
2.7.3 Comportamento mecânico	55
2.7.3.1 Resistência à compressão simples	55
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	57
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL DE MOLDAGEM	57
3.2 MÉTODOS	58

3.2.1 Materiais.....	58
3.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	59
3.3.1 Consistência dos solos.....	59
3.3.1.1 Preparação das amostras Norma NBR 6457 (ABNT, 2016)	59
3.3.1.2 Umidade higroscópica do solo e resíduo de cinza pelo método da estufa	59
3.3.1.3 Limite de Liquidez do Solo – Norma NBR 6459 (ABNT, 2016)	60
3.3.1.4 Limite de Plasticidade do Solo – Norma NBR 7180 (ABNT, 2016)	61
3.3.2 Determinação da densidade real dos grãos Norma ME 093 (DNER, 1994)	63
3.3.3 Análise granulométrica do solo – Norma NBR 7181 (ABNT, 2016)	65
3.3.4 Ensaio de compactação Norma NBR 7182 (ABNT, 2016)	69
3.3.5 Teor de matéria orgânica	70
3.3.5.1 Adição de peróxido de hidrogênio	70
3.3.5.2 Determinação de impurezas orgânicas Norma NBR NM 49 (ABNT, 2001).	71
3.4 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	71
3.4.1 Ensaio de compressão simples Norma NBR 12025 (ABNT, 2012)	73
3.4.2 Ensaio de absorção de água Norma NBR 13555 (ABNT, 2012).....	74
3.5 PROGRAMA DE ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	75
3.5.1 Dosagem das misturas.....	77
3.5.1.1 Dosagem da mistura de solo-cimento	77
3.5.1.2 Dosagem da mistura de solo-cimento-resíduo de cinza.....	78
3.5.2 Método de avaliação da influência do teor de cimento e do peso específico aparente seco	80
3.5.3 Método de avaliação da relação vazios/cimento	80
3.6 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	80
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	83
4.1 CONSISTÊNCIA DOS SOLOS	83
4.1.1 Determinação da umidade higroscópica do solo e resíduo de cinza.....	83
4.1.2. Limite de liquidez do solo	83
4.1.3 Limite de plasticidade do solo	84
4.2 PESO ESPECÍFICO REAL DOS GRÃOS NORMA ME 093 (DNER, 1994).....	85
4.3 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	86
4.4 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....	89
4.5 TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA	92
4.6 RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES PARA DEFINIÇÃO DA UMIDADE OBJETIVO DE MOLDAGEM E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL ...	94
4.6.1 Resistência à compressão simples para definição da umidade objetivo de moldagem	94
4.6.2 Planejamento experimental	95

4.7 EFEITOS DAS VARIÁVEIS DE INVESTIGAÇÃO SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	99
4.7.1 Efeito do teor de cimento	102
4.7.2 Efeito do peso específico aparente seco.....	107
4.7.3 Relação vazios/cimento	112
4.8 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	115
5. ANÁLISE ESTATÍSTICA E ECONÔMICA SOLO-CIMENTO-RESÍDUO DE CINZA	118
5.1.1 Análise para os dados sem ajustes.....	120
5.1.1.1 Análise de variância (ANOVA)	121
5.2.1 Análise para os dados com ajustes.....	129
5.2.1.1 Análise de variância (ANOVA)	130
5.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA	144
6. CONCLUSÕES	149
6.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO	150
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	151
REFERÊNCIAS	152

1. INTRODUÇÃO

Os crescentes desenvolvimentos da produção nas indústrias, bem como a busca pela minimização da geração de resíduos, levam as empresas a buscarem alternativas para a sua destinação final. Os conceitos de reciclagem, reutilização, remanufatura, possibilitam o menor consumo de recursos e geração de resíduos.

No contexto de sustentabilidade e do meio ambiente, surgem fontes de energia renováveis que utilizam a biomassa como fonte de geração de energia limpa por meio da queima em caldeiras. No entanto, esse processo gera resíduos, como as cinzas, que possuem como principal destinação final o descarte em aterros sanitários ou a compostagem.

O processo de operação em aterros sanitários, envolve ações e atividades multidisciplinares relacionadas as áreas de engenharia civil, sanitária e controle ambiental. Os locais de disposição final de resíduos, devem ser adequados em relação aos critérios técnicos e ambientais, que busquem diminuir os impactos ambientais e à saúde. As etapas de tratamento e disposição final geram altos custos, principalmente nos grandes centros urbanos, tornando uma busca maior por alternativas e soluções para que a disposição ocorra de forma adequada (CATAPRETA, 2008).

O setor da construção civil é um dos que mais geram resíduos e mais utilizam recursos naturais, incentivando a busca pela preservação ambiental, o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis e que atendam as normas técnicas, o que tem disseminado interesse e pesquisas nesta área. Diversos resíduos têm sido incorporados em materiais desse setor, como resíduo cerâmico em concreto, incorporação de resíduos PET em tijolos de solo-cimento, resíduo de vidro em argamassa, entre outros (PACHECO-TORGAL E JALALI, 2010; FILHO; STOROPOLI E DIAS, 2016; AZEVEDO et al., 2017).

A técnica de solo-cimento, passou a ser regulamentada Brasil em 1936 e pode ser utilizada para confecção de blocos e tijolos para alvenaria, fundações, parede monolítica, pavimentação e vedação vertical (SEGANTINI E ALCÂNTARA, 2010; SIMIONI, 2020). A dosagem do solo-cimento ocorre por meio da mistura de proporções adequadas de solo, cimento e água e tem atraído pesquisadores a incorporarem resíduos sólidos para analisar o seu efeito sobre a resistência à compressão e absorção de água. Alguns pesquisadores obtiveram resultados satisfatórios na incorporação de alguns resíduos ao tijolo de solo-cimento como resíduo cerâmico moído, adição de fibra

de palha de trigo e palha de cevada e resíduo de casca de arroz (LIMA-JÚNIOR; WILLRICH; BARBOSA, 2003; ASHOUR et al., 2015; FERREIRA E CUNHA, 2017).

1.1 OBJETIVOS

1.1.2 Objetivo geral

Investigar os efeitos da adição de resíduo de cinza de caldeira em misturas de solo-cimento sobre as variáveis investigadas, e por meio de ensaios de resistência à compressão simples determinar a melhor combinação de solo-cimento-cinza.

1.1.3 Objetivos específicos

- Caracterizar quanto aos parâmetros geotécnicos o solo e o resíduo de cinza de caldeira;
- Realizar campanha de ensaios de compactação com diferentes teores de cimento adicionado ao solo com e sem adição de resíduo de cinza;
- Estabelecer teores ótimos de umidade e peso específico aparente seco, a partir das curvas de compactação, para estabelecer os pontos de moldagem para a campanha experimental de ensaios de resistência à compressão simples;
- Realizar as moldagens de corpos de prova de solo-cimento e solo-cimento com adição de resíduo de cinza com máximo aproveitamento de resíduo a partir das curvas de compactação;
- Identificar por meio do planejamento de experimentos as variáveis mais significativas;
- Analisar o efeito do cimento e do peso específico aparente seco sobre a resistência à compressão simples;
- Obter os resultados de curva relação vazios/cimento;
- Estabelecer metodologia de dosagem para os materiais empregados na mistura de solo-cimento-resíduo de cinza, baseada em ensaios de compressão simples;
- Efetuar teste de absorção de água em corpos de prova cilíndricos;
- Analisar estatisticamente os resultados obtidos;

- Verificar economicamente a confecção de tijolos de solo-cimento-resíduo de cinza, a partir dos dados estatísticos.

1.2 JUSTIFICATIVA

A construção civil é responsável por 40% da energia utilizada em todo o mundo e um terço das emissões de gases de efeito estufa, assim, existem técnicas mais sustentáveis como o solo-cimento que pode ser utilizado para fabricação de blocos e tijolos (MUÑOZ et al., 2016; MURMU E PATEL, 2018).

Em Geotecnia o solo é um material muito utilizado, com características próprias e que variam de região para região, o qual muitas vezes não satisfaz a necessidade do projeto ou produto final, podendo passar por processos de melhorias granulométricas e estabilização com agentes cimentantes, para melhoria de suas propriedades. Diante da inviabilização de utilização do solo, existem alternativas para melhorar esse solo como a estabilização com cimento ou cal.

Nesse contexto, a busca pela diminuição da poluição ambiental, a destinação adequada de resíduos gerados em processos produtivos e a conservação de matéria-prima (solo) têm contribuído para a sustentabilidade e abordagens mais ecológicas (AL-FAKIH et al., 2019).

Pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de utilizar resíduos na estabilização de solos, podendo substituir em parte, o solo ou cimento sendo uma alternativa para destinação final do resíduo, como o de cinza de caldeira. Resíduo proveniente da queima de lenha em caldeiras, cujas características estão relacionadas ao processo produtivo, biomassa e desempenho da caldeira, em que a destinação final pode ser um problema ambiental.

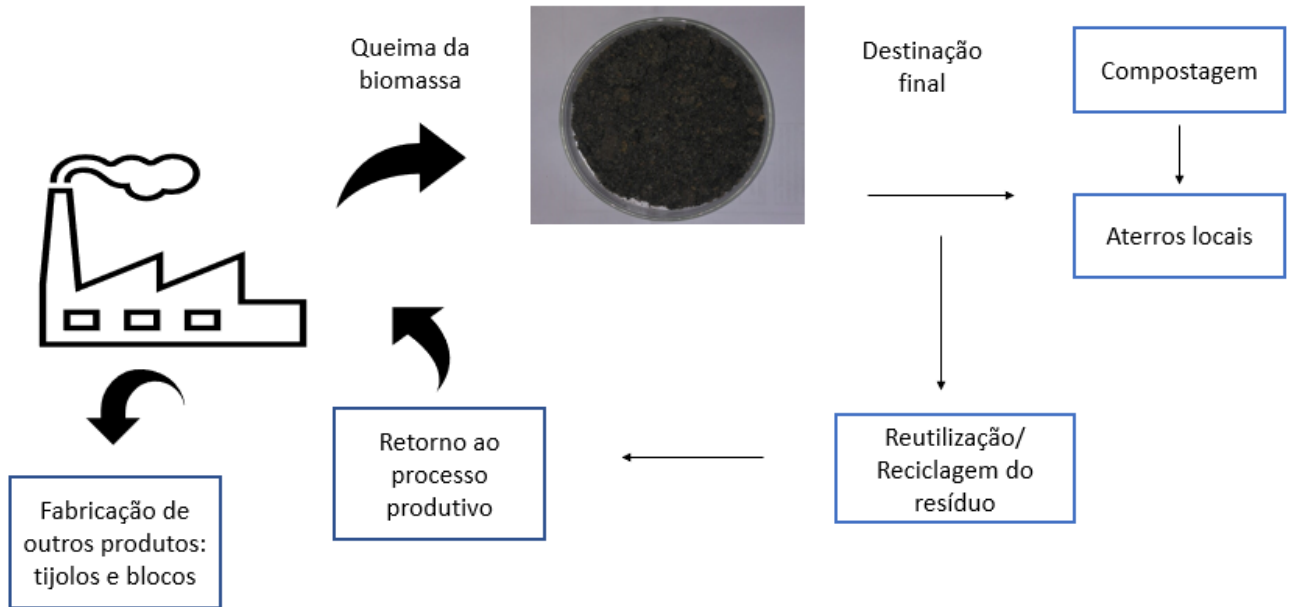
Dessa forma a pesquisa propõe uma nova abordagem ao tema, relacionando a adição de resíduo de cinza à mistura de solo-cimento, estabelecendo uma metodologia de dosagem. O trabalho traz também o conceito de economia circular ¹que atualmente tem se disseminado por setores da economia como: agricultura, energia e transportes e estudos recentes na área da engenharia civil.

As transições que estão ocorrendo nas indústrias têm relacionado mudanças de conceito de economia linear para economia circular, buscando o mínimo desperdício de

¹ Economia voltada ao mínimo desperdício, visando otimizar componentes e produtos com possibilidade inserção de resíduos novamente ao processo produtivo, para aplicação em outros materiais

matérias primas e mínima geração de resíduos. Visando o conceito de economia circular, o trabalho demonstra a reutilização do resíduo de cinza, podendo o resíduo retornar ao ciclo produtivo com a confecção de outro produto, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Aplicação do conceito de economia circular aplicada à utilização do resíduo de cinza

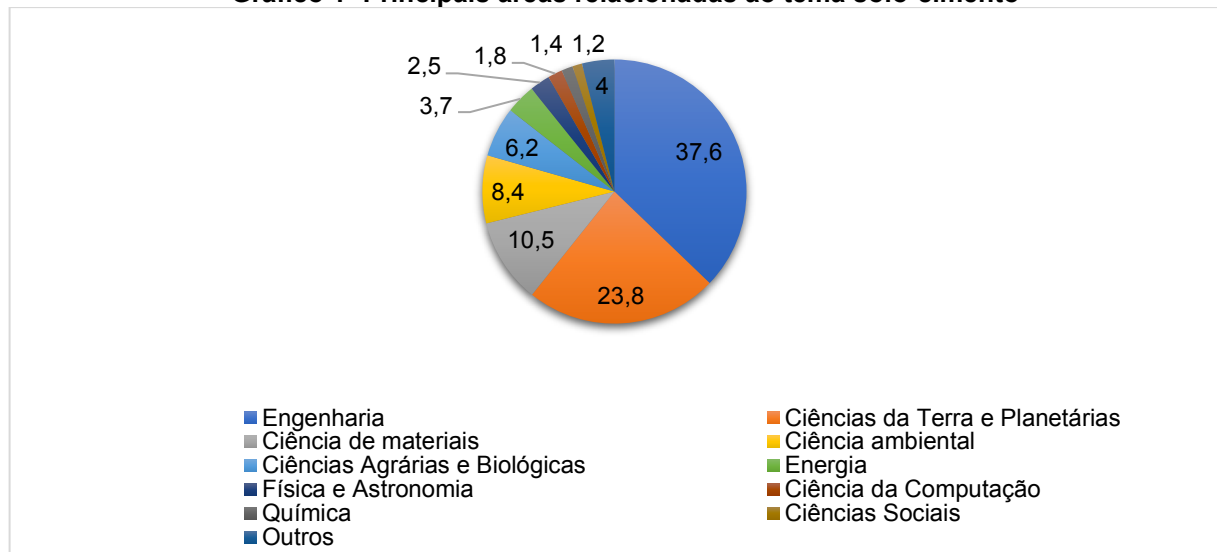


Fonte: Autoria própria

1.3 ADERÊNCIA DO TEMA NA ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Após a busca pela palavra-chave solo-cimento na base de dados *Scopus*, obteve-se as principais áreas relacionadas ao tema, conforme o Gráfico 1.

Gráfico 1- Principais áreas relacionadas ao tema solo-cimento



Fonte: Autoria própria

As principais áreas relacionadas ao tema são: engenharias, ciências da terra e planetárias e ciência dos materiais. As publicações estão mais relacionadas a engenharia civil.

O trabalho aborda o tema economia circular, demonstrando a reutilização do resíduo de cinza, para a aplicação em corpos de prova e sendo uma alternativa para a destinação final do resíduo. É apresentada uma análise de estruturação de custos de matérias-primas para a fabricação de tijolos de solo-cimento-resíduo de cinza.

Segundo a classificação ABEPRO (2008) o trabalho está relacionado a Engenharia de Produção dentro da Engenharia Organizacional e Econômica, a qual aborda temáticas relacionadas a técnicas da gestão industrial e gestão de custos.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação foi estruturada em sete capítulos, descritos brevemente a seguir:

No Capítulo 1 estão descritos a introdução, os objetivos e a importância do trabalho.

No Capítulo 2 encontra-se a revisão de literatura, iniciando pela economia circular, resíduo sólido, uma breve descrição sobre o resíduo utilizado nesta pesquisa, apresenta-se o conceito da técnica de solo-cimento, bem como a metodologia a ser utilizada, os materiais componentes da mistura, os parâmetros, características e propriedades de um solo e um breve conceito sobre planejamento experimental.

No Capítulo 3 estão descritos os procedimentos metodológicos

No Capítulo 4 estão descritos os resultados obtidos e a comparação com os resultados de outros autores.

No Capítulo 5 é apresentada a análise estatística e econômica dos resultados.

No Capítulo 6 estão apresentadas as conclusões sobre o trabalho, limitações e propostas para trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ECONOMIA CIRCULAR

O crescimento da geração de resíduos provenientes de atividades industriais é um fato que não pode ser impedido, e lidar com esse problema se tornou mais difícil, o que pode ser parcialmente atribuído a regulamentos e políticas ambientais mais rigorosas (RUBIO et al., 2018).

A partir das projeções do Work Bank (2012), calcula-se que até 2025 a geração de resíduos sólidos urbanos será aproximadamente 2,2 bilhões de toneladas, o que corresponde que em menos de 10 anos cada pessoa no mundo, será responsável pela geração de 1,5 kg de resíduos por dia. Esse cenário pode ser atribuído aos atuais sistemas produtivos que trabalham com recursos finitos, descarte de resíduos que poderiam ser aproveitados e produção voltada ao descarte (STUMM, 2019).

Continuar o atual modelo linear de produção pode trazer insustentabilidade ao sistema, então a economia circular traz o conceito de consumo e de produção “berço a berço”, defendendo o real valor dos produtos, materiais e recursos por mais tempo, buscando a mínima geração de resíduos, visando otimizar componentes, materiais e produtos, com a intenção do máximo aproveitamento de utilidade e tempo, minimizando o desperdício de materiais (ARAÚJO et al., 2019; STUMM, 2019).

A economia circular busca a viabilidade no reaproveitamento de resíduos industriais e de construção, para a sua transformação como matéria prima, buscando, novamente a sua inserção na cadeia produtiva (RUBIO et al., 2018). Adicionalmente, pode ser definida como um processo regenerativo, que visa o mínimo de desperdício de recursos por meio de *design*, manutenção, reparo, reutilização, reforma e reciclagem (GEISSDOERFER et al., 2017).

O aumento da circularidade no meio produtivo, pode ser quantificado via ACV. ACV é uma ferramenta sólida que pode ser utilizada para quantificar os potenciais impactos ambientais no transporte de caixas de madeira e de plástico, para armazenamento de frutas e vegetais (ALBRECHT et al., 2013), na geração de eletricidade (BARROS et al., 2019), em práticas de desenvolvimento sustentável em universidades (BARROS et al., 2020), na indústria de construção (HUARACHI et al., 2020), entre outros.

Os potenciais impactos ambientais podem ser quantificados, por um conjunto de ferramentas (softwares, base de dados, análise do inventário do ciclo de vida), em que

os autores devem escolher a ferramenta de acordo com o objetivo da sua pesquisa. A análise compreende também a definição da fronteira do sistema e os impactos ambientais por categoria (HUARACHI et al., 2020).

Resíduos de construção e demolição apresentam grande potencial econômico para serem utilizados como matérias-primas, no Brasil estima-se que a geração desses resíduos seja 0,3 a 0,7 tonelada de entulho por habitante, quando mal gerenciados esses resíduos comprometem os recursos naturais e sobrecarregam os serviços de limpeza pública municipal (FREITAS, 2018; STUMM, 2019).

As oportunidades relacionadas à construção civil, seguem rumo em direção à construção sustentável (LIU et al., 2019), o *design*, com tendência à modularidade, fornecimento de materiais eficazes que liberam menos CO₂ para sua produção como: aço, reciclagem de cimento (pesquisas em fase inicial) e alumínio, projeção de locais que possam fazer a recuperação de resíduos orgânicos e inorgânicos (incluindo os resíduos de construção e demolição), renovação, reaproveitamento e desmontagem de edifícios (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017). Novas técnicas de demolição tem sido aplicadas e tem sido elaborada a quantificação do potencial de reutilização desses resíduos e seu impacto ambiental (AJAYABI et al., 2019).

2.2 RESÍDUO SÓLIDO

Conforme a Norma NBR 10004 (ABNT, 2004a) resíduo sólido é o material em estado sólido ou semi-sólido proveniente de atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, e de serviços em geral.

Os resíduos sólidos são classificados em perigosos (classe I) e não perigosos (classe II), sendo os resíduos não perigosos subdivididos em inertes (classe II A) e não inertes (classe II B).

Os resíduos perigosos podem ter as seguintes características:

- Corrosivos: substâncias que por meio de uma reação química deterioram uma superfície, ou outra substância;
- Inflamáveis: ser líquido com ponto de fulgor abaixo de 60° C, em temperatura de 25°C e pressão de 1 atm produzir fogo por fricção, ou em contato com a umidade, em que o fogo seja difícil de extinguir;
- Reativos: reagem de forma rápida, intensa e explosiva, geram gases, vapores ou fumaças tóxicas quando em contato com água;

- Tóxicos: resíduo que contém substâncias em concentrações superiores ao previsto no anexo F da NBR 10004:2004, contém uma ou mais substâncias conforme o anexo C da NBR 10007:2004 (amostragem de resíduos sólidos) e possui alguns critérios de avaliação: natureza da toxicidade, concentração das substâncias tóxicas, capacidade do constituinte tóxico se propagar pelo meio ambiente, capacidade de degradação, entre outras. (FRANCO, 2011; SOUZA E BROLEZE, 2019).

Os resíduos de classe II A podem ter propriedades como:

- Biodegradabilidade: os resíduos podem ser transformados por microrganismos em outras substâncias;
 - Combustibilidade: propriedade da substância que ao entrar em contato com o oxigênio, produz chamas, gases e calor;
 - Solubilidade: capacidade do resíduo se dissolver em contato com solvente.
- (FRANCO, 2011; SOUZA E BROLEZE, 2019).

A destinação, tratamento e disposição final dos resíduos sólidos devem estar de acordo com a Norma NBR 10004 (ABNT, 2004a), classificando os resíduos quanto à sua periculosidade, entretanto, para aplicar esta norma é necessário consultar normas complementares que abordam temas como a solubilização (ABNT, 2004c), lixiviação (ABNT, 2004b) e amostragem de resíduos (ABNT, 2004d) (LUCAS E BENATTI, 2008).

Menezes e Yamashita (2017) consultaram os laudos dos ensaios de amostragem fornecido pela empresa madeireira da região de Ponta Grossa – PR, mesma empresa que forneceu o resíduo de cinza, utilizado nesta pesquisa. O resíduo de cinza pode ser classificado como não inerte (classe II B) e considera-se que o processo produtivo e a fonte sejam a mesma. Em outras fontes de fornecimento de resíduo de cinza de caldeira, os resíduos devem ser classificados conforme a amostragem de resíduos, devido a possibilidade dos processos produtivos das caldeiras serem diferentes.

O descarte e a disposição final dos resíduos de forma inadequada causam impactos ambientais, econômicos e de saúde pública. Atualmente há uma grande preocupação em busca da transformação sustentável, técnica e ambientalmente correta destes, processo que pode ocorrer por meio da inovação no gerenciamento dos resíduos sólidos, nos meios de destinação final e nos meios de produção (GONÇALVES et al., 2010; JACOBI E BENZEN, 2011; GEUS E GARCIAS, 2014).

Nesse contexto, as diretrizes sobre o gerenciamento e destinação final de resíduos sólidos estão previstas no Plano Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS por meio da Lei n. 12.305, de 02/08/2010.

2.2.2 Resíduo sólido industrial

Resíduo sólido industrial pode ser definido como todo o rejeito proveniente de atividades industriais, que esteja no estado sólido, semi-sólido, gasoso (quando contido) e líquido, que não podem ser eliminados diretamente na rede pública de esgoto, apresentando composição e características diversificadas, podendo conter em sua composição cinzas, lodos, madeira, papel, plástico, vidros, cerâmicas, óleos, entre outros (FRANCO, 2011).

Os resíduos industriais devem ser tratados em aterros específicos, isolando-os quando for um resíduo perigoso ou inerte. Outras formas de destinação final incluem:

- Reutilização - capacidade de utilização do resíduo no processo produtivo sem modificar suas propriedades físicas, químicas ou biológicas, desde que os padrões atendam o SISNAMA, SNVS e SUASA;
- Reciclagem - inserção do resíduo no meio produtivo, com aplicação em outros materiais;
- Coprocessamento - utilização do resíduo em substituição parcial do combustível em fornos que produzem clínquer, sem haver geração de outro resíduo;
- Solidificação - processo que ocorre por meio do encapsulamento do resíduo na presença de um reagente, tornando o resíduo em uma massa sólida;
- Estabilização - processo que visa reduzir a capacidade poluidora do constituinte do resíduo, por meio de reações químicas que fixam os cristais estáveis e polímeros impermeáveis, imobilizando os constituintes químicos;
- Compostagem - processo aeróbico que ocorre na decomposição dos restos orgânicos pelos microrganismos sendo o produto final o composto orgânico;
- *Landfarming* - processo aeróbico em que os microrganismos degradam os diversos constituintes do resíduo nas camadas superficiais do solo (LUCAS E BENATTI, 2008; MARTINS, 2010; CHIARO, 2015; PEREIRA, 2017).

Os benefícios do processo de reutilização ou reciclagem de resíduos no processo produtivo, devem ser quantificados para verificação dos potenciais impactos para aplicação em outros produtos (tijolos, por exemplo) (HUARACHI et al., 2020).

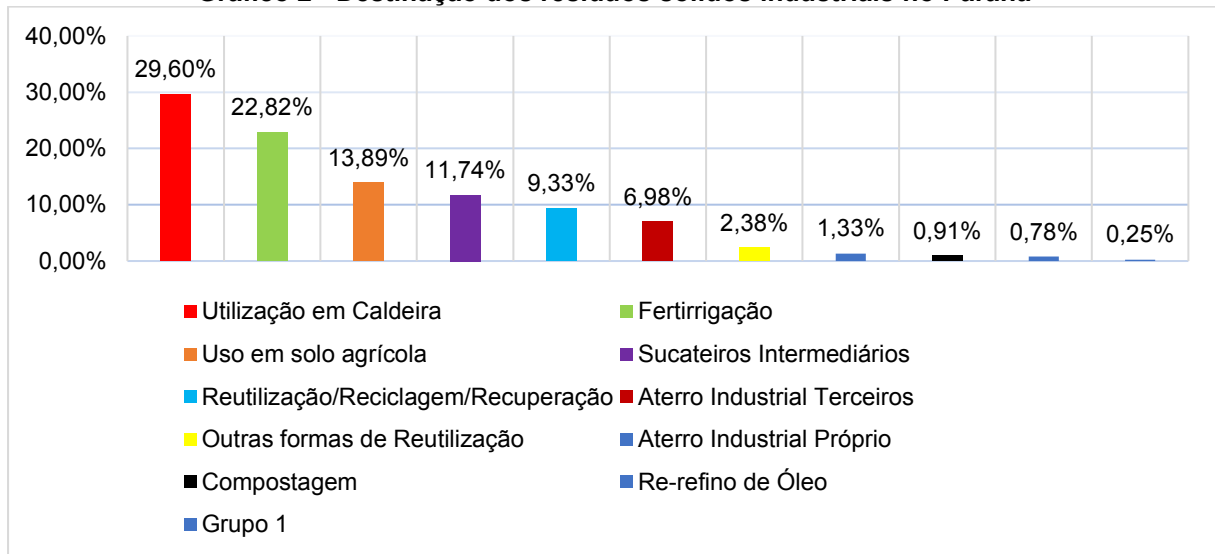
O processo de reciclagem ou reaproveitamento do resíduo, acarreta um maior consumo de energia e materiais para transformá-lo ou tratá-lo, até que possa novamente ser inserido no processo produtivo. A energia utilizada depende da finalidade do reaproveitamento do resíduo e está relacionada aos processos de transformação utilizados, os quais muitas vezes não ocorrem apenas por energia, sendo necessário também a utilização de matérias-primas para transformar quimicamente ou fisicamente um resíduo (ÂNGULO, ZORDAN E JOHN, 2001).

Conhecer sobre o resíduo gerado na indústria permite a implementação de técnicas de gerenciamento de resíduos desde o processo de geração até a destinação final, buscando a eliminação dos impactos ao meio ambiente e recuperação de áreas degradadas (MAZZONETTO E FIALHO, 2016).

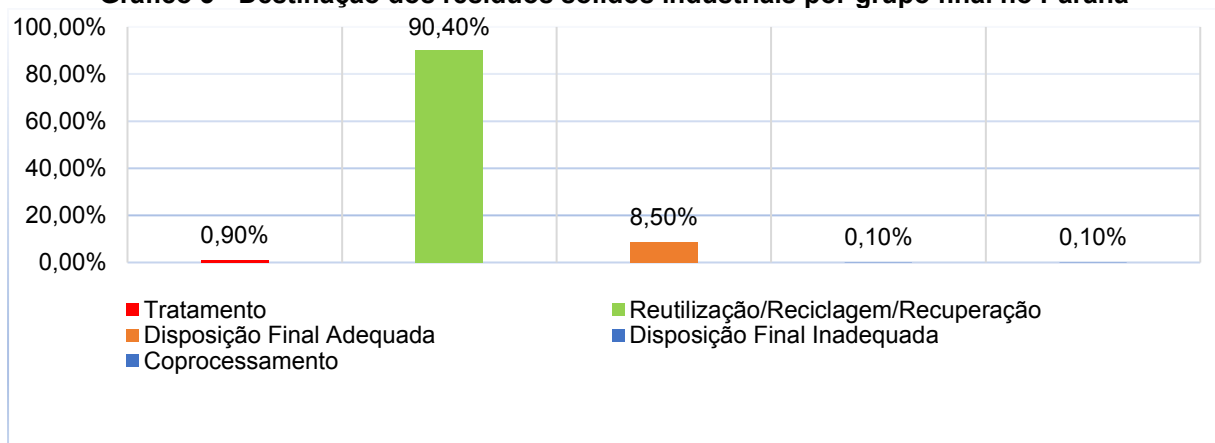
2.2.3 Resíduos sólidos no estado do Paraná

O Estado do Paraná, visando cumprir Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (Lei 12.305/2010), tem realizado a implantação do Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná – PERS/PR, instituído por meio da Lei estadual 19.261/2017.

De acordo com o Relatório da situação do inventário de resíduos sólidos industriais no Estado do Paraná (2016), mais de 90% dos resíduos sólidos nesta unidade da federação são reutilizados, reciclados ou recuperados. Deste total, destaca-se a utilização deste material em caldeiras, com quase 30% da destinação final dos rejeitos (IAT, 2016). Os Gráficos 2 e 3 apresentam a distribuição específica dos destinos dos resíduos industriais e por grupo final.

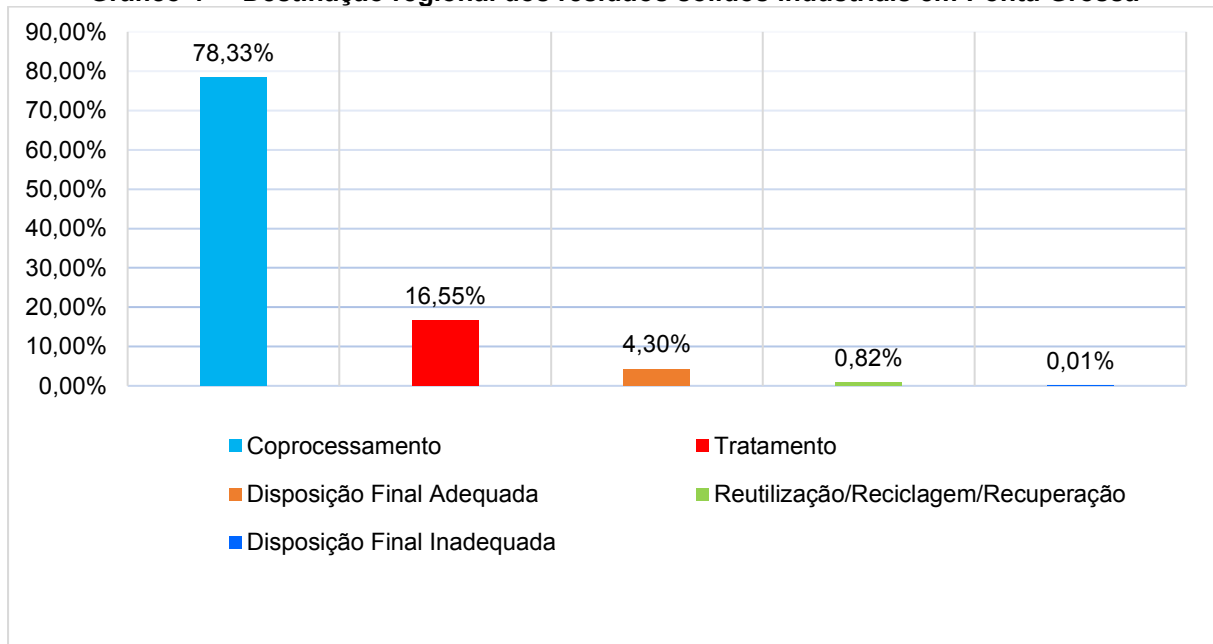
Gráfico 2 - Destinação dos resíduos sólidos industriais no Paraná

Fonte: Adaptado de IAT (2016)

Gráfico 3 - Destinação dos resíduos sólidos industriais por grupo final no Paraná

Fonte: Adaptado de IAT (2016)

Quanto à destinação dos resíduos na cidade de Ponta Grossa, 78,33% são reutilizados, reciclados ou recuperados, sendo que o restante passa por tratamento, acima dos valores praticados no Paraná, com quase 95% do total produzido (Gráfico 4). Quando se compara à média estadual (Gráfico 3), conclui-se que o município segue a tendência da Unidade Federativa, fornecendo destinação correta para quase a totalidade dos resíduos industriais, dessa forma minimizando o impacto ambiental de uma destinação inadequada dos materiais.

Gráfico 4 - Destinação regional dos resíduos sólidos industriais em Ponta Grossa

Fonte: Adaptado de IAT (2016)

2.3 CINZA DE CALDEIRA DE BIOMASSA

A cinza de caldeira é um resíduo proveniente da queima da biomassa, com composição química e mineralógica diversificada, tendo como principal disposição final aterros locais e compostagem (SPRINGWISE, 2015; COSTA et al., 2019; MILOVANOVIĆ et al., 2019; SILVA et al., 2019).

A geração de biomassa anual está entre 112 – 220 bilhões de toneladas por ano e a produção anual de cinza é aproximadamente 480 milhões de toneladas (MILOVANOVIĆ et al., 2019; SILVA et al., 2019).

A composição da cinza de biomassa está relacionada a fatores como temperatura, umidade do material e processo de incineração adotado, apresentando composição e morfologia heterogêneas (CACURO e WALDMAN, 2015; SILVA et al., 2015). A composição química da cinza de caldeira depende da queima da matéria-prima e sua composição mineralógica está relacionada ao projeto e operação da caldeira (POINOT et al., 2018).

A heterogeneidade na composição química e na morfologia é uma característica da cinza, variando conforme o seu processo de incineração, que influencia na sua eficiência para aplicações em diversos materiais, sendo que a taxa de incorporação em materiais cerâmicos, materiais à base de vidro, argamassas, asfalto betuminoso, compósitos, entre outros, depende da matéria-prima da biomassa e do tipo das cinzas

(volante ²ou não) (TEIXEIRA et al., 2008; CACURO e WALDMAN, 2015; COSTA et al., 2019).

Em relação à morfologia, as cinzas são compostas por matéria orgânica em forma de carbono não queimado e partículas de dióxido de silício (SiO_2), que compõe cerca de 60% - 80% da massa das cinzas (CORDEIRO, 2006; CACURO E WALDMAN, 2015).

As cinzas podem apresentar óxidos em diferentes proporções como os de potássio – K_2O (2,4 - 9,02%), de magnésio – MgO (1,09 - 8,65%), de fósforo – P_2O_5 (1,6 - 8,34%), de cálcio – CaO (2,08 - 8,0%), de alumínio – Al_2O_3 (0,09 – 10,32%) e de ferro– Fe_2O_3 (0,09 – 6,3%), além de outros óxidos em menor proporção (CORDEIRO, 2006; TEIXEIRA et al., 2008; CORDEIRO; FILHO E FAIRBAIN, 2009; PAVLÍKOVÁ et al., 2019).

As cinzas de biomassa como a cinza de bagaço de cana de açúcar (CORDEIRO et al., 2008), a cinza volante (CORDEIRO; FILHO E FAIRBAIRN, 2009) e a cinza de casca de arroz (PAVÍÁ et al., 2014) podem ter propriedades pozolânicas, relacionadas às fontes térmicas de processamento (PAVLÍKOVÁ et al., 2019). A capacidade da cinza em funcionar como material aglomerante quando adicionada a materiais cimentícios é definida como atividade pozolânica. Pozolana pode ser definido como um material sílico ou sílico-aluminoso que, ao reagir com o hidróxido de cálcio, apresenta propriedades aglomerantes formando materiais cimentícios (CORDEIRO; FILHO E FAIRBAIN, 2009; MACEDO, 2009).

A característica de atividade pozolânica conferida à cinza de biomassa está relacionada à presença de sílica amorfa e sua capacidade em reagir com o hidróxido de sódio (CORDEIRO; FILHO E FAIRBAIN, 2009; MACEDO, 2009). A caracterização mineralógica da cinza de biomassa pode ser feita por meio de difração de raios-X (PAVIA et al., 2014; SILVA et al., 2015; PAVLÍKOVÁ et al., 2019) e sua composição química pode ser analisada por meio de espectroscopia de fluorescência de raios-x (LA GRÉE et al., 2016; SIMÃO et al., 2019).

A incorporação de resíduo de biomassa em materiais de construção demonstrou ser uma alternativa viável. Na pesquisa de Costa et al. (2019), os autores buscaram avaliar os possíveis impactos ambientais da incorporação de resíduo de biomassa

² Cinza volante pode ser definida como um material sílico-aluminoso, geralmente produzidas em usinas termelétricas que queimam carvão mineral.

lenhosa em argamassa de cimento, argamassa adesiva, blocos de concreto e asfalto betuminoso, utilizando o método da Análise do Ciclo de Vida.

Os resultados obtidos indicaram que o transporte e pré-processamento das cinzas, incluindo as etapas de secagem, carregamento, descarregamento e transporte afetam os potenciais impactos na utilização desses resíduos como alternativas de fabricação e devem ser considerados no final de vida e na gestão das cinzas de biomassa. A incorporação de cinza de biomassa lenhosa em materiais de construção reduz a extração e processamento de matérias-primas, consumindo a energia necessária para fabricar novos materiais, com melhorias no desempenho ambiental (COSTA et al., 2019).

O tijolo Eco Blac foi desenvolvido por pesquisadores na Índia, sendo produzido com 70% de cinza de caldeira, misturada com hidróxido de sódio, cal e argila (SPRINGWISE, 2015).

Conforme caracterização granulométrica, a cinza de caldeira utilizada nesta pesquisa, é composta na sua maioria por partículas de pedregulho e areia, que estão relacionados às impurezas contidas na biomassa, provenientes da sua coleta no reflorestamento e transporte, até o processo de fabricação das lascas de madeira, que pode conter solo, areia e pedregulho.

2.4 VISÃO GERAL E MATERIAIS UTILIZADOS NA TÉCNICA DE SOLO-CIMENTO

2.4.1 Visão geral sobre a técnica de solo-cimento

Solo-cimento pode ser definido como o produto obtido da mistura adequada de solo, cimento e água que atinge uma determinada resistência, quando submetido ao ensaio de compressão (SIQUEIRA E HOLANDA, 2015). O produto obtido da mistura adquire determinada resistência à compressão, pouca retração volumétrica e boa durabilidade, sendo o solo o componente mais utilizado para obter o solo-cimento (ABCP, 2009; SOUZA, 2019).

O solo-cimento difere do concreto principalmente em relação a capacidade da mistura em recobrir as superfícies do solo e preencher os vazios existentes, gerando uma matriz cimentícia com nódulos sem cimentação. Para o concreto, a quantidade de pasta (cimento + água) é suficiente para garantir um menor número de vazios existentes na superfície dos agregados (SPECHT, 2000).

Os fatores que mais interferem nas propriedades da mistura de solo-cimento são: tipo de solo, teor de cimento, teor de umidade, compactação, idade e período de cura (SEGANTINI E ALCÂNTARA, 2010).

Os primeiros trabalhos que abordam a técnica de solo-cimento foram registrados após 1932, a partir da sua utilização na pavimentação de 17.000 m² em Johnsonville, Carolina do Sul, EUA. Em 1944, a *American Society for Testing Materials* (ASTM), a *American Association of State Highway Officials* (AASHO) e a *Portland Cement Association* (PCA) iniciaram a normalização com os ensaios de solo-cimento. No Brasil a partir de 1936, houve interesse pelo assunto após a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) regulamentar e pesquisar sobre a utilização de solo-cimento. Em 1941, foi utilizado o material para a pavimentação do aeroporto de Petrolina -PE (SEGANTINI E ALCÂNTARA, 2010).

A partir das primeiras aplicações, sua utilização foi ampliada devido às características técnicas e econômicas, sendo seu uso mais difundido na pavimentação de estradas e aeroportos (ABIKO, 1987; LIMA, 2013). A técnica pode ser utilizada para revestimento de canais, diques, reservatórios e barragens de terra, além de estabilização de taludes (ABIKO, 1987).

Em edificações seu uso pode ser por meio da confecção de tijolos, blocos compactados e parede monolítica, mais comumente destinado à construção de paredes. Entretanto, o material pode ser utilizado para construção de fundações, passeios e contrapisos (LIMA, 2013).

2.4.2 Materiais utilizados na técnica de solo-cimento

Os materiais que podem ser utilizados na técnica de solo-cimento, são: solo, cimento Portland e adições. Sobre o solo são apresentados os principais constituintes, caracterização (granulometria, consistência dos solos e compactação) e estabilização, que ocorre por meio da adição de agentes estabilizadores como cimento e cal. Sobre o cimento Portland o trabalho traz os tipos de cimento existentes no mercado e apresenta alguns cimentos utilizados em alguns trabalhos disponíveis na literatura.

Nas adições, encontram-se descritos alguns resultados de trabalhos voltados à técnica de solo-cimento que utilizaram diferentes tipos de resíduo.

2.4.2.1 Solo

Os solos são materiais formados a partir de processo natural como intemperismo por desintegração ou decomposição de rochas (SOUZA, 2019). Por meio da desintegração formam-se as partículas mais grossas dos solos (pedregulhos e areias) e silte. A decomposição química refere-se ao processo em que ocorrem mudanças nas propriedades químicas e mineralógicas de rochas de origem de formação dos solos. O principal agente nesse processo é a água e as reações que mais ocorrem são oxidação, hidratação, carbonatação e os efeitos químicos da vegetação, sendo a argila o último produto obtido da fase de decomposição (FERNANDES JUNIOR, 2017).

O solo é o material com maior proporção nas misturas de solo-cimento para a confecção de tijolo de solo-cimento e sua escolha depende da economia que proporciona em relação à menor utilização do cimento e da disponibilidade do solo na região de fabricação dos tijolos.

Segundo a Norma NBR 6502 (ABNT, 1995) os limites do tamanho dos grãos que definem as faixas granulométricas são:

- Pedregulho: diâmetro entre 2,0 mm e 60 mm;
- Pedregulho grosso: diâmetro entre 20 mm e 60 mm;
- Pedregulho médio: diâmetro entre 6,0 mm e 20 mm;
- Pedregulho fino: diâmetro entre 2,0 mm e 6,0 mm;
- Areia grossa: diâmetro entre 0,60 mm e 2,0 mm;
- Areia média: diâmetro entre 0,20 mm e 0,60 mm;
- Areia fina: diâmetro entre 0,06 mm e 0,2 mm;
- Silte: diâmetro entre 0,002 mm e 0,006.
- Argila: partículas com diâmetros menores que 0,002 mm;

Os solos mais adequados para a produção do tijolo de solo-cimento são aqueles que atendam as recomendações descritas na Norma NBR 10833 (ABNT, 2012):

- 100 % dos grãos passam na peneira de 4,75 mm conforme a ABNT NBR NM ISO 3310-1;
- 10 % a 50 % do material passa na peneira de 0,75 μ m conforme a ABNT NBR ISO 3310-1;
- Limite de liquidez \leq 45%;
- Índice de plasticidade \leq 18%.

Em relação à granulometria, os solos mais adequados são os arenosos com grãos de areia grossa e pedregulho em sua composição, materiais inertes, com função de enchimento, buscando que a mistura de solo-cimento tenha maior quantidade de

cimento, para aglutinar os grãos menores (SEGANTINI E ALCÂNTARA, 2010). Na Tabela 1 são apresentadas as faixas granulométricas citadas por alguns autores, como adequadas ao uso em aplicações de solo-cimento:

Tabela 1 - Critérios para a seleção de solos

Autores	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Silte + Argila (%)
CINVA (1963)	45-80	-	-	20-25
ICPA (1973)	60-80	10-20	5-10	-
Merril (1949)	>50	-	-	-
MAC (1975)	40-70	<30	20-30	-
CEPED (1984)	45-90	-	<20	10-55
PCA (1969)	65	-	-	10-35

Fonte: Segantini e Alcântara (2010)

2.4.2.1.1 Granulometria Norma NBR 7181 (ABNT, 2016)

Um solo tem em sua composição partículas com diferentes dimensões, não sendo fácil a sua identificação, pois podem conter grãos de areia que estão envolvidos por frações de argila finas e apresentam aspecto semelhante a essas mesmas formações de argila. As formações quando secas, praticamente não são diferenciáveis, já quando se encontram úmidas, as partículas finas de argila se transformam em pasta fina e as partículas de areia revestidas são facilmente detectadas pelo tato, portanto para um reconhecimento tátil-visual recomenda-se que o solo esteja úmido (PINTO, 2006).

A granulometria de um solo pode ser determinada por peneiramento ou por combinação de peneiramento e sedimentação conforme a Norma NBR 7181 (ABNT, 2016). No peneiramento se determina a quantidade porcentual de partículas mais grossas do solo (pedregulho e areia), que passam ou são retidas em peneiras normalizadas (NEVES et al., 2010).

O peso de material que passa em cada peneira refere-se ao peso seco da amostra e pode ser denominado como “porcentagem que passa” representado no gráfico pela abertura das peneiras, em escala logarítmica. A abertura das peneiras representa a dimensão dos grãos (diâmetro). Atribui-se “diâmetro equivalente”, visto que as partículas não são esféricas (PINTO, 2006).

No ensaio de sedimentação as porções mais finas do solo (silte e argila) são colocadas em um dispersor a uma determinada velocidade de decantação, em função

da variação da densidade e temperatura da solução, calculando-se as proporções na amostra (NEVES et al., 2010).

2.4.2.1.2 Principais constituintes do solo

Considerando a finalidade deste estudo, os principais constituintes do solo a considerar são: areia, silte e argila. Devido a origem os solos podem ou não conter matéria orgânica, na mistura solo-cimento não é recomendado altos teores de matéria orgânica, que comprometam as reações de hidratação do cimento durante o processo de cura (GRANDE, 2003).

Areia são sólidos de quartzo (SiO_2 cristalina) tem forma arredondada ou angular e está presente na fração mais grossa do solo. A areia confere resistência mecânica a compósitos que utilizam cimento em sua composição (GRANDE, 2003; ISAIA, 2010; FILHO, 2016; CARVALHO 2019).

A argila é um agregado natural de composição fina que em presença de certo teor de umidade pode apresentar uma faixa de plasticidade. A argila contém silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio e sílica em sua forma coloidal. (GRANDE, 2003; DANTAS, 2015; FILHO, 2016).

Os siltes são partículas finas de origem mineral, que possuem pouca ou nenhuma plasticidade. As dimensões das partículas presentes no silte bem como a sua origem, influenciam nas características do solo, conferindo-lhe aspecto mais arenoso ou argiloso (GRANDE, 2003; DUARTE, 2013; FILHO, 2016).

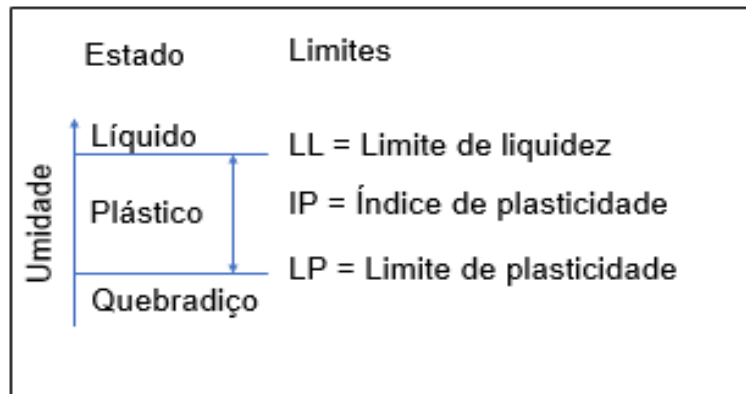
2.4.2.1.3 Consistência dos solos Normas NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016)

Conforme o teor de umidade, o solo encontra-se no estado líquido, plástico ou sólido. Os limites de consistência de um solo, são limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) (FILHO, 2016). Quando o teor de umidade ³ está acima do LL o solo se encontra no estado líquido, quando o teor de umidade está entre o LL e o LP o solo se encontra no estado plástico e quando o teor de umidade está abaixo do LP o solo mais seco se transforma em quebradiço (PINTO, 2006).

³ Refere-se a relação entre o peso da água presente na amostra de solo e o peso de solo seco, no mesmo volume, expresso em porcentagem.

O teor de umidade presente no solo, determina em que estado um solo se encontra: plástico, líquido ou quebradiço, sendo definido como Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP), conforme ilustrado na Figura 2. A diferença entre esses limites, é denominada Índice de Plasticidade (IP) e indica a faixa de valores em que o estado do solo se encontra plástico (PINTO, 2006).

Figura 2- Limites de Consistência do Solo



Fonte: Adaptado de Pinto (2006)

O limite de liquidez pode ser definido como o teor de umidade presente no solo, quando utilizando-se o aparelho de Casagrande, homogeneíza-se aproximadamente 200 g de solo com adição de água destilada e realiza-se uma abertura no solo (aproximadamente no centro) e aplica-se golpes com intensidade constante. A ranhura se fecha após a aplicação de 25 golpes, sendo necessário repetir as etapas até a obtenção de pelo menos cinco pontos (PINTO, 2006).

Limite de Plasticidade é o teor de umidade presente no solo, quando se molda uma certa quantidade de solo em forma de cilindro de dimensões 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento sobre uma placa de vidro e o mesmo se fragmentar nessas dimensões (NEVES, et al., 2010; CAPUTO, 1973).

2.4.2.1.4 Compactação Norma NBR 7182 (ABNT, 2016)

No processo de compactação, ocorre o aumento da densidade do solo, por meio de rolo compactador ou soquete manual para pequenas valetas. Quando ocorre a transposição de um solo de um local para outro, as características de deformabilidade e resistência são alteradas em relação a sua condição *in situ*, assim como, podem ocorrer mudanças em seu comportamento. A compactação objetiva aumentar o contato entre os

grãos e deixá-lo mais homogêneo, visando diminuir o volume de vazios e aumentar a densidade (PINTO, 2006).

O processo de compactação do solo busca reduzir as partículas maiores de solo, diminuindo os vazios de ar, podendo ocorrer por meios mecânicos. O teor de água permanece o mesmo, desde que o teor de umidade seja adequado, pois se for alta (próximo aos níveis de saturação) pode ocorrer a expulsão de água. Esse processo visa reduzir a deformabilidade, a permeabilidade e a expansão, aumentando a estabilidade, a resistência ao cisalhamento e a integridade da mistura de solo-cimento (FILHO, 2016; VERMA E KUMAR, 2019).

O processo de compactação é bastante difundido nas obras de engenharia, como aterros, camadas de pavimentação, preenchimento de espaços atrás de muros de arrimo, barragens de terra e preenchimento de drenos que se formam nas ruas (PINTO, 2006).

Na compactação as quantidades de partículas e água permanecem as mesmas, o aumento do peso específico aparente seco indica a expulsão do ar presente nos vazios, processo que é facilitado pela presença de um teor de umidade mais baixo, pois o ar está em forma de pequenos canais interligados. A diminuição do atrito pela água e a presença dos pequenos canais de ar, proporciona um maior peso específico à medida que o teor de umidade é maior (PINTO, 2006).

Ao se manter a energia de compactação permanente, adicionando água ao solo, seu peso específico aparente seco aumenta até um certo ponto, denominado de umidade ótima, que proporciona uma maior compactação das partículas e maior preenchimento dos vazios (GRANDE, 2003; KOLLING, TROGELLO E MODOLO, 2012; FILHO 2016).

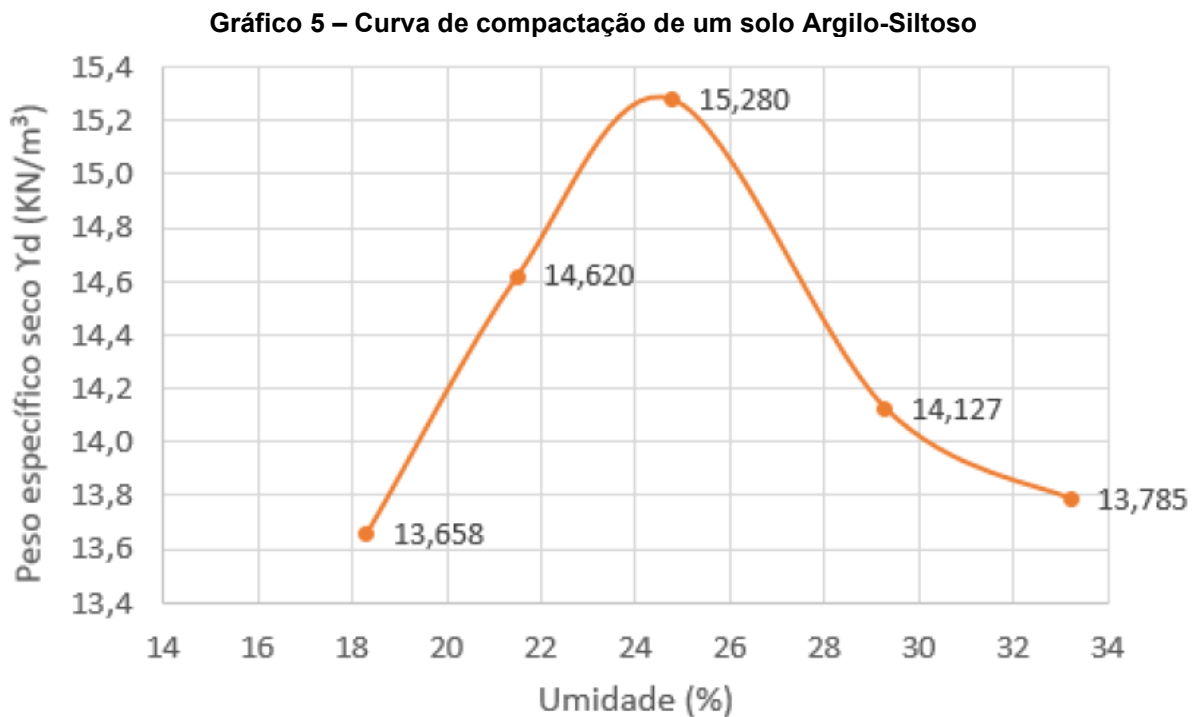
O teor ótimo de umidade indica que, para uma determinada compactação, ocorre o preenchimento do máximo de vazios por meio da lubrificação de partículas (GRANDE, 2003).

O teor de umidade de um solo pode ser definido como a relação entre a massa de água contida em um volume de solo e a massa de partículas de solo no mesmo volume, expressa em porcentagem. A Equação 1 exemplifica como determinar a umidade do solo segundo a Norma ME 213 (DNER, 1994):

$$h = 100 \left(\frac{m_{bu} - m_{bs}}{m_{bs} - m} \right) \quad (1)$$

Onde h é o teor de umidade em %, m_{bu} é a massa bruta úmida (massa da amostra úmida mais a amostra da cápsula), m_{bs} é a massa bruta seca (massa da amostra seca mais a amostra da cápsula) e m é a massa da cápsula⁴.

Os solos se diferenciam quanto aos índices físicos: peso aparente específico seco e teor de umidade, quando submetidos a determinadas energias de compactação. Para cada ponto de compactação existe uma umidade relativa ao máximo peso específico seco chamada de umidade ótima (Gráfico 5). Assim, o solo apresenta uma menor porosidade, se caracterizando como um material mais durável e resistente (FILHO, 2016). O Gráfico 5 ilustra a curva de compactação de um solo Argilo-Siltoso da região de Ponta Grossa -PR.



Fonte: Pereira e Vargas (2019)

No Brasil, o Ensaio Normal de Compactação ou Ensaio de Proctor foi padronizado pela NBR 7182 (ABNT, 2016), na metodologia deste trabalho as etapas do ensaio estão descritas mais detalhadamente. O Ensaio Normal de Compactação já foi utilizado em diversos trabalhos sobre a técnica de solo-cimento (ROLIM, FREIRE E BERARDO, 1999; GRANDE, 2003; FOPPA, 2005; MILANI, 2005; LIMA, 2013; DANTAS, 2015; PEREIRA E VARGAS, 2019; SOUZA, 2019).

⁴ Recipiente de alumínio, normalmente utilizado para armazenar a amostra em estufa.

2.4.2.1.5 Estabilização do solo

A estabilização com agentes estabilizadores como: cimento, cal, resinas e cola, ocorre por meio do preenchimento dos espaços vazios por um ligante que não se dissolve, com capacidade para envolver as partículas em uma matriz inerte, por meio de uma formação em cadeia em que as partículas do solo ficam unidas. Alguns fatores interferem na qualidade da estabilização do solo com o cimento como: tipo de solo, teor de cimento e compactação da mistura (SANTIAGO, 2001).

A estabilização do solo pode ser definida como um processo que visa reduzir os espaços de solo-água e ar, diminuindo o volume de vazios do solo e inibindo a percolação da água, tornando o solo mais resistente à deformação e ao deslocamento em relação ao solo original, modificando as suas propriedades para uma aplicação particular, podendo utilizar agentes estabilizadores como cimento, cal e agregados vegetais (FERREIRA, 2003; MILANI, 2005; JURACH, 2012).

No processo de estabilização do solo com o cimento ocorrem reações de hidratação do cimento com a água, por meio dos silicatos e aluminatos presentes no cimento, formando uma pasta de cimento hidratado. Em paralelo, ocorrem as reações iônicas entre cátions dos argilominerais presentes no solo com íons de cálcio do cimento, o que confere ao solo menor capacidade de absorção de umidade e variação de volume (SANTIAGO, 2001; MILANI, 2005).

Existem diferentes tipos de estabilização de solos como: estabilização mecânica, estabilização física e estabilização química.

Estabilização mecânica pode ocorrer por meio da correção da granulometria e da compactação sem a adição de agente estabilizador, visando aumentar a densidade do solo e sua resistência.

Estabilização física ocorre por meio da adição de solo de diferentes granulometrias, entre areia, argila e silte visando um melhor empacotamento de grãos.

Estabilização química é o processo de adição de um componente químico buscando melhorar a resistência e estabilidade do solo, tais melhorias podem interferir na permeabilidade e na forma do solo. Os aditivos químicos reagem com minerais presentes no solo ou com a água dos poros. No solo-cimento a reação físico-química ocorre por meio da liberação de cátions de Ca^{2+} na hidratação com o cimento reagindo com os argilominerais (FILHO, 2016).

Podem ser utilizados cal e cimento para estabilização de solos finos e argilosos com altos teores de matéria orgânica, e utilização de aglomerante asfáltico e cimento

asfáltico de petróleo – CAP para maior ligação entre as partículas em solos de maior granulometria (PEREIRA, 2012).

A estabilização química mais utilizada é a de solo-cimento em que o cimento é adicionado e ocorre a reação química entre o aglomerante, com minerais do solo (pequenas frações) e por meio da água presente na massa da mistura. A escolha do cimento em detrimento da cal é em razão de se atingir a resistência esperada no solo em menor tempo e estabilidade garantida pelo cimento em relação à variedade de solos (PEREIRA, 2012).

A estabilização de solo com cimento, proporciona algumas vantagens a mistura:

- Aumento do peso específico aparente seco em amostras de solo com compactação inferior e diminuição do em solos que são melhores compactáveis;
- A absorção e a perda da umidade, não causam grandes variações volumétricas;
- Maior resistência à compressão;
- Maior resistência à erosão (SANTIAGO, 2001; PEREIRA E VARGAS, 2019).

Antônio Segantini e Wada (2011) estudaram uma mistura ótima de solo e cimento com adição de resíduo de demolição de construção, por meio da fabricação de blocos prensados (RCD) com cinco diferentes proporções de mistura entre o solo e o resíduo de demolição. Com os resultados obtidos conclui-se que foram produzidos tijolos com qualidade e que a mistura de solo cimento é uma excelente matriz para a incorporação de resíduo de demolição.

Amaral e Siqueira (2013) buscaram a mistura ótima de solo-cimento e adição de resíduo da casca de ovo, em substituição parcial ao cimento, com a fabricação de tijolos em quatro proporções diferentes da mistura de solo, cimento e resíduo da casca de ovo. Os autores obtiveram resultados que atenderam a especificação da Norma NBR 10834 (ABNT, 2012). Assim, o resíduo pode ser considerado uma alternativa de baixo custo para ser aplicado em materiais de construção.

2.4.3 Cimento Portland

O cimento é um aglomerante hidráulico em pó, obtido a partir da queima do clínquer, capaz de formar uma mistura em forma de pasta, que endurece após a reação

de hidratação (SOUZA, 2019). O clínquer é um produto granular, obtido a partir da calcinação de materiais como a argila, calcário e minério de ferro.

A composição do cimento é variada, entretanto, alguns compostos são identificados com maior frequência como a cal (CaO), a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃), o óxido de ferro (FeO₃), uma pequena porção de magnésia (MgO) e uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO₃), substância adicionada depois da calcinação para diminuir o tempo de pega. Outros compostos menores são encontrados como óxido de sódio (Na₂O), óxido de potássio (K₂O), além de óxido de titânio (TiO₂) e outras pequenas impurezas (OLIVEIRA, 2011).

Para a obtenção do cimento ocorre a homogeneização e pulverização da mistura das matérias primas com os constituintes anteriormente citados, posteriormente submetida à alta temperatura de fusão, quando ocorre a obtenção do clínquer e surgem os seguintes compostos:

- Silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$);
- Silicato bicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$);
- Aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$);
- Ferro aluminato tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AFe}$)

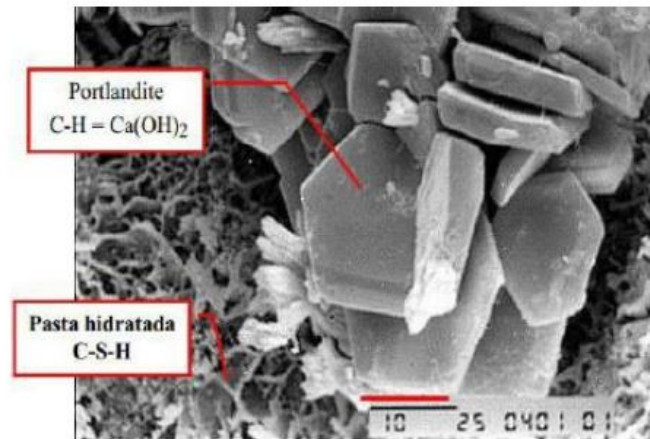
O silicato tricálcico (C₃S) é o responsável pela resistência do cimento em todas as idades, principalmente ao fim do primeiro mês de cura. O silicato bicálcico fornece ao cimento maior resistência em idades de cura mais avançadas como a partir de um ano ou mais, e por fim o aluminato tricálcico (C₃A) contribui para a resistência do primeiro dia (OLIVEIRA, 2011).

O cimento contém outros componentes como o silicato de cálcio hidratado (CSH), hidróxido de cálcio (CH), sulfoaluminato de cálcio. O CH é o principal componente de uma pasta de cimento por possibilitar um aumento da resistência mecânica e durabilidade (FÔNSECA, 2018).

As reações de hidratação do cimento são complexas e acontecem reações químicas simultâneas que influenciam umas nas outras, sendo que o comportamento de hidratação do cimento depende de outras propriedades como tamanho dos grãos de cimento, temperatura, quantidade de água e processo de mistura (GRANDE, 2003).

Conhecer os constituintes do cimento Portland na fase de hidratação auxilia na identificação das propriedades formadas na pasta, desde o estado fresco até o endurecimento (SOUZA, 2019). Na Figura 3, é possível observar microscopicamente a presença de CH e CSH, em uma pasta de cimento.

Figura 3 - Presença de hidróxido de cálcio e silicato de cálcio hidratado



Fonte: Souza (2019)

Na mistura de solo-cimento, assim como em argamassas e concretos é importante analisar a natureza do cimento, a fim de melhorar as propriedades do material. Em tijolos ecológicos ou de solo-cimento a utilização de diferentes tipos de cimento, pode afetar as reações de hidratação no processo de estabilização (GRANDE, 2003).

No Brasil, há diferentes tipos de cimentos comercializados, além do cimento branco.

- CP- I Cimento Portland Comum;
- CP I-S Cimento Portland Comum com adição;
- CP II-E Cimento Portland composto com escória de alto forno;
- CP II-Z Cimento Portland composto com pozolana;
- CP II-F Cimento Portland composto com fíler (calcário);
- CP III Cimento Portland de alto forno;
- CP IV Cimento Portland pozolânico;
- CP V -ARI Cimento Portland de alta resistência inicial

A Tabela 2 exemplifica os tipos e composição do cimento Portland que são mais utilizados no Brasil.

Tabela 2 – Tipos e composição do cimento Portland

Tipo	Classe Resist. (MPa)	Composição (%)				Norma Brasileira
		Clínquer Gesso	+ Escória Alto-forno	Pozolana	Fíler	
CP-I	25 32 40	100		0		
CPI-S		95-99		1-5		NBR 5732
CP II-E	25 32 40	56-94	6-34	0	0-10	
CP II-Z	25 32 40	76-94	0	6-14	0-10	NBR 11578
CP II-F	25 32 40	90-94	0	0	6-10	
CP III	25 32 40	25-65	35-70	0	0-5	NBR 5735
CP IV	25 32	45-85	0	15-50	0-5	NBR 5736
CP V-ARI	-	95-100	0	0	0-5	NBR 5733

Fonte: Itambé (2008)

Na literatura se encontra diferentes tipos de cimentos para aplicação em misturas de solo-cimento. Santiago (2001) cita o cimento Portland Comum por ter o menor valor econômico, comparado aos outros cimentos. Para Foppa (2005) na mistura de solo-cimento não há restrições quanto ao tipo de cimento. Paschoalin Filho et al., (2016) utilizaram cimento Portland CP II E-32 de escória de alto forno, para aplicação em tijolos de solo-cimento com incorporação de resíduo PET, por ser utilizado em pequenas construções no Brasil.

Cancian et al., (2017) utilizaram cimento Portland CP II Z-32 com adição de pozolana e resistência de 32 MPa aos 28 dias para aplicação de solo-cimento em pavimentos. Amaral et al., (2012) utilizaram cimento Portland CP III – 40 RS, composto por clínquer, gesso e escória de alto forno em misturas de solo-cimento e resíduo de casca de ovo. Barbosa et al., (2019) adicionaram cimento Portland CP II Z-32 à mistura de solo-cimento-resíduo de casca de arroz e solo-cimento e lodo de ETA em diferentes proporções para fabricação de tijolos. Jordan et al., (2019) aplicaram cimento Portland CP II E-32 para misturas de solo-cimento-resíduo de bagaço de cana de açúcar para confecção de tijolos.

2.4.4 Adições

Adições têm sido utilizadas para melhorar o desempenho do cimento, como cinza volante e a cal (FOPPA, 2005). A cal pode ser utilizada para melhorar a eficiência da mistura antes da adição do cimento e a cinza pode vir a substituir o cimento. Outros resíduos podem ser utilizados para melhorar as propriedades térmicas e na junção do solo: cinzas de madeira, óleos vegetais (linhaça, coco, algodão, folha de bananeira ou palmeira) e fibras vegetais (DANTAS, 2015).

Lima (2013) utilizou para confecção de tijolos de solo-cimento, as seguintes adições: resíduo de cinza de carvão mineral e casca de arroz, cinza e fibra de bagaço de cana de açúcar, entulho de construção, sílica ativa, serragem de madeira, resíduo de mármore e granito e casca de semente de capim de Braquiária. Os traços de dosagem foram: 12,5% de cimento, 0%, 20%, 40% e 60% de resíduo em substituição ao solo. Os tijolos foram submetidos aos ensaios de durabilidade, absorção de água aos 7 dias e resistência à compressão simples entre 7-28 dias após a cura. Os resultados indicaram que os traços são adequados a aplicação na mistura solo-cimento para confecção de tijolos.

Filho (2016) buscou a fabricação de tijolo de solo-cimento sem a adição de cinza e com incorporação de cinza da lenha de algaroba, em substituição parcial de 10, 30, 40 e 50% em relação ao cimento. No ensaio de resistência à compressão, os tijolos fabricados sem a adição de cinza atingiram o valor médio de 2,47 MPa e o tijolo com substituição de 10% em relação ao cimento atingiu o valor médio de 2,35 MPa mantendo-se dentro do especificado pela Norma NBR 8492 (ABNT, 2012). Em relação a absorção de água tijolos sem a adição de cinza obtiveram o valor médio de 19,89%. Os tijolos atingiram os valores mínimos para absorção de água previstos nas normas.

Ribeiro (2017) incorporou cinza de madeira à mistura de solo-cimento em corpos de prova cilíndricos, obtendo valores mínimos próximos da média de 2,0 MPa no teste de resistência à compressão, para as substituições de 0, 10, 20, 30 e 40% de resíduo de cinza de madeira ao cimento. No ensaio de absorção de água os corpos de prova com 10 e 30% de incorporação de resíduo de madeira atenderam ao especificado pela Norma NBR 10834 (ABNT, 2013) abaixo de 22%. Observou-se que a incorporação de resíduo de cinza de madeira nos corpos de prova cimentícios de solo-cimento reduziu os valores de resistência à compressão e aumentou os valores de absorção de água, com exceção de 30% de incorporação de resíduo.

2.5 METODOLOGIA DE DOSAGEM DO SOLO-CIMENTO

A dosagem do solo-cimento compactado consiste em realizar testes de laboratório para definição do teor de cimento, buscando uma maior resistência ao solo para a finalidade desejada. As variáveis quantidade de água e peso específico aparente seco máximo, devem ser fixadas, pois passam a ser variáveis de controle (GRANDE, 2003; FOPPA, 2005; SEGANTINI E ALCÂNTARA, 2010). O teor de cimento depende da finalidade do material que se pretende utilizar (SEGANTINI E ALCÂNTARA, 2010).

Para uma metodologia de dosagem em que se utilizam a fixação das variáveis de controle de resistência de um solo estabilizado com cimento é possível otimizar os projetos que utilizam essa técnica (CONSOLI et al., 2012). Nesse sentido, existem na literatura alguns trabalhos que correlacionam a existência de vazios e a quantidade de cimento na mistura, bem como essa relação interfere na resistência mecânica do material (LARNACH, 1960; FOPPA, 2005; LOPES JUNIOR, 2007; RIGHETTO, 2008, ROSA, 2009; PEREIRA E VARGAS, 2019).

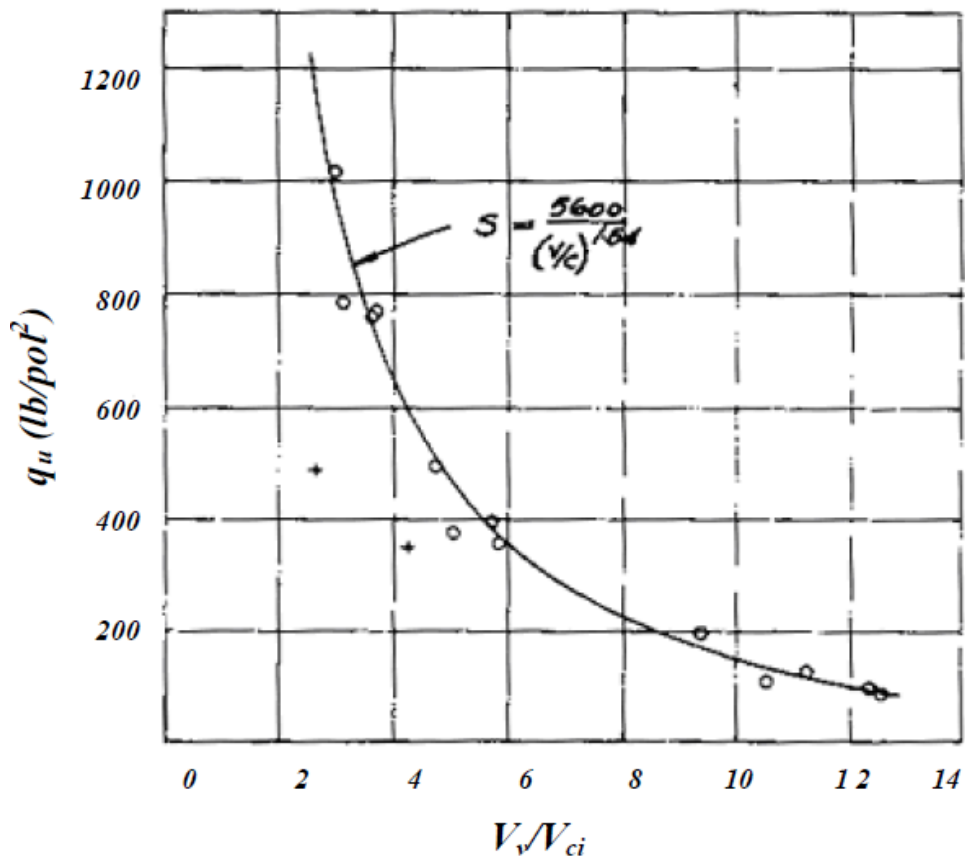
Larnach (1960) utilizou em sua pesquisa uma mistura de areia fina com argila pulverizada, no traço 9:1 (nove partes de areia para uma de argila), o autor escolheu os teores de cimento de 5,3%, 11,1% e 17,7% em relação a massa de solo seco. Para cada teor de cimento foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e de flexão em vigotas, moldadas com diferentes teores de umidade e massa específica aparente seca, definidos a partir do ensaio de compactação.

Larnach (1960) definiu a relação o volume de vazios e o volume de cimento, por meio da Equação 2:

$$\frac{Vv}{Vc} = \frac{\text{Volume absoluto de vazios (ar+água)}}{\text{Volume de cimento}} \quad (2)$$

A curva de tendência da relação vazios/cimento pode ser observada no Gráfico 6.

Gráfico 6– Relação vazios/cimento e resistência à compressão simples



Fonte: Larnach (1960)

Após a análise do gráfico relação vazios/cimento *versus* resistência à compressão simples, notou-se que todos os corpos de prova tinham a mesma relação vazios/cimento e apresentaram valores diferentes de resistência à compressão simples. Os corpos de prova diferenciavam-se quanto aos teores de cimento e relação vazios/cimento (LAUTENSCHLÄGER, 2007).

A dispersão foi observada também por meio dos resultados de ensaio de compressão triaxial que para diferentes valores de tensão obteve-se a mesma relação vazios/cimento. Esse fato foi explicado pela diferença de comportamento dos corpos de prova quando se alterava, isoladamente, os teores de cimento e grau de compactação e geravam-se curvas cujos valores de resistência apresentaram diferentes extensões (LAUTENSCHLÄGER, 2007).

A partir da análise do comportamento de resistência dos corpos de prova e a dispersão nos valores dos resultados, modificou-se as variáveis de modo isolado e notou-se que para obter valores de resistência com maior precisão e melhor ajuste dos pontos nas curvas, seria necessário elevar o volume de cimento a um determinado expoente. Então a relação vazios/cimento pode ser expressa por meio da Equação 3:

$$\text{relação vazios/cimento} = \frac{Vv}{Vci^{0,28}} \quad (3)$$

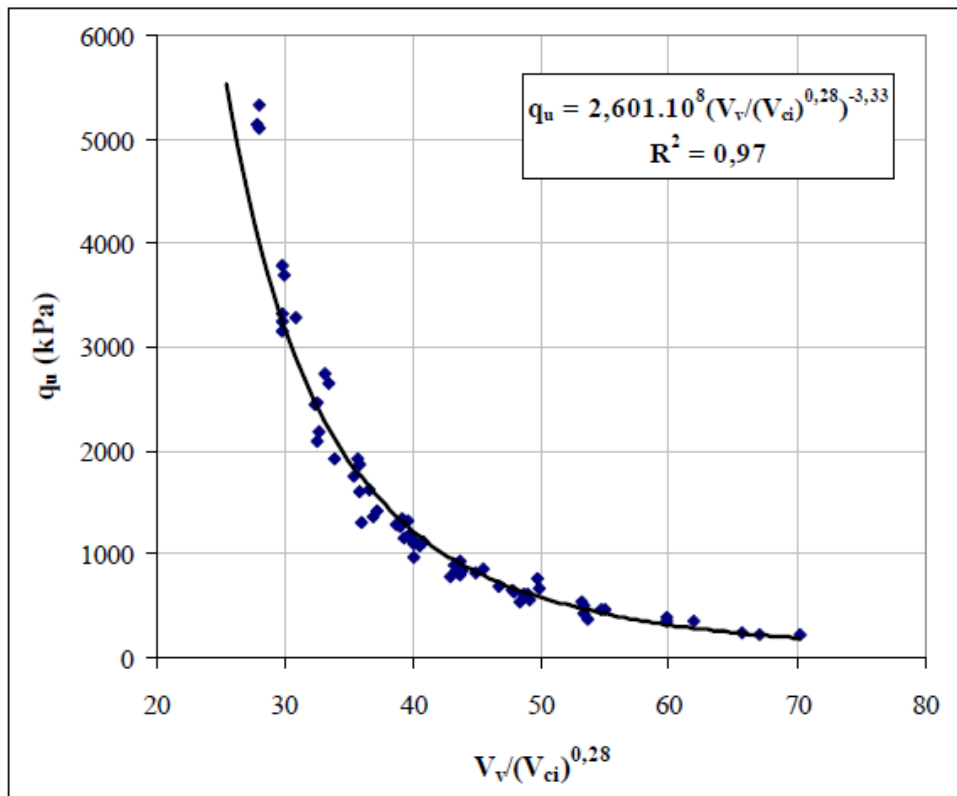
A relação vazios/cimento pode ser obtida por meio da relação entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento (em %) sobre o volume total elevado a um determinado expoente (Equação 4):

$$\text{relação vazios/cimento} = \frac{n}{(Civ)^x} \quad (4)$$

A utilização desse método, semelhante ao que ocorre no concreto, pode ser bem importante para a aplicação de misturas de solo-cimento em campo (LARNACH, 1960 *apud* FOPPA, 2005).

Foppa (2005), realizou uma pesquisa semelhante ao proposto por Larnach (1960) ao estabilizar um solo arenoso com cimento nas proporções: 2%, 3%, 5%, 7%, 9% e 12% em relação ao peso seco do solo. Foram realizados ensaios de compressão simples para cada teor de cimento, com diferentes teores de umidade de moldagem e pesos específicos aparentes secos definidos a partir do ensaio de compactação para as misturas de solo-cimento. O Gráfico 7 ilustra o ajuste da curva de comportamento de resistência à compressão dos corpos de prova de solo-cimento para um período de cura de 7 dias.

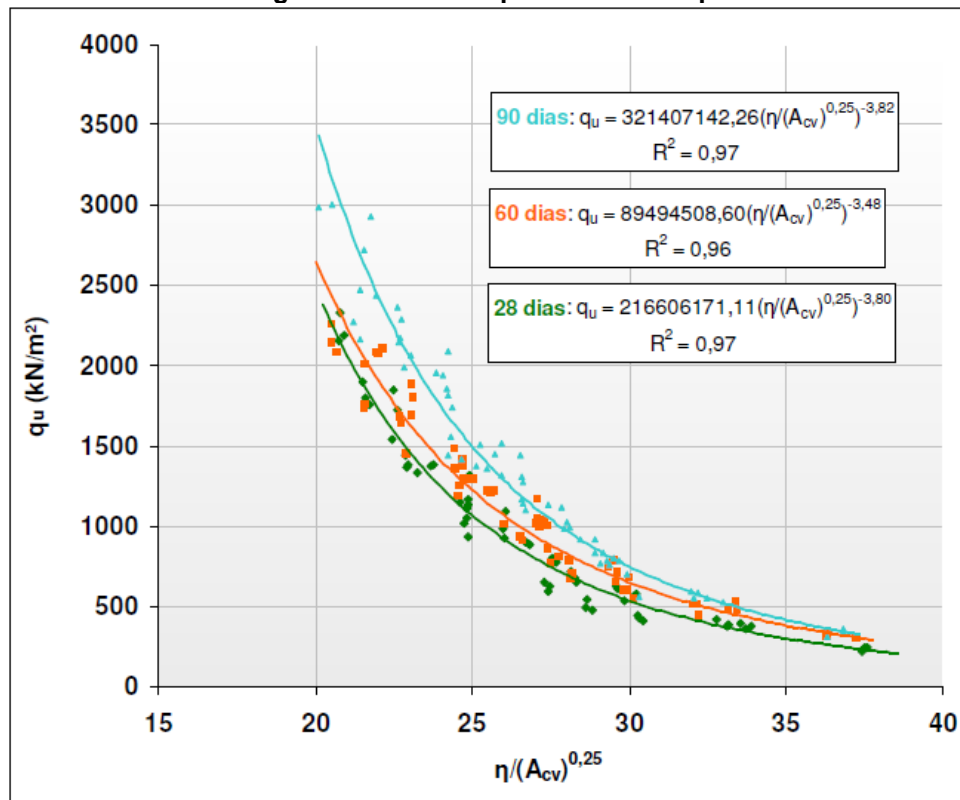
Gráfico 7– Curva de ajuste da relação vazios/cimento e resistência à compressão simples



Fonte: Foppa (2005)

Righetto (2008) estabilizou um solo com resíduo de britagem e cal mais cimento nos teores de 3%, 5%, 7%, 9% e 11%. Foram realizados ensaios de compressão simples para cada teor de cal e cimento, com diferentes teores de umidade de moldagem e pesos específicos aparentes secos definidos a partir do ensaio de compactação para as misturas de solo, agente cimentante e resíduo de britagem. O Gráfico 8 ilustra o comportamento de resistência à compressão dos corpos de prova *versus* a razão entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento para diferentes períodos de cura: 20,60 e 90 dias.

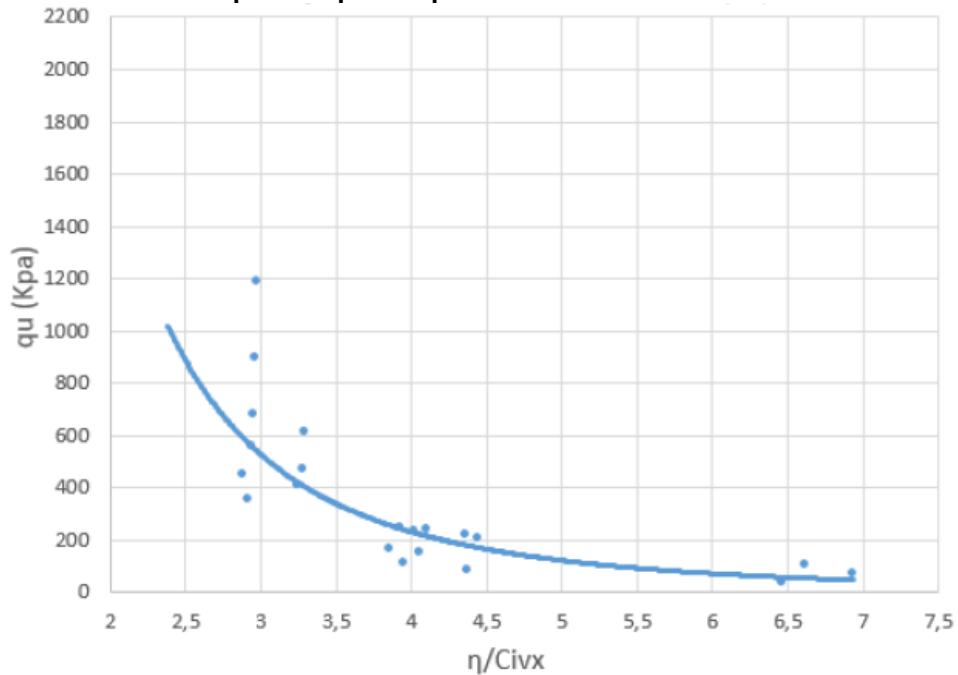
Gráfico 8 – Relação vazios/agente cimentante expresso em termos de porosidade e teor volumétrico de agente cimentante para diferentes períodos de cura.



Fonte: Righetto (2008)

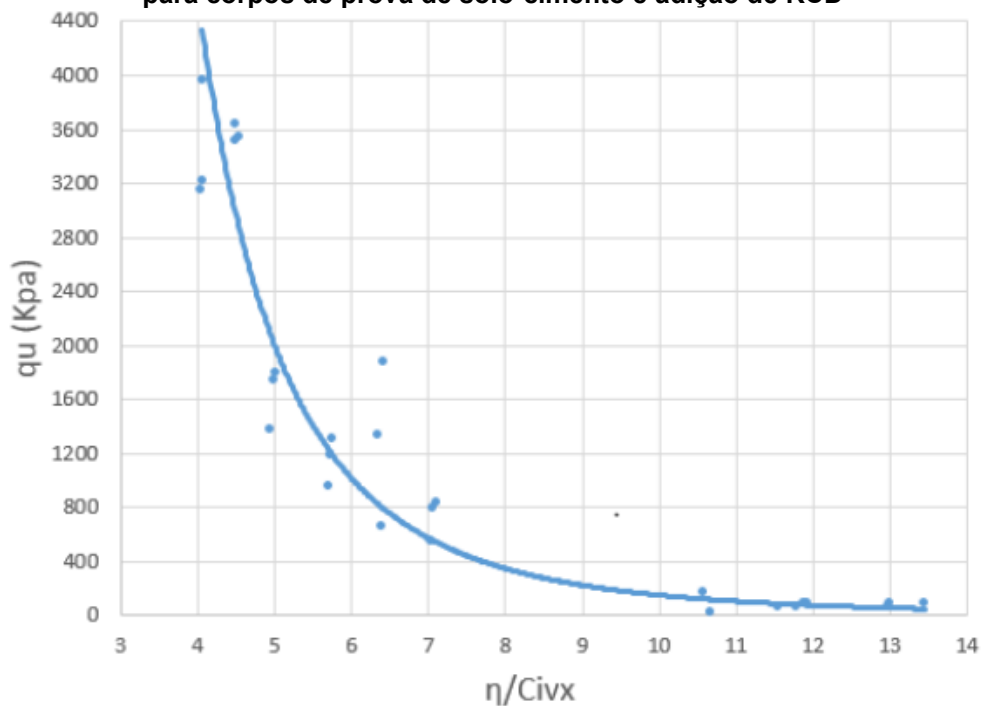
Pereira e Vargas (2019) estabilizaram um solo argilo-siltoso com cimento e resíduo de construção e demolição (RCD), sendo os teores de cimento utilizados: 5%, 10% e 15%. Foram moldados corpos de prova e realizados ensaios de resistência à compressão simples com teor de umidade de moldagem fixo de 22% e variação nos pesos específicos, variáveis que foram estabelecidas a partir da realização do ensaio de compactação. Os Gráficos 9 e 10 ilustram as curvas de ajuste dos valores de compressão simples *versus* volume de vazios/cimento para os corpos de prova de solo-cimento e solo-cimento-RCD, para um período de cura de 21 dias.

Gráfico 9 – Curva de ajuste relação vazios/cimento e resistência à compressão simples para corpos de prova de solo-cimento



Fonte: Pereira e Vargas (2019)

Gráfico 10– Curva de ajuste relação vazios/cimento e resistência à compressão simples para corpos de prova de solo-cimento e adição de RCD



Fonte: Pereira e Vargas (2019)

A aplicação da técnica de análise da relação vazios/cimento proporciona uma melhor escolha da quantidade de cimento e da energia de compactação, proporcionando uma melhor escolha na dosagem da mistura e garantindo à resistência adequada ao projeto a um menor custo possível. A relação vazios/cimento também pode ser utilizado

no controle de camadas de solo estabilizada com cimento, quando nota-se uma compactação inferior a desejada, sendo necessário determinar com precisão a perda de resistência e as medidas que podem ser adotadas para minimizar essa perda da resistência, como por exemplo, o reforço da camada e a minimização do carregamento transmitido (CRUZ, 2008).

2.6 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Em pesquisas que envolvem experimentos de caracterização de materiais que serão produzidas misturas, são realizadas diversas combinações com diferentes variáveis. Assim, muitos experimentos são realizados com repetições e grande número de amostras são geradas (SOUZA, 2019).

O planejamento experimental é uma técnica que permite ao pesquisador executar experimentos de forma eficiente e econômica, por meio da análise estatística dos dados experimentais e obter os efeitos principais e as interações entre as variáveis (SOUZA, 2019). Existem vários tipos de planejamentos: planejamento fatorial completo, fracionário e composto.

No planejamento de experimentos, inicialmente se define as variáveis e as respostas desejadas. Os fatores podem ser definidos como as variáveis que o pesquisador pode controlar, podem ser quantitativos ou qualitativos. Durante a execução do experimento, é possível notar os fatores que podem interferir na resposta, eles podem ser controláveis ou não (NETO, SCARMINIO E BRUNS, 2003).

Os planejamentos fatoriais de dois níveis (2^k) são simples e podem ser utilizados para determinar quais fatores têm influência sobre a resposta, considerando k como as variáveis a serem controladas, para um planejamento completo de dois níveis é necessário 2^k ensaios distintos. Um planejamento 2^2 teria quatro ensaios com quatro níveis diferentes. A execução dos ensaios deve ser definida de forma aleatória evitando distorção estatística dos resultados, podendo ser adicionados pontos centrais e réplicas ao planejamento (ZANUTTO, 2020). No planejamento de dois níveis, é possível obter os efeitos principais e as interações a partir das réplicas ou análise dos gráficos de probabilidade normal (BÔSSA, 2012).

Na técnica de solo-cimento alguns trabalhos trazem sobre a utilização do planejamento experimental, Dallacort et al., (2002) estabeleceram por meio do planejamento experimental fatorial, as variáveis principais para moldagem dos corpos de prova e análise dos resultados de resistência à compressão simples. A dosagem foi

preparada substituindo parcialmente o cimento Portland por resíduo cerâmico. Pelos resultados obtidos da superfície de resposta obtidas por meio da variação de massa específica aparente seca e resistência, foi possível estabelecer proporções ótimas para fabricação de tijolos de solo-cimento com solo estudado.

Souza (2019) por meio do planejamento experimental fatorial, estabeleceu os fatores principais para análise estatística dos resultados do ensaio de resistência à compressão. A dosagem foi preparada a partir da mistura de solo, cimento e manípueira em substituição parcial a água. Segundo o autor, apesar dos resultados estatísticos obtidos do planejamento serem satisfatórios, as equações geradas pelo modelo não foram preditivas, e não podem gerar equações úteis para avaliação dos resultados das propriedades técnicas estudadas.

2.7 FATORES DETERMINANTES DO COMPORTAMENTO DO SOLO-CIMENTO

Alguns fatores influenciam na resistência mecânica de amostras de solo-cimento:

- Propriedades físico-químicas do solo: composição mineralógica, composição granulométrica, umidade, porcentagem de matéria orgânica e pH;
- Tipo e teor de agente cimentante, adições na mistura e relação água/cimento;
- Condições de mistura e cura;
- Procedimentos adotados para a execução dos ensaios (PORBAHA et al., 2000; FOPPA, 2005).

O tipo e composição química do solo, a adição de água e cimento, a densidade presente na pasta durante a compactação, o tempo de reação da mistura antes da compactação e o grau de pulverização do solo (caso seja argiloso), são fatores que interferem no comportamento resistivo do solo-cimento (FELT, 1955; FOPPA, 2005).

A velocidade da modificação do comportamento do solo, estão relacionadas às propriedades específicas desse solo, da quantidade de aditivo, quantidade de água, do método e grau de compactação, das condições e período de cura, grau de pulverização e da eficiência da mistura, na utilização de solos argilosos (SPECHT, 2000).

2.7.1 Efeito do teor de cimento

Quanto à adição de cimento na estabilização do solo estudos indicam que pequenas quantidades de cimento promovem ganhos de resistência e durabilidade, independentemente do tipo de solo, porém elevadas adições de cimento à mistura e condições de cura impróprias podem ocasionar fissuras no material, causadas por retração por secagem (LIMA, 2013).

A quantidade de cimento presente na mistura é um fator determinante nos resultados de resistência à compressão, em sua pesquisa Grande (2003) notou que à medida que se aumentava o teor de cimento, os valores de resistência à compressão simples eram maiores, desde que a quantidade de água disponível seja suficiente para todo o cimento hidratar e ganhar resistência.

2.7.2 Efeito da densidade e compactação

A influência da densidade na mistura é um fator importante assim como o teor de cimento. Quanto maior a densidade maior a resistência do material, e conseqüentemente há uma redução da permeabilidade (PINTO, 2006).

Felt (1955) realizou ensaios de durabilidade em areias, siltes e argilas e notou que com o aumento da densidade da mistura compactada houve uma redução nas perdas de massa das amostras, principalmente em solos argilosos e siltosos. Observou-se um crescimento exponencial nos valores de resistência à compressão simples, em amostras mais densas e que tiveram o mesmo teor de umidade de moldagem. Notou-se também que amostras com valores de peso específico aparente seco e umidade mais próximos aos valores ótimos obtidos do ensaio de compactação, tiveram propriedades mais eficazes.

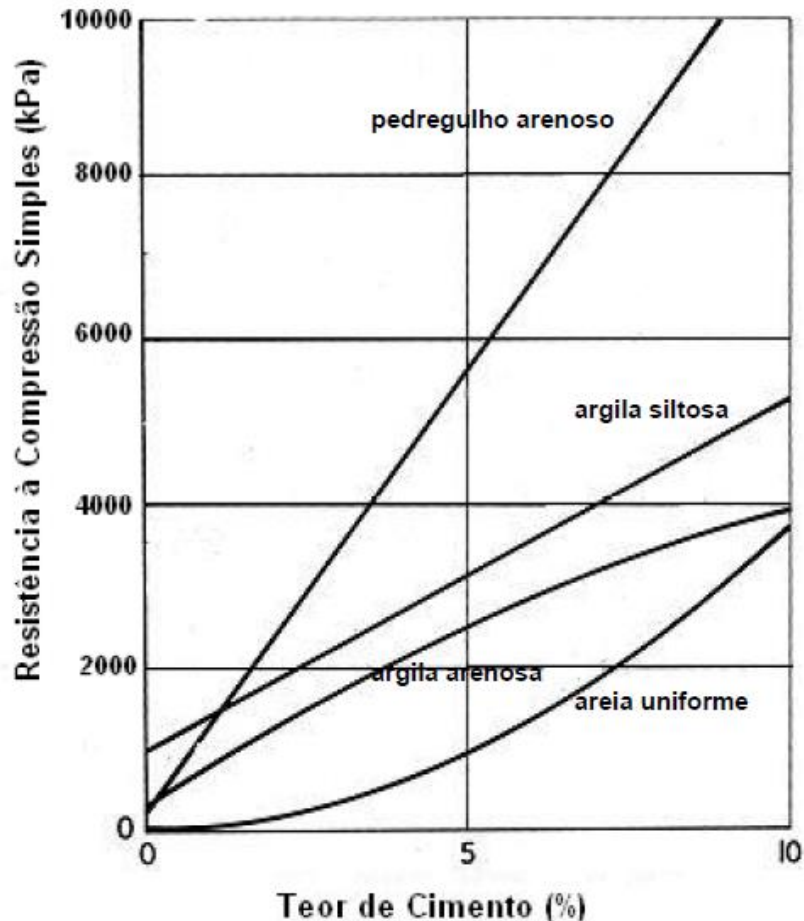
2.7.3 Comportamento mecânico

2.7.3.1 Resistência à compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples e de durabilidade por ciclos de molhagem e secagem, são os mais utilizados para análise dos efeitos da estabilização do solo com o cimento (PORBAHA et al., 2000; FOPPA, 2005).

De maneira geral, à medida em que o cimento é adicionado à mistura, o comportamento resistente das amostras cresce linearmente, à diferentes taxas, dependendo do tipo de solo a ser utilizado, conforme ilustrado no Gráfico 11 (INGLES E METCALF, 1972 apud FOPPA, 2005).

Gráfico 11 – Efeitos da adição do cimento sobre à resistência à compressão simples para diferentes tipos de solo estabilizados com cimento Portland e curados por 7 dias.



Fonte: Ingles e Metcalf (1972) apud Foppa (2005)

Prietto (1996) observou que a resistência à compressão simples para solos arenosos, está relacionada ao grau de cimentação. Segundo o autor, em trabalhos encontrados na literatura sobre o tema, o grau de cimentação pode ser caracterizado pela quantidade de material cimentante, geralmente em porcentagem de cimento, em relação a massa seca de solo. Entretanto, o grau de cimentação não é função somente do agente cimentante, tendo influência de outras características como: densidade, forma e natureza superficial das partículas.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL DE MOLDAGEM

Este programa experimental de moldagem, tem como objetivos avaliar a influência das variáveis teor de cimento e peso específico aparente seco sobre a resistência à compressão simples e verificar a validação da relação vazios/cimento mediante ensaios de resistência à compressão simples.

As variáveis podem ser definidas como: investigadas, fixas e de resposta.

As variáveis investigadas são:

- Peso específico aparente seco (γ_d) das amostras de solo-cimento e solo-cimento resíduo de cinza, compactados.
- Teor de cimento: expresso em porcentagem, por meio da relação do peso do cimento (c_i) dividido pelo peso de solo seco;
- Relação vazios/cimento: relação expressa entre o volume absoluto de vazios (V_v) e o volume de cimento (V_{ci}), presentes nas amostras de solo-cimento e solo-cimento resíduo de cinza compactados.

As variáveis fixas são:

- Tipo de solo: solo proveniente da região de Ponta Grossa -PR;
- Tipo de agente cimentante: Cimento Portland CP II-F-32;
- Período de cura: 14 dias;
- Taxa de deformação nos ensaios de resistência à compressão simples: 2 mm/min.
- A variável resposta é: resistência à compressão simples (q_u);

Inicialmente, foram realizados ensaios de caracterização do solo e do resíduo de cinza para que os materiais pudessem ser classificados. A segunda etapa dos ensaios, consistiu nas moldagens iniciais para estabelecer a umidade de moldagem para os demais ensaios, a partir do ensaio de compactação do solo e do resíduo de cinza, realizando-se os ensaios de resistência à compressão simples.

A terceira etapa consistiu nas moldagens com um volume maior de amostras, definidas a partir dos pontos de moldagem, conforme descrito no item 3.5 deste trabalho. Para as misturas de solo-cimento e solo-cimento resíduo de cinza.

3.2 MÉTODOS

Nesse tópico, serão apresentados os procedimentos metodológicos utilizados durante o desenvolvimento desse trabalho. Os laboratórios utilizados foram o Laboratório de Processos de Separação e Tecnologia Ambiental H006 e o Laboratório de Química Instrumental H003 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa. O Laboratório de Mecânica dos Solos e Rochas da Universidade Estadual de Ponta Grossa foi utilizado para os ensaios de Limites de Atterberg, densidade real dos grãos, análise granulométrica e compactação. O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado para os corpos de prova no laboratório de ensaios mecânicos destrutivos e não destrutivos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa. O ensaio de absorção de água foi aplicado para os corpos de prova, acomodados no laboratório de ensaios mecânicos destrutivos e não destrutivos.

3.2.1 Materiais

- Solo: O solo utilizado nesse trabalho foi adquirido de uma empresa de terraplenagem que coleta solos de jazidas da região. O solo foi depositado sobre uma lona em uma área de campo da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa, e foram separados aproximadamente 40 kg para a realização dos ensaios que foram colocados em padiolas e lonas até a secagem natural.
- Resíduo de Cinza: O resíduo de cinza foi fornecido por uma indústria madeireira de médio porte da região de Ponta Grossa -PR. Este resíduo é obtido a partir da queima da biomassa de lascas de madeira e posteriormente é destinado para compostagem.
- Cimento: O cimento adquirido foi o cimento Portland CP II-F-32, indicado para produção de concretos e argamassas em obras corriqueiras de engenharia civil, como: reboco, contrapisos, lajes etc.
- Água: Foi utilizada água do sistema de abastecimento da cidade de Ponta Grossa -PR, fornecida pela Sanepar, o que possibilita manter os parâmetros de qualidade da água constantes.

3.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

3.3.1 Consistência dos solos

3.3.1.1 Preparação das amostras Norma NBR 6457 (ABNT, 2016)

As amostras utilizadas nos ensaios de limite de liquidez do solo, limite de plasticidade, análise granulométrica e compactação devem ser preparadas conforme a Norma NBR 6457 (ABNT, 2016). Para os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade, inicialmente as amostras são secas a temperatura ambiente até a umidade higroscópica, ou seja, na umidade residual do solo quando seco ao ar e armazenadas em sacos plásticos até a realização dos ensaios. Posteriormente, a amostra passa por processo de destorroamento e é passada na peneira de 0,42 mm (nº40) até se obter a fração de 200 g de solo tamisados ⁵ passados na peneira.

3.3.1.2 Umidade higroscópica do solo e resíduo de cinza pelo método da estufa

As amostras de solo e cinza de caldeira foram preparadas e secas a temperatura ambiente, sendo separadas para o ensaio três amostras de cada material. As amostras foram armazenadas em cápsula de alumínio, pesadas e denominadas M_1 . Posteriormente, foram determinadas massa úmidas do solo e da cinza de caldeira, denominadas como M_2 e levadas a estufa para secagem pelo período de 24 horas. As amostras permaneceram na estufa pelo período de 72 horas, sendo posteriormente novamente pesadas e anotadas as massas de solo seco e cinza de caldeira secas, denominadas de M_3 . Assim, a umidade higroscópica foi obtida por meio da Equação 5:

$$w = 100 \left(\frac{m_{bu} - m}{m_{bs} - m} \right) \quad (5)$$

Onde w é o teor de umidade higroscópica em %, m_{bu} é a massa bruta úmida (massa da amostra úmida mais a amostra da cápsula), m_{bs} é a massa bruta seca (massa da amostra seca mais a amostra da cápsula) e m é a massa da cápsula.

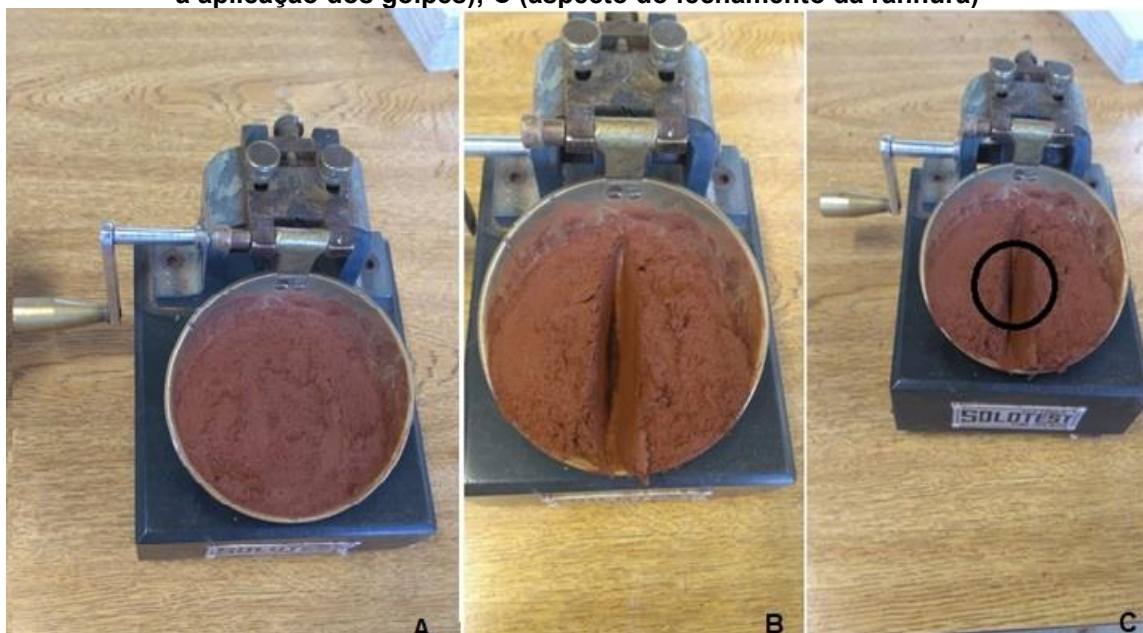
⁵ Tamisado: sinônimo de peneirado.

3.3.1.3 Limite de Liquidez do Solo – Norma NBR 6459 (ABNT, 2016)

Após a preparação das amostras, o aparelho de Casagrande foi inspecionado conforme descrito na Norma NBR 6459 (ABNT, 2016).

O solo foi colocado em cápsula e foi umedecido com água destilada até a constância da massa, com parte desta transferida para o aparelho de Casagrande, sendo que nessa etapa a concha deve ser segurada por uma das mãos do operador, para colocação da massa de forma homogênea de acordo com a Fotografia 1 (A).

Fotografia 1– A (aspecto da ranhura antes da aplicação dos golpes); B (aspecto da amostra após a aplicação dos golpes); C (aspecto do fechamento da ranhura)



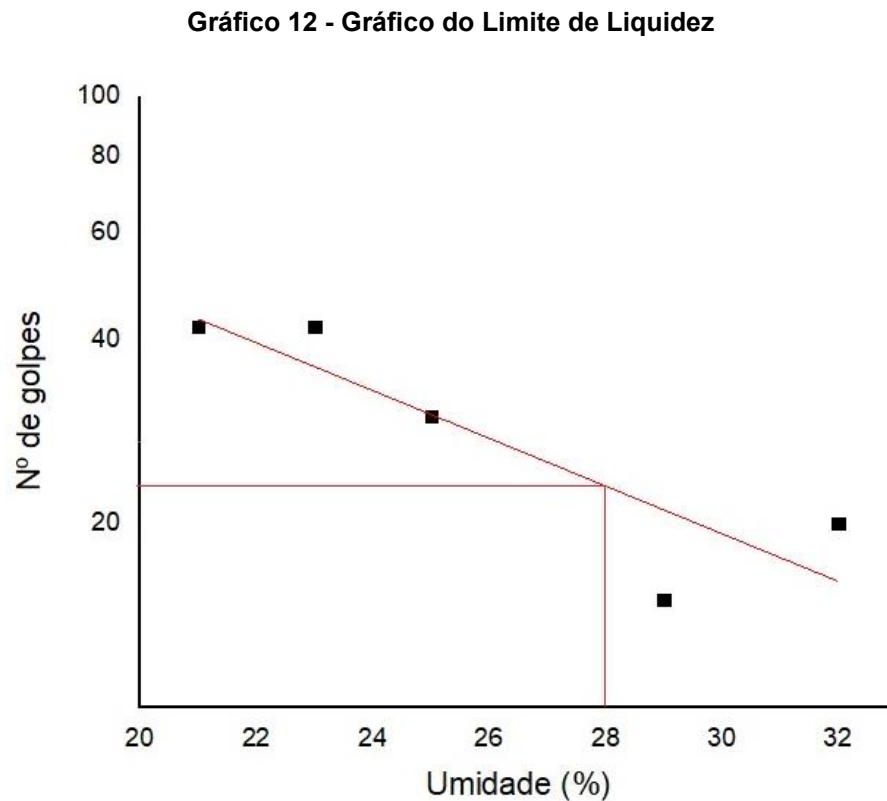
Fonte: Autoria própria

Posteriormente, ocorre a abertura da ranhura com o cinzel e aplicação de golpes para o fechamento da ranhura. A Fotografia 1 (B) demonstra o aspecto da fissura, a qual deve estar localizada no centro da porção do solo, em que seja possível visualizar o fundo da concha. O destaque na Figura C representa o fechamento da ranhura, após a aplicação do golpe. O processo de aplicação dos golpes consiste no giro da manivela em aproximadamente 2 golpes por segundo. Deve-se observar o número de golpes de fechamento das bordas inferiores da ranhura com aproximadamente 13 mm comprimento.

Parte das bordas que se uniram foram coletadas e separadas em cápsulas de alumínio para determinação da umidade conforme. As amostras permaneceram na estufa pelo período de 24 horas NBR 6457 (ABNT, 2016). O restante da massa foi transferido novamente para a cápsula para adicionar água destilada e fazer novamente

a mistura a fim de obter o novo ponto. A cada novo ponto, os golpes devem compreender o intervalo de 35 a 15 e a concha e o cinzel foram limpos NBR 6459 (ABNT, 2016).

O limite de liquidez deve ser expresso em porcentagem e obtido por meio do gráfico que correlaciona o número de golpes e os teores de umidade de cada ponto, conforme o Gráfico 12.



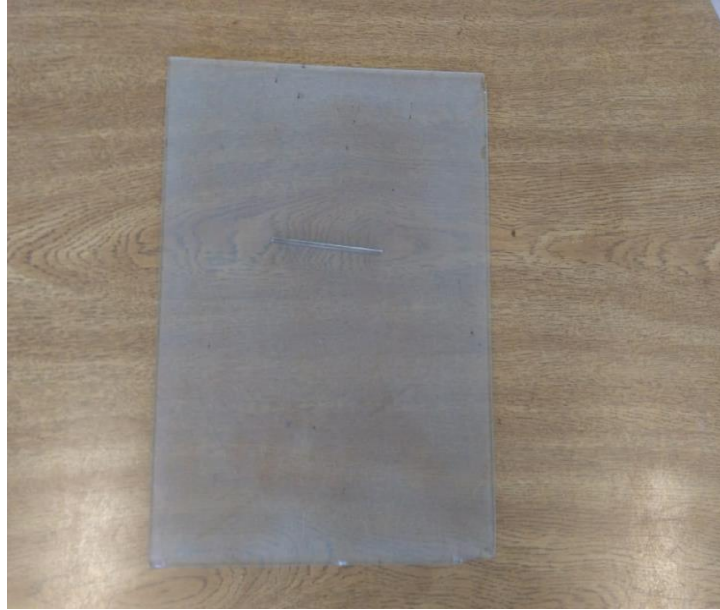
Fonte: Autoria própria

3.3.1.4 Limite de Plasticidade do Solo – Norma NBR 7180 (ABNT, 2016)

Após a realização do ensaio, as amostras foram separadas e pesadas em uma balança com resolução de 0,01 g em cinco cápsulas de alumínio, anteriormente numeradas.

A fração inicial de solo foi colocada na cápsula e umedecida com água destilada até a formação de uma mistura homogênea, de consistência plástica e uma fração de aproximadamente 10 g foi coletada para moldagem no formato de uma pequena bola, rolada sobre a placa de vidro até se obter um corpo de prova em forma cilíndrica, o qual deve ser conferido com o gabarito conforme a Fotografia 2.

Fotografia 2- Placa de vidro e gabarito usados no ensaio de plasticidade



Fonte: Aatoria própria

Nas etapas em que a amostra de solo era rolada sobre a placa de vidro e se fragmentava antes de atingir os 3 mm de diâmetro, o solo era retornado para a cápsula (com solo seco) e era adicionada cerca de 5 ml de água destilada, depois era formado novamente uma pequena bola rolada sobre a placa de vidro até obter a forma cilíndrica. Na ocorrência da não fragmentação ao atingir 3 mm de diâmetro a amostra foi retornada à cápsula, amassada e adicionada mais 10 g de solo seco e procedido até atingir a forma cilíndrica. Quando o cilindro se romper aos 3 mm de diâmetro e 10 mm de comprimento, a amostra deve ser armazenada na cápsula determinar-se a umidade. As amostras permaneceram na estufa pelo período de 24 horas, a uma temperatura de 100 °C. A Fotografia 3 ilustra as características das amostras após secagem na estufa.

Fotografia 3- Aspecto das amostras do ensaio de plasticidade após a secagem em estufa



Fonte: Autoria própria

O índice de plasticidade deve ser determinado por meio da Equação 6:

$$IP = LL - LP \quad (6)$$

Onde, IP é o índice de plasticidade do solo, LL o limite de liquidez determinado conforme a NBR 6459 e LP é o limite de plasticidade. O resultado deve estar expresso em porcentagem.

3.3.2 Determinação da densidade real dos grãos Norma ME 093 (DNER, 1994)

Inicialmente a amostra foi preparada tomando-se cerca de 10 g de solo destorroado e passado na peneira de 2,00 mm (nº10), previamente seco em estufa até a constância da massa, pelo período de 24 horas, obtendo-se três amostras de solo para cada determinação da densidade real.

Os picnômetros da marca Diogolab com capacidade de 50 mL estavam vazios, limpos e secos. Depois, foram pesados como P₁ (massa picnômetro seco, sem amostra de solo) e P₂ (massa picnômetro com amostra de solo). Em seguida, foi adicionada água destilada nos picnômetros até cobrir a amostra de solo e o conjunto foi agitado durante 15 minutos no fogo, conforme Fotografia 4 (A, B).

Fotografia 4– A (solução de água destilada e solo); B (solução de água destilada e solo em agitação no fogo).



Fonte: Autoria própria

Após essa etapa, as soluções foram resfriadas e novamente completadas com água destilada e colocadas em banho de água à temperatura ambiente pelo período de 15 minutos, após as rolhas (de vidro) são colocadas de forma que a água venha a emergir à superfície, sendo a temperatura de banho de água (T [°C]) medida. Os picnômetros foram retirados, enxugados e pesados P_3 (massa do picnômetro, amostra de solo e água).

A densidade real do solo à temperatura T é dada pela Equação 7:

$$D_T = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \quad (7)$$

Onde D_t é a densidade real do solo a determinada temperatura (adimensional), P_1 peso do picnômetro vazio e seco em g, P_2 peso do picnômetro mais amostra em g, P_3 peso do picnômetro mais amostra e água, em g e P_4 peso do picnômetro mais água destilada em g.

O valor da densidade real deverá ser referente à água a temperatura de 20 °C, calculado conforme o valor referente à água à temperatura T (Equação 8):

$$D_{20} = k_{20} \cdot D_T \quad (8)$$

Onde, D_{20} é a densidade real do solo a 20 °C em [g/cm³], k_{20} é a relação entre a densidade relativa da água à temperatura (T) e a densidade relativa da água a 20 °C obtida da tabela da Norma ME 093 (DNER, 1994) e D_t refere-se à densidade real do solo a determinada temperatura T , o valor encontrado é adimensional.

3.3.3 Análise granulométrica do solo – Norma NBR 7181 (ABNT, 2016)

Uma parte da amostra obtida conforme item 4.2.1 foi tamisada através da peneira de 76 mm (nº3). Após, tomou-se aproximadamente 1 kg da amostra retida na peneira, em função da dimensão dos grãos maiores do solo, conforme a Tabela 3 da Norma NBR 6457 (ABNT, 2016). A amostra seca em temperatura ambiente foi obtida, denominada Mt e tamisada através da peneira de 2,0 mm (nº10) para ser destorroada. O material obtido foi lavado para eliminar o material seco e aderente para permanência em estufa à temperatura de 105 °C até a constância da massa. Foi utilizado 70,2 g desse material para a sedimentação e o peneiramento fino, sendo determinado como Mw.

A solução de hexametáfosfato de sódio foi diluída em 125 g de água e misturada com 0,5 g de carbonato de sódio e 70,2 g de solo, permanecendo em repouso pelo período de 12 horas (Fotografia 5). O uso do defloculante é para desagregação de todas as partículas de solo, evitando que elas permaneçam unidas e possa obter-se seu diâmetro isoladamente.

Fotografia 5– Preparação de solução de hexametáfosfato de sódio



Fonte: Autoria própria

Após o período de repouso, a solução foi transferida para o copo dispersor, preenchido com água destilada até o nível de 5 cm abaixo da borda do copo. O dispersor foi ligado pelo período de 15 minutos e após o material obtido da dispersão foi transferido para a proveta com adição de água destilada até que todo o material fosse retirado do

dispersor. Adicionou-se água destilada ao material da proveta até o volume próximo de 1000 cm³ (Fotografia 6).

Fotografia 6- A (dispersor); B (solução de solo no início da sedimentação)



Fonte: Autoria própria

Posteriormente, o material presente na proveta foi agitado com o auxílio de um bastão de vidro, para que as partículas da solução se mantivessem em suspensão, verificando-se a temperatura de equilíbrio. Atingindo-se a temperatura de equilíbrio, a proveta foi colocada sobre a palma de uma das mãos e com o auxílio da outra mão foi agitada em movimentos enérgicos de rotação, por aproximadamente 1 min, de maneira que o bico da proveta movimentou-se de baixo para cima e vice e versa.

Após esta etapa, a proveta foi colocada sobre a bancada, para colocação do densímetro na solução e início da contagem do tempo de sedimentação, sendo: 30 segundos, 1 minuto, 2 minutos, 4 minutos, 8 minutos, 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 4 horas, 8 horas e 24 horas.

Depois da realização da última leitura, o material foi transferido para a peneira de 0,075 mm (nº 200) para lavagem à baixa pressão e secagem em estufa a temperatura de 105 °C até a constância da massa. O material obtido da sedimentação foi utilizado para o peneiramento fino.

No peneiramento grosso, o material retido na peneira de 2,0 mm (nº10) determinado como M_g .

No peneiramento fino, o material resultante da sedimentação é colocado no agitador mecânico para passagem nas peneiras de 1,2 mm (nº16), 0,6 mm (nº30), 0,42 mm (nº40), 0,25 mm (nº50), 0,15 mm (nº100) e 0,075 mm (nº200).

A massa total da amostra seca, deve ser obtida por meio da Equação 9:

$$M_s = 100 \left(\frac{M_T - M_g}{100 + W} \right) + M_g \quad (9)$$

Onde M_s é a massa total da amostra seca em (g), M_T é a amostra seca em temperatura ambiente em (g), M_g é a massa do material retida na peneira de 2,0 mm (nº10) e W umidade higroscópica da porção que atravessa a peneira de 2,0 mm (nº10).

As porcentagens da massa que passam nas peneiras de 50 mm (nº2), 38 mm (nº1 1/2), 25 mm (nº1), 19 mm (nº3/4), 9,5 mm (nº3/8), 4,8 mm (nº4) e 2,0 mm (nº10) foram obtidas por meio da Equação 10:

$$Q_g = 100 \left(\frac{M_s - M_r}{M_s} \right) \quad (10)$$

Onde Q_g é a porcentagem do material que passa em cada peneira, M_s é a massa total da amostra seca e M_r é a massa do material acumulado em cada peneira.

A porcentagem do material em suspensão pode ser calculada conforme cada leitura do densímetro, utilizando a Equação 11:

$$Q_s = N \left(\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{md}} \right) \left(\frac{V \rho_{wc} (L - L_d)}{100\beta} \right) \quad (11)$$

sendo β definido como (Equação 12):

$$\beta = \frac{M_w}{(100+W)} \quad (12)$$

Sendo V o volume da proveta igual a 1000 cm³, Q_s porcentagem do solo na solução no momento da leitura do densímetro, N é a porcentagem do material passante na peneira de 2,00 mm (nº10) obtido conforme o item 5.2 da NBR 7181, ρ_s massa específica dos grãos de solo em (g/cm³), ρ_{md} massa específica do meio dispersor na

temperatura de inspeção do densímetro a 20 °C (utilizar 1,000 g/cm³), L é a leitura do densímetro na suspensão, Ld leitura do densímetro no meio dispersor, M_w é a massa do material úmido utilizado na sedimentação e W a umidade higroscópica da porção de solo que passa na peneira de 2,0 mm (nº10).

O diâmetro das partículas de solo em suspensão, pode ser calculada por meio da lei de Stokes (Equação 13):

$$d = \sqrt{\frac{1800 \mu}{\rho_s - \rho_{md}} \cdot \frac{z}{t}} \quad (13)$$

Onde d é o diâmetro máximo das partículas em mm, μ coeficiente de viscosidade do meio dispersor à temperatura do ensaio em [g x s/cm²] (Tabela 2 da NBR 7181), z a altura da queda das partículas, referente à leitura do densímetro em cm (conforme Anexo A da referida norma), t é o tempo de sedimentação em segundos (s), ρ_s é a massa específica dos grãos de solo em [g/cm³] e ρ_{md} massa específica do meio dispersor à temperatura do ensaio em [g/cm³].

As porcentagens dos materiais que passam nas peneiras de 1,2 mm (nº16), 0,6 mm (nº30), 0,42 mm (nº40), 0,25 mm (nº50), 0,15 mm (nº100) e 0,075 mm (nº200), podem ser obtidas por meio da Equação 14:

$$Q_f = \left(\frac{100M_w - M_r (100 + W)}{100M_w} \right) N \quad (14)$$

Onde M_w massa do material úmido utilizado no peneiramento fino ou sedimentação, M_u massa da porção úmida do solo usado no peneiramento fino ou sedimentação, W umidade higroscópica da porção de solo passante na peneira de 2,0 mm (nº10), M_r massa do material obtido em cada peneira e N é a porcentagem do material que passa na peneira de 2,00 mm (nº10) obtido conforme o item 5.2 da NBR 7181.

Realizou-se o procedimento acima descrito, para as amostras de solo e de cinza de caldeira.

3.3.4 Ensaio de compactação Norma NBR 7182 (ABNT, 2016)

O ensaio de compactação seguiu as etapas descritas na Norma NBR 7182 (ABNT, 2016). Inicialmente preparou-se aproximadamente 7 kg de solo e 3 kg de resíduo de cinza, em seguida o material foi passado na peneira de 19 mm e observou-se que não teve material retido, utilizando-se o cilindro pequeno com dimensões 9,99 cm x 12,73 cm. Pesou-se o molde cilíndrico e efetuou-se duas medidas da altura e diâmetro, para determinação do volume. Colocou-se a amostra de solo em uma bandeja metálica e adicionou-se água, cerca de 0,5 litro para a primeira adição e 0,1 litros para as demais e misturou-se até a completa homogeneização.

Após acoplar o colarinho, acomodou-se o conjunto em uma bandeja metálica e colocou-se o papel filtro sobre o disco espaçador, para evitar que a amostra aderisse no cilindro. Adicionou-se ao cilindro a primeira camada de solo, aplicando-se golpes verticalmente e distribuídos sobre a camada de solo até a energia normal (26 golpes para o cilindro pequeno).

Após a compactação, escarificou-se a camada e adicionou-se a segunda camada de solo para compactá-la e aplicou-se esse procedimento para todas as camadas, de modo que ao final do processo todas as camadas de solo tiveram a mesma altura (3 camadas para cilindro pequeno). Ao final da compactação da última camada, removeu-se o anel complementar e retirou-se o excesso de solo, nivelando-se a camada com régua biselada.

Pesou-se o conjunto (molde cilíndrico + solo compactado). Removeu-se o corpo de prova com o extrator de amostras e retirou-se da parte central uma porção para determinação da umidade da amostra, ao final desmanchou-se o corpo de prova e colocou-se o material na bandeja metálica para reuso. Repetiu-se o processo até obter cinco pontos da curva de compactação. Adotou-se o mesmo procedimento para as misturas de solo com adições de 10,20 e 30% de resíduo de cinza.

Obteve-se o peso específico e o peso específico aparente seco do solo e das misturas por meio das Equações 15 e 16:

$$y' = \frac{P}{V} \quad (15)$$

Onde, y' = peso específico do solo, P = peso do solo compactado e V = volume do solo (molde cilíndrico).

$$Yd = \frac{y}{1+h} \quad (16)$$

Onde, Yd = peso específico aparente seco do solo e h = umidade do solo.

3.3.5 Teor de matéria orgânica

3.3.5.1 Adição de peróxido de hidrogênio

Nesse método, o peróxido de hidrogênio com concentração de 30% foi adicionado a aproximadamente 50 g de solo e por um período a mistura permaneceu sob reação, aquecida ou não. Após o término da reação, a amostra foi levada a estufa para secar a 105 °C, sendo pesada. A Fotografia 7 ilustra a preparação da amostra.

Fotografia 7 – Amostras de solo preparadas



Fonte: Autoria própria

As amostras de solo e cinza de caldeira foram preparadas. Separou-se aproximadamente 50 g de solo e 50 g cinza de caldeira tamisada na peneira de 0,42 mm (nº40) e adicionou-se 150 mL de H_2O_2 por 96h para a reação total. Os sedimentos de solo e cinza foram lavados com água destilada e secos em estufa a 105 °C, por 24 horas (SOUZA, 2019).

O teor de matéria orgânica pode ser obtido por meio da Equação 17:

$$MOS H_2O_2 (\%) = 100 \left(\frac{M_{INICIAL} - M_{H_2O_2}}{M_{INICIAL}} \right) \quad (17)$$

Onde, $MOS_{H_2O_2}$ é o teor em porcentagem de matéria orgânica, $M_{INICIAL}$ é a massa inicial de solo sem umidade, $M_{H_2O_2}$ massa do solo após a reação com H_2O_2 e secagem em estufa à 105 °C.

3.3.5.2 Determinação de impurezas orgânicas Norma NBR NM 49 (ABNT, 2001).

O ensaio seguiu as recomendações da Norma NBR NM 49 (ABNT, 2001). O método consistiu em colocar 200 g de solo ou cinza de caldeira em contato com 100 mL de uma solução reagente de hidróxido de sódio a 3%, deixando essa mistura em repouso por 24 h em ambiente escuro e foram coadas em papel filtro e comparou-se a coloração do filtrado com uma solução padrão.

A solução padrão foi produzida com 97 mL da mesma solução reagente de NaOH e uma quantidade determinada de matéria orgânica, 3 mL de ácido tânico a 2%. Esta solução permaneceu em repouso também por 24h, no mesmo ambiente da mistura de solo. O ácido tânico $C_{76}H_{52}O_{46}$ é um ácido orgânico que, ao reagir com a solução de hidróxido de sódio, altera sua coloração. A matéria orgânica eventualmente presente no solo também reagiu com o hidróxido de sódio, alterando sua coloração.

Terminado o experimento, comparou-se as colorações dos dois filtrados e segundo a norma, a coloração do filtrado de solo deve ser mais clara que a solução padrão.

3.4 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A confecção dos corpos de prova, foi iniciada no laboratório de Mecânica dos Solos e Rochas da Universidade Estadual de Ponta Grossa e posteriormente os experimentos foram realizados no laboratório de ensaios destrutivos e não destrutivos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa.

O processo de moldagem utilizado para a confecção de corpos de prova de solo-cimento e solo-cimento com adição de resíduo de cinza, seguiu as etapas de mistura, compactação, desmoldagem, acondicionamento, armazenagem e cura. Após a etapa de cura, corpos de prova de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura foram submetidos ao ensaio de compressão simples.

Os traços foram pesados e preparados a partir da mistura de solo e resíduo que foram acondicionados em sacos plásticos e para cada corpo de prova foi adicionado

água e o cimento, até que a mistura ficasse com aspecto mais homogêneo. A quantidade de resíduo, cimento e água foram calculadas a partir do peso seco do solo, descontando a umidade higroscópica do resíduo e do solo para obter a quantidade de água para que se atingisse a umidade objetivo de moldagem.

Após a mistura de solo, cimento, água e resíduo de cinza a porção foi dividida em camadas, separadas em recipientes para depois serem colocadas no molde cilíndrico tripartido para a compactação estática por controle de massa e volume e não por energia, conforme o ensaio de Proctor. Antes de iniciar a compactação, duas partes da mistura eram separadas e colocadas nas cápsulas para obter a umidade do corpo de prova, sendo a umidade do corpo de prova determinada pela média de dois teores de umidade.

A prensagem dos corpos de prova, ocorreu por meio compactação das camadas, após a lubrificação do cilindro com óleo mineral, buscando que cada camada atingisse o peso específico aparente seco e o teor de umidade, escarificando cuidadosamente o topo da primeira e segunda camadas.

Ao final da moldagem, os corpos de prova eram pesados, medidos (altura e diâmetro) e colocados em sacos plásticos (identificados) para iniciar o processo de cura de 14 dias.

Foram submetidos à compressão simples, corpos de prova com as seguintes características:

- Teor de umidade (h): Valores obtidos em $\pm 0,6$ percentuais. (Exemplo: para uma umidade objetivo de 12,50% foram considerados valores obtidos entre 13,10% e 11,90%). Inicialmente a umidade de moldagem era 14%, mas devido a oscilação dos valores de umidade obtidos, optou-se pela umidade objetivo de 12,50% com adição de 5 g a mais de água previsto na planilha de programa experimental, conforme as perdas de umidade observadas durante o processo de moldagem.
- Dimensões: diâmetro 50 ± 5 mm e altura 100 ± 5 mm.

A Fotografia 8 (A) e 8 (B) ilustra corpos de prova de solo-cimento e solo-cimento resíduo de cinza moldados conforme as etapas descritas anteriormente.

Fotografia 8– Corpo de prova de solo-cimento (A) e corpo de prova de solo-cimento e resíduo de cinza (B)



Fonte: Autoria própria

3.4.1 Ensaio de compressão simples Norma NBR 12025 (ABNT, 2012)

Ensaio de resistência à compressão simples têm sido utilizados para verificar resistência após estabilização do solo com o aglomerante, bem como analisar a importância das variáveis que influenciam na resistência de solos cimentados. Este ensaio é bem difundido em pesquisas que utilizam concreto (em geotecnia) por ser de baixo custo, rápido e confiável.

Em pesquisas desenvolvidas sobre a utilização de solo-cimento, sabe-se que a compactação de camadas em solos de baixa capacidade de suporte a ruptura normalmente ocorre por tração, entretanto, alguns autores citam que a resistência à tração de solos cimentados varia de 9% a 14% da resistência à compressão simples, nesta pesquisa foi utilizado a resistência à compressão simples para análise das variáveis investigadas.

O ensaio seguiu os critérios previstos na Norma NBR 12025 (ABNT, 2012), para este ensaio foi utilizado a máquina universal de ensaios com taxa de deformação de 2 mm/min e escala de visualização de até 500 kgf. A Fotografia 9 ilustra o corpo de prova submetido ao ensaio de resistência à compressão simples.

Fotografia 9– Corpo de prova submetido ao ensaio de compressão simples



Fonte: Autorial própria

Após a etapa de cura (14 dias) os corpos de prova eram colocados em banho de água, por 24 horas, até a completa saturação. Realizou-se a cura hermética, sem contato com o exterior, evitando evaporação. Posteriormente, os corpos de prova eram secos superficialmente com tecido absorvente e encaminhados ao ensaio de compressão, obtendo-se os valores de carga máxima individuais.

3.4.2 Ensaio de absorção de água Norma NBR 13555 (ABNT, 2012)

O ensaio de absorção de água foi realizado conforme as etapas descritas na Norma NBR 13555 (ABNT, 2012). Ao total foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos, sendo 6 corpos de prova de solo-cimento e 6 corpos de prova de solo-cimento-resíduo de cinza, sendo a seguinte dosagem: peso específico aparente seco de 16 kN/m^3 , teor de cimento 11% e umidade de moldagem de 12,50%. A dosagem foi escolhida a partir dos resultados obtidos do ensaio de resistência à compressão e análise dos gráficos de influência do teor de cimento e peso específico aparente seco, que mostraram uma menor dispersão nos valores de resistência à compressão.

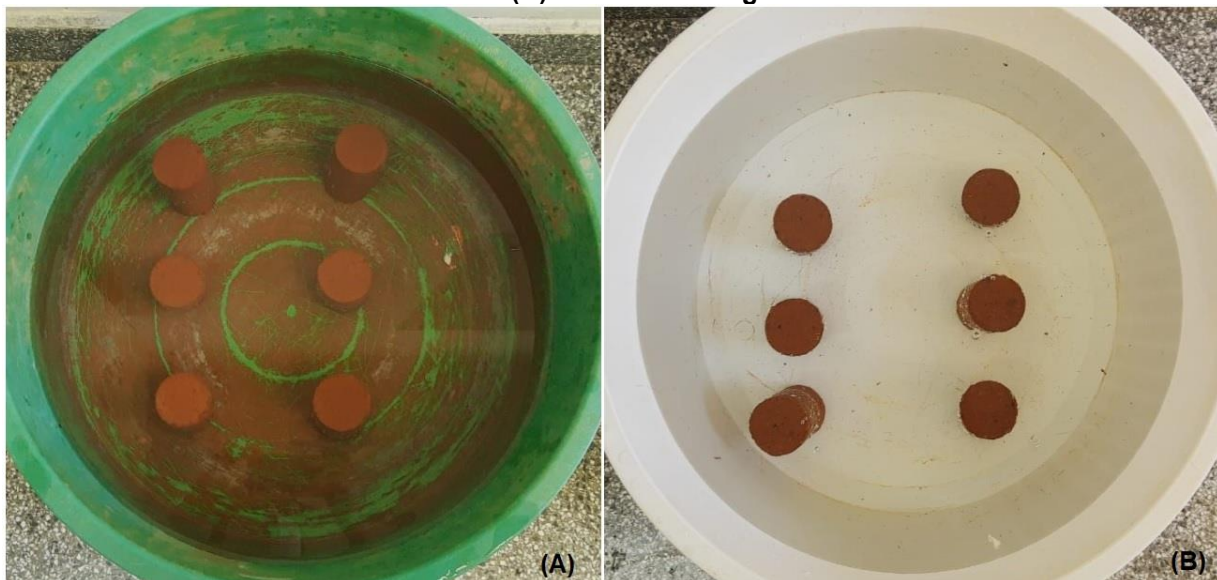
Após a moldagem os corpos de prova foram armazenados em sacos plásticos com identificação e colocados no isopor até o período de cura de 14 dias, terminado o período de cura eles foram levados à estufa até atingirem a massa constante e pesados. Os corpos de prova foram imersos em água pelo período de 24 horas (Fotografia 10) até

a completa saturação, depois foram secos com pano úmido e pesados, obtendo-se a massa do corpo de prova úmido. O valor de absorção de água foi calculado por meio da Equação 18:

$$A = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \quad (18)$$

Onde, A = absorção de água do corpo de prova em %; m_1 = massa do corpo de prova seco (g) e m_2 = massa do corpo de prova saturado (g).

Fotografia 10 – Corpo de prova de solo-cimento (A) e corpo de prova de solo-cimento-resíduo de cinza (B) em banho de água



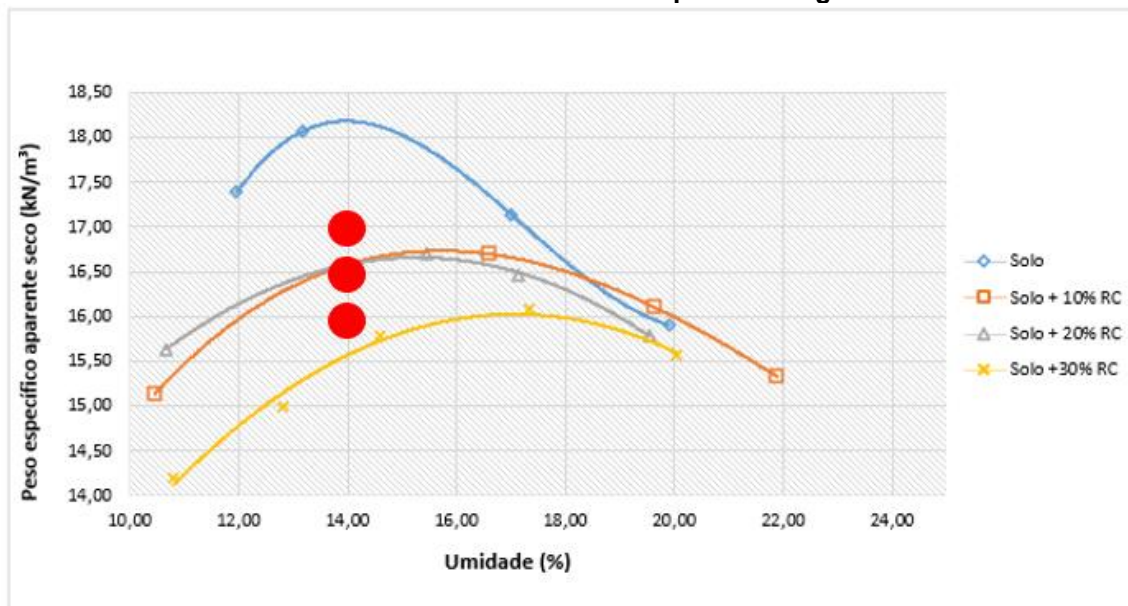
Fonte: Autoria própria

3.5 PROGRAMA DE ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

O programa de ensaios de resistência à compressão simples compreendeu a etapa fundamental deste trabalho e objetivou avaliar as variáveis: teor de cimento, teor de umidade de moldagem, relação vazios/cimento sobre a resistência mecânica de um solo cimentado e de um solo com adição de resíduo de cinza. Para avaliar o efeito de uma variável isoladamente é necessário que as outras sejam mantidas constantes.

Para isto foi elaborado um programa de experimental de moldagem dos corpos de prova, conforme a Gráfico 13. Nela pode-se observar os pontos escolhidos de moldagem para um solo da região de Ponta Grossa-PR, sem e com adição de resíduo de cinza, a partir das curvas obtidas do ensaio de compactação e a localização dos pontos de moldagem dos corpos de prova.

Gráfico 13– Pontos escolhidos para moldagem



Fonte: Autoria própria

Após a realização das moldagens iniciais, mantendo-se fixo o peso específico aparente seco de 17,00 kN/m³ e variando as umidades de moldagens entre 14% e 18%, foram realizadas moldagens em que foi variado os pesos específicos aparentes secos e fixado o valor da umidade objetiva de moldagem. Inicialmente a umidade objetivo de moldagem era 14%, mas devido a oscilação nos valores obtidos dos dados experimentais, relacionados as condições climáticas e de moldagem, a umidade objetivo de moldagem passou a ser 12,50%.

Os pontos foram escolhidos pela proximidade entre as curvas de compactação, de maneira que ficassem numa faixa de pesos específicos aparentes secos e umidade, próximos as condições ótimas das curvas, buscando estabelecer as dosagens de modo que os corpos de prova atingissem maiores valores de resistência à compressão simples. Para todas as dosagens foram utilizados teores de cimento de: 7,11 e 14%, definidos a partir de trabalhos encontrados na literatura que citam experimentos voltados a aplicação de solo-cimento.

Após a realização dos ensaios previstos no planejamento experimental, notou-se a dispersão nos resultados obtidos e para a análise da influência da relação vazios/cimento seriam necessários mais corpos de prova, então adotou-se a moldagem em triplicata para uma maior confiabilidade nos resultados, totalizando 55 corpos de prova.

3.5.1 Dosagem das misturas

3.5.1.1 Dosagem da mistura de solo-cimento

A partir do ensaio de compactação foi possível definir as variáveis peso específico e umidade para elaboração do programa de moldagem e dosagem dos corpos de prova. A fim de obter a comparação dos resultados e analisar os efeitos da adição de resíduo de cinza na mistura, foram moldados corpos de prova de solo-cimento e posteriormente de solo-cimento-resíduo de cinza. Inicialmente, realizou-se o número de ensaios a partir do planejamento experimental, porém na literatura encontram-se trabalhos citando a realização de ensaios em triplicata.

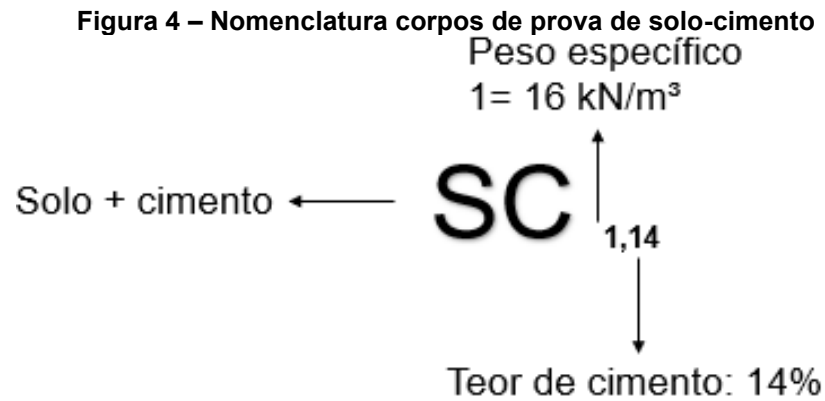
Após a definição da umidade objetivo foram escolhidas as composições, com três teores de cimento e três pesos específicos aparentes secos (γ_d) próximos ao γ_d máximo de cada curva, conforme a Tabela 3:

Tabela 3– Dosagem solo-cimento

	1	2	3
Peso específico aparente seco (γ_d) em kN/m ³ :	16	16,50	17
Teor de cimento em (%)	7	11	14
Umidade objetivo de moldagem (%)		12,50	

Fonte: Autoria própria

Após a definição das características de dosagem do solo-cimento, foi possível a combinação de três corpos de prova por mistura, e então eles foram moldados e submetidos ao ensaio de compressão simples. Para cada corpo de prova foi definido uma nomenclatura, a qual indica as variáveis peso específico aparente seco (γ_d) e teor de cimento, conforme a Figura 4:



Fonte: Autorial própria

A partir da definição da nomenclatura, foi estabelecido a combinação das misturas, mantendo o teor de umidade e variando o peso específico aparente seco e o teor de cimento. Foram definidas nove combinações e um total de 27 corpos de prova, conforme a Tabela 4:

Tabela 4 – Composição mistura de solo-cimento

Denominação do corpo de prova	% solo	% cimento	Y _d (kN/m ³)
SC 1,7	93,00	7,00	16,00
SC 1,11	89,00	11,00	16,00
SC 1,14	86,00	14,00	16,00
SC 2,7	93,00	7,00	16,50
SC 2,11	89,00	11,00	16,50
SC 2,14	86,00	14,00	16,50
SC 3,7	93,00	7,00	17,00
SC 3,11	89,00	11,00	17,00
SC 3,14	86,00	14,00	17,00

Fonte: Autorial própria

3.5.1.2 Dosagem da mistura de solo-cimento-resíduo de cinza

Inicialmente, o procedimento adotado foi a definição da umidade objetivo, próxima as umidades ótimas obtidas do ensaio de compactação, por meio da moldagem e ensaio de compressão simples, utilizando um teor máximo de cimento, um peso específico aparente seco (γ_d) e 20% de resíduo de cinza. Após a definição da umidade objetivo de moldagem, foram definidas as composições com três teores de cimento, três pesos específicos aparentes secos e porcentagem máxima de resíduo de cinza, a partir dos resultados do ensaio de compactação, conforme a Tabela 5:

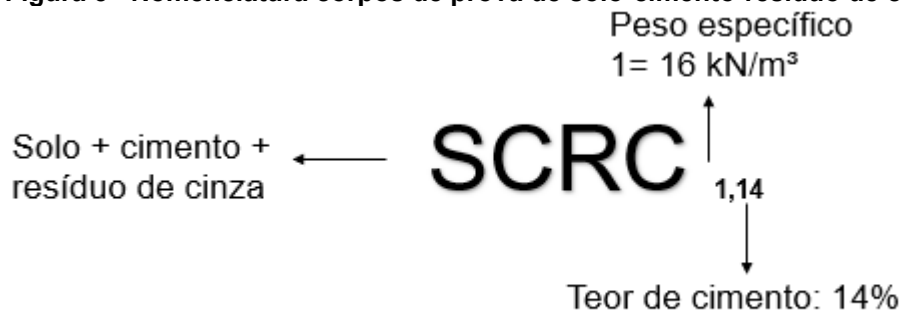
Tabela 5 – Dosagem solo-cimento-resíduo de cinza

	1	2	3
Peso específico aparente seco (γ_d) em kN/m^3 :	16	16,50	17
Teor de cimento em (%)	7	11	14
Teor de resíduo de cinza (%)		30	
Umidade objetivo de moldagem (%)		12,50	

Fonte: Autoria própria

Após a definição das características de dosagem do solo-cimento, foi possível a combinação de três corpos de prova por mistura, e então eles foram moldados e submetidos ao ensaio de compressão simples. Para cada corpo de prova foi definido uma nomenclatura, a qual indica as variáveis peso específico aparente seco (γ_d) e teor de cimento, conforme a Figura 5:

Figura 5– Nomenclatura corpos de prova de solo-cimento-resíduo de cinza



Fonte: Autoria própria

A partir da definição da nomenclatura, foi estabelecido a combinação das misturas, mantendo o teor de umidade e a porcentagem de resíduo de cinza, variando o peso específico aparente seco e o teor de cimento. Foram definidas nove combinações e um total de 27 corpos de prova, conforme a Tabela 6:

Tabela 6– Dosagem solo-cimento-resíduo de cinza

Denominação do corpo de prova	% solo	% cimento	% resíduo de cinza	Yd (kN/m ³)
SCRC 1,7	63,00	7,00	30,00	16,00
SCRC 1,11	59,00	11,00	30,00	16,00
SCRC 1,14	56,00	14,00	30,00	16,00
SCRC 2,7	63,00	7,00	30,00	16,50
SCRC 2,11	59,00	11,00	30,00	16,50
SCRC 2,14	56,00	14,00	30,00	16,50
SCRC 3,7	63,00	7,00	30,00	17,00
SCRC 3,11	59,00	11,00	30,00	17,00
SCRC 3,14	56,00	14,00	30,00	17,00

Fonte: Autoria própria

3.5.2 Método de avaliação da influência do teor de cimento e do peso específico aparente seco

A avaliação da influência do teor de cimento sobre a resistência à compressão simples foi feita por meio dos corpos de prova de solo-cimento e solo-cimento-resíduo de cinza. Para cada corpo de prova foram utilizados três teores de cimento, mantendo-se o peso específico aparente seco e o mesmo teor de umidade, apenas variando a quantidade de cimento adicionada.

A avaliação da influência do peso específico foi feita para todos os corpos de prova de solo-cimento e solo-cimento-resíduo de cinza, com a mesma quantidade de cimento, mesmo teor de umidade e variando o peso específico aparente seco.

3.5.3 Método de avaliação da relação vazios/cimento

Neste trabalho foi utilizada, a definição da relação vazios/cimento proposta por Larnach (1960) conforme a Equação 19:

$$\frac{Vv}{Vc} = \frac{\text{Volume absoluto de vazios (ar+água)}}{\text{Volume de cimento}} \quad (19)$$

Tanto para os corpos de prova de solo-cimento quanto para os corpos de prova de solo-cimento-resíduo de cinza foram utilizados a avaliação desta relação.

3.6 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para avaliar os efeitos dos parâmetros teor de cimento e peso específico aparente seco sobre a resistência à compressão simples, realizou-se um planejamento

experimental 2^2 , onde 2 representa o número de níveis utilizados e 2 os parâmetros utilizados. O número de experimentos realizados é o resultado de 2^2 , ou seja, 4 experimentos. Para uma análise mais qualitativa dos dados, buscou-se o delineamento experimental com repetição do ponto central, totalizando 7 experimentos com 3 repetições, realizando-se a moldagem em duplicata das amostras, totalizando 14 corpos de prova de solo-cimento. A Tabela 7 apresenta as características para cada tratamento, sendo o sinal (+) a representação superior para cada parâmetro, o sinal (-) o nível inferior e (0) o ponto central.

Tabela 7 – Matriz do planejamento experimental 2^2 com três pontos centrais

Ensaio	Peso específico aparente seco (γ_d) em kN/m^3	Teor de cimento em (%)
1	+	+
2	+	-
3	-	+
4	-	-
5	0	0
6	0	0
7	0	0

Fonte: Autoria própria

Os níveis escolhidos para a variável peso específico aparente seco foram 16, 16,50 e 17 (nível inferior, central e superior), a definição dos níveis foi feita a partir do ensaio de compactação.

Para os teores de cimento os níveis escolhidos foram 7, 11 e 14% (nível inferior, central e superior), a definição dos níveis foi escolhida a partir de trabalhos encontrados na literatura. A ordem de realização dos ensaios foi estabelecida de forma aleatória, conforme a Tabela 8. Os tratamentos 5, 6 e 7 estão com a letra C entre parênteses, representando que os mesmos são os pontos centrais do planejamento.

Tabela 8 - Ordem dos ensaios do planejamento experimental 2^2 com três pontos centrais (continua)

Ensaio	Tratamento	Peso específico seco (γ_d) em kN/m^3	Teor de cimento em (%)
1	1	17	14
2	4	17	7

Fonte: Autoria própria

Tabela 8 - Ordem dos ensaios do planejamento experimental 2² com três pontos centrais (conclusão).

Ensaio	Tratamento	Peso específico seco (γ _d) em kN/m ³	Teor de cimento em (%)
3	5 (C)	16	14
4	3	16	7
5	6 (C)	16,5	11
6	2	16,5	11
7	7 (C)	16,5	11

Fonte: Autoria própria

O software STATISTICA for *Windows 10* foi utilizado para obtenção dos dados estatísticos dos experimentos, a partir da tabela de Análise de Variância (ANOVA) e o diagrama de Pareto.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 CONSISTÊNCIA DOS SOLOS

4.1.1 Determinação da umidade higroscópica do solo e resíduo de cinza

Para determinação da umidade higroscópica do solo e resíduo de cinza, foram separadas 3 amostras de cada e determinadas conforme a Norma NBR 6457 (ABNT, 2016). Os valores de umidade higroscópica foram utilizados para o ensaio de granulometria, peso específico real, consistência dos solos e moldagem dos corpos de prova. Os resultados encontrados para o solo e resíduo de cinza, foram respectivamente 2,83% e 1,85% e estão descritos nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9– Umidade do solo pelo método da estufa

Cápsula nº	Peso da cápsula (gf)	Peso da cáp. + solo úmido (gf)	Peso da cáp. + solo seco (gf)	Peso da água (gf)	Peso solo seco (gf)	Teor de umidade (%)	Umidade média (%)
68	14,30	21,39	21,21	0,18	6,91	2,60	2,83
102	16,64	24,88	24,66	0,22	8,02	2,74	
124	12,53	20,10	19,87	0,23	7,34	3,13	

Fonte: Autoria própria

Tabela 10– Umidade do resíduo de cinza pelo método da estufa

Cápsula nº	Peso da cápsula (gf)	Peso da cáp. + solo úmido (gf)	Peso da cáp. + solo seco (gf)	Peso da água (gf)	Peso solo seco (gf)	Teor de umidade (%)	Umidade média (%)
30	19,72	28,72	28,50	0,22	8,56	2,51	1,85
117	17,05	26,10	25,94	0,16	8,73	1,80	
147	16,57	25,59	25,48	0,11	8,80	1,23	

Fonte: Autoria própria

4.1.2. Limite de liquidez do solo

O ensaio de limite de liquidez do solo foi executado conforme a Norma NBR 6459 (ABNT, 2016). Posteriormente é calculado o teor de umidade em que o solo se fecha aos 25 golpes e traçado o gráfico relacionando o teor de umidade e o número de golpes (Gráfico 14). O resultado final deve ser expresso pelo valor inteiro mais próximo. Os resultados encontram-se na Tabela 11.

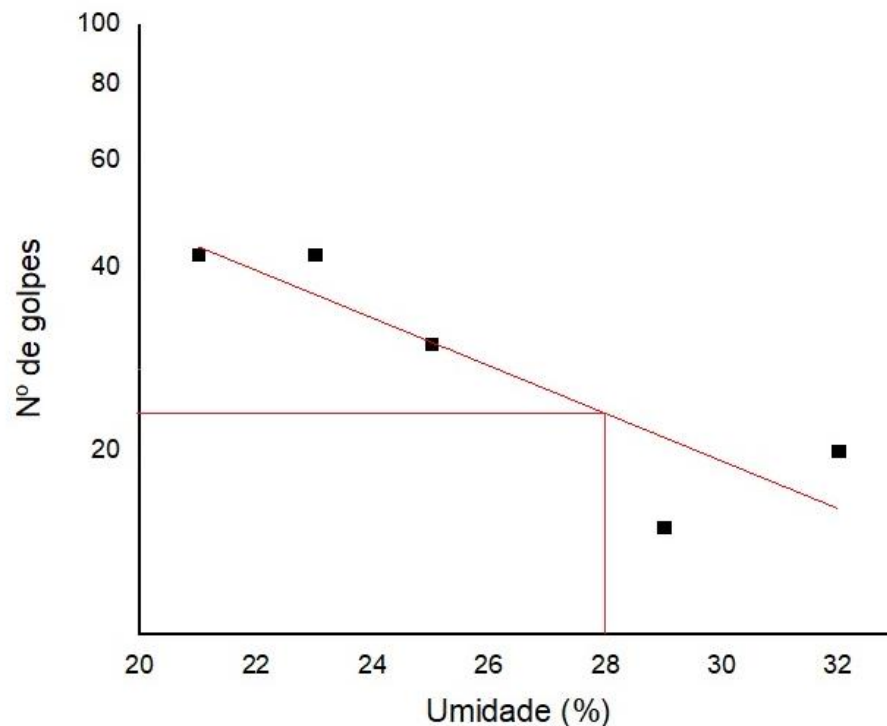
Tabela 11 – Limite de liquidez do solo

Nº da cápsula	Peso da cápsula (gf)	Cápsula + solo úmido (gf)	Cápsula + solo seco (gf)	Umidade (%)	Número de golpes	Ponto
162	18,49	27,48	25,90	21,32	42	1
155	17,60	27,51	25,63	23,41	42	2
144	19,48	28,63	26,77	25,51	42	3
170	16,99	25,02	23,07	32,07	20	4
193	16,74	27,87	25,35	29,27	15	5

Fonte: Autoria própria

Pelo Gráfico 14 é possível observar que a umidade presente no solo aos 25 golpes é 28% que é o valor do limite de liquidez do solo.

Gráfico 14– Limite de liquidez do solo



Fonte: Autoria própria

4.1.3 Limite de plasticidade do solo

O ensaio de limite de plasticidade do solo, foi executado conforme a Norma NBR 7180 (ABNT, 2016) sendo o valor do limite de plasticidade obtido por meio da média do teor de umidade presente na porção de solo em forma de cilindro e o mesmo se fragmentar. A norma prevê pelo menos três determinações, considerado satisfatório o resultado que não diferir em mais de 5% do valor da média. Inicialmente foram feitas cinco repetições do ensaio e duas amostras foram desconsideradas, por estarem

distantes da média. O resultado do limite de plasticidade para o solo foi 22% e está descrito na Tabela 12.

Tabela 12– Limite de plasticidade do solo

Nº da cápsula	Peso da cápsula (gf)	Cápsula + solo úmido (gf)	Cápsula + solo seco (gf)	Umidade (%)	Limite de Plasticidade (%)
90	14,18	15,92	15,60	22,54	22
100	14,55	16,35	16,02	22,45	
113	16,57	19,16	18,70	21,60	

Fonte: Autoria própria

A partir dos resultados adquiridos dos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade, é calculado o índice de plasticidade. O índice de plasticidade encontrado foi 6%, sendo o solo classificado conforme Fiori (2015) como levemente plástico ($1 < IP < 7$).

Verificou-se que os valores de limite de liquidez e índice de plasticidade estiveram abaixo dos valores máximos de 45% e 18% previstos nas normas NBR 10833 (ABNT, 2012) e NBR 13553 (ABNT, 2012) referentes a tijolo de solo-cimento e parede monolítica de solo-cimento, respectivamente.

Considerando a natureza granular do resíduo de cinza, não foram realizados os ensaios de limite de plasticidade e limite de liquidez.

4.2 PESO ESPECÍFICO REAL DOS GRÃOS NORMA ME 093 (DNER, 1994)

O ensaio foi executado seguindo as recomendações da Norma ME 093 (DNER, 1994). A norma prevê no mínimo duas determinações por amostra, sendo válido o resultado da média de duas amostras, desde que os valores entre si não difiram em $0,009 \text{ g/cm}^3$ ou $0,009 \text{ gf/cm}^3$, foram feitas três determinações para as amostras de solo e resíduo de cinza. Os resultados encontrados para o solo e resíduo de cinza, foram respectivamente $2,622 \text{ gf/cm}^3$ e $2,514 \text{ gf/cm}^3$ e são apresentados nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 13 – Peso específico real dos grãos de solo

Picnômetro nº	Peso do picn. vazio e seco (P1) (gf)	Peso do picn. + solo (P2) (gf)	Peso do picn. + solo + água (P3) (gf)	Peso do picn. + água (P4) (gf)	Temperatura da água destilada (°C)	Fator de correção k ₂₀	Peso específico real do solo γ_s (gf/cm ³)
5	34,94	44,96	88,67	82,47	18	1,0004	2,6241
6	29,93	43,86	92,50	83,89	18	1,0004	2,6195 2,622

Fonte: Autoria própria

O resultado para uma amostra de solo foi desconsiderado pois diferiu 0,50 gf/cm³ da amostra 5 e 0,51 gf/cm³ da amostra 6. Para o resíduo de cinza o mesmo foi observado, e uma amostra diferiu 0,059 gf/cm³ da amostra 1 e 0,054 gf/cm³ da amostra 3. Os resultados obtidos para o ensaio do resíduo de cinza estão descritos na Tabela 14.

Tabela 14– Peso específico real do resíduo de cinza

Picnômetro nº	Peso do picn. vazio e seco (P1) (gf)	Peso do picn. + solo (P2) (gf)	Peso do picn. + solo + água (P3) (gf)	Peso do picn. + água (P4) (gf)	Temperatura da água destilada (°C)	Fator de correção k ₂₀	Peso específico real do solo γ_s (gf/cm ³)
5	38,59	49,57	104,69	98,08	22	0,9996	2,512
6	29,62	40,60	92,80	86,18	22	0,9996	2,517 2,514

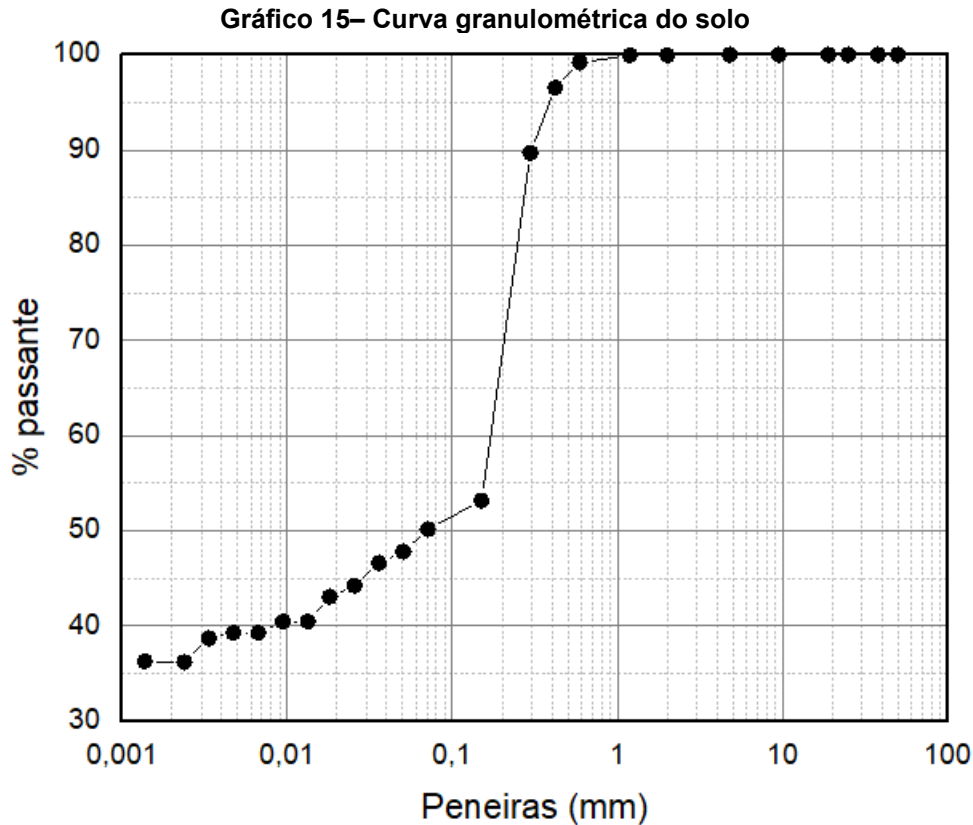
Fonte: Autoria própria

4.3 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica foi feita por peneiramento e sedimentação conforme a Norma NBR 7181 (ABNT, 2016). com o objetivo de determinar pela dimensão das partículas, a distribuição do solo e do resíduo. Conforme Pinto (2006):

O objetivo da classificação de solos, sob o ponto de vista da engenharia, é de poder estimar o possível comportamento do solo ou, pelo menos, orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um problema (PINTO, 2006, p. 63).

O autor recomenda para a classificação dos solos, o sistema de classificação unificada e o sistema rodoviário, utilizada para classificação do solo e do resíduo em análise. O Gráfico 15 apresenta a curva granulométrica do solo.



O solo é formado por 52,13% de areia, 11,59% de silte e 36,27% de argila, sendo classificado segundo a *AASHTO* como argila de baixa compressibilidade e granulação fina. Pelo sistema rodoviário de classificação o solo se enquadra em A-4. Segundo a classificação do *SUCS*, o solo se enquadra como uma argila de baixa compressibilidade.

Segundo a Norma NBR 6502 (ABNT, 1995) o solo é composto por 39,54% de areia fina, 9,50% de areia média e 0,73% de areia grossa. As partículas de argila e silte representam 36,27% e 13,96%, respectivamente.

Conforme o *IPCA* apud Santiago (2001) a composição do solo para a mistura de solo-cimento deve conter 60-80% de areia, 10-20% de silte e 5-10% de argila, a porcentagem de areia ficou abaixo do valor recomendado, a porcentagem de silte ficou na faixa recomendada e a fração argila foi superior ao limite máximo. Conforme Santiago (2001) solos com maiores composições de silte e argila necessitam de maiores teores de cimento para que ocorra a estabilização do solo com o cimento e a mistura obtenha uma determinada resistência. Lima (2010) cita que solos classificados segundo a *AASHTO* A-4 como argila e com alta concentração de silte, são solos que podem ser utilizados para composição de sub-bases de pavimentos.

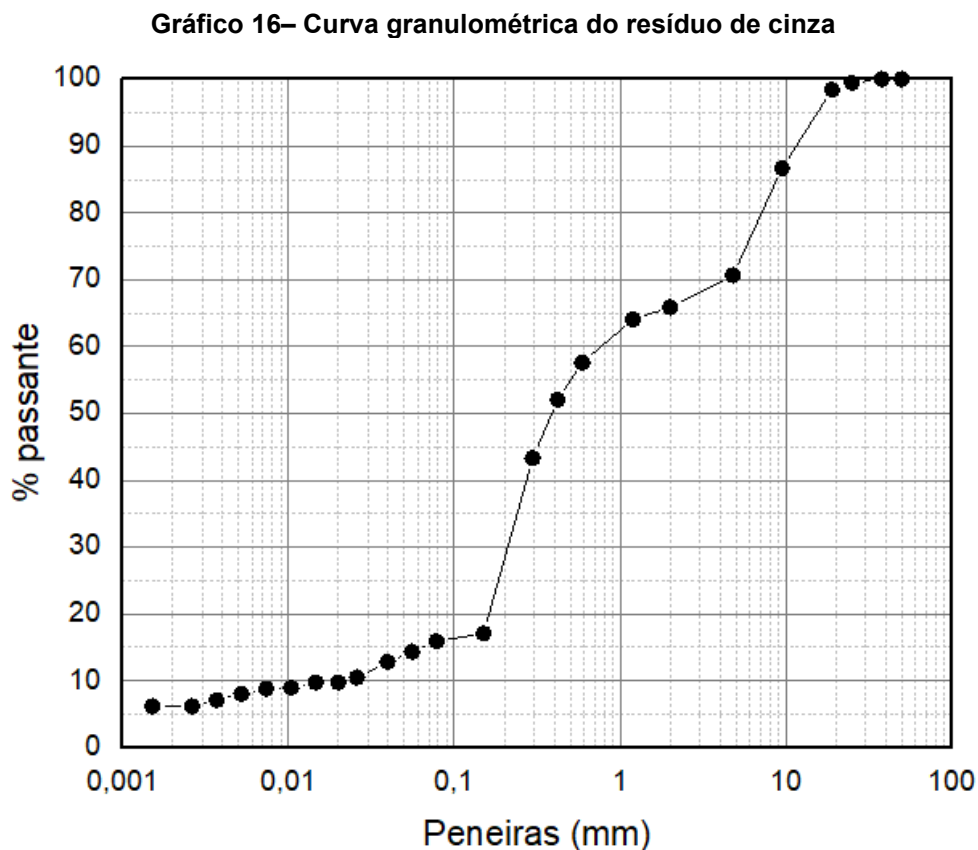
As porcentagens que passam nas peneiras nº 200 (0,075 mm) e nº 4 (4,8 mm) foram 50,17% e 100%, sendo que a fração passada na peneira nº 200 encontra-se 1%

acima do valor recomendado e a porcentagem que passa na peneira nº 4 está de acordo com as especificações da Norma NBR 10833 (ABNT, 2012).

O resíduo de cinza apresenta em sua composição 34,14% de pedregulho, 51,51% de areia, 8,18% de silte e 6,17% de argila, sendo classificado como areia grossa classe A1-b. Segundo a classificação do *SUCS*, o resíduo se enquadra em uma areia bem graduada.

Segundo a Norma NBR 6502 (ABNT, 1995) o resíduo de cinza é composto por 34,14% de pedregulho, sendo 4,82% pedregulho fino, 27,77% pedregulho médio e 1,55% pedregulho grosso. A composição de partículas de areia representa 27,39% de areia fina, 14,31% de areia média e 8,27% areia grossa, silte 9,72% e argila 6,17%. O resíduo tem seu diâmetro efetivo de 0,02586 mm e coeficiente de uniformidade igual a 46.

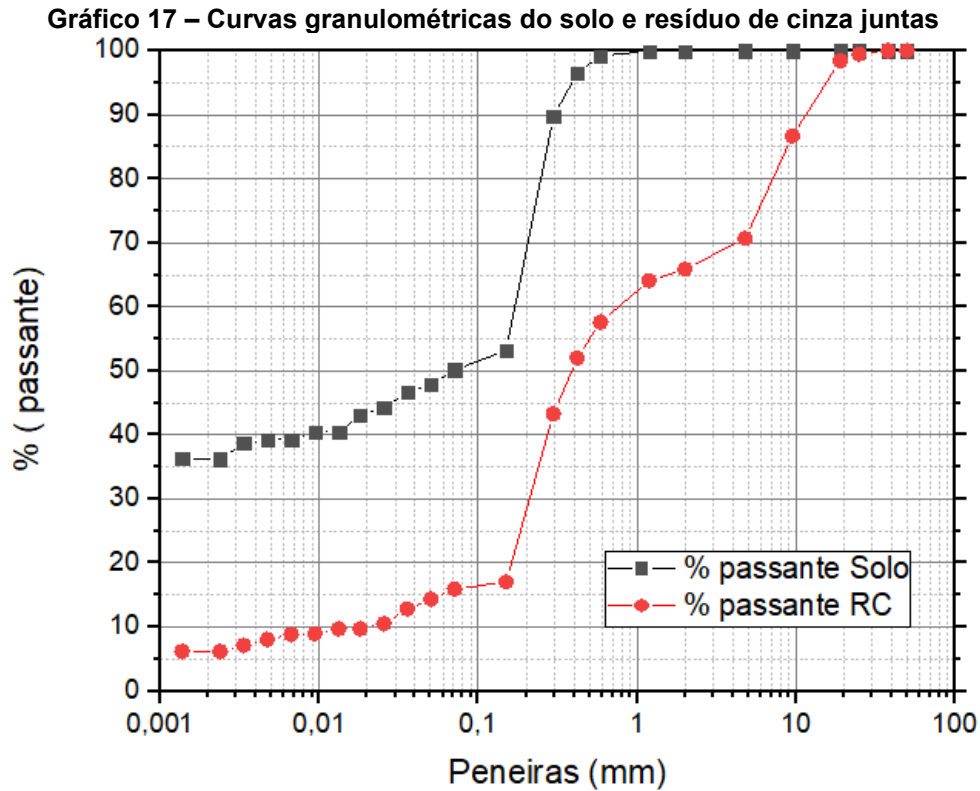
O Gráfico 16 ilustra a curva granulométrica do resíduo.



Fonte: Autoria própria

Pelo Gráfico 17, nota-se que o resíduo de cinza possui uma característica granular mais arenosa com presença de pedregulhos em sua composição, com grãos de dimensão maiores, o que pode ser satisfatório, visto que o solo tem composição granular

mais fina. Devido a esse fato, optou-se pela não correção do solo, buscando utilizar um solo sem alterar suas características originais, em que a correção do solo ocorresse a partir da adição do resíduo de cinza à mistura.

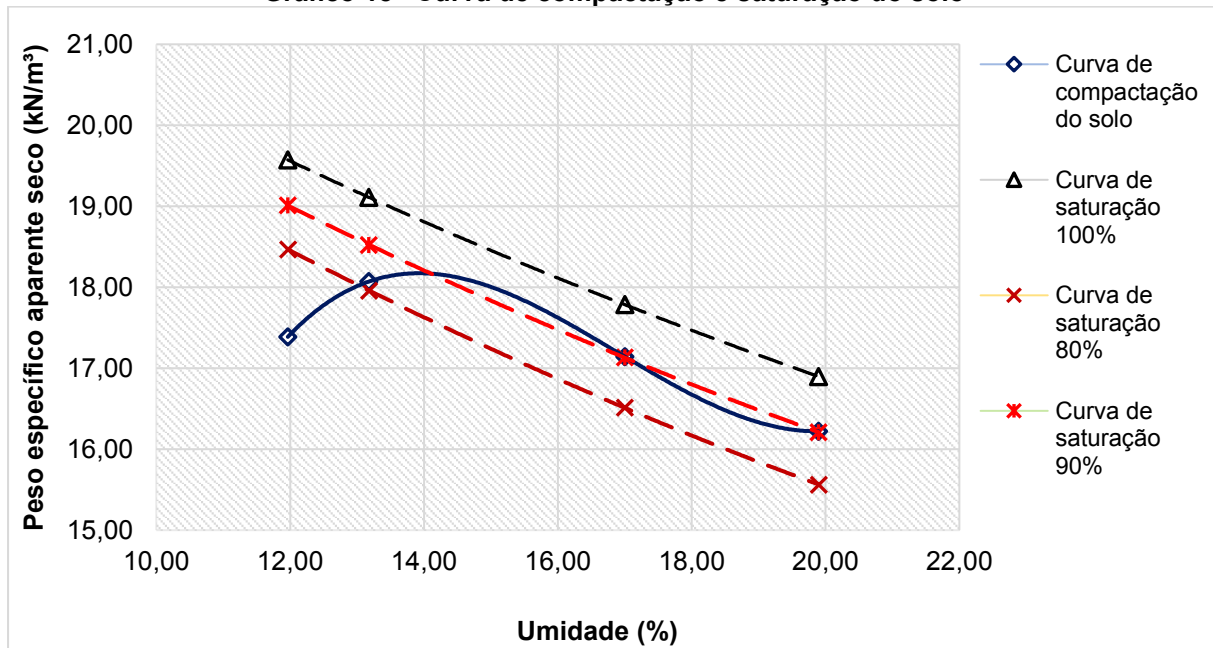


4.4 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

O ensaio foi realizado conforme a Norma NBR 7182 (ABNT, 2016) buscando obter o valor peso específico aparente seco e o valor de umidade ótima para o solo e para as composições do resíduo de 10,20 e 30%, a partir dos resultados, foram definidos os pontos de moldagem dos corpos de prova.

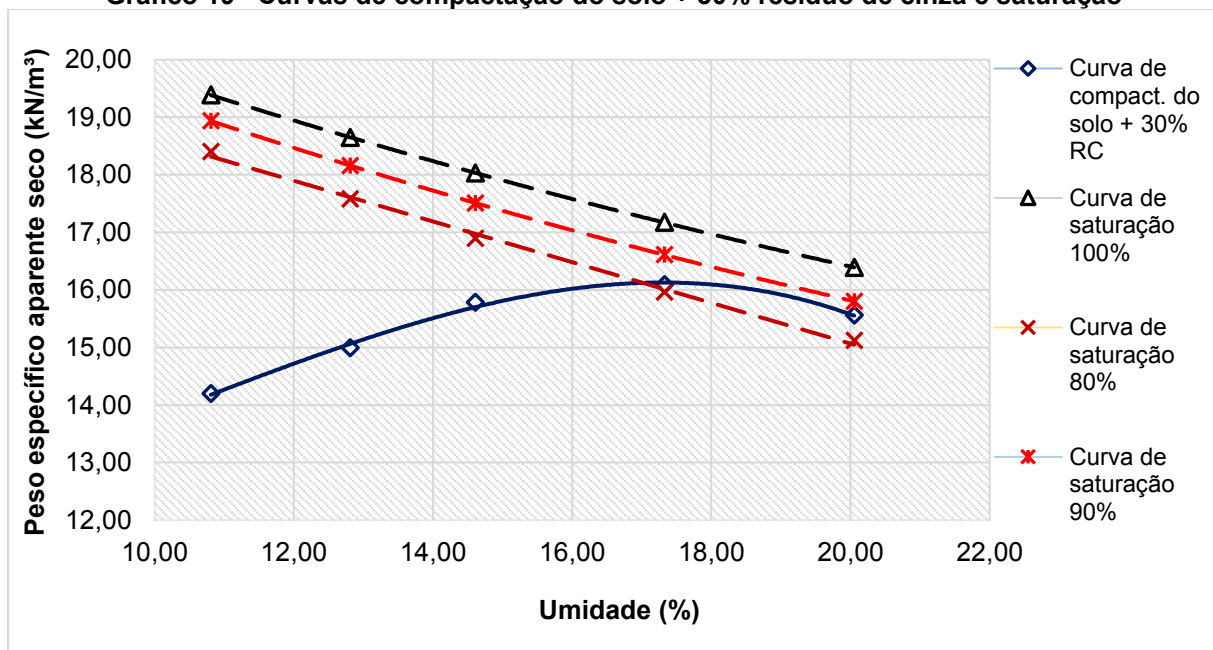
As curvas de saturação (80, 90 e 100%) do solo e 30% resíduo foram traçadas (Gráficos 18 e 19). Segundo Pinto (2006) a curva de saturação corresponde ao eixo em que o peso específico aparente seco e umidade se encontram quando o solo está úmido, o mesmo autor cita que a curva de compactação deve se localizar abaixo da curva de saturação, na compactação do solo a curva ficou acima das curvas de saturação de 80% e 90%. Para a compactação do solo mais a adição de 30% de resíduo observa-se que dois pontos da curva de compactação, os pontos localizados no ramo úmido ficaram entre as curvas de saturação de 80% e 90%.

Gráfico 18– Curva de compactação e saturação do solo



Fonte: Autoria própria

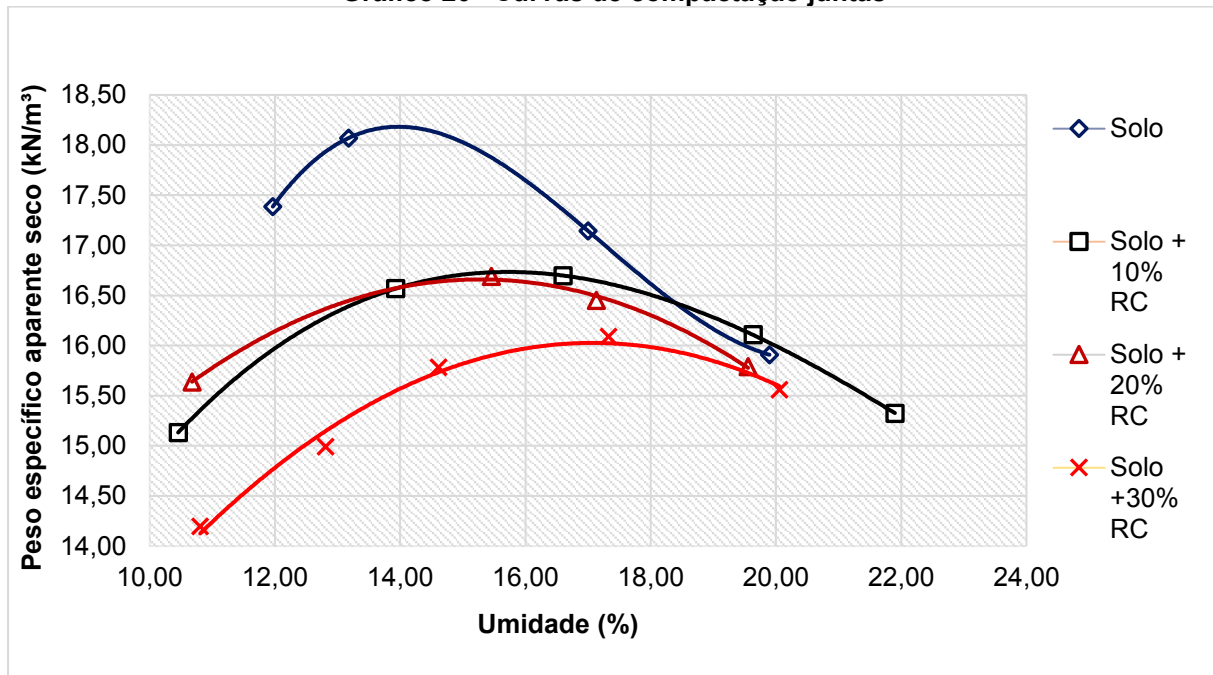
Gráfico 19– Curvas de compactação do solo + 30% resíduo de cinza e saturação



Fonte: Autoria própria

No Gráfico 20, é possível observar que à medida que o resíduo foi adicionado ao solo o peso específico aparente seco diminuiu e a umidade ótima diminuiu para as adições de 10 e 20%, com acréscimo 1,80% para a adição de 30%. A partir do gráfico foram definidos os pontos de moldagem dos corpos de prova.

Gráfico 20– Curvas de compactação juntas



Fonte: Autoria própria

Segundo Pinto (2006) e Lima (2013) os valores de peso específico aparente seco e umidade obtidos do ensaio de Proctor Normal não devem ser considerados parâmetros físicos do solo, pois dependem da energia de compactação aplicada, porcentagem de umidade da amostra e textura.

Pinto (2006) explica que quanto maior a energia de compactação, maior os valores obtidos de peso específico seco e menor os valores de umidade ótima, a mesma tendência é observada quando a umidade se encontra abaixo da umidade ótima, entretanto, quando a umidade está acima da umidade ótima é necessário maior empenho na compactação para eliminar o volume de espaços vazios.

Conforme Lopes (2002) quando a curva de compactação do solo é mais achatada a distribuição das partículas do solo é mais homogênea, a porosidade é mais alta e sua umidade é mais baixa, como pode ser observado na curva de compactação do solo com adição de 10,20 e 30% de resíduo de cinza. Para as curvas com tendência mais pontiaguda, a distribuição das partículas de solo é mais desuniforme, assim como a curva de compactação do solo.

4.5 TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA

Os resultados do ensaio para as amostras de solo, estão descritos na Tabela 15.

Tabela 15– Teor de matéria orgânica do solo

Solo	% de matéria orgânica
Amostra de solo 1	3,1959
Amostra de solo 2	2,5197
Média	2,8578

Fonte: Autoria própria

A porcentagem recomendada de matéria orgânica nas amostras de solo e de resíduo de cinza, é entre 2 e 5%, de modo que o teor de matéria orgânica não comprometa as reações de hidratação do cimento (SOUZA, 2019). Para o resíduo de cinza, os teores obtidos ficaram próximos a 2%, conforme a Tabela 16.

Tabela 16 – Teor de matéria orgânica do resíduo de cinza

Resíduo de cinza	% de matéria orgânica
Amostra de resíduo de cinza 1	2,2947
Amostra de resíduo de cinza 2	1,7451
Média	2,0199

Fonte: Autoria própria

Souza (2019) obteve um teor de matéria orgânica de 4,9% para um solo com grande porcentagem de argilominerais. Sabe-se, que altos teores de matéria orgânica podem interferir na qualidade da mistura de solo-cimento, mas segundo o autor, o seu resultado proporcionou uma estabilização bem-sucedida.

Após realizar o ensaio para a determinação de matéria orgânica de acordo com a Norma NBR NM 49 (ABNT, 2001) e avaliou-se a quantidade de matéria orgânica, comparando a coloração do filtrado. Obteve-se como resultado, uma coloração do filtrado de solo e da cinza mais escura que a solução padrão, indicando a presença de matéria orgânica (Fotografias 11 e 12).

Fotografia 11 – Comparação de coloração entre os filtrados de solo



Fonte: Autoria própria

Pinto (2016) utilizou o mesmo procedimento e verificou que suas amostras de solo não continham matéria orgânica.

Fotografia 12– Comparação de coloração entre os filtrados de solo



Fonte: Autoria própria

4.6 RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES PARA DEFINIÇÃO DA UMIDADE OBJETIVO DE MOLDAGEM E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

4.6.1 Resistência à compressão simples para definição da umidade objetivo de moldagem

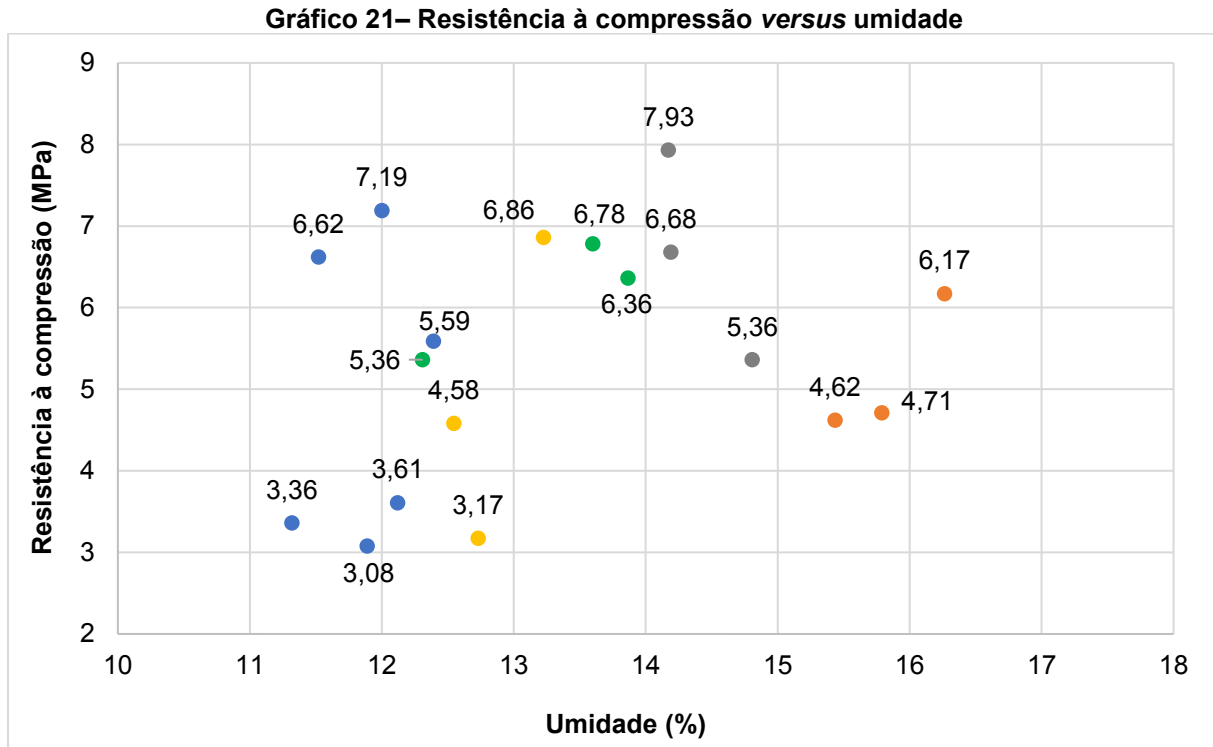
Inicialmente, foram moldados 19 corpos de prova em triplicata para fixar o valor de umidade objetivo de moldagem, utilizando a dosagem de 14% de cimento, 20% de resíduo de cinza, variando os teores de umidade: 14%, 15%, 16%, 17% e 18% e fixando o valor de peso específico aparente seco (Y_d) em 17,00 kN/m³. A Tabela 17 apresenta os resultados de tensão máxima obtidos para cada corpo de prova.

Tabela 17– Valores de tensão máximas obtidos para cada corpo de prova

Denominação do corpo de prova	Tensão máxima (MPa)	Umidade obtido de moldagem (%)
SCRC 3,14-1	3,08	11,89
SCRC 3,14-2	3,61	12,12
SCRC 3,14-3	3,37	11,32
SCRC 3,14-4	6,62	11,52
SCRC 3,14-5	7,19	12,00
SCRC 3,14-6	5,59	12,39
SCRC 3,15-2	6,86	13,23
SCRC 3,15-3	4,58	12,55
SCRC 3,15-4	3,17	12,73
SCRC 3,16-1	5,36	12,31
SCRC 3,16-2	6,36	13,87
SCRC 3,16-3	6,78	13,60
SCRC 3,17-1	6,68	14,19
SCRC 3,17-2	7,93	14,17
SCRC 3,17-3	5,36	14,81
SCRC 3,18-1	4,71	15,79
SCRC 3,18-2	4,29	15,44
SCRC 3,18-3	6,17	16,26

Fonte: Autoria própria

Analisando os valores obtidos de tensão máxima para cada corpo de prova, e considerando a umidade objetivo de moldagem foi traçado um gráfico relacionando a umidade objetivo e a resistência à compressão máxima, para estabelecer a umidade de moldagem para prosseguir com as etapas seguintes.



Fonte: Autoria própria

A partir dos resultados da tabela e do gráfico, nota-se uma dispersão nos valores obtidos das umidades de moldagem, os quais aparentam não ter uma influência definida sobre os valores obtidos de resistência à compressão simples, possibilitando a escolha de um valor de umidade para as demais moldagens do programa experimental.

O teor de umidade escolhido foi 14% (pontos azuis), pois foi onde teve menos dispersão nos valores de umidade atingido de moldagem, entre uma réplica e outra. Dentre os valores estabelecidos de umidade e as moldagens iniciais, não foi possível estabelecer uma correlação, adotando-se um valor de umidade mais próximo a umidade ótima obtida do ensaio de compactação.

4.6.2 Planejamento experimental

Após a etapa de definição da umidade objetivo de moldagem, escolheu-se os pontos de moldagem de corpos de prova de solo-cimento de acordo com o planejamento experimental. Os resultados obtidos da resistência à compressão simples para os 14 corpos de prova de solo-cimento, foram utilizados para verificação das variáveis mais significativas, pois para as análises de influência do teor de cimento, peso específico e relação vazios/cimento, foi necessário mais pontos de moldagem. A Tabela 18 apresenta

os resultados de resistência à compressão simples para os corpos de prova de solo-cimento.

Tabela 18– Valores de tensão máximas obtidos para os corpos de prova de solo-cimento

Denominação do corpo de prova	Tensão máxima (MPa)
SC 3,14-1	1,07
SC 3,14-2	1,38
SC 3,7-1	2,29
SC 3,7-2	2,90
SC 1,14-1	2,52
SC 1,14-2	0,96
SC 1,7-1	0,16
SC 1,7-2	1,09
SC 2,11-1	1,29
SC 2,11-2	0,18
SC 2,11-3	0,85
SC 2,11-4	1,42
SC 2,11-5	0,47
SC 2,11-6	0,78

Fonte: Autoria própria

Por meio dos resultados obtidos do ensaio de compressão simples para os corpos de prova de solo-cimento (Tabela 18) foi possível obter a Tabela Anova (19) para análise da significância dos fatores que tiveram maior influência sobre a variável resposta (resistência à compressão simples). Considerando um valor $p < 0,05$ em um intervalo de confiança de 95% e um coeficiente de correlação R^2 0,46814. A variável peso específico aparente seco foi a variável que apresentou um efeito significativo sobre a resposta.

Tabela 19– ANOVA do planejamento experimental para a resistência à compressão simples de corpos de prova de solo-cimento

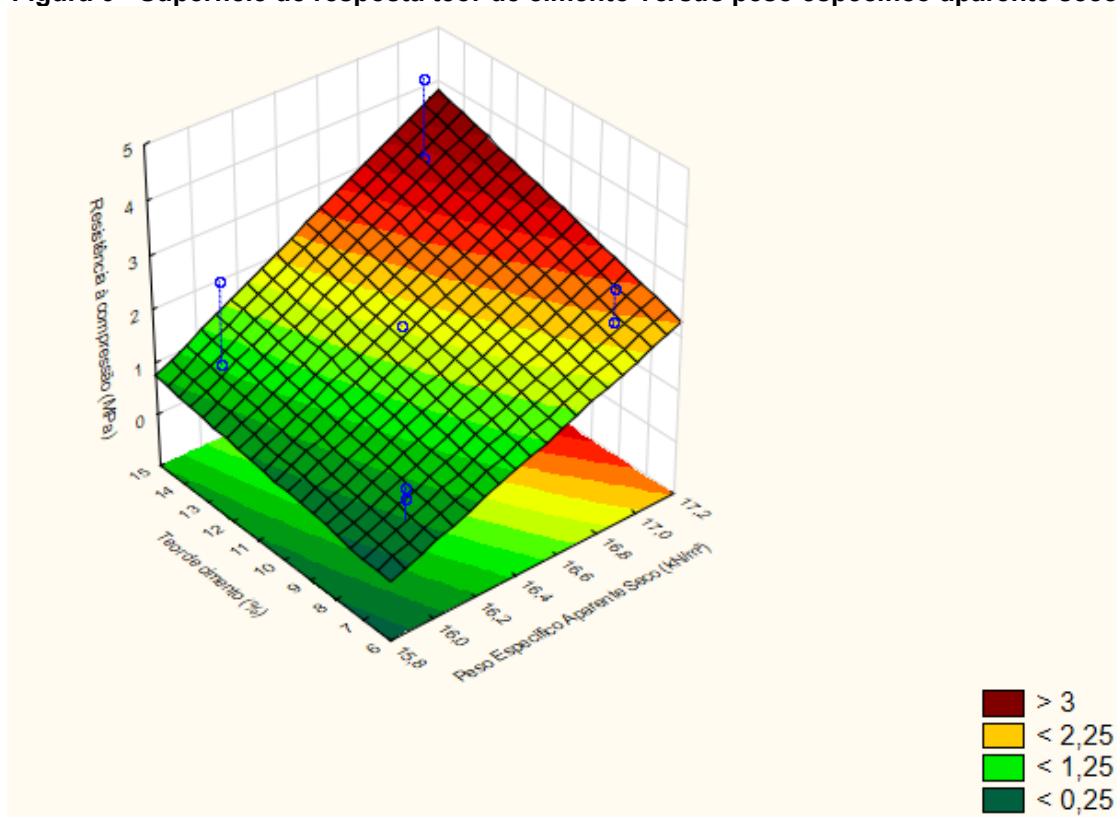
Fatores	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F-calculado	p
Peso específico aparente seco (kN/m ³)	7,06880	1	7,068800	7,140129	0,023408
Teor de cimento (%)	1,50984	1	1,509841	1,525076	0,245082
(1) x (2)	0,13520	1	0,135200	0,136564	0,719426
Erro	9,90010	10	0,990010		
Soma total	18,61394	13			

Fonte: Autoria própria

Pela superfície de resposta (Figura 6) nota-se que os valores desejados para a resistência à compressão são superiores a 3 MPa. Nesse sentido, os dois parâmetros estudados (teor de cimento e peso específico aparente seco) são diretamente proporcionais para a obtenção de uma maior resistência à compressão simples, ou seja, com aumento do teor de cimento e peso específico aparente seco ocorre um aumento nos valores de resistência à compressão. Nos resultados obtidos, constatou-se que a melhor resposta (resistência à compressão) foi encontrada para um teor de cimento de 14% e peso específico aparente seco de 17,00 kN/m³.

Por outro lado, Ingles e Metcalf (1972) descreveram que o cimento é o material com custo, utilizado em misturas de solo-cimento, no qual o ideal é estabelecer um teor máximo, a fim de evitar o efeito de retração devido ao aumento no teor de cimento. O processo de retração em misturas de solo-cimento normalmente ocorre durante o período de cura por aparição de fissuras curvas superficiais, ocasionadas pela perda de umidade e condições de secagem nos primeiros dias (SPECHT, 2000). Portanto, foram mantidos os teores de cimento para as moldagens seguintes.

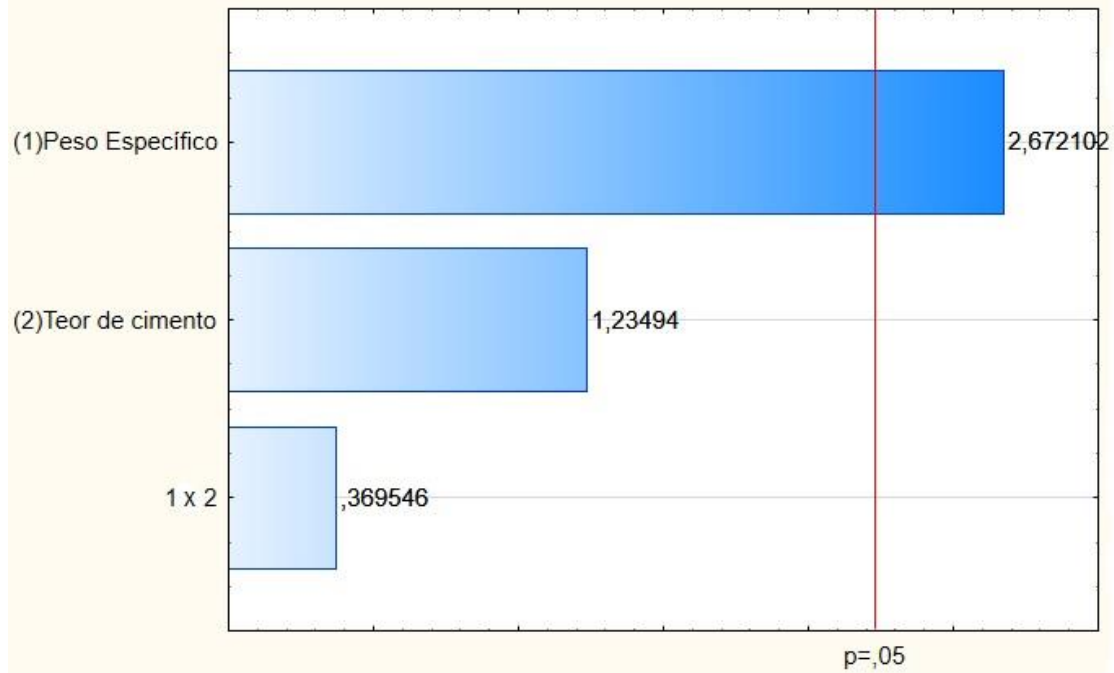
Figura 6 - Superfície de resposta teor de cimento versus peso específico aparente seco



Fonte: Autoria própria

O Gráfico de Pareto (22) indica que a variável peso específico aparente seco foi a que mais influenciou para que houvesse o acréscimo da resistência à compressão simples.

Gráfico 22 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a resistência à compressão simples

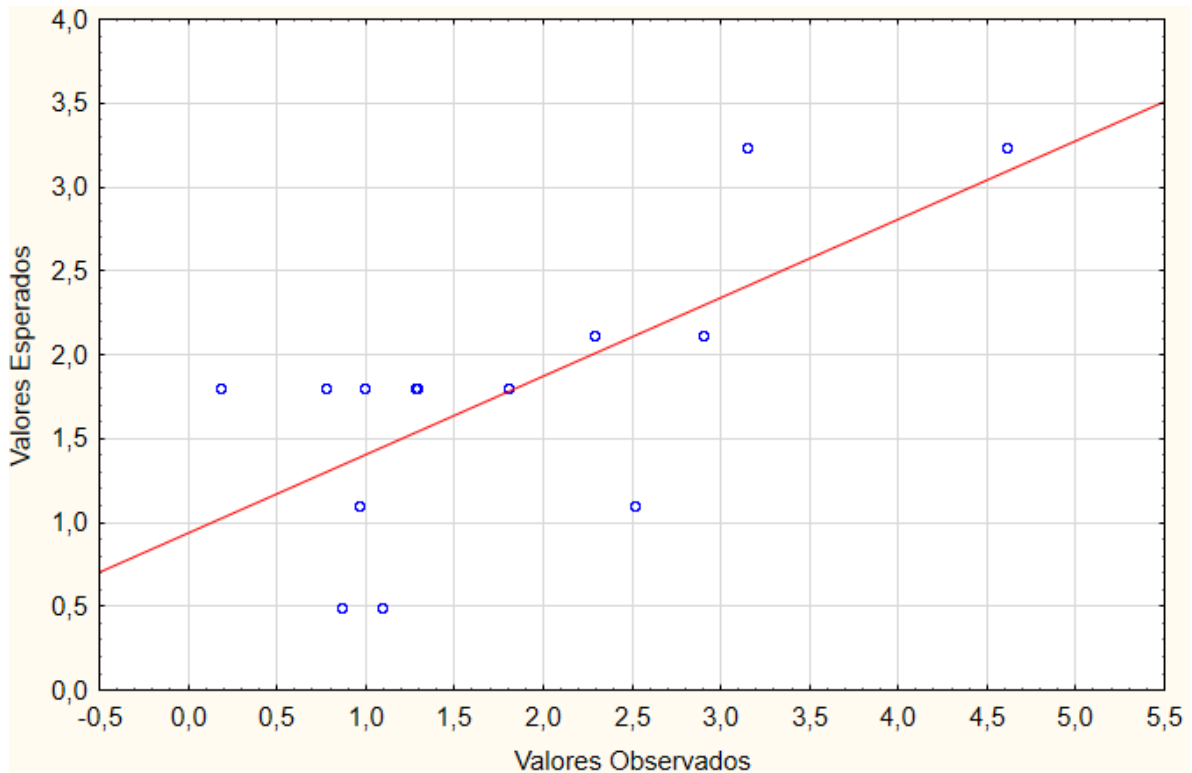


Fonte: Autoria própria

O gráfico apresenta os fatores que mais influenciaram na variável resposta do maior para o menor, bem como a interação entre os fatores. O único fator que pode ser considerado significativo com 95% de confiança é o peso específico aparente seco com $p=0,02341$, seguido do teor de cimento e da combinação entre peso específico aparente seco e teor de cimento.

O Gráfico 23 ilustra a relação valores observados *versus* valores normais esperados para o experimento. Quanto mais próximos os valores estiverem da reta mais ajustado está o modelo, porém, quando o valor de p é significativo a tendência é que os pontos dos valores observados estejam mais dispersos, o que pode ser observado no gráfico, ou seja, a equação gerada não é preditiva.

Gráfico 23 - Gráfico dos valores esperados versus valores observados para a resistência à compressão simples



Fonte: Autoria própria

4.7 EFEITOS DAS VARIÁVEIS DE INVESTIGAÇÃO SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Nesta seção, serão apresentados os resultados dos efeitos das variáveis de controle ou investigadas, sobre a resistência à compressão simples: teor de cimento, peso específico aparente seco e relação vazios/cimento. A partir dos resultados dos corpos de prova de solo-cimento e solo-cimento-resíduo de cinza, descritos nas Tabelas 20 e 21.

Tabela 20– Dados obtidos das moldagens dos corpos de prova de solo-cimento

Nome do CP	Solo (%)	Cimento (%)	Yd buscado (gf/cm ³)	Yd obtido (gf/cm ³)	Umidade de moldagem (h)	VOLUME do CP (cm ³)	Vcim	η %	η/Civ	η/Civ ^x	q _u (N/mm ²)	q _u (kPa)
SC 3,14-1	86,00	14,00	1,73	1,77	12,33	171,00	17,32	34,17	3,37	10,74	1,07	1070
SC 3,14-2	86,00	14,00	1,73	1,77	12,37	176,43	17,84	34,28	3,39	10,78	1,38	1380
SC 3,14-3	86,00	14,00	1,73	1,83	12,25	183,82	19,23	31,96	3,06	9,88	3,6	3600
SC 3,7-1	93,00	7,00	1,73	1,91	12,77	180,13	10,03	28,12	5,05	11,92	2,29	2290
SC 3,7-2	93,00	7,00	1,73	1,89	12,55	182,92	10,03	29,08	5,30	12,42	2,9	2900
SC 3,7-3	93,00	7,00	1,73	1,76	11,96	179,87	9,00	33,79	6,75	15,10	0,51	510
SC 1,14-1	86,00	14,00	1,63	1,83	12,89	176,43	18,80	32,25	3,03	9,88	2,52	2520
SC 1,14-2	86,00	14,00	1,63	1,80	12,51	179,20	18,77	33,18	3,17	10,25	0,96	960
SC 1,14-3	86,00	14,00	1,63	1,81	13,03	175,51	18,26	32,77	3,15	10,16	3,41	3410
SC 1,7-2	93,00	7,00	1,63	1,75	12,68	184,80	9,43	34,06	6,67	15,08	1,09	1090
SC 1,7-3	93,00	7,00	1,63	1,81	12,26	177,34	9,13	32,09	6,23	14,14	0,98	980
SC 2,11-1	89,00	11,00	1,68	1,81	12,30	183,86	15,21	32,32	3,91	11,24	1,29	1290
SC 2,11-2	89,00	11,00	1,68	1,83	12,27	181,97	15,21	31,58	3,78	10,92	0,18	180
SC 2,11-3	89,00	11,00	1,68	1,77	12,29	176,43	14,00	33,95	4,28	12,05	0,85	850
SC 2,11-4	89,00	11,00	1,68	1,75	12,65	175,53	13,85	34,52	4,38	12,29	1,42	1420
SC 2,11-5	89,00	11,00	1,68	1,70	12,61	171,00	13,08	36,48	4,77	13,19	0,47	470
SC 2,11-6	89,00	11,00	1,68	1,84	12,46	179,15	15,02	31,50	3,76	10,88	0,78	780
SC 2,14-1	86,00	14,00	1,68	1,80	11,94	182,90	18,73	33,21	3,24	10,38	2,01	2010
SC 2,14-2	86,00	14,00	1,68	1,80	11,96	183,82	18,79	33,33	3,26	10,43	1,7	1700
SC 2,14-3	86,00	14,00	1,68	1,77	12,01	187,63	18,84	34,53	3,44	10,90	2,11	2110
SC 2,7-1	93,00	7,00	1,68	1,72	11,92	192,83	9,43	35,33	7,23	15,98	1,25	1250
SC 2,7-2	93,00	7,00	1,68	1,77	12,09	180,13	9,09	33,36	6,61	14,86	0,72	720
SC 2,7-3	93,00	7,00	1,68	1,76	12,00	184,80	9,23	33,95	6,80	15,19	0,62	620
SC 3,11-1	89,00	11,00	1,73	1,83	12,20	184,65	15,17	31,55	3,84	11,01	1,25	1250
SC 3,11-2	89,00	11,00	1,73	1,88	12,11	180,77	15,19	29,94	3,56	10,33	1,22	1220
SC 3,11-3	89,00	11,00	1,73	1,92	11,94	177,34	15,19	28,45	3,32	9,72	1,96	1960
SC 1,11-1	89,00	11,00	1,63	1,72	12,19	185,75	14,32	35,73	4,63	12,87	1,55	1550
SC 1,11-2	89,00	11,00	1,63	1,76	12,13	182,90	14,41	34,28	4,35	12,21	1,68	1680
SC 1,11-3	89,00	11,00	1,63	1,73	11,93	177,34	13,73	35,33	4,56	12,70	1,08	1080

Fonte: Autoria própria

Tabela 21 - Dados obtidos das moldagens dos corpos de prova de solo-cimento-resíduo de cinza

Nome do CP	Solo (%)	Cimento (%)	Resíduo de cinza (RC) (%)	Yd buscado (gf/cm ³)	Yd obtido (gf/cm ³)	Umidade de moldagem (h)	Volume do CP (cm ³)	Vcim	η %	η/Civ	η/Civ ^x	q _u (N/mm ²)	q _u (kPa)
SCRC 3,14-1	56,00	14,00	30,00	1,73	1,85	13,05	181,97	15,06	30,41	3,67	10,57	-	-
SCRC 3,14-2	56,00	14,00	30,00	1,73	1,73	12,75	184,80	14,22	35,13	4,56	12,66	-	-
SCRC 3,14-3	56,00	14,00	30,00	1,73	1,86	12,18	179,15	14,75	30,24	3,67	10,54	3,44	3440
SCRC 3,11-1	59,00	11,00	30,00	1,73	1,77	12,47	181,97	11,27	33,00	5,33	13,26	2,07	2070
SCRC 3,11-2	59,00	11,00	30,00	1,73	1,65	13,09	185,75	10,79	37,50	6,46	15,56	1,74	1740
SCRC 3,11-3	59,00	11,00	30,00	1,73	1,80	12,96	186,69	11,78	32,03	5,08	12,75	1,83	1830
SCRC 3,7-1	63,00	7,00	30,00	1,73	1,82	11,93	187,63	7,56	30,66	7,61	15,28	0,85	850
SCRC 3,7-2	63,00	7,00	30,00	1,73	1,81	12,67	187,44	7,57	30,95	7,67	15,41	1,13	1130
SCRC 3,7-3	63,00	7,00	30,00	1,73	1,55	12,08	185,75	6,36	41,09	12,00	22,20	0,26	260
SCRC 1,14-1	56,00	14,00	30,00	1,63	1,74	12,37	183,86	14,23	34,53	4,46	12,41	2,55	2550
SCRC 1,14-2	56,00	14,00	30,00	1,63	1,54	12,24	184,80	12,60	42,27	6,20	16,19	1,04	1040
SCRC 1,14-3	56,00	14,00	30,00	1,63	1,79	12,11	180,05	14,26	32,85	4,15	11,67	2,6	2600
SCRC 1,11-1	59,00	11,00	30,00	1,63	1,84	13,03	172,81	11,16	30,50	4,72	12,00	1,97	1970
SCRC 1,11-2	59,00	11,00	30,00	1,63	1,88	12,32	171,00	11,23	28,84	4,39	11,25	2,58	2580
SCRC 1,11-3	59,00	11,00	30,00	1,63	1,83	12,08	175,51	11,17	30,92	4,86	12,26	2,31	2310
SCRC 1,7-1	63,00	7,00	30,00	1,63	1,70	11,91	177,34	6,66	35,27	9,39	18,20	1,04	1040
SCRC 1,7-2	63,00	7,00	30,00	1,63	1,54	12,33	183,86	6,29	41,35	12,10	22,36	0,88	880
SCRC 1,7-3	63,00	7,00	30,00	1,63	1,65	12,02	176,43	6,46	37,05	10,13	19,37	0,47	470
SCRC 2,7-1	63,00	7,00	30,00	1,68	1,66	12,57	180,13	6,65	36,79	9,97	19,15	0,71	710
SCRC 2,7-3	63,00	7,00	30,00	1,68	1,67	12,07	181,05	6,67	36,61	9,93	19,07	0,56	560
SCRC 2,11-1	59,00	11,00	30,00	1,68	1,67	12,48	179,15	10,47	36,79	6,30	15,22	0,95	950
SCRC 2,11-2	59,00	11,00	30,00	1,68	1,71	12,14	186,69	11,13	35,30	5,92	14,46	1,02	1020
SCRC 2,11-3	59,00	11,00	30,00	1,68	1,66	12,54	185,75	10,75	37,45	6,47	15,57	1,44	1440
SCRC 2,14-1	56,00	14,00	30,00	1,68	1,74	12,83	175,43	13,61	34,67	4,47	12,45	1,57	1570
SCRC 2,14-2	56,00	14,00	30,00	1,68	1,78	13,03	172,78	13,72	33,21	4,18	11,78	1,07	1070
SCRC 2,14-3	56,00	14,00	30,00	1,68	1,64	12,84	177,34	12,95	38,51	5,27	14,25	1,36	1360

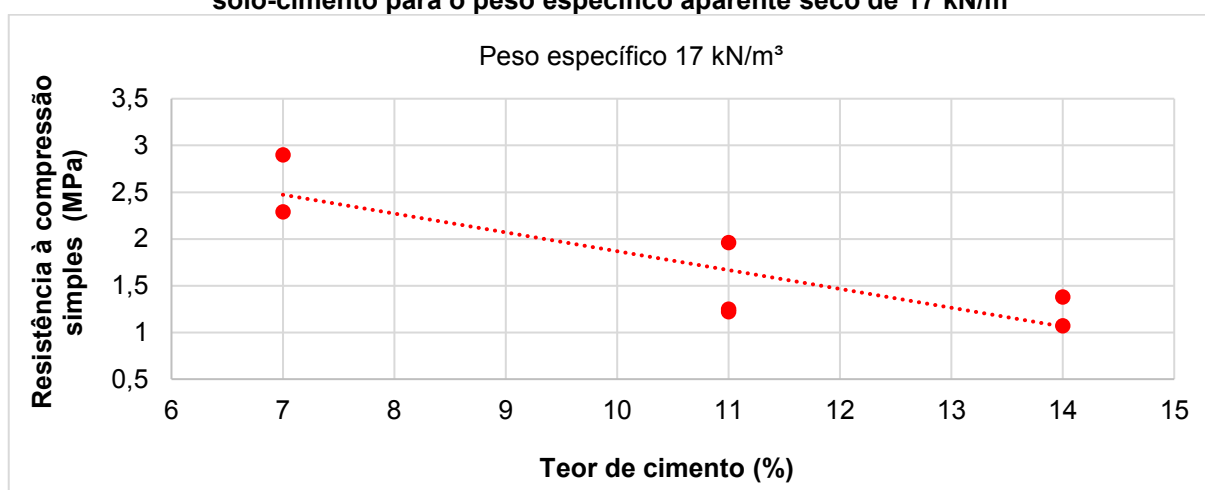
Fonte: Autoria própria

4.7.1 Efeito do teor de cimento

O Gráfico 24 relaciona os resultados obtidos do ensaio de resistência à compressão simples e teor de cimento, para os corpos de prova de solo-cimento com peso específico aparente seco de 17 kN/m^3 .

Observa-se que para essas condições, o aumento no teor de cimento não gerou ganhos de resistência para este tempo de cura, pois em 14% o peso do cimento é maior que em 7%, a densidade real dos grãos (é um valor ponderado referente aos sólidos presentes na mistura) é maior, e 17 kN/m^3 é a maior densidade testada, então a componente da influência do peso específico aparente seco é predominante ao teor de cimento.

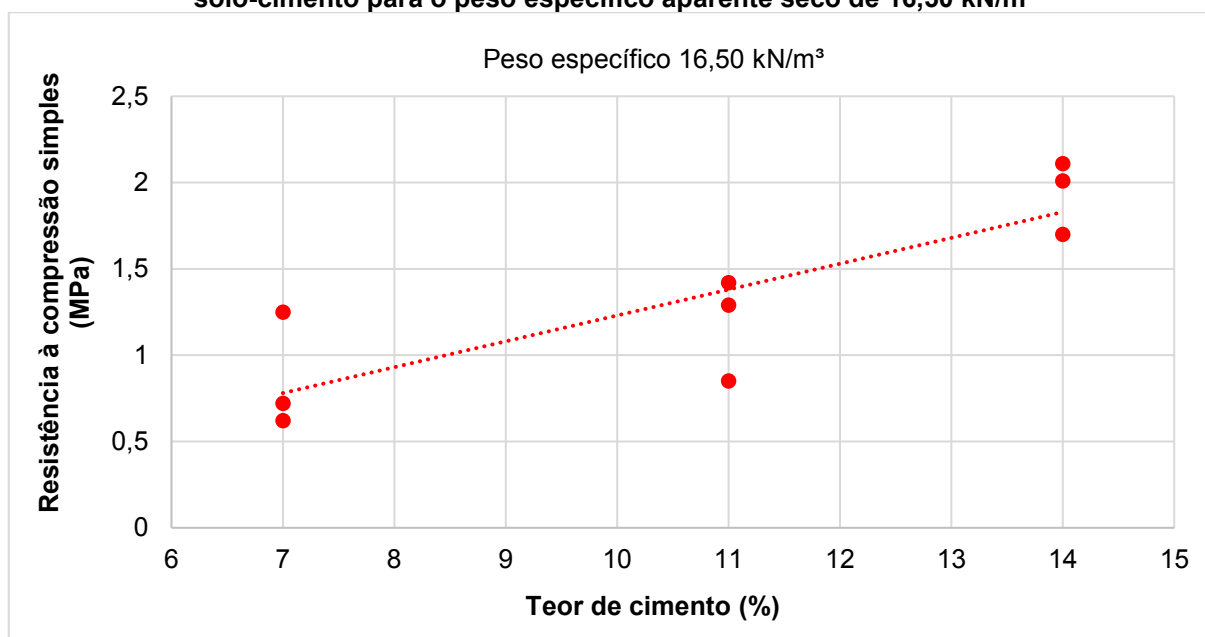
Gráfico 24– Efeito do teor de cimento sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento para o peso específico aparente seco de 17 kN/m^3



Fonte: Autoria própria

Os Gráficos 25 e 26 referentes ao peso específico aparente seco de $16,50 \text{ kN/m}^3$ e 16 kN/m^3 indicam um aumento nos valores de resistência à compressão simples para maiores porcentagens de cimento. Foppa (2005) obteve a mesma tendência, adicionando cimento a mistura de um solo arenito Botucatu, na qual os valores de resistência à compressão simples melhoraram conforme a adição de cimento, na faixa de 1% a 7% de cimento, foram ganhos significativos, com valores que quintuplicaram entre a mínima e a máxima adição de cimento. Ainda segundo o autor, acréscimos nos valores de resistência à compressão simples devido ao aumento do peso específico aparente seco, indicam a efetividade da cimentação em misturas mais compactas.

Gráfico 25– Efeito do teor de cimento sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento para o peso específico aparente seco de 16,50 kN/m³

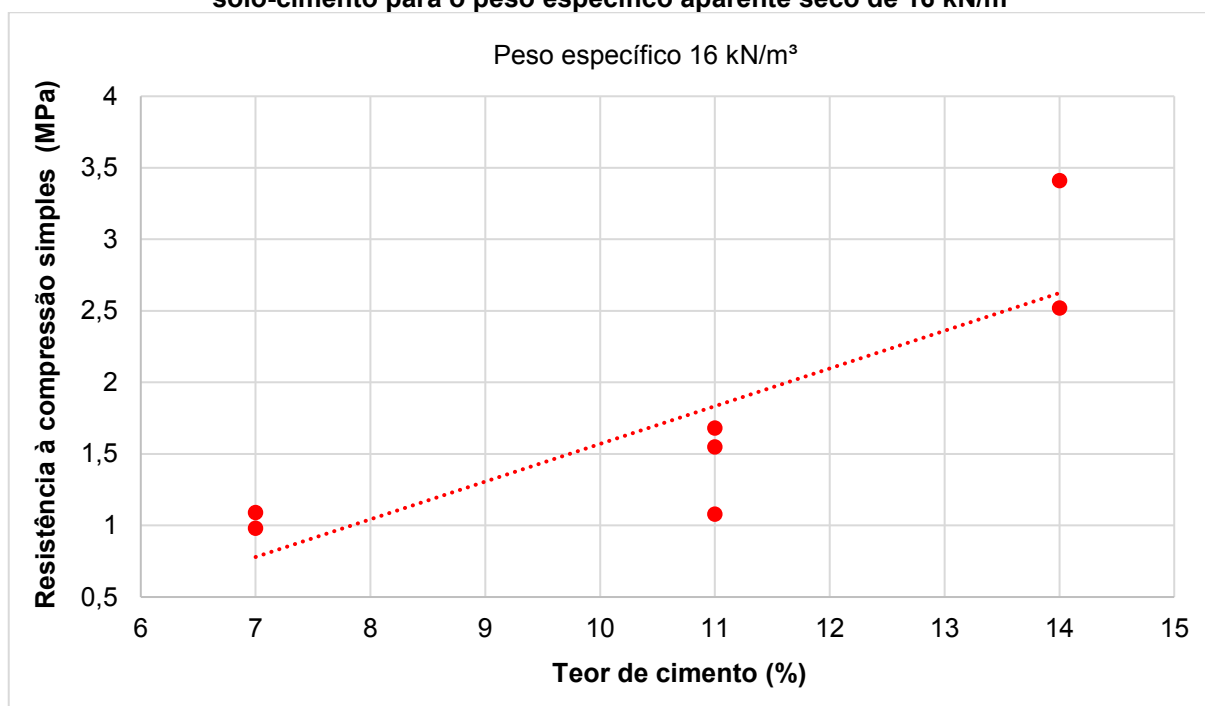


Fonte: Autoria própria

Lopes Junior (2007) ao estabilizar um solo de arenito Botucatu com cal e cimento, observou que pequenas adições tanto de cal quanto cimento geravam ganhos na resistência do material, para os tempos de cura de 28 e 90 dias. Dalla Rosa (2009) utilizou a cal como o aglomerante em misturas de solo-cal-cinza, com tempo de cura de 28, 60 e 90 dias, na faixa de 3% a 9% e obteve ganhos na resistência dos corpos de prova.

Souza (2019) explica que o fato de aumentar os valores de resistência à compressão simples da mistura, quando se aumenta a proporção de agente cimentante, pode ser atribuído a uma maior formação de compostos cimentícios hidratados, os quais contribuem para a matriz sólida da resistência, gerando aumento em seus valores em amostras com menores pesos específicos aparentes secos.

Gráfico 26– Efeito do teor de cimento sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento para o peso específico aparente seco de 16 kN/m³

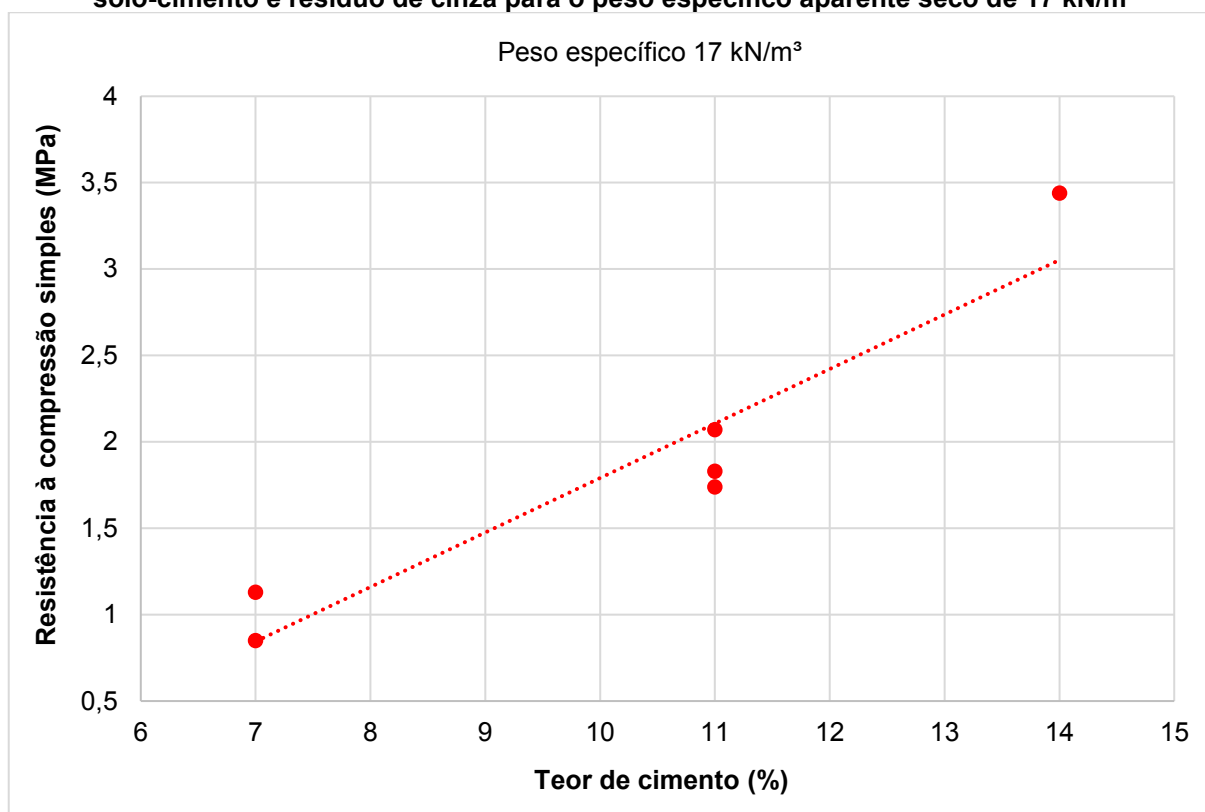


Fonte: Autoria própria

O Gráfico 27 ilustra a relação teor de cimento *versus* resistência à compressão simples para corpos de prova de solo-cimento e adição de 30% de resíduo de cinza, para um valor de peso específico aparente seco de 17 kN/m³.

Observa-se que a adição de cinza na mistura e o aumento no teor de cimento, proporcionaram um aumento de mais de 300% nos valores de resistência à compressão simples.

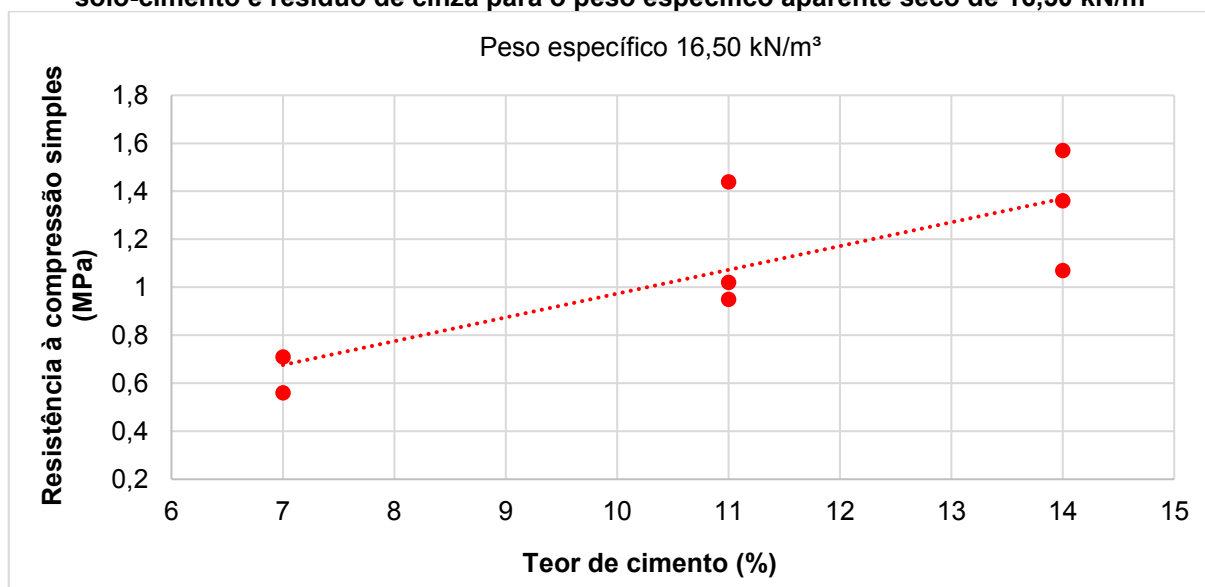
Gráfico 27– Efeito do teor de cimento sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento e resíduo de cinza para o peso específico aparente seco de 17 kN/m³



Fonte: Autoria própria

Os Gráficos 28 e 29 representam o crescimento linear da resistência à compressão simples, ao adicionar cimento e 30% de resíduo em misturas de solo-cimento e resíduo de cinza com pesos específicos aparentes secos de 16,50 e 16 kN/m³.

Gráfico 28– Efeito do teor de cimento sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento e resíduo de cinza para o peso específico aparente seco de 16,50 kN/m³



Fonte: Autoria própria

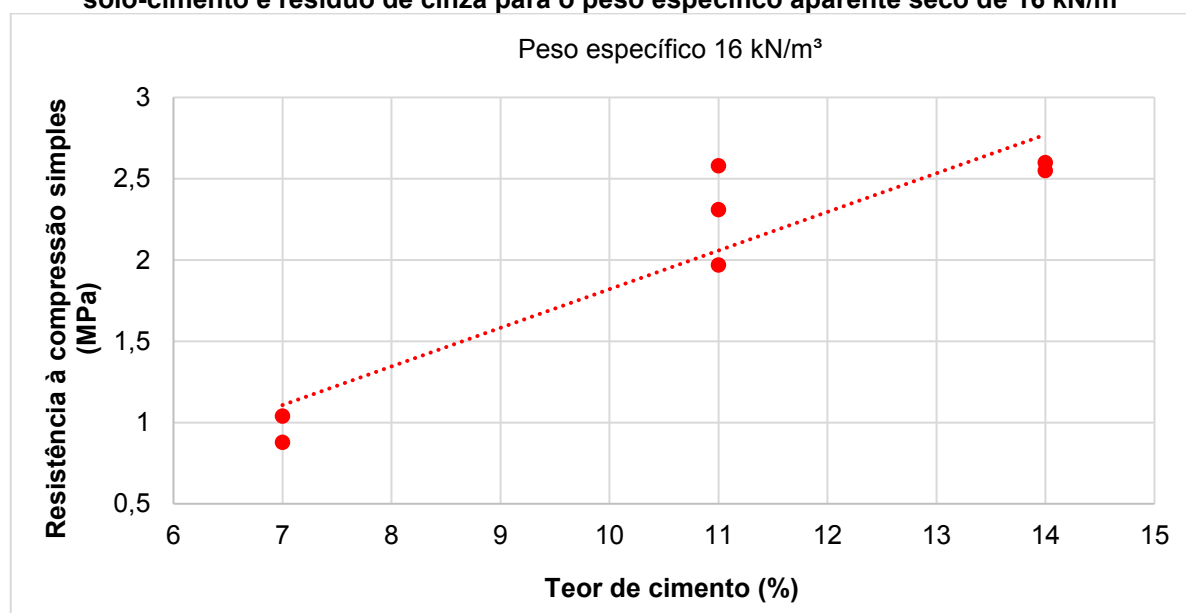
Foi observado um aumento de 180% nos valores de resistência em amostras com peso específico aparente seco de 16,50 kN/m³ e 195% nos valores de resistência em amostras com peso específico aparente seco de 16 kN/m³.

Dalla Rosa (2009) adicionou resíduo cinza volante em misturas de solo cal e observou ganhos na resistência à compressão do material. Os valores obtidos em amostras com 25% de resíduo de cinza, foram aproximadamente 130% superiores, comparados com os valores de resistência para misturas com 12,5% de resíduo de cinza aos 28 dias de cura, independente da quantidade de cal e da relação n/C_{av} .

Carvalho (2019) ao estabilizar um solo com cimento e fibra de coco de babaçu, notou que houve aumento nos valores de resistência à compressão simples do material, considerando o período de cura de 7 dias e utilizando 1,5% de fibra de coco babaçu em sua formulação, segundo o autor pequenas adições de fibra de coco babaçu combinadas com um maior período de cura dos corpos de prova, foram definitivos para melhorar os valores de resistência do material.

Souza (2019) utilizou em sua pesquisa, cimento e manipueira⁶ e ao utilizar a proporção de 12% de cimento na mistura, observou que a resistência à compressão do material aumentou e ao substituir a água por manipueira obteve resultados de resistência à compressão semelhantes.

Gráfico 29– Efeito do teor de cimento sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento e resíduo de cinza para o peso específico aparente seco de 16 kN/m³



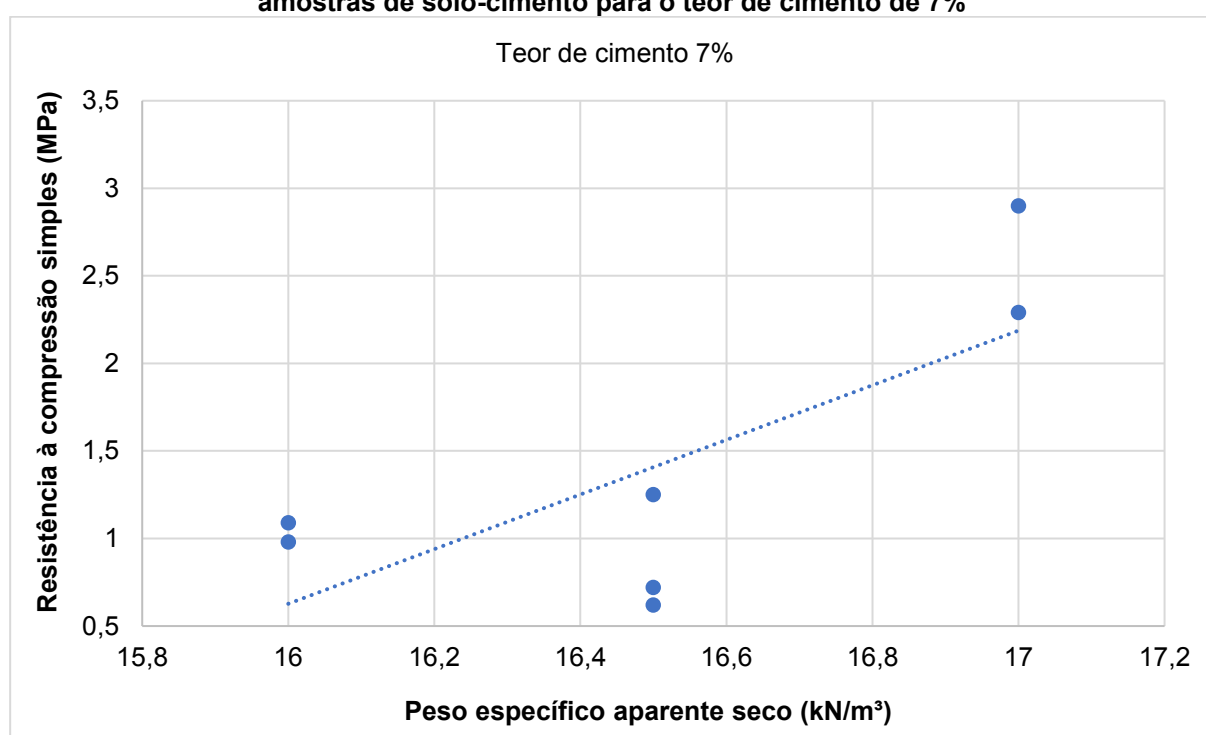
Fonte: Autoria própria

⁶ Líquido amarelado oriundo do beneficiamento de raízes em indústrias ou casas de produção de farinha ou amido

4.7.2 Efeito do peso específico aparente seco

O Gráfico 30 ilustra a influência do peso específico aparente seco sobre os valores de resistência à compressão simples para corpos de prova com teor de cimento de 7%, no qual é possível observar que a influência do peso específico aparente seco foi significativa e houve ganhos na resistência do material, já que para menores teores de cimento a componente da densidade da matriz sólida prevaleceu a componente da matriz da resistência.

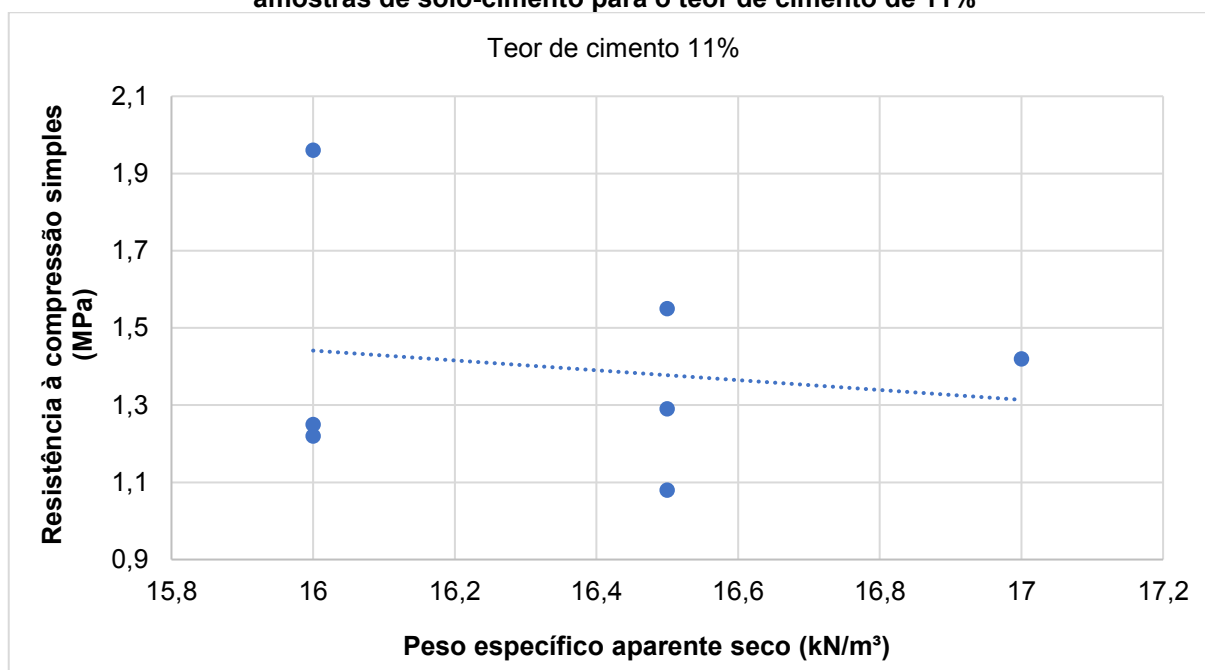
Gráfico 30– Efeito do peso específico aparente seco sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento para o teor de cimento de 7%



Fonte: Autoria própria

O Gráfico 31 refere-se aos corpos de prova de solo e cimento com teor de cimento de 11%, no qual é possível notar que a variação do peso específico aparente seco não interferiu significativamente nos resultados de resistência à compressão simples, fato que pode ser atribuído a dispersão nos valores obtidos para 16 kN/m³, bem como a uma diminuição da densidade da matriz sólida sobre a resistência à compressão, à medida que se aumenta o teor de cimento.

Gráfico 31 – Efeito do peso específico aparente seco sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento para o teor de cimento de 11%

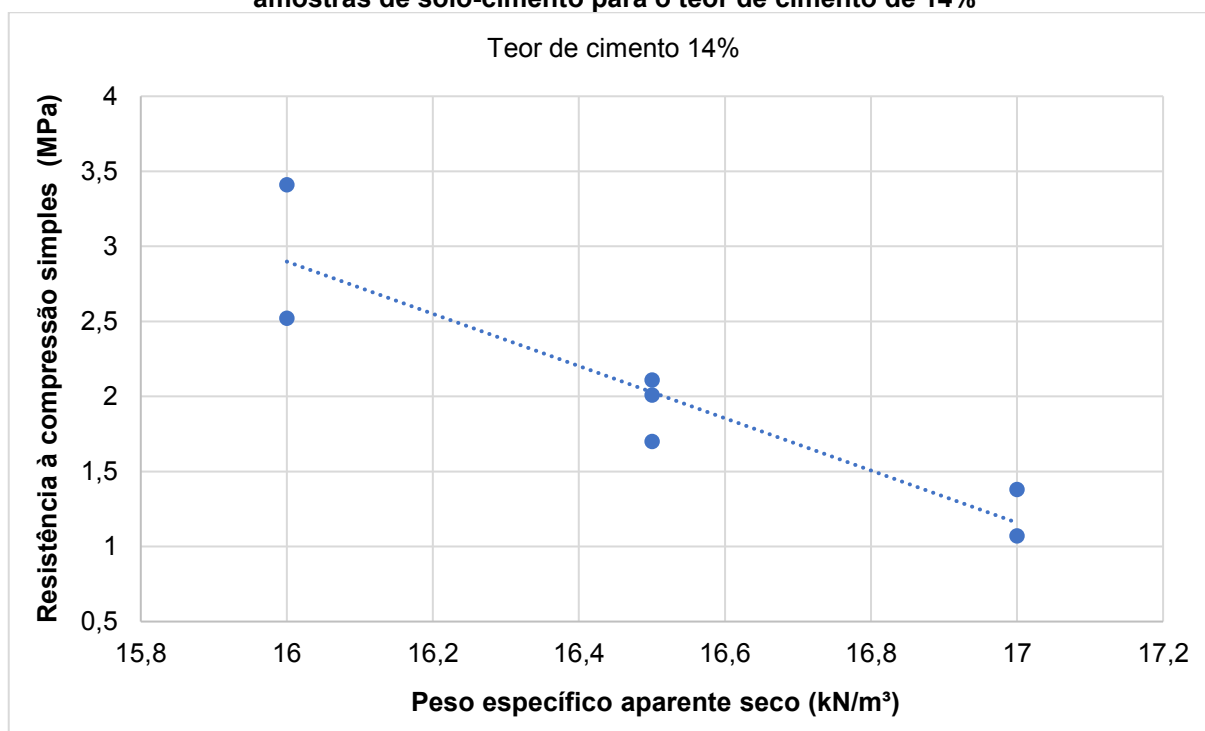


Fonte: Autoria própria

O Gráfico 32 ilustra a variação dos valores de resistência à compressão simples em amostras de solo e cimento com 14% de cimento em sua composição, conforme o gráfico é possível observar que a variação no peso específico aparente seco não gera maiores valores de resistência à compressão aos corpos de prova, prevalecendo uma diminuição da componente da densidade da matriz sólida sobre a resistência à compressão, à medida em que se aumenta o teor de cimento.

Pereira e Vargas (2019) analisaram a estabilização de um solo da região de Ponta Grossa com cimento e adição de resíduo de construção e demolição (RCD), à medida em que se aumentava o peso específico aparente seco, houve um acréscimo nos valores de resistência à compressão, assim como nas amostras que tiveram condições de moldagem mais próximas da ótima, a partir do ensaio de compactação. Nas amostras com 10% e 15% de umidade houve um decréscimo nos valores de resistência.

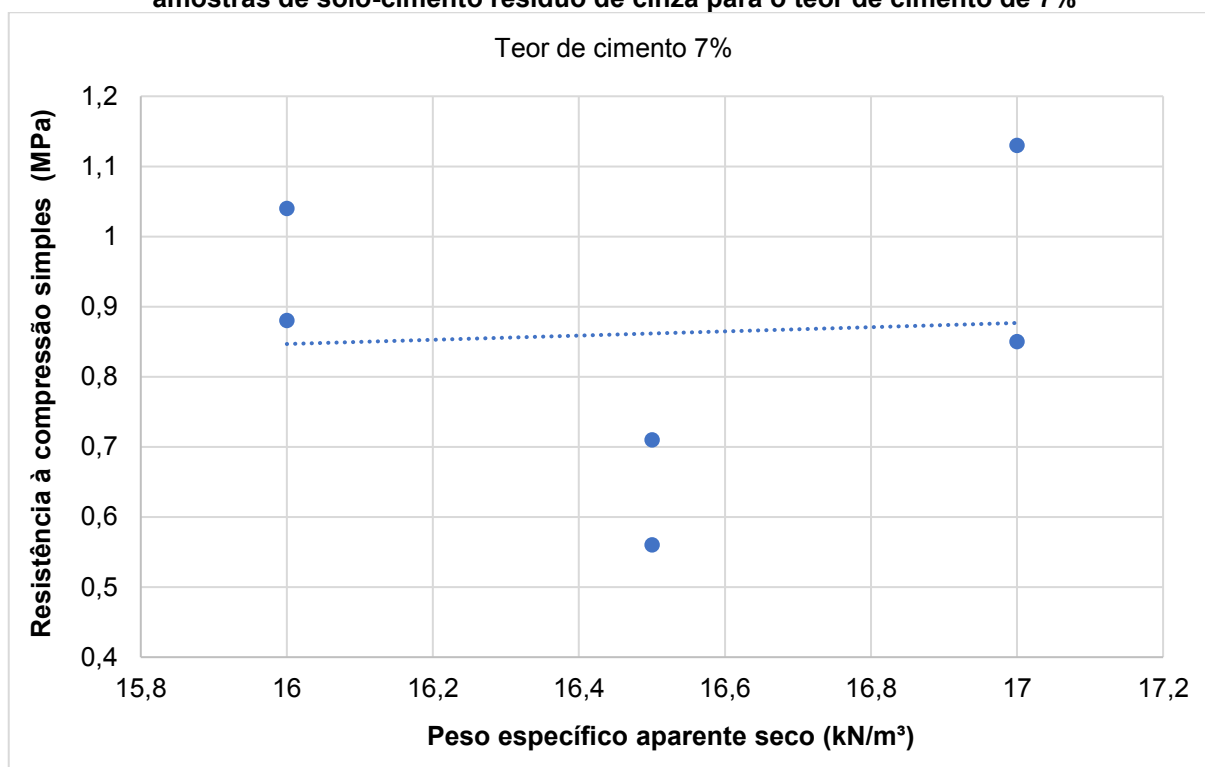
Gráfico 32– Efeito do peso específico aparente seco sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento para o teor de cimento de 14%



Fonte: Autoria própria

Ao adicionar resíduo de cinza nas composições de solo-cimento, não houve ganhos significativos nos valores de resistência em comparação ao solo-cimento sem adição de resíduo, quanto as variações de peso específico aparente seco e teor de cimento. O Gráfico 33 ilustra a relação entre a resistência à compressão simples e o peso específico aparente seco para corpos de prova com teor de cimento de 7%.

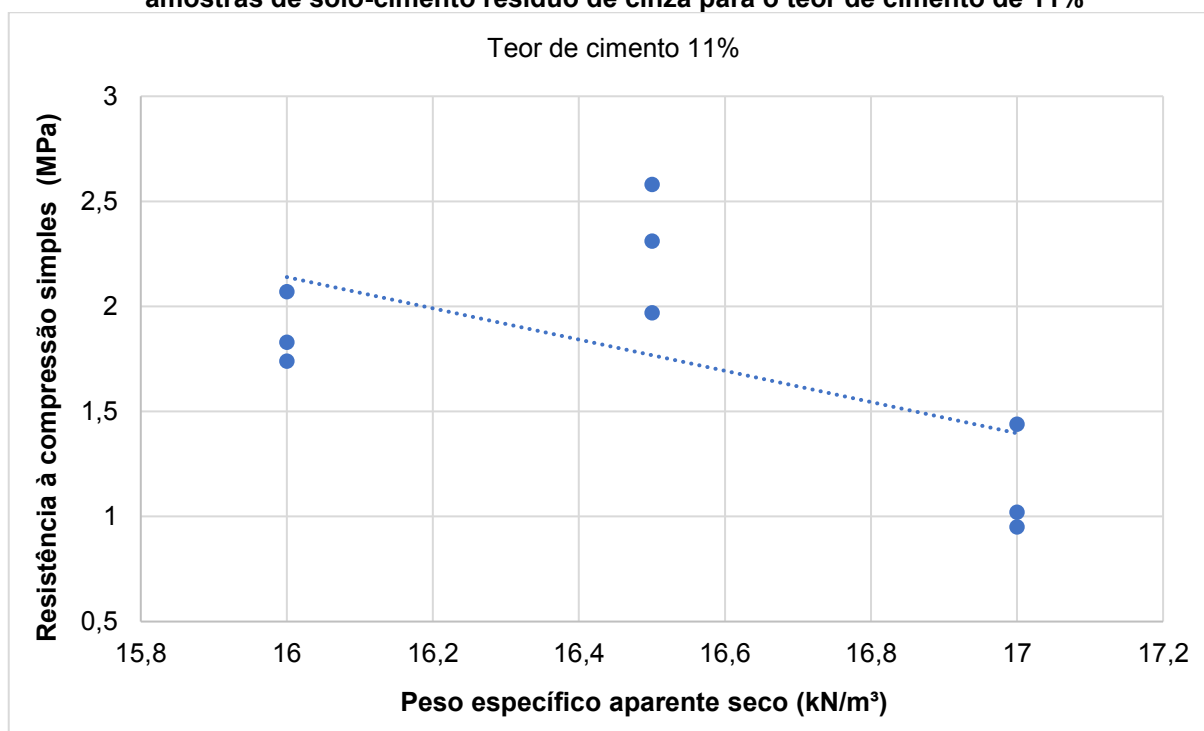
Gráfico 33– Efeito do peso específico aparente seco sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento resíduo de cinza para o teor de cimento de 7%



Fonte: Autoria própria

O Gráfico 34 é referente as amostras com 11% cimento, nas quais não houve variação significativa nos valores de resistência, à medida que se aumentava o peso específico aparente seco. Pelo Gráfico 34 nota-se que houve uma diminuição da componente da densidade da matriz sólida sobre a resistência à compressão, quando se aumentava o teor de cimento.

Gráfico 34 - Efeito do peso específico aparente seco sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento resíduo de cinza para o teor de cimento de 11%

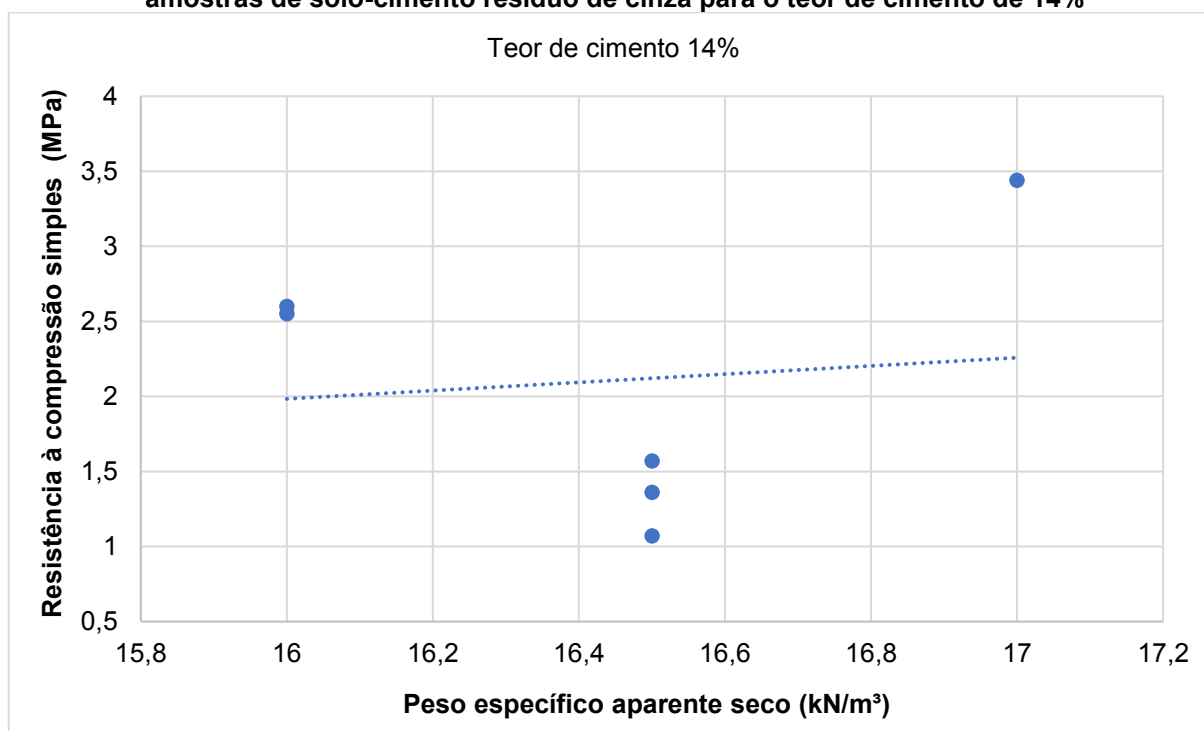


Fonte: Autoria própria

No Gráfico 35 estão representados os resultados da relação resistência à compressão simples *versus* peso específico aparente seco para amostras de solo-cimento e resíduo de cinza com teor de cimento de 14%, o qual não teve influência significativa com o aumento da variável peso específico aparente seco.

Quanto a influência do peso específico aparente seco em amostras de solo-cimento e resíduo de construção e demolição (RCD) Pereira e Vargas (2019) observaram que em amostras de solo-cimento com adição de RCD houve uma redução menos acentuada nos valores de resistência à compressão simples para as amostras mais densas, em relação as amostras de solo-cimento. O RCD devido à presença dominante de uma matriz granular, possui a capacidade de manter a disponibilidade de água na mistura, durante o processo de cura, não interferindo nas reações de hidratação do cimento.

Gráfico 35 - Efeito do peso específico aparente seco sobre a resistência à compressão simples em amostras de solo-cimento resíduo de cinza para o teor de cimento de 14%



Fonte: Autoria própria

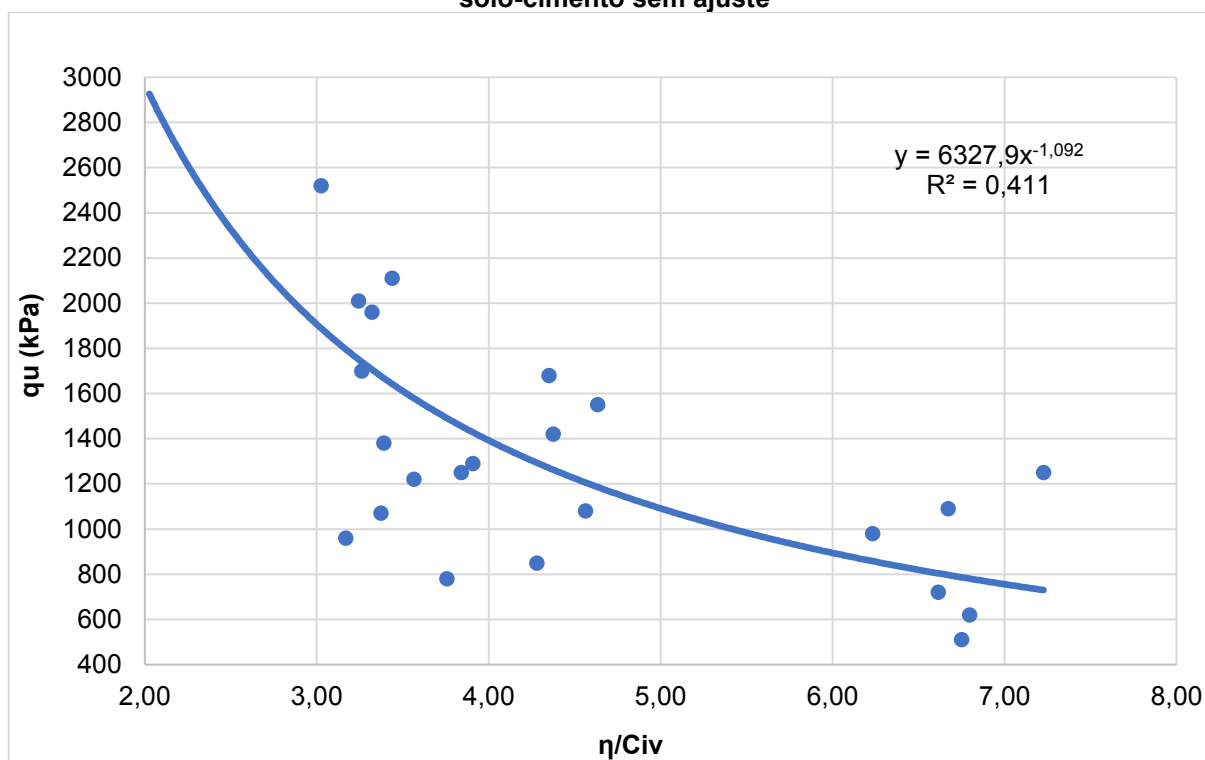
4.7.3 Relação vazios/cimento

Esta análise inclui as variáveis teor de cimento, resistência à compressão simples e índice de vazios para as misturas de solo-cimento e solo-cimento-resíduo de cinza. Por meio da análise dos gráficos, é possível estabelecer a resistência máxima dos corpos de prova, a partir de uma relação vazios/cimento conhecida, ou buscar a relação vazios/cimento para uma certa resistência. O Gráfico 36, estabelece essa relação, para os corpos de prova de solo-cimento descritos na Tabela 20.

Buscando um melhor ajuste das curvas, é feito uma aproximação entre os pontos, realizando-se um ajuste matemático. Porém para as amostras de solo-cimento, após várias tentativas não foi possível estabelecer um expoente com um melhor ajuste, devido a dispersão em algumas análises, como o efeito do teor de cimento.

Segundo Foppa (2005), quando a curva de ajuste tem os pontos mais dispersos do que a original, pode se considerar fatores como porosidade e o teor de cimento nas amostras. Uma maneira que o autor encontrou de contrabalancear as taxas de variação entre as grandezas foi elevar o expoente a 0,28 ao fator V_{ci} , obtendo-se um melhor ajuste a curva vazios/cimento. LOPES JUNIOR (2007) obteve um melhor ajuste dos resultados, elevando o expoente a 0,35 ao parâmetro V_{ci} .

Gráfico 36-Relação vazios/cimento versus resistência à compressão simples para corpos de prova de solo-cimento sem ajuste



Pelo Gráfico 36, é possível observar que os valores de resistência, melhoraram para as amostras mais densas, ou seja, que tiveram maior peso específico aparente seco, independente do teor de cimento, analisando apenas os pontos do gráfico e não a curva de tendência. A curva de tendência correlaciona os valores de resistência à compressão simples e teor de cimento e gerou um R^2 baixo, porém observa-se que corpos de prova com menores valores da relação vazios/cimento tendem a ter maiores valores de resistência à compressão simples.

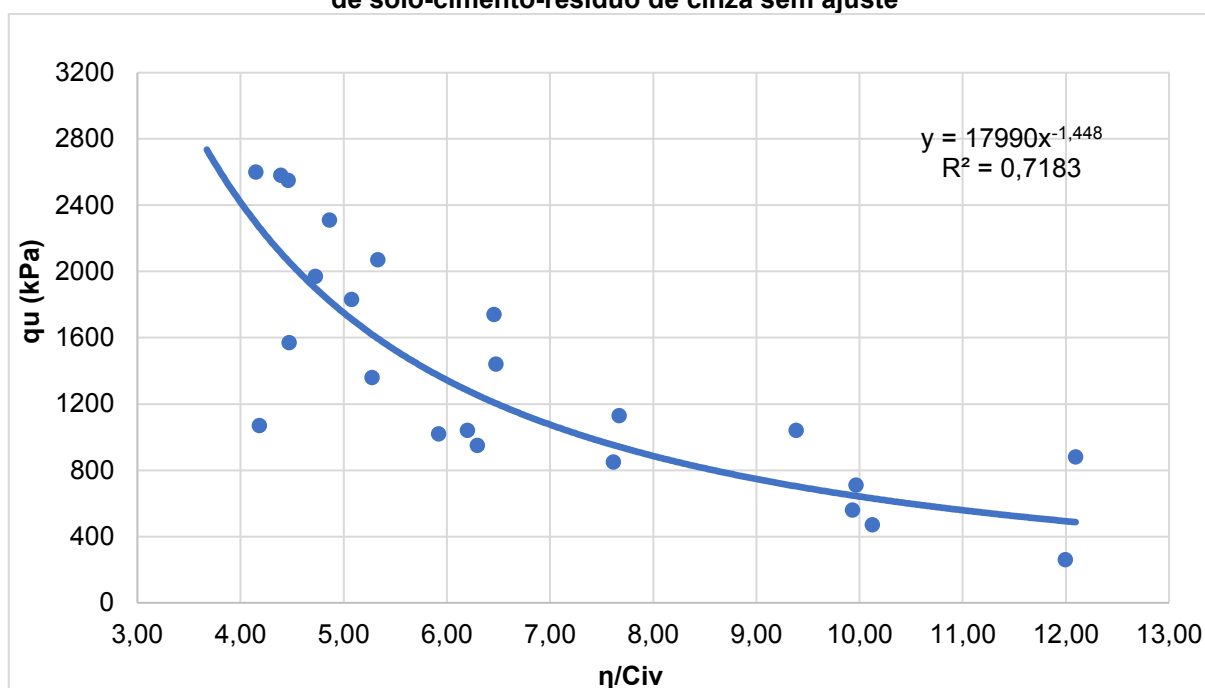
Foppa (2005) e Lopes Junior (2007) observaram que para pontos com a mesma relação vazios/cimento obtidos de maneiras diferentes (por aumento da densidade ou aumento do teor de cimento) atingiram valores de resistência à compressão simples diferentes, sendo que os pontos com menores valores de porosidade e quantidade de cimento, obtiveram maiores valores de resistência à compressão simples.

Lautenschläger, Righetto e Consoli (2008) realizaram ensaios de compressão triaxial em amostras de solo-cimento e observaram que as curvas de resistência demonstraram o aumento dos valores de resistência de coesão efetiva e ângulo de atrito interno dos materiais, com a diminuição da relação vazios/cimento. Os corpos de prova com menores valores de relação vazios/cimento tiveram uma maior rigidez.

Larnach (1960), Foppa (2005) e Lopes Junior (2007) constataram que uma variação no volume de vazios, a uma taxa proporcional de aumento no volume de cimento, seria suficiente para contrabalancear a perda ou ganho nas taxas de resistência.

Abaixo, encontram-se os gráficos referentes as relações vazios/cimento para os corpos de prova de solo-cimento-resíduo de cinza em que foi possível estabelecer um melhor ajuste matemático da curva vazios/cimento por meio da elevação ao expoente 0,7 ao parâmetro V_{ci} .

Gráfico 37– Relação vazios/cimento versus resistência à compressão simples para corpos de prova de solo-cimento-resíduo de cinza sem ajuste



Fonte: Autoria própria

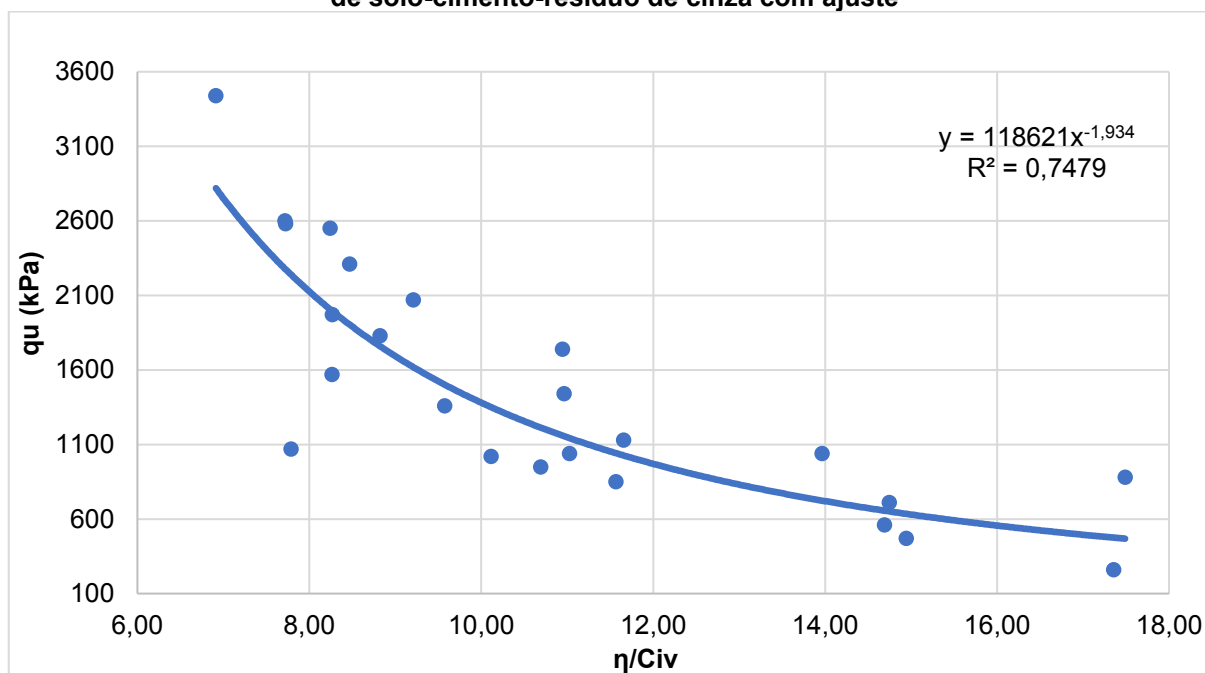
Pelo Gráfico 37, nota-se uma menor dispersão dos pontos, para as amostras menos densas, observa-se que a adição de cimento na mistura proporcionou maiores valores de resistência, possivelmente pela adição de material granular (resíduo de cinza) que melhorou o desempenho das misturas. Para as amostras com maior peso específico aparente seco, nota-se que a adição de cimento, também gerou aumento nos valores de resistência à compressão simples.

Pela Tabela 21, observa-se também que as amostras com maior teor de cimento, tiveram maiores taxas de porosidade, entretanto não afetaram significativamente os valores de resistência.

Dalla Rosa (2009) ao estabilizar um solo com cimento, cal e cinza volante, observou que os valores de resistência das amostras aumentaram à medida que a cinza volante era

adicionada, independente da quantidade de cal e da relação η/C_{av} . Segundo a autora, tal fato pode ser explicado pela composição fina da cinza volante, que mesmo não tendo capacidade cimentante, na presença de umidade reage quimicamente com hidróxidos alcalinos e alcalinos terrosos à temperatura ambiente para auxiliar na formação de compostos, possuindo formação cimentante.

Gráfico 38– Relação vazios/cimento versus resistência à compressão simples para corpos de prova de solo-cimento-resíduo de cinza com ajuste



Fonte: Autoria própria

Para confecção de tijolos, blocos, paredes e outros materiais que têm como matéria prima solo-cimento, seria necessário um maior número de amostras, para uma maior precisão. Entretanto a adição do resíduo proporcionou menor dispersão nos resultados desta análise, indicando que pode ser promissora para aplicação em uma dosagem mais controlada.

4.8 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Para a realização do ensaio foram moldados 12 corpos de prova, conforme as etapas já descritas neste trabalho, eles atenderam aos requisitos da Norma NBR 8491 (ABNT, 2012) quantos aos valores individuais e valores médios. Na Tabela 22 estão descritos os resultados.

Tabela 22- Resultados ensaio de absorção de água para corpos de prova de solo-cimento e solo-cimento resíduo de cinza

Corpo de prova	M1 (massa do corpo de prova seco) (g)	M2 (massa do corpo de prova saturado) (g)	$A = \frac{M2 - M1}{M1} \times 100$ (%)	Valor individual NBR 8491/2012	Média das triplicatas	Valor médio NBR 8491/2012
SC 1,11-1	267,57	314,64	17,59	< 22%		
SC 1,11-2	305,60	364,52	19,28	< 22%	19,16	< 20%
SC 1,11-3	311,88	376,13	20,60	< 22%		
SC 1,11-4	306,85	368,39	20,06	< 22%		
SC 1,11-5	309,08	370,10	19,74	< 22%	19,82	< 20%
SC 1,11-6	312,78	374,26	19,66	< 22%		
SCRC 1,11-1	317,73	375,13	18,07	< 22%		
SCRC 1,11-2	317,33	375,84	18,44	< 22%	18,37	< 20%
SCRC 1,11-3	322,07	381,95	18,59	< 22%		
SCRC 1,11-4	320,50	378,76	18,18	< 22%		
SCRC 1,11-5	323,08	382,42	18,37	< 22%	18,40	< 20%
SCRC 1,11-6	320,31	380,07	18,66	< 22%		

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na tabela, para as composições de 11% de cimento e peso específico de 16 kN/m³ com adição de 30% de resíduo de cinza os resultados indicam que houve ganhos nos valores individuais e na média das triplicatas. Nota-se que os valores individuais e a média das triplicatas ficaram abaixo do recomendado pela Norma NBR 8491 (ABNT, 2012) indicando que os corpos de prova possuem menor capacidade em absorver água.

Grande (2003) em sua pesquisa, trabalhou com misturas de solo-cimento e solo-cimento sílica ativa ⁷ para a confecção de tijolos e painéis de alvenaria e ao realizar o ensaio de absorção de água, observou que em tijolos com adição de sílica ativa os valores obtidos foram superiores aos valores sem adição de sílica, apenas uma composição com sílica ativa teve resultado superior aos traços sem adição de sílica. Os resultados atenderam ao especificado pela Norma NBR 8492 (ABNT, 1982).

⁷ Sílica ativa é o produto de granulação fina proveniente da indústria metalúrgica, mediante produção de ferro silício ou silício metálico, é utilizada para fabricação de concretos de alto desempenho, pré-moldados e bombeáveis.

Milani (2005) ao realizar o ensaio de absorção de água em corpos de prova cilíndricos com formulações de solo-cimento e solo-cimento-casca de arroz, para um tempo de cura de 7 dias, alguns traços tiveram menores valores de absorção de água e não diferiram entre si. Os traços compostos por solos argilosos tiveram os quais não se diferiram entre si.

Para tratamentos com solos argilosos os valores foram mais elevados, devido a maior presença de finos, o que se observou tanto para os tratamentos com solo argiloso quanto arenoso, foi que à medida que era adicionada cinza de casca de arroz na mistura, houve um aumento nos valores de absorção de água, pois a mesma proporcionou um aumento da porosidade no material. Os tratamentos com solo arenoso atenderam ao previsto na Norma NBR 8492 (ABNT, 2012) (MILANI, 2005).

Lima (2013) ao produzir tijolos de solo-cimento e tijolos de solo-cimento com adição de argamassa de assentamento e revestimento notou que os valores médios e individuais atenderam o solicitado na Norma NBR 10834 (ABNT, 2013). A adição da argamassa na mistura, melhorou a capacidade de absorção de água pelo material.

Carvalho (2019) confeccionou tijolos de solo-cimento e tijolos de solo-cimento-fibra de coco babaçu e adquiriu resultados de valores médios que atenderam a Norma NBR 8491 (ABNT, 2012) para 7 dias de cura. Segundo o autor, a adição de fibra de coco babaçu proporcionou maior ganho de umidade do que os tijolos sem a incorporação do resíduo, o que pode ser explicado pela porosidade característica da fibra influenciando na relação água/matriz do tijolo.

5. ANÁLISE ESTATÍSTICA E ECONÔMICA SOLO-CIMENTO-RESÍDUO DE CINZA

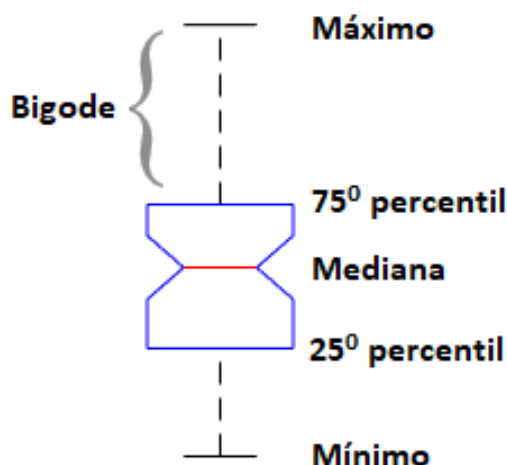
5.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Nesta seção são apresentados os resultados da análise estatística dos corpos de prova, sendo considerados os dados brutos e os dados ajustados considerando 95% de intervalo de confiança, equivalente a 0,05 de nível de significância. Sendo consideradas tanto uma análise qualitativa por meio do uso do “*box plot*”, gerado do *software* matlab^r. Para a análise quantitativa foram consideradas a média das amostras (\bar{X}), média da população (μ), desvio padrão da amostra (S'), intervalo de confiança (IC), e a análise de variância (anova).

O “*box plot*”, é um gráfico que fornece uma visualização de estatísticas resumidas para dados de amostra e contém os seguintes recursos (MCGILL et al., 1976):

- (i) A parte inferior e superior representa os percentis 25 e 75 da amostra, respectivamente. A distância entre a parte inferior e superior de cada caixa é o intervalo interquartil;
- (ii) A linha vermelha no meio de cada caixa é a mediana da amostra. Se a mediana não estiver centralizada na caixa, o gráfico mostra a assimetria da amostra;
- (iii) Os bigodes são linhas que se estendem acima e abaixo de cada gráfico, e vão do final do intervalo interquartil até a observação mais distante dentro do comprimento do bigode (o valor adjacente);
- (iv) Os entalhes exibem a variabilidade da mediana entre as amostras. A largura de um entalhe é calculada de forma que as caixas cujos entalhes não se sobreponham tenham medianas diferentes no nível de significância de 5%. O nível de significância é baseado em uma suposição de distribuição normal, mas as comparações de medianas são razoavelmente robustas para outras distribuições. Comparar medianas de “*box plot*” é como um teste de hipótese visual, análogo ao teste t usado para médias.

Figura 7- Exemplificação “box plot”



Fonte: Adaptado de MathWorks (2020)

A média das amostras (\bar{X}) pode ser obtida pela Equação 20 (LAPPONI, 2000):

$$\mu = \bar{X} + IC \quad (20)$$

O intervalo de confiança (IC) pode ser obtida conforme Equação 21 (LAPPONI, 2000):

$$IC = t_{\alpha/2} \left(\frac{S'}{\sqrt{n}} \right) \quad (21)$$

Onde, α é o nível de significância, n é o tamanho da amostra e t é distribuição T-Student.

O desvio padrão da amostra (S') pode ser obtida pela Equação 22 (LAPPONI, 2000):

$$S' = \sqrt{\frac{\sum_i^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (22)$$

A média da população (μ) pode ser obtida pela Equação 23 (LAPPONI, 2000):

$$\mu = \bar{X} + IC \quad (23)$$

A análise de variância (ANOVA) pode ser obtida considerando a Tabela 23 (VIEIRA, 2006):

Tabela 23 – Tabela ANOVA

Origem de Variações	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F	p-value
Entre Grupos	SST	$n-1$	MST	MST/ MSE	VC
Dentro dos Grupos	SSE	$n_r - n$	MSE		
Total	SS	$n_r - 1$			

Fonte: Adaptado de Vieira (2006)

Onde, MSE é o quadrado médio do erro, SST é a soma do quadrado para tratamentos, MST é o quadrado médio para tratamentos, SS é a soma dos quadrados, n é o tamanho da amostra, n_r é soma das amostras e VC é o valor crítico.

5.1.1 Análise para os dados sem ajustes

Na Tabela 24 são apresentadas as variações da resistência à compressão simples (N/mm²) para os corpos de prova preparados considerando solo/cimento e solo/cimento/cinza, sendo as amostras classificadas na seguinte forma: Amostra (a) representa o corpo de prova composto por (solo/7%cimento); Amostra (b) representa o corpo de prova composto por (solo/11%cimento); Amostra (c) representa o corpo de prova composto por (solo/14%cimento); Amostra (d) representa o corpo de prova composto por (solo/7%cimento/cinza); Amostra (e) representa o corpo de prova composto por (solo/11%cimento/cinza); Amostra (f) representa o corpo de prova composto por (solo/14% cimento/cinza).

Tabela 24 - Variações da resistência à compressão simples (N/mm²) para dados sem ajustes (continua)

Amostra (a)	Amostra (b)	Amostra (c)	Amostra (d)	Amostra (e)	Amostra (f)
1,09	1,55	2,52	1,04	1,97	2,55
0,98	1,68	0,96	0,88	2,58	1,04
1,25	1,08	3,41	0,47	2,31	2,6
0,72	1,29	2,01	0,71	0,95	1,57
0,62	0,18	1,7	0,56	1,02	1,07

Tabela 24 - Variações da resistência à compressão simples (N/mm²) para dados sem ajustes (conclusão).

Amostra (a)	Amostra (b)	Amostra (c)	Amostra (d)	Amostra (e)	Amostra (f)
2,29	0,85	2,11	0,85	1,44	1,36
2,90	1,42	1,07	1,13	2,07	3,44
0,51	0,47	1,38	0,26	1,74	
	0,78	3,60		1,83	
	1,25				
	1,22				
	1,96				

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 25, são apresentados os cálculos estatísticos para os dados apresentados na Tabela 24.

Tabela 25 – Estatísticas das variações da resistência à compressão simples (N/mm²) para dados sem ajustes

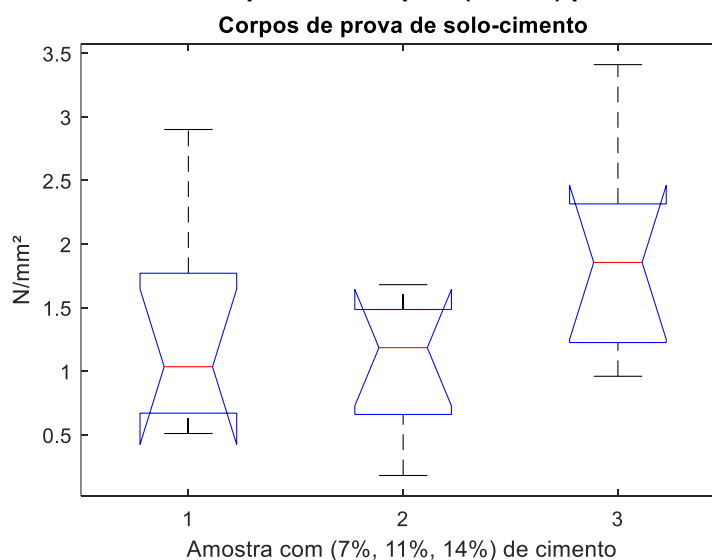
	Amostra (a)	Amostra (b)	Amostra (c)	Amostra (d)	Amostra (e)	Amostra (f)
\bar{X}	1,295	1,144	2,084	0,738	1,768	1,947
S'	0,855	0,508	0,948	0,295	0,551	0,922
IC	0,714	0,323	0,729	0,247	0,423	0,852
$\mu_{\max} = \bar{X} + IC$	2,009	1,858	2,798	1,451	2,482	2,661
$\mu_{\min} = \bar{X} - IC$	0,580	0,429	1,370	0,023	1,053	1,232

Fonte: Autoria própria

5.1.1.1 Análise de variância (ANOVA)

Na Figura 8 é apresentado gráfico do “*box plot*” para as amostras (a, b, c).

Figura 8 - Resistência à compressão simples (N/mm²) para as amostras (a, b, c)



Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados da Figura 8, pode-se observar que as médias das amostras não são diferentes.

Para confirmar os resultados qualitativos apresentados na Figura 8, será utilizada o teste ANOVA, considerando as seguintes hipóteses da Equação 24:

$$\begin{cases} H_0 : \mu_a = \mu_b = \mu_c \\ H_1 : (\mu_a \neq \mu_b) \parallel (\mu_a \neq \mu_b) \parallel (\mu_b \neq \mu_c) \end{cases} \quad (24)$$

Na Tabela 26 são apresentados os resultados do teste ANOVA considerando as amostras (a, b, c).

Tabela 26 – Tabela ANOVA para as amostras (a, b, c)

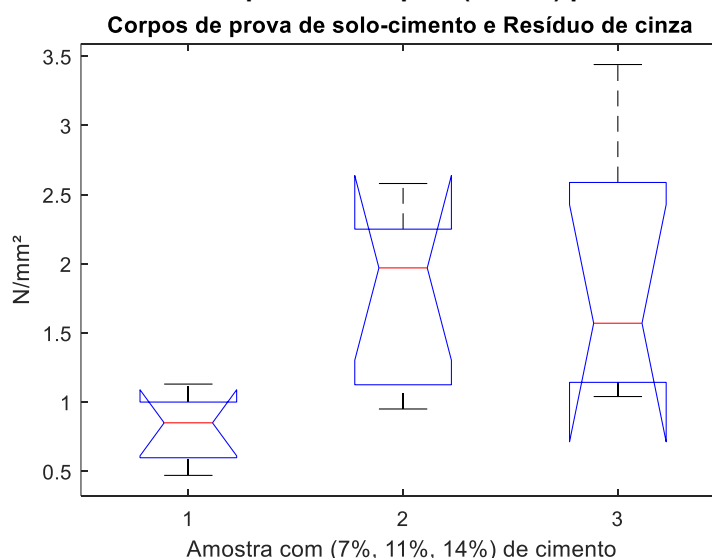
Origem de Variações	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F	p-value
Entre Grupos	2,938133	2	1,469067	2,63926	0,0949
Dentro dos Grupos	11,689	21	0,556619		
Total	14,62713	23			

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Tabela 26 o $p\text{-value}=0,0949$, maior que o nível de significância $\alpha = 0,05$, indicando que deve-se aceitar H_0 , demonstrando que não há diferenças significativas entre as médias das amostras.

Na Figura 9 é apresentado gráfico do “box plot” para as amostras (d, e, f).

Figura 9- Resistência à compressão simples (N/mm²) para as amostras (d, e, f)



Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados da Figura 9, pode-se observar que as médias das amostras são diferentes.

Para confirmar os resultados qualitativos apresentados na Figura 9, será utilizada o teste ANOVA, considerando as seguintes hipóteses (Equação 25):

$$\begin{cases} H_0 : \mu_d = \mu_e = \mu_f \\ H_1 : (\mu_d \neq \mu_e) \parallel (\mu_d \neq \mu_f) \parallel (\mu_e \neq \mu_f) \end{cases} \quad (25)$$

Na Tabela 27 são apresentados os resultados do teste ANOVA considerando as amostras (d, e, f).

Tabela 27– Tabela ANOVA para as amostras (d, e, f)

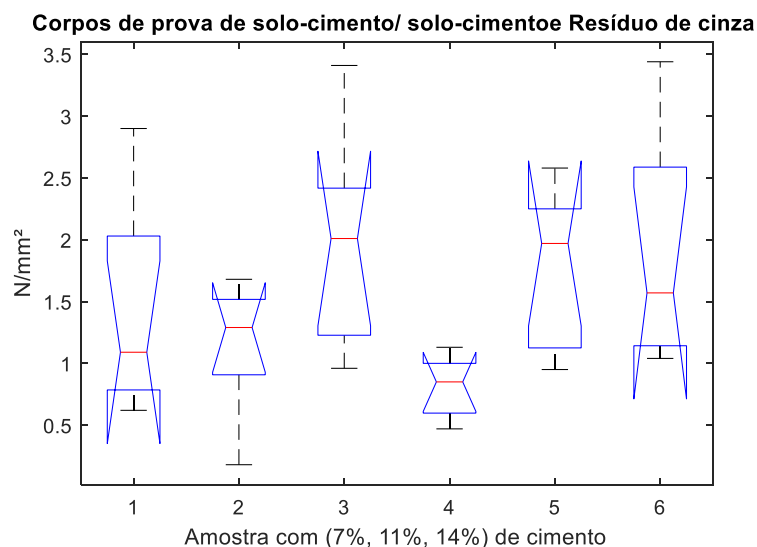
Origem de Variações	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F	p-value
Entre Grupos	5,256867	2	2,628433	6,01284	0,01
Dentro dos Grupos	7,868457	18	0,437137		
Total	13,12532	20			

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Tabela 27 o $p\text{-value}=0,01$, menor que o nível de significância $\alpha = 0,05$, indicando que deve-se rejeitar H_0 e aceitar H_1 , demonstrando que há diferenças significativas em pelos menos uma das médias das amostras.

Na Figura 10 é apresentado gráfico do “box plot” para todas as amostras (a, b, c, d, e, f).

Figura 10 - Resistência à compressão simples (N/mm²) para as amostras (a, b, c, d, e, f)



Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados da Figura 10, pode-se observar que as médias das amostras são diferentes.

Para confirmar os resultados qualitativos apresentados na Figura 10, será utilizada o teste ANOVA, considerando as seguintes hipóteses (Equação 26):

$$\begin{cases} H_0 : \mu_a = \mu_b = \mu_c = \mu_d = \mu_e = \mu_f \\ H_1 : (\mu_d \neq \mu_e) \parallel (\mu_d \neq \mu_f) \parallel (\mu_e \neq \mu_f) \parallel (\mu_d \neq \mu_e) \parallel (\mu_d \neq \mu_f) \parallel (\mu_e \neq \mu_f) \end{cases} \quad (26)$$

Na Tabela 28 são apresentados os resultados do teste ANOVA considerando as amostras (a, b, c, d, e, f).

Tabela 28– Tabela ANOVA para as amostras (a, b, c, d, e, f)

Origem de Variações	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F	p-value
Entre Grupos	7,710212	5	1,542042	3,05935	0,02110
Dentro dos Grupos	18,14549	36	0,504041		
Total	25,8557	41			

Fonte: Autoria própria

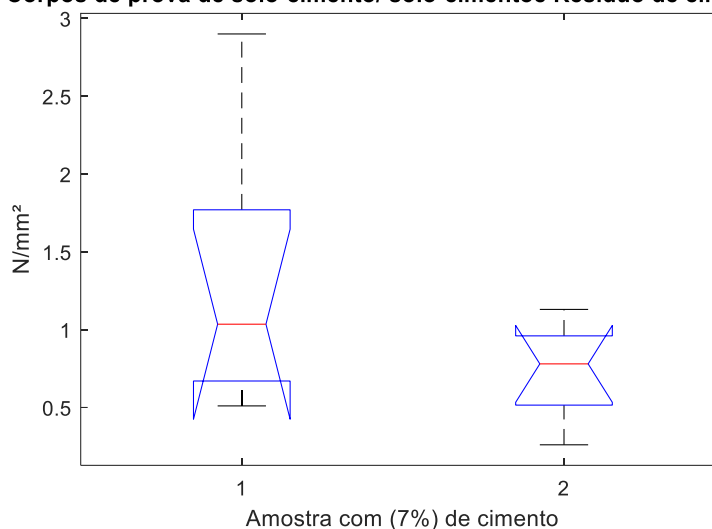
Como pode ser observado na Tabela 28 o $p\text{-value}=0,0211$, menor que o nível de significância $\alpha = 0,05$, indicando que deve-se rejeitar H_0 e aceitar H_1 , demonstrando que há diferenças significativas em pelos menos uma das médias das amostras.

Para determinar quais médias diferem entre si serão testadas os pares das médias das amostras considerando os mais influentes.

Na Figura 11 é apresentado gráfico do “*box plot*” para as amostras (a, d).

Figura 11 - Resistência à compressão simples (N/mm²) para as amostras (a, d)

Corpos de prova de solo-cimento/ solo-cimento+ Resíduo de cinza (7%)

**Fonte: Autoria própria**

Analisando os resultados da Figura 11, pode-se observar que as médias das amostras não são diferentes.

Para confirmar os resultados qualitativos apresentados na Figura 11, será utilizada o teste ANOVA, considerando as seguintes hipóteses (Equação 27):

$$\begin{cases} H_0 : \mu_a = \mu_d \\ H_1 : \mu_a \neq \mu_d \end{cases} \quad (27)$$

Na Tabela 29 são apresentados os resultados do teste ANOVA considerando as amostras (a, d).

Tabela 29– Tabela ANOVA para as amostras (a, d)

Origem de Variações	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F	p-value
Entre Grupos	1,243225	1	1,243225	3,04171	0,10305
Dentro dos Grupos	5,72215	14	0,408725		
Total	6,965375	15			

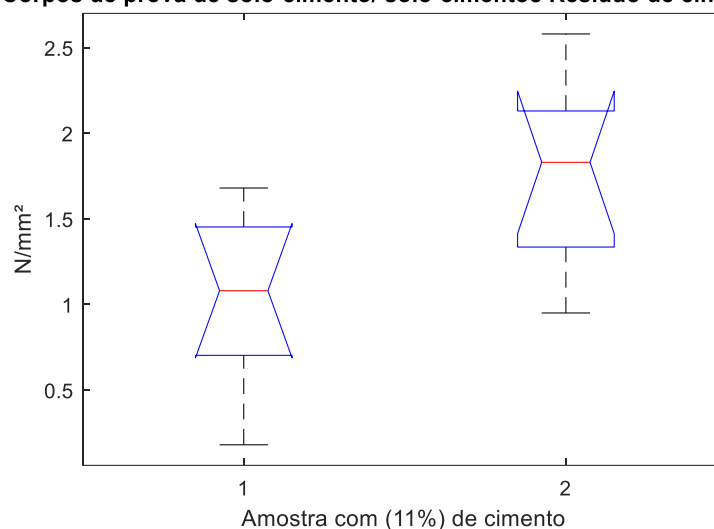
Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Tabela 29 o p -value=0,10305, maior que o nível de significância $\alpha = 0,05$, indicando que deve-se aceitar H_0 , demonstrando que não há diferenças significativas entre as duas médias.

Na Figura 12 é apresentado gráfico do “box plot” para as amostras (b, e).

Figura 12 - Resistência à compressão simples (N/mm²) para as amostras (b, e)

Corpos de prova de solo-cimento/ solo-cimento e Resíduo de cinza (11%)

**Fonte: Autoria própria**

Analisando os resultados da Figura 12, pode-se observar que as médias das amostras são diferentes.

Para confirmar os resultados qualitativos apresentados na Figura 12, será utilizada o teste ANOVA, considerando as seguintes hipóteses (Equação 28):

$$\begin{cases} H_0 : \mu_b = \mu_e \\ H_1 : \mu_b \neq \mu_e \end{cases} \quad (28)$$

Na Tabela 30 são apresentados os resultados do teste ANOVA considerando as amostras (b, e).

Tabela 30– Tabela ANOVA para as amostras (b, e)

Origem de Variações	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F	p-value
Entre Grupos	2,427339	1	2,427339	8,68466	0,00947
Dentro dos Grupos	4,471956	16	0,279497		
Total	6,899294	17			

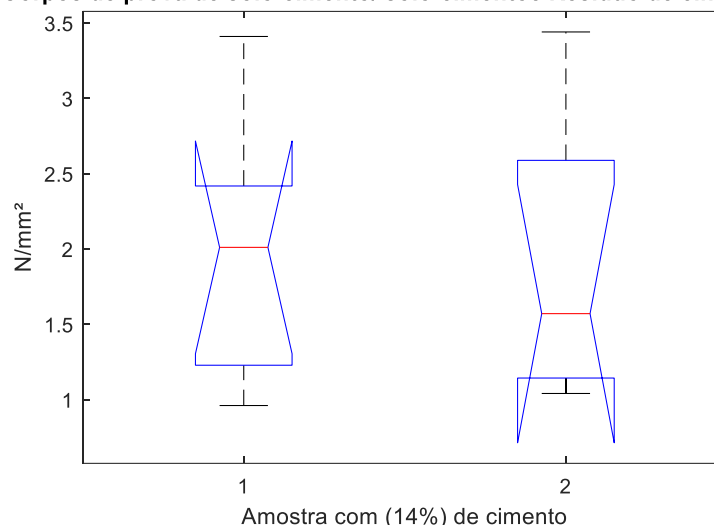
Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Tabela 30 o $p\text{-value}=0,00947$, menor que o nível de significância $\alpha = 0,05$, indicando que deve-se rejeitar H_0 e aceitar H_1 , demonstrando que há diferenças significativas entre as duas médias.

Na Figura 13 é apresentado gráfico do “*box plot*” para as amostras (c, f).

Figura 13- Resistência à compressão simples (N/mm²) para as amostras (c, f)

Corpos de prova de solo-cimento/ solo-cimento e Resíduo de cinza (14%)



Amostra com (14%) de cimento

Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados da Figura 13, pode-se observar que as médias das amostras não são diferentes.

Para confirmar os resultados qualitativos apresentados na Figura 13, será utilizada o teste ANOVA, considerando as seguintes hipóteses (Equação 29):

$$\begin{cases} H_0 : \mu_c = \mu_f \\ H_1 : \mu_c \neq \mu_f \end{cases} \quad (29)$$

Na Tabela 31 são apresentados os resultados do teste ANOVA considerando as amostras (c, f).

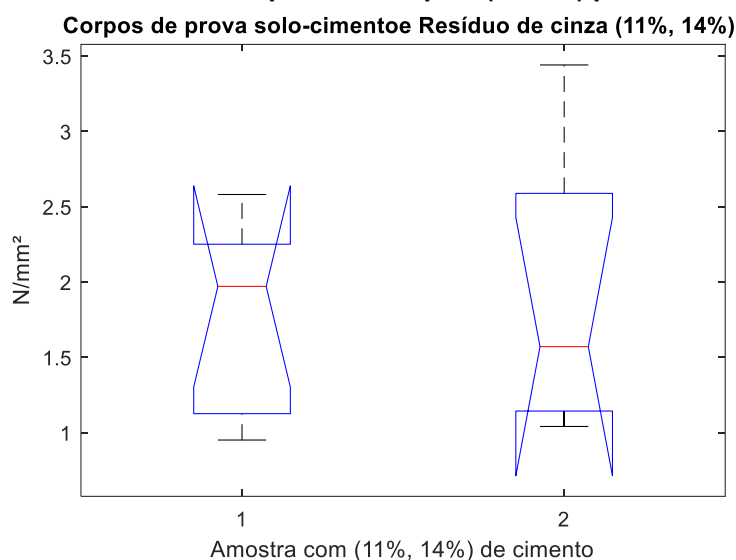
Tabela 31-Tabela ANOVA para as amostras (c, f)

Origem de Variações	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F	p-value
Entre Grupos	0,001607	1	0,001607	0,00205	0,96461
Dentro dos Grupos	9,397829	12	0,783152		
Total	9,399436	13			

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Tabela 31 o $p\text{-value}=0,96461$, maior que o nível de significância $\alpha = 0,05$, indicando que deve-se aceitar H_0 , demonstrando que não há diferenças significativas entre as duas médias.

Na Figura 14 é apresentado gráfico do “*box plot*” para as amostras (e, f).

Figura 14- Resistência à compressão simples (N/mm²) para as amostras (e, f)

Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados da Figura 14, pode-se observar que as médias das amostras não são diferentes.

Para confirmar os resultados qualitativos apresentados na Figura 14, será utilizada o teste ANOVA, considerando as seguintes hipóteses (Equação 30):

$$\begin{cases} H_0 : \mu_e = \mu_f \\ H_1 : \mu_e \neq \mu_f \end{cases} \quad (30)$$

Tabela 32– Tabela ANOVA para as amostras (e, f)

Origem de Variações	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F	p-value
Entre Grupos	0,118864	1	0,118864	0,18971	0,67088
Dentro dos Grupos	7,518686	12	0,626557		
Total	7,63755	13			

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Tabela 32 o p-value=0,67088, maior que o nível de significância $\alpha = 0,05$, indicando que deve-se aceitar H_0 , demonstrando que não há diferenças significativas entre as duas médias.

A Tabela 33 apresenta o resumo dos resultados ANOVA para os dados sem ajustes.

Tabela 33– Resumo dos resultados ANOVA para os dados sem ajustes

Amostras	Média quadrada	<i>p</i> -value	Observação	
A, b, c	Entre grupos Dentro dos grupos	1,469067 0,556619	0,0949	<i>p</i> -value > $\alpha=0,05$ aceitar H_0
D, e, f	Entre grupos Dentro dos grupos	2,628433 0,437137	0,01	<i>p</i> -value < $\alpha=0,05$ rejeitar H_0 e aceitar H_1
A, b, c, d, e, f	Entre grupos Dentro dos grupos	1,542042 0,504041	0,02110	<i>p</i> -value < $\alpha=0,05$ rejeitar H_0 e aceitar H_1
A, d	Entre grupos Dentro dos grupos	1,243225 0,408725	0,10305	<i>p</i> -value > $\alpha=0,05$ aceitar H_0
B, e	Entre grupos Dentro dos grupos	2,427339 0,279497	0,00947	<i>p</i> -value < $\alpha=0,05$ rejeitar H_0 e aceitar H_1
C, f	Entre grupos Dentro dos grupos	0,001607 0,783152	0,96461	<i>p</i> -value > $\alpha=0,05$ aceitar H_0
E, f	Entre grupos Dentro dos grupos	0,118864 0,626557	0,67088	<i>p</i> -value > $\alpha=0,05$ aceitar H_0

Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados obtidos pode-se concluir que a melhor opção é a amostra que considera a amostra que representa o corpo de prova composto por (solo/11%cimento/cinza), pois têm a média superior a observada para as amostras (solo/7%cimento, solo/11%cimento) e (solo/7%cimento/cinza), e de acordo com o teste ANOVA não tem diferença significativa para as amostras (solo/14%cimento) e (solo/14%cimento/cinza).

5.2.1 Análise para os dados com ajustes

Nesta seção são apresentados os resultados da análise estatística dos corpos de prova, sendo considerados a exclusão dos extremos com o objetivo de eliminar possíveis dados espúrios, considerando 95% de intervalo de confiança, equivalente a 0,05 de nível de significância.

Na Tabela 34 são apresentadas as variações da resistência à compressão simples (N/mm²) para os dados ajustados da Tabela 24.

Tabela 34 - Variações da resistência à compressão simples (N/mm²) para dados ajustados

Amostra (a)	Amostra (b)	Amostra (c)	Amostra (d)	Amostra (e)	Amostra (f)
0,62	0,85	1,38	0,47	1,44	1,07
0,72	1,08	1,7	0,56	1,74	1,36
0,98	1,22	2,01	0,71	1,83	1,57
1,09	1,25	2,11	0,85	1,97	2,55
1,25	1,29	2,52	0,88	2,07	2,6

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 35, são apresentados os cálculos estatísticos para os dados apresentados na Tabela 34.

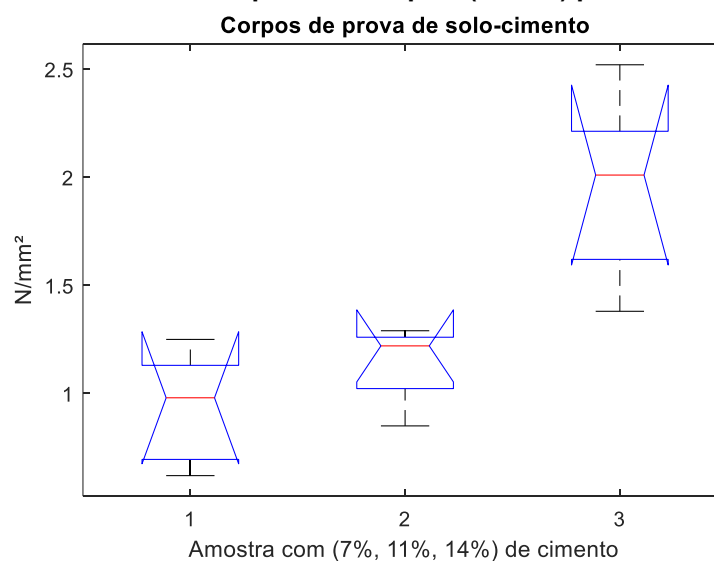
Tabela 35– Estatísticas das variações da resistência à compressão simples (N/mm²) para dados ajustados

	Amostra (a)	Amostra (b)	Amostra (c)	Amostra (d)	Amostra (e)	Amostra (f)
\bar{X}	0,932000	1,138000	1,944000	0,694000	1,810000	1,830000
S'	0,260135	0,179360	0,430500	0,178410	0,242590	0,703100
IC	0,323000	0,222705	0,534536	0,221525	0,301216	0,873014
$\mu_{\max} = \bar{X} + IC$	1,255000	1,461000	2,267000	1,017000	2,133000	2,153000
$\mu_{\min} = \bar{X} - IC$	0,609000	0,815000	1,621000	0,371000	1,487000	1,507000

Fonte: Autoria própria

5.2.1.1 Análise de variância (ANOVA)

Na Figura 15 é apresentado gráfico do “box plot” para as amostras (a, b, c).

Figura 15- Resistência à compressão simples (N/mm²) para as amostras (a, b, c)

Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados da Figura 15, pode-se observar que as médias das amostras com ajustes são diferentes.

Para confirmar os resultados qualitativos apresentados na Figura 15, será utilizada o teste ANOVA, considerando as seguintes hipóteses (Equação 31):

$$\begin{cases} H_0 : \mu_a = \mu_b = \mu_c \\ H_1 : (\mu_a \neq \mu_b) \parallel (\mu_a \neq \mu_c) \parallel (\mu_b \neq \mu_c) \end{cases} \quad (31)$$

Na Tabela 36 são apresentados os resultados do teste ANOVA considerando as amostras (a, b, c).

Tabela 36– Tabela ANOVA para as amostras (a, b, c)

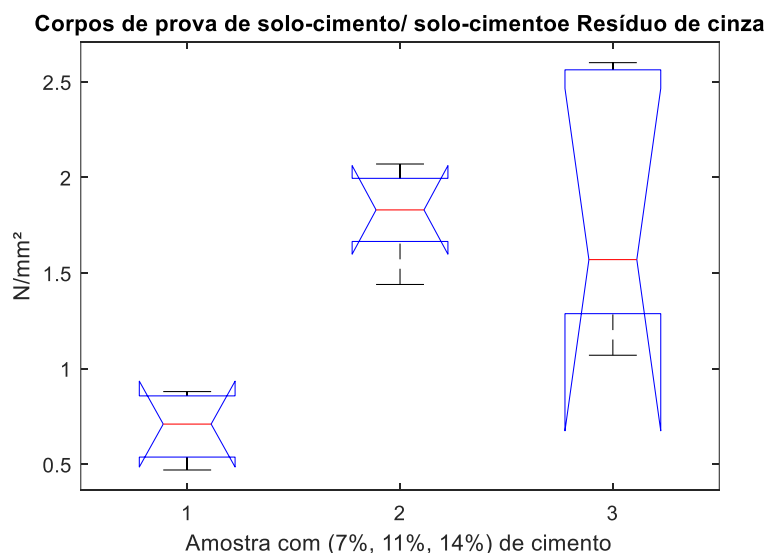
Origem de Variações	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F	p-value
Entre Grupos	2,86036	2	1,43018	15,0455	0,00053
Dentro dos Grupos	1,14068	12	0,095057		
Total	4,00104	14			

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Tabela 36 o $p\text{-value}=0,00053$, menor que o nível de significância $\alpha = 0,05$, indicando que deve-se rejeitar H_0 e aceitar H_1 , demonstrando que há diferenças significativas entre as médias das amostras quando os dados são ajustados para eliminar os extremos.

Na Figura 16 é apresentado o gráfico do “box plot” para as amostras (d, e, f).

Figura 16 - Resistência à compressão simples (N/mm²) para as amostras (d, e, f)



Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados da Figura 16, pode-se observar que as médias das amostras são diferentes.

Para confirmar os resultados qualitativos apresentados na Figura 16, será utilizada o teste ANOVA, considerando as seguintes hipóteses (Equação 32):

$$\begin{cases} H_0 : \mu_d = \mu_e = \mu_f \\ H_1 : (\mu_d \neq \mu_e) \parallel (\mu_d \neq \mu_f) \parallel (\mu_e \neq \mu_f) \end{cases} \quad (32)$$

Na Tabela 37 são apresentados os resultados do teste ANOVA considerando as amostras (d, e, f).

Tabela 37 – Tabela ANOVA para as amostras (d, e, f)

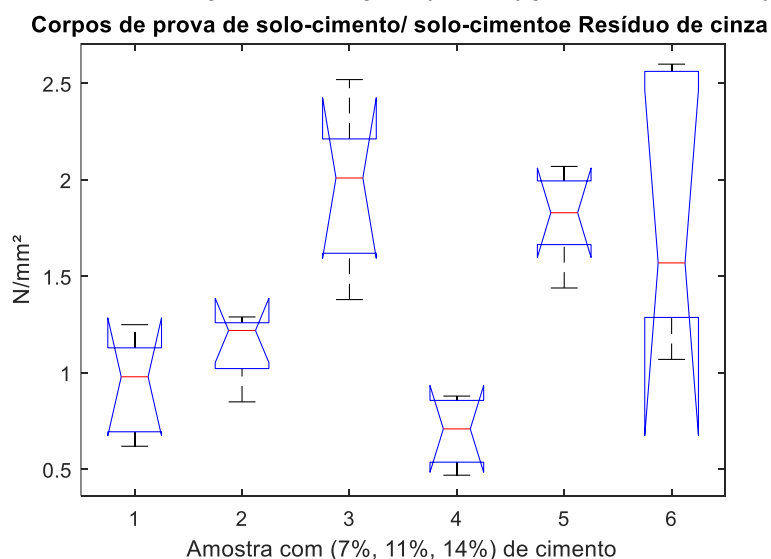
Origem de Variações	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F	p-value
Entre Grupos	4,227253	2	2,113627	10,8385	0,00204
Dentro dos Grupos	2,34012	12	0,19501		
Total	6,567373	14			

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Tabela 37 o $p\text{-value}=0,00204$, menor que o nível de significância $\alpha = 0,05$, indicando que deve-se rejeitar H_0 e aceitar H_1 , demonstrando que há diferenças significativas em pelos menos uma das médias das amostras.

Na Figura 17 é apresentado gráfico do “*box plot*” para todas as amostras (a, b, c, d, e, f).

Figura 17- Resistência à compressão simples (N/mm²) para as amostras (a, b, c, d, e, f)



Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados da Figura 17, pode-se observar que as médias das amostras são diferentes.

Para confirmar os resultados qualitativos apresentados na Figura 17, será utilizada o teste ANOVA, considerando as seguintes hipóteses (Equação 33):

$$\begin{cases} H_0 : \mu_a = \mu_b = \mu_c = \mu_d = \mu_e = \mu_f \\ H_1 : (\mu_d \neq \mu_e) \parallel (\mu_d \neq \mu_f) \parallel (\mu_e \neq \mu_f) \parallel (\mu_d \neq \mu_e) \parallel (\mu_d \neq \mu_f) \parallel (\mu_e \neq \mu_f) \end{cases} \quad (33)$$

Na Tabela 38 são apresentados os resultados do teste ANOVA considerando as amostras (a, b, c, d, e, f).

Tabela 38– Tabela ANOVA para as amostras (a, b, c, d, e, f)

Origem de Variações	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F	p-value
Entre Grupos	7,172947	5	1,434589	9,89144	0,00031
Dentro dos Grupos	3,4808	24	0,145033		
Total	10,65375	29			

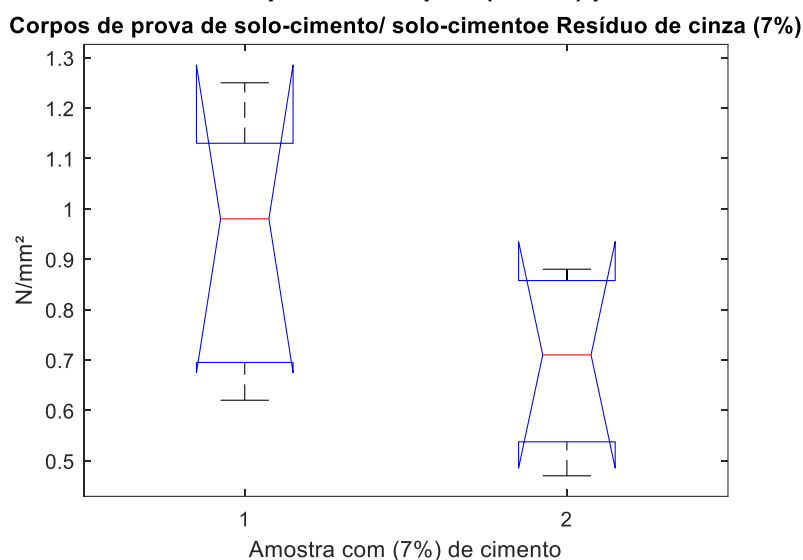
Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Tabela 38 o $p\text{-value}=0,00031$, menor que o nível de significância $\alpha = 0,05$, indicando que deve-se rejeitar H_0 e aceitar H_1 , demonstrando que há diferenças significativas em pelos menos uma das médias das amostras.

Para determinar quais médias diferem entre si serão testadas os pares das médias das amostras considerando os mais influentes.

Na Figura 18 é apresentado gráfico do “*box plot*” para as amostras (a, d).

Figura 18- Resistência à compressão simples (N/mm²) para as amostras (a, d)



Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados da Figura 18, pode-se observar que as médias das amostras não são diferentes.

Para confirmar os resultados qualitativos apresentados na Figura 18, será utilizada o teste ANOVA, considerando as seguintes hipóteses (Equação 34):

$$\begin{cases} H_0 : \mu_a = \mu_d \\ H_1 : \mu_a \neq \mu_d \end{cases} \quad (34)$$

Na Tabela 39 são apresentados os resultados do teste ANOVA considerando as amostras (a, d).

Tabela 39– Tabela ANOVA para as amostras (a, d)

Origem de Variações	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F	p-value
Entre Grupos	0,14161	1	0,14161	2,84643	0,13005
Dentro dos Grupos	0,398	8	0,04975		
Total	0,53961	9			

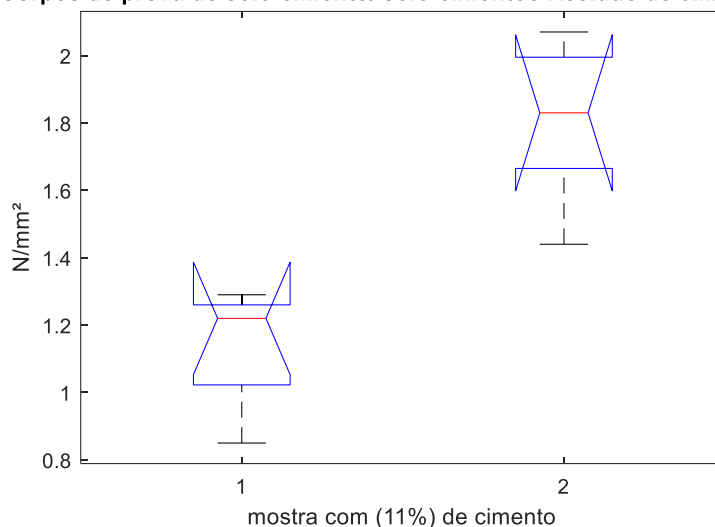
Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Tabela 39 o $p\text{-value}=0,13005$, maior que o nível de significância $\alpha = 0,05$, indicando que deve-se aceitar H_0 , demonstrando que não há diferenças significativas entre as duas médias.

Na Figura 19 é apresentado gráfico do “box plot” para as amostras (b, e).

Figura 19- Resistência à compressão simples (N/mm²) para as amostras (b, e)

Corpos de prova de solo-cimento/ solo-cimento e Resíduo de cinza (11%)

**Fonte: Autoria própria**

Analisando os resultados da Figura 19, pode-se observar que as médias das amostras são diferentes.

Para confirmar os resultados qualitativos apresentados na Figura 19, será utilizada o teste ANOVA, considerando as seguintes hipóteses (Equação 35):

$$\begin{cases} H_0 : \mu_b = \mu_e \\ H_1 : \mu_b \neq \mu_e \end{cases} \quad (35)$$

Na Tabela 40 são apresentados os resultados do teste ANOVA considerando as amostras (b, e).

Tabela 40– Tabela ANOVA para as amostras (b, e)

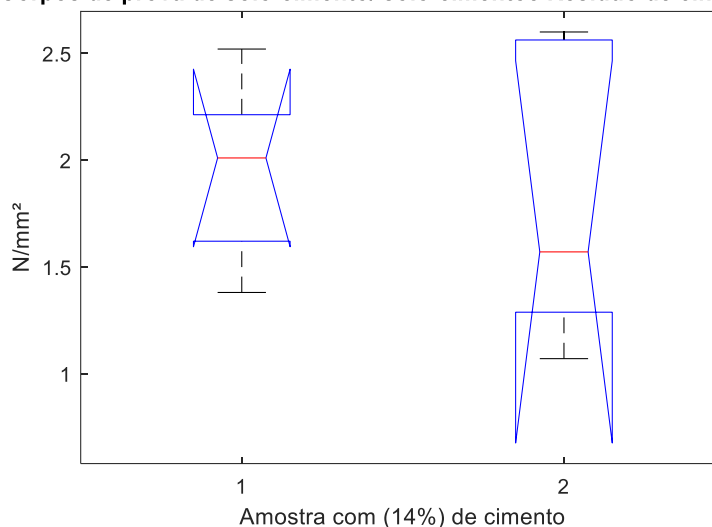
Origem de Variações	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F	p-value
Entre Grupos	1,12896	1	1,12896	24,8068	0,00107
Dentro dos Grupos	0,36408	8	0,04551		
Total	1,49304	9			

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Tabela 40 o $p\text{-value}=0,00107$, menor que o nível de significância $\alpha = 0,05$, indicando que deve-se rejeitar H_0 e aceitar H_1 , demonstrando que há diferenças significativas entre as duas médias.

Na Figura 20 é apresentado gráfico do “box plot” para as amostras (c, f).

Figura 20- Resistência à compressão simples (N/mm²) para as amostras (c, f)
Corpos de prova de solo-cimento/ solo-cimento e Resíduo de cinza (14%)



Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados da Figura 20, pode-se observar que as médias das amostras não são diferentes.

Para confirmar os resultados qualitativos apresentados na Figura 20, será utilizada o teste ANOVA, considerando as seguintes hipóteses (Equação 36):

$$\begin{cases} H_0 : \mu_c = \mu_f \\ H_1 : \mu_c \neq \mu_f \end{cases} \quad (36)$$

Na Tabela 41 são apresentados os resultados do teste ANOVA considerando as amostras (c, f).

Tabela 41– Tabela ANOVA para as amostras (c, f)

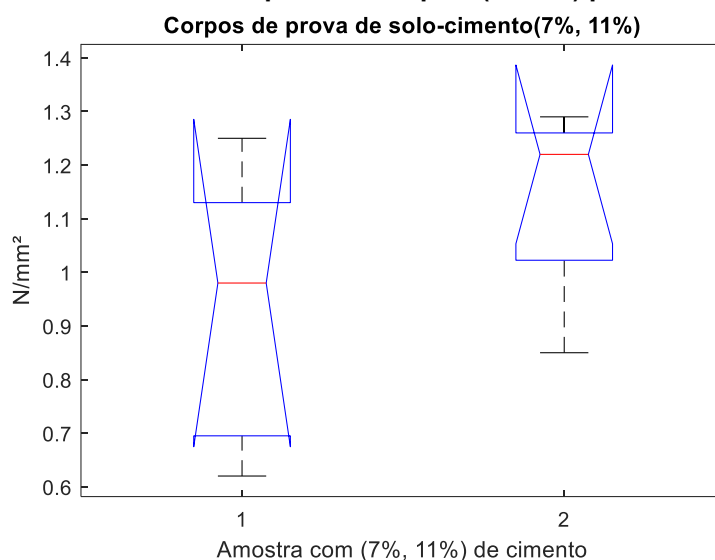
Origem de Variações	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F	p-value
Entre Grupos	0,03249	1	0,03249	0,095604	0,76507
Dentro dos Grupos	2,71872	8	0,33984		
Total	2,75121	9			

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Tabela 41 o $p\text{-value}=0,76507$, maior que o nível de significância $\alpha = 0,05$, indicando que deve-se aceitar H_0 , demonstrando que não há diferenças significativas entre as duas médias.

Na Figura 21 é apresentado gráfico do “*box plot*” para as amostras (a, b).

Figura 21- Resistência à compressão simples (N/mm²) para as amostras (a, b)



Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados da Figura 21, pode-se observar que as médias das amostras não são diferentes.

Para confirmar os resultados qualitativos apresentados na Figura 21, será utilizada o teste ANOVA, considerando as seguintes hipóteses (Equação 37):

$$\begin{cases} H_0 : \mu_a = \mu_b \\ H_1 : \mu_a \neq \mu_b \end{cases} \quad (37)$$

Na Tabela 42 são apresentados os resultados do teste ANOVA considerando as amostras (a, b).

Tabela 42– Tabela ANOVA para as amostras (a, b)

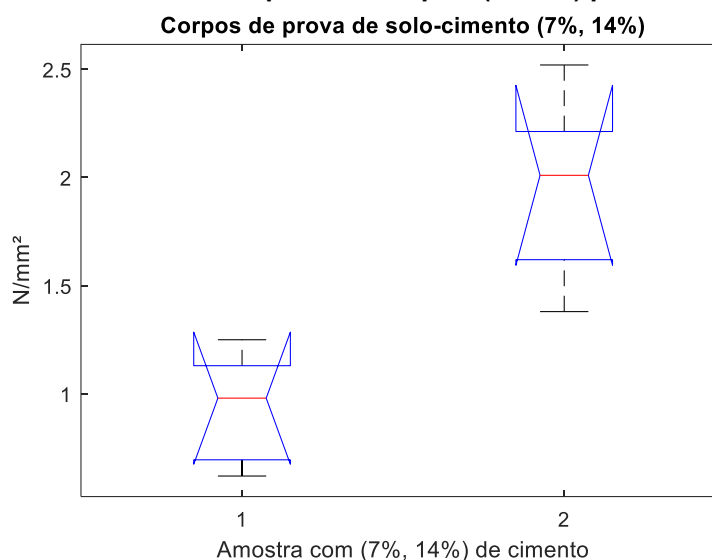
Origem de Variações	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F	p-value
Entre Grupos	0,10609	1	0,10609	2,1252	0,183002
Dentro dos Grupos	0,39936	8	0,04992		
Total	0,50545	9			

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Tabela 42 o $p\text{-value}=0,183002$, maior que o nível de significância $\alpha = 0,05$, indicando que deve-se aceitar H_0 , demonstrando que não há diferenças significativas entre as duas médias.

Na Figura 22 é apresentado gráfico do “*box plot*” para as amostras (a, c).

Figura 22- Resistência à compressão simples (N/mm²) para as amostras (a, c)



Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados da Figura 22, pode-se observar que as médias das amostras são diferentes.

Para confirmar os resultados qualitativos apresentados na Figura 22, será utilizada o teste ANOVA, considerando as seguintes hipóteses (Equação 38):

$$\begin{cases} H_0 : \mu_a = \mu_c \\ H_1 : \mu_a \neq \mu_c \end{cases} \quad (38)$$

Na Tabela 43 são apresentados os resultados do teste ANOVA considerando as amostras (a, c).

Tabela 43– Tabela ANOVA para as amostras (a, c)

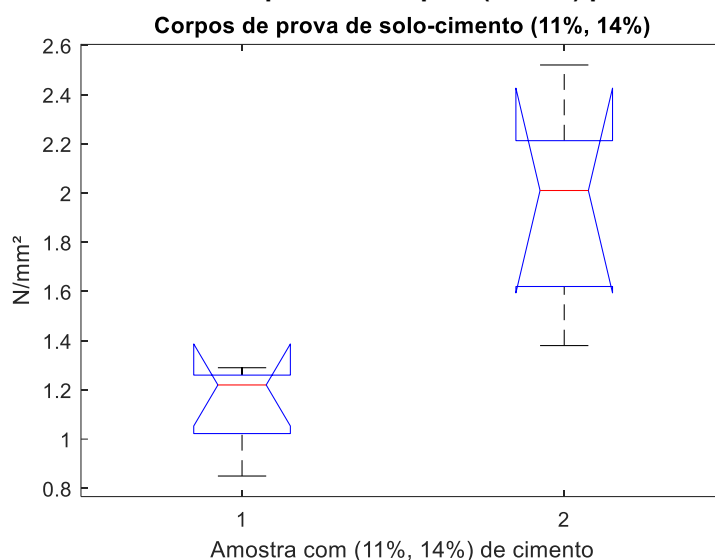
Origem de Variações	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F	p-value
Entre Grupos	2,56036	1	2,56036	20,24	0,002005
Dentro dos Grupos	1,012	8	0,1265		
Total	3,57236	9			

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Tabela 43 o $p\text{-value}=0,002005$, menor que o nível de significância $\alpha = 0,05$, indicando que deve-se rejeitar H_0 e aceitar H_1 , demonstrando que há diferenças significativas entre as duas médias.

Na Figura 23 é apresentado gráfico do “*box plot*” para as amostras (b, c).

Figura 23- Resistência à compressão simples (N/mm²) para as amostras (b, c)



Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados da Figura 23, pode-se observar que as médias das amostras são diferentes.

Para confirmar os resultados qualitativos apresentados na Figura 23, será utilizada o teste ANOVA, considerando as seguintes hipóteses (Equação 39):

$$\begin{cases} H_0 : \mu_b = \mu_c \\ H_1 : \mu_b \neq \mu_c \end{cases} \quad (39)$$

Na Tabela 44 são apresentados os resultados do teste ANOVA considerando as amostras (b, c).

Tabela 44– Tabela ANOVA para as amostras (b, c)

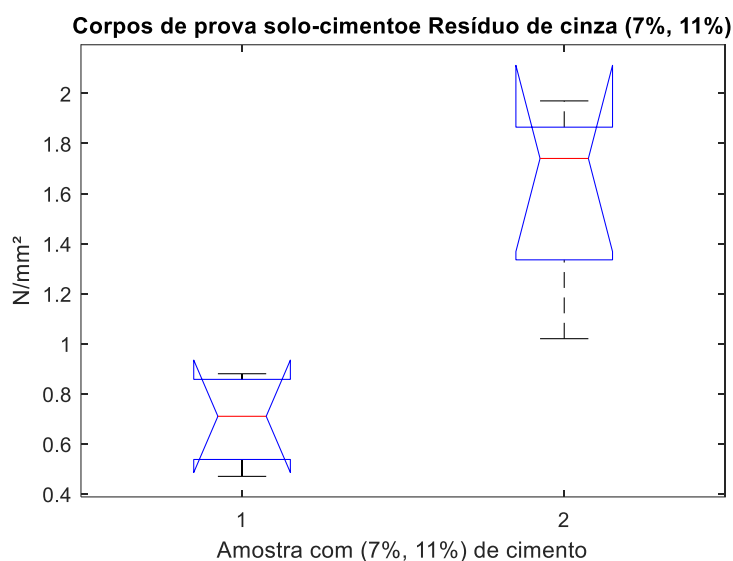
Origem de Variações	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F	p-value
Entre Grupos	1,62409	1	2,56036	14,93416	0,004779
Dentro dos Grupos	0,87	8	0,1265		
Total	2,49409	9			

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Tabela 44 o $p\text{-value}=0,004779$, menor que o nível de significância $\alpha = 0,05$, indicando que deve-se rejeitar H_0 e aceitar H_1 , demonstrando que há diferenças significativas entre as duas médias.

Na Figura 24 é apresentado gráfico do “*box plot*” para as amostras (d, e).

Figura 24- Resistência à compressão simples (N/mm²) para as amostras (d, e)



Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados da Figura 24, pode-se observar que as médias das amostras são diferentes.

Para confirmar os resultados qualitativos apresentados na Figura 24, será utilizada o teste ANOVA, considerando as seguintes hipóteses (Equação 40):

$$\begin{cases} H_0 : \mu_d = \mu_e \\ H_1 : \mu_d \neq \mu_e \end{cases} \quad (40)$$

Na Tabela 45 são apresentados os resultados do teste ANOVA considerando as amostras (d, e).

Tabela 45– Tabela ANOVA para as amostras (d, e)

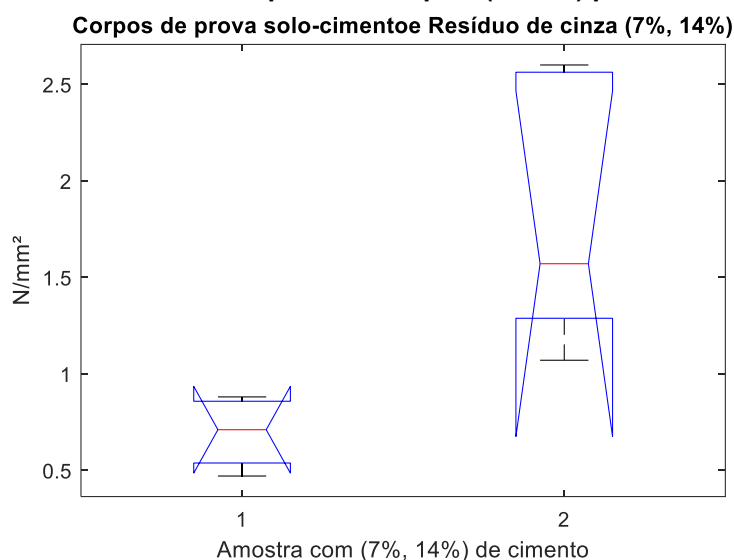
Origem de Variações	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F	p-value
Entre Grupos	2,05209	1	2,05209	23,49542	0,001276
Dentro dos Grupos	0,69872	8	0,08734		
Total	2,75081	9			

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Tabela 45 o $p\text{-value}=0,001276$, menor que o nível de significância $\alpha = 0,05$, indicando que deve-se rejeitar H_0 e aceitar H_1 , demonstrando que há diferenças significativas entre as duas médias.

Na Figura 25 é apresentado gráfico do “box plot” para as amostras (d, f).

Figura 25- Resistência à compressão simples (N/mm²) para as amostras (d, f)



Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados da Figura 25, pode-se observar que as médias das amostras são diferentes.

Para confirmar os resultados qualitativos apresentados na Figura 25, será utilizada o teste ANOVA, considerando as seguintes hipóteses (Equação 41):

$$\begin{cases} H_0 : \mu_d = \mu_f \\ H_1 : \mu_d \neq \mu_f \end{cases} \quad (41)$$

Na Tabela 46 são apresentados os resultados do teste ANOVA considerando as amostras (d, f).

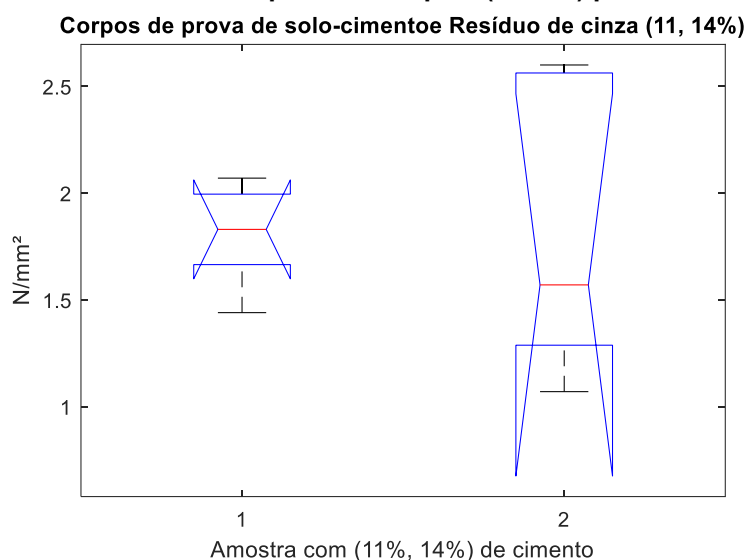
Tabela 46– Tabela ANOVA para as amostras (d, f)

Origem de Variações	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F	p-value
Entre Grupos	3,22624	1	3,22624	12,26288	0,008057
Dentro dos Grupos	2,10472	8	0,26309		
Total	5,33096	9			

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Tabela 46 o $p\text{-value}=0,008057$, menor que o nível de significância $\alpha=0,05$, indicando que deve-se rejeitar H_0 e aceitar H_1 , demonstrando que há diferenças significativas entre as duas médias.

Na Figura 26 é apresentado gráfico do “box plot” para as amostras (e, f).

Figura 26- Resistência à compressão simples (N/mm²) para as amostras (e, f)

Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados da Figura 26, pode-se observar que as médias das amostras não são diferentes.

Para confirmar os resultados qualitativos apresentados na Figura 26, será utilizada o teste ANOVA, considerando as seguintes hipóteses (Equação 42):

$$\begin{cases} H_0 : \mu_e = \mu_f \\ H_1 : \mu_e \neq \mu_f \end{cases} \quad (42)$$

Na Tabela 47 são apresentados os resultados do teste ANOVA considerando as amostras (e, f).

Tabela 47– Tabela ANOVA para as amostras (e, f)

Origem de Variações	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrada	F	p-value
Entre Grupos	0,001	1	0,001	0,003615	0,953529
Dentro dos Grupos	2,2128	8	0,2766		
Total	2,2138	9			

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Tabela 47 o $p\text{-value}=0,953529$, maior que o nível de significância $\alpha = 0,05$, indicando que deve-se aceitar H_0 , demonstrando que não há diferenças significativas entre as duas médias.

A Tabela 48 apresenta o resumo dos resultados ANOVA para as amostras com ajustes.

Tabela 48- Resumo dos resultados ANOVA para os dados com ajustes

Amostras	Média quadrada	p -value	Observação	
A, b, c	Entre grupos Dentro dos grupos	1,43018 0,095057	0,00053	p -value < $\alpha=0,05$ rejeitar H_0 e aceitar H_1
D, e, f	Entre grupos Dentro dos grupos	2,113627 0,19501	0,00204	p -value < $\alpha=0,05$ rejeitar H_0 e aceitar H_1
A, b, c, d, e, f	Entre grupos Dentro dos grupos	1,434589 0,145033	0,00031	p -value < $\alpha=0,05$ rejeitar H_0 e aceitar H_1
A, d	Entre grupos Dentro dos grupos	0,14161 0,04975	0,13005	p -value > $\alpha=0,05$ aceitar H_0
B, e	Entre grupos Dentro dos grupos	1,12896 0,04551	0,00107	p -value < $\alpha=0,05$ rejeitar H_0 e aceitar H_1
C, f	Entre grupos Dentro dos grupos	0,03249 0,33984	0,76507	p -value > $\alpha=0,05$ aceitar H_0
A, b	Entre grupos Dentro dos grupos	0,10609 0,04992	0,183002	p -value > $\alpha=0,05$ aceitar H_0
A, c	Entre grupos Dentro dos grupos	2,56036 0,1265	0,02005	p -value < $\alpha=0,05$ rejeitar H_0 e aceitar H_1
B, c	Entre grupos Dentro dos grupos	2,56036 0,1265	0,004779	p -value < $\alpha=0,05$ rejeitar H_0 e aceitar H_1
D, e	Entre grupos Dentro dos grupos	2,05209 0,08734	0,001276	p -value < $\alpha=0,05$ rejeitar H_0 e aceitar H_1
D, f	Entre grupos Dentro dos grupos	3,22624 0,26309	0,008057	p -value < $\alpha=0,05$ rejeitar H_0 e aceitar H_1
E, f	Entre grupos Dentro dos grupos	0,001 0,2766	0,953529	p -value > $\alpha=0,05$ aceitar H_0

Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados obtidos nota-se que a melhor opção é a mesma observada para os dados sem ajustes, sendo a amostra que representa os corpos de prova composto por (solo/11% de cimento e 30% de resíduo de cinza), pois conforme os cálculos das médias das amostras, a média obtida para esta amostra foi superior a observada para as amostras (solo/7% cimento e solo/11% cimento) e (solo/7% cimento/30% de resíduo de cinza) e de acordo com o teste ANOVA não tem diferença significativa para as amostras

(solo/14%cimento) e (solo/14%cimento/30% resíduo de cinza) com o p-value obtido de 0,953529 superior ao nível de significância $\alpha = 0,05$.

5.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Quanto a viabilidade econômica da confecção de tijolos de solo-cimento-resíduo de cinza, calculou-se o custo da matéria prima a ser utilizada, com valores de mercado, considerando que o resíduo de cinza foi fornecido por uma empresa de médio porte da região de Ponta Grossa-PR, como uma alternativa para a destinação final do resíduo.

Segundo dados fornecidos por uma empresa de grande porte de Ponta Grossa-PR o valor médio de geração de resíduo de cinza de caldeira, considerando os meses de janeiro e outubro de 2020 foi 16 toneladas/mês.

A partir da análise estatística, estabeleceu-se como melhor dosagem as amostras compostas por (solo, 11% de cimento e 30% de resíduo de cinza). Assim, como para os corpos de prova, para a dosagem dos tijolos utilizou-se três pesos específicos aparentes secos (γ_d): 16 kN/m³, 16,50 kN/m³ e 17 kN/m³, para os cálculos da massa seca de solo, cimento e água necessários à mistura.

Adotou-se as medidas do tijolo padrão Tipo B, previstas na Norma NBR 8491 (ABNT, 2012), com dimensões: 24 cm X 12 cm x 7 cm. Calculou-se as matérias-primas para 1 tijolo e para 1000 tijolos, para cada dosagem, e considerou-se a substituição do resíduo de cinza por areia, para comparação. Considerou-se que o volume de uma carga de solo equivale a 7m³ e corresponde a R\$ 200,00 (já incluso o transporte), o preço do cimento é referente a um saco de 50 kg e da areia média a um saco de 20 kg.

Para o cálculo do volume de solo necessário, utilizou-se a densidade real dos grãos de solo 2,622 g/cm³ e a massa de solo foi retirada do programa experimental de moldagem. O volume de solo das dosagens foi obtido por meio da Equação 43 (PINTO, 2006):

$$d = \frac{M}{V} \quad (43)$$

Utilizou-se o fator de empolamento, para ajustar o volume de solo solto, visto que o solo quando transportado, sofre variação em seu volume. A taxa de empolamento considerada, foi 25% terra comum seca (solos argilo-siltosos com areia) (RICARDO E CATALANI, 1990 *APUD* ROCHA, BARROS E VIEIRA, 2012).

O volume de solo solto, foi obtido por meio da Equação 44:

$$V_s = V_c (1 + E) \quad (44)$$

Conforme a Tabela 49 a dosagem composta por solo, 30% de resíduo e 11% de cimento com peso específico aparente seco de 17 kN/m³, para um tijolo tem o custo de R\$ 0,03 para o solo, R\$ 0,20 para o cimento e um custo total de R\$ 0,23. Para a produção de 1000 tijolos o custo do solo foi R\$ 31,07 e o cimento R\$ 201,60 com um custo final de R\$ 232,67.

Tabela 49 – Custo da matéria-prima para tijolos solo-cimento-resíduo de cinza com peso específico aparente seco de 17 kN/m³

Custo de materiais				
Dosagem: Y _d = 17 kN/m ³ , Teor de cimento 11 % e 30% de resíduo de cinza				
Insumo	Massa seca Kg (+10%)	Custo para um tijolo padrão B	Massa seca Kg (+10%)	Custo para 1000 tijolos padrão B
Solo	2,3	R\$ 0,03	2300	R\$ 31,07
Cimento (50 Kg)	0,42	R\$ 0,20	420	R\$ 201,60
Resíduo de cinza	1,16	Fornecido pela empresa	1160	Fornecido pela empresa
Total		R\$ 0,23		R\$ 232,67

Fonte: Autoria própria

A Tabela 50 apresenta a dosagem composta por solo, 30% de resíduo e 11% de cimento com peso específico aparente seco de 16,50 kN/m³, para um tijolo tem o custo de R\$ 0,03 para o solo, R\$ 0,20 para o cimento e um custo total de R\$ 0,23. Para a produção de 1000 tijolos o custo do solo é R\$ 30,36 e o cimento R\$ 196,80 com um custo final de R\$ 227,16.

Tabela 50 – Custo da matéria-prima para tijolos solo-cimento-resíduo de cinza com peso específico aparente seco de 16,50 kN/m³

(Continua)

Custo de materiais				
Dosagem: Y _d = 16,50 kN/m ³ , Teor de cimento 11 % e 30% de resíduo de cinza				
Insumo	Massa Kg (+10%)	Custo para um tijolo padrão B	Massa Kg (+10%)	Custo para 1000 tijolos padrão B
Solo	2,24	R\$ 0,03	2240	R\$ 30,36
Cimento (50 Kg)	0,41	R\$ 0,20	410	R\$ 196,80

Tabela 50 – Custo da matéria-prima para tijolos solo-cimento-resíduo de cinza com peso específico aparente seco de 16,50 kN/m³

Insumo	Massa Kg (+10%)	Custo para um tijolo padrão B	(Conclusão).	
			Massa Kg (+10%)	Custo para 1000 tijolos padrão B
Resíduo de cinza	1,12	Fornecido pela empresa	1120	Fornecido pela empresa
Total		R\$ 0,23		R\$ 227,16

Fonte: Autoria própria

A Tabela 51 descreve os valores para dosagem composta por solo, 30% de resíduo e 11% de cimento com peso específico aparente seco de 16 kN/m³, para um tijolo tem o custo de R\$ 0,03 para o solo, R\$ 0,19 para o cimento e um custo total de R\$ 0,22. Para a produção de 1000 tijolos o custo do solo é R\$ 29,64 e o cimento R\$ 192,00 com um custo final de R\$ 221,64.

Tabela 51 – Custo da matéria-prima para tijolos solo-cimento-resíduo de cinza com peso específico aparente seco de 16 kN/m³

Custo de materiais				
Dosagem: $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$, Teor de cimento 11 % e 30% de resíduo de cinza				
Insumo	Massa Kg (+10%)	Custo para um tijolo padrão B	Massa Kg (+10%)	Custo para 1000 tijolos padrão B
Solo	2,17	R\$ 0,03	2170	R\$ 29,64
Cimento (50 Kg)	0,40	R\$ 0,19	400	R\$ 192,00
Resíduo de cinza	1,09	Fornecido pela empresa	1090	Fornecido pela empresa
Total		R\$ 0,22		R\$ 221,64

Fonte: Autoria própria

A Tabela 52 refere-se a dosagem composta por solo, 30% de areia e 11% de cimento com peso específico aparente seco de 17 kN/m³, para um tijolo tem o custo de R\$ 0,03 para o solo, R\$ 0,20 para o cimento, R\$ 0,27 para a areia e um custo total de R\$ 0,50. Para a produção de 1000 tijolos o custo do solo é R\$ 31,07, para o cimento R\$ 201,60, para a areia R\$ 272,02 com um custo final de R\$ 504,69.

Tabela 52 – Custo da matéria-prima para tijolos solo-cimento-areia com peso específico aparente seco de 17 kN/m³

Custo de materiais				
Dosagem: Yd = 17 kN/m ³ , Teor de cimento 11 % e 30% de areia				
Insumo	Massa Kg (+10%)	Custo para um tijolo padrão B	Massa Kg (+10%)	Custo para 1000 tijolos padrão B
Solo	2,30	R\$ 0,03	2300	R\$ 31,07
Cimento (50 Kg)	0,42	R\$ 0,20	420	R\$ 201,60
Areia média (20 Kg)	1,16	R\$ 0,27	1160	R\$ 272,02
Total		R\$ 0,50		R\$ 504,69

Fonte: Autoria própria

A Tabela 53 descreve a dosagem composta por solo, 30% de areia e 11% de cimento com peso específico aparente seco de 16,50 kN/m³, para um tijolo tem o custo de R\$ 0,03 para o solo, R\$ 0,20 para o cimento, R\$ 0,26 para a areia e um custo total de R\$ 0,49. Para a produção de 1000 tijolos o custo do solo é R\$ 30,36, para o cimento R\$ 196,80, para a areia R\$ 262,64 com um custo final de R\$ 489,80.

Tabela 53– Custo da matéria-prima para tijolos solo-cimento-areia com peso específico aparente seco de 16,50 kN/m³

Custo de materiais				
Dosagem: Yd = 16,50 kN/m ³ , Teor de cimento 11 % e 30% de areia				
Insumo	Massa Kg (+10%)	Custo para um tijolo padrão B	Massa Kg (+10%)	Custo para 1000 tijolos padrão B
Solo	2,24	R\$ 0,03	2240	R\$ 30,36
Cimento (50 Kg)	0,41	R\$ 0,20	410	R\$ 196,80
Areia média (20 Kg)	1,12	R\$ 0,26	1120	R\$ 262,64
Total		R\$ 0,49		R\$ 489,80

Fonte: Autoria própria

A Tabela 54 refere-se a dosagem composta por solo, 30% de areia e 11% de cimento com peso específico aparente seco de 16 kN/m³, para um tijolo tem o custo de R\$ 0,03 para o solo, R\$ 0,19 para o cimento, R\$ 0,26 para a areia e um custo total de R\$ 0,48. Para a produção de 1000 tijolos o custo do solo é R\$ 29,64, para o cimento R\$ 192,00, para a areia R\$ 255,61 com um custo final de R\$ 477,25.

Tabela 54– Custo da matéria-prima para tijolos solo-cimento-areia com peso específico aparente seco de 16,00 kN/m³

Custo de materiais				
Dosagem: $\gamma_d = 16,00 \text{ kN/m}^3$, Teor de cimento 11 % e 30% de areia				
Insumo	Massa Kg (+10%)	Custo para um tijolo padrão B	Massa Kg (+10%)	Custo para 1000 tijolos padrão B
Solo	2,17	R\$ 0,03	2170	R\$ 29,64
Cimento (50 Kg)	0,40	R\$ 0,19	400	R\$ 192,00
Areia média (20 Kg)	1,09	R\$ 0,26	1090	R\$ 255,61
Total		R\$ 0,48		R\$ 477,25

Fonte: Autoria própria

Conforme o cálculo das matérias primas, a dosagem mais econômica para a confecção de tijolos de solo-cimento-resíduo de cinza é composta por solo, 30% de resíduo de cinza e 11% de cimento com peso específico aparente seco de 16,00 kN/m³.

A adição do resíduo de cinza em misturas de solo-cimento, para a confecção de tijolos, proporcionou uma melhor economia, se comparado com a substituição do resíduo de cinza por areia. A areia além do custo gasto com a compra, têm os impactos ambientais causados pela extração das jazidas.

6. CONCLUSÕES

Quanto as caracterizações do solo, obteve-se um material composto na sua maioria por finos, podendo ser classificado como uma argila de baixa compressibilidade. As curvas de compactação possibilitaram encontrar os pontos de peso específico aparente seco máximos e umidades de moldagem mais próximas as umidades ótimas, o solo continha teor de matéria orgânica que não interferiu nas reações de hidratação do cimento.

O resíduo foi classificado como uma areia bem graduada, por meio da realização do ensaio de compactação foi possível traçar as curvas de compactação com adição de 10, 20 e 30% de resíduo, sendo escolhido 30%, objetivando um máximo aproveitamento de resíduo. Obtendo-se os pontos de moldagem dos corpos de prova, com pontos de peso específico aparente seco e umidade próximos aos ótimos. O resíduo continha teor de matéria orgânica que não interferiu nas reações de hidratação do cimento.

O resíduo de cinza foi reutilizado, para utilização em misturas de solo-cimento, indicando que os corpos de prova com adição do resíduo, tiveram melhores resultados nos ensaios de resistência à compressão simples e absorção de água, sendo uma alternativa para a destinação final do resíduo.

A partir dos resultados do planejamento experimental, notou-se que os corpos de prova de solo-cimento tiveram uma maior influência da variável peso específico aparente seco sobre a resistência à compressão simples, ao invés do teor de cimento.

De modo geral, para as amostras de solo-cimento observou-se que para um peso específico de 17 kN/m^3 maiores teores de cimento, não geraram ganhos de resistência, diferente do observado para as amostras com 16 kN/m^3 e $16,50 \text{ kN/m}^3$ em que o crescimento da resistência à compressão simples foi linear.

Observa-se que a adição de cinza na mistura e o aumento no teor de cimento, proporcionaram um aumento significativo nos valores de resistência à compressão simples para as amostras com peso específico de 17 kN/m^3 .

Houve um crescimento linear da resistência à compressão simples, ao adicionar cimento e 30% de resíduo em misturas de solo-cimento e resíduo de cinza com pesos específicos aparentes secos de $16,50$ e 16 kN/m^3 .

Quanto a influência do peso específico aparente seco, nota-se que em amostras de solo-cimento o peso específico foi significativo para menores teores de cimento e em amostras de solo-cimento-resíduo de cinza a variação do peso específico não gerou maiores valores de resistência à compressão simples.

Quanto a relação vazios/cimento apesar da curva de tendência gerar um R^2 baixo, observou-se que corpos de prova com menores valores da relação vazios/cimento tendem a ter maiores valores de resistência à compressão simples.

Para as amostras de solo-cimento-resíduo de cinza, notou-se uma menor dispersão dos pontos, para as amostras menos densas. A adição de cimento na mistura proporcionou maiores valores de resistência, possivelmente pela adição de material granular (resíduo de cinza) que melhorou o desempenho das misturas.

Pela metodologia de dosagem adotada não foi possível estabelecer a dosagem para a confecção de materiais de solo-cimento, por ser necessário uma maior quantidade de amostras para uma maior confiabilidade. Mesmo com a dispersão obtida dos resultados, observou-se uma tendência a se ajustar o método de dosagem, que necessita de mais pontos e maior controle de moldagem para definição da metodologia de dosagem.

Quanto aos resultados do ensaio de absorção de água, tanto os corpos de prova de solo-cimento, quanto de solo-cimento-resíduo de cinza, atenderam ao especificado na ABNT: NBR 8491/2012 para os valores individuais e média das triplicatas. A adição de cinza melhorou a capacidade de absorção de água pelos corpos de prova.

Pela análise estatística dos resultados, estabeleceu-se que a melhor dosagem para a confecção de tijolos é a dosagem com composição de solo, 30% de resíduo de cinza e 11% de cimento. Em que o resultado obtido foi o mesmo para as amostras com os valores ajustados e sem ajustes.

Conforme o cálculo das matérias primas, a dosagem mais econômica para a confecção de tijolos de solo-cimento-resíduo de cinza é composta por solo, 30% de resíduo de cinza e 11% de cimento com peso específico aparente seco de 16 kN/m^3 .

A adição do resíduo de cinza em misturas de solo-cimento, para a confecção de tijolos, proporcionou uma melhor economia, se comparado com a substituição do resíduo de cinza por areia. A areia além do custo gasto com a compra, têm os impactos ambientais causados pela extração das jazidas.

6.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

- Reutilização do resíduo de cinza, para aplicação em corpos de prova de solo-cimento;
- Solo e resíduo de cinza utilizados, são da região de Ponta Grossa -PR;

- Utilizado cimento comum nos experimentos e um tempo de cura dos corpos de prova de 14 dias;
- Realização de ensaio de absorção de água e resistência à compressão simples;
- Análise da relação vazios/cimento, efeito do teor de cimento e do peso específico aparente seco;
- Na análise econômica foram feitos os cálculos das matérias-primas necessárias para a fabricação de tijolos de solo-cimento-resíduo de cinza, considerando três pesos específicos aparentes secos e substituição do resíduo de cinza por areia;

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a relação circularidade x ACV para quantificação de ganhos, incluindo: durabilidade, energia e transporte;
- Realizar moldagens com maior número de amostras para verificação dos comportamentos estudados, visando menor dispersão dos resultados para aplicação e validação da metodologia de dosagem;
- Aplicar a dosagem para os tijolos de solo-cimento e solo-cimento com adição de resíduo de cinza, verificando as normas vigentes;
- Aplicar outro resíduo na mistura para comparação;
- Testar a mistura para aplicação em pavimentos, estacas, muros de arrimo, paredes;
- Aplicar a mistura utilizando solo-cal para o mesmo resíduo;

REFERÊNCIAS

ABIKO, Alex Kenya. **Estabilização de solo com cimentos pozolânicos de cinza de casca de arroz e de resíduo cerâmico**. 1987. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1987.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR NM ISO 3310-1**: Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação Parte 1 - Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR NM 49**: Agregado Miúdo — Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 6457**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 6459**: Solo — Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

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

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 7180**: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 7181**: Solo — Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 7182**: Solo — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 8491**: Tijolo de solo-cimento — Requisitos (b). Rio de Janeiro, 2012.

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

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2002.

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

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 10834**: Bloco de solo-cimento sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2012 (Versão corrigida: 2013).

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 12024**: Solo-cimento – Moldagem e preparação de corpos de prova cilíndricos - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 12025**: Solo-cimento — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 13555**: Solo-cimento - Determinação da absorção de água - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ALBRECHT, Stefan., BRANDSTETTER, Peter., BECK, Tabea. et al. An extended life cycle analysis of packaging systems for fruit and vegetable transport in Europe. **The International Journal Life Cycle Assessment**, v. 18, p. 1549–1567, 2013.

AJAYABI, A.; et al. REBUILD: Regenerative Buildings and Construction systems for a Circular Economy. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, p. 1-8. 2019

AL-FAKIH, A.; et al. Incorporation of waste materials in the manufacture of masonry bricks: an update review. **Journal of Building Engineering**, v. 21, p. 37-54, 2019.

AMARAL, M. C.; SIQUEIRA, F.B. Soil-cement bricks incorporated with eggshell waste. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Waste and Resource Management**, v. 166, n. 3, p. 137-141. 2013.

ÂNGULO, Sérgio Cirelli; ZORDAN, Sérgio Edurado; JOHN, Vanderley Moacyr. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. São Paulo: SP, 2001. In: **IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na construção civil - materiais reciclados e suas aplicações**. CT206 - IBRACON. São Paulo - SP. 2001a

ASHOUR, T.; et al. Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum. **Energy and Buildings**, v. 104, p. 139-146, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Solo-cimento**. 22 dez. 2009. Disponível em: <https://abcp.org.br/basico-sobre-cimento/aplicacoes/solo-cimento/>. Acesso em 26 set. 2019

BARBOSA, M. F. L.; et al. Rice husk and water treatment plant sludge incorporated into soil-cement brick. **Asian Journal of Civil Engineering**, v. 20, n. 4, p. 563-570, 2019.

BARROS, Murillo Vetroni et al. Sustainability at a Brazilian university: developing environmentally sustainable practices and a life cycle assessment case study. **International Journal of Sustainability in Higher Education**, v. 21, n. 5, p. 841-859, 2020.

BARROS, Murillo Vetroni et al. Correction to: Life cycle assessment of electricity generation: a review of the characteristics of existing literature. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 1, p. 55-56, 2020

BRASIL. **Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, altera a Lei nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 25 set. 2019

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – **CONAMA**. Resolução nº 313, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=335> . Acesso em: 07 out. 2019

BÔSSO, Antônio Rafael de Souza Alves. **Desenvolvimento do Software PlanEx de Planejamento de Experimentos Online e sua aplicação didática na pós-graduação**. 2012. 172 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.

CACURO, T. A.; WALDMAN, W. R. Cinzas da queima de biomassa: aplicações e potencialidades. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 6, p. 2154-2165, 2015.

CANCIAN, M. A. et al. Influência do teor de umidade, da porosidade e do intervalo de tempo até a aplicação da mistura solo-cimento em pavimento rodoviário. **Transportes**, v. 25, n. 1, p. 41, 2017.

CARVALHO, Renan Santos de Sá. **Estudo da viabilidade da utilização de fibra de coco babaçu em formulações de tijolo de solo-cimento**. 2019. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Teresina, 2019.

CATAPRETA, Cícero Antonio Antunes. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação**. 2008. 316 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos - E Suas Aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1973.

CHIARO, D. W. **Você sabe qual a diferença entre reciclar e reutilizar?** 04 mar. 2015. Disponível em: <https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/voce-sabe-qual-a-diferenca-entre-reciclar-e-reutilizar>. Acesso em 18 jun. 2020.

CIMENTO MAUA. Conheça a trabalhabilidade e outras propriedades do concreto fresco. 09 jul. 2018. Disponível em: <https://cimentomaua.com.br/blog/conheca-trabalhabilidade-e-outras-propriedades-do-concreto-fresco/> Acesso em 16 nov. 2019

CORDEIRO, Guilherme Chagas. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. 475 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D; FAIRBAIRN, E. de M. R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, v. 32, n. 1, p. 1-5, 2009.

CONSOLI.; et al. **Revista Luso-Brasileira de Geotecnia**. N°125, julho de 2012. p. 87-94.

CRUZ, Rodrigo Caberlon. **Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatância de uma areia artificialmente cimentada**. 2008. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

DA COSTA, T. P.; et al. Environmental assessment of valorisation alternatives for woody biomass ash in construction materials. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 148, p. 67-79, 2019.

DALLACORT, R. et al. Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 511–518, 2002.

DALLA ROSA, Amanda. **Estudos dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. 2009. 200 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

DA SILVA, Sandra Regina. **Tijolos de solo-cimento reforçado com serragem de madeira**. 2005. 202 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

DANTAS, Valter Bezerra. **Desenvolvimento de blocos de solo cimento utilizando argissolo com incorporação de material armazenador de calor por mudança de fase (MMFs)**. 2015. 135 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

DE AZEVEDO, A. R. G.; et al. Influence of incorporation of glass waste on the rheological properties of adhesive mortar. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 359-368, 2017.

DE CARVALHO ARAÚJO, C. K.; et al. Circular Economy Practices on Wood Panels: A Bibliographic Analysis. **Sustainability**, v. 11, n. 4, p. 1-21, 2019.

DE LA GRÉE, G. C. H. D.; et al. Contaminated biomass fly ashes—Characterization and treatment optimization for reuse as building materials. **Waste Management**, v. 49, p. 96-109, 2016.

DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem). **ME 093/94**: Solos-Determinação da densidade real. Brasília, 1994.

DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem). **ME 213/94**: Solos-Determinação do teor de umidade. Brasília, 1994.

DUARTE, Susana Reis. **Construir com a terra**. Uma proposta de intervenção no Bairro do Barruncho. 2013. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Lisboa. Lisboa, 2013.

EMF- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **A circular economy in Brazil: an initial exploration**. Ellen Macarthur Foundation: Cowes, UK. 2017

FELT, E. J. **Factors influencing physical properties of soil-cement mixtures** Highway Research Board Bulletin, 1955.

FERNANDES JUNIOR, Wellington. **Avaliação das propriedades tecnológicas de tijolo ecológico modular de solo-cimento com incorporação de resíduo da fabricação de papel**. 2017. 53 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2017.

FERREIRA, Regis de Castro. **Desempenho físico - mecânico e propriedades termofísicas de tijolos e mini-painéis de terra crua tratada com aditivos químicos**. 2003. 202 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

FERREIRA, R. de C.; CUNHA, A. H. N. Quality evaluation of soil-cement-plant residue bricks by the combination of destructive and non-destructive tests. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 8, p. 543-549, 2017.

FERREIRA, R. de C.; GOBO, J.C da C.; CUNHA, A. H. N. Incorporação de casca de arroz e de braquiária e seus efeitos nas propriedades físicas e mecânicas de tijolos de solo-cimento. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 1, p. 1-11, 2008.

FILHO, Lupercio Luizines Cavalcanti. **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. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2016.

FIORI, Alberto Pio. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas**. Oficina de Textos, 2015.

FONSÊCA, Nayara Jhêssica Marques da. **Potencial de substituição do cimento pela cal em tijolos de solo-cimento com incorporação de resíduo cerâmico**. 2018. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

FOPPA, Diego. **Análise de Variáveis-chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados**. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

FRANCO, Janaina de Melo. **Produção de blocos de concreto para pavimentação (BCP) utilizando resíduos de galvanoplastia**. 2011. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011.

FREITAS, de. L. **Reaproveitamento de resíduos sólidos da construção civil no Brasil**. 05 jun. 2018. Disponível em:

<https://domtotal.com/noticia/1262733/2018/06/reaproveitamento-de-residuos-solidos-da-construcao-civil-no-brasil/>. Acesso em 08 jun. 2020.

GEISSDOERFER, M.; et al. The Circular Economy—A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757-768, 2017.

GEUS, L. M. de.; GARCIAS, Carlos Mello. Gestão de resíduos de construção em edificações de grande porte na cidade de Ponta Grossa. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 6, n. 2, p. 124-139, 2014.

GONÇALVES, M. S.; et al. Gerenciamento de resíduos sólidos na Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Francisco Beltrão. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, n. 15, p. 79-84, 2010.

GRANDE, Fernando Mazzeo. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. 2003. 165 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

HUARACHI, Diego Alexis Ramos et al. Life cycle assessment of traditional and alternative bricks: A review. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 80, p. 106335, 2020.

INGLES, Owen G.; METCALF, John B. **Soil stabilization principles and practice**. 1972.

ISAIA, Geraldo C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2010.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. **Relatório da situação do inventário de resíduos sólidos industriais no Estado do Paraná**, 2016. Disponível em: http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Monitoramento/DIAGNOSTICO_DE_RESIDUOS_SO_LIDOS_INDUSTRIAIS. Acesso em 23 set. 2019

ITAMBÉ. Tipos de cimento Portland. 1 set. 2008. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/tipos-de-cimento-portland/>. Acesso em 02 jul. 2020.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **Estudos avançados**, v. 25, n. 71, p. 135-158, 2011.

JORDAN, R. A.; et al. Manufacture of soil-cement bricks with the addition of sugarcane bagasse ash. **Engenharia Agrícola**, v. 39, n. 1, p. 26-31, 2019.

JURACH, Aline. **Estudo da viabilidade técnica da aplicação de solo melhorado com cimento como base de pavimento de baixo custo**. 2012. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

KOLLING, E. M.; TROGELLO, E.; MODOLO, A. J. Avaliação da resistência mecânica de diferentes traços de solo-cimento estabilizados com areia. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 7, n. 3, p. 185-191, 2012.

LARNACH, W. J. **Relationship Between Dry Density, Voids/Cement Ratio and Strength of Soil-cement Mixtures**. Civil Engineering and Public Works Reviews, Lomax Erskine and Co., London, Vol. 55, n. 648, p. 903-905, 1960.

LAUTENSCHLÄGER, Carlos Emmanuel Ribeiro. **Influência da relação vazios/cimento nos parâmetros de resistência de um solo artificialmente cimentado**. 2007. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007

LAUTENSCHLÄGER, C. E. R.; RIGHETTO, G. L.; CONSOLI, N. C. A relação vazios/cimento na análise do comportamento mecânico de solos artificialmente cimentados sob compressão triaxial. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA TÉCNICA*, 8., 2008. **ANAIS[...]**. Rio de Janeiro: Hotel Atlântico Búzios, 2008. p. 1-8.

LAPPONI, J. C. **Estatística usando o Excel**. São Paulo, Lapponi Treinamento e Editora, 2000.

LEMAITRE, C.; et al. Fostering the Integration of Circular Economy Aspects into the Construction and Real Estate Industry. *In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, p. 1-6. 2019

LEONEL, R. F.; et al. Characterization of soil-cement bricks with incorporation of used foundry sand. **Cerâmica**, v. 63, n. 367, p. 329-335, 2017.

LIMA, F. X. R. F. **Bloco de terra compactada de solo-cimento com resíduo de argamassa de assentamento e revestimento: caracterização para uso em edificações**. 2013. 128 f. Tese. (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

LIMA JÚNIOR, H. C.; WILLRICH, F. L.; BARBOSA, N. P. Structural behavior of load bearing brick walls of soil-cement with the addition of ground ceramic waste. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 552-558, 2003

LIMA, Rosa do Carmo de Oliveira. **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito**. 2010. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

LIU, X.; et al. Navigating Transitions for Sustainable Infrastructures - The Case of a New High-Speed Railway Station in Jingmen, China. **Sustainability**, v. 11, n. 15, p. 4197, 2019.

LOPES JUNIOR, Luizmar da Silva. **Parâmetros de controle de resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada**. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

LOPES, Wilza Gomes Reis. **Solo-cimento reforçado com bambu: características físico-mecânicas**. 2002. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

LUCAS, D.; BENATTI, C. T. Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 1, n. 3, p. 405–418, 2008.

MACEDO, Pamela Camargo. **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2009. 116 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Ilha da Solteira, 2009.

MARTINS, Bianca Peccin. **Estudo de alternativas para reaproveitamento de resíduos sólidos das indústrias metal-mecânicas em processos siderúrgicos**. 2010. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

MathWorks. Statistics and Machine Learning Toolbox™ User's Guide. Disponível em: <https://www.oreilly.com/library/view/matlab-for-machine/9781788398435/d122c38e-a744-4c64-9399-db79632a79c9.xhtml> . Acesso em: 10 nov. 2020.

MAZZONETTO, A. W.; FIALHO, L. Geração de energia através de resíduos sólidos na indústria de autopeças-estudo de caso. **Bioenergia em Revista: Diálogos**, v. 6, n. 2, p. 8-30, 2016.

McGill, R., J. W. Tukey, and W. A. Larsen. Variations of Boxplots. **The American Statistician**. Vol. 32, No. 1, 1978, pp. 12–16

MENDONÇA, S. F. DE.; TENÓRIO, T.M.; MARQUES, S. K. J. Estudo da incorporação de resíduo de bagaço de cana de açúcar em formulações para fabricação de tijolos solo cimento. **VII CONNEPI – Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação**. Palmas, TO 2012.

MENEZES, Ligia Cristina Micheleti de Azevedo Oliveira; YAMASHITA, Mariana. **Produção de tijolos ecológicos com cinzas de caldeira e bagaço de malte**. 2017. 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

MILANI, Ana Paula da Silva. **Avaliação físico-mecânica de tijolos de solo- cimento e de solo-cal adicionados de casca de arroz**. 2005.131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MILOVANOVIĆ, B.; et al. Wood biomass ash as a raw material in concrete industry. **Građevinar**, v. 71, n. 06, p. 505-514, 2019.

MULAZZANI, R. P; GUBIANI, P. I. Modelo de estimativa da área superficial específica do solo por meio da curva granulométrica. *In*: XI REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. 2016, Frederico Westphalen. **Anais[...]** Frederico Westphalen: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016. p. 1-3.

MUÑOZ, P.; et al. Fired clay bricks made by adding wastes: Assessment of the impact on physical, mechanical and thermal properties. 2016. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 241-252, 2016.

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

NEVES, C. M. M.; et al. (2010). **Seleção de solos e métodos de controle na construção com terra-práticas de campo**. Rede Ibero-Americana PROTERRA. Disponível em: https://www.promemoria.indaiatuba.sp.gov.br/arquivos/proterra-selecao_de_solos_2010.pdf. Acesso em 06 ago. 2019.

NETO, B. DE B; SCARMINIO, I.S; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos** – Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. 2. Ed. São Paulo: UNICAMP, 2003.

OLIVEIRA, Hélio Martins de. Cimento Portland. In: _____. **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. cap. 3, p. 35-62

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Reusing ceramic wastes in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 5, p. 832-838, 2010.

PARANÁ. **Lei nº 19.261, de 07 de dezembro de 2017**. Cria o Programa de Estadual de Resíduos Sólidos no Estado, o Paraná Resíduos em atendimento ao previsto na Política Nacional de Resíduos Sólidos para o Estado do Paraná e dá outras providências. Disponível em: <https://www.legislacao.pr.gov.br/legislacao/listarAtosAno.do?action=exibir&codAto=187176&indice=4&totalRegistros=465&anoSpan=2019&anoSelecionado=2017&mesSelecionado=0&isPaginado=true>> Acesso em 23 set. 2019

PARRON-RUBIO, M.; et al. Concrete properties comparison when substituting a 25% cement with slag from different provenances. **Materials**, v. 11, n. 6, p. 1-13, 2018.

PASCHOALIN FILHO, João A; STOROPOLI, João H; DIAS, A. J. G. Evaluation of compressive strength and water absorption of soilcement bricks manufactured with addition of pet (polyethylene terephthalate) wastes. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 38, n. 2, p. 163-171, 2016.

PAVÍA, S., et al. Impact of the properties and reactivity of rice husk ash on lime mortar properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 2, n. 9. p. 04014066, 2014.

PAVLÍKOVÁ, M.; et al. Influence of Wood-Based Biomass Ash Admixing on the Structural, Mechanical, Hygric, and Thermal Properties of Air Lime Mortars. **Materials**, v. 12, n. 14, p. 1-22, 2019.

PEREIRA, Emanuel Victor; VARGAS, Murilo Cassiano. **Estudo de dosagem para misturas de solo-cimento e resíduos de construção e demolição mediante ensaio de compressão simples**. 2019. 81f. Trabalho de Conclusão de Curso – (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2019.

PEREIRA, Kiev Luiz de Araújo. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos**. 2012. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

PEREIRA, Thiago Henrique Martins. **Determinação das características ótimas do Blend de resíduos do município de Betim/MG para coprocessamento em cimenteiras**. 2017.

96 f. Dissertação (Mestrado em sustentabilidade e tecnologia ambiental) – Instituto Federal de Minas Gerais, Bambuí, 2017.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, Eduardo da Silva. **Solo-cimento compactado: proposta de métodos de ensaio para dosagem e caracterização física e mecânica**. 2016. 209 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Bauru, 2016.

POINOT, T.; et al. Beneficial use of boiler ash in alkali-activated bricks. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 128, p. 1-10, 2018.

PORBAHA, A. State of the art in deep mixing technology. Part IV: Design considerations. **Ground Improvement**, v. 4, n. 3, p. 111–125, 2000.

PRIETTO, Pedro Domingos Marques. **Estudo do comportamento mecânico de um solo artificialmente cimentado**. 1996. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

RIBEIRO, Simone Valéria. **Reutilização de resíduo de cinza de madeira na produção de tijolo solo-cimento: formulação, propriedades e microestrutura**. 2017. 126 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2017.

RIGHETTO, Guilherme Lima. **Validação do fator vazios/agente cimentante na análise da resistência mecânica de um solo tratado com cal, cimento e resíduo de britagem de rocha**. 2008. 93 f. Trabalho de Conclusão de Curso – (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

ROCHA, Ronaldo; BARROS, José Maria de Camargo.; VIEIRA, Rubens. Contribuição ao estudo do empoamento dos solos. *In: XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*. 2012. **ANAIS[...]**.Porto de Galinhas: Summerville Beach Resort, 2012.

RODRIGUES, Mayza Loureiro Araújo. **Adição de resíduo de argamassa mistas na produção de tijolos modulares de solo-cimento**. 2008. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

ROJAS-VALENCIA, M. N.; AQUINO, E. Recycling of construction wastes for manufacturing sustainable bricks. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials**, v. 172, n. 1, p. 29-36, 2019.

ROLIM, M. M.; FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. Análise comparativa da resistência à compressão simples de corpos-de-prova, tijolos e painéis de solo-cimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 1, p. 93–98, 1999.

SANTIAGO, Cybèle Celestino. **O solo como material de construção**. 2. ed. Salvador: EDUFBA, 2001.

SEGANTINI, Antonio Anderson da Silva; ALCÂNTARA, Marco Antonio de Moraes. Solo-Cimento e Solo-Cal. In: _____. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais**, 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. cap. 27, p. 863-891

SEGANTINI, A. A. DA S.; WADA, P. H. Estudo de dosagem de tijolos de solo-cimento com adição de resíduos de construção e demolição. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 33, n. 2, p. 179-183, 2011.

SILVA, F. C.; et al. Use of biomass ash-based materials as soil fertilisers: Critical review of the existing regulatory framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 214, p. 112-124, 2019.

SILVA, R. B.; et al. Cinzas de biomassa geradas na agroindústria do cacau: caracterização e uso em substituição ao cimento. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 4, p. 321-334, 2015.

SIMÃO, L.; et al. Characterization of pulp and paper mill waste for the production of waste-based cement. **Revista Internacional de Contaminación Ambiental**, v. 35, n. 1, p. 237-246, 2019.

SIMIONI, F. C. et al. Solo-cimento autoadensável com incorporação de areia de resíduos de construção civil para aplicação em sistema de vedação vertical. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 4, p. 281-296, 2020.

SIQUEIRA, F. B.; HOLANDA, J. N. F. Effect of incorporation of grits waste on the densification behavior of soil-cement bricks. **Cerâmica**, v. 61, n. 360, p. 414-419, 2015.

SIQUEIRA, F. B.; HOLANDA, J. N. F. Reuse of grits waste for the production of soil-cement bricks. **Journal of Environmental Management**, v. 131, p. 1-6, 2013.

SOUZA, A. C. de; BROLEZE, F.M. Práticas e percepções quanto ao gerenciamento de resíduos sólidos industriais no estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Educação Ambiental**, São Paulo (SP), v. 14, n. 4, p. 386-404. 2019

SOUZA, Jônatas Macedo de. **Tijolos de solo-cimento produzidos com manipueira em substituição à água**. 2019. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

SPECHT, Luciano Pivoto. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação**. 2000. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

SPRINGWISE. **Tijolos Ecológicos são feitos a partir de resíduos industriais reciclados**. Propriedade e Construção, 2015. Disponível em: <https://www.springwise.com/eco-friendly-brick-recycled-industrial-waste/>. Acesso em 02 set. 2019.

STUMM, M.G. **Elementos de Economia Circular**. Curitiba: Fiep – Federação das Indústrias do Paraná, 2019.

TEIXEIRA, S. R.; et al. Sugarcane bagasse ash as a potential quartz replacement in red ceramic. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 91, n. 6, p. 1883-1887, 2008.

VERMA, G.; KUMAR, B. Prediction of compaction parameters for fine-grained and coarse-grained soils: a review. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 13, n. 1. p. 1-8, 2019.

VIEIRA, Sonia. **Análise de Variância: (ANOVA)**. São Paulo, Atlas, 2006.

VINAI, R.; et al. Coal combustion residues valorisation: Research and development on compressed brick production. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1088-1096, 2013.

ZANUTTO, Adriane. **Estudo da agitação intermitente em reator batelada por experimentos e fluidodinâmica computacional**. 2020. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2020.