



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**
- MESTRADO -

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DE BTC
ESTABILIZADO UTILIZANDO O PLANEJAMENTO FATORIAL
EXPERIMENTAL**

Por

Luane César Espínola Guedes

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da
Paraíba para obtenção do grau de Mestre*



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**
- MESTRADO -

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DE BTC
ESTABILIZADO UTILIZANDO O PLANEJAMENTO FATORIAL
EXPERIMENTAL**

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia
Civil e Ambiental da Universidade
Federal da Paraíba, como parte dos
requisitos para a obtenção do título
de Mestre.

Luane César Espínola Guedes

Orientador: Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo

Luane César Espínola Guedes

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DE BTC
ESTABILIZADO UTILIZANDO O PLANEJAMENTO FATORIAL
EXPERIMENTAL**

Dissertação aprovada em ____/____/____ como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo – UFPB
Orientador


Prof. Dr. Aluisio Braz de Melo – UFPB
Examinador Interno


Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro – UFPE
Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus e a Nossa Senhora, que com toda certeza essa oportunidade apareceu e a força que tive nessa trajetória foi por meio dEles.

Aos meus pais, Luiz Humberto e Aneline, que sempre me apoiaram em toda decisão que tomasse, ao meu irmão, Humberto Neto, que foi um grande incentivador dessa etapa em minha vida e a minha avó, Evelyn, que foi uma grande entusiasta da minha formação, fazendo questão de mostrar para o mundo o orgulho de ter uma neta engenheira. Sem a educação, amor e carinho que vocês me deram desde sempre, eu não seria o que sou hoje. Amo muito vocês!

À minha avó Lulu, que sempre sentiu orgulho do caminho que segui e foi um dos maiores exemplos que tive na vida. Com toda certeza ela está no céu essas horas pulando de alegria com mais esse desafio que consegui superar. Obrigada, minha avó, pela oportunidade que a senhora me deu de passar esses meus 27 anos na tua presença.

Ao meu noivo, Vitor, que nos momentos mais difíceis, nunca me deixou cair, sempre me dando forças para continuar seguindo, e me mostrando que devemos sempre agradecer, independente do momento em que estamos passando. Obrigada meu amor, você é a minha vida!

Ao professor Givanildo, que sempre se mostrou interessado com a minha pesquisa, não medindo esforços para ajudar. Que em meio das dificuldades que apareceram estava sempre pronto para ajudar, independente da hora e do dia. A este meu respeito e gratidão por seu grande exemplo de profissional e pessoa.

Aos amigos, Leovegildo Douglas, Dimas Teixeira, Carla Cavalcante, Taissa Guedes, Mohara Medeiros, José Victor Alves e Vitória de Oliveira, que durante esse tempo me ajudaram de todas as formas possíveis, de fabricação de blocos até mesmo um conselho que precisava no momento. A vocês meu mais sincero muito obrigada.

Aos técnicos do LABEME, Delby e Sebastião, pela prontidão e atenção que sempre tiveram comigo, me auxiliando e se tornando muito mais que companheiros de trabalho, tornando-se amigos.

RESUMO

Sustentabilidade é nos dias de hoje um dos maiores alvos a serem alcançados dentro da construção civil. E essa necessidade atual de se encontrar mecanismos que sejam boas alternativas para diminuir grandes problemas da atualidade, como a agressão ao meio ambiente, o alto custo das edificações e a falta de moradia é a maior justificativa para que estudos voltados para blocos de terra estabilizados com cimento estejam cada dia mais solicitados. É nesse contexto que este estudo é focado, pois é voltado para a adição de cimento, cal e fibra de sisal (juntos e separados) na mistura feita para a fabricação de blocos de terra compactados (BTC) ou blocos de terra estabilizados com cimento. Esses materiais são adicionados com o propósito de analisar e tentar melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos blocos. Essa análise foi comparativa entre os resultados encontrados com os solicitados pelas normas e também serviu como um banco de dados para possíveis sugestões de alterações da norma existente ou de novas diretrizes acerca do tema. Apesar de já haver vários estudos dessas adições em blocos de terra, não existe ainda um estudo que tenha sido feito por um planejamento estatístico, como forma de quantificar a influência do cimento, da cal e da fibra nas propriedades dos BTC, tanto de forma independente como conjuntamente, avaliando suas interações. Outro ponto positivo do planejamento experimental é a otimização da produção de BTC, permitindo-se chegar a uma melhor formulação diminuindo-se custo e tempo. Foram feitos ensaios de resistência à compressão, absorção por imersão e molhagem e secagem com o intuito de analisar o comportamento físico-mecânico do BTC. Concluiu-se a partir do planejamento fatorial experimental que as variáveis de entrada influenciaram linearmente a resistência à compressão, além de serem estatisticamente significativas. Quanto ao ensaio de absorção, sugere-se utilizar o método do DCCR (delineamento composto central rotacional), pois possivelmente as variáveis de entrada influenciaram quadraticamente seus resultados. Em relação ao ensaio de molhagem e secagem, aconselha-se fazer ensaios com mais réplicas para uma análise mais conclusiva dos resultados.

ABSTRACT

Sustainability is nowadays one of the biggest targets to be achieved within civil construction. And this current need to find mechanisms that are good alternatives to reduce major problems of the present time, such as aggression to the environment, the high cost of buildings and the lack of housing is the major justification for studies focused on soil-cement blocks are increasingly sought after. It is in this context that this study is focused, since it is focused on the addition of cement, lime and sisal fiber (together and separated) in the mixture made for the manufacture of compacted earth blocks (CEB) or soil-cement block. These materials are added for the purpose of analyzing and attempting to improve the physical and mechanical properties of the blocks. This analysis was comparative between the results found with those requested by the standards and also served as a database for possible changes to the existing standard on the topic. Although we already have several studies of these additions in blocks of land, there is not yet a study that has been done by statistical planning, as a way to reduce costs and save time, and this was proposed by this work. Tests of resistance to compression, immersion absorption and wetting and drying were done in order to analyze the physico-mechanical behavior of the CEB. After analyzing the results and statistics (through *Statistica 7.0*), it was concluded that the use of experimental factorial design for resistance to compression was successful in its proposed models, indicating a good quality in relation to its effects and responses, besides statistically significant. The absorption assays are recommended to make tests with more traces and to use the DCCR method (Rotacional Central Composite Design), because possibly for these factors the quadratic model will be statistically significant. In the humidity and drying test, it is advisable to do more tests with more replicates for a better conclusive analysis of the results.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1- Fabricação de Adobe..... | 3 |
| Figura 2-Execução de Abóbada..... | 4 |
| Figura 3-Estrutura em Abóbada com terra | 5 |
| Figura 4 - Execução em taipa de pilão de madeira (esquerda) e armadura de aço (direito) | 6 |
| Figura 5 - Eficiência de beiral e calçada na proteção de paredes de taipa..... | 6 |
| Figura 6 - Paredes feitas com taipa de pilão | 7 |
| Figura 7 - Variedades de BTC; a)maciço de superfície lisa; b)maciço com encaixes; c)com furos; d)com furos e encaixe. | 8 |
| Figura 8 - Casa feita com blocos de terra comprimidos | 8 |
| Figura 9 - Classificação das Fibras | 16 |
| Figura 10 - Processo de secagem das Fibras de Sisal em Pocinhos-PB | 24 |
| Figura 11 - Tamanho das fibras de sisal após cortadas..... | 25 |
| Figura 12 – Adição em camadas da fibra de sisal na betoneira. | 27 |
| Figura 13 - Verificação da unidade adequada para a mistura. | 27 |
| Figura 14 – Torrões de terra formados após a mistura (esquerdo); destorramento das bolas de terra (direta)..... | 28 |
| Figura 15 - Prensa Hidráulica Eco Máquinas e seu respectivo bloco. | 28 |
| Figura 16 - Corpos de prova capeados para ensaio de compressão. | 30 |
| Figura 17 - Ensaio de compressão do corpo de prova. | 31 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Quantidade de cal em função do tipo de terra usado (Ingles e Metcalf, 1972) | 11 |
| Tabela 2 - Tipos de Cimento Portland..... | 13 |
| Tabela 3 - Resumo de valores de absorção encontrados em BTC. | 14 |
| Tabela 4 – Resumo de valores de resistência à compressão já encontradas em BTC. | 15 |
| Tabela 5 - Resultados de Resistência à compressão e Absorção de Gutiérrez-Orrego | 19 |
| Tabela 6 - Matriz de Planejamento 2^3 | 21 |
| Tabela 7 - Tabela de Análise de Variância (ANOVA) | 23 |
| Tabela 8 - Matriz de Planejamento estudada | 25 |
| Tabela 9 - Total de blocos moldados e ensaiados | 29 |
| Tabela 10 - Resumo dos resultados de caracterização física da terra | 34 |
| Tabela 11 - Matriz de planejamento fatorial experimental com as variáveis independentes codificadas e reais. | 37 |
| Tabela 12 - Resultado médio de resistência à compressão sem imersão aos 30 dias. | 37 |
| Tabela 13 - Efeitos estimados do planejamento referente ao ensaio de compressão aos 30 dias e sem imersão. | 39 |
| Tabela 14 - ANOVA: resultados da análise de regressão para cimento, cal e sisal na resistência à compressão aos 30 dias e sem imersão. | 40 |
| Tabela 15 - Comparação entre Modelo Linear e outros autores | 42 |
| Tabela 16 - Resultado médio de resistência à compressão com imersão de 6h aos 30 dias. | 42 |
| Tabela 17 - Efeitos estimados do planejamento referente ao ensaio de compressão aos 30 dias e com imersão de 6h. | 43 |
| Tabela 18 - ANOVA: resultados da análise de regressão para cimento, cal e sisal na resistência à compressão aos 30 dias com imersão de 6h. | 45 |
| Tabela 19 - Resultado médio de resistência à compressão sem imersão aos 90 dias. | 46 |
| Tabela 20 - Efeitos estimados do planejamento referente ao ensaio de compressão aos 90 dias e sem imersão. | 47 |
| Tabela 21 - ANOVA: resultados da análise de regressão para cimento, cal e sisal na resistência à compressão aos 90 dias e sem imersão. | 48 |
| Tabela 22 - Comparação do modelo linear com outros autores | 50 |
| Tabela 23 - Resultado médio de resistência à compressão com imersão de 6h aos 90 dias. | 50 |
| Tabela 24 - Efeitos estimados do planejamento referente ao ensaio de compressão aos 90 dias e com imersão de 6h. | 51 |
| Tabela 25 - ANOVA: resultados da análise de regressão para cimento, cal e sisal na resistência à compressão aos 90 dias e com imersão de 6h. | 53 |
| Tabela 26 -Resultado médio de resistência à compressão sem imersão aos 180 dias. | 54 |
| Tabela 27 - Teste de Tukey para Resistência à compressão sem imersão..... | 56 |
| Tabela 28 - Efeitos estimados do planejamento referente ao ensaio de compressão aos 180 dias e sem imersão. | 56 |

| | |
|---|----|
| Tabela 29 - ANOVA: resultados da análise de regressão para cimento, cal e sisal na resistência à compressão aos 180 dias e sem imersão..... | 58 |
| Tabela 30 - Resultado médio de resistência à compressão com imersão de 6h aos 180 dias..... | 59 |
| Tabela 31- Teste de Tukey para os Traços com imersão de 6h..... | 60 |
| Tabela 32 - Efeitos estimados do planejamento referente ao ensaio de compressão aos 180 dias e com imersão de 6h..... | 62 |
| Tabela 33 - ANOVA: resultados da análise de regressão para cimento, cal e sisal na resistência à compressão aos 180 dias e com imersão de 6h..... | 63 |
| Tabela 34 - Resultado médio de absorção aos 30 dias..... | 64 |
| Tabela 35 - Efeitos estimados do planejamento referente ao ensaio de absorção aos 30 dias..... | 65 |
| Tabela 36 - ANOVA: resultados da análise de regressão para cimento, cal e sisal na absorção aos 30 dias..... | 66 |
| Tabela 37 - Resultado médio de absorção aos 180 dias..... | 67 |
| Tabela 38 - Teste de Tukey para ensaio de Absorção | 68 |
| Tabela 39 - Efeitos estimados do planejamento referente ao ensaio de absorção aos 180 dias..... | 69 |
| Tabela 40 - ANOVA: resultados da análise de regressão para cimento, cal e sisal na absorção aos 180 dias..... | 70 |
| Tabela 41 - Resultado médio de perda de massa aos 30 dias..... | 71 |
| Tabela 42 - Efeitos estimados do planejamento referente ao ensaio de molhagem e secagem aos 30 dias..... | 72 |
| Tabela 43 - ANOVA: resultados da análise de regressão para cimento, cal e sisal no ensaio de molhagem e secagem aos 30 dias..... | 73 |
| Tabela 44 - Resultado médio de perda de massa aos 180 dias..... | 74 |
| Tabela 45 - Teste de Tukey para o ensaio de molhagem e secagem..... | 76 |
| Tabela 46 - Efeitos estimados do planejamento referente ao ensaio de molhagem e secagem aos 180 dias..... | 76 |
| Tabela 47 - ANOVA: resultados da análise de regressão para cimento, cal e sisal no ensaio de molhagem e secagem aos 180 dias..... | 77 |
| Tabela 48 - Resumo dos Resultados obtidos neste estudo..... | 79 |
| Tabela 49 - Resumo das Análises Estatísticas obtidas neste estudo..... | 80 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1 - Curva Granulométrica da terra estudada..... | 35 |
| Gráfico 2- Difratograma da terra | 36 |
| Gráfico 3 - Diagrama de Pareto mostrando a influência dos fatores estudados para compressão aos 30 dias sem imersão..... | 39 |
| Gráfico 4 - Valores observados versus valores esperados para a resistência à compressão aos 30 dias sem imersão..... | 41 |
| Gráfico 5 - Resistência à compressão aos 30 dias sem imersão em função da porcentagem do cimento e da cal. | 41 |
| Gráfico 6 - Comparação entre as resistências à compressão aos 30 dias. | 43 |
| Gráfico 7 - Diagrama de Pareto mostrando a influência dos fatores estudados para compressão aos 30 dias com imersão de 6h. | 44 |
| Gráfico 8 - Valores observados versus valores esperados para a resistência à compressão aos 30 dias com imersão de 6h. | 45 |
| Gráfico 9 - Resistência à compressão aos 30 dias com imersão de 6h em função da porcentagem do cimento e do sisal | 46 |
| Gráfico 10 - Diagrama de Pareto mostrando a influencia dos fatores estudados para compressão aos 90 dias sem imersão..... | 48 |
| Gráfico 11 - Valores observados versus valores esperados para a resistência à compressão aos 90 dias sem imersão..... | 49 |
| Gráfico 12 - Resistência à compressão aos 90 dias sem imersão em função da porcentagem do cimento e da cal. | 49 |
| Gráfico 13 - Comparação entre as resistências à compressão aos 90 dias. | 51 |
| Gráfico 14 - Diagrama de Pareto mostrando a influência dos fatores estudados para compressão aos 90 dias com imersão de 6h. | 52 |
| Gráfico 15 - Valores observados versus valores esperados para a resistência à compressão aos 90 dias com imersão de 6h. | 53 |
| Gráfico 16 - Resistência à compressão aos 90 dias com imersão de 6h em função da porcentagem do cimento e da cal. | 54 |
| Gráfico 17 - Comparação das resistências à compressão sem imersão aos 30, 90 e 180 dias..... | 55 |
| Gráfico 18 - Diagrama de Pareto mostrando a influência dos fatores estudados para compressão aos 180 dias sem imersão..... | 57 |
| Gráfico 19 - Valores observados versus valores esperados para a resistência à compressão aos 180 dias sem imersão. | 58 |
| Gráfico 20 - Resistência à compressão aos 180 dias sem imersão em função da porcentagem do cimento e da cal. | 59 |
| Gráfico 21 - Comparação das resistências à compressão com imersão de 6h ao longo dos dias. | 60 |
| Gráfico 22 - Comparação entre as resistências à compressão aos 180 dias. | 61 |
| Gráfico 23 - Diagrama de Pareto mostrando a influência dos fatores estudados para compressão aos 180 dias com imersão de 6h. | 62 |
| Gráfico 24 - Valores observados versus valores esperados para a resistência à compressão aos 180 dias com imersão de 6h. | 63 |
| Gráfico 25 - Resistência à compressão aos 180 dias com imersão de 6h em função da porcentagem do cimento e da cal. | 64 |

| | |
|---|----|
| Gráfico 26 - Diagrama de Pareto mostrando a influência dos fatores estudados para ensaio de absorção aos 30 dias | 66 |
| Gráfico 27 - Comparaçao dos resultados de absorção ao longo dos dias..... | 67 |
| Gráfico 28 - Diagrama de Pareto mostrando a influência dos fatores estudados para absorção aos 180 dias..... | 69 |
| Gráfico 29 Valores observados versus valores esperados para a absorção aos 180 dias..... | 70 |
| Gráfico 30 - Absorção aos 180 dias em função da porcentagem do cimento e da cal. | 71 |
| Gráfico 31 - Diagrama de Pareto mostrando a influência dos fatores estudados para molhagem e secagem aos 30 dias..... | 73 |
| Gráfico 32 - Valores observados versus valores esperados para o ensaio de molhagem e secagem aos 30 dias..... | 74 |
| Gráfico 33 - Comparaçao dos resultados de perda de massa ao longo dos dias..... | 75 |
| Gráfico 34 - Diagrama de Pareto mostrando a influência dos fatores estudados para o ensaio de molhagem e secagem aos 180 dias. | 77 |
| Gráfico 35 - Valores observados versus valores esperados para a perda de massa .. | 78 |
| Gráfico 36 - Superfície de Resposta da Perda de Massa em função da porcentagem do cimento e da cal..... | 78 |

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABCP–Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BTC – Bloco de terra comprimido

CEB – Compressed Earth blocks

DCCR - Delineamento Composto Central Rotacional

I.P – índice de Plasticidade

L.L- Limite de Liquidez

L.P- Limite de Plasticidade

NBR – Norma Brasileira

Sumário

| | |
|---|-----------|
| LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS | ix |
| 1-Introdução | 1 |
| 1.1-Objetivos | 2 |
| 1.1.1-Objetivo Geral..... | 2 |
| 1.1.2-Objetivos Específicos | 2 |
| 2-Fundamentação Teórica | 3 |
| 2.1-Técnicas construtivas em Terra | 3 |
| 2.1.1-Adobe | 3 |
| 2.1.2-Abóbada | 4 |
| 2.1.3-Taipa de Pilão..... | 5 |
| 2.1.4-Bloco de Terra Comprimido (BTC)..... | 7 |
| 2.2-CAL..... | 10 |
| 2.2.1-Generalidades | 10 |
| 2.2.2- Blocos de Terra-Cal..... | 11 |
| 2.3-Cimento..... | 12 |
| 2.3.1-Generalidades | 12 |
| 2.3.2- Blocos de Terra estabilizados com Cimento | 13 |
| 2.4-Fibra de Sisal | 16 |
| 2.4.1-Generalidades | 16 |
| 2.4.2-Blocos de Terra-sisal | 18 |
| 2.6-Planejamento Fatorial Experimental..... | 19 |
| 2.6.1-Experimentos Fatoriais 2^k | 20 |
| 2.6.2-Teste de Significância do ajuste | 22 |
| 3-Materiais e Métodos | 24 |
| 3.1- Materiais | 24 |
| 3.2- Métodos | 25 |
| 3.2.1- Definição das dosagens e traços | 25 |
| 3.2.2- Procedimentos e ensaios aplicados na terra..... | 26 |
| 3.2.3- Produção dos blocos | 26 |
| 3.2.4-Ensaio de Resistência à compressão Simples..... | 30 |
| 3.2.5-Ensaio de Absorção de Água..... | 31 |
| 3.2.6-Ensaio de Molhagem e Secagem | 32 |
| 4-Resultados | 34 |
| 4.1-Caracterização física da terra..... | 34 |

| | |
|---|----|
| 4.2-Análise Estatística..... | 36 |
| 4.3-Ensaio de Resistência à Compressão..... | 37 |
| 4.3.1-Ensaio com 30 Dias | 37 |
| 4.3.2-Ensaio com 90 Dias | 46 |
| 4.3.3-Ensaio com 180 Dias..... | 54 |
| 4.4-Ensaio de Absorção de Água por imersão | 64 |
| 4.4.1-Ensaio com 30 Dias | 64 |
| 4.4.2-Ensaio com 180 Dias..... | 67 |
| 4.5-Ensaio de Molhagem e Secagem..... | 71 |
| 4.5.1-Ensaio com 30 Dias | 71 |
| 4.5.2-Ensaio com 180 Dias..... | 74 |
| 4.6 – Resumos dos Resultados e Análise Estatística..... | 79 |
| 5-Conclusões..... | 81 |
| 5.1- Sugestões para trabalhos futuros..... | 82 |
| 6-Referências Bibliográficas | 84 |

1-Introdução

Um problema que é comum no Brasil é a grande demanda de habitações, que se depara com a falta de materiais tradicionais de construção necessários à construção das unidades residenciais e comunitárias, seja pelo custo elevado do produto, seja pelo afastamento dos centros produtores desses elementos. Pensando em soluções que diminuam esses custos do produto final e ainda ajude a diminuir a degradação do meio ambiente, há a necessidade de desenvolver novos materiais e técnicas construtivas que racionalizem os recursos naturais, com pouco investimento financeiro e possuam fonte dos materiais para a sua fabricação próximo ao local da construção.

Com esse pensamento, o material terra vem sendo cada vez mais estudado como componente construtivo, pois fornece as vantagens citadas acima. Para oferecer à terra resistência à água, adiciona-se algum estabilizante, como cimento ou cal. Frente aos efeitos de retração, pode-se adicionar fibras à matriz de terra.

A terra em seu estado natural foi um dos primeiros materiais empregados pelo homem na construção civil. Há mais de dez mil anos existem edificações com o uso de terra, pedras, madeiras e palhas, que foram construídas com a finalidade de abrigar o homem de intempéries. No Brasil também é bastante utilizada a terra como material construtivo. No meio rural e regiões interioranas, as técnicas construtivas mais aplicadas, utilizando-se a terra como matéria-prima, são alvenarias de adobe, painéis de pau-a-pique e paredes monolíticas em taipa de pilão. (MILANI, 2005)

Já foram feitos vários estudos da utilização da terra em seu estado natural para a fabricação de blocos, mas nenhum realizado com o auxílio do planejamento experimental fatorial.

O planejamento fatorial experimental é uma metodologia focada no processamento antes, durante e depois da obtenção dos dados, que nos permite obter mais respostas fazendo menos ensaios, pois com ele é possível criar um modelo matemático que nos proporciona mais resultados do que os obtidos durante os ensaios. O planejamento também nos permite ver parâmetros estatísticos representativos das amostras analisadas, como erro e coeficiente de determinação. (SOUZA, 2016)

1.1-Objetivos

1.1.1-Objetivo Geral

A pesquisa tem como objetivo geral utilizar o planejamento fatorial experimental de modo a quantificar a influência estatística do cimento, da cal e da fibra de sisal, aplicados juntos e individualmente, nas propriedades dos blocos de terra comprimidos..

1.1.2-Objetivos Específicos

- Verificar a influência da interação entre as variáveis independentes (sisal, cimento e cal) nas propriedades físicas (absorção e molhagem e secagem) e mecânicas (resistência à compressão) dos BTC;
- Avaliar a influência da etapa de imersão indicada pela NBR 8492 (ABNT, 2012) nos valores de resistência à compressão dos BTC;
- Obter superfície de resposta (análise gráfica)da influência das variáveis independentes nas propriedades físicas e mecânicas;
- Avaliar se o planejamento experimental fatorial linear consegue gerar um modelo significativo para os resultados.

2-Fundamentação Teórica

2.1-Técnicas construtivas em Terra

Existem várias técnicas construtivas com a terra, a primeira delas foi a alvenaria de adobes, dando início quando o homem começou a transformar recursos naturais em materiais de construção. Depois do adobe foram surgindo cada vez mais novas técnicas, como a abóbada, o bloco de terra comprimido, a taipa de pilão e as técnicas mistas.

2.1.1-Adobe

Adobe é um tijolo feito com terra, moldado manualmente, e geralmente estabilizado fisicamente com adição de fibras ou de agregado miúdo. Também pode ser adicionado emulsão asfáltica quando se deseja sua impermeabilidade. O adobe foi usado em construções durante milhares de anos e, atualmente, cerca de 30% da população mundial vive em construções em terra. (BHARATH B. et al, 2014)

Sua fabricação é feita com a terra em estado plástico, moldado com a compressão das mãos, como visto na Figura 1. Após os tijolos secos, estes podem ser estocados e em seguida utilizados na execução de alvenaria, normalmente colados com uma argamassa também constituída de terra.

Figura 1- Fabricação de Adobe



Fonte: Rotondaro(2011)

O adobe apresenta várias vantagens como sua fácil fabricação, secagem e empilhamento, possuem bom isolamento térmico, é 100% reciclável, sua mão-de-obra não necessita ser especializada, além de sua matéria-prima ser abundante. Por outro lado, o adobe apresenta algumas desvantagens, como baixa resistência à tração, à flexão e à ação da água. Há também dificuldade de se obter dimensões regulares de adobes. Finalmente, bastante esforço humano e água são requeridos na sua produção. (ROTONDARO, 2011).

2.1.2-Abóbada

Essa técnica teve origem na região central do México e é considerada uma alternativa econômica de cobertura. Sua construção é baseada em um processo repetitivo de arcos que surgem dos cantos e podem suportar o seu próprio peso. (AGUIRRE, 2011)

Uma das melhores alternativas para a execução de uma abóbada é com o uso do bloco de terra comprimido, como pode ser visto na Figura 2, pela facilidade de sua fabricação e por suas vantagens de utilização, como pode ser visto no tópico 1.2.3.

Figura 2-Execução de Abóbada



Fonte: Aguirre(2011)

Para a construção de abóbadas com terra é necessário usar blocos com dimensões de 5 cm x 10 cm x 20 cm, posicionar as fiadas de maneira que elas possam suportar uma sobre a outra, fazer sempre a formação de arcos e utilizar o bloco seco, para que assim as fiadas tenham uma melhor aderência (AGUIRRE, 2011). Na Figura 3 podemos ver um exemplo de utilização de Abóbadas com terra.

Figura 3-Estrutura em Abóbada com terra



Fonte: Aguirre (2011)

2.1.3-Taipa de Pilão

A taipa de pilão é um processo construtivo utilizado na execução de paredes e fundações. Para sua execução, a terra deve ser inicialmente destorroada, seca e peneirada. Após essa preparação, ela pode ser misturado com algum aglomerante, caso precise, e água até o ponto ótimo. Em seguida é compactada em uma fôrma (também chamada de molde ou taipal) até a massa específica máxima, como pode ser visto na Figura 4. Essa compactação é feita com o auxílio de compactadores manuais ou mecânicos (HOFFMANN et al, 2011).

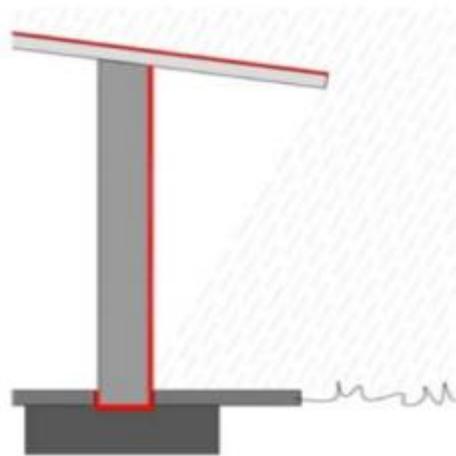
Figura 4 - Execução em taipa de pilão de madeira (esquerda) e armadura de aço (direito)



Fonte: Hoffmann et al (2011)

Como em todas as construções em terra, é necessário ter cuidado com a penetração de água nas paredes. Ao fazer o projeto devem ser previstos alguns elementos que possam protegê-las. Alguns desses elementos são: beirais, impermeabilização das fundações, aplicação de hidrofugante, execução de calçadas e até mesmo drenos. Algumas das soluções citadas podem ser vistas na Figura 5 e na Figura 6.

Figura 5 - Eficiência de beiral e calçada na proteção de paredes de taipa.



Fonte: Hoffman et al (2011).

Segundo HOFFMAN et al (2011), a taipa de pilão possui inúmeras vantagens, como um baixo consumo de energia na sua produção, não necessidade de transporte de matéria-prima (dependendo do local da obra), reciclagem da obra, pois dado que

após sua demolição, as paredes voltam à condição normal do solo, além de possuir uma boa troca de umidade com o meio, o que gera um menor consumo energético de climatização na construção. A seguir, podemos ver um exemplo de arquitetura em taipa de pilão.

Figura 6 - Paredes feitas com taipa de pilão



Fonte: Hoffman et al (2011).

2.1.4-Bloco de Terra Comprimido (BTC)

O Bloco de Terra Comprimido, também conhecido como BTC, é construído através da mistura de terra, água e alguma adição estabilizante. Essa mistura é então comprimida com a ajuda de uma prensa manual ou hidráulica. Para obter melhor resistência à compressão, estabilização, entre outros fatores, geralmente adiciona-se cal, cimento ou algum outro estabilizante previamente estudado.

Caso o estabilizante seja o cimento, após sua fabricação, os BTC devem ser mantidos úmidos durante 7 dias, para que o processo de cura do cimento fique completo, dando assim uma maior resistência ao material.

Os BTCS podem ser fabricados de diferentes formatos e dimensões, podendo ser maciços ou não, com ou sem furos e com ou sem encaixes, como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 - Variedades de BTC; a)maciço de superfície lisa; b)maciço com encaixes; c)com furos; d)com furos e encaixe.



Fonte: Auroville Earth Institute (2017).

O BTC pode substituir facilmente os blocos cerâmicos na execução de alvenarias de vedação ou até mesmo estruturais. A Figura 8 mostra uma residência que teve sua alvenaria feita em BTC.

Figura 8 - Casa feita com blocos de terra comprimidos



Fonte: Auroville Earth Institute (2017).

Segundo o Auroville Earth Institute (2017) o bloco de terra comprimido possui várias vantagens, tais como:

- Material local: do próprio canteiro ou próximo a ele, o que acaba gerando uma economia no transporte, combustível, tempo e dinheiro;

- Material biodegradável: casas de bloco de terra estabilizados com cimento bem projetadas podem suportar chuvas, neves ou geadas fazendo suas manutenções previstas sem serem danificadas. Mas se imaginarmos que um edifício caia e que uma floresta cresça em torno dele, os materiais bioquímicos contidos nos blocos irão se misturar como a camada superficial da terra e a mistura de cimento acabará se destruindo em 10 ou 20 anos.
- Limitação do desmatamento: como a madeira não é necessária para a fabricação de bloco de terra estabilizado com cimento, a utilização e melhoria de sua tecnologia poderão diminuir o uso de madeira e, consequentemente, o desmatamento.
- Material adaptado: produzido localmente, ele é facilmente adaptado para as possíveis necessidades, como técnica, social ou até mesmo cultural.
- Tecnologia simples e de fácil aprendizagem: sua tecnologia é de fácil de ser obtida e repassada. Um centro de treinamento eficiente pode ensinar essa tecnologia em uma semana.
- Oportunidade de criação de emprego: este bloco permite que pessoas não qualificadas e desempregadas aprendam com facilidade e rapidez a sua fabricação, o que irá gerar novos empregos e valores sociais.
- Oportunidade de mercado: de acordo com todos os materiais e mão-de-obra utilizados, o preço final sairá mais barato que os tijolos cerâmicos.
- Redução de importações: como os blocos podem facilmente ser produzidos localmente, não é necessária a importação de algum material caro ou transportar por longas distâncias materiais pesados e caros.
- Escala e produção flexível: os equipamentos para a fabricação dos blocos podem ir de fabricação manual *in loco* até a escala semi-industrial. A seleção do equipamento que vai ser utilizado é crucial, pois influenciará na produtividade da obra.
- Eficiência energética: exigindo apenas um pouco de estabilizador na fabricação do bloco, o consumo de energia m³ pode ser de 5 até 15 vezes menos que nos blocos cerâmicos. A emissão de poluentes pode ser também de 2,4 até 7,8 vezes menor que a de tijolos cerâmicos.

- Eficiência de custos: como é produzido localmente, com recurso natural e mão-de-obra semi-qualificada, quase sem transporte, a utilização desses blocos pode ser qualificada como rentável.
- Aceitação social: é um material que pode ser adaptado para várias necessidades, desde casas de habitação social, até mesmo mansões. Sua qualidade, regularidade e estilo permitem uma imensa variedade de produtos de casas.

Mesmos apresentando essa várias vantagens, o Auroville Earth Institute (2017) ainda fez questão de apresentar algumas limitações para alertar sobre a fabricação e utilização desse material:

- Necessidade de identificação adequada da terra;
- Desconhecimento da necessidade de gerenciamento de recursos;
- Ignorância de conhecimento básico para a sua produção e uso;
- Dificuldade de construção de edifícios altos, longos e com vãos largos;
- Baixo desempenho mecânico comparado ao concreto;
- Não treinamento de equipes provocam a produção de blocos de má qualidade;
- Uso de estabilizante sem necessidade, por medo ou ignorância, implicando em um aumento dos custos;
- Diminuição da estabilização necessária, resultando em produtos de baixa qualidade;
- Utilização de prensa de má qualidade ou sem estar adaptado para o local.

2.2-CAL

2.2.1-Generalidades

A cal, normalmente utilizada na estabilização da terra, é resultado da calcinação em altas temperaturas de rochas cálcicas e magnesianas que existem na superfície terrestre.

Existem dois tipos de cal que são utilizados em construções: a cal hidratada (também conhecida como aérea) e a cal hidráulica.

A cal hidratada endurece por reação com o CO₂ encontrado no ar. Quando o teor de óxido de magnésio (MgO) é menor que 20% na composição química da cal, ela é conhecida como cal cálcica, já quando o teor é maior que 20%, a cal fica

conhecida como cal magnesiana. Essa cal é utilizada para a fabricação de argamassa simples e mista de assentamento e de revestimento, de tintas, de concreto para reduzir permeabilidade e aumentar a trabalhabilidade e para o tratamento de água e correção de acidez da terra (agricultura).

A cal hidráulica é um aglomerante que endurece por reação com a água, mas também sofre um endurecimento por ação do CO₂ do ar.

Segundo Ingles e Matclaf(1972), a cal pode ser adicionada com uma porcentagem diferenciada dependendo do tipo de material a ser estabilizado. Essa porcentagem pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1 - Quantidade de cal em função do tipo de terra usado (Ingles e Metcalf, 1972).

| Tipo de Terra | Teor de Cal para Modificação(%) | Teor de Cal para Estabilização(%) |
|----------------------------------|--|--|
| Pedra finamente britada | 2 a 4 | Não recomendado |
| Pedregulho argiloso bem graduado | 1 a 3 | >=3 |
| Areias | Não recomendado | Não recomendado |
| Argila arenosa | Não recomendado | >=5 |
| Argila siltosa | 1 a 3 | 2 a 4 |
| Argilas | 1 a 3 | 3 a 8 |
| Solos orgânicos | Não recomendado | Não recomendado |

Fonte: Ingles e Metcalf (1972).

2.2.2- Blocos de Terra-Cal

Segundo Lopes Junior (2007), a cal é considerada como o material mais antigo para a estabilização da terra. O bloco de terra-cal é produzido através da mistura de terra, cal e água em dosagens pré-estabelecidas. Após homogeneização, a mistura é compactada em um molde, tornando-se o bloco.

Para decidir as dosagens adequadas para fabricar os blocos de terra-cal, existem alguns tipos de métodos, como por exemplo:

- Método do pH (EADES E GRIM, 1966): determina o teor mínimo de cal que vai produzir um aumento no pH para 12,4.
- Método do ICL-Initial Consumptionof Lime (ROGERS et al., 1997): indica que o teor mínimo de cal é quando o pH atinge um valor constante máximo.

- Método do Lime Fixation Point (HILT E DAVIDSON, 1960): afirma que o teor de cal máximo gera uma melhoria na trabalhabilidade, baseado no limite de plasticidade, mas sem ganhos significativos na resistência.
- Método de Thompson (1966): diz que uma terra que possui um aumento de resistência à compressão simples de pelo menos 345 kPa, quando estabilizada com cal, é considerada uma terra reativa.

De acordo com Ingles e Metcalf(1972), a adição de cal na terra geralmente se inicia com uma redução do índice de plasticidade e melhora na trabalhabilidade. Após essas mudanças, a mistura ganha uma resistência à compressão por conta da cimentação das partículas. Além dessas mudanças, a cal ainda pode alterar outras propriedades da terra, como por exemplo: granulometria, plasticidade, contração e retração, umidade de campo, densidade, desintegração, compactação e permeabilidade (GUIMARÃES, 1971).

Como ainda não há norma para a fabricação de blocos terra-cal, são utilizadas as normas de terra estabilizada com cimento como informação de parâmetros.

Segundo Muntohar (2011), quanto maior a adição de cal no bloco de terra, menor será sua absorção de água. Além disso, Patil e Atar (2015) encontraram em seus estudos que a porcentagem de 10% de cal é a quantidade ótima para encontrar a melhor resistência e um menor custo.

2.3-Cimento

2.3.1-Generalidades

De acordo com a ABCP (2009), o cimento Portland é um dos materiais mais utilizados pelo homem, e seu grande uso deve-se à sua boa trabalhabilidade, alta durabilidade, boa resistência a cargas e ao fogo.

A palavra cimento vem do latim *caementum*, que seria a mistura de cal com a pozolana (cinzas vulcânicas das ilhas gregas de Santorim e da região de Pozzuoli); essa mistura resulta em uma massa aglomerante comumente utilizada como ligante em obras de alvenaria, pontes e aquedutos. (GRANDE, 2003)

Segundo a ABCP, os tipos básicos e mais utilizados do cimento são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Tipos de Cimento Portland.

| Tipo de cimento | Adições | Sigla | Norma |
|--|--|--------------------------|--------------|
| Cimento Portland Comum | Escória, pozolana, fíler (até 5%) | CP I-S 32 CP I-S 40 | 5732 |
| Cimento Portland Composto | Escória (6-34%) | CP II-E 32 CP II-E 40 | |
| | Pozolana (6-14%) | CP II-Z 32 | 11578 |
| | Fíler (6-10%) | CP II-F 32 CP II-F 40 | |
| Cimento Portland de Alto-Forno | Escória (35-70%) | CP III 32 CP III 40 | 5735 |
| Cimento Portland Pozolânico | Pozolana (15-50%) | CP IV 32 | |
| Cimento Portland de Alta Resistência Inicial | Materiais carbonáticos (até 5%) | CP V-ARI | 5733 |
| Cimento Portland Resistente aos Sulfatos | Estes cimentos são designados pela sigla RS. Ex.: CP-III-40 RS, CP V-ARI RS. | | 5737 |

Fonte: ABCP (2017)

2.3.2- Blocos de Terra estabilizados com Cimento

A estabilização de terra com cimento começou com o Engenheiro Bert Reno, que utilizou a mistura na pavimentação de ruas. Mas foi só em 1935 que a Portland Cement Association (PCA) começou realmente a fazer estudos com as misturas de terra (ABIKO, 1983, apud GRANDE, 2003).

A adição de cimento em blocos de terra proporciona algumas vantagens como:

- Diminuição na variação volumétrica causada pela absorção e perda de umidade;
- Redução da deterioração após a imersão em água (depende da quantidade de cimento aplicada);
- Aumento da resistência à compressão;
- Maior durabilidade devido à sua menor permeabilidade.

Mesmo vários autores mostrando que um aumento no teor de cimento, provoca um aumento na resistência à compressão e uma melhora na durabilidade do bloco, alguns autores como Ingles e Metcalf (1972) e Pitta (1982) afirmam que se o teor de cimento for muito elevado e o bloco não tiver uma cura adequada, isso irá interferir nos resultados, podendo aparecer fissuras causadas pela retração por secagem do bloco.

De acordo com Gonçalves (2005), adicionam-se taxas de cimento de até 15% para conseguir chegar a uma resistência adequada em um bloco de terra. Adicionar

mais que 15% já influí significativamente no custo do material, que acaba não se tornando viável em estudos de terra.

Alguns resultados de resistência à compressão e absorção em blocos de terra comprimidos obtidos por variados autores, podem ser vistos na Tabela 3 e na Tabela 4.

Tabela 3 - Resumo de valores de absorção encontrados em BTC.

| Autor | Tipo de Bloco | Cimento (%) | Argila (%) | Absorção (%) |
|---|--------------------------|-------------|-----------------|--------------|
| Venkatarama (2007) | Sem furos 305x143x96 | 4% cimento | 21,7% argila | 15,89 |
| | | 8% cimento | 21,7% argila | 15,28 |
| | | 4% cimento | 16,3% argila | 15,7 |
| | | 8% cimento | 16,3% argila | 14,97 |
| | | 4% cimento | 10,9% argila | 15,25 |
| | | 8% cimento | 10,9% argila | 14,84 |
| | | 4% cimento | 5,4 % argila | 14,87 |
| | | 8% cimento | 5,4% argila | 14,66 |
| Venkatarama e Gupta (2004) | Sem furos 305x143x100 | 6% cimento | 9% argila | 12,1 |
| | | 8% cimento | | 11,2 |
| | | 12% cimento | | 11,4 |
| Presa (2011) | Com furos 125x125x75 | 8% cimento | 25,2% de argila | 16,3 |
| Poovizhi, Aarthi e Gowthami (2015) | Sem furos 210x100x100 | 12% | 10% de argila | 12,58 |
| | | 16% | | 11,43 |
| | Com Furos 210x100x150 | 12% | | 12,74 |
| | | 16% | | 11,62 |
| Grande (2013) | Com furos 200x100x50 | 7,70% | 10% de argila | 14% |
| | | 10% | | 13,30% |
| | | 14,30% | | 11% |

Através da Tabela 3, verifica-se como o cimento e a argila são influentes no resultado de absorção obtido pelos blocos. Quanto maior a porcentagem de cimento, menor a absorção de água. Já em relação à argila, quanto menor a porcentagem de argila contida no bloco, menor é a porcentagem de absorção, ou seja, um bloco considerado argiloso precisaria de alguns aditivos ou adições para aumentar seu poder de absorção.

Pela Tabela 4, podem ser vistos vários fatores que influenciam no resultado de resistência à compressão encontrada. Alguns desses fatores são a existência ou não de furos, a porcentagem de argila contida na terra, a porcentagem de aditivo, a duração do ensaio e se ele foi submetido à imersão prévia. Quanto maior a adição de cimento ou de argila nos blocos, maior a sua resistência à compressão. O processo de imersão obtido antes do rompimento acaba diminuindo a resistência por fragilizar o bloco.

Como pode ser visto nos resultados encontrados por Venkatarama (2007), os blocos mais argilosos necessitam de adições para atingir uma resistência adequada.

Existem autores que adicionam areia para deixar o solo menos argiloso e por isso precisam de menos cimento, mas no caso de Venkatarama (2007), só se adicionou mais cimento para mostrar o aumento de resistência devido a essa adição.

Tabela 4 – Resumo de valores de resistência à compressão já encontradas em BTC.

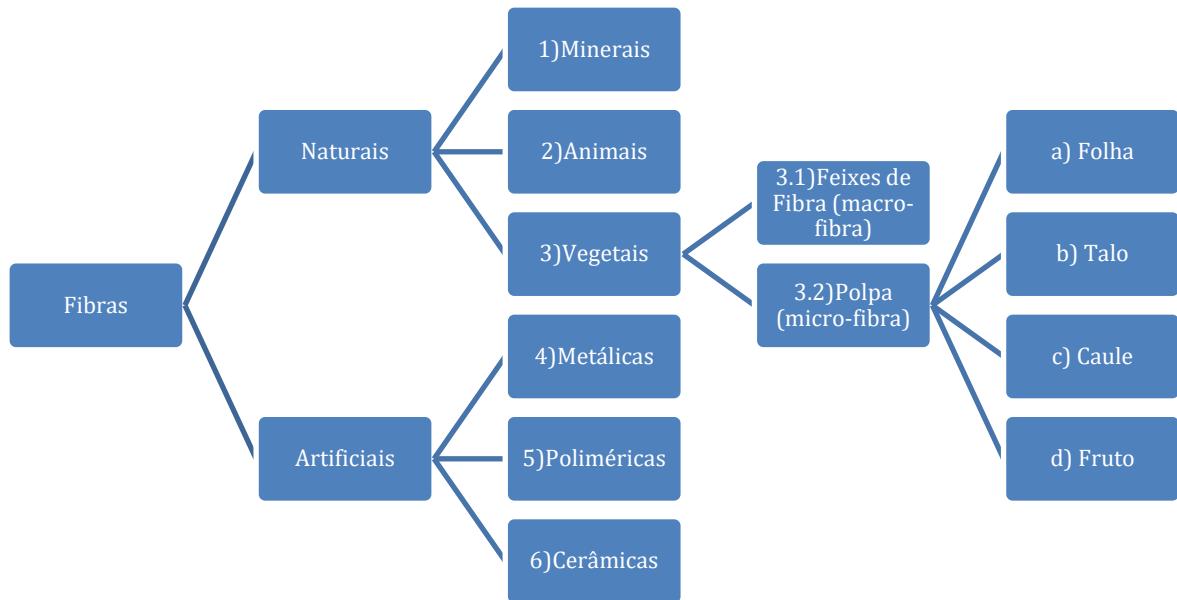
| Autor | Tipo de Bloco | Adições | Características da terra | Tempo do Ensaio | Resistência (Mpa) | |
|------------------------------------|-------------------------|------------------|--------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|
| | | | | | Com imersão em água | Sem Imersão |
| Venkatarama (2007) | Maciço 305x143x96 | 4% cimento | 21,7% argila | 28 Dias | 0,99 | 48h de imersão |
| | | 8% cimento | 21,7% argila | | 4,42 | |
| | | 4% cimento | 16,3% argila | | 3,14 | |
| | | 8% cimento | 16,3% argila | | 5,73 | |
| | | 4% cimento | 10,9% argila | | 2,77 | |
| | | 8% cimento | 10,9% argila | | 4,99 | |
| | | 4% cimento | 5,4 % argila | | 2,64 | |
| | | 8% cimento | 5,4% argila | | 4,54 | |
| Pete Walker(1997) | Maciço 295x140x120 | 5% cimento | 21,8 IP | 28 Dias | 0,08 | 24h de imersão |
| | | 10% cimento | 21,8 IP | | 1,84 | |
| | | 5% cimento | 19,8 IP | | 0,3 | |
| | | 10% cimento | 19,8 IP | | 2,5 | |
| | | 5% cimento | 15,7 IP | | 1,23 | |
| | | 10% cimento | 15,7 IP | | 2,99 | |
| | | 5% cimento | 7,2 IP | | 2,24 | |
| | | 10% cimento | 7,2 IP | | 4,45 | |
| | | 5% cimento | 3,1 IP | | 2,77 | |
| | | 10% cimento | 3,1 IP | | 5,22 | |
| | | 5% cimento | 0 IP | | 3,36 | |
| | | 10% cimento | 0 IP | | 6,35 | |
| Venkatarama e Gupta (2004) | Maciço 305x143x100 | 6% cimento | 9% argila | 60 dias | 3,13 | 48h de imersão |
| | | 8%cimento | | | 5,63 | |
| | | 12% cimento | | | 7,19 | |
| Nagaraj (2014) | Maciço 305x145x100 | 8% cimento | 11,20% | 5 Anos | 4,9 | 48h de imersão |
| | | 6%cimento 2% cal | | | 4,3 | |
| | | 4%cimento 4%cal | | | 7,2 | |
| Presa 2011 | Vazado 12,5x12,5x7,5 | 8% cimento | 25,2% de argila | 28 Dias | Não foi feito | x |
| Poovizhi, Aarthi e Gowthami (2015) | Maciço 210x100x100 | 12% cimento | 10% de argila | 28 Dias | 3,68 | Não informa o tempo |
| | | 16% cimento | | | 4,57 | |
| | Vazado 210x100x150 | 12%cimento | | | 2,4 | |
| | | 16% cimento | | | 3,14 | |
| Ferreira e Júnior (2011) | Maciço 23x11x5,5 | 8% cimento | 20% de argila | 56 | Não foi feito | x |
| | | | | 210 | | |
| Grande (2013) | Vazado 10x20x5 | 7,7% cimento | 10% de argila | 28 | Não foi feito | x |
| | | 7,7% cimento | | 91 | | |
| | | 7,7% cimento | | 120 | | |
| | | 10% cimento | | 28 | | |
| | | 10% cimento | | 91 | | |
| | | 10% cimento | | 120 | | |
| | | 14,3% cimento | | 28 | | |
| | | 14,3% cimento | | 91 | | |
| | | 14,3% cimento | | 120 | | |
| | | | | | | |
| Queiroga (2016) | Vazado 125x250x75 | 12% cimento | 9% | 60 dias | Não foi feito | x |

2.4-Fibra de Sisal

2.4.1-Generalidades

Levando em consideração a morfologia, as fibras podem ser classificadas como visto na Figura 9.

Figura 9 - Classificação das Fibras



Fonte: Picanço (2005).

Segundo Picanço (2005), alguns exemplos de fibras específicas para cada classificação são:

- Minerais: amianto;
- Animais: pelos de animais, cabelos humanos;
- Folha: sisal, curauá, fique e banana;
- Talo: juta, linho, piaçava, cânhamo;
- Caule: bambu, bagaço-de-cana;
- Fruto: coco, algodão;
- Metálicas: aço, alumínio;
- Poliméricas: aramida, nylon, fibras de carbono, boron;
- Cerâmicas: whiskers, vidro.

As fibras classificadas como naturais são divididas em minerais, animais e vegetais. As fibras minerais são aquelas formadas de cadeiras cristalinas com grande rompimento; as de origem animal possuem cadeias proteicas; e as vegetais possuem

uma natureza celulósica, como encontradas no sisal e no curauá. As fibras classificadas como artificiais surgiram do avanço da engenharia e podem ser divididas em metálicas, poliméricas e cerâmicas(IZQUIERDO, 2011).

O sisal, que tem como nome científico *Agave sisalana*, é uma planta que teve origem no México, mas que com o passar dos anos conseguiu se perpetuar muito rápido por outros países no mundo todo. É comumente cultivada em regiões tropicais e subtropicais por possuir uma boa resistência ao clima seco e ao sol intenso. No Brasil, a região nordeste é responsável pela maior produção no país, especialmente nos estados da Bahia e Paraíba.

Após 3 anos de vida ou quando as folhas de sisal conseguem atingir 140 cm de comprimento, é a fase na qual acontece a transformação da folha do sisal em fios naturais que são comercializados. Essas fibras possuem tamanhos variados, de 90 cm até 120 cm.

A fibra de sisal é classificada, segundo a Portaria nº71 de 16 de março de 1993, quanto à classe, em longa (comprimento acima de 0,90m), média (comprimento entre 0,71 e 0,90m) e curta (comprimento entre 0,60 e 0,70m) e quanto ao tipo em Tipo Superior, Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3, como pode ser visto abaixo:

- Tipo Superior: fibras lavadas e bem batidas ou escovadas, de coloração creme-claro, em ótimo estado de maturação, com maciez, brilho e resistência bem acentuados, umidade máxima de 13,5%, bem soltas e desembaraçadas, isentas de impurezas, de substâncias pécticas, de entrançamentos, nós, fragmentos de folhas e cascas e de quaisquer outros defeitos;
- Tipo 1: fibras secas e bem batidas ou escovadas, de coloração creme-claro ou amarelada, em ótimo estado de maturação com maciez, brilho e resistência normais, manchas com pequena variação em relação à cor, umidade máxima de 13,5%, soltas e desembaraçadas, isentas de impurezas, substâncias pécticas, entrançamentos, nós, fragmento de folhas e cascas e de quaisquer outros defeitos;
- Tipo 2: fibras secas e bem batidas ou escovadas, de coloração amarelada ou pardacenta, com pequenas extensões esverdeadas, em bom estado de maturação, com brilho e resistência normais,

ligeiramente ásperas, umidade máxima de 13,5%, soltas e desembaraçadas, isentas de impurezas, entrançamentos, nós e cascas;

- Tipo 3: fibras secas e bem batidas ou escovadas, de coloração amarelada, com parte de tonalidade esverdeada, pardacenta ou avermelhada, em bom estado de maturação, com brilho e resistência normais, ásperas, manchas com variação bem acentuadas em relação à cor, umidade máxima de 13,5%, soltas e desembaraçadas, isentas de impurezas, entrançamentos, nós e cascas.

O sisal é mais utilizado na indústria da construção civil como reforço de materiais de gesso. Possui absorção de água de 60-70% e o diâmetro de suas fibras pode variar de 0,06-0,4 mm (MISHRA, 2004).

Uma das maneiras que a fibra de sisal pode ser usada com a terra é na aplicação de alguma terra que precisa de um aumento de resistência à compressão. Prabakar e Siridihar(2002) usaram 0,25%, 0,5%, 0,75% e 1% de fibras sisal, com comprimentos variados de 10, 15, 20 e 25 mm em uma terra com problemas e tiveram resultados bastante significativos. Concluíram que a adição e aumento de tamanho das fibras reduzem a densidade seca da terra. Além disso, descobriu-se que o aumento da porcentagem de fibras melhora a resistência da terra ao cisalhamento, mas o limite é o valor de 0,75%, pois, além disso, não foi obtida uma melhora significativa.

2.4.2-Blocos de Terra-sisal

Os fatores que são analisados no que concerne à adição de fibras nos blocos de terra são o seu tamanho e seu teor. Um dos estudos feitos foi de Namango e Madara(2014), onde foram adicionados teores de 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 e 1,25% de fibra de sisal em função da massa de terra usada. Os resultados mostraram que a adição de 0.75% de fibra foi o teor que obteve melhores resultados de resistência, tendo um aumento expressivo do seu valor. Além disso, também foi concluído que a máxima porcentagem de fibra que obtém aumento na resistência é a de 1%, e que, além desse valor, a tendência é que as fibras comecem a prejudicar a resistência do bloco.

Olivier (1995) fez um estudo cujos resultados convergem com aqueles de Namango e Madara (2014). Mostrou-se que a fibra aumenta não só a resistência à tração dos blocos, mas também a sua resistência à compressão. Além disso, ela

também viu que ao se adicionar plastificante, também ocorre um aumento da resistência ao cisalhamento e uma redução da quantidade de água a ser utilizada na mistura.

Prabakar e Siriha(2002) mostraram que ao aumentar o tamanho das fibras, podemos obter resultados muito satisfatórios, mas até certo ponto. Em seu estudo, foi percebido que as fibras com até 20 mm de comprimento resultaram em uma mistura mais resistente ao cisalhamento, mas a partir do momento que eles aumentaram o comprimento dessa fibra, esse valor começou a decair.

Gutiérrez-Orrego, Garcia-aristizabal e Gomez-botero (2017) fizeram ensaios de resistência à compressão e absorção com bloco de terra com 9% de cimento e fibra de sisal de 70 mm e obtiveram os resultados mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados de Resistência à compressão e Absorção de Gutiérrez-Orrego

| Ensaio | % Fibra | Resultado |
|---|---------|-----------|
| Resistência à Compressão com 45 dias(MPa) | 0,1 | 3,45 |
| | 0,25 | 3,6 |
| | 0,4 | 3,75 |
| Absorção com 28 dias (%) | 0,1 | 14 |
| | 0,25 | 12 |
| | 0,4 | 12,3 |

2.6-Planejamento Fatorial Experimental

O planejamento fatorial experimental é utilizado com o intuito de estudar o efeito conjunto de vários fatores em cima de uma ou mais variáveis de resposta de maneira mais eficiente e econômica. Cada fator estudado pode ser observado em vários níveis, mas com o experimento fatorial basta assumir dois níveis, que podem ser quantitativos ou qualitativos, como por exemplo, dois níveis de temperatura, dois níveis de adição de algum produto, ou até mesmo "com" ou "sem" alguma característica.

O planejamento experimental tem como objetivos reduzir o tempo de processo, reduzir o custo operacional, melhorar o rendimento do processo e melhorar a concordância entre os valores obtidos e os valores esperados.

Para um bom planejamento de experimentos existem 3 princípios básicos, que seriam a replicação, aleatoriedade e a blocagem. Um experimento com réplicas permite obter um erro experimental, verificando assim se as diferenças observadas nos dados são estatisticamente diferentes. A aleatoriedade garante a distribuição igual de todos os fatores considerados. Já a blocagem aumenta a precisão de um experimento, e é usada quando uma determinada medida experimental é feita por duas diferentes pessoas, levando a uma possível não homogeneidade nos dados.

Quando não se sabe ao certo se o modelo que será criado pelo planejamento é linear ou quadrático, inicia-se pela hipótese de linear pois necessita-se de menos ensaios para a criação do modelo. Quando não encontramos um modelo linear, deve-se aumentar a quantidade de traços estudados e partir para um estudo de DCCR (delineamento composto central), que irá produzir um modelo quadrático.

De acordo com Montgomery (1984), os passos que devem ser seguidos para a execução de um planejamento fatorial experimental são:

- Definição da função objetiva;
- Definição das variáveis do processo em estudo e suas restrições;
- Elaboração do planejamento fatorial completo;
- Análise dos efeitos dos fatores nas respostas desejadas;
- Análise estatística e interpretação dos resultados;
- Ajuste de modelo;
- Verificação da validade dos modelos utilizando Análise de Variância – ANOVA;
- Análise de Superfície de Resposta.

2.6.1-Experimentos Fatoriais 2^k

De acordo com Juran et al. (1951, apud Galdamez, 2002), um experimento é dito fatorial 2^k quando apresenta k fatores, onde cada um possui 2 níveis de estudo. São feitos testes com as combinações desses fatores nos níveis escolhidos e assim é construída uma matriz experimental. Com essa matriz podem ser determinados e interpretados os efeitos principais e de interação dos fatores, levando assim a conclusão das melhores condições experimentais.

Levando em consideração um experimento fatorial 2³, a matriz de planejamento seria construída como mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Matriz de Planejamento 2³

| N Teste | Fatores de Controle | | | Resposta (Y _i) |
|---------|---------------------|----|----|-------------------------------|
| | X1 | X2 | X3 | |
| 1 | -1 | -1 | -1 | Y1 |
| 2 | +1 | -1 | -1 | Y2 |
| 3 | -1 | +1 | -1 | Y3 |
| 4 | +1 | +1 | -1 | Y4 |
| 5 | -1 | -1 | +1 | Y5 |
| 6 | +1 | -1 | +1 | Y6 |
| 7 | -1 | +1 | +1 | Y7 |
| 8 | +1 | +1 | +1 | Y8 |

Na Tabela 8, as colunas são os conjuntos de fatores analisados ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$) e as linhas são os níveis escolhidos e as combinações dos fatores (níveis codificados -1 (mínimo) e +1(máximo)). De acordo com Devor et al. (1992, apud Galdamez, 2002), essa maneira de organizar a matriz de planejamento é denominada de ordem padrão e, com esse planejamento, podemos determinar os efeitos principais e de interação que as variáveis independentes geram nas respostas.

Para um planejamento experimental fatorial 2³, o seu modelo estatístico é representado pela seguinte Equação (MONTGOMERY, 1991).

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta_{ij}) + (\tau\gamma_{ik}) + (\beta\gamma_{jk}) + (\tau\beta\gamma_{ijk}) + \varepsilon_{ijk}$$

Equação 01

Sendo que,

μ é a média dos resultados;

τ_i é o efeito principal do fator x_1 ;

β_j é o efeito principal do fator x_2 ;

γ_k é o efeito principal do x_3 ;

$(\tau\beta_{ij})$ é o efeito de interação entre os fatores x_1 e x_2 ;

$(\tau\gamma_{ik})$ é o efeito de interação entre os fatores x_1 e x_3 ;

$(\beta\gamma_{jk})$ é o efeito de interação entre os fatores x_2 e x_3 ;

$(\tau\beta\gamma_{ijk})$ é o efeito de interação dos fatores x_1, x_2, x_3 ;

ε_{ijk} é o erro experimental.

O planejamento experimental possui várias vantagens, como por exemplo:

- Reduzir o número de experimentos, ou seja, ganha-se uma diminuição do trabalho, tempo e custo final;

- Verificar e analisar possíveis efeitos que sejam eficientes ou não entre os fatores estudados, já que os fatores são analisados simultaneamente;
- Otimizar mais de uma resposta ao mesmo tempo, maximizando ou não variáveis;
- Possibilitar o cálculo do erro experimental;
- Depender mais da competência do profissional na sua área de trabalho que de seus conhecimentos em estatística, pois as técnicas são de fácil uso e aprendizagem.

2.6.2-Teste de Significância do ajuste

Para aferir a qualidade da aproximação gerada a partir de um conjunto de dados é feito o procedimento de teste de significância. Esse teste é baseado na análise da variância e necessita da obtenção dos seguintes parâmetros estatísticos (médias e somas dos quadrados dos desvios)

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}$$

Equação 02

$$SQ_T = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$$

Equação 03

$$SQ_E = \sum_{i=1}^N (y_i - y_{ri})^2$$

Equação 04

$$SQ_R = \sum_{i=1}^N (y_{ri} - \bar{y})^2$$

Equação 05

$$SQ_T = SQ_R + SQ_E$$

Equação 06

Onde:

N = Número total de observações;

y_i = valor observado (ou obtido na função dada);

y_{ri} = previsão do modelo para o valor y_i .

A soma total mostrada nas equações é soma dos quadrados devidos aos erros e na soma dos quadrados devida ao modelo ou devida à regressão. Quanto maior for

a fração descrita pela regressão, melhor será o ajuste do modelo. Com esses valores calculados, pode-se construir a tabela ANOVA, como visto abaixo na Tabela 7.

Tabela 7 - Tabela de Análise de Variância (ANOVA)

| Fonte de Variação | Soma de Quadrados | Grau de Liberdade Estatístico | Quadrados Médios | Estatística F₀ |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| Modelo | SQ_R | $(p-1)$ | $MS_R = \frac{SQ_R}{p-1}$ | $F_0 = \frac{MS_R}{MS_E}$ |
| Erro | SQ_E | $(N-p)$ | $MS_E = \frac{SQ_E}{N-p}$ | |
| Total | SQ_T | $(N-1)$ | | |

Quanto maior o valor de F_0 , melhor é o ajuste, pois quando o MS_E é suficientemente pequeno, implica que SQ_E também é pequeno, o que significa que y_{ri} está próximo de y_i .

3-Materiais e Métodos

A metodologia aplicada nesse estudo será experimental através da análise de propriedades físicas e mecânicas de corpos de prova fabricados no laboratório do Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas (LABEME), localizado na Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

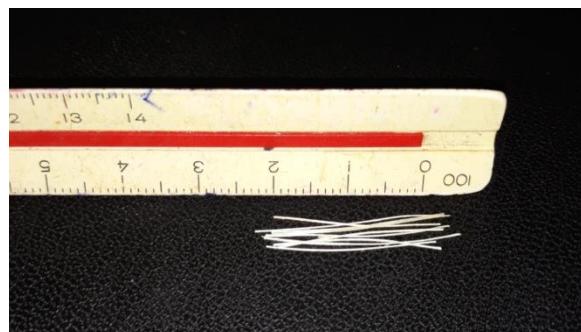
3.1- Materiais

A terra utilizada no estudo tem origem da cidade de Santa Rita, na Paraíba. O cimento usado foi o CP II-Z-32, de acordo com a norma NBR 11578 (ABNT, 2012), e a cal foi a hidratada do tipo CH-I (Cal Carbomil). A água usada foi de um poço artesiano situado na UFPB. As fibras de sisal foram do Tipo 2 e adquiridas na cidade de Pocinhos-PB, conforme visto na Figura 10, com o auxílio da EMBRAPA. As fibras foram cortadas com o comprimento de 20 mm e diâmetro de 0,19mm (Fator de Forma de 105), como mostrado na Figura 11.

Figura 10 - Processo de secagem das Fibras de Sisal em Pocinhos-PB



Figura 11 - Tamanho das fibras de sisal após cortadas.



3.2- Métodos

3.2.1- Definição das dosagens e traços

Como serão 3 fatores que serão estudados (cimento, cal e sisal) e dois níveis para cada fator (+1,-1), foi feito um planejamento fatorial 2^3 . Para uma maior precisão nos resultados, foi ensaiado também o ponto central com réplica, para se calcular o erro experimental.

Sabendo então que o planejamento fatorial é do tipo 2^3 (8 traços, fora 2 réplicas do ponto central), foi feita a matriz de planejamento codificada para determinar as porcentagens de cimento, cal e sisal para cada traço.

Levando em consideração estudos anteriormente já feitos para o sisal, como o de Namango et Madara (2014), os valores utilizados foram de 0%, 0,25% e 0,5%, em relação ao peso da terra seca. Já para o cimento foi aplicado 5%, 10% e 15%, e a cal de 0%, 5% e 10%. Dessa forma, a matriz de planejamento foi feita como mostra a Tabela 8. A porcentagem de terra variou entre 2,2kg e 3,2kg para a fabricação dos blocos.

Tabela 8 - Matriz de Planejamento estudada

| Traço | Cimento (%) | Cal (%) | Sisal (%) |
|-------|-------------|---------|-----------|
| T1 | 5 | 0 | 0 |
| T2 | 15 | 10 | 0 |
| T3 | 15 | 0 | 0 |
| T4 | 5 | 10 | 0 |
| T5 | 5 | 0 | 0,5 |
| T6 | 15 | 10 | 0,5 |
| T7 | 15 | 0 | 0,5 |
| T8 | 5 | 10 | 0,5 |
| T9 | 10 | 5 | 0,25 |
| T10 | 10 | 5 | 0,25 |

O traço T9 é o correspondente ao ponto central e T10 sua réplica. A réplica tem o intuito de viabilizar o cálculo de resíduos e erro padrão, podendo fornecer informações de grande importância sobre o comportamento das respostas entre os níveis inicialmente atribuídos aos fatores, como também mostrar a qualidade na repetitividade do processo.

Segundo Namango e Madara(2014), a porcentagem de fibra que dá um maior aumento de resistência é de 0,75%, mas testes foram feitos previamente, e foi notado que essa porcentagem de fibra dificulta muito o trabalho com a mistura do material, fazendo uma grande quantidade de buchas, dificultando então a homogeneização da mistura e resultando em uma perda de mistura de mais de 25%.. Logo, foi decidido utilizar teores de fibras de 0,25 e 0,50. Já em relação à cal, Ingles e Metcalf(1972) dizem que em uma terra arenosa deve ser adicionado no mínimo 5%, por esse motivo, decidiu-se trabalhar com esse valor inicialmente. O cimento levou como base as informações dadas por Gonçalves (2005), que diz que não deve ser adicionado mais de 15% em blocos de terra, pois levará em um aumento significativo no custo do material. Desse modo, foram escolhidos os valores de 5, 10 e 15%.

3.2.2- Procedimentos e ensaios aplicados na terra

A terra foi beneficiada por peneiramento prévio em peneira de 4.8mm e foi caracterizada pelos seguintes ensaios:

- Determinação da massa específica da terra, NBR 6508 (ABNT, 1984);
- Análise granulométrica da terra, NBR 7181 (ABNT, 2016);
- Determinação do limite de liquidez, NBR 6459 (ABNT, 2017);
- Determinação do limite de plasticidade, NBR 7180 (ABNT, 2016);
- Caracterização mineralógica por DRX.

3.2.3- Produção dos blocos

Depois de feito o estudo da terra, deu-se início a fabricação dos blocos. Cada material do traço foi adicionado à betoneira, e para os blocos que possuíam sisal, a fibra era adicionada por camadas entre os outros materiais, como pode ser visto na Figura 12, para evitar uma maior produção de buchas.

Figura 12 – Adição em camadas da fibra de sisal na betoneira.



Após a uniformização da mistura seca, iniciou-se a adição de água até encontrar a umidade adequada para a mistura. Essa umidade foi verificada através de uma amostra da mistura que foi comprimida na mão de forma enérgica, até formar um bolo com a marca nítida dos dedos em relevo, como visto na Figura 13. Além desse teste, foi feita outra verificação, onde a amostra comprimida manualmente foi solta a uma altura de 1m de uma superfície dura. A amostra devia esfarelar-se ao entrar em choque com a superfície, caso isso não ocorresse, a mistura estaria mais úmida que o necessário.

Figura 13 - Verificação da unidade adequada para a mistura.



A terra, já umidificada, passou por uma peneira de 4,8 mm para desmanchar os torrões de terra que foram formados, espalhando assim melhor a umidade que estava presa, como pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 – Torrões de terra formados após a mistura (esquerdo); destorramento das bolas de terra (direita).



Após destorroada, a mistura foi levada para a prensa hidráulica da marca Eco Máquinas, modelo Eco Brava, para a fabricação dos blocos. As dimensões dos blocos fabricados foram de 12,5 x 25 x 7,5 cm (largura x comprimento x altura), conforme mostrado na Figura 15. Os blocos são vazados com furos de 6 cm de diâmetro e anéis de encaixe, o que facilita na amarração dos blocos quando executados em paredes.

Figura 15 - Prensa Hidráulica Eco Máquinas e seu respectivo bloco.



Após sua fabricação, os blocos passaram por um processo de cura durante os 7 primeiros dias. Os blocos foram molhados, com a ajuda de um regador, diariamente, no período diurno. Essa maneira de realização da cura foi escolhida por identificarmos

como sendo a maneira mais fácil de fabricação em canteiro de obra. Durante esse período de cura, os blocos também foram mantidos cobertos com sacos plásticos, uma forma de protegê-los de possíveis intempéries e impurezas. Após os 7 dias de cura, os blocos foram ensacados até 30 dias de idade para que a água interna do bloco não saísse e pudesse ainda reagir com o cimento, conforme indicado por Walker (1997) e, depois desses 30 dias, os sacos foram abertos para que a cal aérea iniciasse seu processo de reação.

Para os ensaios de absorção, molhagem e secagem e resistência à compressão simples, foram fabricados os blocos mostrados na Tabela 9:

Tabela 9 - Total de blocos moldados e ensaiados

| Traço | Absorção | | Molhagem e Secagem | | Compressão (sem imersão) | | | Compressão (com imersão) | | | Total |
|--------------|-----------|-----------|--------------------|-----------|--------------------------|-----------|-----------|--------------------------|-----------|-----------|------------|
| | 30 | 180 | 30 | 180 | 30 | 90 | 180 | 30 | 90 | 180 | |
| T1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 32 |
| T2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 32 |
| T3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 32 |
| T4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 32 |
| T5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 32 |
| T6 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 32 |
| T7 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 32 |
| T8 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 32 |
| T9 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 32 |
| T10 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 32 |
| TOTAL | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 40 | 40 | 30 | 30 | 30 | 320 |

Foram escolhidos os períodos de 30, 90 e 180 dias para os ensaios, dado que a cal exige um período de cura mais prolongado para se carbonatar e mostrar uma mudança nas propriedades físicas e mecânicas dos blocos.

3.2.4-Ensaio de Resistência à compressão Simples

O ensaio de resistência à compressão é realizado conforme a NBR 10836 (ABNT, 2012). Para que o bloco de terra comprimido e estabilizado com cimento seja destinado à execução de alvenaria sem função estrutural, a NBR 10834 (ABNT, 2012) pede que os valores médios de resistência à compressão obtidos sejam superiores a 2,0 MPa, com idade mínima de 7 dias.

A determinação da resistência à compressão foi realizada após 30, 90 e 180 dias de sua fabricação. Os blocos foram serrados ao meio com o auxílio de uma serra de disco, e suas metades foram unidas, segundo a NBR 8492 (2012), por uma argamassa de terra com 10% de cimento e 10% de cal. Após a argamassa endurecida, foi feito o capeamento superior e inferior das amostras, como pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 - Corpos de prova capeados para ensaio de compressão.



Após o bloco devidamente unido pela argamassa e capeado, foi dado início ao ensaio de compressão com uma prensa Automática Pavitest Contenco, como visto na Figura 17, usando uma velocidade de deformação de 1 mm/min.

Figura 17 - Ensaio de compressão do corpo de prova.



A NBR 8492 (ABNT, 2012) solicita que o bloco antes de entrar no ensaio de compressão, deve passar por imersão em água por no mínimo 6h, e só retirado no exato momento de fazer o ensaio. Segundo alguns autores como Pitta e Nascimento (1983, apud Lima, 2013), o processo de imersão no ensaio de compressão prejudica o desempenho dos componentes contidos no corpo de prova, por isso aconselham a fazer o ensaio de resistência à compressão sem a fase de imersão. Já outros autores como Venkatarama, Lal e Rao (2207) e Pete Walker (1997) fazem os ensaios de compressão com e sem o processo de imersão, para obter mais resultados e poder compará-los. Por esse motivo, decidiu-se seguir essa linha e fazer o ensaio de compressão com e sem imersão em água.

3.2.5-Ensaio de Absorção de Água

Os ensaios de absorção de água auxiliam a ver a capacidade do material de reter água, o que refletirá, posteriormente, na sua durabilidade. Quando maior a capacidade de absorção do material, maior sua deterioração.

Através da diferença da massa seca e da massa úmida dos blocos, podemos determinar a capacidade do bloco de reter água, segundo a NBR 8492 (ABNT, 2012). Para os blocos de terra comprimidos e estabilizados com cimento destinados à

execução de alvenaria sem função estrutural, o valor de absorção procurado seria igual ou menor que 20%, com idade mínima de sete dias, segundo a NBR 10834 (ABNT, 2012).

Após 30 e 180 dias de idade os blocos foram levados à estufa com temperatura entre 105° C e 110°C, até se obter uma constância de sua massa. Os blocos então foram pesados e obtidos assim as suas massas secas. Após essa pesagem, os blocos foram imersos em tanque de água durante 24h, em seguida pesados e obtidas as suas massas saturadas.

Já possuindo os valores de massa seca e úmida, é utilizada a Equação 07 para obtenção da porcentagem de absorção do bloco.

$$A = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right) \times 100$$

Equação 07

Onde:

M_1 = massa do bloco seco em estufa (g);

M_2 = massa do bloco saturado (g);

A = absorção de água (%).

3.2.6-Ensaio de Molhagem e Secagem

A NBR13554 (ABNT, 2012) propõe a utilização do método de molhagem e secagem para a averiguação da durabilidade do bloco de terra estabilizada com cimento. Quanto maior o efeito de estabilização da terra, menor deve ser a perda de massa, mostrando que o material possui uma melhor durabilidade e resistência.

Após 30 e 180 dias de fabricação, cada bloco foi pesado e imerso em água durante 5h consecutivas. Devido ao tamanho dos recipientes disponíveis para imersão, alguns blocos foram deixados na posição vertical e outros na horizontal. Em seguida o bloco foi enxugado levemente com a ajuda de um pano, pesado e levado para uma estufa programada a uma temperatura de 70°C ($\pm 2^\circ\text{C}$). Ao ser retirado da estufa o bloco foi pesado novamente, e foi submetido ao ciclo mais 5 vezes. Terminados os ciclos, cada bloco foi levado para uma estufa programada a uma temperatura de 105°C até 110°C até atingir uma massa constante. Finalmente, cada bloco foi pesado e os valores obtidos então substituídos na Equação 08 para encontrar a perda de massa da amostra.

$$Pm = \left(\frac{P_2 - P_1}{P_1} \right) \times 100$$

Equação 08

Onde,

P_1 = massa inicial do corpo de prova seco, após o primeiro processo de secagem, expressa em gramas (g);

P_2 = massa final do corpo de prova seco, após atingir massa constante, expressa em gramas (g);

PM= perda de massa do bloco, expressa em porcentagem (%).

A norma aconselha fazer uma etapa de escovação nos blocos após cada etapa de secagem, mas considerando que os blocos terão solicitações de abrasão menores, pois são construídos para serem utilizados em alvenarias, decidiu-se desconsiderar o processo de escovação ao final de cada ciclo, como aconselhado por Lima (2013).

4-Resultados

Os resultados que serão apresentados neste tópico são os valores médios. Os resultados de cada bloco podem ser encontrados no Apêndice desta pesquisa.

4.1-Caracterização física da terra

Os resultados da caracterização física da terra podem ser vistos na Tabela 10:

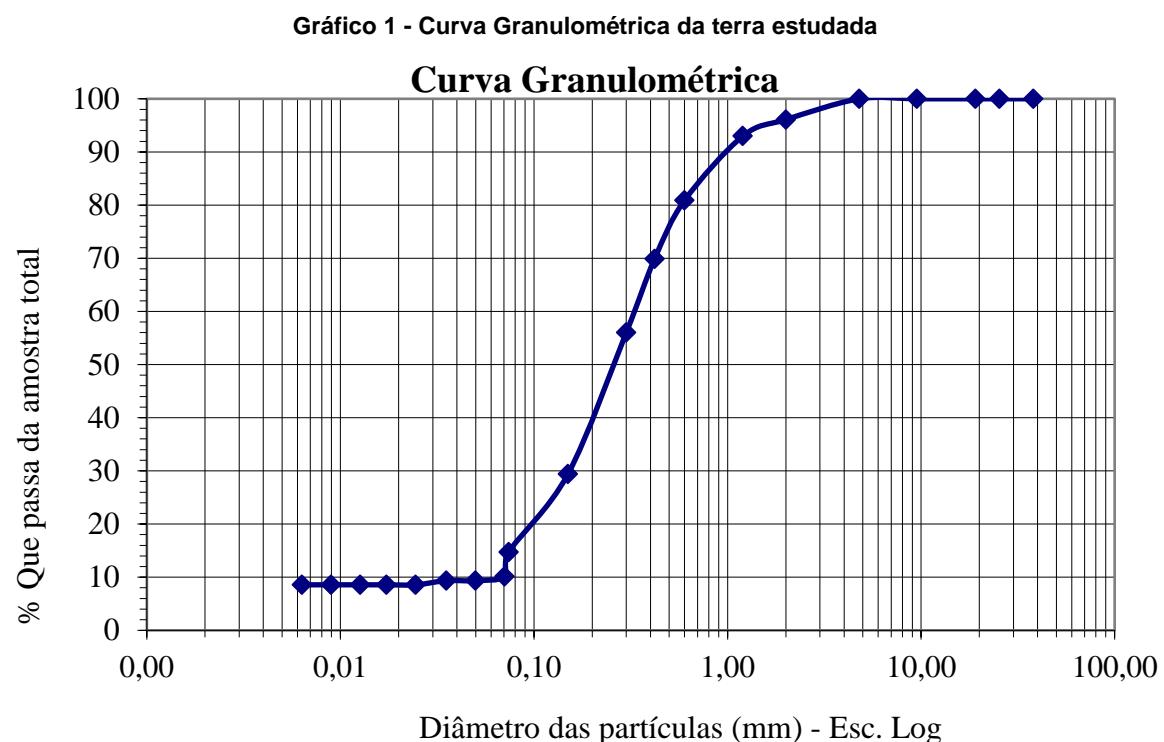
Tabela 10 - Resumo dos resultados de caracterização física da terra

| Parâmetros | | Terra |
|--|--|---|
| Distribuição Granulométrica -ABNT | Pedregulho (%) | 0 |
| | Areia Grossa (%) | 13 |
| | Areia Média(%) | 38 |
| | Areia Fina (%) | 39,65 |
| | Silte(%) | 0,78 |
| | Argila (%) | 8,57 |
| | Porcentagem que passa na #200 | 14,71 |
| Índices Físicos | Massa específica dos grãos (g/m ³) | 2,69 |
| | LL(%) | 24 |
| | LP(%) | 19,03 |
| | Índice de Plasticidade (IP)-(%) | 4,97 |
| Classificação | Unificada | Areia argiloso (SC) - mistura de areia e argila |
| | AASHTO | A-2-4 (Areia Siltosa ou Argilosa) |

Foi feita a análise granulométrica da terra seguindo os procedimentos da NBR 7181 (ABNT, 2016).

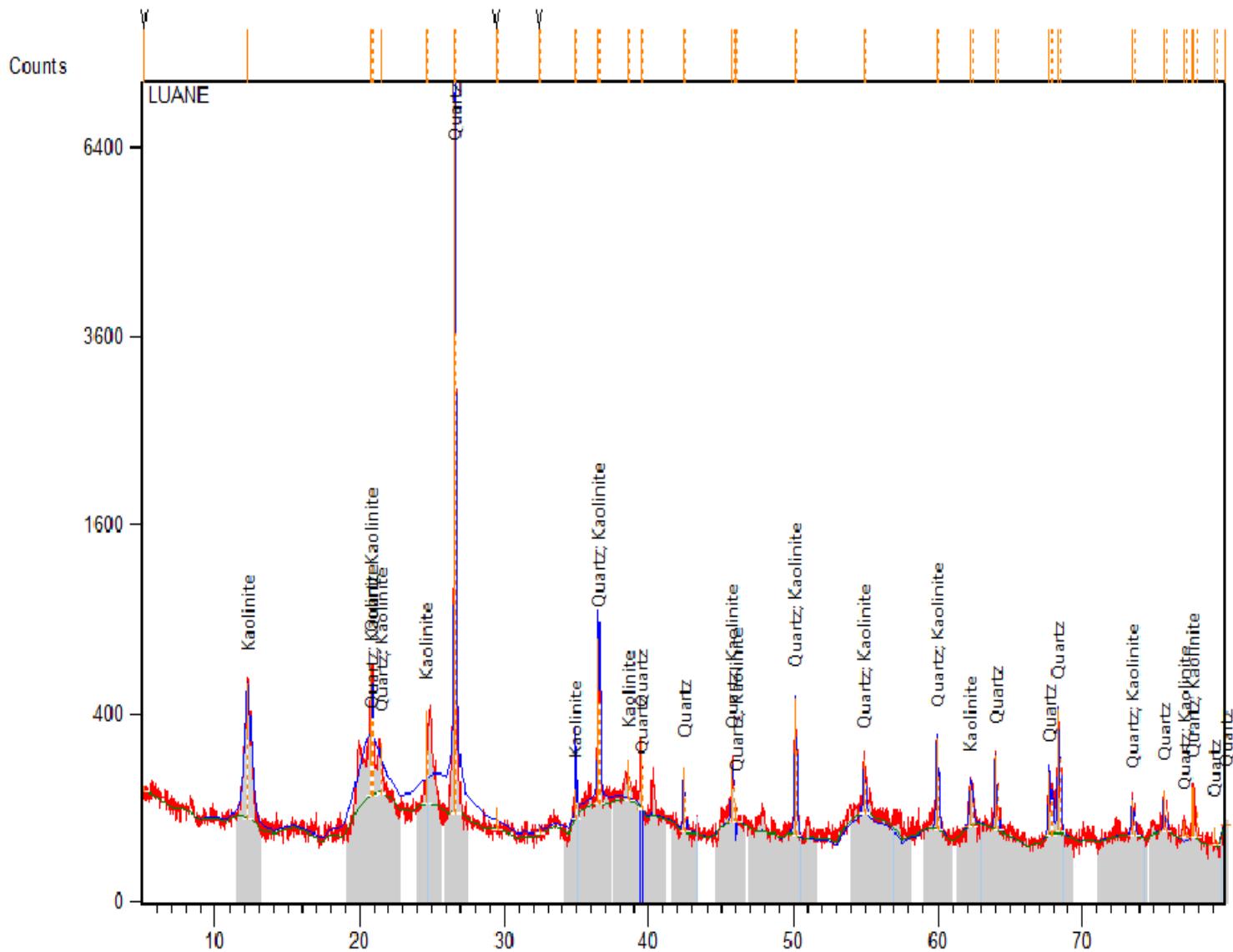
Segundo a NBR 10833 (ABNT, 2012), a terra para ser utilizada na fabricação de bloco vazado de terra estabilizado com cimento deve passar 100% na peneira de número 4 (nenhum pedregulho foi retido nas peneiras), e entre 10% e 50% passar na peneira de número 200. Como pode ser visto na Tabela 10, a terra segue as

características solicitadas e pode ser usado na fabricação de bloco vazado de terra estabilizado com cimento.



Através dos dados mostrados na Tabela 10, também pode-se ver o valor do limite de liquidez (LL), que foi de 24%, e do Índice de Plasticidade (IP), que foi de 4,97%. Segundo a NBR 10833 (ABNT, 2012), para a fabricação de bloco vazado de terra estabilizado com cimento, o limite de liquidez deve ser inferior ou igual a 45%, e o índice de plasticidade deve ser menor ou igual a 18%. Visto que os resultados encontrados seguem essas características, podemos dizer então que a terra é adequada para a fabricação de blocos vazados de terra estabilizado com cimento.

Gráfico 2- Difratograma da terra



4.2-Análise Estatística

A análise dos resultados para o ensaio de absorção, molhagem e secagem e de resistência à compressão foi feita usando o programa *Statistica 7.0*, conforme o planejamento fatorial experimental 2^3 com um ponto central e uma réplica, lembrando que cada traço teve 3 ou 4 réplicas, como mostrado na Tabela 9. A matriz desse planejamento pode ser vista na Tabela 11.

Tabela 11 - Matriz de planejamento fatorial experimental com as variáveis independentes codificadas e reais.

| Ensaio | Cimento | Cimento | Cal | Cal | Fibra | Fibra |
|---------------|----------------|----------------|------------|------------|--------------|--------------|
| | codificado | real | codificado | real | codificado | real |
| 1 | + | 15% | + | 10% | + | 0,50% |
| 2 | - | 5% | + | 10% | + | 0,50% |
| 3 | + | 15% | - | 0% | + | 0,50% |
| 4 | - | 5% | - | 0% | + | 0,50% |
| 5 | + | 15% | + | 10% | - | 0,00% |
| 6 | - | 5% | + | 10% | - | 0,00% |
| 7 | + | 15% | - | 0% | - | 0,00% |
| 8 | - | 5% | - | 0% | - | 0,00% |
| 9 | 0 | 10% | 0 | 5% | 0 | 0,25% |
| 10 | 0 | 10% | 0 | 5% | 0 | 0,25% |

4.3-Ensaio de Resistência à Compressão

4.3.1-Ensaio com 30 Dias

Os resultados a seguir são referentes aos blocos que foram ensaiados após 30 dias de sua fabricação.

- Sem Imersão em água**

Ao romper os corpos de prova com 30 dias de fabricação e sem aplicar o processo de imersão, foram obtidas as resistências à compressão mostradas na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultado médio de resistência à compressão sem imersão aos 30 dias.

| Traço | | | | | |
|--------------|--|--|--|--|--|
| | | | | | |

| | Área Bruta (cm ²) | Área Líquida (cm ²) | Carga Aplicada(Kgf) | Resistência Bruta(MPa) | Resistência Líquida(MPa) |
|--|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------|--------------------------|
| T1 (15%cim, 10%cal, 0,5sisal) | 156,25 | 127,99 | 7774,33 | 4,98 | 6,07 |
| T2 (5%cim,10%cal, 0,5%sisal) | 156,25 | 127,99 | 2952 | 1,89 | 2,31 |
| T3 (15%cim,0%cal, 0,5%sisal) | 156,25 | 127,99 | 5001,33 | 3,2 | 3,91 |
| T4 (5%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 156,25 | 127,99 | 1523,67 | 0,98 | 1,19 |
| T5 (15%cim, 10%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 7553,33 | 4,83 | 5,90 |
| T6 (5%cim, 10%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 2485,67 | 1,59 | 1,94 |
| T7 (15%cim, 0%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 5160,33 | 3,3 | 4,03 |
| T8 (5%cim, 0%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 1416 | 0,91 | 1,11 |
| T9 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 156,25 | 127,99 | 5053 | 3,23 | 3,95 |
| T10 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 156,25 | 127,99 | 5444,33 | 3,48 | 4,25 |

Os traços com maior quantidade de cimento obtiveram os melhores resultados, provando que o cimento foi o principal responsável pelo ganho de resistência à compressão em uma idade de 30 dias. Os blocos com no mínimo 10% de cimento foram os únicos que tiveram resistência superior à solicitada pela NBR 10834 (2012) que é de 2,0 MPa. A cal também foi um dos responsáveis pelo aumento da resistência à compressão dos blocos, como pode ser visto, por exemplo, entre os traços T1 e T3, ou até mesmo entre o T6 e o T8, mas ela não foi suficiente para deixar a resistência superior a 2,0 MPa dos blocos com apenas 5% de cimento. Como a cal é áerea e até os 30 dias, os blocos estavam ensacados, acredita-se que a cal aumentou a resistência por substituir a terra e deixar o bloco mais compactado, já que possui superfície específica superior.

A NBR 10834 (2012) diz que o valor da resistência à compressão de bloco de terra estabilizado com cimento deve ser calculado através de sua área bruta, ou seja, sem retirar a área dos furos, mas como forma de agregar mais resultados ao presente estudo, também foi exposta a resistência calculada através da área líquida.

A tabela a seguir apresenta os efeitos principais e de interação de variáveis, com um limite de confiança de 95%. Os dados foram obtidos considerando o erro puro.

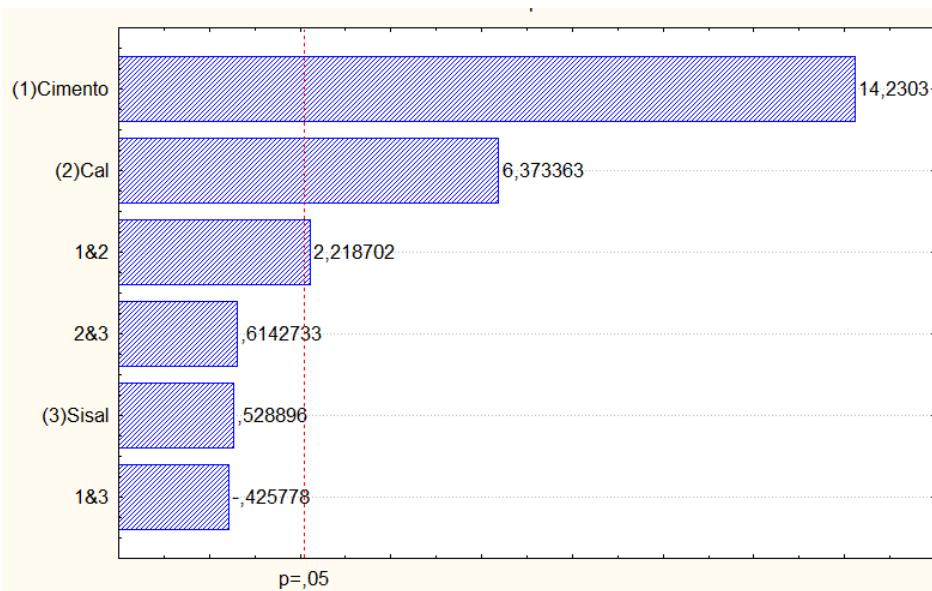
Um modelo de regressão exibe a falta de ajuste quando ele falha em descrever adequadamente a relação funcional entre os fatores experimentais e a variável de resposta. As réplicas representam o “erro puro”, pois apenas a variação aleatória pode causar diferenças entre os valores de resposta observados.

Tabela 13 - Efeitos estimados do planejamento referente ao ensaio de compressão aos 30 dias e sem imersão.

| | Efeito | Desvio Padrão | Limite de | | Coeficiente |
|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | | Erro Puro | Confiança | |
| Média/Interação | 2,839296 | 0,086044 | 2,660357 | 3,018235 | 2,839296 |
| Cimento | 2,73792 | 0,192401 | 2,337801 | 3,138039 | 1,36896 |
| Cal | 1,22624 | 0,192401 | 0,826121 | 1,626359 | 0,61312 |
| Cimento e Cal | 0,42688 | 0,192401 | 0,036761 | 0,826999 | 0,21344 |
| R²=0,88902 | | | | | |

Observa-se também pela Tabela 13 que o valor do coeficiente de determinação R² foi de aproximadamente 89%, que sugere que o modelo encontrado pelo planejamento representa bem a relação entre os efeitos e a resposta. Para conhecer o modelo linear proposto pelo planejamento factorial experimental e saber se ele é estatisticamente significativo, deve-se fazer uma análise de variância, que só é permitido através da Tabela ANOVA.

Gráfico 3 - Diagrama de Pareto mostrando a influência dos fatores estudados para compressão aos 30 dias sem imersão



Através do diagrama de Pareto, Gráfico 3, podemos avaliar a influência dos fatores estudados na resposta. As barras representam a magnitude dos efeitos, já a

linha transversal às barras representa a referência para $p=0,05$; os fatores são estatisticamente significativos com limite de confiança de 95%, se ultrapassarem essa linha.

Pode ser visto através do Gráfico 3 que o cimento foi o fator que influenciou de forma mais significativa o modelo, apresentando um efeito de 14,23. Esse resultado é esperado, pois o cimento é a adição que tem maior responsabilidade no aumento da resistência à compressão dos blocos de terra. Os efeitos que apresentam valor do lado esquerdo do limite de confiança não são estatisticamente significativos; por esse motivo eles podem ser descartados do modelo sem grandes perdas de representatividade.

Levando em consideração os efeitos significativos apresentados na Tabela 13, o modelo linear é dado pela Equação 09:

$$\text{Res.Comp.} = 2,84 + (1,369 * \text{Cim}) + (0,613 * \text{Cal}) + (0,213 * \text{CimCal})$$

Equação 09

A síntese dos resultados da análise de regressão para todas as variáveis de respostas analisadas é mostrada na Tabela 14.

Tabela 14 - ANOVA: resultados da análise de regressão para cimento, cal e sisal na resistência à compressão aos 30 dias e sem imersão.

| Variação Explicada | Soma Quadrática | Grau de Liberdade | Quadrado Médio | F calculado | F tabelado | Teste F |
|------------------------|-----------------|-------------------|----------------|-------------|------------|----------|
| Regressão | 55,09258 | 3 | 18,364193 | 16,02136 | 4,76 | 3,365833 |
| Resíduo | 6,87739 | 6 | 1,1462317 | | | |
| Falta de Ajuste | 2,21311 | 5 | 0,442622 | 0,094896 | 230,2 | 0,000412 |
| Erro Puro | 4,66428 | 1 | 4,66428 | | | |
| Total | 61,96997 | 9 | | | | |

Fazendo a análise da tabela ANOVA, pode ser visto que o modelo proposto é estatisticamente significativo, pois o valor do $F_{\text{calculado}}(\text{Regressão})$ é maior que o valor do $F_{\text{tabelado}}(\text{Resíduo})$. Sabe-se também que o modelo não precisa de ajustes, pois o $F_{\text{tabelado}}(\text{Falta de ajuste})$ é maior que o $F_{\text{calculado}}(\text{Erro puro})$.

Outra maneira de fazer a avaliação do modelo é através do gráfico que apresenta os valores observados e esperados, como mostrado no Gráfico 4. Os

valores esperados são os representados pela reta, já os observados são representados por pontos. Pode-se ver que os valores observados e esperados foram bastante próximos, confirmando que o modelo é significativo.

Gráfico 4 - Valores observados versus valores esperados para a resistência à compressão aos 30 dias sem imersão

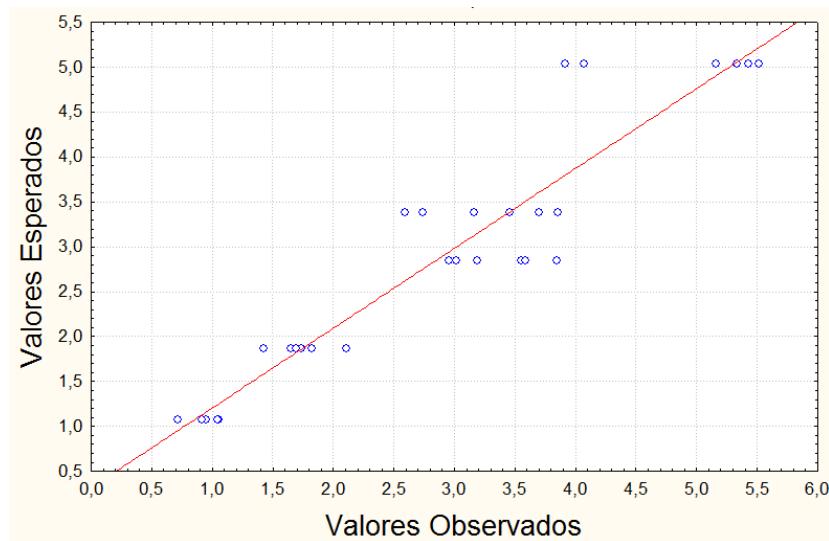
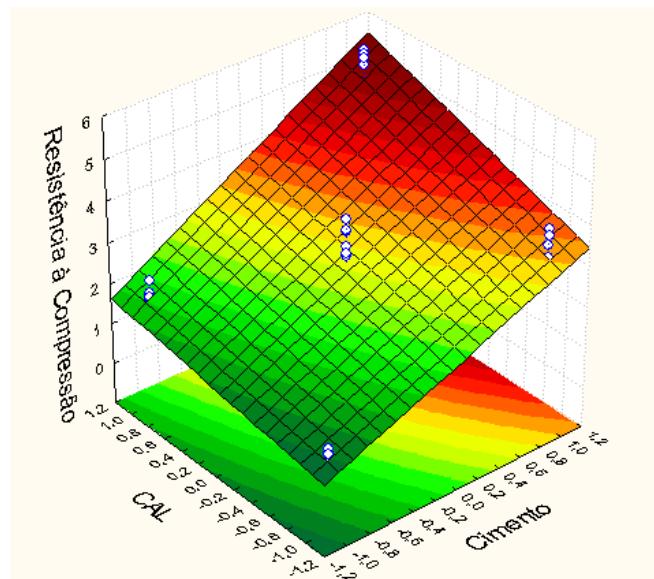


Gráfico 5 - Resistência à compressão aos 30 dias sem imersão em função da porcentagem do cimento e da cal.



Ao analisar a superfície de resposta mostrada no Gráfico 5, pode-se dizer que o modelo linear parece representar bem a relação entre a resposta e os fatores estudados.

Ao comparar o resultado retirado do modelo criado nesse estudo com alguns trabalhos de outros autores, podemos ver a similaridade entre os resultados, como visto na Tabela 15.

Tabela 15 - Comparação entre Modelo Linear e outros autores

| Cimento (%) | Resistência à Compressão com 30 dias sem imersão (MPa) | | |
|-------------|--|------------------------------------|------------------------------|
| | Grande (2013) | Pooyizhi, Aarthi e Gowthami (2015) | Modelo Linear desta pesquisa |
| 7,7 | 2,24 | - | 2,21 |
| 10 | 2,83 | - | 2,84 |
| 12 | | 3,05 | 3,39 |
| 14,3 | 4,22 | - | 4,01 |

- **Com Imersão em água por 6h**

Na Tabela 16 podem ser vistos os resultados encontrados para a resistência à compressão aos 30 dias com a etapa de imersão.

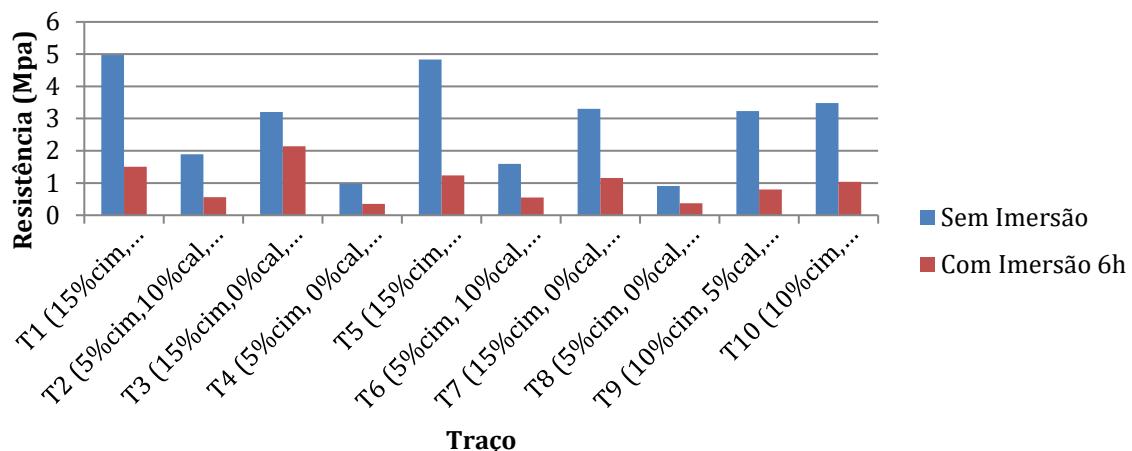
Tabela 16 - Resultado médio de resistência à compressão com imersão de 6h aos 30 dias.

| Traço | Área Bruta (cm ²) | Área Líquida (cm ²) | Carga Aplicada(Kgf) | Resistência Bruta(MPa) | Resistência Líquida(MPa) |
|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------|--------------------------|
| T1 (15%cim, 10%cal, 0,5sisal) | 156,25 | 127,99 | 2355,33 | 1,51 | 1,84 |
| T2 (5%cim,10%cal, 0,5%sisal) | 156,25 | 127,99 | 867,33 | 0,56 | 0,68 |
| T3 (15%cim,0%cal, 0,5%sisal) | 156,25 | 127,99 | 3343,67 | 2,14 | 2,61 |
| T4 (5%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 156,25 | 127,99 | 552,67 | 0,35 | 0,43 |
| T5 (15%cim, 10%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 1932,67 | 1,24 | 1,51 |
| T6 (5%cim, 10%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 853,00 | 0,55 | 0,67 |
| T7 (15%cim, 0%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 1808,67 | 1,16 | 1,41 |
| T8 (5%cim, 0%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 579,33 | 0,37 | 0,45 |
| T9 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 156,25 | 127,99 | 1245,67 | 0,80 | 0,97 |
| T10 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 156,25 | 127,99 | 1626,67 | 1,04 | 1,27 |

O traço contendo 15% de cimento e 0,5% de sisal foi o único que mostrou resistência superior à solicitada pela NBR 10834 (2012). Também pode ser visto que o cimento continua sendo o principal fator de aumento de resistência entre os traços. Ao comparar os traços T3 e T7, pode ser visto que a fibra aumentou a resistência do bloco. Como aos 30 dias, o bloco não ficou ao ar livre para a cal reagir, e após sua preparação para rompimento, ainda foi colocado em imersão, pode-se dizer que a cal

provavelmente não teve influência nesses resultados. Vale salientar também que, com o processo de imersão, o bloco perde certa quantidade de cal na água, pois, ao retirá-lo, percebeu-se sobra de cal nos recipientes.

Gráfico 6 - Comparaçāo entre as resistências à compressão aos 30 dias.



Ao analisar a comparação do Gráfico 6, podemos confirmar como a etapa de imersão diminui a resistência do bloco. Essa queda varia de 79%, no traço T8, até 56%, nos traços T3 e T7. Essa queda com o processo de imersão ocorre possivelmente por que o bloco não está estabilizado completamente pelas suas adições, e ainda é fragilizado pela presença de água, pois nem o cimento e nem o ar conseguiram reagir com as partículas de cal, de modo que o hidróxido de cálcio permaneceu solúvel na matriz do bloco de terra.

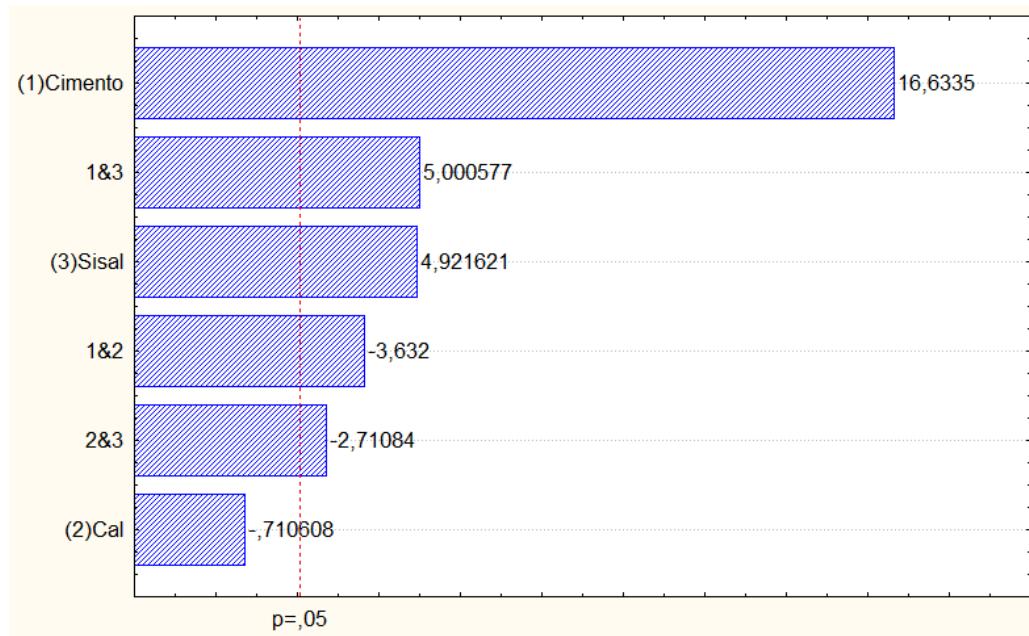
Conforme pode ser visto na Tabela 17, o único efeito ausente, que não foi estatisticamente significativo, foi o termo linear da cal.

Tabela 17 - Efeitos estimados do planejamento referente ao ensaio de compressão aos 30 dias e com imersão de 6h.

| | Desvio Padrão | | Limite de Confiança | | Coeficiente |
|------------------------------|---------------|-----------|---------------------|-----------|-------------|
| | Efeito | Erro Puro | -95% | 95% | |
| Média/Interação | 0,971 | 0,02832 | 0,912105 | 1,029895 | 0,971000 |
| Cimento | 1,05333 | 0,063326 | 0,92164 | 1,185027 | 0,526667 |
| Sisal | 0,311667 | 0,063326 | 0,179973 | 0,443360 | 0,155833 |
| Cimento e Cal | -0,23 | 0,063326 | -0,361694 | -0,098306 | -0,115000 |
| Cimento e Sisal | 0,316667 | 0,063326 | 0,184973 | 0,448360 | 0,158333 |
| Cal e Sisal | -0,171667 | 0,063326 | -0,300336 | -0,039973 | -0,085833 |
| R²=0,91847 | | | | | |

Pode ser visualizado também que o valor do coeficiente de determinação R^2 foi de aproximadamente 92%, comprovando que o modelo linear encontrado representa bem a relação entre os efeitos e a resposta.

Gráfico 7 - Diagrama de Pareto mostrando a influência dos fatores estudados para compressão aos 30 dias com imersão de 6h.



Pelo diagrama de Pareto mostrado no Gráfico 7, nota-se que a cal foi o único fator que não foi estatisticamente significativo, podendo assim ser desconsiderado do modelo estatístico. Outra informação que pode ser vista é que o cimento foi o fator com a maior influência sobre o modelo, comparado com os outros fatores. O sisal mostrou-se significativo possivelmente por ainda auxiliar o bloco na presença de pequenas fissuras, a partir do momento em que ocorreu algum tipo de retração, enquanto a mistura se estabilizava. Levando em consideração esses fatores, o modelo linear é dado pela Equação 10:

$$\text{Res.Comp.} = 0,971 + (0,527 * \text{Cim}) + (0,156 * \text{Sisal}) - (0,115 * \text{CimCal}) + (0,158 * \text{CimSisal}) - (0,085 * \text{CalSisal})$$

Equação 10

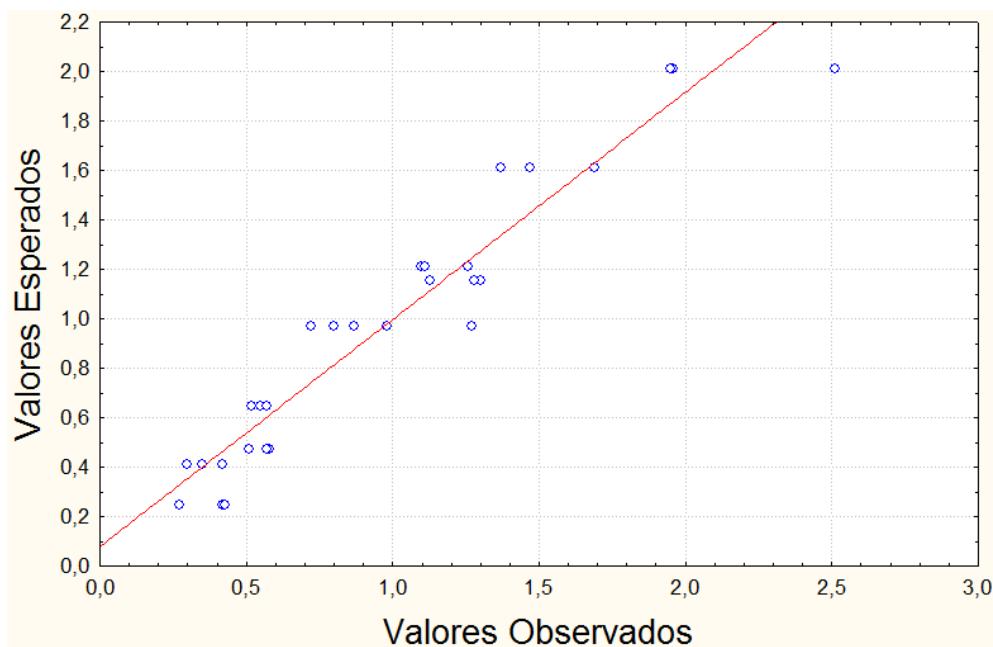
Na Tabela 18, o teste F comprova que o modelo é estatisticamente significativo e não precisa de ajustes.

Tabela 18 - ANOVA: resultados da análise de regressão para cimento, cal e sisal na resistência à compressão aos 30 dias com imersão de 6h.

| Variação Explicada | Soma Quadrática | Grau de Liberdade | Quadrado Médio | F calculado | F tabelado | Teste F |
|------------------------|-----------------|-------------------|----------------|-------------|------------|----------|
| Regressão | 8,335767 | 5 | 1,6671534 | 9,012821 | 4,76 | 1,89345 |
| Resíduo | 0,739903 | 4 | 0,1849758 | | | |
| Falta de Ajuste | 0,23462 | 3 | 0,0782067 | 0,154778 | 230,2 | 0,000672 |
| Erro Puro | 0,505283 | 1 | 0,505283 | | | |
| Total | 9,07567 | 9 | | | | |

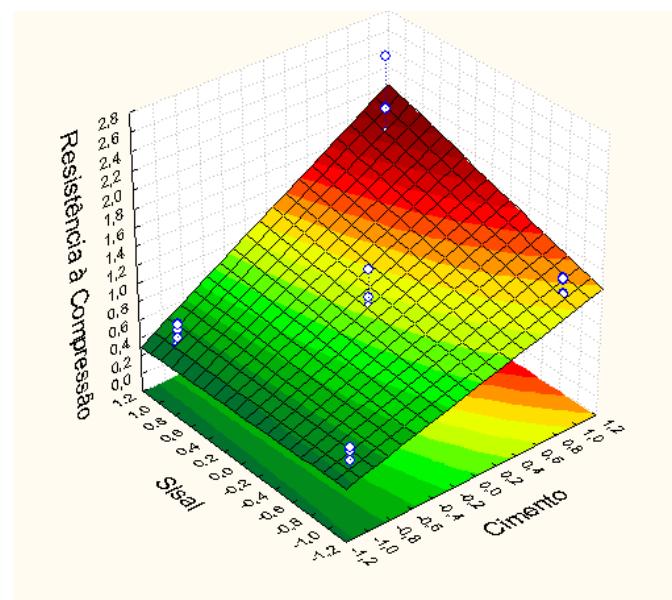
Pode ser visto também através do Gráfico 9, que os valores observados e esperados são bastante próximos, mostrando também a veracidade do modelo.

Gráfico 8 - Valores observados versus valores esperados para a resistência à compressão aos 30 dias com imersão de 6h.



Pela superfície de resposta encontrada do modelo, podemos confirmar também quanto maior é a influência do cimento em relação ao sisal (Gráfico 10).

Gráfico 9 - Resistência à compressão aos 30 dias com imersão de 6h em função da porcentagem do cimento e do sisal .



4.3.2-Ensaio com 90 Dias

Os resultados a seguir são referentes aos blocos que foram ensaiados após 90 dias de sua fabricação.

- **Sem Imersão**

Ao romper os corpos de prova com 90 dias de fabricação e sem aplicar o processo de imersão, foram obtidos os seguintes resultados para resistência à compressão.

Tabela 19 - Resultado médio de resistência à compressão sem imersão aos 90 dias.

| Traço | Área Bruta (cm ²) | Área Líquida (cm ²) | Carga Aplicada(Kgf) | Resistência Bruta(MPa) | Resistência Líquida(MPa) |
|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------|--------------------------|
| T1 (15%cim, 10%cal, 0,5sisal) | 156,25 | 127,99 | 6566,75 | 4,20 | 5,13 |
| T2 (5%cim,10%cal, 0,5%sisal) | 156,25 | 127,99 | 2802,5 | 1,79 | 2,19 |
| T3 (15%cim,0%cal, 0,5%sisal) | 156,25 | 127,99 | 4690,5 | 3,00 | 3,66 |
| T4 (5%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 156,25 | 127,99 | 1499,75 | 0,96 | 1,17 |
| T5 (15%cim, 10%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 5888 | 3,77 | 4,60 |
| T6 (5%cim, 10%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 2232,75 | 1,43 | 1,74 |
| T7 (15%cim, 0%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 5093,25 | 3,26 | 3,98 |
| T8 (5%cim, 0%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 1559 | 1,00 | 1,22 |
| T9 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 156,25 | 127,99 | 4246,25 | 2,72 | 3,32 |
| T10 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 156,25 | 127,99 | 4599,25 | 2,94 | 3,59 |

Como pode ser visto na Tabela 19, o cimento continuou sendo o principal responsável pelo aumento de resistência nos blocos. Após os primeiros 30 dias, os blocos foram retirados do saco e assim puderam ter contato com o ar e a cal pôde ter iniciada sua carbonatação e, consequentemente, passaria a influenciar nas propriedades físicas e mecânicas dos blocos. Isso pode ser notado pela Tabela 19, pois os traços com a adição de cal obtiveram uma resistência maior que os que não têm a cal.

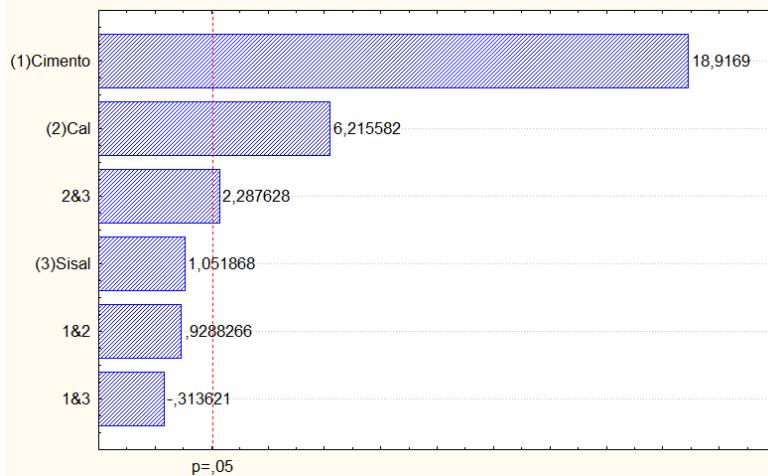
Com a Tabela 20 pode ser visto que o valor encontrado para o coeficiente de determinação R^2 foi de aproximadamente 90%, o que já aponta que o modelo linear encontrado representa bem a relação entre os efeitos e a resposta.

Tabela 20 - Efeitos estimados do planejamento referente ao ensaio de compressão aos 90 dias e sem imersão.

| Efeito | Desvio Padrão | Limite de | | | Coeficiente | |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--|
| | | Confiança | | -95% | | |
| | | 95% | | | | |
| Média/Interação | 2,507392 | 0,053502 | 2,398273 | 2,616511 | 2,507392 | |
| Cimento | 2,26312 | 0,119635 | 2,019123 | 2,507117 | 1,13156 | |
| Cal | 0,7436 | 0,119635 | 0,499603 | 0,987597 | 0,3718 | |
| Cal e Sisal | 0,27368 | 0,119635 | 0,029683 | 0,517677 | 0,13684 | |
| $R^2=0,90421$ | | | | | | |

Pelo diagrama de Pareto (Gráfico 10), pode ser visto que os únicos fatores que foram significativos para compor o modelo foram o cimento, a cal e a interação da cal com o sisal. Além disso, mostra que o cimento foi o principal influenciador nos resultados.

Gráfico 10 - Diagrama de Pareto mostrando a influência dos fatores estudados para compressão aos 90 dias sem imersão



Com os valores encontrados na Tabela 20 o modelo linear é dado pela Equação 11:

$$\text{Res.Comp.} = 2,507 + (1,131 * \text{Cim}) + (0,372 * \text{Cal}) + (0,137 * \text{CalSisal})$$

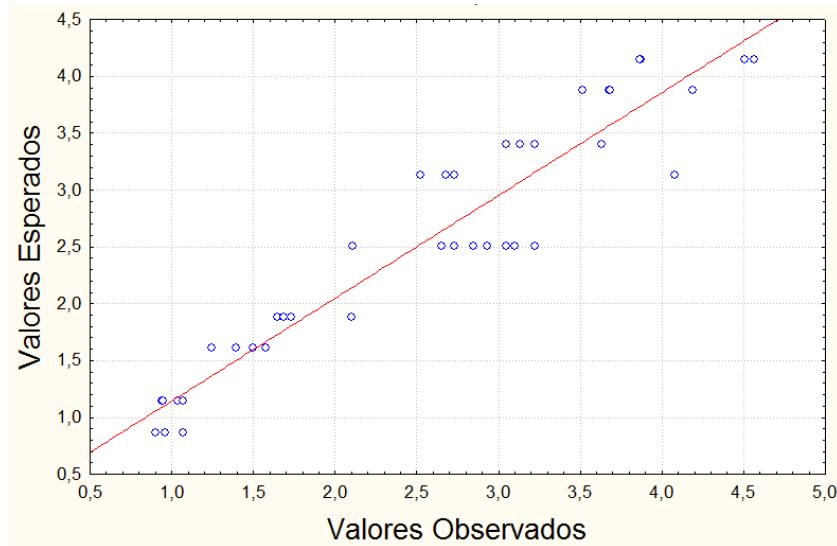
Equação 11

Fazendo então o Teste F através dos resultados obtidos pela Tabela 21, pode-se concluir que o modelo é estatisticamente significativo e não precisa de ajustes. Essa conclusão também pode ser vista com a ajuda do Gráfico 11, que compara valores observados e esperados, bastante próximos.

Tabela 21 - ANOVA: resultados da análise de regressão para cimento, cal e sisal na resistência à compressão aos 90 dias e sem imersão.

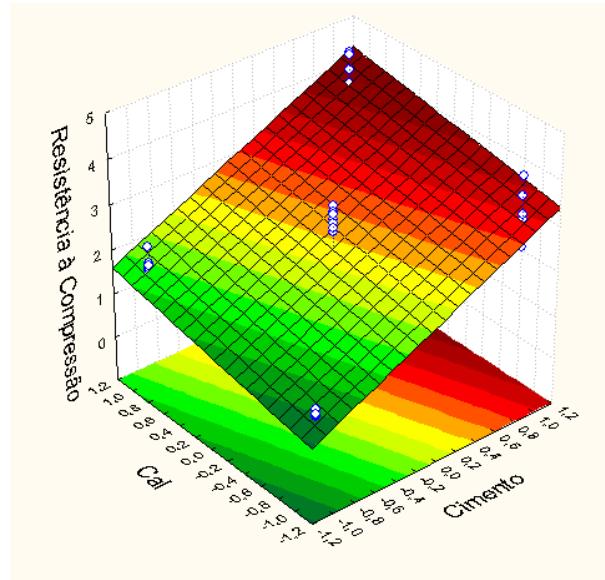
| Variação Explicada | Soma Quadrática | Grau de Liberdade | Quadrado Médio | F calculado | F tabelado | Teste F |
|------------------------|-----------------|-------------------|----------------|-------------|------------|----------|
| Regressão | 45,99643 | 3 | 15,332143 | 18,87986 | 4,76 | 3,966357 |
| Resíduo | 4,87254 | 6 | 0,81209 | | | |
| Falta de Ajuste | 1,32304 | 5 | 0,264608 | 0,074548 | 230,2 | 0,000324 |
| Erro Puro | 3,5495 | 1 | 3,5495 | | | |
| Total | 50,86897 | 9 | | | | |

Gráfico 11 - Valores observados versus valores esperados para a resistência à compressão aos 90 dias sem imersão



Pela superfície de respostas vista no Gráfico 12 podemos ver como o cimento e a cal são influentes na resistência do bloco. A cal começou a mostrar sua influência, pois começou a entrar em contato com o ar e, portanto, a reagir.

Gráfico 12 - Resistência à compressão aos 90 dias sem imersão em função da porcentagem do cimento e da cal.



Como pode ser visto na Tabela 22, os resultados encontrados no modelo foram um pouco menor que o de GRANDE (2013), mas similares. Essa diferença pode ter ocorrido devido ao tipo de terra utilizada por GRANDE (2013, que tinha uma

porcentagem de argila de 10%, pois uma terra com mais argila, indica menos areia e consequentemente uma menor reação com o cimento.

Tabela 22 - Comparação do modelo linear com outros autores

| Cimento (%) | Resistência à Compressão com 90 dias sem imersão (MPa) | |
|-------------|--|------------------------------|
| | Grande (2013) | Modelo Linear desta pesquisa |
| 7,7 | 2,24 | 1,99 |
| 10 | 2,83 | 2,5 |
| 14,3 | 4,22 | 3,48 |

- **Com Imersão de 6h**

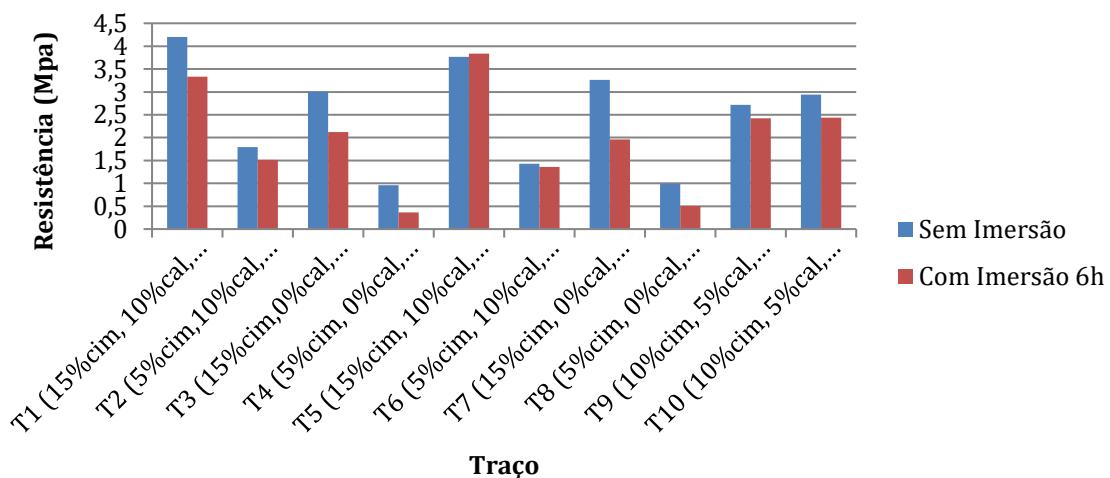
Tabela 23 - Resultado médio de resistência à compressão com imersão de 6h aos 90 dias.

| Traço | Área Bruta (cm ²) | Área Líquida (cm ²) | Carga Aplicada(Kgf) | Resistência Bruta(MPa) | Resistência Líquida(MPa) |
|--|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------|--------------------------|
| T1 (15%cim, 10%cal, 0,5sisal) | 156,25 | 127,99 | 5202,00 | 3,33 | 4,06 |
| T2 (5%cim,10%cal, 0,5%sisal) | 156,25 | 127,99 | 2365,67 | 1,51 | 1,84 |
| T3 (15%cim,0%cal, 0,5%sisal) | 156,25 | 127,99 | 3315,33 | 2,12 | 2,59 |
| T4 (5%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 156,25 | 127,99 | 573,33 | 0,37 | 0,45 |
| T5 (15%cim, 10%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 5990,33 | 3,83 | 4,68 |
| T6 (5%cim, 10%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 2125,67 | 1,36 | 1,66 |
| T7 (15%cim, 0%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 3065,00 | 1,96 | 2,39 |
| T8 (5%cim, 0%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 789,33 | 0,50 | 0,62 |
| T9 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 156,25 | 127,99 | 3781,00 | 2,42 | 2,95 |
| T10 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 156,25 | 127,99 | 3812,67 | 2,44 | 2,98 |

Como nos resultados encontrados com 30 dias de fabricação, os blocos com 90 dias também mostraram que o processo de imersão diminui as resistências. Mesmo assim pode ser visto na Tabela 23 um aumento nas resistências à compressão comparados com o ensaio de 30 dias com imersão, indicando uma melhora na estabilização dos blocos e na resistência à água. Os traços que obtiveram resistências superiores a 2,0 MPa foram os traços que possuem 15% e 10% de cimento, mostrando a importância desse material para esse aspecto mecânico. Se analisarmos os traços T1 e T3, separadamente, pode-se ver também que a adição de 10% de cal

foi um fator de aumento de resistência, já que após 30 dias, os blocos foram deixados ao ar livre e a cal pôde começar a reagir.

Gráfico 13 - Comparaçao entre as resistências à compressão aos 90 dias.



Com os ensaios de 90 dias, a etapa de imersão ainda é responsável por diminuir a resistência, como visto no Gráfico 13, mas agora o bloco já tem sua estrutura bem desenvolvida e com produtos de reação bem mais formados tanto pelo cimento como pela cal, por isso que a queda chega a ser bem menor quando comparada à dos ensaios de 30 dias. O traço T8 continua sendo o responsável pela maior queda, com 50%, possivelmente por ser o bloco com menos adição, deixando-o com uma maior fragilidade ainda sobre a água. Já o traço T5 chegou a ter um leve aumento de resistência de aproximadamente 2%; esse aumento foi diferente de todos os outros traços, não se conseguiu explicar o fenômeno e acredita-se que tal efeito necessita de mais estudos continuado, de modo a se ter uma melhor compressão.

Com um valor de aproximadamente 85% de coeficiente de determinação, já temos um primeiro indicativo que o modelo linear possivelmente terá uma boa relação entre os efeitos e a resposta.

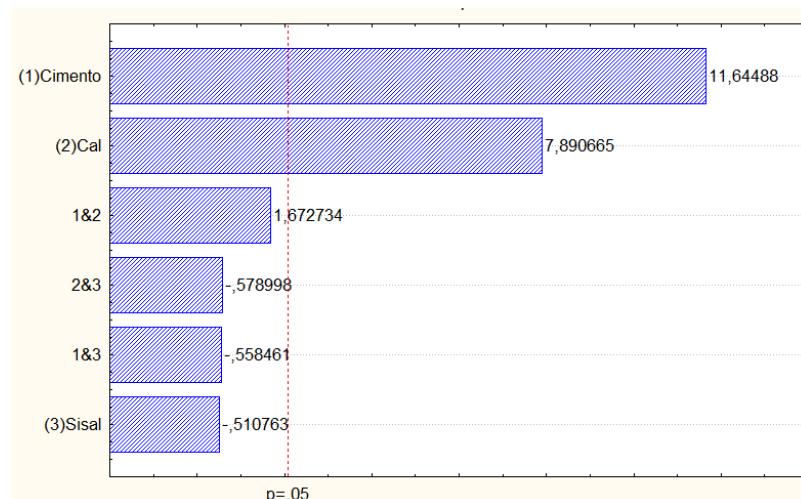
Tabela 24 - Efeitos estimados do planejamento referente ao ensaio de compressão aos 90 dias e com imersão de 6h.

| Desvio Padrão | Limite de Confiança | Coeficiente |
|---------------|---------------------|-------------|
|---------------|---------------------|-------------|

| | Efeito | Erro Puro | -95% | 95% | |
|------------------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Média/Interação | 1,985301 | 0,072008 | 1,835553 | 2,135049 | 1,985301 |
| Cimento | 1,874987 | 0,161014 | 1,54014 | 2,209833 | 0,937493 |
| Cal | 1,270507 | 0,161014 | 0,93566 | 1,605353 | 0,635253 |
| R²=0,84446 | | | | | |

Através do diagrama de Pareto, mostrado no Gráfico 14, vemos que os únicos fatores que foram significativos e influenciaram no modelo linear foram o cimento e a cal. Anteriormente, nos ensaio de 30 dias, a cal não tinha reagido ainda, pois além de precisar do ar para reagir, ela também precisava de tempo, e com essa análise podemos confirmar o início de sua reação.

Gráfico 14 - Diagrama de Pareto mostrando a influência dos fatores estudados para compressão aos 90 dias com imersão de 6h.



O sisal aos 30 dias foi significativo e aos 90 dias deixou de ser, isso pode ser explicado pelo fato do bloco possivelmente já estar estabilizado suficiente para não precisar do auxílio do sisal para diminuir as fissuras.

Usando-se os efeitos estimados na Tabela 26, o modelo linear é dado pela Equação 12.

$$\text{Res.Comp} = 1,985 + (0,937 \cdot \text{Cim}) + (0,635 \cdot \text{Cal})$$

Equação 12

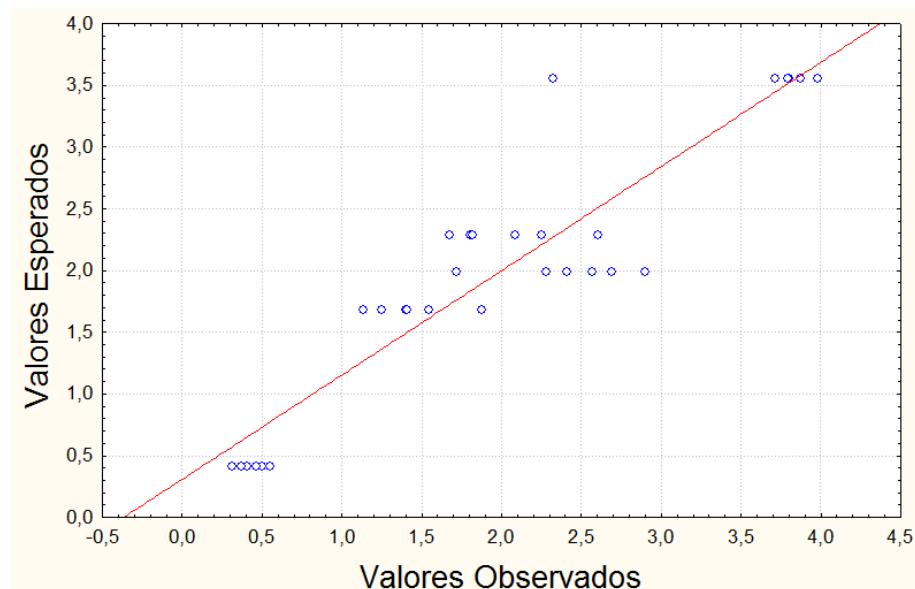
Como modelo definido, dá-se início aos testes para analisar sua significância estatística. Pelo Teste F, visto na Tabela 25, podemos concluir que o modelo além de ser estatisticamente significativo, não precisa de ajuste, e isso também pode ser

confirmado através do Gráfico 15, que compara valores observados e esperados. Os valores foram bem próximos um dos outros.

Tabela 25 - ANOVA: resultados da análise de regressão para cimento, cal e sisal na resistência à compressão aos 90 dias e com imersão de 6h.

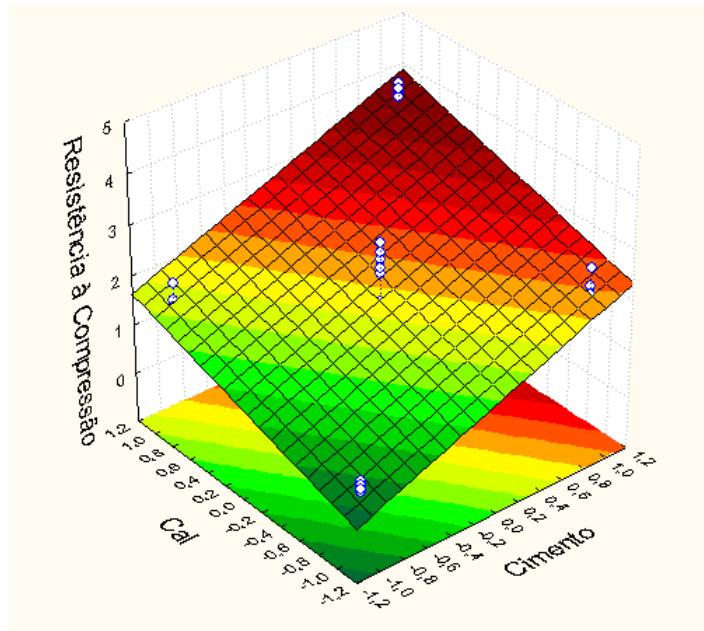
| Variação Explícada | Soma Quadrática | Grau de Liberdade | Quadrado Médio | F calculado | F tabelado | Teste F |
|------------------------|-----------------|-------------------|----------------|-------------|------------|----------|
| Régressão | 30,77857 | 2 | 15,389285 | 19,00166 | 4,74 | 4,00879 |
| Resíduo | 5,66924 | 7 | 0,8098914 | | | |
| Falta de Ajuste | 2,40263 | 6 | 0,4004383 | 0,122585 | 234 | 0,000524 |
| Erro Puro | 3,26661 | 1 | 3,26661 | | | |
| Total | 36,44781 | 9 | | | | |

Gráfico 15 - Valores observados versus valores esperados para a resistência à compressão aos 90 dias com imersão de 6h.



Através do gráfico de superfície de resposta do modelo (Gráfico 16), podemos ver que quanto maior a adição de cimento e cal, maior será sua resistência à compressão.

Gráfico 16 - Resistência à compressão aos 90 dias com imersão de 6h em função da porcentagem do cimento e da cal.



4.3.3-Ensaio com 180 Dias

Os resultados a seguir são referentes aos blocos que foram ensaiados após 180 dias de sua fabricação.

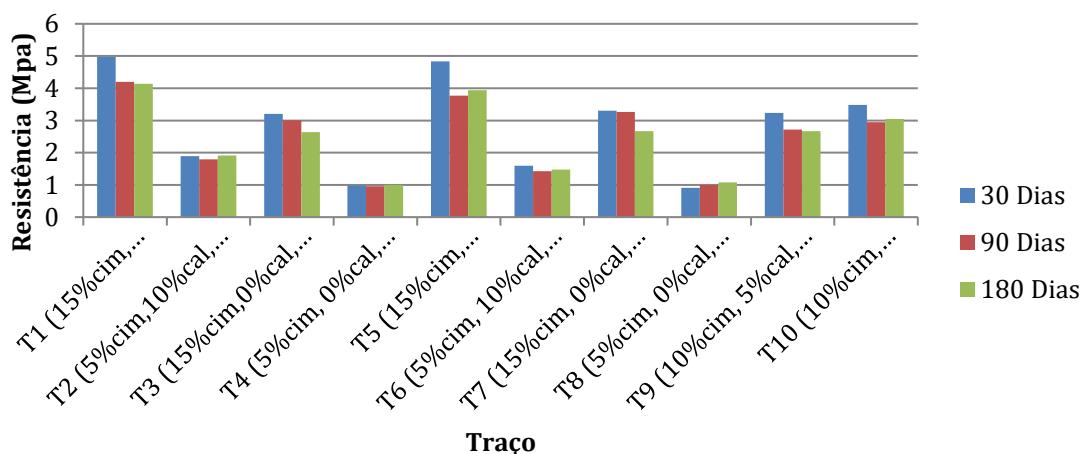
- **Sem Imersão**

Tabela 26 -Resultado médio de resistência à compressão sem imersão aos 180 dias.

| Traço | Área Bruta (cm ²) | Área Líquida (cm ²) | Carga Aplicada(Kgf) | Resistência Bruta(MPa) | Resistência Líquida(MPa) |
|--|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------|--------------------------|
| T1 (15%cim, 10%cal, 0,5sisal) | 156,25 | 127,99 | 6461,00 | 4,14 | 5,05 |
| T2 (5%cim,10%cal, 0,5%sisal) | 156,25 | 127,99 | 2984,75 | 1,91 | 2,33 |
| T3 (15%cim,0%cal, 0,5%sisal) | 156,25 | 127,99 | 4123,25 | 2,64 | 3,22 |
| T4 (5%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 156,25 | 127,99 | 1561,75 | 1,00 | 1,22 |
| T5 (15%cim, 10%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 6154,75 | 3,94 | 4,81 |
| T6 (5%cim, 10%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 2299,25 | 1,47 | 1,80 |
| T7 (15%cim, 0%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 4161,00 | 2,66 | 3,25 |
| T8 (5%cim, 0%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 1682,50 | 1,08 | 1,31 |
| T9 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 156,25 | 127,99 | 4167,00 | 2,67 | 3,26 |
| T10 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 156,25 | 127,99 | 4750,50 | 3,04 | 3,71 |

O cimento continua se mostrando o maior influente nos resultados, e os traços com 15% e 10% de cimentos foram os únicos que tiveram resistência superior às solicitadas pela norma. Pode ser visto também na Tabela 26 que a cal foi um fator importante para o aumento na resistência quando comparamos os traços T1 e T3 ou até mesmo os traços T2 e T4. Isso pode ser explicado pelo mesmo motivo dos blocos ensaiados aos 90 dias. Como os blocos ficaram ao ar livre, e a cal é aérea, ela pôde reagir com o CO₂. Segundo estudo feito por Jagadish et al (2014), a adição de cal no bloco de terra pode aumentar a sua resistência até os seus 2 anos de idade, ou seja, a cal reage de forma lenta com a argila, podendo se estender por anos.

Gráfico 17 - Comparaçāo das resistências à compressão sem imersão aos 30, 90 e 180 dias.



Como podemos ver no Gráfico 17, sem o processo de imersão não tem uma grande variação nas resistências ao passar do tempo. Apenas os traços T1 e T5 tiveram uma queda na resistência entre 30 e 90 dias, mas depois se mantiveram aproximadamente constantes, como os outros traços. Ao analisar os pontos centrais T9 e T10, podemos ver também que não teve uma variação entre eles, mostrando a qualidade do ensaio.

Para saber se essa queda entre 30, 90 e 180 dias é realmente significativa, foi feito o Teste de Tukey, com o auxílio do programa *Past*. O Teste de Tukey faz uma comparação das médias, mostrando se a diferença entre elas é estatisticamente significativa, ou seja, com o teste podemos saber se a queda que obtivemos aos 90 e 180 dias é realmente significativa em relação à média obtida aos 30 dias. Ao colocar os resultados obtidos no programa *Past*, uma tabela é gerada, onde somente os resultados evidenciados possuem uma diferença significativa. Esses resultados são a

comparação entre as diferenças da média e a mínima significativa calculada. Através do teste feito, os seguintes resultados foram obtidos.

Tabela 27 - Teste de Tukey para Resistência à compressão sem imersão

| T1 | | | | T2 | | | |
|-----------------|---------|----------------|----------|-----------------|---------|---------|----------|
| | 30 dias | 90 dias | 180 dias | | 30 dias | 90 dias | 180 dias |
| 30 dias | | 0,2635 | 0,2152 | 30 dias | | 0,7505 | 0,9862 |
| 90 dias | 2,403 | | 0,9857 | 90 dias | 1,04 | | 0,617 |
| 180 dias | 2,614 | 0,2285 | | 180 dias | 0,2248 | 1,366 | |
| T3 | | | | T4 | | | |
| | 30 dias | 90 dias | 180 dias | | 30 dias | 90 dias | 180 dias |
| 30 dias | | 0,8751 | 0,3843 | 30 dias | | 0,9732 | 0,9328 |
| 90 dias | 0,7017 | | 0,6093 | 90 dias | 0,3142 | | 0,8106 |
| 180 dias | 1,984 | 1,385 | | 180 dias | 0,5048 | 0,8846 | |
| T5 | | | | T6 | | | |
| | 30 dias | 90 dias | 180 dias | | 30 dias | 90 dias | 180 dias |
| 30 dias | | 0,04477 | 0,0894 | 30 dias | | 0,2659 | 0,4613 |
| 90 dias | 4,148 | | 0,8695 | 90 dias | 2,393 | | 0,8818 |
| 180 dias | 3,482 | 0,7186 | | 180 dias | 1,763 | 0,6811 | |
| T7 | | | | T8 | | | |
| | 30 dias | 90 dias | 180 dias | | 30 dias | 90 dias | 180 dias |
| 30 dias | | 0,989 | 0,1519 | 30 dias | | 0,5628 | 0,1802 |
| 90 dias | 0,2001 | | 0,1486 | 90 dias | 1,499 | | 0,6035 |
| 180 dias | 2,966 | 2,987 | | 180 dias | 2,795 | 1,399 | |
| T9 | | | | T10 | | | |
| | 30 dias | 90 dias | 180 dias | | 30 dias | 90 dias | 180 dias |
| 30 dias | | 0,3122 | 0,255 | 30 dias | | 0,07618 | 0,149 |
| 90 dias | 2,219 | | 0,9848 | 90 dias | 3,636 | | 0,8744 |
| 180 dias | 2,437 | 0,2357 | | 180 dias | 2,985 | 0,704 | |

As células sublinhadas indicam que a diferença entre as médias foi estaticamente significativa, com isso pode ser visto que apenas o traço T5 teve uma variação de média significativa, que foi entre 30 e 90 dias. Quando comparado o traço T5 de 30 dias com o de 180 dias, vemos que não é significativo a queda, nem entre 90 e 180 dias, ou seja, essa queda que foi encontrada aos 90 dias, tais mecanismos necessitam de mais pesquisas para chegar a uma conclusão mais plausível. Erros aleatórios sempre estão presentes e podem também causar algumas diferenças nos resultados, por isso a necessidade de mais ensaios.

Pela tabela de efeitos estimados, podemos ver que o valor do coeficiente de determinação foi de aproximadamente 89%, indicando a boa relação entre os efeitos e a resposta.

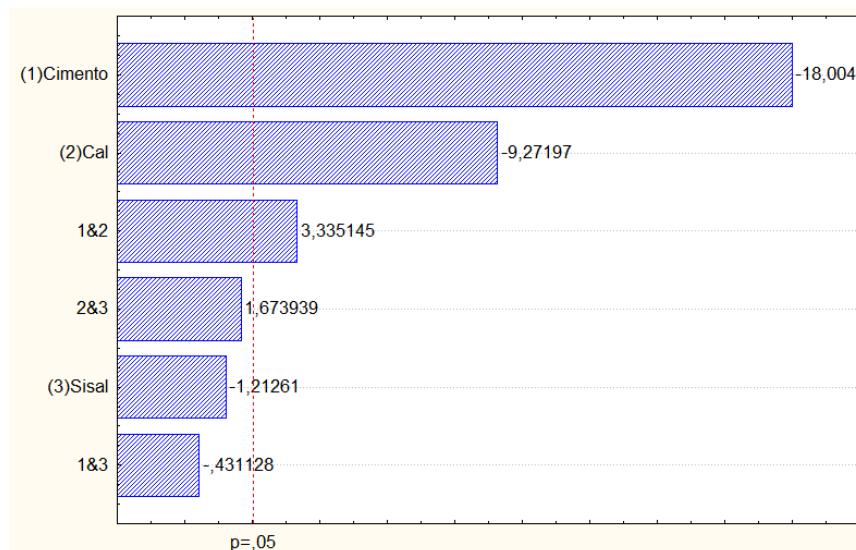
Tabela 28 - Efeitos estimados do planejamento referente ao ensaio de compressão aos 180 dias e sem imersão.

| Desvio Padrão | Limite de Confiança | Coeficiente |
|---------------|---------------------|-------------|
|---------------|---------------------|-------------|

| | Efeito | Erro Puro | -95% | 95% | |
|--------------------------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Média/Interação | 2,45413 | 0,049169 | 2,35385 | 2,55441 | 2,454128 |
| Cimento | -1,97948 | 0,109944 | -2,20371 | -1,75525 | -0,989740 |
| Cal | -1,01940 | 0,109944 | -1,24363 | -0,79517 | -0,509700 |
| Cimento e Cal | 0,36668 | 0,109944 | 0,14245 | 0,59091 | 0,183340 |
| R²=0,0,88935 | | | | | |

O diagrama de Pareto (Gráfico 18) mostra que o cimento, a cal e a interação do cimento com a cal foram os fatores responsáveis pelo modelo linear, onde o cimento foi o mais influente de todos. Com o passar dos dias, pode ser visto que os mesmos fatores sempre foram significativos para a construção do modelo linear.

Gráfico 18 - Diagrama de Pareto mostrando a influência dos fatores estudados para compressão aos 180 dias sem imersão.



Tendo os fatores influentes, pode-se assim escrever o modelo linear mostrado na Equação 13.

$$\text{Res.Comp.} = 2,454 - (0,9897 * \text{Cim}) - (0,5097 * \text{Cal}) + (0,1833 * \text{CimCal})$$

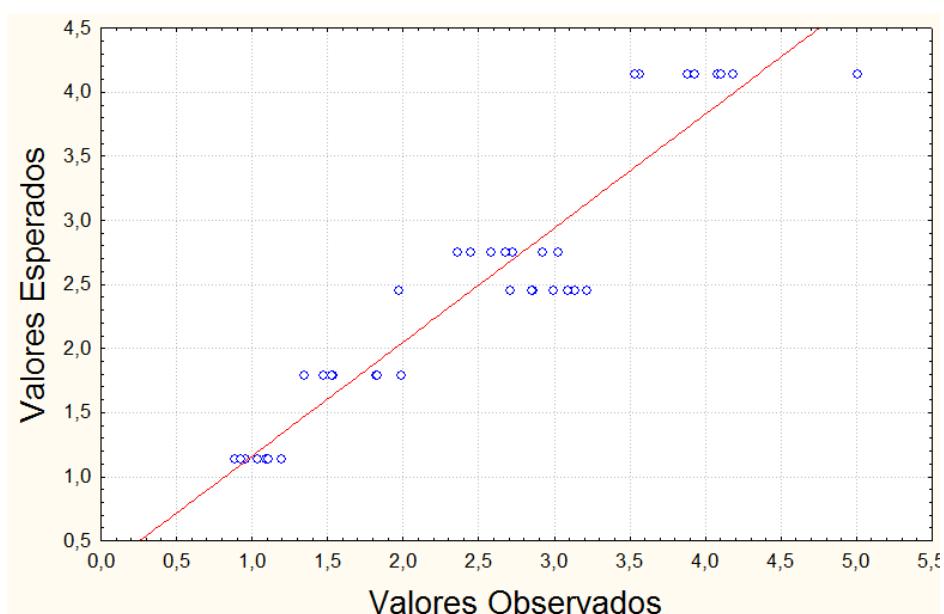
Equação 13

Ao fazer o Teste F, conclui-se que o modelo definido além de ser estatisticamente significativo, ainda não precisa de ajustes, como pode ser confirmado também através da proximidade dos resultados observados e esperados visto no Gráfico 19.

Tabela 29 - ANOVA: resultados da análise de regressão para cimento, cal e sisal na resistência à compressão aos 180 dias e sem imersão.

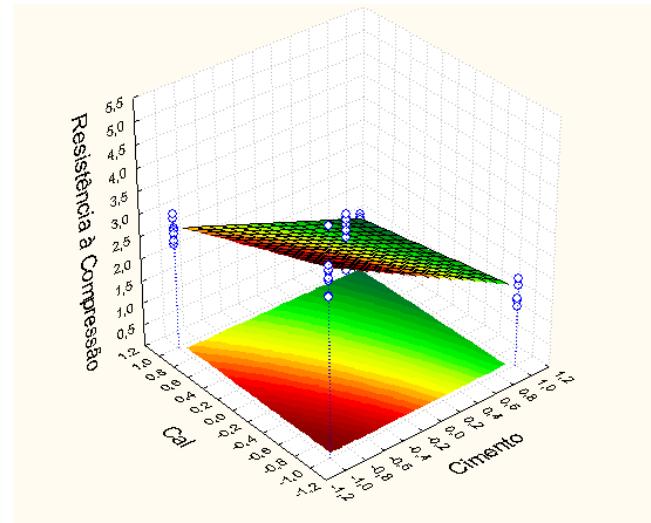
| Variação Explicada | Soma Quadrática | Grau de Liberdade | Quadrado Médio | F calculado | F tabelado | Teste F |
|------------------------|-----------------|-------------------|----------------|-------------|------------|----------|
| Régressão | 40,73577 | 3 | 13,57859 | 16,07431 | 4,76 | 3,376957 |
| Resíduo | 5,06843 | 6 | 0,8447383 | | | |
| Falta de Ajuste | 2,07067 | 5 | 0,414134 | 0,138148 | 230,2 | 0,0006 |
| Erro Puro | 2,99776 | 1 | 2,99776 | | | |
| Total | 45,8042 | 9 | | | | |

Gráfico 19 - Valores observados versus valores esperados para a resistência à compressão aos 180 dias sem imersão.



Pela superfície de resposta no Gráfico 20 pode ser visto a influência do cimento e da cal, que continua reagindo durante o tempo. Para se discutir mais profundamente é necessário estudos a respeito da cristalinidade e/ou pozolanicidade da argila em estudo. Exemplo semelhante pode ser encontrado na literatura no estudo de JAGADISH, et al. (2014), no qual a cal reage com a argila no BTC até os seus 2 anos de idade, dado que ela tem uma reação muito lenta com o material.

Gráfico 20 - Resistência à compressão aos 180 dias sem imersão em função da porcentagem do cimento e da cal.



- **Com Imersão de 6h**

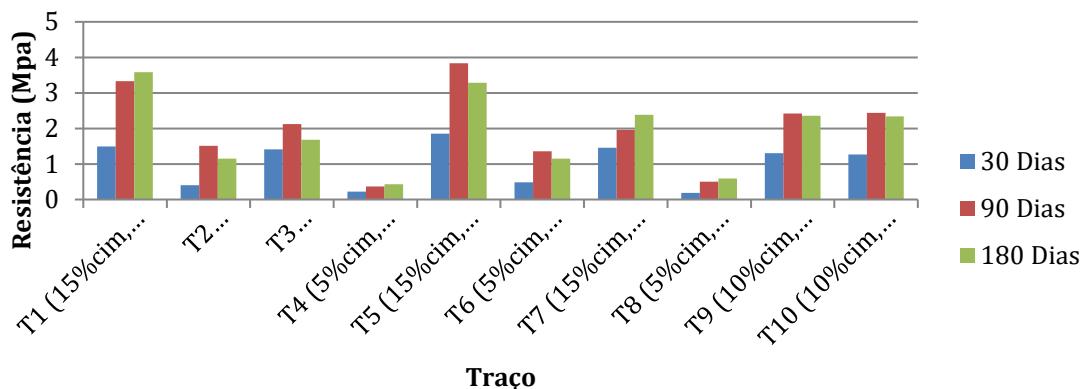
Tabela 30 - Resultado médio de resistência à compressão com imersão de 6h aos 180 dias.

| Traço | Área Bruta (cm ²) | Área Líquida (cm ²) | Carga Aplicada(Kgf) | Resistência Bruta(MPa) | Resistência Líquida(MPa) |
|--|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------|--------------------------|
| T1 (15%cim, 10%cal, 0,5sisal) | 156,25 | 127,99 | 5595,67 | 3,58 | 4,37 |
| T2 (5%cim,10%cal, 0,5%sisal) | 156,25 | 127,99 | 1802,00 | 1,15 | 1,41 |
| T3 (15%cim,0%cal, 0,5%sisal) | 156,25 | 127,99 | 2629,00 | 1,68 | 2,05 |
| T4 (5%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 156,25 | 127,99 | 670,00 | 0,43 | 0,52 |
| T5 (15%cim, 10%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 5129,67 | 3,28 | 4,01 |
| T6 (5%cim, 10%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 1795,33 | 1,15 | 1,40 |
| T7 (15%cim, 0%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 3727,00 | 2,39 | 2,91 |
| T8 (5%cim, 0%cal, 0%sisal) | 156,25 | 127,99 | 926,67 | 0,59 | 0,72 |
| T9 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 156,25 | 127,99 | 3687,33 | 2,36 | 2,88 |
| T10 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 156,25 | 127,99 | 3661,00 | 2,34 | 2,86 |

Com 180 dias os resultados ainda comprovam a diminuição da resistência ao adicionar o processo de imersão. Além do cimento, a cal também mostra ser uma adição de grande influência nos resultados devido à sua reação com o ar que ocorre de forma lenta com o passar dos dias.

Após esse tempo, também pôde ser visto uma queda em todas as resistências, em comparação aos resultados com 90 dias, como pode ser visto Gráfico 20?.

Gráfico 21 - Comparação das resistências à compressão com imersão de 6h ao longo dos dias.



Para saber se essa queda entre 90 e 180 dias é realmente significativa, foi feito o Teste de Tukey, com o auxílio do software *Past*. O Teste de Tukey faz uma comparação das médias, mostrando se a diferença entre elas é estatisticamente significativa, ou seja, com o teste podemos saber se a queda que obtivemos aos 180 dias é realmente significativa em relação à média obtida aos 90 dias. Através do teste, obtiveram-se os seguintes resultados.

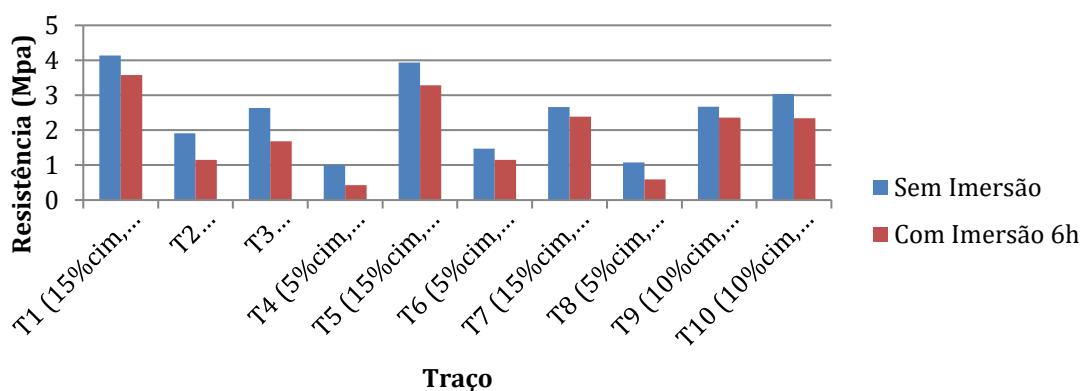
Tabela 31- Teste de Tukey para os Traços com imersão de 6h

| T1 | | | T2 | | | | |
|-----------------|---------|-----------------|-----------------|-----------------|---------|-----------------|-----------------|
| | 30 dias | 90 dias | 180 dias | | 30 dias | 90 dias | 180 dias |
| 30 dias | | <u>0,0186</u> | <u>0,01033</u> | 30 dias | | <u>0,003074</u> | <u>0,02801</u> |
| 90 dias | 5,523 | | 0,855 | 90 dias | 8,046 | | 0,1616 |
| 180 dias | 6,287 | 0,7641 | | 180 dias | 5,02 | 3,026 | |
| T3 | | | T4 | | | | |
| | 30 dias | 90 dias | 180 dias | | 30 dias | 90 dias | 180 dias |
| 30 dias | | 0,9981 | 0,3628 | 30 dias | | 0,9387 | 0,2018 |
| 90 dias | 0,08252 | | 0,3879 | 90 dias | 0,4815 | | 0,3071 |
| 180 dias | 2,097 | 2,014 | | 180 dias | 2,778 | 2,296 | |
| T5 | | | T6 | | | | |
| | 30 dias | 90 dias | 180 dias | | 30 dias | 90 dias | 180 dias |
| 30 dias | | <u>0,000122</u> | <u>0,000466</u> | 30 dias | | <u>0,00169</u> | <u>0,007725</u> |
| 90 dias | 14,54 | | 0,1536 | 90 dias | 9,026 | | 0,2953 |
| 180 dias | 11,45 | 3,083 | | 180 dias | 6,684 | 2,343 | |
| T7 | | | T8 | | | | |
| | 30 dias | 90 dias | 180 dias | | 30 dias | 90 dias | 180 dias |
| 30 dias | | <u>0,02272</u> | <u>0,003058</u> | 30 dias | | 0,1269 | <u>0,01992</u> |
| 90 dias | 5,275 | | 0,2015 | 90 dias | 3,294 | | 0,3488 |
| 180 dias | 8,054 | 2,78 | | 180 dias | 5,438 | 2,144 | |
| T9 | | | T10 | | | | |
| | 30 dias | 90 dias | 180 dias | | 30 dias | 90 dias | 180 dias |
| 30 dias | | <u>0,000109</u> | <u>0,000135</u> | 30 dias | | <u>0,02203</u> | <u>0,02985</u> |
| 90 dias | 14,83 | | 0,9223 | 90 dias | 5,313 | | 0,9633 |
| 180 dias | 14,28 | 0,5453 | | 180 dias | 4,944 | 0,3697 | |

As células sublinhadas indicam que a diferença entre as médias foi estaticamente significativa, com isso podemos ver que se pegarmos a linha de 90 dias e compararmos com a coluna de 180 dias, nenhum traço foi significativo, indicando que a diferença de resistência entre 90 e 180 dias não foi estatisticamente significativa. Outra análise pode ser vista quando se compara a diferença existente entre 30 e 90 dias, que na maior parte dos traços foi significativa e é explicada pela ação da cal após os 30 dias, com o seu contato com o ar.

Com o processo de imersão anterior ao rompimento do bloco, pode-se ver que as resistências dos blocos aumentaram consideravelmente na segunda medição dos 90 dias, o que foi confirmado também através do Gráfico 21. A repetição do ponto central mostra que os processos e ensaios foram bastante similares, pois mostram valores quase iguais. O processo de imersão pode ser explicado como uma forma maior de segurança no resultado do ensaio de 30 dias, já que podemos ver que o bloco não tem ainda sua resistência e estabilidade completas. Já a partir de 90 dias podemos ver que a variação na resistência é muito pequena, mostrando que o bloco já está com uma resistência muito próxima da máxima alcançada.

Gráfico 22 - Comparação entre as resistências à compressão aos 180 dias.



Através da semelhança nos resultados, comparado com os resultados encontrados aos 30 dias, com e sem imersão depois de 180 dias, podemos confirmar a estabilidade do bloco, indicando que possivelmente não terá uma maior variação de resistência ao longo dos próximos dias por causa do processo de imersão.

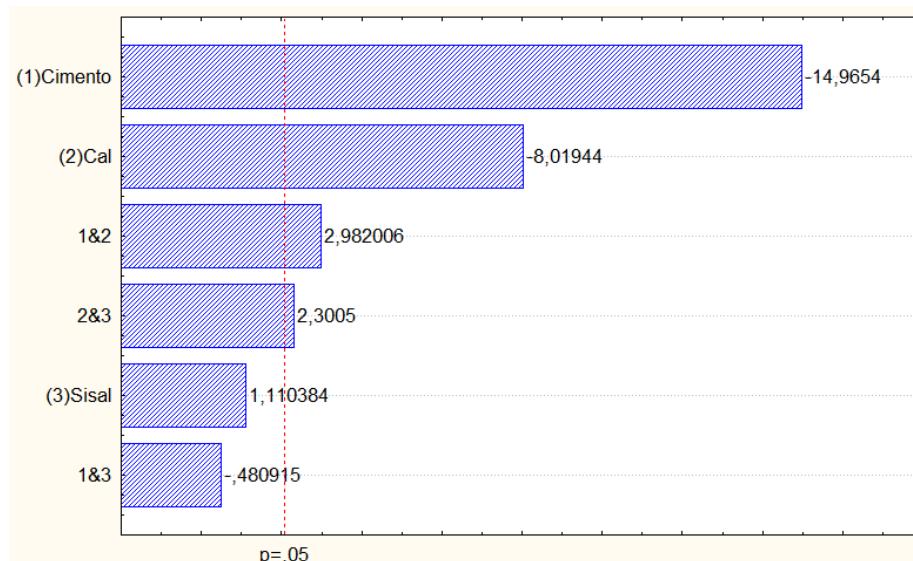
Com um coeficiente de determinação de aproximadamente 88%, o modelo mostra uma boa relação entre os efeitos e a resposta.

Tabela 32 - Efeitos estimados do planejamento referente ao ensaio de compressão aos 180 dias e com imersão de 6h.

| | Limite de | | | | |
|-----------------------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|
| | Desvio Padrão | | Confiança | | Coeficiente |
| Efeito | Erro Puro | -95% | 95% | | |
| Média/Interação | 1,89591 | 0,056837 | 1,77772 | 2,01411 | 1,895915 |
| Cimento | -1,90197 | 0,127091 | -2,16627 | -1,63767 | -0,950987 |
| Cal | -1,01920 | 0,127091 | -1,28350 | -0,75490 | -0,509600 |
| Cimento e Cal | 0,37899 | 0,127091 | 0,11469 | 0,64329 | 0,189493 |
| Cal e Sisal | 0,29237 | 0,127091 | 0,02807 | 0,55667 | 0,146187 |
| R²=0,8801 | | | | | |

Pelo diagrama de Pareto, mostrado no Gráfico 23, pode-se ver que os fatores que foram estatisticamente significativos para o modelo linear foram o cimento, a cal, a interação do cimento e da cal, e a interação da cal com o sisal.

Gráfico 23 - Diagrama de Pareto mostrando a influência dos fatores estudados para compressão aos 180 dias com imersão de 6h.



Sabendo os fatores significativos, pode-se então definir o modelo linear da Equação 14.

$$\text{Res.Comp.} = 1,896 - (0,95 * \text{Cim}) - (0,51 * \text{Cal}) + (0,189 * \text{CimCal}) + (0,146 * \text{CalSisal})$$

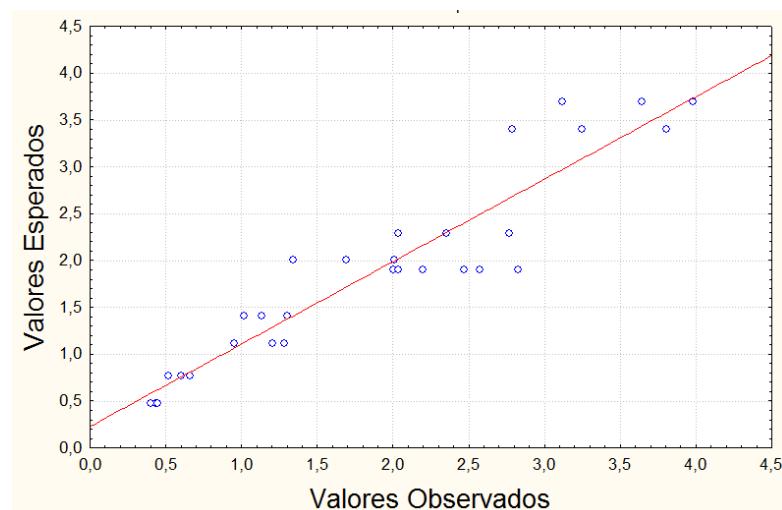
Equação 14

O Teste F (ver Tabela 33) mostrou que o modelo é estatisticamente significativo e que não precisa de ajustes. Essa conclusão também é confirmada pela proximidade dos valores observados e esperados, vistos no Gráfico 24..

Tabela 33 - ANOVA: resultados da análise de regressão para cimento, cal e sisal na resistência à compressão aos 180 dias e com imersão de 6h.

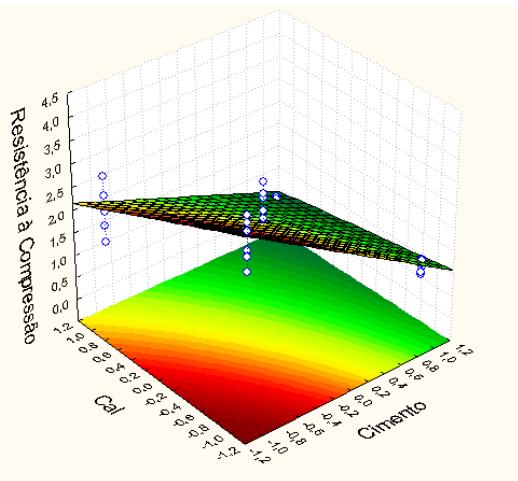
| Variação Explicada | Soma Quadrática | Grau de Liberdade | Quadrado Médio | F calculado | F tabelado | Teste F |
|------------------------|-----------------|-------------------|----------------|-------------|------------|----------|
| Regressão | 29,31231 | 4 | 7,3280775 | 9,175282 | 5,19 | 1,767877 |
| Resíduo | 3,99338 | 5 | 0,798676 | | | |
| Falta de Ajuste | 1,95821 | 4 | 0,4895525 | 0,240546 | 224,6 | 0,001071 |
| Erro Puro | 2,03517 | 1 | 2,03517 | | | |
| Total | 33,30569 | 9 | | | | |

Gráfico 24 - Valores observados versus valores esperados para a resistência à compressão aos 180 dias com imersão de 6h.



O que foi dito sobre a superfície de resposta de 180 sem imersão pode ser dito com imersão; a cal continua a reagir no material, pois possui uma reação lenta e vai até os 2 anos de idade reagindo com o material. Essa reação pode ser vista no Gráfico 25.

Gráfico 25 - Resistência à compressão aos 180 dias com imersão de 6h em função da porcentagem do cimento e da cal.



4.4-Ensaio de Absorção de Água por imersão

4.4.1-Ensaio com 30 Dias

Os valores de absorção dos blocos foram calculados através da Equação 03 e estão apresentados na Tabela 36 seus valores médios.

Tabela 34 - Resultado médio de absorção aos 30 dias.

| Traço | Após Secagem | Após Imersão | Absorção (%) |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| T1 (15%cim, 10%cal, 0,5sisal) | 2808,87 | 3166,37 | 12,73 |
| T2 (5%cim, 10%cal, 0,5%sisal) | 2698,47 | 3131,50 | 16,05 |
| T3 (15%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 3108,63 | 3569,83 | 14,84 |
| T4 (5%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 2944,80 | 3417,43 | 16,05 |
| T5 (15%cim, 10%cal, 0%sisal) | 3044,17 | 3467,83 | 13,92 |
| T6 (5%cim, 10%cal, 0%sisal) | 3212,13 | 3799,93 | 18,30 |
| T7 (15%cim, 0%cal, 0%sisal) | 3579,00 | 4069,23 | 13,70 |
| T8 (5%cim, 0%cal, 0%sisal) | 3070,80 | 3563,83 | 16,06 |
| T9 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 3145,77 | 3599,03 | 14,41 |
| T10 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 2941,23 | 3327,47 | 13,13 |

Através destes resultados, podemos dizer que todos os traços estudados estão de acordo com o valor requerido pela NBR 10834 (2012), que é o máximo aceitável de 20% de absorção. Outro fator que pode ser visto através dos resultados é que o cimento foi um dos maiores responsáveis pela queda na absorção, pois os blocos com 5% de cimento apresentaram uma absorção maior que os mesmos traços com 15% de cimento. Segundo Ghavani et al (1999, apud Gutiérrez-Orrego et al, 2017), os blocos com fibra de sisal geram menos fissuras no processo de secagem, o que diminui a quantidade de água que entra no bloco por imersão. Essa afirmação pode ser vista nos resultados obtidos na Tabela 34. Pensava-se que a absorção dos blocos com fibra de sisal seria bem maior que a sem fibras, já que a fibra de sisal é conhecida também por reter muito líquido, mas na maioria dos resultados não teve um aumento de absorção ao adicionar a fibra; comparando-se o traço T1 e o traço T5, observa-se uma tendência de validação desta hipótese para explicar o mecanismo.

Tabela 35 - Efeitos estimados do planejamento referente ao ensaio de absorção aos 30 dias.

| | Desvio Padrão Erro | Limite de Confiança | | | Coeficiente | |
|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------|--|
| | | Efeito | Puro | -95% | 95% | |
| Média/Interação | 14,916 | 0,172061 | 14,55818 | 15,27382 | 14,916 | |
| Cimento | -2,81917 | 0,38474 | -3,61928 | -2,01906 | -1,40958 | |
| Cimento e Cal | -1,02917 | 0,38474 | -1,82928 | -0,22906 | -0,51458 | |
| Cal e Sisal | -1,13917 | 0,38474 | -1,93928 | -0,33906 | -0,56958 | |
| R²=0,65749 | | | | | | |

Através do Pareto, mostrado no Gráfico 26, podemos ver que somente o cimento e as interações entre o cimento e a cal e entre a cal e o sisal é que foram estatisticamente significativos. Já os outros fatores e interação não obtiveram valores para serem definidos como estatisticamente significativos.

Gráfico 26 - Diagrama de Pareto mostrando a influência dos fatores estudados para ensaio de absorção aos 30 dias.

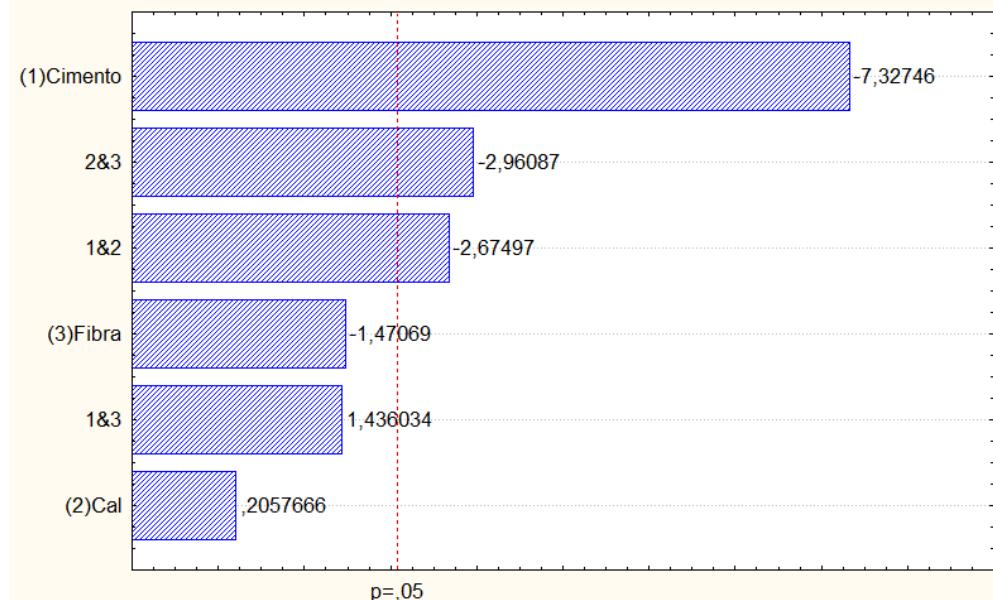


Tabela 36 - ANOVA: resultados da análise de regressão para cimento, cal e sisal na absorção aos 30 dias.

| TABELA ANOVA | | | | | | |
|--------------------|-----------------|-------------------|----------------|-------------|------------|----------|
| Variação Explicada | Soma Quadrática | Grau de Liberdade | Quadrado Médio | F calculado | F tabelado | Teste F |
| Regressão | 61,823 | 3 | 20,607667 | 3,839103 | 4,76 | 0,806534 |
| Resíduo | 32,207 | 6 | 5,3678333 | | | |
| Falta de Ajuste | 13,557 | 5 | 2,7114 | 0,145383 | 230,2 | 0,000632 |
| Erro Puro | 18,65 | 1 | 18,65 | | | |
| Total | 94,03 | 9 | | | | |

Fazendo a análise da Tabela 36 ANOVA, pode ser visto que o Teste F mostrou que o modelo linear não foi estatisticamente significativo, pois o valor do $F_{calculado}$ (Regressão) é menor que o valor do $F_{tabelado}$ (Resíduo).

Através do programa *Statistica 7.0* foi feita a checagem de curvatura que indica se o modelo possivelmente seria um modelo quadrático ao invés de um linear. Foi notado um aumento de R^2 na checagem de curvatura, o que sugere que seja feito ensaio com mais traços e utilizar o delineamento composto central rotacional (DCCR), ou seja, o modelo quadrático.

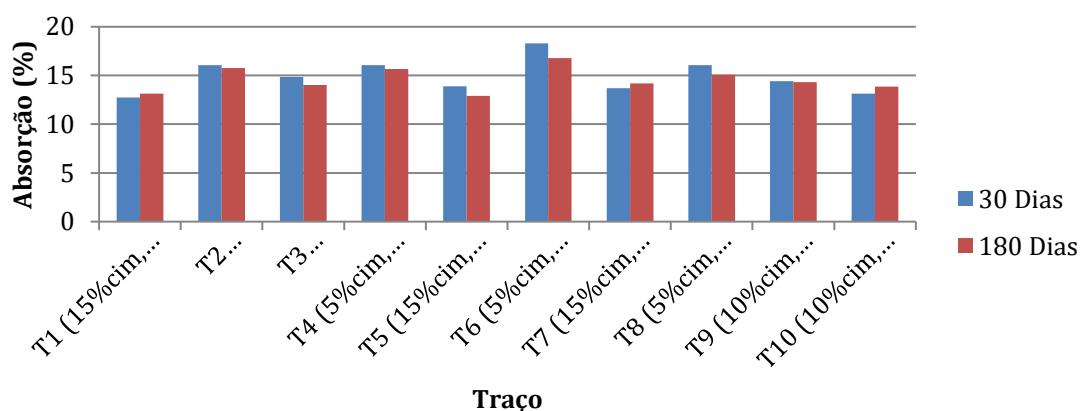
4.4.2-Ensaio com 180 Dias

Tabela 37 - Resultado médio de absorção aos 180 dias.

| Traço | Massa após secagem (kg) | Massa após imersão (kg) | Absorção (%) |
|--|-------------------------|-------------------------|--------------|
| T1 (15%cim, 10%cal, 0,5sisal) | 2898,90 | 3279,17 | 13,12 |
| T2 (5%cim,10%cal, 0,5%sisal) | 2760,03 | 3194,97 | 15,76 |
| T3 (15%cim,0%cal, 0,5%sisal) | 3314,90 | 3780,30 | 14,04 |
| T4 (5%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 2963,40 | 3427,60 | 15,66 |
| T5 (15%cim, 10%cal, 0%sisal) | 3165,80 | 3573,93 | 12,89 |
| T6 (5%cim, 10%cal, 0%sisal) | 3321,43 | 3878,77 | 16,78 |
| T7 (15%cim, 0%cal, 0%sisal) | 3536,40 | 4038,47 | 14,20 |
| T8 (5%cim, 0%cal, 0%sisal) | 3126,50 | 3598,33 | 15,09 |
| T9 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 3202,50 | 3661,57 | 14,33 |
| T10 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 3071,80 | 3497,47 | 13,86 |

Após 180 dias, a variação da absorção não foi grande entre os traços, chegando a no máximo 6%, por isso todos continuaram dentro do valor solicitado pela norma, abaixo de 20%.

Gráfico 27 - Comparaçao dos resultados de absorção ao longo dos dias.



Com o passar dos dias, podemos ver que a absorção não variou muito, mostrando assim a qualidade da mistura e a ação das adições. A variação máxima encontrada foi no traço T6, tendo uma melhora na absorção de 8,3%; isso pode ser explicado pelo avanço da estabilização dos blocos, correspondente a uma idade de

180 dias. A réplica do ponto central também comprova a qualidade do ensaio, por apresentar valores tão semelhantes.

Como pode ser visto no Teste de Tukey mostrado na Tabela 40, somente o traço T8 teve uma diferença estatisticamente significativa; isso possivelmente é explicado por ser um bloco mais frágil, já que possui adição de somente 5% de cimento.

Tabela 38 - Teste de Tukey para ensaio de Absorção

| T1 | | | T2 | | |
|-----------------|---------|----------|-----------------|---------|----------------|
| | 30 dias | 180 dias | | 30 dias | 180 dias |
| 30 dias | | 0,2574 | 30 dias | | 0,2929 |
| 180 dias | 1,866 | | 180 dias | 1,711 | |
| T3 | | | T4 | | |
| | 30 dias | 180 dias | | 30 dias | 180 dias |
| 30 dias | | 0,3027 | 30 dias | | 0,316 |
| 180 dias | 1,672 | | 180 dias | 1,62 | |
| T5 | | | T6 | | |
| | 30 dias | 180 dias | | 30 dias | 180 dias |
| 30 dias | | 0,255 | 30 dias | | 0,2367 |
| 180 dias | 1,877 | | 180 dias | 1,967 | |
| T7 | | | T8 | | |
| | 30 dias | 180 dias | | 30 dias | 180 dias |
| 30 dias | | 0,1158 | 30 dias | | <u>0,03412</u> |
| 180 dias | 2,832 | | 180 dias | 4,472 | |
| T9 | | | T10 | | |
| | 30 dias | 180 dias | | 30 dias | 180 dias |
| 30 dias | | 0,8765 | 30 dias | | 0,13553 |
| 180 dias | 0,2342 | | 180 dias | 4,412 | |

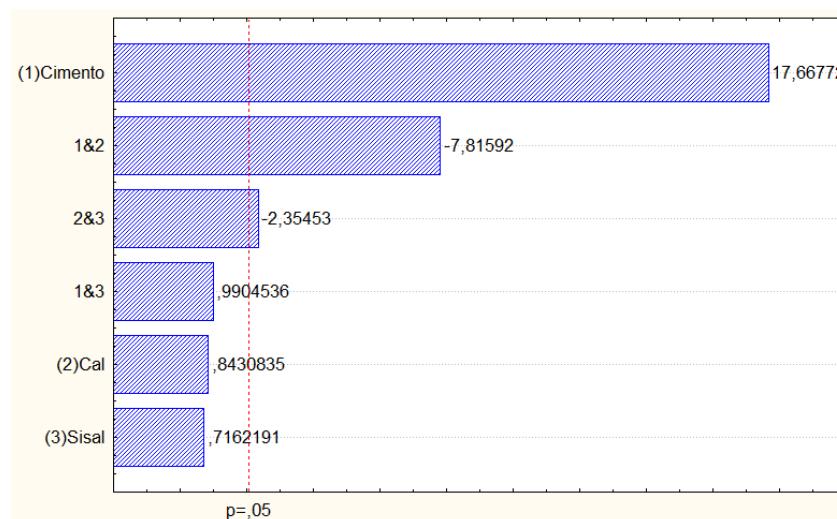
Com o valor encontrado de R^2 , na Tabela 39, sendo de aproximadamente 87% pode-se dizer que o modelo linear encontrado pelo planejamento representa bem a relação entre os efeitos e a resposta.

Tabela 39 - Efeitos estimados do planejamento referente ao ensaio de absorção aos 180 dias.

| | Efeito | Desvio Padrão | Limite de Confiança | | Coeficiente |
|------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| | | Erro Puro | -95% | 95% | |
| Média/Interação | 14,57128 | 0,057234 | 14,45225 | 14,69030 | 14,57128 |
| Cimento | 2,26110 | 0,127979 | 1,99495 | 2,52724 | 1,13055 |
| Cimento e Cal | -1,00027 | 0,127979 | -1,26642 | -0,73413 | -0,50014 |
| Cal e Sisal | -0,30133 | 0,127979 | -0,56748 | -0,03518 | -0,15067 |
| R²=0,87176 | | | | | |

Pelo Gráfico 28, pode ser visto que os fatores que se mostraram significativos foram: cimento, interação do cimento com a cal e a interação da cal com o sisal.

Gráfico 28 - Diagrama de Pareto mostrando a influência dos fatores estudados para absorção aos 180 dias.



Desconsiderando-se os fatores que não foram significativos, o modelo linear final é o exposto na Equação 15.

$$\text{Absorção} = 14,57 + (1,13 \cdot \text{Cim}) - (0,5 \cdot \text{CimCal}) - (0,15 \cdot \text{CalSisal})$$

Equação 15

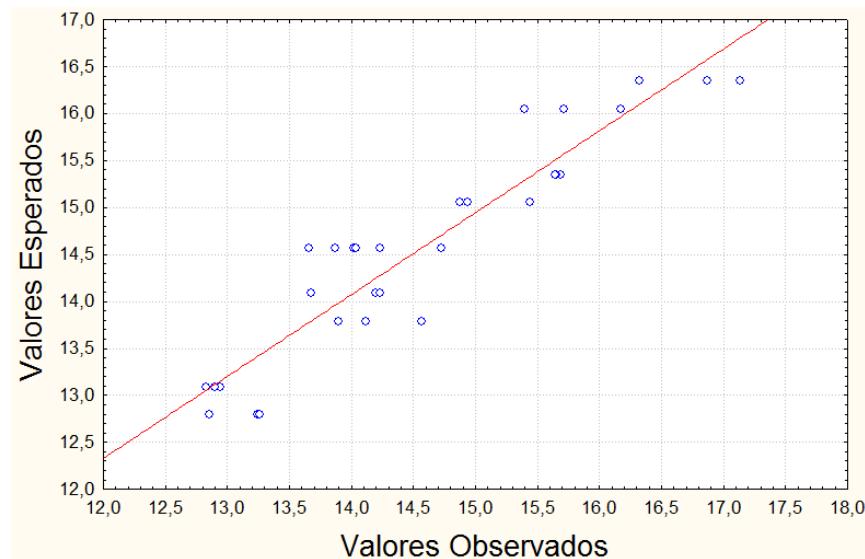
Através do teste F mostrado na Tabela 42 , comprova-se que o modelo é estatisticamente significativo e não precisa de ajustes.

Tabela 40 - ANOVA: resultados da análise de regressão para cimento, cal e sisal na absorção aos 180 dias.

| TABELA ANOVA | | | | | | |
|------------------------|-----------------|-------------------|----------------|-------------|------------|----------|
| Variação Explicada | Soma Quadrática | Grau de Liberdade | Quadrado Médio | F calculado | F tabelado | Teste F |
| Regressão | 37,22343 | 3 | 12,40781 | 13,59544 | 4,76 | 2,856185 |
| Resíduo | 5,47587 | 6 | 0,912645 | | | |
| Falta de Ajuste | 3,41217 | 5 | 0,682434 | | | |
| Erro Puro | 2,0637 | 1 | 2,0637 | 0,330685 | 230,2 | 0,001437 |
| Total | 42,6993 | 9 | | | | |

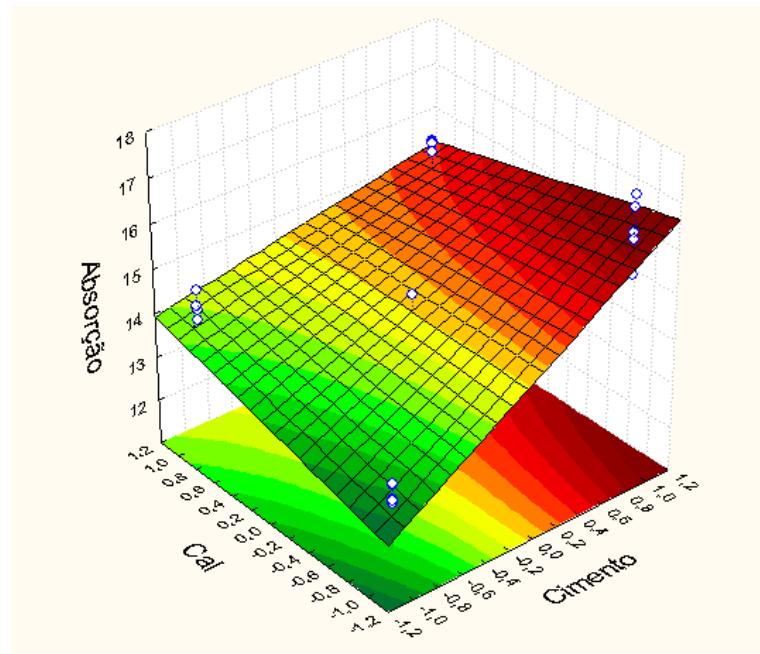
Pelo Gráfico 29 pode-se ver a proximidade entre os valores observados e esperados, confirmando assim a adequabilidade do modelo linear ao experimento.

Gráfico 29 Valores observados versus valores esperados para a absorção aos 180 dias.



Através da superfície de resposta mostrada no Gráfico 30, pode ser visto a influência do cimento e da cal na absorção do material aos 180 dias.

Gráfico 30 - Absorção aos 180 dias em função da porcentagem do cimento e da cal.



4.5-Ensaio de Molhagem e Secagem

4.5.1-Ensaio com 30 Dias

Tabela 41 - Resultado médio de perda de massa aos 30 dias.

| Traço | Massa após ciclo 1 (kg) | Massa estufa 100C (kg) | Perda de Massa (%) |
|---------------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|
| T1 (15%cim, 10%cal, 0,5sisal) | 2853,30 | 2850,00 | 0,12 |
| T2 (5%cim, 10%cal, 0,5%sisal) | 2709,77 | 2690,70 | 0,70 |
| T3 (15%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 2950,57 | 2924,63 | 0,88 |
| T4 (5%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 2857,03 | 2812,50 | 1,56 |
| T5 (15%cim, 10%cal, 0%sisal) | 3271,70 | 3238,20 | 1,02 |
| T6 (5%cim, 10%cal, 0%sisal) | 3203,00 | 3191,23 | 0,37 |
| T7 (15%cim, 0%cal, 0%sisal) | 3594,90 | 3543,80 | 1,42 |
| T8 (5%cim, 0%cal, 0%sisal) | 3139,50 | 3109,93 | 0,94 |
| T9 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 3169,33 | 3156,57 | 0,40 |
| T10 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 3123,27 | 3096,63 | 0,85 |

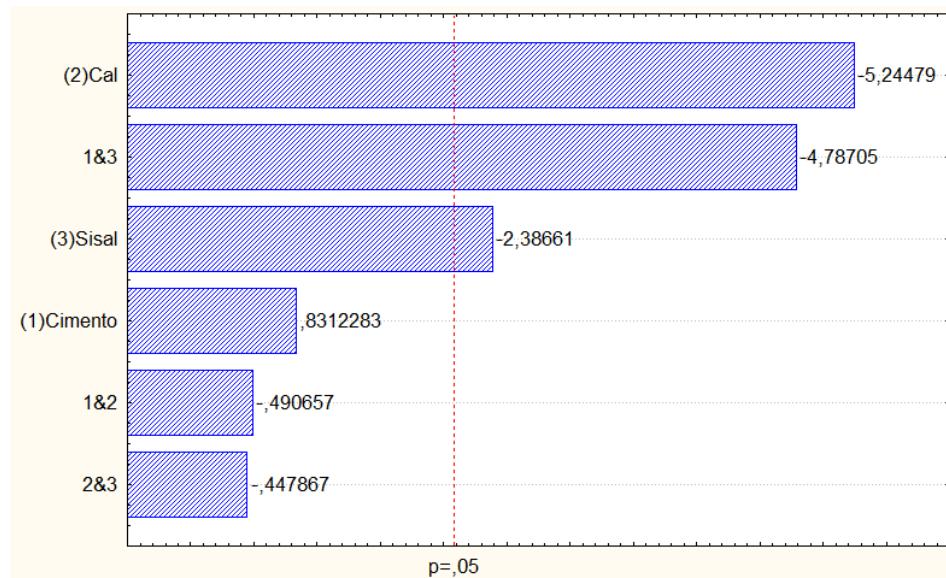
Como foi retirado o processo de escovação no ensaio, as perdas de massa foram bem pequenas, menores até do que as encontradas por LIMA(2013), que variaram de 7,7% a 13,67%. Ao analisar os resultados encontrados na Tabela 41, podemos ver a influência do sisal. Como o sisal ajuda na mitigação da retração do bloco durante a secagem, o bloco terá menos fissuras, menos água irá percorrer dentro do bloco, e consequentemente menor será a perda de massa criada pela percolação da água; isso pode ser visto comparando-se os traços T1 e T5; T3 e T7; e T4 e T8; o mesmo não aconteceu entre os blocos T2 e T6, nesse caso acredita-se que necessita de mais ensaios para poder fazer uma análise concreta dos resultados.

Através da Tabela 42, podemos ver que o valor do coeficiente de determinação R^2 foi de aproximadamente 69%, indicando que o modelo linear encontrado pelo planejamento não representa bem a relação entre os efeitos e a resposta. O modelo encontrado diz, através do Gráfico 31, que só a cal, o sisal e a interação entre o cimento e o sisal são significativos.

Tabela 42 - Efeitos estimados do planejamento referente ao ensaio de molhagem e secagem aos 30 dias.

| | Desvio Padrão | | Limite de Confiança | | Coeficiente |
|---------------------------------|---------------|-----------|---------------------|-----------|-------------|
| | Efeito | Erro Puro | -95% | 95% | |
| Média/Interação | 0,781688 | 0,044796 | 0,688246 | 0,875131 | 0,781688 |
| Cal | -0,534389 | 0,100643 | -0,744326 | -0,324452 | -0,267194 |
| Sisal | -0,236808 | 0,100643 | -0,446745 | -0,026871 | -0,118404 |
| Cimento e Cal | -0,488132 | 0,100643 | -0,698069 | -0,278195 | -0,244066 |
| $R^2=0,68566$ | | | | | |

Gráfico 31 - Diagrama de Pareto mostrando a influência dos fatores estudados para molhagem e secagem aos 30 dias.



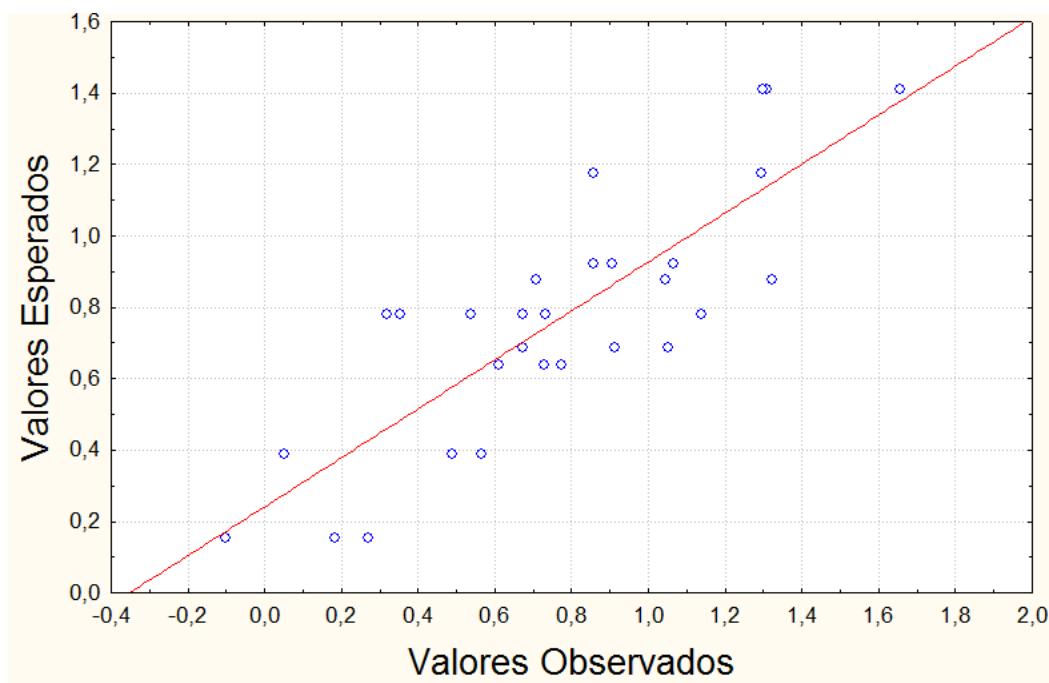
Com os dados da Tabela 43, o teste F prova que o modelo linear encontrado não é estatisticamente significativo. Provavelmente, devam ser feitos mais ensaios, utilizando-se o DCCR, para a criação de um modelo quadrático para esse ensaio, conforme indicado pela checagem de curvatura no *Statistica 7.0*.

Tabela 43 - ANOVA: resultados da análise de regressão para cimento, cal e sisal no ensaio de molhagem e secagem aos 30 dias.

| TABELA ANOVA | | | | | | |
|--------------------|-----------------|-------------------|----------------|-------------|------------|----------|
| Variação Explícada | Soma Quadrática | Grau de Liberdade | Quadrado Médio | F calculado | F tabelado | Teste F |
| Regressão | 3,319874 | 3 | 1,1066247 | 4,362613 | 4,76 | 0,916515 |
| Resíduo | 1,521966 | 6 | 0,253661 | | | |
| Falta de Ajuste | 0,363827 | 5 | 0,0727654 | 0,06283 | 230,2 | 0,000273 |
| Erro Puro | 1,158139 | 1 | 1,158139 | | | |
| Total | 4,84184 | 9 | | | | |

Através do Gráfico 32, também podemos ver como os valores observados se distanciam dos valores esperados, confirmando o resultado encontrado no teste F.

Gráfico 32 - Valores observados versus valores esperados para o ensaio de molhagem e secagem aos 30 dias.



4.5.2-Ensaio com 180 Dias

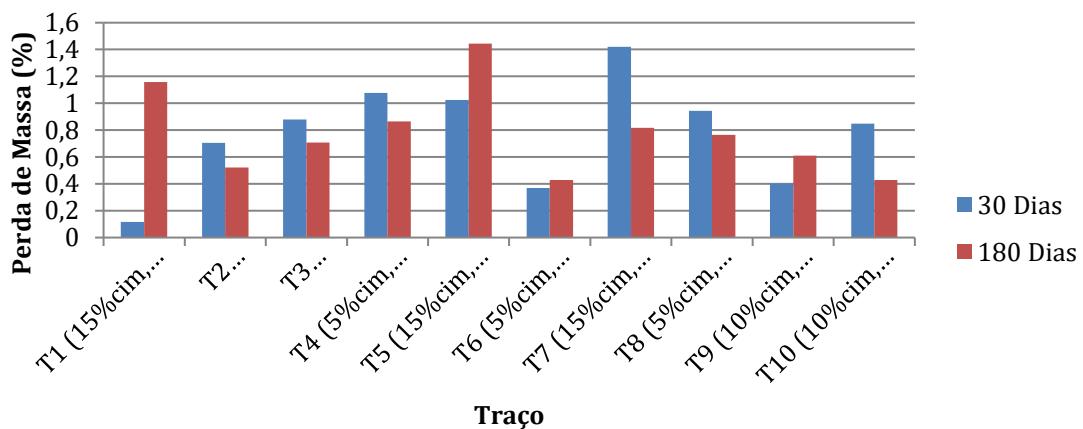
Tabela 44 - Resultado médio de perda de massa aos 180 dias.

| Traço | Massa após ciclo 1 (kg) | Massa estufa 100C (kg) | Perda de Massa (%) |
|--|-------------------------|------------------------|--------------------|
| T1 (15%cim, 10%cal, 0,5sisal) | 2866,27 | 2833,07 | 1,16 |
| T2 (5%cim,10%cal, 0,5%sisal) | 2728,50 | 2714,23 | 0,52 |
| T3 (15%cim,0%cal, 0,5%sisal) | 3151,63 | 3129,30 | 0,71 |
| T4 (5%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 2866,73 | 2841,73 | 0,87 |
| T5 (15%cim, 10%cal, 0%sisal) | 3230,63 | 3184,03 | 1,44 |
| T6 (5%cim, 10%cal, 0%sisal) | 3342,77 | 3328,37 | 0,43 |
| T7 (15%cim, 0%cal, 0%sisal) | 3626,17 | 3596,60 | 0,82 |
| T8 (5%cim, 0%cal, 0%sisal) | 3145,97 | 3121,90 | 0,77 |
| T9 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 3280,63 | 3260,67 | 0,61 |
| T10 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 2995,17 | 2982,30 | 0,43 |

Com 180 dias, ocorreu a mesma diferença com e sem sisal que aconteceu com 30 dias, possivelmente pelo mesmo motivo da influência da mitigação da retração que a fibra de sisal causou.

Lima (2013) fez o ensaio de molhagem e secagem para os seus blocos sem o processo de escovação, mas obteve perdas de massas muito maiores que a desse estudo, uma média de 9,86% de perda de massa. Os resultados obtidos aqui foram mais baixos por causa da porcentagem de argila na terra, aqui tivemos 8,57% de argila, já Lima (2013) trabalhou com misturas variando entre 37,33% e 14,97%. Segundo Gutiérrez-Orrego et al. (2017), o cimento é responsável pela estabilização da areia presente na terra, e a cal é responsável pela estabilização da argila; dessa forma, se tivermos duas amostras com a mesma porcentagem de cimento mas uma variação de argila, podemos dizer que a amostra menos argilosa, consequentemente mais arenosa, terá uma melhor estabilização pelo cimento.

Gráfico 33 - Comparaçao dos resultados de perda de massa ao longo dos dias.



Através do Teste de Tukey mostrado na Tabela 45, podemos ver que apenas a variação do traço T1 e T7, foi estatisticamente significativa. No traço T7 possivelmente isso se deu por conta da estabilização do cimento, que após os 30 dias, como visto nos ensaios de resistência, o bloco ficou mais estabilizado; mas no traço T1 não se sabe ao certo o motivo do aumento da perda de massa, já que isso não ocorreu em outros traços. O correto será em trabalhos futuros fazer o ensaio com e sem a etapa de escovação, com uma quantidade maior de réplicas e com a maior similaridade nos procedimentos para uma melhor precisão nos resultados.

Tabela 45 - Teste de Tukey para o ensaio de molhagem e secagem.

| | | T1 | | T2 | |
|-----------------|-------|---------|-----------------|-----------------|----------|
| | | 30 dias | 180 dias | 30 dias | 180 dias |
| 30 dias | | | 0,001435 | 30 dias | |
| 180 dias | 11,08 | | | 180 dias | 3,201 |
| | | T3 | | T4 | |
| | | 30 dias | 180 dias | 30 dias | 180 dias |
| 30 dias | | | 0,4534 | 30 dias | |
| 180 dias | 1,173 | | | 180 dias | 1,718 |
| | | T5 | | T6 | |
| | | 30 dias | 180 dias | 30 dias | 180 dias |
| 30 dias | | | 0,1176 | 30 dias | |
| 180 dias | 2,813 | | | 180 dias | 0,3951 |
| | | T7 | | T8 | |
| | | 30 dias | 180 dias | 30 dias | 180 dias |
| 30 dias | | | 0,01192 | 30 dias | |
| 180 dias | 6,188 | | | 180 dias | 2,817 |
| | | T9 | | T10 | |
| | | 30 dias | 180 dias | 30 dias | 180 dias |
| 30 dias | | | 0,3448 | 30 dias | |
| 180 dias | 1,514 | | | 180 dias | 3,912 |

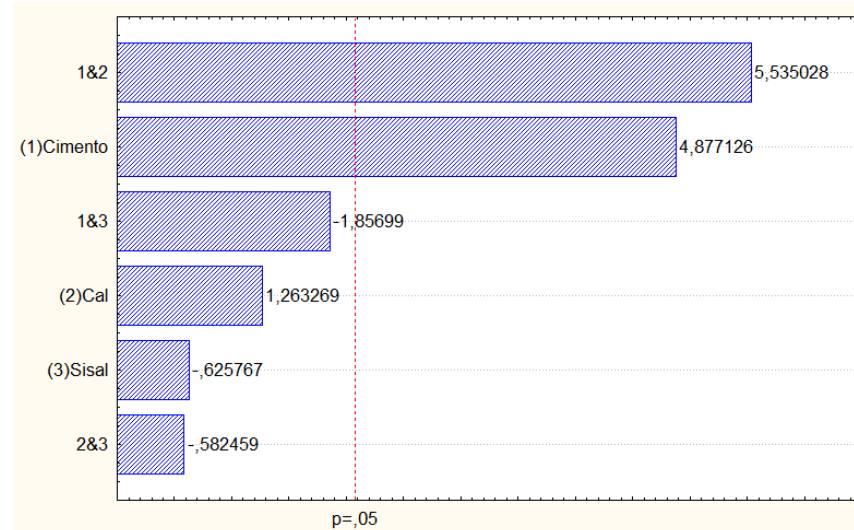
O valor encontrado para o coeficiente de determinação R^2 pode ser visto na Tabela 45, que é de aproximadamente 58%. Com isso podemos dizer que esse valor continuou baixo como o encontrado no ensaio de 30 dias e afirma também que o modelo linear encontrado não representa bem a relação entre os efeitos e a resposta.

Tabela 46 - Efeitos estimados do planejamento referente ao ensaio de molhagem e secagem aos 180 dias.

| Efeito | Desvio Padrão | Limite de Confiança | | Coeficiente |
|---------------------------------|-----------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| | Erro Puro | -95% | 95% | |
| Média/Interação | 0,774504 | 0,035448 | 0,700787 | 0,848222 |
| Cimento | 0,386577 | 0,079263 | 0,221740 | 0,551414 |
| Cimento e Cal | 0,438725 | 0,079263 | 0,273888 | 0,603562 |
| $R^2=0,57625$ | | | | |

Através do Gráfico 34, observa-se que apenas a interação do cimento com a cal e do cimento que foram estatisticamente significativos para o modelo gerado.

Gráfico 34 - Diagrama de Pareto mostrando a influência dos fatores estudados para o ensaio de molhagem e secagem aos 180 dias.



Levando em consideração apenas os efeitos significativos, o modelo linear é o definido pela Equação 16.

$$\text{Perda de Massa} = 0,87 - (0,31 \times \text{Cim}) + (0,34 \times \text{CimCal})$$

Equação 16

Tabela 47 - ANOVA: resultados da análise de regressão para cimento, cal e sisal no ensaio de molhagem e secagem aos 180 dias.

| Variação Explicada | Soma Quadrática | Grau de Liberdade | Quadrado Médio | F calculado | F tabelado | Teste F |
|--------------------|-----------------|-------------------|----------------|-------------|------------|----------|
| Regressão | 2,540153 | 2 | 1,2700765 | 8,716391 | 4,76 | 1,831175 |
| Resíduo | 1,019979 | 7 | 0,1457113 | | | |
| Falta de Ajuste | 0,228362 | 6 | 0,0380603 | 0,048079 | 230,2 | 0,000209 |
| Erro Puro | 0,791617 | 1 | 0,791617 | | | |
| Total | 3,560132 | 9 | | | | |
| R ² | 0,71349967 | | | | | |

Ao analisar o Gráfico 35, observa-se a proximidade dos valores observados e esperados, confirmando a informação dada pelo valor do R², de falta de representatividade entre os efeitos e a resposta. E através do Gráfico 36 podemos ver a influência do cimento e da cal na perda de massa, além de ver o contorno do gráfico, sugerindo um modelo quadrático, pois ao fazer uma checagem de curvatura, obteve-se um R² maior que aquele do modelo linear.

Gráfico 35 - Valores observados versus valores esperados para a perda de massa

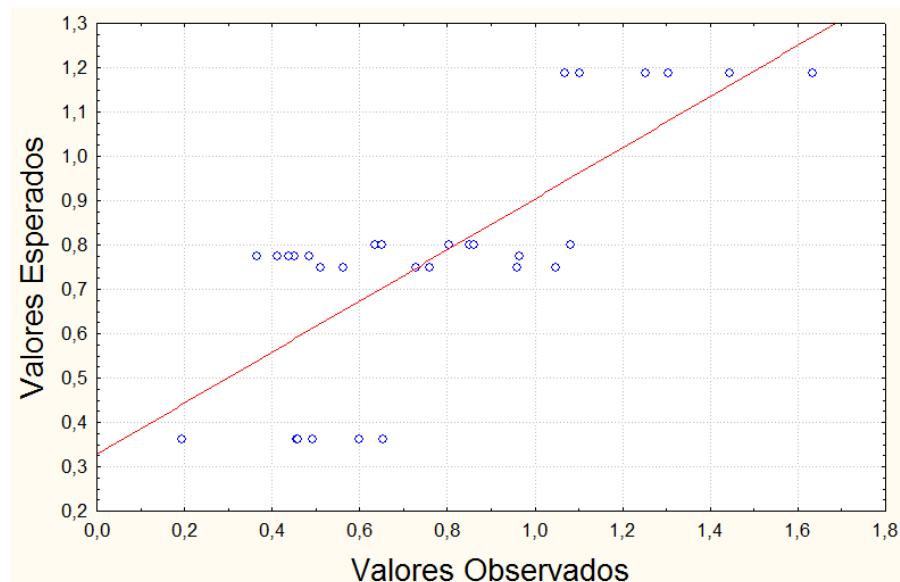
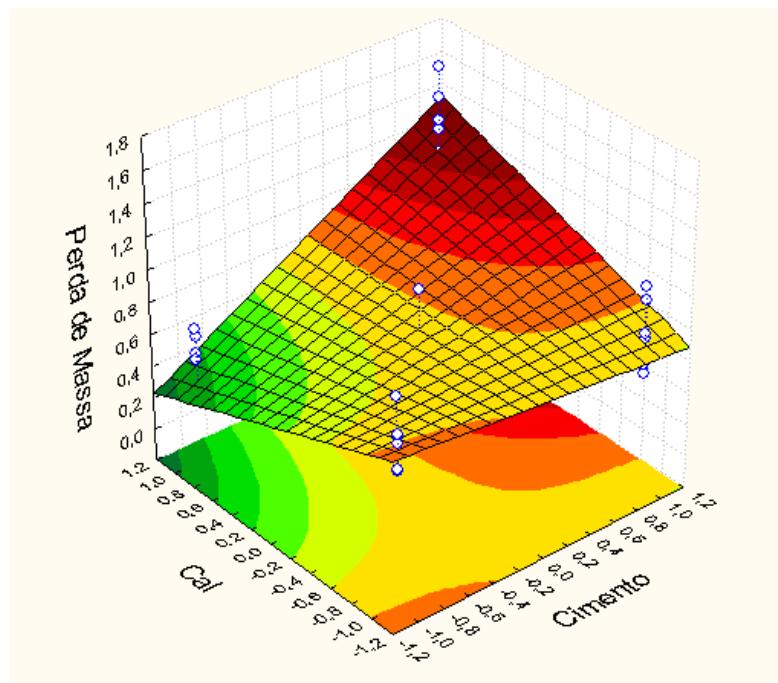


Gráfico 36 - Superfície de Resposta da Perda de Massa em função da porcentagem do cimento e da cal



Mesmo com o resultado de modelo estatisticamente significativo obtido pelo Teste F, aconselha-se fazer mais ensaios e utilizar o DCCR, como sugerido para os ensaios de 30 dias, pois o valor de R^2 nos deu apenas 58% de qualidade nos resultados obtidos.

4.6 – Resumos dos Resultados e Análise Estatística

Com a finalidade de melhorar a visão dos resultados gerais encontrados, segue a Tabela 48 e a Tabela 49.

Tabela 48 - Resumo dos Resultados obtidos neste estudo.

| Ensaio | Dias | Resumo dos Resultados |
|---|------|---|
| Resistência à compressão sem imersão | 30 | Cimento principal responsável pelo tamanho da resistência |
| | 90 | Cimento principal responsável pelo tamanho da resistência e cal começa a se mostrar influente devido ao contato com o ar |
| | 180 | Cimento principal responsável pelo tamanho da resistência e cal continua a mostrar influência devido ao contato com o ar |
| Resistência à compressão com imersão de 6h | 30 | Cimento principal responsável pelo tamanho da resistência e sisal mostra influência também por contribuir no processo de retração |
| | 90 | Cimento principal responsável pelo tamanho da resistência e cal começa a se mostrar influente devido ao contato com o ar |
| | 180 | Cimento principal responsável pelo tamanho da resistência e cal começa a se mostrar influente devido ao contato com o ar |
| Absorção | 30 | Cimento principal responsável pela porcentagem de absorção do bloco e sisal ajuda a diminuir fissuras no processo de retração |
| | 180 | Cimento principal responsável pela porcentagem de absorção do bloco e sisal ajuda a diminuir fissuras no processo de retração |
| Molhagem e Secagem | 30 | Cimento principal responsável pela porcentagem de perda de massa dos blocos e sisal influência na mitigação da retração. |
| | 180 | Cimento principal responsável pela porcentagem de perda de massa dos blocos e sisal influência na mitigação da retração. |

Tabela 49 - Resumo das Análises Estatísticas obtidas neste estudo

| Ensaio | Dias | Significância do Modelo | Efeitos Significativos |
|---|------|--|------------------------------|
| Resistência à compressão sem imersão | 30 | Estatisticamente Significativo | Cimento |
| | | | Cal |
| | | | Interação Cimento e Cal |
| | 90 | Estatisticamente Significativo | Cimento |
| | | | Cal |
| | | | Interação da Cal e Sisal |
| | 180 | Estatisticamente Significativo | Cimento |
| | | | Cal |
| | | | Interação do Cimento e Cal |
| Resistência à compressão com imersão de 6h | 30 | Estatisticamente Significativo | Cimento |
| | | | Sisal |
| | | | Interação do Cimento e Cal |
| | | | Interação do Cimento e Sisal |
| | | | Interação da Cal e Sisal |
| | 90 | Estatisticamente Significativo | Cimento |
| | | | Cal |
| | | Estatisticamente Significativo | Cimento |
| | | | Cal |
| | | | Interação do Cimento e Cal |
| Absorção | 30 | Não foi Estatisticamente Significativo | - |
| | 180 | Estatisticamente Significativo | Cimento |
| | | | Interação do Cimento e Cal |
| | | | Interação da Cal e Sisal |
| Molhagem e Secagem | 30 | Não foi Estatisticamente Significativo | - |
| | 180 | Estatisticamente Significativo | Cimento |
| | | | Interação do Cimento e Cal |

5-Conclusões

Ao finalizar esse estudo, são feitas diversas conclusões sobre os resultados, na tentativa de fornecer hipóteses mais precisas, validadas estatisticamente, sobre a influenciado cimento, da cal e da fibra de sisal nas propriedades físicas e mecânicas aqui estudadas; entender como se deu o mecanismo dessa influência; e finalmente quantificar o efeito dessas influências. De modo geral, as conclusões foram validadas com 95% de confiança, pelos diagramas de Pareto e pelos teste F.

1. Mesmo adicionando a cal, o cimento continua sendo o principal fator de aumento de resistência nos blocos com até 180 dias de fabricação;
2. Apesar da fibra de sisal ser um material que consegue absorver muita água, ela diminuiu significativamente a absorção dos blocos, pois quando ocorre a retração da mistura, as fibras evitam o aparecimento de fissuras, ou seja, comprovou-se que a fibra de sisal entra com o intuito de alteração física do material;
3. Em todos os resultados de resistência à compressão, o modelo foi linear até os 180 dias, conforme comprovado pela análise de variância;
4. Nos ensaios de absorção e de molhagem e secagem, o modelo linear acabou não sendo estatisticamente significativo, mas o planejamento ainda pode ser eficiente, faltando fazer mais ensaios e provando assim que o modelo pode ser quadrático;
5. Todos os traços estudados conseguiram fornecer resultados dentro dos valores solicitados para absorção pela norma NBR 10834 (2012), aos 30 e 180 dias;
6. Os traços com adição de 5% de cimento não conseguiram ter a resistência à compressão mínima solicitada pela norma NBR 10834 (2012), independente se o bloco foi submetido ou não a imersão antes do ensaio;
7. A diferença maior encontrada entre os resultados de resistência à compressão com e sem imersão foram aos 30 dias, provavelmente pelo motivo de que o bloco ainda não estava totalmente estabilizado, logo menos resistente frente à ação da água;

8. Para o ensaio de resistência à compressão sem o processo de imersão, os únicos fatores importantes para o modelo foram o cimento, a cal e sua interação;
9. Aos 30 dias, a etapa de imersão diminuiu mais que 50% da resistência à compressão dos blocos. Mas o processo de imersão se faz necessário, pois dá uma margem de segurança para o bloco que inicialmente não está totalmente estabilizado pelas adições; ao longo dos dias, pode-se ver uma diferença cada vez menor entre as resistências com e sem imersão;
10. Adicionar mais que 0,5% de fibra de sisal na fabricação de blocos de terra, além de gerar um maior trabalho na mistura utilizando a betoneira, gera significativo desperdício de material através das buchas de fibras. Para usar maior porcentagem de fibra, a mistura deve ser feita com algum método diferente, que não produza tantas buchas, talvez uma mistura manual ou adicionar as fibras aos poucos depois da mistura já úmida;
11. Como a cal possui uma reação lenta, ficou também comprovado, conforme esperado, que deve-se trabalhar com idade dos blocos superior a 6 meses para uma melhor análise das resistências à compressão dos blocos estabilizados com este aglomerante.

5.1- Sugestões para trabalhos futuros

- Estudo sobre a comparação entre os resultados encontrados com o uso da área líquida e da área bruta para a resistência à compressão;
- Verificação da análise estatística para bloco de terra maciço;
- Verificação da influência da etapa de escovação no ensaio de molhagem e secagem;
- Estudar novas maneiras de adicionar fibra de sisal em mistura para a fabricação de BTC sem ter grande desperdício de material;
- Comparação do comportamento físico-mecânico quando o bloco é submetido à cura por câmara úmida e por molhagem diária.

6-Referências Bibliográficas

ABIKO, A. K..**Solo-cimento: tijolos, blocos e paredes monolíticas.** In: Construção São Paulo n.1863. Pini-SP, 1983.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. A **Quicktestto Determine Lime Requirements for Lime Stabilization.** Highway Research Record, Washington, D.C., n.139, p.61-72. 1966.

AGUIRRE, Ramón. Técnicas de Construção com Terra: Abóbada de Terra. Bauru: FEB-UNESP / Proterra, p.26. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, ABCP. **Quais são os tipos de Cimento Portland?** Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/perguntas-frequentes/quais-sao-os-tipos-de-cimento-portland/>>. Acesso em: 07 ago. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459:** Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 6508:** Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7180:** Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7181:** Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **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.

_____. **NBR 10833:** Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 10834:** Bloco de solo-cimento sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 10836**: Bloco de solo-cimento sem função estrutural – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 11578**: Cimento Portland composto - Especificações. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 13553**: Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 13554**: Solo-cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

B. BHARATH, M. REDDY, J. PATHAN, and R. PATEL. Studies osStabilised Adobe Blocks. **Ijret: International Journal Of Research In Engineering And Technology**, Bangalore, India, v. 3, n. 6, p.259-264, maio 2014.

FERREIRA, G. C. S.; JÚNIOR, A. L. M. Cola à base de PVA e argamassa de solo-cimento como alternativas para o assentamento de alvenaria de tijolos maciços de solo-cimento. Engenharia Agrícola, v. 31, n. 2, p. 237-248. Jaboticabal, mar./abr. 2011.

GALDÁMEZ, Edwin Vladimir Cardoza. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. 2002. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

GHAVANI, K.; TOLEDO, R.D.; Barbosa, N.P. **Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres**. Cem. Concr. Compos., 21(1), 39-48, 1999.

GONÇALVES, J. da S. **Contribuição para a normalização da alvenaria estrutural com o uso de tijolos de terra crua para construções urbanas**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos molares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa.** São Carlos, 2003. 165p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

GUIMARÃES, J. E. P. **Estabilização de Solos – Nova e importante aplicação da cal – Seus conceitos e suas vantagens.** Boletim no1. São Paulo: ABPC, 1971.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil.** 2a ed. São Paulo: PINI, 2002.

GUTIÉRREZ-ORREGO, Diego Alejandro; GARCIA-ARISTIZABAL, Edwin Fabián; GOMEZ-BOTERO, Maryory Astrid. Mechanical and Physical Properties of Soil-Cement Blocks Reinforced with Mineral Wool and Sisal Fiber. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, mar. 2017.

HILT, G. H.; DAVIDSON, D. T. **Lime Fixation in Clayey Soils.** Highway Research Board, Washington, D.C., n.262, p.20-32. 1960.

HOFFMANN, Márcio Vieira; MINTO, Fernando César Negrini; HEISE, AndreFalleiros. **Técnicas de Construção com Terra: Taipa de Pilão.** Bauru: FEB-UNESP / Proterra, p.46. 2011.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization – Principles and Practice.** Sidney: Butterworths, 1972. 374p.

IZQUIERDO, I. S. **Uso de fibra natural de sisal em blocos de concreto para alvenaria estrutural.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2011.

JURAN, J.M.; GRYNA JR., F.M; BINGHAM JR. R.S. Quality control handbook. 3. ed. New York, McGraw-Hill. Cap.27,p.1-49. 1951.

LIMA, Fabíola Xavier Rocha Ferreira. **Blocos de Terra Compactada de Solo-Cimento com Resíduo de Argamassa de Assentamento e Revestimento:**

Caracterização para uso em Edificações. 2013. 114 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

LOPES JUNIOR, Luizmar da Silva. **Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada.** 2007. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

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) – Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MISHRA S, Mohanty K, Drzal T, Misra M, Hinrichsen G. **A review on pineapple leaf fibers, sisal fibers and their biocomposites.** Macromol Mater Eng, 2004;289:955–74.

MONTGOMERY, D.C. **Diseño y análisis de experimentos.** Jaime Delgado Saldivar. México, 1991.

MUNTOHAR, AgusSetyo. Engineering characteristics of the compressed-stabilized earth brick. **Construction And Building Materials**, Yogyakarta, p.4215-4220, maio, 2011.

NAGARAJ, H. B. et al. Role of lime with cement in long-term strength of compressed stabilized earth blocks. International Journal Of Sustainable Built Environment, -, v. 3, n. 1, p.54-61, mar. 2014.

NAMANGO, Saul Sitati; MADARA, Diana Starovoytova. **Compressed Earth Blocks Reinforced with Fibres**, Eldoret, p.10-22, jun. 2014.

OLIVIER, M. e EL GHARBI, Z., **Sisal fibre reinforced soil masonry**. Proceedings of the 4th International Mansory, London, p. 55-58, 1995.

PATIL, Abhijeet D.; ATTAR, Dr. A. C.. Compressed Stabilized Earth Blocks by using Lime. **International Journal Of Engineering Research e Technology**. Sakharale, p. 116-120. set. 2015.

PICANÇO, M. S. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá**. 2005. 25 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PITTA, M. R. **Retração do solo-cimento**. In. 17^a Reunião Anual de Pavimentação, Brasília, Anais. Brasília, p.il-i67, 1982.

PITTA, M. R.; NASCIMENTO, A. A. P. **Dosagem de solo melhorado com cimento por modificações físicas, químicas e mecânicas do solo original**. Estudo Técnico-53. Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo – SP, 1983.

POOVIZHI, J.; AARTHI, E. T.; GOWTHAMI, R.. Experimental Study of Soil Cement Bricks and Characteristics Compressive Strength of Brick Masonry Wall. International Journal Of Science And Engineering Research, -, v. 3, n. 2, p.1-10, fev. 2015.

PRABAKARA J, SRIDHAR R. **Effect of random inclusion of sisal fiber on strength behavior of soil**. Construct Build Mater2002;16:123–3

PRESA, Marcello Bastos. Resistência à compressão e absorção de água em tijolos de solo cimento. 2011. 41 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Agrônoma, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

QUEIROGA, Matheus Silva. **Resistência à compressão de painéis reduzidos de alvenaria de BTC**. 2016. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

RODRIGUES, Marian Isabel; LEMMA, Antonio Francisco. **Planejamento de Experimentos & Otimização de Processos**. 2. ed. Campinas: Casa da Criança Fraternidade Fé e Amor, 2009.

ROGERS, C. D. F.; GLENDINING, S. **Lime Requirement for Stabilization**. In: Transportation Research Board. 79th Annual Meeting , 2000, Washington, DC.

ROTONDARO, Rodolfo. Técnicas de Construção com Terra: Adobe. Bauru: FEB-UNESP / Proterra, p.16. 2011.

SOUZA, Leovegildo Douglas Pereira de. **Análise do comportamento estrutural de vigas de concreto armado submetidas às altas temperaturas utilizando a metodologia do planejamento fatorial**.112 f. João Pessoa, PB, 2016.

THOMPSON, M. R. **Lime Reactivity of Illinois Soils**. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE, v.92, p.67-92.1966.

VARELA, M. Materiais de Construção. Curso Técnico em Edificações, p.25, Natal, 2013.

VENKATARAMA RENDDY, B. V. ; GUPTA, A.. Characteristics of soil-cement blocks using highly sandy soils. Materials And Structures, Bangalore, v. 38, n. -, p.651-658, set. 2004.

VENKATARAMA, B. V.; LAL, Richardson; RAO, K. S. Nanjunda. Optimum Soil Grading for the Soil-Cement Blocks. Journal Of Materials In Civil Engineering, [s.l.], v. 19, n. 2, p.139-148, fev. 2007. American Society of Civil Engineers (ASCE).

WALKER, Pete. Characteristics of pressed earth blocks in compression. In: 11th International Brick/Block/Masonry Conference, 1997, Shanghai, China.

Apêndice

Segue os resultados completos dos ensaios feitos durante esse estudo:

- Resistência à compressão

| Resistência à Compressão 30 dias Sem Imersão | | | | |
|--|--------|-------|-------|--------------|
| Traço | Blocos | | | Média |
| | 1 | 2 | 3 | |
| T1 (15%cim, 10%cal, 0,5sisal) | 5,516 | 5,338 | 4,072 | 4,976 |
| T2 (5%cim,10%cal, 0,5%sisal) | 1,738 | 1,824 | 2,106 | 1,889 |
| T3 (15%cim,0%cal, 0,5%sisal) | 2,739 | 3,697 | 3,166 | 3,201 |
| T4 (5%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 0,950 | 1,055 | 0,920 | 0,975 |
| T5 (15%cim, 10%cal, 0%sisal) | 5,159 | 5,429 | 3,914 | 4,834 |
| T6 (5%cim, 10%cal, 0%sisal) | 1,425 | 1,652 | 1,696 | 1,591 |
| T7 (15%cim, 0%cal, 0%sisal) | 3,460 | 3,857 | 2,591 | 3,303 |
| T8 (5%cim, 0%cal, 0%sisal) | 0,954 | 0,717 | 1,047 | 0,906 |
| T9 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 3,556 | 2,955 | 3,190 | 3,234 |
| T10 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 3,585 | 3,848 | 3,021 | 3,484 |

| Resistência à Compressão 30 dias Com Imersão de 6h | | | | |
|--|--------|-------|-------|--------------|
| Traço | Blocos | | | Média |
| | 1 | 2 | 3 | |
| T1 (15%cim, 10%cal, 0,5sisal) | 1,686 | 1,368 | 1,469 | 1,507 |
| T2 (5%cim,10%cal, 0,5%sisal) | 0,512 | 0,580 | 0,573 | 0,555 |
| T3 (15%cim,0%cal, 0,5%sisal) | 1,960 | 1,952 | 2,508 | 2,140 |
| T4 (5%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 0,348 | 0,295 | 0,419 | 0,354 |
| T5 (15%cim, 10%cal, 0%sisal) | 1,132 | 1,296 | 1,283 | 1,237 |
| T6 (5%cim, 10%cal, 0%sisal) | 0,549 | 0,519 | 0,570 | 0,546 |
| T7 (15%cim, 0%cal, 0%sisal) | 1,101 | 1,265 | 1,107 | 1,158 |
| T8 (5%cim, 0%cal, 0%sisal) | 0,269 | 0,415 | 0,428 | 0,371 |
| T9 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 0,720 | 0,803 | 0,868 | 0,797 |
| T10 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 0,980 | 0,872 | 1,272 | 1,041 |

| Resistência à Compressão 90 dias Sem Imersão | | | | | |
|--|--------|-------|-------|-------|--------------|
| Traço | Blocos | | | | Média |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| T1 (15%cim, 10%cal, 0,5sisal) | 3,875 | 4,564 | 3,866 | 4,507 | 4,203 |
| T2 (5%cim,10%cal, 0,5%sisal) | 2,104 | 1,648 | 1,734 | 1,689 | 1,794 |
| T3 (15%cim,0%cal, 0,5%sisal) | 2,676 | 2,521 | 2,731 | 4,080 | 3,002 |
| T4 (5%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 1,074 | 0,902 | 0,903 | 0,960 | 0,960 |
| T5 (15%cim, 10%cal, 0%sisal) | 3,517 | 3,678 | 3,686 | 4,191 | 3,768 |
| T6 (5%cim, 10%cal, 0%sisal) | 1,396 | 1,576 | 1,247 | 1,496 | 1,429 |
| T7 (15%cim, 0%cal, 0%sisal) | 3,046 | 3,134 | 3,223 | 3,635 | 3,260 |
| T8 (5%cim, 0%cal, 0%sisal) | 1,040 | 1,068 | 0,939 | 0,944 | 0,998 |
| T9 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 2,931 | 2,110 | 3,101 | 2,728 | 2,718 |
| T10 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 3,222 | 2,652 | 2,851 | 3,049 | 2,944 |

| Resistência à Compressão 90 dias Com Imersão de 6h | | | | | |
|--|--------|-------|-------|--------------|--|
| Traço | Blocos | | | Média | |
| | 1 | 2 | 3 | | |
| T1 (15%cim, 10%cal, 0,5sisal) | 3,793 | 2,321 | 3,874 | 3,329 | |
| T2 (5%cim,10%cal, 0,5%sisal) | 1,878 | 1,253 | 1,411 | 1,514 | |
| T3 (15%cim,0%cal, 0,5%sisal) | 1,677 | 2,603 | 2,086 | 2,122 | |
| T4 (5%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 0,317 | 0,409 | 0,375 | 0,367 | |
| T5 (15%cim, 10%cal, 0%sisal) | 3,802 | 3,716 | 3,983 | 3,834 | |
| T6 (5%cim, 10%cal, 0%sisal) | 1,400 | 1,137 | 1,544 | 1,360 | |
| T7 (15%cim, 0%cal, 0%sisal) | 1,807 | 1,823 | 2,255 | 1,962 | |
| T8 (5%cim, 0%cal, 0%sisal) | 0,499 | 0,554 | 0,463 | 0,505 | |
| T9 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 2,280 | 2,566 | 2,413 | 2,420 | |
| T10 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 1,722 | 2,695 | 2,904 | 2,440 | |

| Resistência à Compressão 180 dias Sem Imersão | | | | | |
|---|--------|-------|-------|-------|--------------|
| Traço | Blocos | | | | Média |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| T1 (15%cim, 10%cal, 0,5sisal) | 4,082 | 3,886 | 3,565 | 5,007 | 4,135 |
| T2 (5%cim,10%cal, 0,5%sisal) | 1,992 | 1,826 | 1,834 | 1,988 | 1,910 |
| T3 (15%cim,0%cal, 0,5%sisal) | 2,730 | 2,929 | 2,449 | 2,448 | 2,639 |
| T4 (5%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 1,091 | 1,093 | 0,888 | 0,926 | 1,000 |
| T5 (15%cim, 10%cal, 0%sisal) | 4,106 | 3,930 | 4,183 | 3,537 | 3,939 |
| T6 (5%cim, 10%cal, 0%sisal) | 1,537 | 1,473 | 1,346 | 1,530 | 1,472 |
| T7 (15%cim, 0%cal, 0%sisal) | 2,676 | 2,586 | 2,359 | 3,031 | 2,663 |
| T8 (5%cim, 0%cal, 0%sisal) | 0,956 | 1,198 | 1,112 | 1,042 | 1,077 |
| T9 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 1,971 | 2,712 | 3,135 | 2,849 | 2,667 |
| T10 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 2,995 | 2,859 | 3,093 | 3,215 | 3,040 |

| Resistência à Compressão 180 dias Com Imersão de 6h | | | | |
|---|--------|-------|-------|--------------|
| Traço | Blocos | | | Média |
| | 1 | 2 | 3 | |
| T1 (15%cim, 10%cal, 0,5sisal) | 3,980 | 3,645 | 3,119 | 3,581 |
| T2 (5%cim,10%cal, 0,5%sisal) | 1,135 | 1,306 | 1,019 | 1,153 |
| T3 (15%cim,0%cal, 0,5%sisal) | 1,695 | 1,343 | 2,010 | 1,683 |
| T4 (5%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 0,434 | 0,449 | 0,404 | 0,429 |
| T5 (15%cim, 10%cal, 0%sisal) | 2,789 | 3,252 | 3,808 | 3,283 |
| T6 (5%cim, 10%cal, 0%sisal) | 1,208 | 0,954 | 1,285 | 1,149 |
| T7 (15%cim, 0%cal, 0%sisal) | 2,769 | 2,034 | 2,353 | 2,385 |
| T8 (5%cim, 0%cal, 0%sisal) | 0,658 | 0,516 | 0,605 | 0,593 |
| T9 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 2,472 | 2,573 | 2,035 | 2,360 |
| T10 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 2,824 | 2,004 | 2,201 | 2,343 |

- Absorção

| Absorção 30 dias | | | | | |
|---------------------------------|--------|-------|-------|--------------|--|
| Traço | Blocos | | | Média | |
| | 1 | 2 | 3 | | |
| T1 (15%cim, 10%cal, 0,5sisal) | 12,38 | 13,24 | 12,57 | 12,73 | |
| T2 (5%cim,10%cal, 0,5%sisal) | 15,89 | 16,14 | 16,11 | 16,05 | |
| T3 (15%cim,0%cal, 0,5%sisal) | 15,28 | 13,55 | 15,69 | 14,84 | |
| T4 (5%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 16,23 | 16,54 | 15,40 | 16,06 | |
| T5 (15%cim, 10%cal, 0%sisal) | 14,14 | 12,48 | 15,09 | 13,91 | |
| T6 (5%cim, 10%cal, 0%sisal) | 16,21 | 18,97 | 19,67 | 18,29 | |
| T7 (15%cim, 0%cal, 0%sisal) | 13,70 | 13,42 | 13,96 | 13,70 | |
| T8 (5%cim, 0%cal, 0%sisal) | 15,68 | 15,96 | 16,53 | 16,06 | |
| T9 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 13,49 | 15,21 | 14,55 | 14,41 | |
| T10 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 12,73 | 13,39 | 13,28 | 13,13 | |

| Absorção 180 dias | | | | | |
|---------------------------------|--------|-------|-------|--------------|--|
| Traço | Blocos | | | Média | |
| | 1 | 2 | 3 | | |
| T1 (15%cim, 10%cal, 0,5sisal) | 12,85 | 13,24 | 13,26 | 13,12 | |
| T2 (5%cim,10%cal, 0,5%sisal) | 15,71 | 15,39 | 16,17 | 15,76 | |
| T3 (15%cim,0%cal, 0,5%sisal) | 14,20 | 14,23 | 13,68 | 14,04 | |
| T4 (5%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 15,69 | 15,66 | 15,65 | 15,66 | |
| T5 (15%cim, 10%cal, 0%sisal) | 12,83 | 12,94 | 12,90 | 12,89 | |
| T6 (5%cim, 10%cal, 0%sisal) | 16,32 | 16,87 | 17,14 | 16,78 | |
| T7 (15%cim, 0%cal, 0%sisal) | 14,12 | 14,57 | 13,90 | 14,19 | |
| T8 (5%cim, 0%cal, 0%sisal) | 14,94 | 14,87 | 15,44 | 15,09 | |
| T9 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 14,02 | 14,73 | 14,23 | 14,33 | |
| T10 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 13,66 | 14,04 | 13,87 | 13,85 | |

- Molhagem e Secagem

| Molhagem e Secagem 30 dias | | | | | |
|---------------------------------|--------|-------|------|-------------|--|
| Traço | Blocos | | | Média | |
| | 1 | 2 | 3 | | |
| T1 (15%cim, 10%cal, 0,5sisal) | 0,27 | -0,10 | 0,18 | 0,12 | |
| T2 (5%cim,10%cal, 0,5%sisal) | 0,77 | 0,61 | 0,73 | 0,70 | |
| T3 (15%cim,0%cal, 0,5%sisal) | 0,67 | 1,05 | 0,91 | 0,88 | |
| T4 (5%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 0,86 | 1,08 | 1,29 | 1,08 | |
| T5 (15%cim, 10%cal, 0%sisal) | 1,32 | 0,71 | 1,05 | 1,03 | |
| T6 (5%cim, 10%cal, 0%sisal) | 0,57 | 0,05 | 0,49 | 0,37 | |
| T7 (15%cim, 0%cal, 0%sisal) | 1,31 | 1,66 | 1,30 | 1,42 | |
| T8 (5%cim, 0%cal, 0%sisal) | 1,06 | 0,90 | 0,86 | 0,94 | |
| T9 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 0,32 | 0,35 | 0,54 | 0,40 | |
| T10 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 0,67 | 1,14 | 0,73 | 0,85 | |

| Molhagem e Secagem 180 dias | | | | | |
|---------------------------------|--------|------|------|-------------|--|
| Traço | Blocos | | | Média | |
| | 1 | 2 | 3 | | |
| T1 (15%cim, 10%cal, 0,5sisal) | 1,07 | 1,30 | 1,10 | 1,16 | |
| T2 (5%cim,10%cal, 0,5%sisal) | 0,46 | 0,46 | 0,65 | 0,52 | |
| T3 (15%cim,0%cal, 0,5%sisal) | 0,51 | 1,05 | 0,56 | 0,71 | |
| T4 (5%cim, 0%cal, 0,5%sisal) | 1,08 | 0,65 | 0,86 | 0,87 | |
| T5 (15%cim, 10%cal, 0%sisal) | 1,25 | 1,63 | 1,44 | 1,44 | |
| T6 (5%cim, 10%cal, 0%sisal) | 0,49 | 0,19 | 0,60 | 0,43 | |
| T7 (15%cim, 0%cal, 0%sisal) | 0,96 | 0,73 | 0,76 | 0,82 | |
| T8 (5%cim, 0%cal, 0%sisal) | 0,63 | 0,85 | 0,80 | 0,76 | |
| T9 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 0,41 | 0,45 | 0,96 | 0,61 | |
| T10 (10%cim, 5%cal, 0,25%sisal) | 0,36 | 0,48 | 0,44 | 0,43 | |