

ANÁLISE ESTATÍSTICA PROPORCIONAL DOS CONSTITUINTES DE UM LIGANTE ALTERNATIVO UTILIZADO EM REFORÇO DE SOLOS

PROPORTIONAL STATISTICS ANALYSIS OF THE CONSTITUENTS OF AN ALTERNATIVE BINDER USED IN SOIL REINFORCEMENT

Pinheiro, Claver; *CONSTRUCT-GEO, Universidade do Porto, Portugal; clavergiovanni@gmail.com*

Molina-Gómez, Fausto; *CONSTRUCT-GEO, Universidade do Porto, Portugal, fausto@fe.up.pt*

Rios, Sara; *CONSTRUCT-GEO, Universidade do Porto, Portugal, sara.rios@fe.up.pt*

Sousa, Fernanda; *CITTA, Universidade do Porto, Portugal, fcsousa@fe.up.pt*

Viana Da Fonseca, António; *CONSTRUCT-GEO, Universidade do Porto, Portugal, viana@fe.up.pt*

RESUMO

As zonas costeiras são geralmente caracterizadas por solos com fracas características geomecânicas como as areias soltas, siltes ou argilas moles. Esses solos não garantem o suporte necessário às obras que neles se pretendem implantar e é necessária a utilização de técnicas de reforço. Normalmente, essas técnicas utilizam grandes quantidades de cimento Portland, cuja produção causa vários problemas ambientais. O objetivo deste trabalho é apresentar uma análise estatística utilizando de dados gerados em um trabalho experimental sobre um cimento alternativo produzidos pela ativação alcalina de resíduos industriais como as cinzas volantes e as escórias. A metodologia de trabalho incluiu a preparação de vinte e seis provetes, constituídos por cinzas volantes, escórias, silicato de sódio e hidróxido de sódio em diferentes proporções. Os provetes foram ensaiados para determinação da resistência à compressão e à flexão sendo ainda medida a rigidez elástica, pelo que estas são as variáveis de resposta analisadas. Análises feitas nos programas Microsoft Excel e IBM SPSS Statistics foram utilizadas, numa previsão mais simplificada dos constituintes do novo gel cimentício, para que esse possa ser aplicado onde tradicionalmente se usa cimento Portland convencional. A análise estatística mostrou grande influência dos constituintes líquidos, nos resultados dos ensaios realizados, em detrimento aos constituintes sólidos, que mostram forte correlação apenas entre si.

ABSTRACT

Coastal areas are generally comprised by soils with poor geomechanical characteristics. They do not assure the necessary support for the constructions that are intended to be built and so the use of soil reinforcement techniques is necessary. Normally, these techniques use a large quantities of Portland cement, whose production causes several environmental problems. The objective of this work is to present a statistical analysis using dates generated in an experimental work on an alternative cement generated by the alkaline activation of industrial residues like fly ash and slag. The work methodology included the preparation of twenty-six specimens, consisting of fly ash, slag, sodium silicate and sodium hydroxide in different proportions. The specimens were tested for compressive strength, flexural strength and stiffness measurements, so these are the response variables analyzed. Analyzes made on Microsoft Excel and IBM SPSS Statistics programs will be used in a more simplified prediction of the constituents of the new cementitious gel so that it can be applied where conventional Portland cement is traditionally used. The statistical analysis shows a great influence of the liquid constituents in the response variables in detriment to the solid constituents that show strong correlation only among themselves.

1 - INTRODUÇÃO

O aumento das atividades turísticas ao longo das margens dos rios e das áreas costeiras atrai mais investimentos e a necessidade de áreas de lazer. No entanto, essas áreas são geralmente caracterizadas por solos com características geomecânicas ruins, como areias finas, sedimentos e lamas de baixa compacidade e alto teor de água, que não garantem as condições de suporte necessárias para as obras que se destinam a ser instaladas nelas. As técnicas atualmente utilizadas consistem em escavar e instalar as fundações num estrato competente, ou tratamento de solos, usando grandes quantidades de cimento Portland que requerem matérias-primas de boa qualidade, libertando cerca de 1 tonelada de dióxido de carbono no solo por 1 tonelada em sua produção.

As alterações climáticas registadas nas últimas décadas têm vindo a ser justificadas por vários especialistas, como resultado da emissão excessiva de gases causadores do efeito estufa e poluentes tóxicos. Os resultados dessas mudanças climáticas refletiram-se na população mundial, a intensificação das catástrofes naturais resultou na perda de milhares de vidas, bem como em grandes perdas económicas. A necessidade de reduzir as emissões de gases que contribuem para o efeito de estufa é um princípio cada vez mais

enraizado na sociedade. O incentivo para produzir e usar novos materiais é uma medida que pode reduzir os efeitos da produção de cimento Portland.

Estudos recentes dos potenciais da técnica de ativação alcalina (AA) no melhoramento de solos mostram resultados promissores (Cristelo et al., 2012, 2013). Dependendo da aplicação as quantidades de água, cinzas volantes, escórias e as soluções alcalinas podem ser adaptadas, tendo em conta vários parâmetros como a proporção sólidos / líquidos, razão Na_2O / cinza, relação sílica / alumina, dentre outros. É assim essencial avaliar a melhor gama de valores desses parâmetros para a aplicação no reforço do solo.

Um novo material cimentício pode ser produzido a partir de resíduos calcinados que contenham aluminossilicato. Os resíduos industriais não sendo utilizados como subprodutos, necessitam de tratamento especial para serem depositados em aterros. Alguns resíduos exibem na sua estrutura materiais pesados que não sendo devidamente acondicionados poderão causar danos nocivos aos seres vivos. Com esse material os elementos perigosos presentes nos resíduos são bloqueados no quadro tridimensional da matriz geopolimérica. Deste modo os resíduos que podem contaminar o solo com os seus compostos orgânicos e inorgânicos, podem ser imobilizados "in situ" com rapidez e baixo custo. Nos últimos anos estes resíduos têm sido depositados em aterros especiais com camadas de duplo revestimento, exigindo um acompanhamento a longo prazo, são dispendiosos e de difícil instalação (Davidovits, 2002).

O principal objetivo deste trabalho é descrever e explorar este conjunto, recorrendo a técnicas estatísticas univariada e bivariada, de forma a identificar as diferenças que melhor discriminam os vários grupos de provete, de forma a identificar parâmetros que possam ser utilizados para a definição de cada constituinte da calda previamente de acordo com a utilização característica desejada. Essa calda terá futuras utilizações em locais que possuem um solo com fraca capacidade de suporte, servindo como reforço.

2 - PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

2.1 - Plano Experimental

A definição do plano experimental para a otimização da mistura foi realizada por meio de um método estatístico de planeamento, considerando uma gama para valores de cada parâmetro-chave. Os parâmetros selecionados como os mais relevantes no comportamento das misturas são: a proporção de sólidos (S) / líquidos (L), concentração de hidróxido de sódio (conc HS), relação de silicato de sódio (SS) / hidróxido de sódio (HS), relação cinza (C)/escória (E). A combinação dos três primeiros parâmetros levará a diferentes razões molares para os quatro elementos principais responsáveis pelo processo de reação química: sílica, alumina, sódio e água. O método definiu a composição das misturas a testar alterando os 4 parâmetros indicados acima, numa gama de valores como se expressa na Tabela 1.

Tabela 1 - Variáveis e gama de valores introduzidos para cada traço

Variáveis	Gama de Variação
SS/SS+HS	[0,0-1,0]
S/L	[1,5-2,5]
E/E+C	[0,1-1,0]
conc HS	[5,0-12]

A primeira variável ($\text{SS} / (\text{SS} + \text{HS})$) foi definida entre 0 e 1, onde 0 corresponde a um ativador composto apenas por hidróxido de sódio e 1 a um ativador composto apenas por silicato de sódio. A segunda variável ($\text{E} / (\text{E} + \text{C})$) foi definida entre 0,1 e 1, onde 1 corresponde a uma mistura sem cinzas volantes. O intervalo da terceira variável (S / L) ficou entre 1,5 e 2,5 com base em ensaios preliminares. Finalmente, a concentração de hidróxido de sódio variou entre 5 e 12 molal como atualmente encontrado na literatura (Xu e van Deventer, 2003; Cristelo et al., 2013; Phummiphan et al., 2016).

A solução de ativador alcalino foi preparada por hidróxido de sódio e silicato de sódio. Hidróxido de sódio em forma de flocos com uma densidade específica de 2,13 a 20°C e a pureza de 95-99% foi dissolvida em água até a concentração desejada. O silicato de sódio já estava em forma de solução com uma densidade específica de 1,5 e relação $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$ de 2 em massa (Rios et al., 2018).

Neste caso, uma escória branca que não possui no momento qualquer aplicação para sua reutilização foi utilizada. Uma vez que este material residuário é rico em cálcio (Tabela 2) e com uma estrutura amorfa, considerou-se adequado para a produção do cimento alcalino (Rios et al., 2018).

Tabela 2 - Composição da escória (% em peso) (Rios et al., 2018)

Elementos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Fe Total	Cr ₂ O ₃	Outros
Escória	23.5	6.6	54.9	8.5	0.4	1.1	0	5

A cinza volante é classificada como tipo F de acordo com a norma ASTM (2005) devido ao seu baixo teor de cálcio como pode ser observado na composição química apresentada na Tabela 3. A perda ao fogo não foi especificamente determinada para essas cinzas, mas deve ser em torno de 2,59% do peso, de acordo com Cristelo et al., (2012) que trabalhou com uma cinza volante da mesma usina termelétrica.

Tabela 3 - Composição da cinza volante (% em peso) (Rios et al., 2018)

Elementos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	SO ₃	Outros
Cinza Volantes	54.84	19.46	10.73	4.68	4.26	1.40	1.79	1.65	0.7	0.5

As composições das 26 misturas geradas estão expressas na Tabela 4.

Tabela 4 - Traços em massa da calda para posteriores ensaios de flexão, compressão e rigidez

Traços	Escória (g)	Cinza (g)	Silicato de Sódio (g)	Hidróxido de Sódio em Flocos (g)	Água (g)
Traço 1	30,00	270,00	0,00	33,33	166,67
Traço 2	30,00	270,00	0,00	64,86	135,14
Traço 3	300,00	0,00	0,00	33,33	166,67
Traço 4	300,00	0,00	0,00	64,86	135,14
Traço 5	183,33	150,00	0,00	42,29	124,38
Traço 6	35,71	321,43	0,00	23,81	119,05
Traço 7	35,71	321,43	0,00	46,33	96,53
Traço 8	357,14	0,00	0,00	23,81	119,05
Traço 9	357,14	0,00	0,00	46,33	96,53
Traço 10	165,00	135,00	100,00	25,37	74,63
Traço 11	33,33	300,00	83,33	21,14	62,19
Traço 12	183,33	150,00	83,33	13,89	69,44
Traço 13	183,33	150,00	83,33	21,14	62,19
Traço 14	183,33	150,00	83,33	21,14	62,19
Traço 15	183,33	150,00	83,33	27,03	56,31
Traço 16	333,33	0,00	83,33	21,14	62,19
Traço 17	196,43	160,71	71,43	18,12	53,30
Traço 18	30,00	270,00	200,00	0,00	0,00
Traço 19	30,00	270,00	200,00	0,00	0,00
Traço 20	300,00	0,00	200,00	0,00	0,00
Traço 21	300,00	0,00	200,00	0,00	0,00
Traço 22	183,33	150,00	166,67	0,00	0,00
Traço 23	35,71	321,43	142,86	0,00	0,00
Traço 24	35,71	321,43	142,86	0,00	0,00
Traço 25	357,14	0,00	142,86	0,00	0,00
Traço 26	357,14	0,00	142,86	0,00	0,00

Rios et al. (2018) explica que esses métodos são válidos para misturas com vários ingredientes, como é o caso dos cimentos ativados alcalinamente (AAC), onde a mistura com melhor desempenho é o alvo. Isso é

geralmente conseguido alterando a quantidade dos ingredientes, um de cada vez, seguindo o método tradicional de um fator-tempo. No entanto, esta metodologia não explica as interações entre variáveis que podem ser resolvidas usando desenhos fatoriais completos simbolizados matematicamente como N^K , onde N é o nível de projeto fatorial e K é o número de variáveis. Considerando um projeto fatorial de três níveis, que fornece uma boa previsão, à medida que K aumenta, o número de interações torna-se excessivo (com 5 fatores, são necessárias 243 interações). Por essa razão, optou-se por usar um projeto fatorial de dois níveis e tentar melhorá-lo. De facto, quando se aproxima o nível ótimo de resposta, um projeto fatorial de dois níveis já não fornece informações suficientes para modelar adequadamente a superfície de resposta verdadeira. No entanto, se os pontos centrais e axiais forem adicionados ao desenho fatorial de dois níveis, é obtido um *design* composto adequado aos métodos de superfície de resposta (Whitcomb e Anderson, 2004). Neste trabalho utilizou-se um projeto composto centrado na face, o que significa que os pontos axiais estão na face do cubo.

Assim, provetes prismáticos de 160 mm de comprimento e 40 mm de lado foram preparados num molde metálico (Figura 1) considerando um período de cura de 14 dias. Realizaram-se ensaios simples de compressão, flexão e medição de ondas, aos 7 e 14 dias, para avaliar a evolução da rigidez.



Figura 1 - Provetes preparados em moldes metálicos antes de desmoldar

2.2 - Avaliação da Rigidez por Medições da Velocidade de Propagação de Ondas Sísmicas

As velocidades de propagação das ondas sísmicas de compressão (P) e de corte (S) foram medidas por transdutores ultrassônicos não-destrutivos em provetes nos períodos de cura de 7 e 14 dias. Para aquisição das ondas emitidas e recebidas, utilizou-se um equipamento comercialmente disponível no mercado (Figura 2) composto por um par de transdutores ultrassônicos de compressão, para medir velocidades de onda P, com uma frequência nominal de 82 kHz e 30 mm de diâmetro; um par de transdutores ultrassônicos de corte, para medir velocidades de onda S, com uma frequência nominal de 100 kHz e 35 mm de diâmetro; e um gerador de onda de impulsos e unidade de aquisição de dados, amplificador, conectado diretamente a um computador, usando software específico para operar como um osciloscópio.



Figura 2 - Aparelho de aquisição de ondas P e S (Rios et al., 2015)

Segundo processo descrito em Rios et al. (2015) o sinal de entrada foi configurado para uma tensão de excitação de 500 V e uma frequência de sinal de impulso de 82kHz, tanto para onda P como onda S. Utilizou-se a mesma frequência para ambos os transdutores porque esta é a frequência mais próxima disponível no gerador de função. A calibração de cada par de transdutores foi conseguida medindo a

velocidade da onda através de um cilindro de calibração, com densidade e velocidade de onda conhecidas. As medições foram feitas ao longo do eixo longitudinal dos provetes, verticalmente alinhados, e com os transdutores instalados em faces opostas. Portanto, o comprimento do percurso correspondia ao próprio comprimento dos provetes, i.e., de 160 mm. O comprimento exato da viagem e o peso de cada amostra foram medidos antes de cada leitura, com precisão de $\pm 1\%$. Em termos de propagação de ondas, o transmissor foi localizado na parte inferior do provete, enquanto o receptor estava na extremidade superior. O acoplamento acústico entre os transdutores durante a medição foi assegurado por uma camada de gel condutor de ultrassom. Além disso, os transdutores estavam pressionados uniformemente contra a superfície superior da amostra. As leituras foram realizadas em períodos de cura de 7 e 14 dias. Cada resultado apresentado corresponde a uma média de 10 leituras consecutivas do tempo de propagação medido.

Pesquisas anteriores por Prassianakis e Prassianakis (2004), sobre a avaliação da capacidade de ensaios não destrutivos (END) para avaliar a integridade do betão, concluíram que os ensaios com ultrassom são viáveis para avaliar materiais cimentícios.

A Lei de Hooke fornece a relação tensão-deformação dos materiais elásticos por meio da matriz dos componentes elásticos dos materiais (matriz de rigidez) (Bodig e Jayne, 1993).

A partir da teoria da elasticidade, é sabido que as velocidades de onda de compressão e de corte estão relacionadas com os módulos confinados (M_0) e de distorção (G_0), respectivamente, de acordo com as equações 1 e 2:

$$V_p = \sqrt{\frac{M_0}{\rho}} \quad [1]$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G_0}{\rho}} \quad [2]$$

onde:

ρ é a densidade aparente do material;

V_p é a velocidade de ondas P;

V_s é a velocidade de ondas S.

2.3 - Ensaios de Flexão e Compressão

Para a determinação da resistência à flexão, foi utilizado o método de carga concentrada a meio vão. Colocou-se o prisma numa máquina de flexão com uma face lateral de moldagem sobre os cilindros de apoio e o seu eixo longitudinal perpendicular aos apoios. Em seguida, aplicou-se a carga verticalmente por meio do cilindro de carga, sobre a face lateral oposta do prisma, e aumentando-a uniformemente a velocidade de 50 ± 10 N/s, até à rotura.

Os semi-prismas foram conservados até ao momento do ensaio à compressão e foi calculada a resistência à flexão R_f , pela fórmula

$$R_f = 1,5 \frac{F_f}{b^2 l} \quad [3]$$

onde:

R_f é a Resistencia a flexão, in mega Pascal;

b é o lado da secção quadrada do prisma, em milímetro;

F_f é a carga aplicada ao centro do prisma na rotura, em Newton;

l é a distância entre os apoios, em milímetro.

O ensaio de compressão foi feito sobre as duas metades do prisma rompido, por meios adequados que não submetam os semi-prismas a tensões prejudiciais (Figura 3). Centrou-se lateralmente cada semi-prisma em relação aos pratos da máquina a $\pm 0,5$ mm e longitudinalmente de modo que a base do prisma fique saliente em relação aos pratos ou às placas auxiliares cerca de 10 mm. A resistência à compressão R_c foi calculada da seguinte forma:

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad [4]$$

onde:

R_c é a resistência à compressão, em mega Pascal;

F_c é a carga máxima na rotura, em Newton;

1600 é a área dos pratos ou das placas auxiliares (40 mm × 40 mm), em milímetro quadrado.

O resultado do ensaio de resistência à flexão deve ser calculado como sendo a média aritmética de três resultados individuais, cada um arredondado a 0,1 MPa, obtidos a partir de um ensaio efetuado sobre um conjunto de três prismas e apresentar a média aritmética arredondada a 0,1 MPa (NP EN 196-1, 2006).

O resultado da resistência à compressão deve ser calculado conforme a NP EN 196-1 (2006), sendo a média aritmética de seis resultados individuais arredondados a 0,1 MPa, obtidos a partir de seis determinações, efetuadas numa série de três prismas. Se um resultado entre estas seis determinações variar mais do que $\pm 10\%$ da média, elimina-se este resultado e calcula-se a média dos cinco valores restantes. Se um novo resultado entre estas cinco determinações variar mais do que $\pm 10\%$ da média, elimina-se toda a série de resultados e apresentar a média aritmética arredondada a 0,1 MPa.



Figura 3 - Provete desenformado (A) e logo após ensaiado a flexão (B) e compressão (C)

3 - RESULTADOS DOS ENSAIOS

3.1 - Resultados dos Ensaios à Flexão e Compressão

Como foi já descrito anteriormente, os provetes foram ensaiados à flexão e à compressão com as metades resultantes do ensaio a flexão. Os resultados obtidos foram organizados na tabela 5 para a resistência à flexão e na tabela 6 para a resistência à compressão.

Tabela 5 - Resultados dos Ensaios a Flexão

Provete	Força (N)	Resistência (MPa)	Provete	Força (N)	Resistência (MPa)
Traço 1	177,16	0,42	Traço 14	740,12	1,73
Traço 2	181,32	0,42	Traço 15	1201,94	2,82
Traço 3	36,79	0,09	Traço 16	668,75	1,57
Traço 4	11,04	0,03	Traço 17	1291,53	3,03
Traço 5	212,11	0,50	Traço 18	1322,63	3,10
Traço 6	429,38	1,01	Traço 19	1322,63	3,10
Traço 7	518,66	1,22	Traço 20	1177,03	2,76
Traço 8	152,67	0,36	Traço 21	1177,03	2,76
Traço 9	6,00	0,01	Traço 22	2126,44	4,98
Traço 10	677,66	1,59	Traço 23	1372,42	3,22
Traço 11	934,65	2,19	Traço 24	1372,42	3,22
Traço 12	1010,43	2,37	Traço 25	2081,96	4,88
Traço 13	498,32	1,17	Traço 26	2081,96	4,88

Tabela 6 - Resultados dos Ensaios a Compressão

Provete	Força (N)	Resistência (MPa)	Provete	Força (N)	Resistência (MPa)
Traço 1	3367,32	0,66	Traço 14	13962,80	3,07
Traço 2	4215,35	0,81	Traço 15	35048,71	6,89
Traço 3	276,01	0,06	Traço 16	26903,37	5,70
Traço 4	226,34	0,04	Traço 17	19887,80	5,00
Traço 5	3948,49	0,77	Traço 18	38813,49	7,26
Traço 6	4801,49	1,26	Traço 19	38813,49	7,26
Traço 7	10888,98	2,03	Traço 20	56602,60	9,52
Traço 8	2240,52	0,46	Traço 21	56602,60	9,52
Traço 9	981,88	0,25	Traço 22	95073,93	19,55
Traço 10	15719,21	2,80	Traço 23	72834,48	12,02
Traço 11	27281,63	5,59	Traço 24	72834,48	12,02
Traço 12	25969,11	4,78	Traço 25	137261,64	22,79
Traço 13	21062,16	5,10	Traço 26	137261,64	22,79

3.2 - Resultado da Rigidez por Medições da Velocidade de Propagação das Ondas Sísmicas

As velocidades das ondas de compressão e corte (ondas P e S, respectivamente) foram utilizadas para avaliar o desenvolvimento e evolução da rigidez elástica dos provetes cimentados que foram testados em flexão e compressão, ao longo do tempo de cura. Isto foi possível pela natureza não destrutiva destas medições de ondas. A determinação do tempo de propagação da onda P é direta e corresponde à primeira quebra do sinal de onda recebido. Em contraste, a seleção da chegada da onda de corte é ligeiramente mais complexa, devido à interferência das ondas de compressão no sinal recebido.

A seguir, Tabelas 7 e 8, são apresentados, os valores obtidos das velocidades de propagação das ondas S e P, e os respectivos módulos de distorção calculados a partir das equações 1 e 2. Os ensaios foram feitos aos 7 e aos 14 dias de cura de cada provete:

Tabela 7 - Resultados de testes de ondas dos provetes aos 7 dias

Estágio do Teste	VS	VP	G ₀	Estágio do Teste	VS	VP	G ₀
7 Dias	m/s	m/s	MPa	7 Dias	m/s	m/s	MPa
Provete 01	296,30	550,51	139,58	Provete 14	739,03	1923,54	1218,85
Provete 02	432,43	741,43	298,22	Provete 15	828,59	2597,82	1530,03
Provete 03	652,70	1262,78	895,45	Provete 16	666,94	2668,00	989,73
Provete 04	0,00	0,00	0,00	Provete 17	688,76	1482,03	1091,72
Provete 05	585,01	928,07	746,88	Provete 18	579,71	1693,12	677,52
Provete 06	680,85	1048,49	949,24	Provete 19	579,71	1693,12	677,52
Provete 07	874,32	1482,30	1767,80	Provete 20	1081,81	2198,41	2493,00
Provete 08	592,59	1032,26	761,59	Provete 21	1081,81	2198,41	2493,00
Provete 09	0,00	0,00	0,00	Provete 22	957,51	2503,91	2102,58
Provete 10	978,71	2437,91	2056,42	Provete 23	906,00	2514,93	1882,45
Provete 11	744,19	2450,98	1121,08	Provete 24	1063,22	2087,30	2209,84
Provete 12	905,49	1941,04	1676,79	Provete 25	1390,10	3042,98	4438,75
Provete 13	597,68	1482,03	764,60	Provete 26	1390,10	3042,98	4438,75

Tabela 8 - Resultados de testes de ondas dos provetes aos 14 dias

Estágio do Teste	VS	VP	G ₀	Estágio do Teste	VS	VP	G ₀
14 Dias	m/s	m/s	MPa	14 Dias	m/s	m/s	MPa
Provete 01	505,21	858,37	405,81	Provete 14	790,51	2022,24	1394,59
Provete 02	495,05	921,87	390,84	Provete 15	1388,89	2756,72	4298,93
Provete 03	366,97	805,15	283,06	Provete 16	990,10	2786,49	2181,19
Provete 04	0,00	0,00	0,00	Provete 17	1101,93	2573,17	2794,32
Provete 05	647,77	1227,56	915,74	Provete 18	898,88	2177,46	1628,92
Provete 06	919,01	1629,33	1729,48	Provete 19	898,88	2177,46	1628,92
Provete 07	952,38	1739,13	2097,57	Provete 20	1266,83	2503,13	3418,63
Provete 08	851,06	1472,48	1570,84	Provete 21	1266,83	2503,13	3418,63
Provete 09	0,00	0,00	0,00	Provete 22	1338,91	16913,32	4111,21
Provete 10	913,24	2512,56	1790,50	Provete 23	1122,02	2525,25	2887,13
Provete 11	858,83	2548,58	1493,10	Provete 24	1196,71	1817,06	2799,59
Provete 12	1154,40	2149,67	2725,37	Provete 25	1612,90	21276,60	5975,69
Provete 13	1015,23	2289,64	2206,07	Provete 26	1612,90	21276,60	5975,69

3.3 - Análise Estatística dos Resultados Experimentais

A exploração inicial dos dados indicou que o módulo de distorção dos traços 25 e 26, aos 7 e 14 dias, possuem valores atípicos.

Todos os grupos de dados analisados (variáveis de entrada e de resposta) possuem valor positivo de assimetria, isto é, as distribuições são estendidas à direita da média. Sendo que as variáveis Escória e Cinza apresentam valores positivos próximos de zero (distribuições quase simétricas), já as variáveis Resistência à Compressão e G₀ (7 Dias), apresentam valores positivos elevados de coeficiente de assimetria.

A interpretação descritiva é complementada pelos valores da curtose, onde Escória, Cinza, Silicato de Sódio, Hidróxido de Sódio, Água e Resistência a Flexão, apresentam valores negativos de coeficiente de curtose ($g_2 < 0$), isto é, as distribuições destas variáveis são platicúrticas (curvas mais achatadas que a curva normal reduzida). Já a Resistência à Compressão, e os módulos de distorção aos 7 e 14 dias, apresentam distribuições leptocúrticas (curvas mais esguias que a normal reduzida), com coeficientes de curtose positivos ($g_2 > 0$). A interpretação pode ser confirmada pelos dados da Tabela 9 e a Figura 4.

Tabela 9 - Estatística descritiva

	Mínimo	Máximo	Média	Desvio -Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Assimetria	Curtose
Escória	30	357,14	181,52	126,79	69,8	0,05	-1,52
Cinza	0	321,43	148,52	126,56	85,2	0,04	-1,54
Silicato de Sódio	0	200	84,98	74,41	87,6	0,2	-1,31
Hidróxido de Sódio	0	64,86	21,08	19,99	94,8	0,7	-0,15
Água	0	166,67	63,91	56,64	88,6	0,28	-1,13
Resistência Flexão	0,01	4,98	2,05	1,52	74,1	0,41	-0,67
Resistência Comp.	0,04	22,79	6,46	6,7	103,7	1,37	1,27
G ₀ (7 Dias)	0	4438,75	1439,28	1143,59	79,5	1,32	1,95
G ₀ (14 Dias)	0	5975,69	2235,45	1613,21	72,2	0,8	0,49

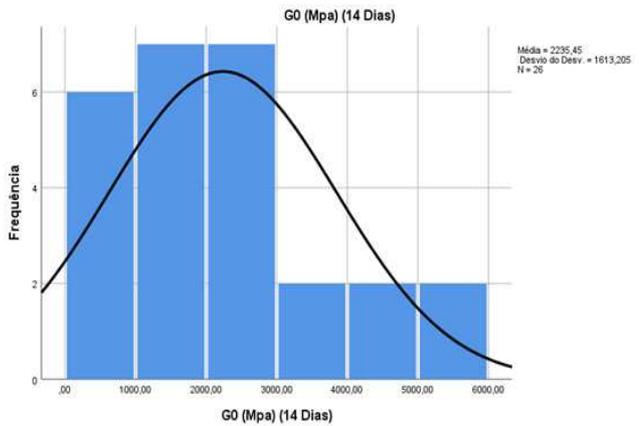
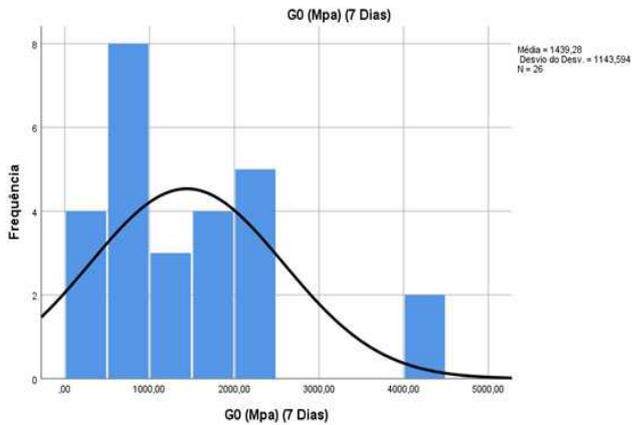
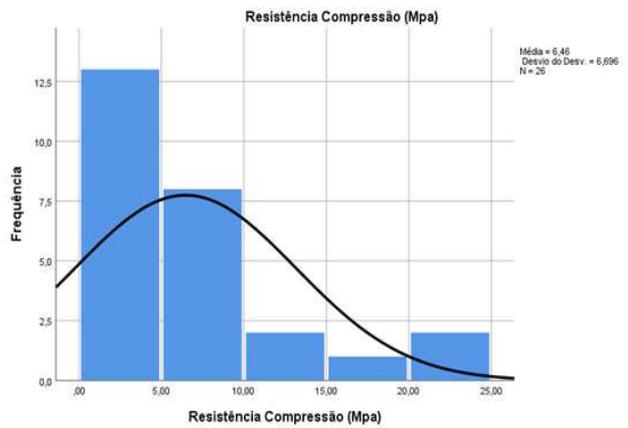
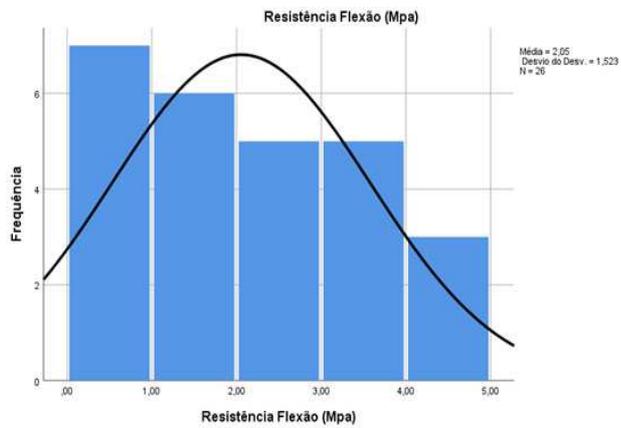
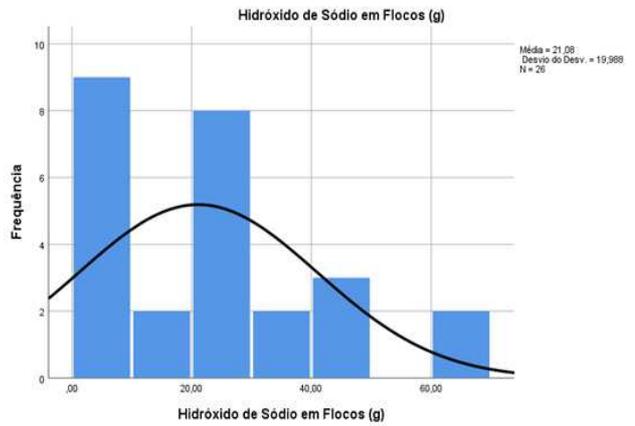
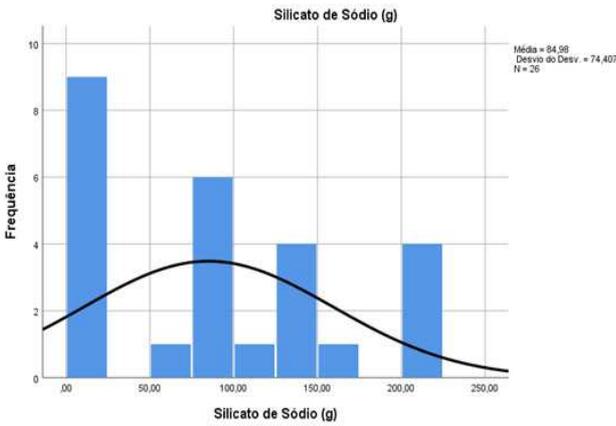
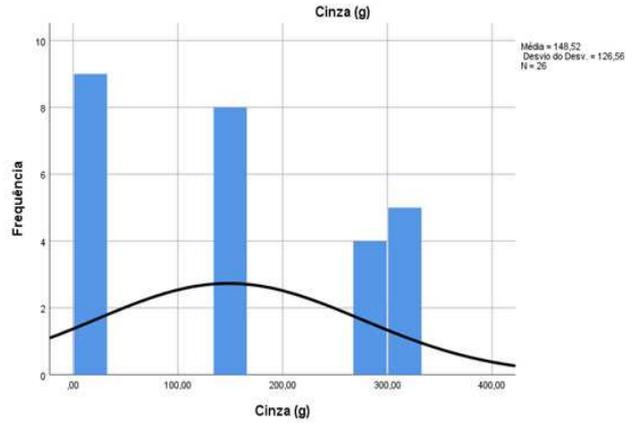
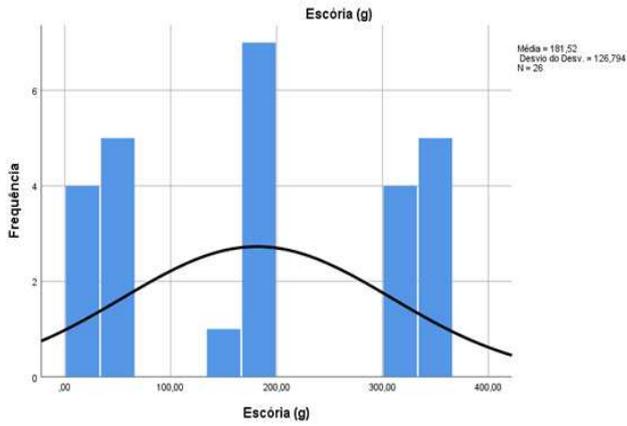


Figura 4 - Distribuição de frequência para os parâmetros estudados

Na análise bivariada observou-se, a partir do coeficiente de correlação (R), que os componentes sólidos constituintes do traço, têm pouca influência nas variáveis de resposta. No entanto, os componentes em solução afetam de forma mais significativa os resultados laboratoriais.

Na Tabela 10, foram destacados os valores de coeficientes de correlação linear que possuem valores relevantes de correlação, R^2 superior a 0,50 e é bem nítido que esses estão mais relacionados com os componentes líquidos.

Tabela 10 - Matriz dos quadrados (R^2), entre componentes dos traços e respostas dos ensaios laboratoriais

	Escória	Cinza	Sil. De sódio	Hid. De sódio	Água	Res. Flexão	Res. Comp.	G0 (7 dias)	G0 (14 dias)
Escória	1,00								
Cinza	0,96	1,00							
Silicato de sódio	0,00	0,00	1,00						
Hidróxido de sódio	0,00	0,00	0,75	1,00					
Água	0,00	0,00	0,88	0,73	1,00				
Resistência flexão	0,00	0,00	0,67*	0,67*	0,78*	1,00			
Resistência compressão	0,04	0,02	0,51*	0,54*	0,64*	0,87	1,00		
G0 (7 dias)	0,09	0,06	0,31	0,39	0,41	0,61	0,73	1,00	
G0 (14 dias)	0,07	0,04	0,38	0,48	0,54	0,77	0,79	0,82	1,00

*, Relações mais relevantes entre variáveis de entrada e de resposta

4 - CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos podemos observar em relação a solução que, quanto maior a quantidade de silicato utilizado na mistura, melhor serão os resultados para os ensaios como os propostos nesse trabalho. Sanz (2007) salienta que misturas a base de cinzas volantes só atingem boas resistências quando adicionado o fator temperatura, visto que esse material possui uma quantidade baixa de cal, este parâmetro afeta de forma muito significativa a transição estrutural do polímero amorfo ao cristalino dos polímeros minerais sintetizados. O estudo os provetes tiveram cura a temperatura ambiente, assim, os que possuíam uma maior quantidade de cinzas em comparação as escórias, foram os que tiveram pior desempenho.

A análise estatística univariada e bivariada da calda cimentícia é concordante sobre a importância dos constituintes em solução, onde esses, são aqueles que tem maior correlação com as variáveis respostas do modelo, corroborando com uma resposta semelhante ao comportamento de materiais que tem como base o cimento Portland convencional. Percebeu-se, assim, a necessidade de um estudo mais completo. Dessa maneira a inclusão de uma análise multivariada deve ser avaliada, com o propósito de melhor explorar, os componentes dos traços que tem maior efeito nos parâmetros da resistência e rigidez dos provetes ensaiados, assim como o desenvolvimento de um modelo estatístico que permita definir as proporções de cada constituinte da calda consoante com a utilização da mesma.

Os resultados obtidos nas análises estatísticas são semelhantes ao modelo publicado em Rios et al. (2018), que se utilizou da mesma base de dados e onde as análises foram feitas pelo uso de um método de superfície de resposta. No referido trabalho a definição do plano experimental e também a análise dos resultados se mostrou com boa exatidão e concluiu-se que a melhor composição da mistura é obtida aumentando as variáveis mais importantes que se constituiu como a relação entre as duas soluções do ativador, ou seja, a parte que possuía líquidos envolvidos.

REFERÊNCIAS

- ASTM, C. (2017) - 618 - 17: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. *ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania.*
- Bodig, J. e Jayne, B. A. (1993) - *Mechanics of wood and wood composites.* Krieger Pub.
- Cristelo, N., Glendinning, S., Fernandes, L. e Pinto, A. T. (2013) - Effects of alkaline-activated fly ash and Portland cement on soft soil stabilisation. *Acta Geotechnica*, 8(4), 395-405. <https://doi.org/10.1007/s11440-012-0200-9>
- Cristelo, N., Glendinning, S., Miranda, T., Oliveira, D. e Silva, R. (2012) - Soil stabilisation using alkaline activation of fly

ash for self compacting rammed earth construction. *Construction and Building Materials*, 36, 727–735.

- Cristelo, N., Soares, E., Rosa, I., Miranda, T., Oliveira, D. V., Silva, R. A. e Chaves, A. (2013)- Rheological properties of alkaline activated fly ash used in jet grouting applications. *Construction and Building Materials*, 48, 925–933.
- Davidovits, J. (2002) - Environmentally Driven Geopolymer Cement Applications. *Geopolymer Conference, Melbourne, Australia*, 9. Retrieved from https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/43915282/ENVIRONMENT.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWO WYYGZ2Y53UL3A&Expires=1507031789&Signature=pPz0fzwyQkVmntXMTeMvZ%2BHUgRQ%3D&response-content-disposition=inline%3B filename%3DEnvironmentally_Driven_Geopolyme
- NP EN 196-1. (2006) - 3ª edição Métodos de ensaios de cimentos-Parte 1: Determinação das resistências mecânicas. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- Phummiphan, I., Horpibulsuk, S., Sukmak, P., Chinkulkijniwat, A., Arulrajah, A. e Shen, S.-L. (2016) - Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer. *Road Materials and Pavement Design*, 17(4), 877–891.
- Prassianakis, I. N. e Prassianakis, N. I. (2004) - Ultrasonic testing of non-metallic materials: concrete and marble. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 42(2), 191–198.
- Rios, S., Cristelo, N., Viana da Fonseca, A. e Ferreira, C. (2015) - Structural Performance of Alkali-Activated Soil Ash versus Soil Cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2), 4015125.
- Rios, S., Nunes, S., Viana da Fonseca, A. e Pinheiro, C. (2018) - Alkali-activated cement using slags and fly ash. *4th International Conference WASTES – Solutions, Treatments and Opportunities*, 161–166.
- Sanz, M. C. (2007) - Nuevos materiales cementantes basados en la activación alcalina de cenizas volantes caracterización de geles NASH en función del contenido de sílice soluble: efecto del Na_2SO_4 . Universidad Autónoma de Madrid.
- Whitcomb, P. J. e Anderson, M. J. (2004) - *RSM simplified: optimizing processes using response surface methods for design of experiments*. CRC press.
- Xu, H. e van Deventer, J. S. J. (2003) - The effect of alkali metals on the formation of geopolymeric gels from alkali-feldspars. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 216(1), 27–44.