



USO DE RESÍDUOS E SUBPRODUTOS NA ESTABILIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DE UM SOLO DISPERSIVO E SULFATADO

GREEN STABILIZED SULFATE-RICH DISPERSIVE SOIL THROUGH RESIDUES AND INDUSTRIAL BY-PRODUCTS

Gustavo Dias Miguel¹; Lucas Festugato¹

Artigo recebido em: 20/07/2020 e aceito para publicação em: 15/09/2020.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/holos.v21i1.12411>

Resumo: Solos dispersivos e sulfatados emergem como uma grande preocupação ao desenvolvimento da infraestrutura. Dado suas características, tipos de solos como estes possuem uma alta suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos, além da possibilidade do desenvolvimento de minerais expansivos quando tratados à base de cálcio. Neste sentido, surge a demanda por alternativas a estabilizantes como o cimento Portland e a cal calcítica. Com isto, o presente trabalho propõe um novo estabilizante à base de vidro moído (um subproduto da produção de fibras de vidro) e cal de carbureto (um resíduo proveniente da produção de gás acetileno). Sua eficiência foi averiguada através da resistência à compressão dos compósitos propostos. Para isto, corpos-de-prova foram moldados com distintas dosagens tendo-se como fatores controláveis o teor de vidro moído, o teor de cal de carbureto, o teor de umidade de moldagem e o peso específico aparente seco das amostras. Ambos, subproduto e resíduo, se mostraram eficazes ao tratamento de solos dispersivos e sulfatados, levando a resistências à compressão da ordem de 4 MPa. Da análise estatística, nesta ordem de importância, os fatores peso específico aparente seco, teor de vidro moído e teor de cal de carbureto, se mostram significantes para um nível de significância de 5%. Enquanto que o teor de umidade de moldagem se mostrou não-significativo. Por fim, por meio de uma regressão não-linear, é proposta uma otimização de valores para que se possa atingir a máxima resistência desejada.

Palavras-chave: Solos dispersivos e sulfatados. Tratamento de solos problemáticos. Tratamento sustentável. Resíduos. Projeto de experimentos. Otimização de processo.

Abstract: Sulfate-rich dispersive soils became an enormous concern to infrastructure development. Owing to its characteristics, these type of soils are highly susceptible to erosions process, as well as, to expansive minerals growth when calcium based stabilizers are applied. Therefore, alternative binders must be found alternatively to ordinary Portland cement and lime. In this context, the present study aims to develop an alternative soil stabilizer, composed by ground glass (a byproduct from fiberglass production) and carbide lime (an industrial residue from acetylene gas production). To access the efficiency of the proposed stabilization, unconfined compressive strength was performed. Therefore, soil-ground glass-carbide lime blends were molded at distinct dosages, with ground glass, carbide lime, molding moisture content and dry unit weight being varied throughout the tests. Results has shown that both, residue and byproduct arise as an innovative approach to sulfate-rich dispersive soil treatment, where unconfined compressive strengths up to 4 MPa were reached. Additionally, regarding to statistical analysis, following this sequence, dry unit weight, ground glass amount and carbide lime content were statistical significant to a significance level of 5%. Whereas, molding moisture content was not a significant parameter. Finally, based on a non-linear regression, an experimental optimization was proposed aiming to obtain the maximum unconfined compressive strength requested.

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS. E-mail: gustavo2995@hotmail.com, lucas@ufrgs.br

Keywords: Sulfate-rich dispersive soils. Soil improvement. Green stabilized soil. Residues. Design of experiments. Experiment optimization.

1 INTRODUÇÃO

Tanto solos dispersivos quanto solos ricos em sulfatos, são conhecidamente problemáticos quando da execução de obras geotécnicas de infraestrutura. A situação se agrava ainda mais quando em um único solo ambas estas características são encontradas, como o caso do solo aqui em questão. No caso de solos dispersivos, estes estão propensos a sofrerem erosões de grande magnitude devido a presença de íons monovalentes, tipicamente sódio (Na^+) e potássio (K^+), adsorvidos às suas partículas. Já solos sulfatados, quando tratados com estabilizantes à base de cálcio, tendem a desenvolver reações químicas deletérias, incorrendo em uma estabilização ineficiente (HOLMGREN & FLANAGAN, 1977; LAMBE & WHITMAN, 1979; SHARMA & REDDY, 2004; CAREY 2014; SINGH *et al.* 2015; PUPPALA *et al.* 2003; TALLURI 2013; TALLURI *et al.* 2013; MIGUEL 2020; MIGUEL *et al.* 2020). A presença de íons fracamente carregados, como Na^+ e K^+ , diminui o nível de forças atrativas atuantes entre as partículas do solo, facilitando assim o carreamento das mesmas. Logo, solos que se caracterizam pela presença destes íons tornam-se suscetíveis ao desenvolvimento de *piping* (erosão interna) e erosão externa, o que leva não só a problemas de infraestrutura, mas também, a uma elevada turbidez da água e, com isto, onerando os sistemas de tratamento de águas (SHERARD *et al.* 1977; TUNCER *et al.* 1989; AWAD 2002; VACHER *et al.* 2004; UMESH *et al.* 2011; QUIÑÓNEZ SAMANIEGO 2015; SCHEUERMANN FILHO 2019).

Por outro lado, no caso de solos sulfatados, estes ocorrem devido a presença de sulfatos como sulfato de sódio (Na_2SO_4), sulfato de magnésio (MgSO_4) e sulfato de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ - gesso), que podem se dar de forma natural ou devido a ações antrópicas. No que diz respeito a esta última, os sulfatos podem ocorrer do extrativismo mineral, locais que até então não possuíam grandes quantidades de oxigênio, são inundados por este durante a atividade mineira. Com isto, sulfetos como a Pirita e Marcasita (FeS_2), por exemplo, acabam oxidando, gerando a precipitação de íons de ferro e, com a presença de fontes de cálcio nas proximidades, acabam por formar compostos de sulfato de cálcio (gesso) tornando por assim o solo sulfatado (HARRIS *et al.* 2004a; HARRIS *et al.* 2004b; TALLURI 2013; TALLURI *et al.* 2013). A problemática envolvida neste tipo de solo diz respeito de que, quando da utilização de

estabilizantes à base de cálcio (e.g. cimento Portland e cal hidratada), estes podem vir a reagir com os sulfatos e argilominerais com isto, induzir a formação de minerais expansivos como a etringita $[Ca_3Al(OH)_6 \cdot 12H_2O]_2 \cdot (SO_4)_3 \cdot 2H_2O$ e a taumasita $[Ca_3Si(OH)_6 \cdot 12H_2O] \cdot (SO_4)(CO_3)$, que estão pré-dispostos a ocorrerem em um ambiente alcalino e hidratado (SHERWOOD 1962; SCHLORHOLTZ & DEMERIEL 1984; HUNTER 1988; KOTA *et al.* 1996; ROY *et al.* 2003; HOYOS *et al.* 2006a; PUNTHU-TAETCHA *et al.* 2006; LITTLE & NAIR 2009; PUPPALA & CERATO 2009; PUPPALA *et al.* 2013; RAJA & THYAGARAJ 2018; PUPPALA *et al.* 2019a; PUPPALA *et al.* 2019b; SCHEUERMANN FILHO *et al.* 2020).

Minerais como a etringita e a taumasita, são responsáveis por expansões deletérias da matriz estabilizada, o que ocorre em virtude da formação de cristais aciculares/piramidais, seja pela absorção de água por parte destes, ou então, devido um cristal impelir o outro (PUPPALA *et al.* 2004; AL-MHAIDIB 2006). Estes problemas são tipicamente observados em bases e sub-bases de rodovias, onde estas camadas são geralmente estabilizadas a partir de cimento Portland ou cal, o que acaba inviabilizando o uso destas infraestruturas devido sua insegurança (MITCHELL & DERMATAS 1992; DERMATAS 1995; KNOPP & MOORMANN 2016).

Embora solos dispersivos serem de grande preocupação, variadas técnicas já se apresentaram promissoras em seu tratamento. Awad (2002) verificou a eficiência do tratamento destes solos a partir de resíduos como cinzas e filtros granulares, este último se mostrando promissor em prevenir a dispersão. Vakili *et al.* (2013) aplicou pozolanas naturais derivadas da indústria cimenteira, as quais reduziram o potencial dispersivo do solo em 25,79% quando uma dosagem de 5% foi utilizada durante um período de cura de 90 dias. Consoli *et al.* (2016, 2019a) investigaram misturas do tipo solo-cal-pozolana por meio de ensaios *Pinhole* e durabilidade por molhagem e secagem, os autores perceberam uma redução no potencial dispersivo, sendo este dependente da pososidade do solo e teor de cal empregado.

No caso de solos ricos em sulfatos, alternativas como *mellowing*, dupla aplicação de cal e, adoção de um teor de umidade extra, se tornaram os principais meios de contornar e tratar os problemas que envolvem estes tipos de solos quando tratados à base de cálcio (BERGER *et al.* 2001; HARRIS *et al.* 2004a; LITTLE & NAIR 2009). Harris *et al.* (2005) e Talluri *et al.* (2013) testaram uma ampla variedade de estabilizantes (cinza volante tipos F e C, lignossulfonato, resinas derivadas de petróleo, dentre outros), onde muitos deles se mostraram eficazes no tratamento de solos

sulfatados. Alternativamente ainda, uma ampla gama de autores (PUPPALA & MUSENDA 2000; PUPPALA *et al.* 2006; HOYOS *et al.* 2006a; 2006b; PUNTHUTAECHEA *et al.* 2006) aplicaram fibras de polipropileno como metodologia de reforço para solos, intencionando-se a prevenção da expansão quando estes elementos fossem solicitados à tração. No geral, as fibras se mostraram capazes de conter a expansão, especialmente quando associadas a uma pozolana.

Isto posto, a presente pesquisa compõe um estudo maior que busca o desenvolvimento de estabilizantes e reforços alternativos com o intuito de sanar as adversidades associadas a solos dispersivos e ricos em sulfatos. Neste sentido, a análise aqui descrita irá focar no comportamento mecânico de um solo dispersivo e sulfatado, este sendo melhorado através da adição de uma mistura inovadora composta por vidro moído e cal de carbureto, o que pode-se dizer se tratar de uma estabilização sustentável, uma vez que o primeiro é um subproduto enquanto que o segundo, um resíduo. Com isto, as propriedades mecânicas de um solo dispersivo e sulfatado proveniente do norte do Paraguai, melhorado com os materiais acima descritos, foram estudadas por meio de ensaios de resistência à compressão não confinada. Sendo para isto, adotadas variadas combinações de misturas por meio da alternância dos níveis dos fatores controláveis, a saber: teor de vidro moído (5, 15 e 25%), teor de cal de carbureto (2, 5 e 8%), teor de umidade de moldagem (14, 15 e 16%) e, peso específico aparente seco (16,2, 17,2 e 18,2 kN/m³).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental aqui proposto foi dividido em duas partes. A primeira delas diz respeito a caracterização dos materiais aqui envolvidos. Na sequência, é realizada a determinação das características de qualidade e variável resposta a ser adotada como meio de avaliação, além disto, nesta mesma fase são ainda determinados os fatores controláveis, constantes e de ruído.

2.1 Caracterização dos materiais

O solo utilizado nesta pesquisa trata-se de um solo sedimentar, coletado no Estado Paraguai mais especificamente entre os municípios de Loma Plata e Filadélfia, a região conhecida como *Chaco* Paraguaio (região oeste do país). De acordo com o

Sistema Unificado de Classificação de Solos (ASTM 2006), este solo pode ser classificado como um solo de graduação fina, inorgânico e com limite de liquidez inferior a 50 podendo assim, ser nominado como uma *lean-clay* (CL). Ensaio de difração de raios-X (DRX) revelaram a presença dos seguintes minerais: Quartzo (33,9%), Albita (24,5%), Clorita (17,4%), Ilita (14,5%), Bário Ortoclásio (5,5%) e Gesso (4,2%).

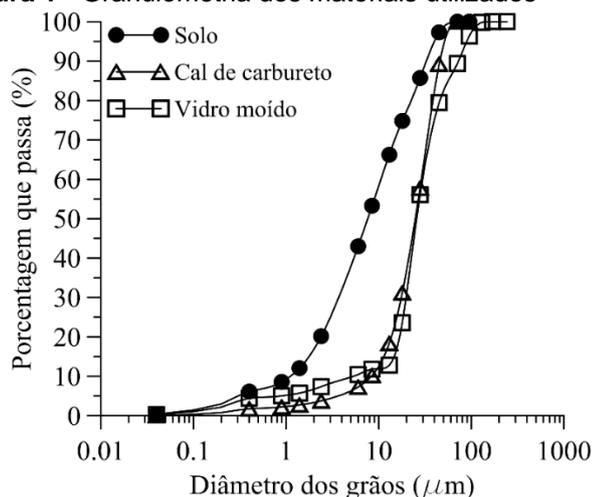
Já o vidro moído, aplicado aqui como uma pozolana artificial, é originário da região metropolitana de Porto Alegre (sul do Brasil) e trata-se de um subproduto da fabricação de fibras de vidro. Sua composição química, obtida por meio de fluorescência de raios-X (FRX) revelou que este material é principalmente composto por SiO₂ (59,4%), Al₂O₃ (13,5%), Fe₂O₃ (0,4%), MgO (2,9%) e CaO (22,1%). Ensaio DRX revelaram uma estrutura basicamente amorfa para este material, com a existência de um único pico referente ao mineral Quartzo-Alfa (SiO₂) que deve-se as condições termais de manufatura. Além disto, o vidro moído se mostrou não plástico sendo classificado como um silte (ML) de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (ASTM 2006).

Como ativador alcalino utilizou-se a cal de carbureto, este material trata-se de um resíduo da produção de gás acetileno, igualmente obtido na região metropolitana de Porto Alegre. A análise de sua composição química mostrou que este material é composto principalmente por CaO (98,3%), SrO (0,5%), Al₂O₃ (0,4%) e SO₃ (0,5%). Em ensaios DRX, a cal de carbureto apresentou picos cristalinos referente aos minerais Portlandita [Ca(OH)₂] e Calcita [CaCO₃], este último devido ao fato de uma eventual carbonatação do material.

Ambos vidro moído e cal de carbureto foram submetidos a um processo de peneiramento através de uma malha #200 (0,075 mm), afim de se obter um material mais fino logo, com maior propensão a ocorrência de reações químicas. A Tabela 1 lista maiores detalhes de cada um dos materiais (incluindo a caracterização quanto a dispersão e quantidade de sulfatos presente no solo natural). Por fim, a Figura 1 apresenta a distribuição granulométrica de cada um dos materiais supracitados.

Tabela 1- Propriedades físicas dos materiais utilizados

Parâmetro	Solo	Cal de Carbureto	Vidro Moído
Limite de liquidez (%)	32	-	-
Limite de plasticidade (%)	16	-	-
Índice de plasticidade (%)	16	-	Não-plástico
Peso esp. Real dos grãos (g/cm ³)	2,61	2,09	2,62
Passante peneira #200	92,11%	96,06%	100%
Diâmetro médio das partículas, D ₅₀ (mm)	0,0064	0,024	0,025
Superfície específica, SSA (m ² /g)	22,74	20,7	3,96
Matéria orgânica (%)	1,24%	-	-
pH	8,54	12,55	9,60
<i>Crumb Test</i>	Grade 2 (Intermediário)	-	-
<i>Pinhole Test</i>	D1	-	-
Sais totais dissolvidos, TDS (mEq/L)	65,45	-	-
Porcentagem de sódio, SP (%)	68,60	-	-
Razão de adsorção de sódio, SAR	14,09	-	-
Sulfatos solúveis (SO ₄)	14.299 ppm	-	-
Capacidade de troca catiônica, CEC (cmol/kg)	12	-	-
Classificação USCS	CL	-	ML

Figura 1 - Granulometria dos materiais utilizados

2.2 Definição da característica de qualidade e variável resposta

A característica de qualidade adotada no respectivo estudo foi a resistência à compressão. Esta foi estabelecida em virtude da aplicabilidade proposta para este tipo de mistura, ou seja, sua utilização em bases e sub-bases de rodovias onde há uma demanda por resistências mínimas para que um bom desempenho seja alcançado. Desta forma, a resistência à compressão passa a ser a variável resposta aqui adotada. Sendo com isto, uma variável resposta do tipo maior-é-melhor, o que leva a não possuir um limite superior estabelecido (LSE), do contrário, possui um limite inferior estabelecido (LIE) de 250 kPa de acordo com os requisitos exigidos pela norma DNIT

2.3 Definição dos fatores controláveis, constantes e de ruído

Os parâmetros de um processo qualquer, ou seja, os parâmetros que governam um fenômeno da natureza, para serem determinados estes podem se basear na literatura, na experiência do pesquisador, em um debate entre a equipe de pesquisa, em normativos, dentre outros (MONTGOMERY 2008). A partir então, da definição de um compêndio de parâmetros, se originam por sua vez os fatores controláveis, que nada mais são que um subconjunto destes parâmetros os quais foram escolhidos e que terão seus níveis alternados ao longo da experimentação. Desta forma, após uma síntese da literatura que contempla a estabilização de solos, os seguintes fatores controláveis foram adotados para este estudo: teor de vidro moído, teor de cal de carbureto, teor de umidade de moldagem e peso específico aparente seco.

Com intuito de verificar o impacto da adição de vidro moído como um potencial precursor pozolânico e, baseado em estudos já realizados (e.g. CONSOLI *et al.* 2018a; 2018b), os níveis de 5 e 25% foram adotados e correspondem, respectivamente, ao nível baixo e alto deste fator. Estas porcentagens se dão sobre o peso seco de solo. Além disto, adicionou-se um ponto central entre os valores escolhidos sendo, neste caso, no valor de 15%, que objetiva detectar eventuais não linearidades nos fatores.

Quanto aos teores de cal de carbureto, seu nível baixo foi determinado através do método de Consumo Mínimo de Cal (do inglês: *Initial Consumption of Lime* – ICL) proposto por Rogers *et al.* (1997). Tal procedimento se baseia na interpretação do pH, onde o teor mínimo de cal a ser adotado é aquele em que um pH de 12,4 é alcançado e mantém-se estável. Um pH de 12,4, a partir de misturas solo-vidro, foi alcançado com um teor de 2% de cal em relação ao peso seco da mistura solo-vidro, consequentemente, este teor foi adotado como o nível baixo deste fator. Quanto ao seu nível alto, este foi adotado com base na literatura e trabalhos experimentais previamente realizados sendo este, no valor de 8% (CONSOLI *et al.* 2018a; 2018b; 2019b; 2020). Da mesma forma, um ponto central foi adicionado para avaliar eventuais não linearidades.

Tanto o teor de umidade de moldagem quanto o peso específico aparente seco tiveram seus níveis escolhidos com base em ensaios Proctor de compactação, sendo

estes realizados com uma energia normal ($600 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$), baseados na norma ASTM D698 (ASTM 2012). Misturas solo-vidro-cal atingiram seu peso específico aparente seco máximo de $18,2 \text{ kN}/\text{m}^3$ e uma umidade ótima de 14%. Logo, ambos estes se tornaram pontos fatoriais, ou seja, extremos, com o primeiro refletindo o nível alto do peso específico aparente seco e o segundo, o nível baixo do teor de umidade de moldagem. O nível baixo do peso específico aparente seco foi estabelecido de forma a se ter amostras mais porosas com isto, um valor de $16,2 \text{ kN}/\text{m}^3$ foi adotado, sendo o ponto central no valor de $17,2 \text{ kN}/\text{m}^3$. Já o nível alto do teor de umidade de moldagem foi escolhido de forma a se ter uma maior quantidade de água nas amostras, podendo assim, vir a facilitar a ocorrência de reações pozolânicas. Desta forma um teor de umidade de 16% foi adotado, com um ponto central no valor de 15%.

Por fim, no que diz respeito aos fatores constantes e de ruído, os primeiros tratam-se de um subconjunto de fatores os quais não serão investigados logo, devem ser mantidos constantes ao longo de toda a experimentação para que não venham inflacionar o termo de erro ou na variabilidade experimental. Desta forma, dentre os fatores que poderiam ser mantidos constantes, optou-se por fixar o tempo de cura das amostras (28 dias), a temperatura de cura das amostras ($23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$), o operador responsável pela moldagem das amostras e, o tipo de água de moldagem que, neste caso, se tratou de água destilada. Já os fatores de ruído, são aqueles que não podem ser nem controlados durante a execução do experimento, nem mantidos constantes, sendo assim, responsáveis pelo ruído ou erro experimental. Dentre os fatores de ruído possíveis, destacam-se a temperatura e umidade do ambiente durante o procedimento de moldagem das amostras.

2.4 Definição da matriz experimental e restrições experimentais

Quanto ao programa experimental aqui proposto, uma de suas restrições experimentais diz respeito ao grande número de tratamentos. Desta forma, em termos práticos, seria intangível que um único operador conseguisse executar um número tão grande de ensaios em um único dia. Assim sendo, a parte que compõe o projeto fatorial completo 2^4 , com duplicatas e, 4 pontos centrais [$(16 \times 2) + 4 = 36$ tratamentos], foi dividida em 4 blocos independentes (Tabela 2). Cada um dos blocos é uma fração homogênea do experimento sendo que, dentro de cada bloco, os tratamentos são dispostos de forma aleatória. Como mencionado, a utilização de 4 blocos visa distribuir

a moldagem dos 36 corpos-de-prova ao longo de quatro dias distintos, sem qualquer prejuízo na avaliação da variável resposta.

Ainda, previu-se de antemão uma eventual não linearidade nos resultados o que levou ao planejamento de um Projeto Composto de Segunda Ordem (PCSO), isto é, pontos axiais (estrela) sendo anexados ao cubo fatorial anteriormente apresentado. Com isto, os pontos axiais podem ser considerados um bloco único e homogêneo, sendo estes executados somente se necessário, isto é, caso detectado a não-linearidade. A verificação da ortogonalidade do modelo se deu por meio da *Correlação de Pearson*.

Tabela 2 - Projeto fatorial completo - 2⁴ - 4 pontos centrais - duplicatas - 4 blocos

Tratamento	Pt. central	Blocos	Vidro moído (%)	Teor de umidade (%)	Peso esp. (kN/m ³)	Cal de Carburado (%)	VR: RCS ¹ (MPa)
1	1	3	5	16	16,2	2	0,46
2	1	3	5	14	18,2	2	1,08
3	1	3	5	16	18,2	8	1,46
4	1	3	25	14	18,2	8	3,55
5	1	3	25	14	16,2	2	1,01
6	0	3	15	15	17,2	5	1,82
7	1	3	25	16	18,2	2	1,62
8	1	3	25	16	16,2	8	1,83
9	1	3	5	14	16,2	8	0,76
10	1	4	25	16	18,2	8	2,83
11	1	4	5	16	18,2	2	0,71
12	1	4	5	14	18,2	8	2,12
13	0	4	15	15	17,2	5	1,88
14	1	4	25	14	16,2	8	1,98
15	1	4	5	16	16,2	8	0,94
16	1	4	25	16	16,2	2	0,98
17	1	4	25	14	18,2	2	1,89
18	1	4	5	14	16,2	2	0,40
19	1	1	25	14	16,2	2	0,94
20	1	1	25	14	18,2	8	3,79
21	1	1	25	16	18,2	2	1,96
22	1	1	25	16	16,2	8	2,20
23	1	1	5	16	18,2	8	2,19
24	1	1	5	14	18,2	2	1,04
25	1	1	5	14	16,2	8	0,90
26	1	1	5	16	16,2	2	0,53
27	0	1	15	15	17,2	5	2,01
28	1	2	5	16	18,2	2	1,02
29	1	2	25	16	18,2	8	3,65
30	1	2	25	14	18,2	2	2,01
31	0	2	15	15	17,2	5	2,31
32	1	2	25	14	16,2	8	1,79
33	1	2	5	14	18,2	8	2,22
34	1	2	5	16	16,2	8	1,02
35	1	2	5	14	16,2	2	0,46
36	1	2	25	16	16,2	2	1,04

¹RCS = resistência à compressão simples

Como será visto em seguida, uma não-linearidade foi detectada na análise dos resultados. Desta forma, houve ainda a necessidade da execução de pontos extras que viessem a modelar matematicamente os efeitos quadráticos sendo, portanto, executado o PCSO já previsto. Assim sendo, além dos 36 tratamentos já executados e, descritos na Tabela 2, foram ainda executados pontos axiais (estrela) arranjados de forma a se ter um experimento do tipo *face centrada* ($\alpha = 1$). Optou-se por esta configuração já que, na eventual existência de pontos que extrapolassem as faces do cubo (experimento fatorial), isto levaria a impossibilidade da moldagem dos corpos-de-prova. Apesar da implementação de um PCSO, os fatores acima elencados permaneceram os mesmos, mudando tão somente a combinação entre estes. Com isto, 16 tratamentos extras foram realizados de forma axial ao cubo fatorial ($2 \times 4 = 8$ pontos axiais, por se tratarem de duplicatas, 16 tratamentos extras), totalizando assim um total de 52 ensaios de resistência à compressão não-confinada. A Tabela 3 apresenta os pontos axiais adicionados ao cubo fatorial.

Tabela 3 - Pontos axiais - 2 x 4 - duplicatas

Tratamento	Blocos	Vidro mo- ído (%)	Teor de umi- dade (%)	Peso esp. (kN/m ³)	Cal de Carbu- reto (%)	VR: RCS (MPa)
1	2	15	15	17,2	2	1,05
2	2	15	14	17,2	5	1,77
3	2	15	15	17,2	2	1,34
4	2	15	15	18,2	5	3,01
5	2	5	15	17,2	5	1,12
6	2	15	16	17,2	5	2,33
7	2	25	15	17,2	5	2,57
8	2	15	14	17,2	5	2,01
9	2	5	15	17,2	5	1,14
10	2	15	15	16,2	5	1,19
11	2	15	15	18,2	5	2,81
12	2	25	15	17,2	5	2,13
13	2	15	15	17,2	8	2,15
14	2	15	15	16,2	5	1,16
15	2	15	15	17,2	8	2,08
16	2	15	16	17,2	5	1,95

2.5 Processo de moldagem dos corpos-de-prova e ensaios de resistência à compressão não-confinada

A moldagem de cada um dos corpos-de-prova se deu de forma individual, obedecendo uma ordem de aleatorizada (Tabela 2 e Tabela 3). Neste caso, utilizaram-se corpos-de-prova cilíndricos possuindo 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro. Em um

primeiro momento, os materiais eram separados conforme cada uma das dosagens pré-estabelecidas e que, se tratavam, respectivamente, do solo dispersivo e sulfatado, do vidro moído e da cal de carbureto. Separação esta, que ocorria por meio da pesagem de cada um dos componentes em balança com precisão de 0,01g. Findado este procedimento, partia-se para a mistura dos materiais. Essencialmente havia dois momentos em que eram realizadas misturas, previamente à adição de água sendo, portanto, os materiais homogeneizados a seco e, após a adição do teor de umidade adotado. Sendo em todos os casos utilizada água destilada. Após a mistura, eram coletadas 3 pequenas porções (cápsulas), e tinham por intuito a verificação da umidade de moldagem resultante.

Na sequência, do material restante, este foi separado em três quantidades idênticas representando cada uma das camadas a serem confeccionadas. Afim de não se ter perdas significativas de umidade, cada uma destas parcelas foi acondicionada em sacos plásticos até o momento de sua compactação. Os materiais inseridos dentro do molde, passaram por um mecanismo de compactação estática como proposto por Ladd (1978). Uma vez atingida a altura desejada, a camada compactada era escarificada e a camada seguinte adicionada. Efetuadas as três camadas, foram tomadas as medidas do corpo-de-prova, altura e diâmetro neste caso. Ambas grandezas averiguadas em três diferentes posições, obtendo-se assim seus valores médios. Neste mesmo momento, se apurou a massa total de cada elemento. Em relação a critérios de aceitabilidade, foram adotados $\pm 1,5\%$ em relação às dimensões médias e massa total dos corpos-de-prova e, $\pm 0,5\%$ para umidade de moldagem em relação a umidade teórica.

Voltando-se ao procedimento de cura das amostras, estas logo após moldadas, foram acomodadas no interior de três sacos plásticos, e tinham como propósito evitar o contato dos corpos-de-prova com a água, já que a cura se desenvolveu submersa a temperatura controlada de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. A preocupação pela completa selagem parte por exemplo, do afirmado por Sherwood (1962), o qual comenta que a presença de sulfatos como o sulfato de cálcio, pouco influenciará na resistência de corpos-de-prova desde que mantidos a um teor de umidade constante. No entanto, no caso da elevação abrupta desta umidade (e.g. imersão), isto poderia implicar em uma grande perda de resistência/desagregação.

A cura dos corpos-de-prova foi estabelecida como um fator constante, ou seja, 28 dias. No vigésimo sétimo dia, as amostras foram então levadas a submersão em

água destilada e, mantidas por um período de 24 h. Esta ação visou suprimir eventuais efeitos da sucção na resistência à compressão das amostras. Transcorrido este período, foi efetuada a ruptura (compressão não-confinada uniaxial) de cada um dos corpos-de-prova, tendo-se como base a norma ASTM D5102-09. Para isto, fez-se uso de uma prensa elétrica mantida a uma velocidade constante de 1,14 mm/min na qual, um anel dinamométrico com capacidade de 10 kN encontrava-se acoplado. A determinação da variável resposta resistência à compressão simples (RCS) se deu por meio da (Eq. 1), onde a carga Q foi obtida a partir das leituras efetuadas diretamente no anel e, posteriormente convertidas em unidades de engenharia.

$$RCS = \left(\frac{Q}{\frac{\pi D_m^2}{4}} \right) \quad (1)$$

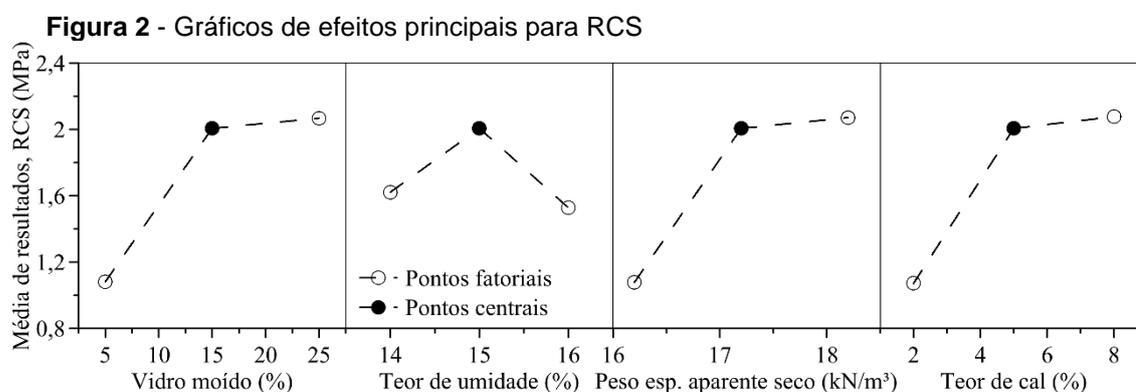
Q = carga desenvolvida devido a reação;

D_m = diâmetro médio do corpo-de-prova

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise dos fatores controláveis

Em uma primeira instância, após a realização do experimento fatorial completo (Tabela 2), detectou-se a não-linearidade dos fatores controláveis como pode ser visto na Figura 2.



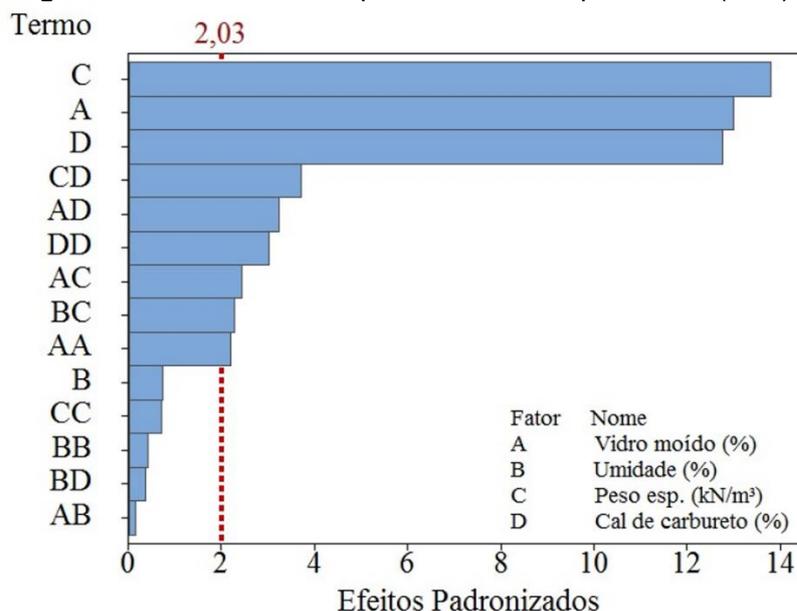
Portanto, sucedeu-se a realização do projeto composto de segunda ordem. A Tabela 4 abaixo, apresenta a análise de variância (ANOVA) referente ao PCSO, contendo todos os fatores controláveis aqui adotados, suas interações quadráticas bem como, as interações entre fatores. Sendo neste caso, adotado uma significância de 5%, ou seja, a chance de se estar cometendo um erro do Tipo 1 é de apenas 5% (MOORE *et al.* 2012). Com isto, os fatores significativos, isto é, aqueles que contém um Valor-P inferior a 5% (0,05), são apresentados em destaque.

Tabela 4 - Regressão Superfície de Resposta: Análise de Variância para RCS (MPa)

Fonte	Valor-P
Modelo	0,000
Blocos	0,777
Linear	0,000
Teor de vidro moído (%)	0,000
Teor de umidade (%)	0,475
Peso Esp. (kN/m³)	0,000
Teor de cal de carbureto (%)	0,000
Quadrado	0,002
Vidro moído (%)*Vidro moído (%)	0,035
Umidade (%)*Umidade (%)	0,675
Peso Esp. (kN/m ³)*Peso Esp. (kN/m ³)	0,491
Cal de carbureto(%)*Cal de carbureto(%)	0,005
Interação com 2 Fatores	0,000
Vidro moído (%)*Umidade (%)	0,880
Vidro moído (%)*Peso Esp. (kN/m³)	0,021
Vidro moído (%)*Cal de carbureto (%)	0,003
Umidade (%)*Peso Esp. (kN/m³)	0,029
Umidade (%)*Cal de carbureto (%)	0,722
Peso Esp. (kN/m³)*Cal de carbureto (%)	0,001

Apesar da significância poder ser detectada através da tabela ANOVA acima, gráficos de Pareto acabam por auxiliar na visualização dos resultados. Assim sendo, a Figura 3 apresenta o que seria o gráfico de Pareto para a variável resposta RCS (MPa). Neste caso, são expostos tanto fatores principais quanto interações onde, aqueles que se mostram estatisticamente significativos, devem cruzar a linha determinada para um nível de significância de 5%, isto é, possuir um $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$.

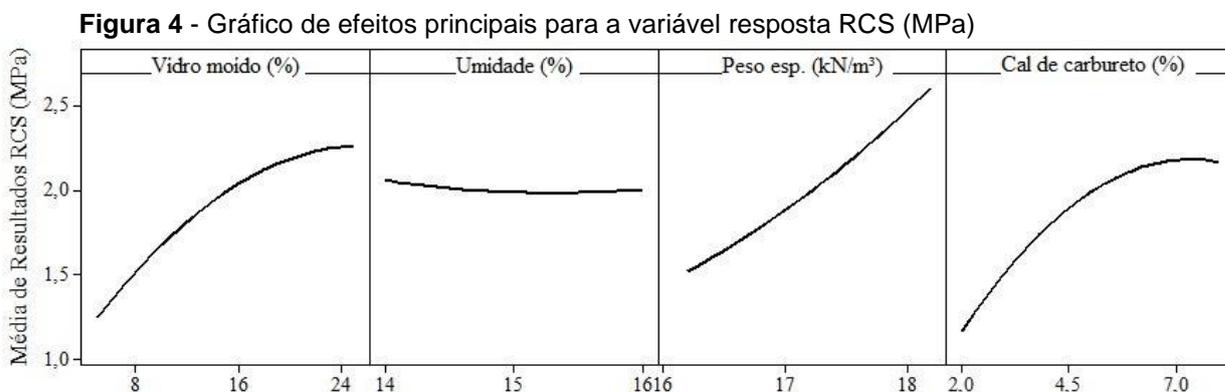
Figura 3 - Gráfico de Pareto para a variável resposta RCS (MPa)



Efeitos principais como peso específico aparente seco (C), teor de vidro moído (A) e teor de cal de carbureto (D) despontam como os efeitos mais significativos. Como se trata de uma estabilização pozolânica, onde o vidro moído e a cal de carbureto são, respectivamente, um precursor e um ativador, é esperado que estes fatores despon-tem como significativos. Ao mesmo tempo, no que diz respeito ao tratamento de solos, sua compactação tende a influenciar significativamente na resistência final das amostras o que é bem demonstrado, por exemplo, por Consoli *et al.* (2016, 2018a; 2018b; 2019a; 2019b e 2020). Onde, amostras com uma menor porosidade tendem a atingir melhores desempenhos mecânicos. Chama-se atenção também, para a não-signifi-cância do efeito principal do fator umidade de moldagem (B), se mostrando signifi-cante apenas, sua interação com o peso específico aparente seco fato este, que é melhor discutido na sequência com auxílio da Figura 5.

A Figura 4, por sua vez, apresenta a modelagem não-linear dos fatores contro-láveis, fato este que não pôde ser explicado por meio da Figura 2 uma vez que a primeira análise dos resultados compreendia tão somente a execução dos pontos fa-toriais propostos. Uma vez adicionados os pontos axiais, é possível perceber que com exceção do teor de umidade de moldagem, todos os demais fatores melhoraram a resistência à compressão do solo ao passo em que passaram para seus níveis altos. Contudo, percebe-se patamares (assíntotas) tanto no caso do vidro moído como no caso da cal de carbureto, podendo ser um indicativo de que teores mais elevados pouco influiriam no aumento da variável resposta. A não significância do teor de

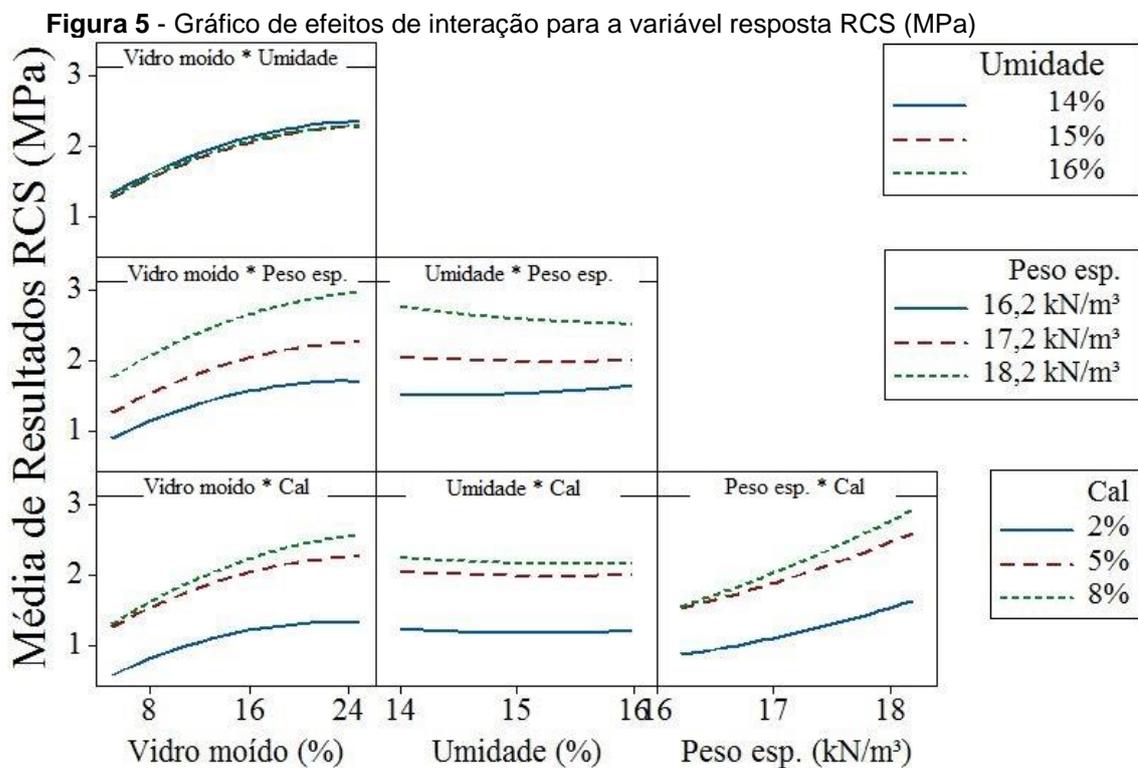
umidade de moldagem pode ser também notada devido a linha praticamente horizontal (*flat*) deste efeito.



Embora a Figura 4 seja de grande valia na visualização da modelagem não-linear dos fatores controláveis, bem como, na verificação de suas significâncias, a determinação do impacto de cada um destes nas misturas deve ser feita por meio de coeficientes codificados, isto porquê, a faixa de variação (alternância dos níveis) de cada fator é diferente (e.g. Vidro moído possui uma faixa de variação de 5 a 25% enquanto que a Cal de carbureto, possui uma faixa de variação de 2 a 8%). Assim sendo, após efetuada esta normalização, os seguintes coeficientes codificados foram encontrados 0,50, -0,02, 0,53, 0,49 para o teor de vidro moído, teor de umidade de moldagem, peso específico aparente seco e teor de cal de carbureto, respectivamente. Com base nestes coeficientes codificados, é possível perceber um maior impacto nas misturas por parte do peso específico aparente seco (0,53), todavia, ambos teores de vidro moído (0,50) e cal de carbureto (0,49) igualmente se apresentam com alto potencial de impacto no que diz respeito a resistência à compressão final das misturas. Enquanto que o teor de umidade de moldagem, como já observado pela Figura 4, apresentou impacto nulo na resistência final, podendo até levar a um decremento desta no caso da adição de teores de umidade muito elevados.

Vale ressaltar ainda, como disposto na Tabela 4, o grande número de interações entre fatores controláveis que apresentaram significância, fato que também pode ser visualizado por meio da Figura 5. Interações como Peso específico x Cal de carbureto, Vidro moído x Cal de Carbureto e, Vidro moído x Peso específico, quando combinados tiveram um efeito potencializador. Do ponto de vista da interação de vidro moído e cal de carbureto com o peso específico, em um primeiro momento, ambos vidro e cal por se tratarem de materiais extremamente finos, podem ter contribuído

para um maior preenchimento dos vazios do solo (efeito filler) resultando com isto, em um melhor contato entre grãos e, por sua vez, uma melhor distribuição das tensões maior capacidade de carga. Já a interação entre vidro moído e cal de carbureto, trata-se da interação dos materiais que compõem o ligante alternativo aqui proposto, uma vez que a cal eleve o pH do meio, é esperado a dissolução do vidro para formação de compostos ligantes hidratados como C-S-H e C-A-H. Por fim, no caso da interação Umidade x Peso específico, um maior teor de umidade não chegou a auxiliar no desenvolvimento de reações pozolânicas. Na verdade, apenas impactou negativamente uma vez que um maior teor de umidade acaba dificultando o alcance do peso específico máximo das misturas.



3.2 Otimização da variável resposta (VR)

Como pôde ser visto, da Tabela 4, dentre todos os efeitos possíveis sejam eles principais, de interação ou quadráticos, alguns deles acabaram por não mostrar significância, ou seja, um Valor-P superior a 0,05. Desta forma, para a otimização da VR e, elaboração do modelo matemático final, estes efeitos não-significativos foram retirados do modelo. Vale salientar, que por se tratar de um modelo hierárquico, por mais

que efeitos principais não venham mostrar significância, estes são ainda mantidos no modelo dado sua hierarquia. Assim, no caso do fator umidade de moldagem (B), este mesmo não sendo significativo, foi mantido no modelo. A partir da retirada de termos não-significativos, o coeficiente de determinação (R^2) e coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajustado}) do modelo, obtiveram os seguintes valores 94,11 e 92,49%, respectivamente. O primeiro indica uma alta capacidade do modelo matemático em explicar o fenômeno aqui estudado, enquanto que o segundo, indica que o modelo proposto não possui termos excedentes (já que houve uma retirada daqueles não-significativos).

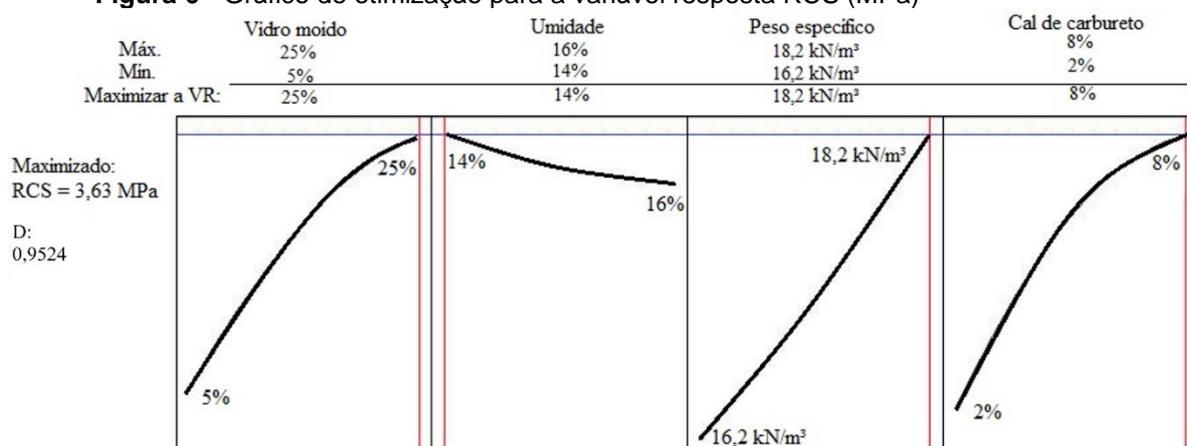
Portanto, com intuito de otimizar a VR resistência à compressão simples, realizou-se com auxílio do software Minitab 18 a otimização da estabilização de solos aqui proposta, isto é, com base na regressão não-linear que compreende a Equação 2, foram determinados os valores dos fatores controláveis que maximizassem a resistência sendo para isto, adotada uma função objetivo do tipo *Desirability*. Além disto, a otimização se deu de forma unilateral, já que se buscava o maior valor de resistência, enquanto que a restrição imposta ao valor mínimo se adequou ao limite inferior estabelecido (*i.e.* 250 kPa). A Equação 2 além de auxiliar no ajuste ótimo, também permite a obtenção de valores intermediários de resistência em uma eventual alternância de teores, sejam eles de vidro moído, cal de carbureto, umidade, ou ainda, valores de peso específico. Desta forma, o operador não fica restrito aos valores fixos aqui estudados, podendo-se utilizar qualquer dosagem dentro da faixa de variação dos materiais (*e.g.* um teor de vidro moído de 10% o qual, se encontra dentro da faixa de variação de 5 a 25%).

$$\begin{aligned}
 \text{RCS (MPa)} = & -26,6 - 0,0841 \text{ Vidro Moído (\%)} + 1,590 \text{ Umidade (\%)} \\
 & + 1,544 \text{ Peso Esp. (kN/m}^3) - 0,460 \text{ Cal Carbureto (\%)} - 0,001980 \text{ Vidro Moído (\%)*Vidro Moído (\%)} \\
 & - 0,0317 \text{ Cal Carbureto (\%)*Cal Carbureto (\%)} \\
 & + 0,00999 \text{ Vidro Moído (\%)*Peso Esp. (kN/m}^3) + 0,00445 \text{ Vidro Moído (\%)*Cal Carbureto (\%)} \\
 & - 0,0941 \text{ Umidade (\%)*Peso Esp. (kN/m}^3) + 0,0509 \text{ Peso Esp. (kN/m}^3) * \text{Cal Carbureto (\%)}
 \end{aligned} \tag{2}$$

A Figura 6, abaixo, apresenta o resultado da otimização do processo. Onde, baseando-se na regressão matemática proposta, a maximização da VR resistência à compressão simples ocorreria com a seguinte mistura: teores de Vidro moído = 25%,

umidade de moldagem = 14%, Peso específico aparente seco = 18,2 kN/m³ e, um teor de Cal de carbureto = 8%, o que resultaria em resistências máximas da ordem de 3,63 MPa. Para esta otimização, um valor de *Desirability* composta (D) igual a 0,9524 foi obtido. Isto indica que o modelo matemático aqui proposto, não foi capaz alcançar o máximo valor de RCS contido aqui nas Tabela 2 e Tabela 3, isto é, de 3,79 MPa, chegando tão somente ao valor de 3,63 MPa como já mencionado. Caso tivesse alcançado este valor máximo, a *Desirability* composta seria igual a unidade.

Figura 6 - Gráfico de otimização para a variável resposta RCS (MPa)



4 CONCLUSÕES

O estudo atual foi realizado com o intuito de se acessar o comportamento mecânico de um solo dispersivo e sulfatado, estes sendo melhorado a partir de adições como vidro moído e cal de carbureto, o que pode se dizer tratar-se em uma estabilização sustentável já que um trata-se de um subproduto enquanto que o outro, um resíduo. Com isto, foi possível chegar as seguintes conclusões:

- Ambos, vidro moído (subproduto da produção de fibras de vidro) e cal de carbureto (resíduo da produção de gás acetileno) apresentaram-se como potenciais alternativas ao tratamento de solos dispersivos e sulfatados, uma vez que exibiram performance adequada do ponto de vista de resistência à compressão não confinada. A utilização de materiais como estes, impacta positivamente através de duas formas, primeiro, reduz o extrativismo de matérias primas naturais e, segundo, ajuda a dispor de maneira correta resíduos que até em tão poderiam ficar mal alocados;

- Resistências à compressão da ordem de 4 MPa foram alcançadas por meio desta estabilização alternativa, demonstrando assim o potencial da mesma na utilização, por exemplo, de bases e sub-bases de rodovias uma vez que atende o limiar estabelecido pela norma DNIT 167/2013-ES que é de 250 kPa;
- A resistência à compressão não confinada se mostrou dependente, nesta ordem, dos fatores peso específico aparente seco, teor de vidro moído e teor de cal de carbureto. O que era de se esperar uma vez que uma menor porosidade das amostras bem como, uma maior quantidade de ligante, isto é, uma maior quantidade de ativador alcalino e precursor pozolânico induzem a maiores resistências;
- O teor de umidade de moldagem não se mostrou significativo para um nível de significância de 5%, entretanto, quando da sua interação com o peso específico aparente seco, este fator veio a reduzir os valores de RCS. Portanto, teores acima da umidade ótima pouco ou nada impactaram no desenvolvimento de reações pozolânicas, sendo aconselhado utilizar-se o valor ótimo para as máximas resistências à compressão.

REFERÊNCIAS

AL-MHAIDIB, A. I. Chapter 19 - Swelling behavior of expansive shale: A case study from Saudi Arabia. **Expansive Soils, Recent Advances in Characterization and Treatment**, Eds. Amer Ali Al-Rawas & Mattheus F.A. Goosen, p. 526, 2006. <https://doi.org/10.1201/9780203968079>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard classification of soils for engineering purposes. **ASTM D2487**. West Conshohocken, PA: ASTM, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). **ASTM D698**. West Conshohocken, PA: ASTM, 2012.

AWAD, M. A. Identification of dispersive clays in Gaza strip area and filter effects on dam safety. *In: FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCOUR OF FOUNDATIONS*, College Station, Texas: Texas Transportation Inst., Publications Dept., USA. **Proceedings [...]**, 2002, p. 471-484. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/100356>

BERGER, E.; LITTLE, D. N.; GRAVES, R. Technical Memorandum: Guidelines for Stabilization of Soils Containing Sulfates. **National Lime Association**, Arlington, Va., p. 16, 2001.

CAREY, B. Understanding dispersive soils. **Queensland, Australia: Queensland Land-care**, p. 240, 2014. Disponível em: < <http://landcare.org.au/resources-links/achieving-soil-conservation-in-queensland/> >. Acesso em: fev. 2019.

CONSOLI, N. C.; QUIÑÓNEZ SAMANIEGO, R. A.; KANAZAWA, N. M. Durability, strength, and stiffness of dispersive clay-lime blends. **J. Mater. Civ. Eng.**, v. 28, no. 11, 04016124, 2016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001632](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001632)

CONSOLI, N. C.; BITTAR MARÍN, E. J.; QUIÑÓNEZ SAMANIEGO, R. A.; HEINECK, K. S.; DALLA ROSA JOHANN, A. Use of sustainable binders in soil stabilization. **J. Mater. Civ. Eng.**, v. 31, no. 2, 06018023, 2018a. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002571](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002571)

CONSOLI, N. C.; WINTER, D.; LEON, H. B.; SCHEUERMANN FILHO, H. C. Durability, strength, and stiffness of green stabilized sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v. 144, no. 9, 04018057, 2018b. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001928](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001928)

CONSOLI, N. C.; BITTAR MARÍN, E. J.; QUIÑÓNEZ SAMANIEGO, R. A.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MIRANDA, T.; CRISTELO, N. The effect of mellowing and coal fly ash addition on the behavior of sulfate-rich dispersive clay after lime stabilization. **J. Mater. Civ. Eng.**, v. 31, no. 6, 04019071, 2019a. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002699](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002699)

CONSOLI, N. C.; CARRETTA, M. S.; LEON, H. B.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; TOMASI, L. F. Strength and stiffness of ground waste glass-carbide lime blends. **J. Mater. Civ. Eng.**, v. 31, no. 10, 06019010, 2019b. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002862](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002862)

CONSOLI, N. C.; FESTUGATO, L.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MIGUEL, G. D.; TEBCHRANI NETO, A.; ANDREGHETTO, D. Durability Assessment of Soil-Pozzolan-Lime Blends through Ultrasonic-Pulse Velocity Test. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, no. 8, p. 04020223, 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003298](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003298)

DERMATAS, D. Ettringite-induced swelling in soils: State-of-the-art. **Appl. Mech. Rev.**, v. 48, no. 10, pp. 659-673, 1995. <https://doi.org/10.1115/1.3005046>

HARRIS, P.; SCULLION, T.; SEBESTA, S. Report 0-4240-2: Hydrated lime stabilization of sulfate-bearing soils in Texas. **Texas Department of Transportation: Texas Transportation Institute and Federal Highway Administration**, Project 0-4240, Texas, US, p. 36, 2004a. <https://doi.org/10.3141/1868-04>

HARRIS, P.; SEBESTA, S.; SCULLION, T. Hydrated Lime Stabilization of Sulfate-Bearing Vertisols in Texas. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, No. 1868, Washington D.C., pp. 31-39, 2004b. <https://doi.org/10.1520/STP26990S>

HARRIS, P.; HOLDT, J. V.; SEBESTA, S.; SCULLION, T. Report 0-4240-3: Recommendations for stabilization of high-sulfate soils in Texas. **Texas Department of Transportation: Texas Transportation Institute and Federal Highway Administration**, Project 0-4240, Texas, US, p. 52, 2005.

HOLMGREN, G. G. S.; FLANAGAN, C. P. Factors affecting spontaneous dispersion of soil materials as evidenced by the crumb test. **Dispersive Clays, Related Piping, and**

Erosion in Geotechnical Projects, ASTM STP 623, Eds. J. L. Sherard and R. S. Decker, American Society for Testing and Materials, pp. 218-239, 1977.
<https://doi.org/10.1520/STP26990S>

HOYOS, L. R.; LAIKRAM, A.; PUPPALA, A. J. Chapter 33 - Assessment of seasonal effects on engineering behavior of chemically treated sulfate-rich expansive clay. **Expansive Soils, Recent Advances in Characterization and Treatment**, Eds. Amer Ali Al-Rawas & Mattheus F.A. Goosen, p. 526, 2006a. <https://doi.org/10.1201/9780203968079>

HOYOS, L. R.; CHAINUWAT, P.; PUPPALA, A. J. Chapter 32 - Dynamic characterization of chemically modified expansive soil. **Expansive Soils, Recent Advances in Characterization and Treatment**, Eds. Amer Ali Al-Rawas & Mattheus F.A. Goosen, p. 526, 2006b. <https://doi.org/10.1201/9780203968079>

HUNTER, D. Lime-induced heave in sulfate-bearing clay soils. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 114, no. 2, pp. 150-167, 1988. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1988\)114:2\(150\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1988)114:2(150))

KNOPP, J.; MOORMANN, C. Ettringite swelling in the treatment of sulfate-containing soils used as subgrade for road constructions. *In: 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPORTATION GEOTECHNICS (ICTG 2016)*, Guimarães, Portugal. **Proceedings [...]**. v. 143, pp. 128-137, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.017>

KOTA, P. B. V. S.; HAZLETT, D.; PERRIN, L. Sulfate-bearing soils: Problems with calcium-based stabilizers. **Transportation Research Record**, v. 1546, no. 1, pp. 62-69, 1996. <https://doi.org/10.1177/0361198196154600107>.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. *Soil Mechanics, SI Version*. John Wiley & Sons Inc., New York, p. 553, 1979. ISBN-13: 978-0471022619

LITTLE, D. N.; NAIR, S. Recommended practice for stabilization of sulfate-rich subgrade soils – Document 145. **American Association of State Highway and Transportation (AASHTO)**, Transportation Research Board (TRB): The National Academies: National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), United States, p. 54, 2009. <https://doi.org/10.17226/22997>

MIGUEL, G. D. **Desempenho e Comportamento Mecânico de Um Solo Dispersivo e Sulfatado Tratado com uma Pozolana Artificial, Cal de Carbureto e Reforçado com Fibras de Vidro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, p. 189, 2020.

MIGUEL, G. D.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; FESTUGATO, L.; CORTE, M. B. Discussion of “Cement, Lime, and Fly Ashes in Stabilizing Expansive Soils: Performance Evaluation and Comparison” by Masrur Mahedi; Bora Cetin; and David J. White. **Journal of Materials in Civil Engineering**, (aceito para publicação), 2020.

MITCHELL, J. K.; DERMATAS, D. Clay soil heave caused by lime-sulfate reactions. **Innovations and Uses for Lime**, ASTM STP 1135, D. Walker, Jr., T. Hardy, D. Hoffman, and D. Stanley, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 41-64, 1992. <https://doi.org/10.1520/STP15529S>

MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons, INC., 7th ed., United States of America, p. 684, 2008. ISBN-13: 978-1118146927
MOORE, D. S., Mc CABE, G. P.; CRAIG, B. A. *Introduction to the practice of statistics*, seventh ed., W H Freeman & Co., New York, 2012. ISBN-13: 978-1319153977

- LADD, R. S. Preparing test specimens using under-compaction. **Geotech. Test. J.**, v. 1, no. 1, 16–23, 1978. <https://doi.org/10.1520/GTJ10364J>
- PUNTHUTAECHA, K.; PUPALLA, A. J.; VANAPALLI, S. K.; INYANG, H. Volume change behaviors of expansive soils stabilized with recycled ashes and fibers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 18, no. 2, pp. 295-306, 2006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:2\(295\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:2(295))
- PUPPALA, A. J.; MUSENDA, C. Effects of fiber reinforced on strength and volume change in expansive soils. **Transportation Research Record**, 1736, no. 00-07 16, pp. 134-140, 2000. <https://doi.org/10.3141/1736-17>
- PUPPALA, A. J.; WATTANASANTICHAROEN, E.; PUNTHUTAECHA, K. Experimental evaluation of stabilization methods for sulphate-rich expansive soils. **Ground Improvement**, v. 7, no. 1, pp. 25-35, 2003. <https://doi.org/10.1680/grim.2003.7.1.25>
- PUPPALA, A. J.; KATHA, B.; HOYOS, L. R. Volumetric shrinkage strain measurements in expansive soils using digital imaging technology. **Geotechnical Testing Journal**, ASTM, v. 27, no. 6, pp. 547-556, 2004. <https://doi.org/10.1520/GTJ12069>
- PUPPALA, A. J.; WATTANASANTICHAROEN, E.; PORBAHA, A. Chapter 24 - Combined lime and polypropylene fiber stabilization for modification of expansive soils. **Expansive Soils, Recent Advances in Characterization and Treatment**, Eds. Amer Ali Al-Rawas & Mattheus F.A. Goosen, p. 526, 2006. <https://doi.org/10.1201/9780203968079>
- PUPPALA, A. J.; CERATO, A. Heave distress problems in chemically-treated sulfate-laden materials. **Geo-Strata: Engineering Geology**, United States, pp. 28-32, 2009.
- PUPPALA, A. J.; TALLURI, N.; GAILY, A.; BHASKAR, C. C. S. Heaving mechanics in high sulfate soils. *In: 18th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING*, Paris, França. **Proceedings [...]**. pp. 3125-3128, 2013.
- PUPPALA, A. J.; CONGRESS, S. S. C.; TALLURI, N., WATTANASANTICHAROEN, E. Sulfate-heaving studies on chemically treated sulfate-rich geomaterials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, no. 6, p. 9, 2019a. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002729](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002729).
- PUPPALA, A. J.; CONGRESS, S. S. C.; BANERJEE, A. Research advancements in expansive soil characterization, Stabilization and Geoinfraestructure Monitoring. *In: FRONTIERS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING. DEVELOPMENTS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING*. SPRINGER, Singapore. **Proceedings [...]**. p. 15-29, 2019b. https://doi.org/10.1007/978-981-13-5871-5_2
- QUIÑONEZ SAMANIEGO, R. A. **Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, p. 169, 2015.
- RAJA, P. S. K.; THYAGARAJ, T. Effect of sulfate contamination on compaction and strength behavior of lime treated expansive soil. *In: RECENT ADVANCES ON EXPANSIVE SOILS, 2nd GEOMEAST INTERNATIONAL CONGRESS AND EXHIBITION ON SUSTAINABLE CIVIL INFRASTRUCTURES*, SSIGE, Egypt. **Proceedings [...]**. pp. 15-27, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01914-3_2.

ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING, S.; ROFF, T. E. J. Lime modification of clay soils for construction expediency. **Proc., Inst. Civ. Eng. - Geotech. Eng.**, v. 125, no. 4, pp. 242–249, 1997. <https://doi.org/10.1680/igeng.1997.29660>

ROY, A.; WANG, L.; SEALS, R. K.; METCALF, J. B. Stabilization techniques for reactive aggregates in soil-cement base course. **Louisiana Department of Transportation and Development**, Louisiana Transportation Research Center, Technical Report No. FHWA/LA. 03/366, p. 69, 2003.

SCHEUERMANN FILHO, H. C. **Dispersive Soil Stabilization with Ground Glass and Carbide Lime**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, p. 189, 2019.

SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MIGUEL, G. D.; FESTUGATO, L.; CORTE, M. B. Discussion of “Suppressing Ettringite-Induced Swelling of Gypseous Soil by Using Magnesia-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag” by Wentao Li, Yaolin Yi, and Anand J. Puppala. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, (aceito para publicação), 2020.

SCHLORHOLTZ, S.; DEMERIAL, T. Quick lime-gypsum interactions in stabilized soil bases for concrete highways. **Cement and Concrete Research**, v. 14, pp. 529-532, 1984. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(84\)90129-7](https://doi.org/10.1016/0008-8846(84)90129-7)

SHARMA, H. D.; REDDY, K. R. *Geoenvironmental Engineering: Site Remediation, Waste Containment, and Emerging Waste Management Technologies*. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, p. 986, 2004. ISBN: 978-0-471-21599-8

SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P.; DECKER, R. S. Some engineering problems with dispersive clays. **Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects**, ASTM STP 623, J. L. Sherard and R. S. Decker, Eds., American Society for Testing and Materials, pp. 3-12, 1977. <https://doi.org/10.1520/STP26975S>

SHERWOOD, P. T. Effect of sulfate on cement and lime-stabilized soils. *In: 41st ANNUAL MEETING OF THE HIGHWAY RESEARCH BOARD*. Washington DC, United States, pp. 98-107, 1962.

SINGH, N.; VYAS, S.; CHITRA, R.; ANAND, B. Characterization of dispersive soils – A comparative evaluation between available tests. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, v. 4, no. 12, pp. 12908-12918, 2015. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2015.0412159>

TALLURI, N. **Stabilization of high sulfate soils**. Doctoral Dissertation (Doctor of Philosophy) – Faculty of the Graduate School, University of Texas at Arlington (UT Arlington), Arlington, US, 2013.

TALLURI, N.; PUPPALA, A. J.; CHITTOORI, B. C. S.; GAILY, A. H., HARRIS, P. Stabilization of high-sulfate soils by extended mellowing. **Transportations Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington D.C., pp. 96-104, 2013. <https://doi.org/10.3141/2363-11>.

TUNCER, E. R.; ORDEMIR, I. M.; OUD, M. Soil susceptibility to dispersion. **International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)**, pp. 2115- 2118, 1989. Disponível em: https://www.issmge.org/uploads/publications/1/33/1989_03_0143.pdf. Acesso em: fev. 2019.

UMESH, T. S.; DINESH, S. V.; SIVAPULLAIAH, P. V. Characterization of dispersive soils. **Materials Sciences and Applications**, v. 2, pp. 629-633, 2011. <https://doi.org/10.4236/msa.2011.26085>

VACHER, C. A.; LOCH, R. J.; RAINE, S. R. Identification and management of dispersive mine spoils. **Australian Centre for Mining Environmental Research**, Landloch Pty Ltd, p. 84, 2004.

VAKILI, A. H.; SELAMET, M. R.; MOAYEDI, H.; AMANI, H. Stabilization of dispersive soils by pozzolan. *In*: SIXTH CONGRESS ON FORENSIC ENGINEERING 2012: GATEWAY TO A SAFER TOMORROW, ASCE, San Francisco: California, US. **Proceedings [...]**. p. 726-735, 2013. <https://doi.org/10.1061/9780784412640.077>