



## 26° Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

### PRODUÇÃO DE PÓ DE VIDRO MOÍDO A PARTIR DE RESÍDUOS PARA APLICAÇÃO EM OBRAS DE INFRAESTRUTURA

*Lucas Eduardo Dornelles<sup>1</sup>; Bethania Machado Correa<sup>1</sup>*

#### RESUMO

Em um contexto de desenvolvimento sustentável, a utilização de materiais alternativos para o melhoramento de solos em obras de infraestrutura tem se mostrado uma excelente alternativa. Neste panorama, este trabalho teve como objetivo a produção de pó de vidro moído obtido a partir de resíduos, visando a sua aplicação como material cimentante em camadas de solos de obras de infraestrutura. O pó de vidro pode ser obtido a partir dos processos de moagem, trituração e peneiramento de vidro de descartes, como garrafas não-retornáveis e vidros planos. No estudo, optou-se pela avaliação da estabilização de um solo residual argiloso com o uso de pó de vidro moído e adição de cal de carbureto, resíduo gerado na produção industrial do gás acetileno. O pó de vidro foi produzido a partir de vidro de garrafas não retornáveis. Em laboratório, corpos-de-prova foram moldados com as adições e posteriormente ensaiados no ensaio de compressão diametral. A partir dos resultados obtidos, foi possível identificar que a utilização do pó de vidro, aliado a adição de cal de carbureto, permite a obtenção de materiais mais resistentes. Assim, conclui-se que a estabilização de solos com resíduos, como o pó de vidro moído, é uma alternativa viável para diversas obras de infraestrutura, como camadas de suporte para fundações de obras de arte especiais, proteção de taludes rodoviários e em camadas de pavimentos rodoviários e ferroviários.

**PALAVRAS-CHAVE:** pó de vidro; melhoramento; infraestrutura; desenvolvimento sustentável.

#### ABSTRACT

In a context of sustainable development, the use of alternative materials for soil improvement in infrastructure works has proven to be an excellent alternative. In this context, this paper aimed to produce ground glass powder obtained from waste, aiming for its application as a cementing material in layers of soil in infrastructure works. Glass powder can be obtained from the processes of grinding, crushing and sieving waste glass, such as non-returnable bottles and flat glass. In the study, it was decided to evaluate the stabilization of a clayey residual soil with the use of ground glass powder and the addition of carbide lime, a residue generated in the industrial production of acetylene gas. The glass powder was produced from non-returnable bottles. In the laboratory, specimens were molded with the additions and subsequently tested in the diametral compression test. From the results obtained, it was possible to identify that the use of ground glass powder, combined with the addition of carbide lime, allows the production of more resistant materials. Thus, it is concluded that the stabilization of soils with waste, such as ground glass powder, is a viable alternative for various infrastructure works, such as support layers for foundations of special works of art, protection of road embankments and in layers of road and railway pavements.

**KEY WORDS:** ground glass powder; improvement, infrastructure, sustainable development.

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), lucascivilufsm@gmail.com; bethania.correa@ufrgs.br



## INTRODUÇÃO

A presença de solos com condições geotécnicas desfavoráveis, como solos expansivos, solos colapsíveis e solos com baixa capacidade de suporte, demanda a adoção de técnicas de engenharia especiais para implantação de obras rodoviárias nestas regiões. Em tais condições desfavoráveis, é necessário adotar técnicas que permitam a melhoria das propriedades dos materiais, sejam elas físicas, químicas ou mecânicas (Cristelo, 2001).

O melhoramento químico dos materiais é comumente feito com a adoção de produtos convencionais como cimento Portland e cales comerciais. Porém, sabe-se que a produção industrial destes resulta em elevadas emissões de gases de efeito estufa, alto consumo energético e dependência de extração mineral.

Em um contexto de desenvolvimento sustentável, a utilização de materiais alternativos para o melhoramento de solos em obras de infraestrutura tem se mostrado uma excelente alternativa. Além da redução do consumo de recursos naturais não-renováveis e substituição de produtos como o cimento Portland, este desenvolvimento também permite dar uma destinação nobre a materiais que seriam descartados ou depositados em aterros.

Scheuermann Filho (2019) relata algumas aplicações do vidro, como na substituição parcial e/ou total de agregados finos em concreto com cimento Portland, incorporação de vidro moído em misturas de concreto asfáltico como agregado e/ou material de preenchimento (*filler*), aplicação de pó de vidro em misturas com materiais pétreos para bases e sub-bases de pavimentos, entre outros.

Neste panorama, este trabalho teve como objetivo a produção de pó de vidro moído obtido a partir de resíduos, visando a sua aplicação como material cimentante em camadas de solos em obras de infraestrutura. O pó de vidro pode ser obtido a partir dos processos de moagem, trituração e peneiramento de vidro de descartes, como garrafas não-retornáveis e vidros planos.

Optou-se pela avaliação da estabilização de um solo residual argiloso com o uso de pó de vidro moído e adição de cal de carbureto, resíduo gerado na produção industrial do gás acetileno que apresenta hidróxido de cálcio em sua composição. Em virtude da disponibilidade de sílica em estado amorfo em sua composição, o pó de vidro apresenta uma atividade pozolânica.

Ao ser finamente moída e na presença de água, a sílica tem o potencial de reagir com o hidróxido de cálcio da cal de carbureto e formar compostos cimentantes. As reações que ocorrem neste processo são denominadas reações pozolânica, e elas permitem o desenvolvimento de materiais com melhores resistências, rigidezes e durabilidades.

Bilondi et al. (2018) estudaram a utilização de cal de carbureto na estabilização de solos argilosos em misturas com adições de pó de vidro. Foi identificada uma tendência de aumento da resistência à compressão simples com o aumento do tempo de cura até o período de 28 dias. Além disso, o aumento da temperatura de cura também refletiu em um ganho de resistência para os períodos de sete e 28 dias de cura, se mostrando menos efetivo para os períodos maiores.

Assim, dentro de uma visão de desenvolvimento econômico, ambiental e social, aliado a adoção de práticas e materiais mais sustentáveis, a estabilização de solos com resíduos, como o pó de vidro moído, pode ser uma alternativa viável para diversas obras de infraestrutura, como camadas de suporte para fundações de obras de arte especiais, proteção de taludes rodoviários e em camadas de pavimentos rodoviários e ferroviários.

## METODOLOGIA

Inicialmente, são apresentadas as características dos materiais utilizados no estudo, quais sejam, o solo argiloso, o pó de vidro moído e a cal de carbureto, e suas características avaliadas através de



ensaios de laboratório. Além disso, enfatiza-se o método utilizado para a produção do pó de vidro moído em laboratório.

### Pó de vidro

O objetivo principal do estudo foi a produção de pó de vidro moído para aplicação em obras de infraestrutura. Inicialmente, de modo a se ter um material padronizado, optou-se por utilizar vidro proveniente somente de garrafas de cor verde, do tipo não retornáveis. Todas as garrafas foram coletadas na Central de Descarte de Vidros do município de Ijuí/RS. Após a coleta, as garrafas foram lavadas com água e sabão neutro, e posteriormente passaram por secagem ao ar.

O processo de trituração e moagem das garrafas para a obtenção do pó de vidro foi desenvolvido no Laboratório de Tecnologias da Construção (LATEC) da Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES. De modo a se obter um material com o maior nível de homogeneidade possível, seguiu-se um procedimento padronizado, conforme descrito a seguir.

Inicialmente, as garrafas foram grosseiramente quebradas com o auxílio de um martelo, de modo a se produzir cacos de vidro. Na sequência, os cacos foram triturados em um britador de mandíbulas. O material produzido nesta etapa foi separado em frações de 1,5 kg para ciclagem no moinho de bolas metálicas, com número de giros variando entre 1500 e 2000. Manteve-se constante o número e o tamanho das bolas metálicas utilizadas em cada ciclo de moagem. A Figura 1 mostra os equipamentos utilizados na produção do pó de vidro.



Figura 1. Equipamentos utilizados na trituração e moagem do vidro (AUTORES, 2024).

Após a moagem no moinho de bolas, o material resultante desta etapa do processo foi peneirado até a fração que foi utilizada no estudo, qual seja, o material passante na peneira de malha número 200 (diâmetro das partículas inferior a 0,075mm). O peneiramento resultou em um rendimento entre 30 e 40%, ou seja, cada amostra de 1,5 kg submetida ao processo de moagem resultou em cerca de 500g de material passante na peneira de número 200. A Figura 2 apresenta o aspecto do pó de vidro passante na peneira de número 200.



Figura 2. Pó de vidro moído passante na peneira 200 (AUTORES, 2024).

A Figura 3 apresenta a distribuição granulométrica obtida para o pó de vidro através do método da granulometria a laser e a Tabela 1 mostra algumas das características físicas do pó de vidro moído, assim como as frações granulométricas obtidas.

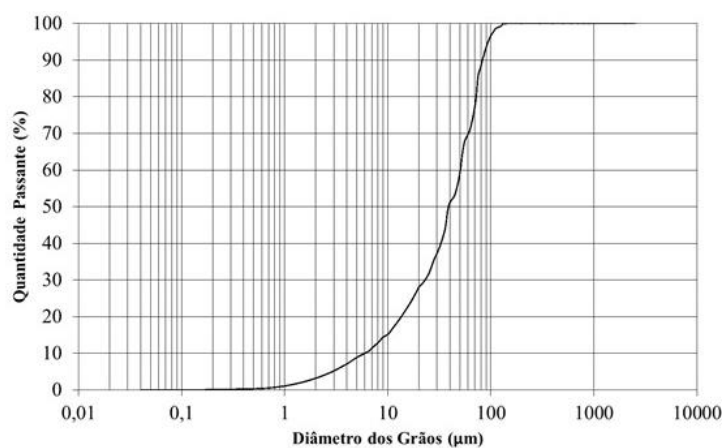


Figura 3. Distribuição granulométrica do pó de vidro moído (AUTORES, 2024).

Tabela 1. Características físicas do pó de vidro moído (AUTORES, 2024).

| Característica                      | Resultado               | Normativa/Método |
|-------------------------------------|-------------------------|------------------|
| Peso específico real dos grãos (Gs) | 2,35 g/cm <sup>3</sup>  | ABNT NBR 6508    |
| Superfície específica (SSA)         | 4,821 m <sup>2</sup> /g | Análise BET      |
| pH                                  | 10,39                   | ASTM D4972       |
| % Passante na peneira #200          | 100%                    |                  |
| % Silte (0,002 < d < 0,06mm)        | 97%                     | ABNT NBR 7181    |
| % Argila (d < 0,002mm)              | 3%                      |                  |



O valor de superfície específica do pó de vidro (SSA), obtido a partir da análise BET, é de 4,821 m<sup>2</sup>/g. Sales (2014) obteve valores próximos para o pó de vidro em seu estudo, isto é, 5,23 m<sup>2</sup>/g para o pó de vidro oriundo de vidro incolor e 3,06 m<sup>2</sup>/g para o oriundo do vidro âmbar. Scheuermann Filho (2019), ao estudar pó de vidro obtido a partir de garrafas comuns de cor marrom obteve um valor de superfície específica de 5,45 m<sup>2</sup>/g. Os valores obtidos, em todos casos supracitados, são superiores aos que enquadrariam o material como uma pozolana reativa, conforme indicado por Sales (2014).

Também foi realizado o ensaio de Difração de Raios-X (DRX) do pó de vidro. Não foram identificadas fases minerais, indicando a inexistência de uma estrutura bem definida. Assim, é possível caracterizar o material como altamente amorfo.

### Solo Argiloso

O solo utilizado neste estudo foi coletado às margens da RS-342, km 120, entre os municípios de Ijuí e Boa Vista do Cadeado, no noroeste do estado do Rio Grande do Sul. Após a coleta do material em campo, foram realizados em laboratório os ensaios de caracterização física e mecânica do solo. São eles a análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, Limites de Atterberg, peso específico real dos grãos, compactação e Índice de Suporte Califórnia (ISC), além dos ensaios classificatórios da metodologia MCT. A Tabela 2 apresenta um resumo das características do solo estudado.

Tabela 2. Características do solo estudado (AUTORES, 2024).

| Característica                      | Resultado              | Normativa utilizada |
|-------------------------------------|------------------------|---------------------|
| Limite de Liquidez (LL)             | 79                     | ABNT NBR 6459       |
| Limite de Plasticidade (LP)         | 60                     | ABNT NBR 7180       |
| Índice de Plasticidade (IP)         | 19                     | -                   |
| Peso específico real dos grãos (Gs) | 2,89 g/cm <sup>3</sup> | ABNT NBR 6508       |
| % Areia média                       | 10%                    | ABNT NBR 6502       |
| % Areia fina (0,06 < d < 0,2mm)     | 10%                    |                     |
| % Silte (0,002 < d < 0,06mm)        | 37%                    |                     |
| % Argila (d < 0,002mm)              | 43%                    |                     |
| Classificação SUCS                  | CH                     | -                   |
| Classificação TRB                   | A-7-5                  | -                   |
| Classificação MCT                   | NG'                    | -                   |
| Índice de Suporte Califórnia (%)    | 5,2 (Energia normal)   | ABNT NBR 9598       |
| Expansão (%)                        | 2,21 (Energia normal)  |                     |

De acordo com o sistema da *Transportation Research Board* (TRB) o solo é enquadrado como um solo argiloso do subgrupo A-7-5, enquanto que conforme o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o solo estudado é classificado como um CH, ou seja, uma argila inorgânica de alta plasticidade. Estas classificações agrupam materiais que podem ser altamente elásticos e sujeitos a elevadas mudanças de volume. Além disso, são enquadrados como materiais de fraco a pobre



comportamento quando utilizados como subleito rodoviário. Os valores de ISC e expansão também indicam que o solo não é indicado para utilização em subleitos rodoviários.

Em adição, ao se classificar o solo pela metodologia MCT, de Nogami e Villibor (1981), conclui-se que o solo apresenta com comportamento não laterítico (NG'). Solos deste tipo (Classe N) apresentam, de uma forma geral, valores de capacidade de suporte abaixo dos índices classificatórios tradicionais, além de poderem apresentar altos valores de expansão. Mais que isso, são geralmente erodíveis e possuem baixos valores de ISC e módulo resiliente, de modo que são considerados inadequados para uso em pavimentação.

Desta forma, tantos os sistemas tradicionais de classificação quanto a metodologia MCT indicam que o solo não é recomendado para utilização em camadas de pavimentos rodoviários, o que reforça a necessidade de adoção de técnicas para melhoria de suas propriedades.

### Cal de carbureto

A cal de carbureto utilizada na pesquisa é um resíduo da produção de gás acetileno de uma indústria de Esteio/RS, região metropolitana de Porto Alegre. O material foi coletado em um estado úmido e com consistência aquosa (umidade entre 48 e 80%). Por isso, passou por secagem a 50° C por dois a três dias antes de sua utilização. Em seguida, o material foi destorroado e passado em peneira de malha #100 ( $d < 0,149\text{mm}$ ), de modo a se obter um material com um bom nível de uniformidade. A Tabela 3 apresenta as propriedades físicas do material estudado em laboratório.

Tabela 3: Características da cal de carbureto (AUTORES, 2024).

| Característica                             | Resultado               | Normativa/método      |
|--------------------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Peso específico real dos grãos (Gs)        | 2,19 g/cm <sup>3</sup>  | ABNT NBR 6508         |
| Superfície específica (SSA)                | 22,60 m <sup>2</sup> /g | Análise BET           |
| pH                                         | 12,4                    | ASTM D4972            |
| % Areia fina ( $0,06 < d < 0,2\text{mm}$ ) | 10%                     | Granulometria a laser |
| % Silte ( $0,002 < d < 0,06\text{mm}$ )    | 83%                     |                       |
| % Argila ( $d < 0,002\text{mm}$ )          | 7%                      |                       |

De modo a se atender ao principal objetivo do estudo, qual seja, a avaliação da efetividade da produção de pó de vidro moído para melhoramento de solos visando aplicação em obras de infraestrutura, definiu-se o programa experimental do estudo. A metodologia do estudo pode ser sintetizada como a estabilização de um solo residual argiloso com adições de diferentes teores de pó de vidro moído e cal de carbureto, estudadas em misturas com diferentes pesos específicos secos, tempos e temperaturas de cura. A estabilização do solo foi avaliada através da realização de ensaios de compressão diametral.

### Programa experimental

Foram definidas oito misturas diferentes a serem estudadas, conforme a Tabela 4. Elas foram avaliadas em dois tempos de cura (sete e 28 dias) e em duas temperaturas de cura (23°C e 40°C).



Tabela 4. Misturas utilizadas no estudo (AUTORES, 2024).

| Mistura | Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> ) | Teor de pó de vidro (%) | Teor de cal (%) |
|---------|----------------------------------------------------|-------------------------|-----------------|
| 1       | 13                                                 | 10                      | 3               |
| 2       | 15                                                 | 10                      | 3               |
| 3       | 13                                                 | 30                      | 3               |
| 4       | 15                                                 | 30                      | 3               |
| 5       | 13                                                 | 10                      | 7               |
| 6       | 15                                                 | 10                      | 7               |
| 7       | 13                                                 | 30                      | 7               |
| 8       | 15                                                 | 30                      | 7               |

Em solos argilosos com adição de pozolana e cal, com a devida hidratação, o aumento no teor de pozolana resulta em uma disponibilidade imediata de sílica e/ou alumina. Assim, há uma maior formação de compostos cimentantes em um prazo menor, em comparação à solos em que há somente adição de cal. As quantidades usuais de pozolanas utilizadas, em relação à massa seca de solo, variam entre 10 e 40%. Neste estudo, foram definidos os teores de pó de vidro moído de 10 e 30% em relação à massa seca total das misturas.

O teor mínimo de cal foi determinado a partir do método do ICL (*Initial Consumption of Lime*), proposto por Rogers et al. (1997). O método consiste na adição de teores crescentes de cal na mistura, com medições da variação de pH. Define-se como teor mínimo de cal aquele que leva a um valor máximo e constante de pH, que indica o teor de cal necessário para o início das reações pozolânicas. Neste estudo, o valor encontrado foi de 3%.

Os valores de porosidade das misturas, controlados a partir dos pesos específicos aparentes secos ( $\gamma_d$ ) e umidades de moldagem foram definidos de acordo com a curva de compactação do solo (valores de  $\gamma_d$  entre 13 kN/m<sup>3</sup> e 15 kN/m<sup>3</sup> e teores de umidade de moldagem entre 28 e 30%). Por fim, optou-se pela cura acelerada através do aumento da temperatura das amostras em função das reações pozolânicas serem consideravelmente lentas. Por isso, foram estabelecidas duas temperaturas de cura (23° C e 40° C).

### Moldagem dos corpos de prova

Em laboratório, os corpos de prova foram elaborados através dos procedimentos de pesagem, mistura, compactação estática, desmoldagem, armazenamento e cura. A compactação da amostra é feita de forma estática, em três camadas, no interior de um molde metálico tripartido devidamente lubrificado, conforme a Figura 4. O molde apresenta as dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Durante o período de cura, as amostras curadas a temperatura de 23° C foram colocadas em uma câmara úmida, e as amostras curadas a 40° C foram seladas em uma embalagem hermética e imersas em água com esta temperatura.



Figura 4. Molde tripartido utilizado para moldagem de corpos-de-prova (AUTORES, 2024).

### Ensaio de compressão diametral

Os ensaios de compressão diametral foram realizados de acordo com a normativa norte-americana ASTM C496 (ASTM, 2017). Utilizou-se uma prensa automática com deslocamento controlado, mostrada na Figura 5. Antes da ruptura, os corpos-de-prova foram submetidos a imersão em água por 24h, na mesma temperatura utilizada para a cura. Deste modo, minimizaram-se eventuais efeitos da sucção. Este procedimento também é utilizado para avaliar a ocorrência de reações que promovam algum tipo de cimentação nas misturas. Caso a cimentação ocorrida não tivesse sido suficiente, provavelmente o corpo-de-prova seria dissolvido na água. Por este motivo, não foram moldadas amostras de solo sem nenhuma adição.

Após o período mínimo de 24h em imersão, cada amostra foi submetida ao ensaio de pulso ultrassônico, que será apresentado no item a seguir. Após, cada espécime foi submetido ao ensaio de compressão diametral.



Figura 5. Ensaio de compressão diametral (AUTORES, 2024)



## RESULTADOS E ANÁLISES

### Resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios de compressão diametral foram realizados para misturas com pesos específicos aparentes secos de 13,0 kN/m<sup>3</sup> e 15 kN/m<sup>3</sup>, com teores de pó de vidro de 10% e 30% e teores de cal de carbureto de 3% e 7%. Ainda, utilizaram-se os tempos de cura de sete e 28 dias e temperaturas de cura de 23°C e 40°C. Os resultados médios obtidos para as triplicatas estão apresentados na Tabela 5. As Figuras 6 e 7 ilustram estes valores. O valor máximo de  $q_t$  foi 594,68 kPa, para a amostra 8A, curada a 40°C por 28 dias.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral ( $q_t$ ) em kPa (AUTORES, 2024).

| Mistura | Sete dias de cura |        | 28 dias de cura |        |
|---------|-------------------|--------|-----------------|--------|
|         | 23°C              | 40°C   | 23°C            | 40°C   |
| 1A      | 7,41              | 20,12  | 25,30           | 17,44  |
| 2A      | 44,99             | 70,02  | 56,74           | 159,87 |
| 3A      | 6,98              | 41,43  | 25,45           | 77,06  |
| 4A      | 51,67             | 83,05  | 70,09           | 256,78 |
| 5A      | 12,38             | 88,56  | 80,77           | 181,76 |
| 6A      | 47,78             | 284,83 | 188,93          | 492,78 |
| 7A      | 26,58             | 164,58 | 144,54          | 328,78 |
| 8A      | 104,89            | 394,65 | 336,75          | 594,68 |

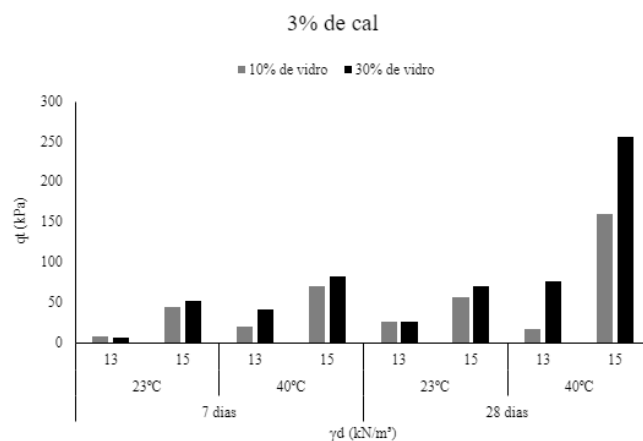


Figura 6. Variação da RTCD ( $q_t$ ) em função dos diferentes parâmetros para 3% de cal (AUTORES, 2024).

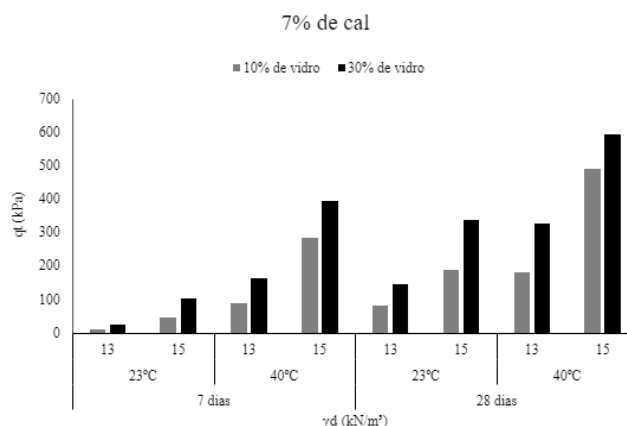


Figura 7. Variação da RTCD ( $q_t$ ) em função dos diferentes parâmetros para 7% de cal (AUTORES, 2024).

A partir dos resultados exibidos nos gráficos e nas figuras, é possível identificar que a resistência aumenta com a elevação do teor de cal de carbureto, conforme já havia sido identificado por Saldanha (2014). Isso indica que teores de cal inferiores à 7% não são suficientes para a obtenção das maiores resistências. Todavia, um maior tempo de cura pode ser necessário para que essa hipótese seja confirmada, uma vez que parte do hidróxido de cálcio excedente pode ainda não ter reagido com a cal no período de 28 dias.

De forma análoga, identifica-se também a elevação dos valores de  $q_t$  com o aumento do peso específico aparente seco e consequente redução da porosidade das misturas. Independentemente da quantidade de cal utilizada, a redução na porosidade do material promove ganhos consideráveis de resistência. Esse efeito é explicado, em parte, pelo maior intertravamento entre as partículas do solo em virtude da maior área de contato para o desenvolvimento das reações no sistema e pela maior compacidade da mistura.

Por outro lado, a elevação do teor de pó de vidro moído de 10% para 30% não representou uma variação considerável na resistência das amostras. Isso pode indicar que existe uma espécie de competição entre as partículas do solo e da pozolana pelo consumo da cal de carbureto, qual seja, as fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo reagem com a cal e a água antes de reagir com o pó de vidro. De qualquer forma, a adição conjunta do pó de vidro moído e cal de carbureto permite a obtenção de materiais mais resistentes.

Güllü et al. (2017) estudaram o comportamento de um solo argiloso artificialmente cimentado com cimento Portland e adição de pó de vidro. Os autores concluíram que um maior teor de adição de vidro representa também um maior tempo necessário para o ganho de resistência da mistura. Além disso, eles identificaram a existência de um teor ótimo de vidro que maximiza o ganho de resistência nas misturas, sendo que ao se ultrapassar este valor a adição se torna prejudicial.



### Análise Estatística

Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente no software Minitab v.18, de modo a se avaliar o efeito de cada uma das variáveis no comportamento das misturas estudadas. A Figura 8 mostra o gráfico dos efeitos principais ou de primeira ordem obtido para estes resultados.

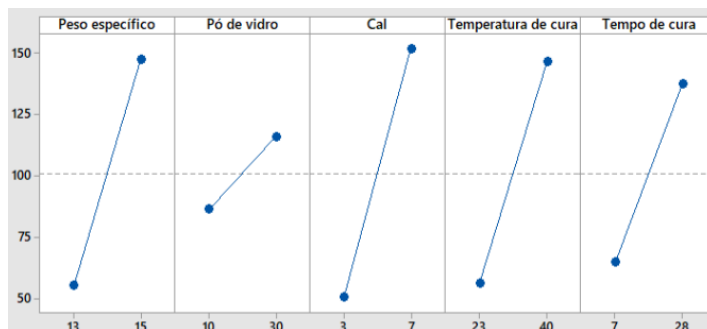


Figura 8. Efeitos principais para  $q_t$  (AUTORES, 2024).

A partir do gráfico, é possível identificar que os fatores que mais exerceram efeito positivo sobre a resistência das misturas ensaiadas foram o peso específico, o teor de cal, a temperatura de cura e o tempo de cura. O teor de pó de vidro apresentou um efeito menor do que as outras variáveis supracitadas.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise dos resultados, foi possível concluir que o teor de cal de carbureto exerceu considerável influência sobre os parâmetros estudados. O aumento deste teor de 3% para 7% resultou em uma melhora considerável no comportamento mecânico do material. A utilização do pó de vidro também permite uma melhora no comportamento, porém com influência menor.

Além disso, o aumento do peso específico aparente seco, e consequente redução da porosidade das misturas, também exerceu influência significativa nos valores obtidos. A elevação do teor de pó de vidro moído de 10% para 30% exerceu pouca influência na melhoria do comportamento do material no que tange a resistência à tração por compressão diametral.

Por fim, tanto a elevação do tempo de cura (de sete para 28 dias) e da temperatura de cura (de 23°C para 40°C) resultaram em um aumento dos valores de  $q_t$ . Esse comportamento era esperado e comprova que a elevação da temperatura de cura pode ser utilizada em materiais deste tipo para a obtenção de melhores resistências à curto prazo.

Assim sendo, conclui-se que o procedimento de produção de pó de vidro a partir de garrafas não-retornáveis é viável visando a estabilização de solos para aplicações em obras de infraestrutura. Ao se utilizar materiais mais sustentáveis, como o pó de vidro moído e a cal de carbureto, e com a utilização da técnica de cura acelerada, é possível o desenvolvimento de materiais mais resistentes, duráveis e sustentáveis. Mesmo assim, são necessários estudos mais abrangentes e aprofundados, com aplicações em campo, para confirmar a possibilidade identificada.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM D 4972: standard test methods for pH of soils. Philadelphia, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6502: Rochas e solos: terminologia. Rio de Janeiro, 1995. 18p. Origem: TB-3
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6508: grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6459: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7180: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7181: Análise granulométrica de solos. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9598: Solo – Índice de suporte Califórnia – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987. 14p. Origem: MB-2545.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). C 496: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Philadelphia, 2017.
- BILONDI, M.P.; TOUFIGH, M.M.; TOUFIGH, V. Using calcium carbide residue as an alkaline activator for glass powder-clay geopolymer. *Construction and Building Materials*. 183. P. 417-428. 2018
- CRISTELO, N.M.C. Estabilização de Solos Residuais Graníticos Através da Adição de Cal. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas, Geotecnia e Fundações. Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Braga, Portugal.
- GÜLLÜ, H.; CANAKCI, H.; AL ZANGANA, I. F. Use of cement based grout with glass powder for deep mixing. *Construction and Building Materials*. 137, 12-20, 2017.
- NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. 1981. In. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro – Rio de Janeiro.
- ROGERS, C.D.F.; GLENDINNING, S.; ROFF, T.E.J. Lime modification of clay soils for construction expediency. *Proceedings: Institute of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, 125(4), p. 242–249. 1997.
- SALDANHA, R. B. Misturas cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples para cura acelerada. 2014. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia na área de Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- SALES, F. A. Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland. 2014. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- SCHEUERMANN FILHO, H.C. Estabilização de um Solo Dispersivo com Pó de Vidro Moído e Cal de Carbureto. 2019. 205f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.