

doi <https://doi.org/10.18265/2447-9187a2022id7687>

ARTIGO ORIGINAL

SUBMETIDO 26/04/2023

APROVADO 16/06/2023


PUBLICADO ON-LINE 29/06/2023

VERSÃO FINAL DIAGRAMADA 03/02/2025

EDITOR ASSOCIADO

Prof. Dr. Hugo Plínio de Andrade Alves

Estabilização do subleito com adição de cal e resíduos do polimento do porcelanato

 Alexandra Amador de Abreu ^[1]

 Robson Arruda dos Santos ^[2] *

 Cinthya Santos da Silva ^[3]

[1] alexandraamdor@gmail.com

[2] robson.santos@ifpb.edu.br

[3] cinthya.santos@ifpb.edu.br

Departamento de Construção Civil,
Instituto Federal da Paraíba (IFPB),
Cajazeiras, Paraíba, Brasil

* Autor para correspondência.

RESUMO: Os problemas ambientais causados pelo descarte de diversos materiais da construção civil e pelo consumo desordenado de recursos naturais têm se tornado um desafio constante para os administradores. Esse cenário inclui as indústrias que produzem os materiais cerâmicos. Um dos processos que mais produzem resíduos é o de polimento do porcelanato, quando são geradas grandes quantidades de resíduo composto por restos de cerâmica e substâncias abrasivas utilizadas no polimento. Observando-se as características desse material, conhecido como Resíduo do Polimento do Porcelanato (RPP), e visando reduzir seu descarte em aterros, viu-se uma possível alternativa para a utilização desse resíduo na pavimentação. Dessa forma, este estudo busca analisar a viabilidade da estabilização de solos de subleito de pavimentos por meio da adição do RPP e de cal hidratada. Essas adições foram realizadas em um solo silto-argiloso, com pouca plasticidade, compostas por 8% de cal, seguindo os métodos de dosagem do *Lime Fiction Point* (LFP) e de Thompson, adaptado por Ingles e Metcalf (1972), e, em seguida, adicionadas à massa do solo nas proporções de 6%, 9% e 12% de RPP. Os materiais e as misturas foram verificados mediante ensaios de granulometria, limites de Atterberg e massa específica. Posteriormente, realizaram-se os ensaios de expansão e Índice de Suporte Califórnia (ISC), preparados com a umidade ótima obtida através do ensaio de compactação *Proctor Normal*. Entre todas as combinações, a mistura da cal hidratada com 9% de RPP demonstrou valores significativos, o que torna essa adição eficaz para o uso em obras rodoviárias, por otimizar o solo natural.

Palavras-chave: cal; estabilização; pavimentação; resíduo do polimento do porcelanato.

Subgrade stabilization with addition of lime and porcelain polishing residues

ABSTRACT: The environmental problems caused by the disposal of construction materials and the unrestrained consumption of natural resources have become a constant challenge for administrators. This scenario includes, for example, ceramic industries. One of the processes that generates the largest amounts of waste is the polishing step of porcelain tile production, which results in



large quantities of waste composed of ceramic residue and abrasive substances used during polishing. By taking advantage of the characteristics of this material, known as Porcelain Polishing Residue (PPR), and aiming to reduce its disposal in landfills, we tested an alternative for its use in road paving. Thus, we analyzed the feasibility of stabilizing subgrade soils by adding PPR and hydrated lime. The PPR residue was added in proportions of 6%, 9% and 12% to a low-plasticity silt-clay soil composed of 8% lime, by using Lime Fiction Point (LFP) and Thompsons method adapted by Ingles and Metcalf (1972). Granulometry tests, Atterberg limits, and specific gravity were used to measure the materials and mixtures. Expansion tests and California Bearing Ratio (CBR) were performed with the optimum moisture content obtained through the standard Proctor compaction test. Among all combinations, the mixture of hydrated lime with 9% PPR showed significant values, making this addition effective for use in road works and optimizing the natural soil.

Keywords: lime; paving; porcelain polishing residue; stabilization.

1 Introdução

A construção civil exerce grande influência no desenvolvimento social e econômico, seja na geração de mão de obra ou no fornecimento de matérias-primas (Vieira; Nogueira, 2018). Esse setor, no entanto, é um dos grandes responsáveis pelos problemas ambientais existentes, principalmente devido ao consumo indiscriminado de recursos naturais para a produção de bens e insumos e à falta de planejamento e gerenciamento dos resíduos dele oriundos (Roth; Garcias, 2009).

Nesse contexto, a indústria de cerâmica brasileira se destaca por sua grande produção – o Brasil é o terceiro maior produtor de revestimentos cerâmicos do mundo, atrás apenas da China e da Índia, em 2018 (ANFACER, 2019).

Atrelada à elevada produção, há uma grande geração de resíduos cerâmicos nos diversos segmentos durante o processo produtivo, destacando-se os resíduos de matéria-prima e da queima. Esses materiais representam volumes significativos quando contabilizados na produção das demais indústrias da área (Skoronski *et al.*, 2015). Buscando soluções que conciliem a disposição econômica e o impacto ambiental, especialmente pelas características físico-químicas das matérias-primas cerâmicas e suas particularidades nas etapas da produção, alguns métodos que realizam a reciclagem desses resíduos são aplicados.

Entre os resíduos produzidos pela indústria da cerâmica, destacam-se os Resíduos do Polimento do Porcelanato (RPP), resultantes do desgaste das peças de porcelanato por meio de máquinas polidoras de alta rotação, que retiram cerca de 1 mm da superfície de todas as peças para oferecer brilho e eliminar defeitos (Oliveira *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2014).

O RPP é um composto resultante da combinação de argila, feldspato, areia feldspáltica e, às vezes, caulins, filitos e aditivos (quando necessários), encontrados no material cerâmico, responsáveis pela elevada resistência mecânica e pela baixa porosidade (Rosso; Cunha; Rojas-Ramírez, 2005). Unido a esse composto há o material abrasivo, oriundo do processo de polimento, constituído por partículas de diamante aglomerado por cimento à base de cloretos magnesianos ou carbetos de silício (Bernardin *et al.*, 2006).

A popularização das peças de porcelanato no mercado da construção civil tem crescido bastante, causando preocupações quanto ao descarte de seus resíduos, os quais devem ser depositados em aterros certificados pelos órgãos públicos, considerando a realidade do descarte ilegal, que provoca inúmeros problemas ambientais (Dagostim, 2008; Guzman *et al.*, 2015; Sánchez *et al.*, 2006).

Uma das possibilidades de utilização desses resíduos é sua adição em argamassas de restauro à base de cal (Breitenbach *et al.*, 2017), em argamassas autoadensáveis (Betioli *et al.*, 2020) e na produção de concreto (Medeiros *et al.*, 2018). Além disso, o RPP também pode ser usado como um elemento geotécnico, com a finalidade de estabilizar as subcamadas dos pavimentos, o que contribuiria na solução de grandes impasses nos órgãos rodoviários brasileiros, devido à inadequação de solos para a construção de rodovias (Machado; Pereira; Pires, 2003).

Segundo a Confederação Nacional de Transporte (CNT, 2019), em 2019 apenas 12,4% da malha rodoviária do país era pavimentada, área equivalente a 213.453 km, apresentando uma dimensão espacial insatisfatória, uma vez que o modal rodoviário é responsável por 61% da movimentação de mercadorias e 95% do traslado de passageiros. Devido às manutenções ineficientes, à falta de investimento e ao aumento do volume dos modais terrestres, ocorrem déficits na segurança e na eficiência, resultando em prejuízos ao poder público e à sociedade.

A fim de solucionar os problemas geotécnicos que surgem no sistema rodoviário brasileiro, aproveitando-se o solo local da construção sem removê-lo ou substituí-lo, são adicionados produtos convencionais como cimento Portland, cal e asfaltos artificiais (Machado; Pereira; Pires, 2003). Essa adição visa melhorar as características do solo quando este, no seu estado natural, não atinge os requisitos mínimos para pavimentação, sendo denominada de estabilização (Almeida *et al.*, 2019).

A estabilização, especialmente a rodoviária, busca conferir melhoria nas propriedades mecânicas do solo, preservando-as por um longo período, possibilitando, assim, maior durabilidade, devido à diminuição da capacidade expansiva do material quando submetido às variações do teor de umidade (Cruz; Jalali, 2010). O uso de solos estabilizados em substituição aos agregados naturais possibilita vantagens econômicas e ambientais, uma vez que os materiais para uso em rodovias estão cada vez mais escassos. Esse método se torna, portanto, uma das soluções mais viáveis, pois reduz os custos de manutenção em rodovias, além de gerar economia na compra e no transporte de materiais para obras rodoviárias (Bernucci *et al.*, 2008; Sherwood, 1993).

Diversos estudos na literatura tratam da otimização do solo natural durante a execução de obras rodoviárias, como no caso da cal hidratada, produto que, em contato com o solo úmido, provoca um processo químico que o torna mais friável, logo reduz sua capacidade de deformação, facilitando sua compactação (Herrin; Mitchell, 1968).

Ainda há lacunas em relação à utilização de resíduos oriundos da própria indústria da construção civil, motivo pelo qual muitos pesquisadores estão buscando soluções, muitas delas a partir de elementos que antes seriam descartados e que, devido às suas características, podem ser reutilizados para melhorar as características do solo. Entre essas soluções, pode-se mencionar a utilização de telhas e pneus reciclados (Al-Bared; Marto; Latifi, 2018), resíduo do vidro pulverizado (Castro *et al.*, 2019), cerâmica vermelha em um solo laterítico arenoso (Lima *et al.*, 2020) e resíduos industriais denominados de “grits” provenientes da fabricação do papel e da celulose (Machado; Pereira; Pires, 2003).

No sentido de contribuir com outra alternativa de minimização de prejuízos ambientais, este trabalho se utiliza da alta resistência oferecida pelos resíduos produzidos durante o processo de polimento do porcelanato e das propriedades da cal como agente

estabilizante, com a finalidade de analisar a viabilidade técnica de realizar a estabilização das subcamadas dos pavimentos flexíveis, por meio de análises físico-químicas e mecânicas desse material. Na sequência, verifica-se o solo pós-adição visando investigar se este atende aos critérios normativos estabelecidos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT) para esse tipo de atividade e, por fim, busca-se identificar a dosagem de materiais que proporcionam a maior capacidade de suporte do solo e sua menor expansão.

Assim, são apresentados, de forma detalhada, na seção 2, os materiais e métodos utilizados bem como a normativa na qual se basearam os ensaios. Na seção 3, discorre-se sobre os resultados obtidos para a caracterização dos materiais, através da análise dos índices físicos e da distribuição granulométrica do solo e da composição química do RPP. É então apresentada a definição do percentual de cal na mistura e são analisados os efeitos físicos das composições solo + cal e solo + cal + RPP, nas porcentagens de 6%, 9% e 12%, respectivamente, bem como os resultados dos ensaios de compactação, expansão e CBR (*California Bearing Ratio*) dessas misturas. Por fim, na seção 4, são apresentadas as conclusões deste trabalho.

2 Materiais e métodos

O estudo apresenta-se de forma experimental, com abordagem quantitativa dos dados. Para obtenção destes, investigou-se isoladamente cada material, de acordo com as normas vigentes, sendo determinadas as dosagens e, posteriormente, avaliado o comportamento das composições por meio de ensaios mecânicos: compactação, expansão e CBR.

Esses procedimentos práticos foram desenvolvidos no Laboratório de Geotecnia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), Campus Cajazeiras; no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Faculdade Santa Maria; e no Laboratório de Materiais Cerâmicos da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campus I, João Pessoa, todos localizados no estado da Paraíba (PB).

2.1 Materiais

A fim de alcançar os objetivos da pesquisa, foi realizada a caracterização do solo e do resíduo do polimento do porcelanato (RPP), de modo que fossem avaliadas as suas propriedades, suas origens, o processo de coleta e a forma como esses materiais foram armazenados.

O solo foi coletado na zona rural do município de São João do Rio do Peixe-PB e transportado para o IFPB, Campus Cajazeiras. Para a cal hidratada, optou-se por utilizar o material comercializado na região. Os resíduos utilizados para as adições foram coletados durante o processo de polimento das peças de porcelanato, ainda na forma de lama, em uma indústria de produção de porcelanato localizada em João Pessoa.

2.2 Métodos

Para os ensaios de caracterização do solo, foram utilizadas as especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), do Sistema Unificado de Classificação (SUCS) e da *Transportation Research Board* (TBR), com o objetivo de se

classificar o material e se obterem as propriedades necessárias para os próximos passos. Para isso, foram realizados os ensaios de teor de umidade, massa específica, análise granulométrica e os limites de Atterberg ou consistência (limite de liquidez – LL e limite de plasticidade – LP) que seguiram as recomendações da NBR 6457/2016, NBR 6458/2016, NBR 7181/2016, NBR 6459/2016 e NBR 7180/2016, respectivamente (ABNT, 2016).

Para as adições, o processo foi diferente, pois a cal hidratada não necessitou de nenhum procedimento antes de serem realizados os ensaios, uma vez que suas especificações são fornecidas pelo fabricante. Para os resíduos de porcelanato, porém, foi necessário determinar as propriedades químicas, o que se fez por meio da espectrometria de fluorescência de raios X, realizada após a secagem em estufa a $105 \pm 5^\circ \text{C}$ e desaglomeração manual com o auxílio de um almofariz, até a retirada de todas as partículas maiores.

Na segunda etapa, referente à determinação da quantidade de cal necessária para oferecer resistência e durabilidade adequada ao solo, foram utilizados dois métodos, com base na relação entre duas técnicas: o método Thompson, adaptado por Ingles e Metcalf (1972), e o método *Lime Fiction Point* (LFP) (Hilt; Davidson, 1960). O primeiro se utiliza da classificação do solo, a partir da qual é feita a relação do tipo de material com os teores de cal estabelecidos para a estabilização. Com o conhecimento dessas proporções, realizaram-se os ensaios de plasticidade imediatamente após a adição, com leituras em 1 hora, 2 horas, 4 horas, 8 horas, 24 horas e 1 semana, até que o limite de plasticidade máximo fosse alcançado. A esse valor foram acrescentados, posteriormente, 4% de cal, como o método recomenda, alcançando-se, assim, o LFP.

Por fim, definiram-se as umidades ótimas e as massas específicas por meio do ensaio de compactação, com o intuito de se determinar a capacidade expansiva e a resistência à penetração do solo, da mistura com a cal e com as proporções do RPP, definidas por meio de revisão bibliográfica. As adições de 3%, 6% e 9% do resíduo incorporado ao solo geraram mudanças satisfatórias no CBR, na pesquisa de Germano e Arns (2018), cujos dados foram utilizados como parâmetros para determinação das dosagens analisadas no presente trabalho. Definiram-se, então, as adições de 6%, 9% e 12% do material, a fim de se verificar a tendência no aumento do desempenho do solo a partir desse acréscimo.

Durante a realização da compactação, utilizou-se a energia normal, seguindo as recomendações da norma ME-164/2013 do DNIT (DNIT, 2013). Para esse processo, optou-se por não se reutilizar o material, uma vez que, ao se adicionar a cal e o resíduo, as propriedades do solo são modificadas imediatamente devido às características dos próprios materiais adicionados. Diante dos valores adquiridos nesses ensaios, foram moldados três corpos de prova para cada dosagem e, com esses valores, foram observados seus comportamentos expansivos durante 96 horas, quando inundados, realizando-se leituras a cada 24 horas no extensômetro graduado em 0,01 mm.

Concluído o período de quatro dias, os corpos de prova foram encaminhados para a prensa do CBR, em que foram submetidos a um pistão com seção transversal de 3 pol², cuja velocidade de penetração na amostra é de 0,05 pol/min – esse processo foi realizado com o intuito de se determinar a tensão necessária para que ocorresse a penetração, conforme recomendações da NBR 9895/2016 (ABNT, 2016).

3 Resultados

São apresentadas, inicialmente, as análises realizadas para os materiais utilizados: o solo, a cal hidratada e o resíduo do polimento do porcelanato. Em seguida, são expostos

os resultados das caracterizações das composições e dos ensaios mecânicos: compactação, expansão e capacidade de suporte.

3.1 Caracterização dos materiais

As características das amostras e suas classificações foram obtidas por meio dos ensaios de teor de umidade, massa específica, granulometria, limites de consistência e espectrometria de fluorescência de raios X, conforme descritos nos itens seguintes, por meio das tabelas e gráficos experimentais. Primeiramente, foram realizados ensaios de caracterização física do solo sem qualquer adição, respeitando-se as normativas vigentes para cada procedimento. Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 ▶

Índices físicos do solo.
Fonte: dados da pesquisa

Propriedades	Valores médios
Teor de umidade inicial (h)	2,6%
Massa Específica (ρ)	2,044 g/cm ³
Limite de Liquidez (LL)	24,8%
Limite de Plasticidade (LP)	18,05%
Índice de Plasticidade (IP)	6,75%

Usando como referência os parâmetros adotados por Caputo (1996) para o índice de plasticidade (IP), considera-se esse solo como fracamente plástico, já que este apresenta um IP menor que 7. A análise granulométrica da amostra foi realizada por peneiramento e sedimentação, seguindo as recomendações da NBR 6502/1995 (ABNT, 1995), resultando nas seguintes composições: 0,0% de pedregulho (acima de 2 mm), 31,3% de areia (de 0,06 mm a 2 mm), 39,2% de silte (de 0,02 mm a 0,06 mm) e 29,5% de argila (abaixo de 0,02 mm). Assim, verifica-se que o material é predominantemente fino, pois 98,7% são passantes na peneira de n° 200, como indicado na Tabela 2.

Tabela 2 ▶

Composição granulométrica (%).
Fonte: dados da pesquisa

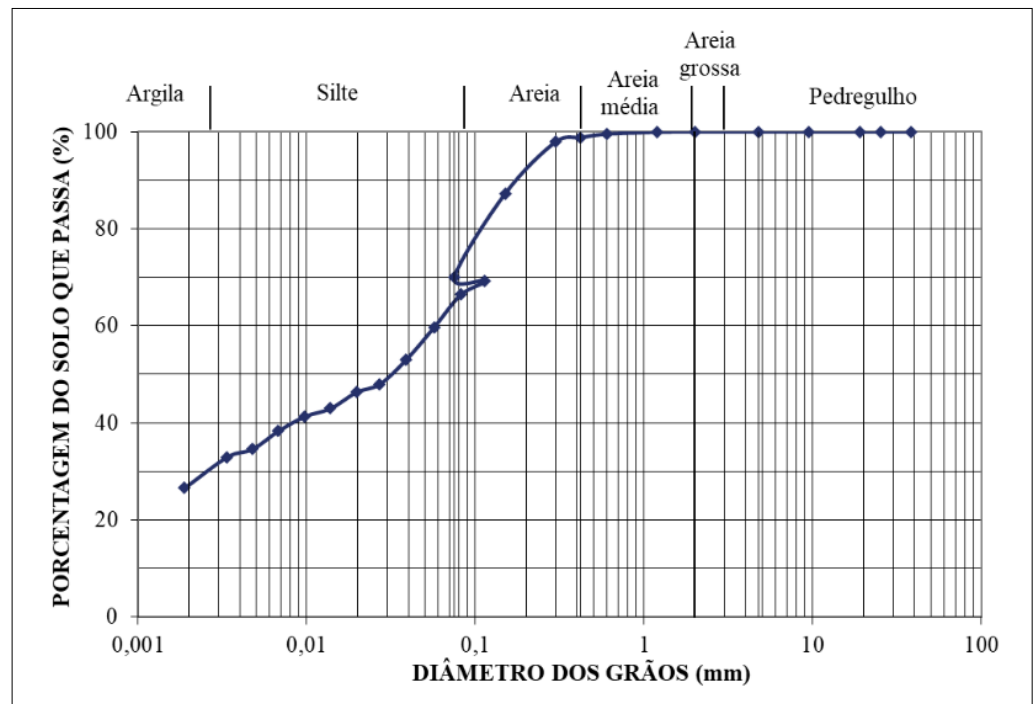
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
29,5	39,2	30,0	1,3	0,0	0,0

Por meio dos dados obtidos nos ensaios, foi possível determinar a curva granulométrica para essa amostra de solo natural, como mostra a Figura 1.

Figura 1 ►

Curva granulométrica do solo obtida por meio do ensaio de peneiramento e sedimentação.

Fonte: dados da pesquisa



De acordo com a curva granulométrica, não foi possível definir os índices granulométricos, pois o coeficiente de uniformidade (CU) e o coeficiente de curvatura (CC) não apresentaram valores representativos, visto que não foi possível determinar o diâmetro efetivo correspondente ao ponto de 10%, dado que mais de 20% do material passou na menor peneira.

Ainda observando a Figura 1, é possível perceber uma descontinuidade na faixa que combina o ensaio do peneiramento com a sedimentação. Isso acontece porque os argilominerais presentes em cada fração granulométrica produzem óxidos com características cimentantes, que podem interferir na desagregação com a ajuda do defloculante (Manso, 1999).

A partir desses resultados, realizou-se a classificação do solo, apresentada no Quadro 1, de acordo com os sistemas *Transportation Research Board* (TRB) e Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), visto que a classificação TRB considera a porcentagem de material passante pelas peneiras de nº 200, nº 10 e nº 40, além dos resultados obtidos para os índices de Atterberg, e a classificação SUCS considera a peneira nº 200, bem como o IP e o LL.

Quadro 1 ►

Classificação do solo natural por meio dos métodos TRB e SUCS.

Fonte: dados da pesquisa

Material	TBR	SUCS
Solo	A-4	ML

Assim, o solo natural se apresenta como um A-4, conforme a classificação TRB determina, isto é, um silte não plástico ou moderadamente plástico, podendo também ser uma mistura entre o silte, areia e pedregulho. Com base na classificação do SUCS, o solo é um silte argiloso inorgânico com baixa plasticidade, ou uma areia fina siltosa (ML). Conferindo essas classificações no Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), para utilização em qualquer camada de um pavimento, mesmo no subleito, esse solo apresenta um comportamento de fraco a pobre.

Para o resíduo oriundo do polimento do porcelanato, foi realizado o ensaio de espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX) para obtenção da composição química desse material, conforme dados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 ▶

Composição química do RPP por meio do ensaio de fluorescência de raios X.

Fonte: dados da pesquisa

Elemento	Teor (%)
SiO ₂	71,122
Al ₂ O ₃	10,131
CaO	7,389
K ₂ O	7,153
Fe ₂ O ₃	2,318
TiO ₂	0,708
ZnO	0,561
MnO	0,200
ZrO ₂	0,136
CuO	0,086
RbO ₂	0,066
Cr ₂ O ₅	0,036
SrO	0,033
V ₂ O ₅	0,031

Observando-se a Tabela 3, conclui-se que o RPP é composto predominantemente por sílica e alumina, com percentuais de participação de 71,122% e 10,131%, respectivamente. Esse resultado constata que, conforme a NBR 12653/2014 (ABNT, 2014), o resíduo atende a um dos itens que caracterizam um material pozolânico, uma vez que a união entre SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ é superior a 70% (83,571%). Essa propriedade, normalmente, promove melhoria da resistência mecânica (Carmo; Portella, 2008).

3.2 Definição da porcentagem da cal

Os ensaios caracterizaram o solo como silto-argiloso. Diante dessa definição, foram analisadas as adições de 2% a 4% de cal no solo, teores dados pelo método Thompson adaptado por Ingles e Metcalf (1972), observando-se qual porcentagem apresenta o maior valor de plasticidade. Para cada teor, foram utilizadas três amostras, com as quais se realizaram sete verificações conforme o intervalo de tempo, como exige o método *Lime Fiction Point* (LFP) (Hilt; Davidson, 1960).

Dessa forma, esse ensaio foi realizado 315 vezes. A partir dos valores encontrados, calculou-se a média aritmética em cada intervalo de tempo, e, com esses valores, foi

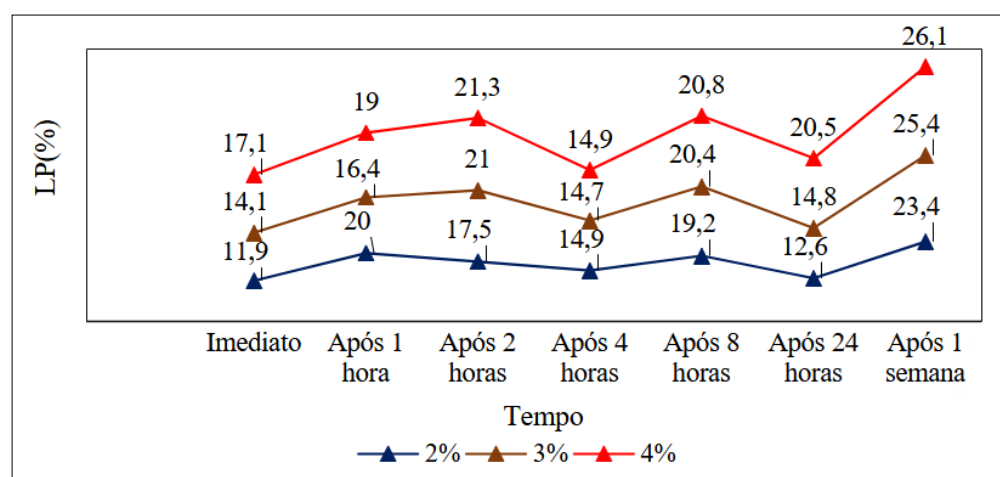
Tabela 4 ▼
Média dos limites de plasticidade para determinação do LFP.
Fonte: dados da pesquisa

possível determinar o teor de cal. A Tabela 4 apresenta os limites de plasticidades médios para teor de cal nos intervalos de tempo.

% Cal	Média do LP (%)						
	Imediato	Após 1 hora	Após 2 horas	Após 4 horas	Após 8 horas	Após 24 horas	Após 1 semana
2	17,1	19	17,5	14,9	19,2	12,6	23,4
3	14,1	16,4	21	14,7	20,4	14,8	25,4
4	11,9	20	21,3	14,9	20,8	20,5	26,1

Pelo método de dosagem *Lime Fiction Point*, os maiores valores para LP foram encontrados para o teor de 4%, como é possível visualizar na Figura 2.

Figura 2 ►
Gráfico do LP (%) para as composições de solo + cal para determinação do LFP.
Fonte: dados da pesquisa



Diante disso, nos demais procedimentos realizados e expostos neste trabalho, são acrescentados 4% ao teor de LFP, como a metodologia estabelecida por Hilt e Davidson (1960) determina, obtendo-se, então, uma adição de 8%.

3.3 Efeitos físicos das composições

Após a definição da porcentagem da adição da cal (8%), conforme discutido na subseção 3.2, foram realizados os mesmos ensaios físicos do solo natural nas composições. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 ►
Índices físicos das composições de solo + cal e solo + cal + RPP.
Fonte: dados da pesquisa

Composições	ρ (g/cm ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Solo + cal	2,045	23,1	19,62	3,48
Solo + cal + 6% de RPP	2,047	23,54	21,51	2,02
Solo + cal + 9% de RPP	2,049	23,23	22,00	1,25
Solo + cal + 12% de RPP	2,048	23,09	21,74	1,34

Percebe-se um aumento na massa específica em todos os níveis de adições, até mesmo na composição solo e cal hidratada, o que está associado ao tipo de solo estudado, que possui baixa plasticidade. O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) relaciona a queda desse parâmetro às características argilosas do solo.

Quanto às adições com o RPP, os acréscimos na ρ (massa específica) podem ser explicados pelas dimensões dos grãos, que são menores. Dessa forma, pode-se afirmar que as composições geraram misturas mais empacotadas, diminuindo seus vazios.

Os índices de plasticidade das composições diminuíram, porém foram acompanhados de aumentos nos limites de plasticidade. Esses resultados estão coerentes com as observações de Guimarães (1998), que relaciona essas mudanças físicas à troca iônica que acontece imediatamente após o contato dos materiais.

Apenas na adição de 6% do RPP houve o aumento do LL, o que torna o solo mais suscetível a recalque quando submetido a esforços. Já nas adições de 9% e 12% houve diminuições de 1,32% e 0,6%, respectivamente, em relação à amostra anterior, tornando essas composições mais compressíveis que as demais.

Constata-se um aumento no IP na adição com o teor de 12% de RPP, assim como a diminuição no LP. Desse modo, pode-se concluir que o teor de 9% é o ponto ótimo quanto ao índice de plasticidade entre todas as composições realizadas neste trabalho.

Quanto à análise granulométrica das adições, percebem-se acréscimos na quantidade de argila das amostras, enquanto a quantidade de silte e areia diminui (Tabela 6). Isso se deve à inserção das adições e suas características granulométricas. Mesmo com as reações químicas e a floculação que a cal hidratada provoca no solo, não houve aumentos nas dimensões das amostras, resultado relacionado ao fato de o solo natural não ser totalmente coesivo.

Tabela 6 ▼

Resultados do ensaio de granulometria para as composições.

Fonte: dados da pesquisa

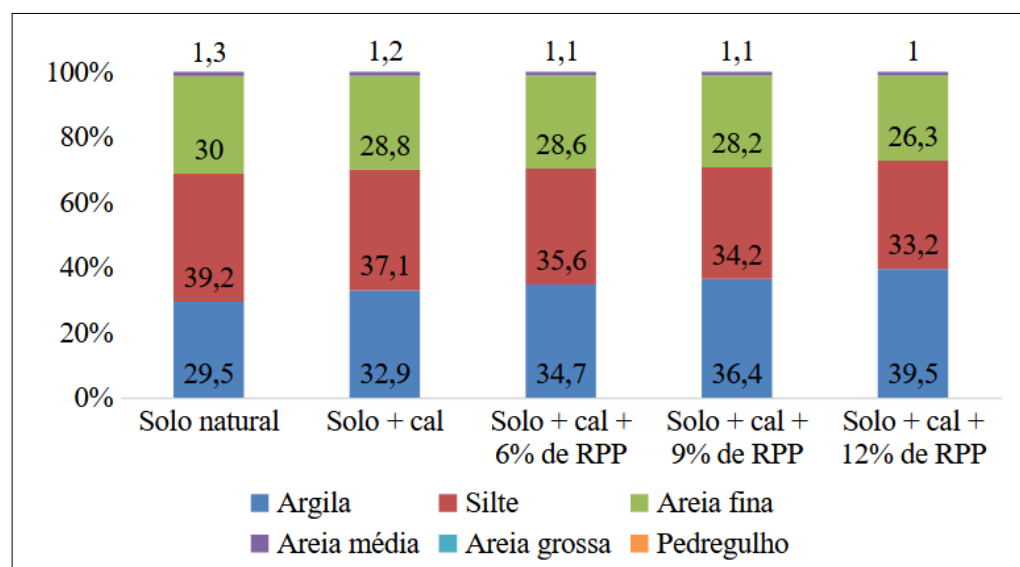
Composições	Argila	Silte	Areia			Pedregulho
			Fina	Média	Grossa	
Solo + cal	32,9	37,1	28,8	1,2	0,0	0,0
Solo + cal + 6% de RPP	34,7	35,6	28,6	1,1	0,0	0,0
Solo + cal + 9% de RPP	36,4	34,2	28,2	1,1	0,0	0,0
Solo + cal + 12% de RPP	39,5	33,2	26,3	1,0	0,0	0,0

Observa-se que, com a adição da cal, a quantidade de argila aumentou 11,52% em relação ao solo natural, porém, houve uma diminuição no teor de silte de 5,35%, o que comprova a alteração granulométrica devido à ação das adições de cal e resíduo. Esse comportamento se repetiu nas demais composições inseridas no solo-cal, 6%, 9% e 12% do RPP. Esses valores condizem com os resultados de Germano e Arns (2018), em que todas as adições apresentaram percentuais maiores do material passante na peneira de nº 200 em relação ao solo natural. Na Figura 3, pode-se observar melhor como estão distribuídas as classes granulométricas de todas as amostras.

Figura 3 ►

Gráfico que relaciona os percentuais granulométricos das amostras.

Fonte: dados da pesquisa



Por meio desses percentuais, não foi possível determinar os índices granulométricos, resultado semelhante ao do solo natural. Diante dos valores encontrados para as adições da cal e do resíduo, pode-se perceber que as amostras continuam sendo classificadas como silte argiloso misturado com areia, não plástico ou moderadamente plástico, de acordo com as metodologias TBR e SUCS.

3.4 Compactação

Nesta subseção, são apresentados os resultados obtidos para o solo natural, em seguida com o solo acrescido da cal e com as adições do RPP. Com esse procedimento, foram determinadas, para três corpos de prova de cada situação, as massas específicas secas máximas ($\rho_{dm\acute{a}x}$) e as umidades ótimas (h_{ot}), apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 ►

Massa específica seca máxima e umidade ótima dos ensaios de compactação.

Fonte: dados da pesquisa

Composições	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	h_{ot} (%)
Solo natural	1,906 ± 0,15	11,5 ± 0,25
Solo + cal	1,889 ± 0,19	27,3 ± 0,31
Solo + cal + 6% de RPP	2,065 ± 0,11	14,5 ± 0,38
Solo + cal + 9% de RPP	2,095 ± 0,17	14,1 ± 0,57
Solo + cal + 12% de RPP	2,037 ± 0,10	16,0 ± 0,43

Percebe-se um aumento da umidade ótima em todos os casos, quando comparados com o solo natural, especialmente nas adições que receberam a cal hidratada durante este ensaio. Isso acontece porque, quando a cal é adicionada ao solo, há uma mudança imediata de pH. O cálcio presente na mistura evita a inserção da água nos vazios dos argilominerais, proporcionando a floculação (Ferreira *et al.*, 2017), comportamento similar ao produzido por Al-Swaidani, Hammoud e Meziab (2016).

A massa específica diminui apenas na adição da cal hidratada, aproximadamente de 1%, semelhante ao trabalho desenvolvido por Alcântara *et al.* (2017), que teve uma redução de aproximadamente 2%. Houve aumento, no entanto, em todas as combinações

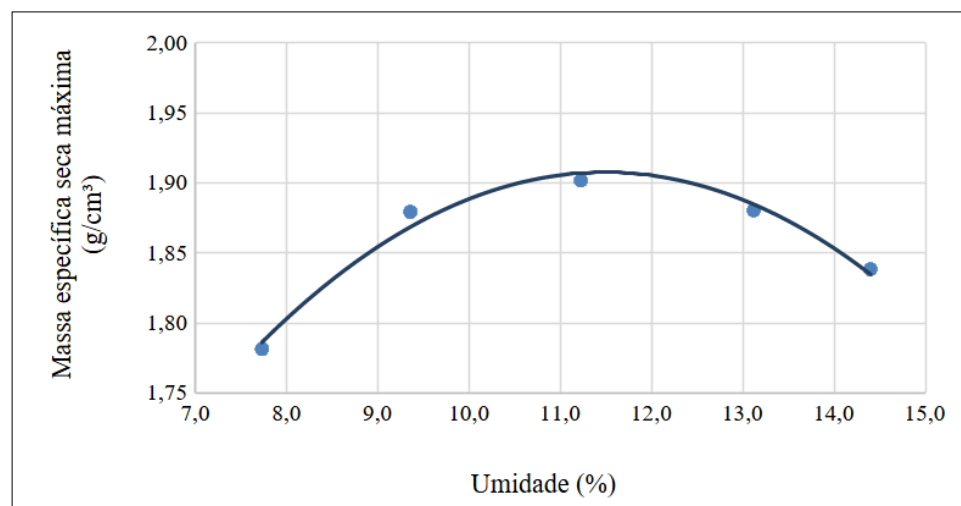
que receberam o resíduo, quando comparadas com o solo de referência, sendo a adição de 9% a que mais se destaca devido ao acréscimo de 9,9% em relação às adições de 6% e 12%, nas quais ocorreram acréscimos de 8,34% e 6,87%, respectivamente.

Com os resultados dessa análise, foram obtidas as curvas de compactação que relacionam a massa específica seca máxima e a umidade ótima. Essas curvas foram divididas de acordo com as adições realizadas. O primeiro caso, exposto na Figura 4, é a amostra do solo sem adição.

Figura 4 ►

Curva resultante do ensaio de compactação do solo natural.

Fonte: dados da pesquisa



A curva de compactação do solo natural se comporta conforme Pinto (2006) descreve os solos siltes-argilosos, com uma massa específica menor que 2 g/cm³ e uma umidade ótima maior que 10%. Ainda se percebe que essa curva não ultrapassa a de saturação, comportamento que, segundo Caputo (1996), se deve ao fato de que o processo de compactação não conseguiu expulsar todo o ar aprisionado – sabendo-se que a curva de saturação corresponde a uma situação em que todo o ar é expulso. Para o ensaio do solo com a cal hidratada, o comportamento foi um pouco diferente, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 ►

Curva resultante do ensaio de compactação do solo + cal.

Fonte: dados da pesquisa

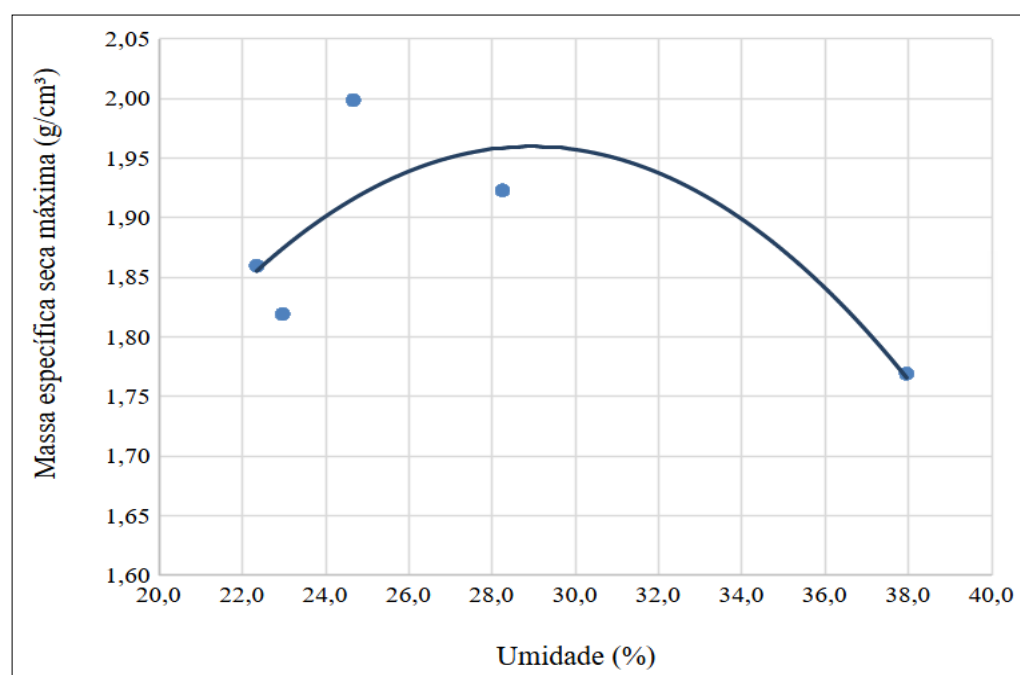


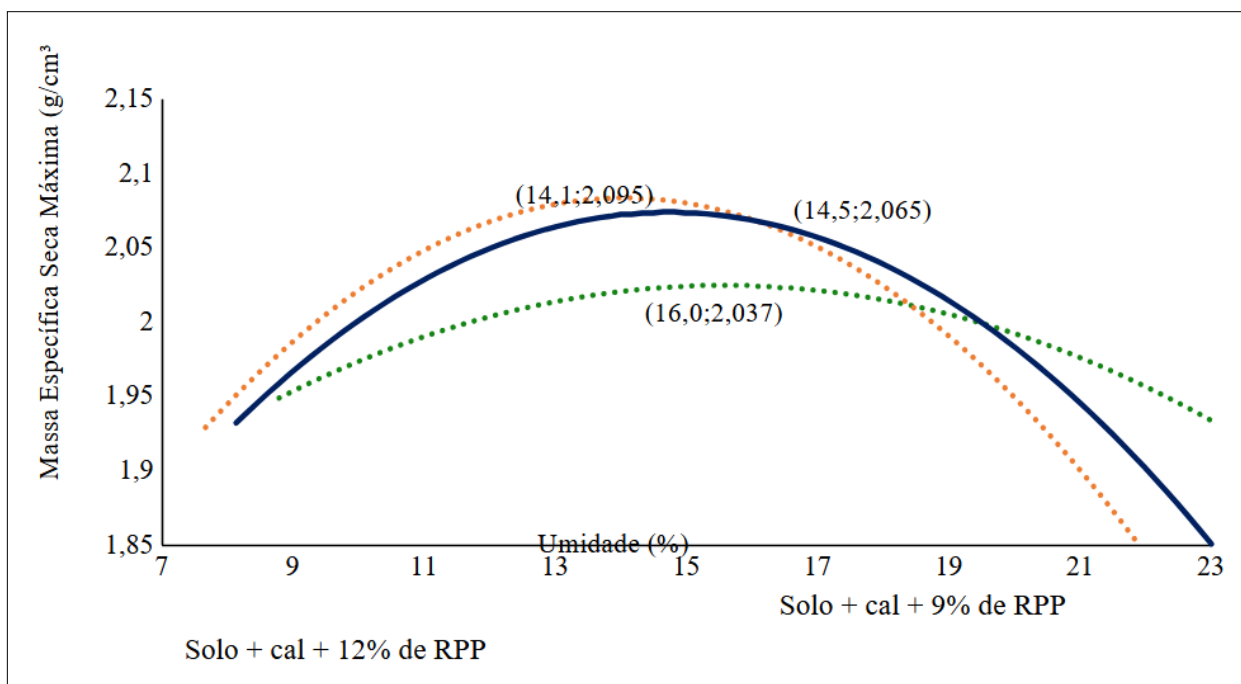
Figura 6 ▼

Curva resultante do ensaio de compactação do solo + cal + RPP.

Fonte: dados da pesquisa

Quando o solo recebeu a cal hidratada, houve um aumento de aproximadamente 2,47% no teor de umidade ótima. Isso se deve à necessidade de se preencherem os vazios gerados pela aglomeração das partículas. Já a massa específica seca passou de 1,906 g/cm³ (solo natural) para 1,889 g/cm³, com a adição da cal.

Quando, porém, se adiciona o RPP junto à cal no solo, percebe-se um comportamento diferenciado, como é apresentado na Figura 6.



Verifica-se um aumento na massa específica das adições com o RPP, ao contrário da adição apenas da cal hidratada. Dessa forma, pode-se afirmar que houve uma diminuição do número de vazios do solo, já que as granulometrias das amostras apresentam uma quantidade maior de grãos menores que 0,075 mm. Resultado semelhante foi observado na pesquisa de Sampaio, Martinelli e Gomes (2017). Esses autores perceberam que a taxa de vazios foi reduzida depois da adição do resíduo do polimento do porcelanato. Tal acréscimo na $\rho_{dmáx}$ não é, contudo, contínuo, pois a adição de 12% sofre uma redução em relação ao acréscimo de 9%, que, por sua vez, aumenta quando comparada com a anterior, 6%. Assim, pode-se concluir que o ponto ótimo de compactação é a adição de RPP com 9% junto à cal hidratada.

3.5 Expansão e CBR

Nesta subseção são apresentados os resultados para o ensaio de CBR e expansão (três amostras por composição), realizados com o solo puro, o solo acrescido de cal e dos resíduos. Todos os corpos de prova foram preparados de acordo com os teores de umidade ótima encontrados na compactação, porém, no processo de moldagem das amostras do ensaio, os teores de umidade (h_{mold}) foram analisados novamente, com o intuito de verificar se condizem com os valores de h_{ot} , como mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 ▶

Análise do desvio padrão dos teores de umidade.

Fonte: dados da pesquisa

Composições	h_{ot} (%)	h_{mold} (%)	Desvio padrão
Solo natural	11,5	11,6	0,035
Solo + cal	27,3	27,1	0,071
Solo + cal + 6% de RPP	14,5	14,1	0,141
Solo + cal + 9% de RPP	13,9	13,6	0,106
Solo + cal + 12% de RPP	16,0	16,0	0,00

Os teores de umidade para os corpos de prova moldados apresentam desvios padrão pequenos, tornando esses resultados semelhantes aos obtidos nos ensaios de compactação. Depois da moldagem, as amostras foram inundadas a fim de se avaliar sua capacidade expansiva e de suporte e a viabilidade de incorporação dos materiais na pavimentação. A Tabela 9 expõe os resultados encontrados.

Tabela 9 ▶

Resultados das composições para a expansão e o CBR.

Fonte: dados da pesquisa

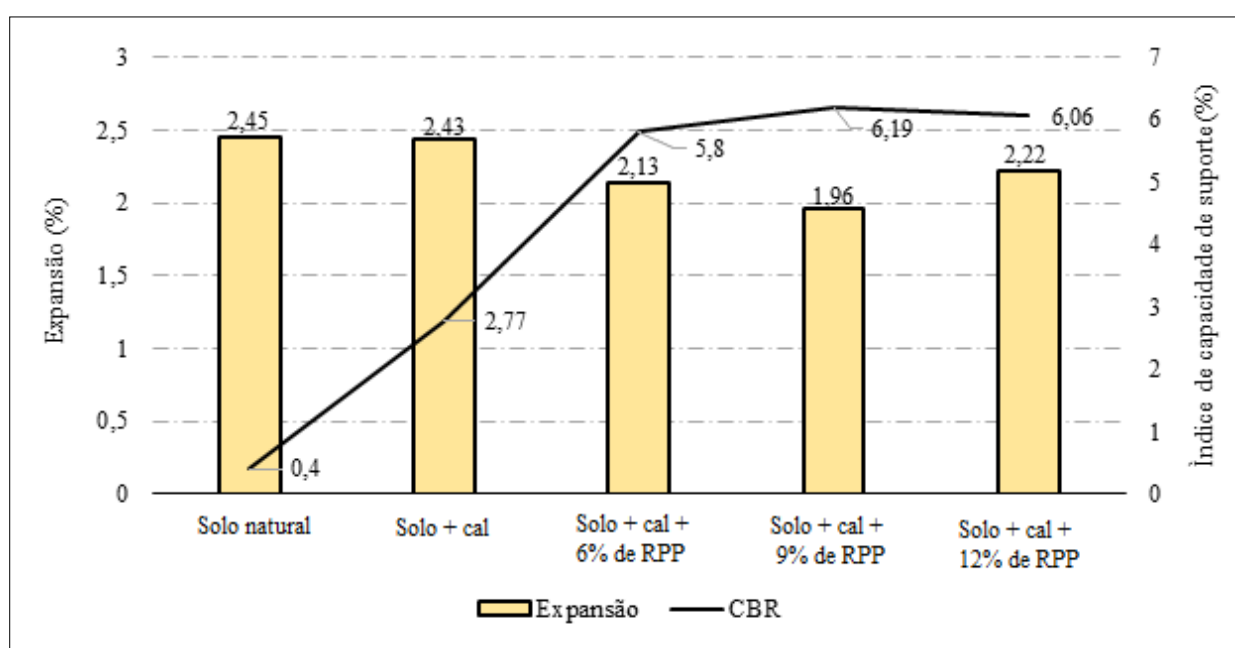
Composições	Expansão (%)	CBR (%)
Solo natural	2,45 ± 0,42	0,40 ± 0,12
Solo + cal	2,43 ± 0,30	2,77 ± 0,22
Solo + cal + 6% de RPP	2,13 ± 0,21	5,80 ± 0,17
Solo + cal + 9% de RPP	1,96 ± 0,37	6,19 ± 0,42
Solo + cal + 12% de RPP	2,22 ± 0,20	6,06 ± 0,31

Diante dos valores obtidos, é possível concluir que a expansão das composições apresentou um decréscimo e que houve aumento da capacidade de suporte em todas as adições, com exceção da adição de cal com 12% de RPP. Dessa forma, pode-se afirmar que a amostra composta de cal e 9% do resíduo apresenta o melhor resultado, visto a menor capacidade expansiva e o maior CBR. A Figura 7 apresenta os resultados da expansão e do CBR.

Figura 7 ▼

Gráfico para a análise da expansão e do CBR.

Fonte: dados da pesquisa



O potencial de expansão do solo está atrelado, principalmente, ao arranjo estrutural de seus argilominerais. Diante dos resultados, pode-se afirmar que as combinações ofereceram melhorias ao solo natural quanto à expansão e ao CBR. É notável que há uma tendência de diminuição na expansão à medida que há um acréscimo no valor de resíduo na mistura, apontando que o resíduo é um material menos expansivo.

A diminuição da expansão em todas as adições, em relação ao solo natural, é o resultado conferido neste trabalho, o qual está em consonância com a pesquisa de Germano e Arns (2018), os quais analisaram a ação do resíduo até os 9%. O aumento da expansão na adição de 12% de RPP indica que a mistura com a cal hidratada atingiu o valor máximo que o solo suporta sem formar poros, os quais podem ser causados pelo borbulhamento da fase líquida e pela liberação de gases do resíduo.

De acordo com as especificações do DNIT (2006), os CBRs das adições podem ser aplicados no subleito, pois apresentam valores maiores que 2%. Ao se analisar, porém, a expansão, apenas a combinação de cal e 9% do resíduo do polimento do porcelanato pode ser empregada, já que esta foi a única que apresentou uma capacidade expansiva menor que 2%.

4 Conclusões

O presente trabalho estudou a adição da cal hidratada e do resíduo de polimento do porcelanato (RPP) a um solo, com a finalidade de sua aplicação nas obras rodoviárias. Para avaliar a inserção desses componentes, foram realizados ensaios físicos e mecânicos dos materiais, visando viabilizar uma destinação adequada para o RPP, cuja produção tem se dado em larga escala.

Diante das análises realizadas, pode-se concluir que a quantidade máxima de cal hidratada a ser adicionada no solo corresponde a 8%, pois esse valor é o que apresenta o maior LP sem causar perdas na resistência da amostra. As adições da cal hidratada e de RPP no solo não geraram alterações significativas na granulometria do solo natural, pois todas as misturas continuaram sendo classificadas como um solo silto-argiloso com teores de areia. E o solo, por apresentar mais da metade da sua composição formada por finos, apresentou uma elevada expansão em presença de água; porém, nas misturas realizadas, esse parâmetro diminuiu.

Os ensaios de compactação nas composições com o RPP apontaram crescimento nos valores da massa específica e nas umidades ótimas, de modo que o ponto máximo desses ensaios foi a adição de 9% de RPP com a cal hidratada. Com todos os dados obtidos nesta pesquisa, pode-se dizer que, de forma geral, o resíduo e a cal podem ser utilizados nas misturas com o solo natural, pois não alteraram significativamente suas propriedades, resultados comprovados pelos ensaios de expansão e de CBR. Todas as composições se enquadraram nos valores limites apresentados para a execução como subleito, de acordo com os parâmetros estabelecidos pelo DNIT, com os melhores resultados obtidos na adição de 8% de cal hidratada e 9% de resíduo de RPP.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Elizabeth Porcelanatos de João Pessoa-PB, pelo fornecimento do resíduo utilizado nesta pesquisa. Também agradecem ao Instituto Federal da Paraíba, Campus Cajazeiras, à Universidade Federal da Paraíba (Laboratório de Materiais

Cerâmicos) e à Faculdade Santa Maria, por disponibilizarem os equipamentos para a realização dos ensaios.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Nota

Este artigo é derivado do trabalho de conclusão do curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), Campus Cajazeiras, disponível em: <https://repositorio.ifpb.edu.br/jspui/handle/177683/1414>.

Contribuições ao artigo

ABREU, A. A.; SANTOS, R. A.; SILVA, C. S.: concepção ou desenho do estudo/pesquisa; análise e/ou interpretação dos dados; revisão final com participação crítica e intelectual no manuscrito. Todos os autores participaram da escrita, discussão, leitura e aprovação da versão final do artigo.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:** Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaio de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458:** Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459:** Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502:** Rochas e solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180:** Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

AL-BARED, M. A. M.; MARTO, A.; LATIFI, N. Utilization of recycled tiles and tyres in stabilization of soils and production of construction materials: a state-of-the-art review. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 22, p. 3860-3874, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-018-1532-2>.

ALCÂNTARA, M. A. M.; SANTOS, L. P.; SOUZA, A.; LIMA, D. C. Efeito da cinza de casca de arroz na plasticidade e compactação de uma mistura solo-cal. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. 3, e11875, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170003.0209>.

ALMEIDA, L. W. S.; SOUZA, L. H. P.; ALMEIDA, W. M. S.; SILVA JÚNIOR, F. V. Estabilização química do solo com adição de sílica ativa e cimento, para utilização em camadas de pavimentação rodoviária. **Engineering Sciences**, v. 7, n. 1, p. 11-21, 2019. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/engineeringsciences/article/view/CBPC2318-3055.2019.001.0002>. Acesso em: 30 dez. 2024.

AL-SWAIDANI, A.; HAMMOUD, I.; MEZIAB, A. Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 8, n. 5, p. 714-725, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.04.002>.

ANFACER – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTOS, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES. **Ceramics of Brazil**. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.ceramicsofbrazil.com/>. Acesso em: 31 mar. 2020.

BERNARDIN, A. M.; FELISBERTO, D. S.; DAROS, M. T.; RIELLA, H. G. Reaproveitamento de resíduos de polimento e de esmaltação para obtenção de cerâmica celular. **Cerâmica Industrial**, v. 11, n. 5/6, p. 31-34, 2006. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/5876572c7f8c9d6e028b4708>. Acesso em: 29 jun. 2023.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2008.

BETIOLI, A. M.; FORTUNATO, M.; MARTINS, B.-H. R.; CASALI, J. M.; ROCHA, J. C.; COLLODETTI, G. Efeito da composição granulométrica e da área superficial específica de resíduos de polimento de porcelanato em argamassas autoadensáveis. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 385-402, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000300435>.

BREITENBACH, S. B.; SANTOS, O. C.; ANDRADE, J. C. S.; NASCIMENTO, R. M.; MARTINELLI, A. E. Adição de resíduo do polimento de porcelanato em argamassas de restauro à base de cal. **Cerâmica**, São Paulo, v. 63, n. 367, p. 395-401, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633672182>.

CAPUTO, P. H. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. v. 1. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

CARMO, J. B. M.; PORTELLA, K. F. Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto. **Cerâmica**, v. 54, n. 331, p. 309-318, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132008000300007>.

CASTRO, C. E. N.; SILVA, R. R. F.; SANTOS, L. F.; MENDES, A. S.; LIMA, C. A. P.; FROTA, C. A. Comportamento mecânico de solo argiloso estabilizado com resíduo de vidro pulverizado em moinho de alta energia e de bolas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 2, e12356, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0671>.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2019**. Brasília, DF: CNT: SEST SENAT, 2019. Disponível em: <http://repositorio.itl.org.br/jspui/handle/123456789/322>. Acesso em: 30 mar. 2020.

CRUZ, M. L.; JALALI, S. Melhoramento do desempenho de misturas de solo-cimento com recurso a activadores de baixo custo. **Revista Luso-Brasileira de Geotecnia**, n. 120, p. 49-64, 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10198/2026>. Acesso em: 26 mar. 2023.

DAGOSTIM, B. R. Fabricação de pavimentos cerâmicos e cerâmica celular a partir da reutilização de resíduos sólidos: adequação laboratorial e industrial. **Cerâmica Industrial**, v. 13, n. 6, p. 25-27, 2008. Disponível em: <https://ceramicaindustrial.org.br/journal/ci/article/587657397f8c9d6e028b4751>. Acesso em: 29 jun. 2023.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 164/2013-ME: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: DNIT, 2013. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_164_2013_me.pdf. Acesso em: 29 mar. 2020.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr_719_manual_de_pavimentacao_versao_corrigda_errata_1.pdf. Acesso em: 28 mar. 2020.

FERREIRA, S. R. M.; PAIVA, S. C.; MORAIS, J. J. O.; VIANA, R. B. Avaliação da expansão de um solo do município de Paulista-PE melhorado com cal. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, supl. 1, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170005.0266>.

GERMANO, R. S.; ARNS, P. **Estabilização mecânica de um solo com adição de resíduo de polimento de porcelanato destinado a pavimentação rodoviária**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2018. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/handle/1/6522>. Acesso em: 29 jun. 2023.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: fundamentos e aplicações na Engenharia Civil**. São Paulo: Pini, 1998.

GUZMAN, A.; DELVASTO, S.; QUEREDA, M. F.; SÁNCHEZ, E. Valorization of rice straw waste: production of porcelain tiles. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61, n. 360, p. 442-449, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613601939>.

HERRIN, M.; MITCHELL, H. **Mistura de solo-cal**. Rio de Janeiro: IPR, 1968.

HILT, G. H.; DAVIDSON, D. T. Lime fixation in clayey soils. **Highway Research Record**, Washington, n. 262, p. 20-32, 1960. Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbulletin/262/262-002.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2020.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization: principles and practice**. Sidney: Butterworths, 1972.

LIMA, J. S. P.; VICENTE, G. O.; FAGUNDES, L. P.; CABRAL, C. L. B.; CRUZ, F. A.; TASHIMA, M. M. Estabilização física de solo laterítico arenoso utilizando resíduos cerâmicos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 4, e12876, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1176>.

MACHADO, C. C.; PEREIRA, R. S.; PIRES, J. M. M. Influência do tratamento térmico do resíduo sólido industrial (Grits) na resistência mecânica de um latossolo para pavimentos de estradas florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 543-550, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000400015>.

MANSO, E. **Análise granulométrica dos solos de Brasília pelo granulômetro a laser**. 1999. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1999.

MEDEIROS, V. B. R.; CARVALHO, C. M.; LIMA, E. E. P.; SOUSA, S. M. T. Concreto sustentável produzido com resíduo de porcelanato: análise de durabilidade por carbonatação. **Revista Ciência e Tecnologia**, Campinas, p. 17-24, 20 jun. 2018.

OLIVEIRA, E. M.; OLIVEIRA, E. M.; PETERSON, M.; PELISSER, F.; OLIVEIRA, C. M.; ANTUNES, E. G. P. Efeito da adição do resíduo do polimento de porcelanato – RPP na durabilidade de argamassa de revestimento. **Cerâmica Industrial**, v. 23, n. 4, p. 42-49, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2018.013>.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

ROSSO, J.; CUNHA, E. S.; ROJAS-RAMIREZ, R. A. Características técnicas e polimento de porcelanatos. **Cerâmica Industrial**, v. 10, n. 4, p. 11-14, 2005. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587657247f8c9d6e028b46d7>. Acesso em: 29 jun. 2023.

ROTH, C. G.; GARCIAS, C. M. Construção civil e a degradação ambiental. **Desenvolvimento em Questão**, v. 7, n. 13, p. 111-118, 2009. Disponível em: <https://www.revistas.unijui.edu.br/index.php/desenvolvimentoemquestao/article/view/169>. Acesso em: 29 jun. 2023.

SAMPAIO, Z. L. M.; MARTINELLI, A. E.; GOMES, T. S. Formulation and characterization of structural lightweight concrete containing residues of porcelain tile polishing, tire rubber and limestone. **Cerâmica**, São Paulo, v. 63, n. 368, p. 530-535, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633682139>.

SÁNCHEZ, E.; IBÁÑEZ, M. J.; GARCÍA-TEN, J.; QUEREDA, M. F.; HUTCHINGS, I. M.; XU, Y. M. Porcelain tile microstructure: implications for polished tile properties. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 26, n. 13, p. 2533-2540, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2005.06.002>.

SANTOS, P. F.; CALADO, C. R.; SILVA, S. M.; PINHEIRO, I. P. Reuse of waste from polish in the production of porcelain. **Materials Science Forum**, v. 798-799, p. 317-322, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.798-799.317>.

SHERWOOD, P. T. **Soil stabilization with cement and lime**. London: HMSO, 1993. (TRL State of the Art Review).

SKORONSKI, E.; SOUZA, D. H.; SANTOS, S.; CESINO, J. C.; GHISLANDI, M. G. Avaliação das propriedades físicas de revestimentos cerâmicos produzidos com resíduo da indústria cerâmica (cinza pesada de carvão mineral). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 20, n. 1, p. 239-244, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620150001.0024>.

VIEIRA, B. A.; NOGUEIRA, L. Construção civil: crescimento *versus* custos de produção civil. **Sistemas & Gestão**, Niterói, v. 13, n. 3, p. 366-377, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/327403991_Construcao_civil_crescimento_versus_custos_de_producao_civil. Acesso em: 29 jun. 2023.