

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] alexandraamador@gmail.com, ^[2] robson.santos@ifpb.edu.br, ^[3] cinthya.santos@ifpb.edu.br.

Departamento de Construção Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), Campus Cajazeiras, Brasil

* autor correspondente

Resumo

Os problemas ambientais causados pelo descarte de diversos materiais da construção civil e consumo desordenado dos recursos naturais têm se tornado um desafio constante para os administradores, esse cenário inclui, por exemplo, as indústrias que produzem os materiais cerâmicos. Um dos processos que mais produzem resíduos é a etapa de polimento do porcelanato, na qual durante a produção são geradas grandes quantidades de resíduo, composto por restos de cerâmica e substâncias abrasivas utilizadas durante o polimento. Beneficiando-se das características do resíduo, conhecido como Resíduo do Polimento do Porcelanato (RPP), e pensando na diminuição do descarte destes produtos em aterros, é possível encontrar uma alternativa viável para utilização do referido 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 da cal hidratada. Essas adições foram realizadas em um solo silto-argiloso, com pouca plasticidade, compostas de 8% de cal, obedecendo aos métodos de dosagem do *Lime Fiction Point* (LFP) e de Thompson adaptado por Ingles e Metcalf, e em seguida adicionadas à massa do solo 6%, 9% e 12% de RPP. Os materiais e as misturas foram verificados mediante a realização dos ensaios de granulometria, dos limites de Atterberg e da massa específica. Posteriormente, realizaram-se os ensaios de expansão e Índice de Suporte Califórnia (ISC), preparados com a umidade ótima conhecida através do ensaio de compactação Proctor Normal. Dentre todas as combinações, a mistura da cal hidratada com 9% de RPP demonstrou valores significativos, tornando essa adição eficaz para o uso em obras rodoviárias por meio da otimização do solo natural.

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

Subgrade stabilization with addition of lime and porcelain polishing residues

Abstract

The many environmental problems caused by the disposal of several construction materials and disordered consumption of natural resources, have become a constant challenge for administrators, this scenario includes, for example, the industries that produce ceramic materials. One of the processes that most produces wastes is the polishing step of porcelain tiles, where during production large amounts of residue are generated, composed of ceramic remains and abrasive substances used during polishing. Taking advantage of the characteristics of the waste, known as Porcelain Polishing Residue (RPP), and thinking about reducing the disposal of these products in landfills, it is possible to find a viable outlet for the material with its reuse in paving. Therefore, this study seeks to analyze the feasibility of stabilizing subgrade pavement soils through the addition of RPP and hydrated lime. These additions were made in silt-clay soil with little plasticity, composed of 8% lime, following the dosage methods of Lime Fiction Point (LFP) and Thompson adapted by Ingles & Metcalf, and then added to the soil mass 6%, 9% and 12% residue. The materials and mixtures were verified by carrying out the granulometry tests, the Atterberg limits and the specific mass. Subsequently, the expansion tests and the California Support Index (ISC) were performed with the optimum humidity known in the Proctor Normal compaction test. Among all combinations, the mixture of hydrated lime with 9% RPP showed significant values, making this addition effective for use in road works through the optimization of natural soil.

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

1. Introdução

A construção civil possui uma grande influência no desenvolvimento social e econômico, seja na geração de mão de obra e/ou no fornecimento de matérias-primas (VIEIRA; NOGUEIRA, 2018). No entanto, esse setor é um dos grandes responsáveis pelos problemas ambientais existentes, principalmente por possuir um consumo indiscriminado dos recursos naturais para a produção de bens e insumos, e por não portar de um planejamento e gerenciamento dos resíduos oriundos do próprio setor (ROTH; GARCIAS, 2007).

Nesse contexto, a indústria de cerâmica brasileira é uma das que mais se destacam, em virtude da sua grande produção, uma vez que o Brasil é o terceiro maior produtor de revestimentos cerâmicos do mundo, perdendo apenas para a China e Índia, em 2018 (ANFCRLSC, 2019).

Atrelada à elevada produção, tem-se a grande geração de resíduos cerâmicos nos mais diversos segmentos durante o processo produtivo, entre eles se destacam os resíduos de matéria prima e da queima. Esses materiais representam valores significativos quando contabilizados na produção das demais indústrias da área (SKORONSKI *et al.*, 2015). Devido a isso, existem alguns métodos que realizam a reciclagem desses resíduos buscando soluções que conciliem a disposição econômica e o impacto ambiental, especialmente pelas características físico-químicas das matérias-primas das cerâmicas e suas particularidades nas etapas da produção.

Dentre os resíduos produzidos pela indústria da cerâmica, destacam-se os Resíduos do Polimento do Porcelanato (RPP), resultado do desgaste das peças de porcelanato por meio das máquinas polidoras com alta rotação que retiram cerca de 1 mm da superfície de todas as peças, com o intuito de oferecer brilho e extrair todos os defeitos (OLIVEIRA *et al.*, 2018; SANTOS *et al.*, 2014).

O RPP é a combinação entre a argila, feldspato, areia feldspática, e às vezes, caulins, filitos e aditivos (quando necessários) encontrados no material cerâmico, responsáveis pela elevada resistência mecânica e baixa porosidade (ROSSO; CUNHA; ROJAS-RAMÍREZ, 2005). Unido a isso, existe o material abrasivo, fruto do processo de polimento, constituído por carbeto de silício aglomerados por cimento à base de cloretos magnesianos ou partículas de diamante (BERNARDIN *et al.* 2006). A popularização das peças de porcelanato no mercado da construção civil tem crescido bastante, causando preocupações quanto ao descarte da torta, pois esses resíduos devem ser depositados em aterros certificados pelos órgãos públicos, visto 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 como 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 realizar a estabilização das subcamadas dos pavimentos, posto que existem grandes impasses nos órgãos rodoviários brasileiros devido à falta de solo com propriedades adequadas 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 apresentava pavimentação, equivalente a 213.453 km, que apresenta um caráter insatisfatório, 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 o aumento do volume dos modais terrestres, ocorrem déficits na segurança e na eficiência, o que proporciona danos ao poder público e à sociedade.

A fim de solucionar os problemas geotécnicos que surgem no sistema rodoviário brasileiro e aproveitar o solo local da construção sem removê-lo e substituí-lo, são adicionados produtos convencionais como o cimento Portland, a cal e asfaltos artificiais (MACHADO; PEREIRA; PIRES, 2003). Essa adição visa o melhoramento das características do solo, quando este no seu estado natural não atinge os requisitos mínimos para a pavimentação, denomina-se estabilização (ALMEIDA *et al.*, 2018).

A estabilização, especialmente a rodoviária, busca conferir melhoria nas propriedades mecânicas do solo, e que sejam preservadas por um longo período, possibilitando, assim, uma maior durabilidade, devido à diminuição da capacidade expansiva do material quando submetido às variações do teor de umidade (CRUZ; JALALI, 2010). O uso dos solos estabilizados em substituição aos agregados naturais, possibilita vantagens econômicas e ambientais, uma vez que materiais para o uso em rodovias estão cada vez mais escassos e o uso desse método se torna uma das soluções mais

viáveis, pois provoca uma diminuição nos custos da compra, transporte e manutenções rodoviárias (BERNUCCI, 2008; SHERWOOD, 1993;).

Existem diversos estudos na literatura direcionados para a otimização do solo natural durante a execução de obras rodoviárias, como é o caso da cal hidratada, que quando em contato com o solo úmido, ocorre um processo químico que o torna mais friável e proporciona uma diminuição na capacidade de deformação do material, que facilita a sua compactação (HERRIN; MITCHELL, 1968). Ainda há uma lacuna em relação à utilização de resíduos oriundos da própria indústria da construção civil, por esse motivo muitos pesquisadores estão inovando e trazendo soluções com elementos que antes seriam descartados, e que devido às suas características podem ser reutilizados com o intuito de melhorar as características do solo, dentre estes, pode-se mencionar a utilização de telhas e pneus reciclados (AL-BARED; MARTO; LATIFI, 2018), o resíduo do vidro pulverizado (ASTRO *et al.*, 2019), a 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).

Sabendo disso, este trabalho utiliza-se 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. Na sequência, verifica-se o solo pós-adição visando investigar se esse atende aos critérios normativos estabelecidos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT) para esse tipo de atividade e, por fim, identifica a dosagem de materiais que proporcionam a maior capacidade de suporte do solo e a menor expansão.

Assim, serão apresentados de forma detalhada nas seções a seguir inicialmente os materiais e métodos utilizados, bem como a normativa na qual se basearam os ensaios realizados, estes na seção 2. Na seção 3 são apresentados 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%, bem como os resultados dos ensaios de compactação, expansão e CBR (California Bearing Ratio) dessas misturas. Por fim, na seção 4, 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 da realização de ensaios mecânicos: compactação, expansão e CBR.

Estes 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 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 que estes 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 (PB).

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 classificar o material e obter 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 o 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.

Para as adições, o processo foi diferente, onde a cal hidratada não necessitou de nenhum procedimento antes de serem realizados os ensaios, uma vez que suas especificações são fornecidas pelo fabricante. Porém para os resíduos de porcelanato foi necessário determinar as propriedades químicas por meio da espectrometria de fluorescência de raios X, realizada após a secagem na estufa a 105 ± 5 °C e desaglomeração manual com o auxílio da mão de gral, até retirada de todas as partículas maiores.

Na segunda etapa utilizaram-se dois métodos para obtenção da quantidade da cal que forneceria a resistência e a durabilidade adequada ao solo. Assim, foi realizada uma 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 destes critérios utiliza-se 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 plasticidades imediatamente após a adição, com 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 foi acrescentado posteriormente 4% de cal, como o método recomenda, alcançando assim o LFP.

Por fim, foram definidas as umidades ótimas e as massas específicas por meio do ensaio de compactação, com o intuito de determinar a capacidade expansiva e a resistente 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), assim, foram utilizadas 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 verificar a tendência no aumento do desempenho do solo com o acréscimo do percentual de material adicionado.

Durante a realização da compactação foi utilizada a energia normal, seguindo as recomendações da norma ME-164/2013 do DNIT. Para esse processo escolheu-se não reutilizar o material, uma vez que ao adicionar a cal e o resíduo as propriedades do solo são modificadas imediatamente devido às características das adições. 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 leituras a cada 24 horas no extensômetro graduado em 0,01 mm.

Concluído o período de 4 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, que penetra na amostra a uma velocidade de 0,05 pol/min, com o intuito de determinar a tensão necessária para que ocorra a penetração, de acordo com as recomendações da NBR 9895/2016.

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 são descritas nos itens seguintes por meio das tabelas e gráficos experimentais.

Primeiramente foram realizados ensaios de caracterização física do solo sem qualquer adição, respeitando as normativas vigentes para cada procedimento, os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Índices físicos do solo

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%

Fonte: dados da pesquisa

Usando como referência os parâmetros adotados por Caputo (1996) para o índice de plasticidade (IP), considera-se esse solo como fracamente plástico, já que esse possui um IP menor que 7. Quanto a análise granulométrica da amostra, foi realizada por meio do peneiramento e por sedimentação seguindo as recomendações da NBR 6502/2016, na qual o solo apontou as seguintes composições: 0,0% de pedregulho (acima de 2 mm), 31,3% de areia (de 0,06 a 2 mm), 39,2% de silte (de 0,02 a 0,06 mm) e 29,5% de argila (abaixo de 0,02 mm). Assim, verifica-se que o material é predominante fino, pois 98,7% é passante na peneira de n° 200, como indicado na Tabela 2.

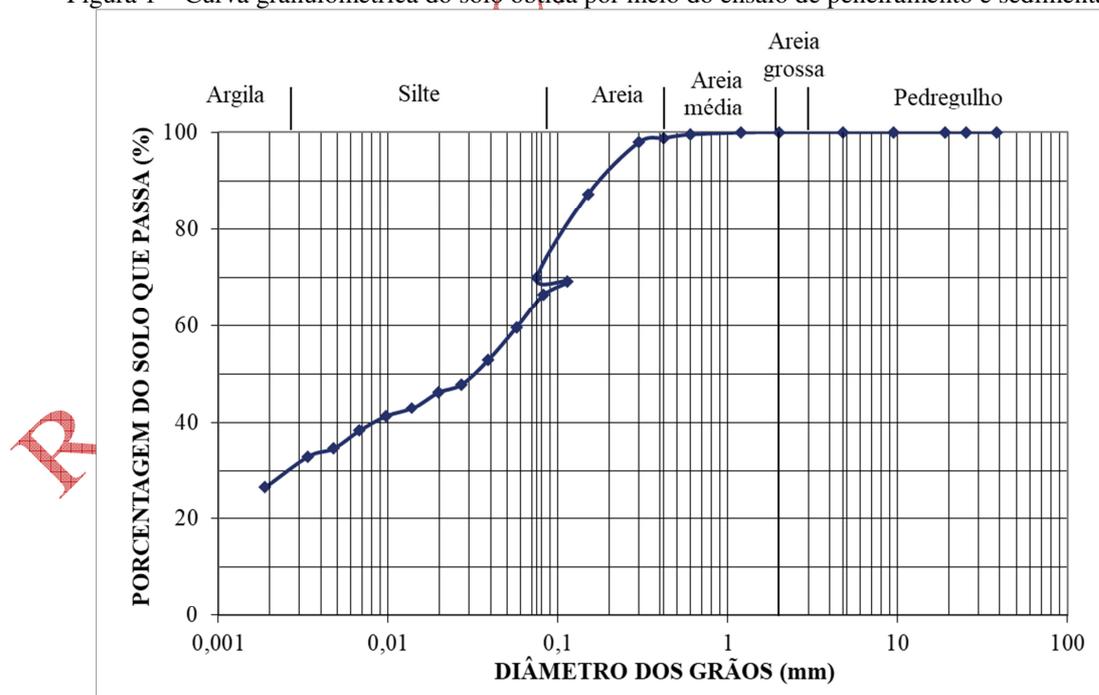
Tabela 2 – Composição Granulométrica (%)

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

Fonte: dados da pesquisa

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 permitido definir os índices granulométricos, pois o coeficiente de uniformidade (CU) e o coeficiente de curvatura (CC) não obtiveram 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, pois os argilominerais presentes em cada fração granulométrica produzem óxidos com características cimentantes, que pode interferir na desagregação com a ajuda do defloculante (MANSO, 1999).

Através desses resultados, realizou-se a classificação do solo, apresentada na Tabela 3, de acordo com os sistemas TRB (Transportation Research Board) e SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos), posto que, a classificação TBR 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.

Tabela 3 – Classificação do solo natural por meio dos métodos TRB e SUCS

Material	TBR	SUCS
Solo	A-4	ML

Fonte: dados da pesquisa

Assim, o solo natural se apresenta como um A-4, conforme a classificação TBR determina, isto é, um silte não plástico ou moderadamente plástico, podendo também ser uma mistura entre o silte, areia e pedregulho. E para o 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), esse solo apresenta um comportamento fraco a pobre para utilização em qualquer camada de um pavimento, mesmo no subleito.

Para o resíduo oriundo do polimento do porcelanato realizou-se o ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), para obtenção da composição química desse material, apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição química do RPP por meio do ensaio de fluorescência de raios X

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

Fonte: dados da pesquisa

Analisando a Tabela 4, 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, o resíduo atende a um dos itens que caracteriza um material pozolânico, uma vez que a união entre SiO₂, Al₂O₃+Fe₂O₃ é superior a 70% (83,753%). Essa propriedade produz, normalmente, a melhoria da resistência mecânica (CARMO; PORTELLA, 2008).

3.2 Definição da porcentagem da cal

Os ensaios do solo o caracterizaram como silto-argiloso, assim, foram analisadas as adições de 2 a 4% de cal no solo, teores dados pelo o método Thompson adaptado por Ingles e Metcalf (1972),

observando qual porcentagem apresenta o maior valor de plasticidade. Para cada teor foram utilizadas 3 amostras e assim realizadas as 7 verificações conforme o intervalo de tempo, como o método Lime Fiction Point (LFP) (Hilt; Davidson, 1960) exige, dessa forma esse ensaio foi realizado 315 vezes para a obtenção dos resultados a seguir.

Dos valores encontrados, calculou-se a média aritmética e com esses números foi possível determinar o teor de cal. A Tabela 5 apresentada os limites de plasticidades médios para teor de cal nos intervalos de tempo.

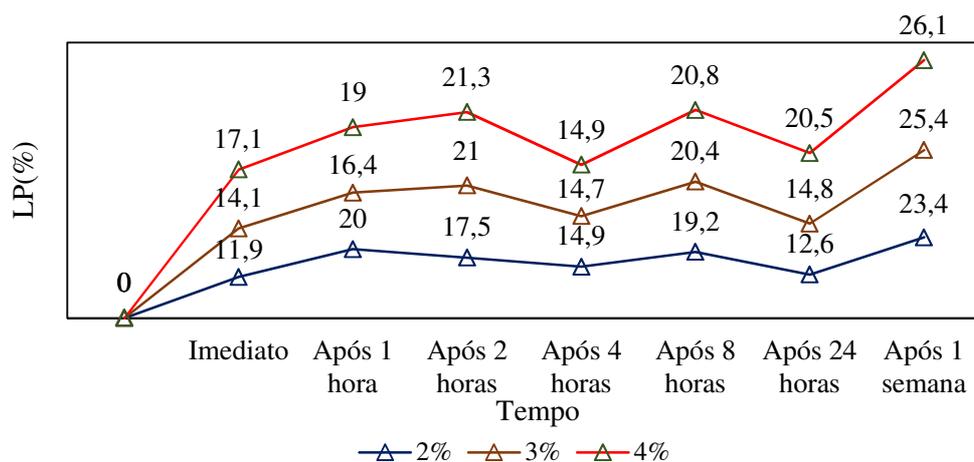
Tabela 5 – Média dos limites de plasticidade para determinação do LFP

% 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

Fonte: dados da pesquisa

Pelo o 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 neste trabalho são acrescentados 4% ao teor de LFP, como a metodologia estabelecida por Hilt; Davidson (1960), obtendo assim uma adição de 8%.

3.3 Efeitos físicos das composições

Após a definição da porcentagem da adição da cal (8%), calculado na subseção 3.2, foram realizados os mesmos ensaios físicos do solo natural nas composições. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Índices físicos das composições de solo + cal e solo + cal + RPP

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

Fonte: dados da pesquisa

Percebe-se um aumento na massa específica em todas os níveis de adições, até mesmo na composição apenas 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, podem-se explicar os acréscimos na ρ (massa específica) às dimensões dos grãos, que são menores, dessa forma pode-se afirmar que as composições geraram misturas mais empacotadas, que diminui os vazios da mistura.

Os índices de plasticidade das composições diminuíram, atrelado a isso aconteceram aumentos nos limites de plasticidade, esses resultados estão coerentes com as observações de Guimarães (1998). O autor relaciona essas mudanças físicas com a troca iônica que acontece imediatamente após o contato que gera o aumento do limite de plasticidade.

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, quando relacionados com a amostra anterior, o que torna 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 a análise granulométrica das adições, percebem-se acréscimos na quantidade de argila das amostras, enquanto a quantidade de silte e areia diminui, fato que se deve a 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, isso está relacionado ao solo natural não ser totalmente coesivo.

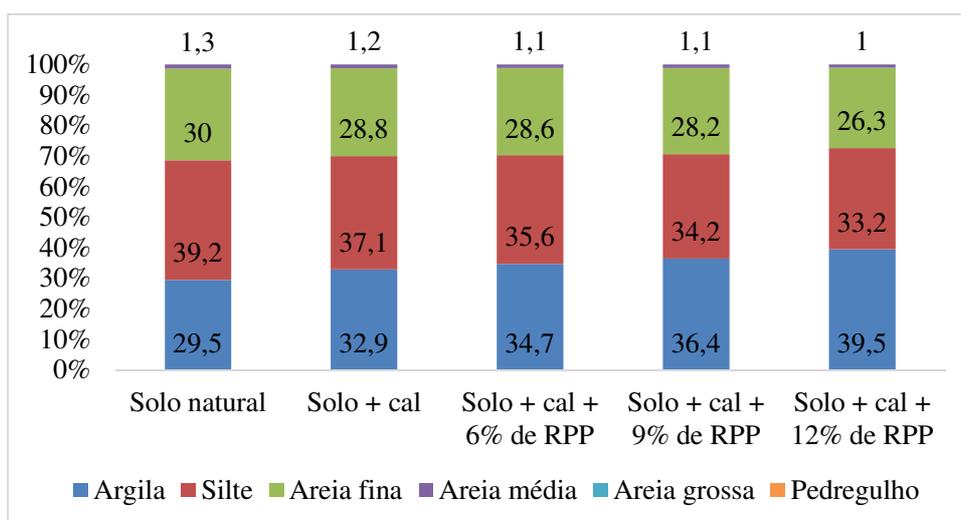
Tabela 7 – Resultados do ensaio de granulometria para as composições

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

Fonte: dados da pesquisa

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, a cal e o 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 da 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 solo natural. Diante dos valores encontrados para as adições de 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 Tabela 8.

Tabela 8 – Massa específica seca máxima e umidade ótima dos ensaios de compactação

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

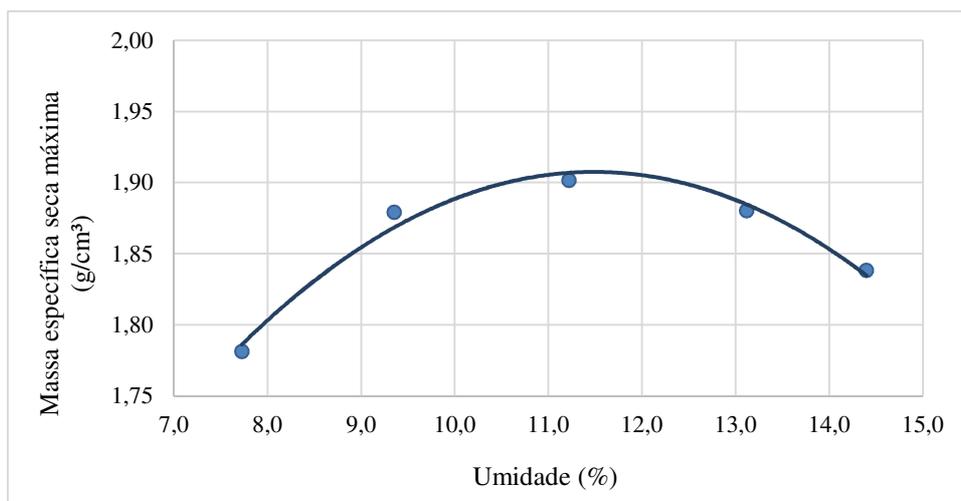
Fonte: dados da pesquisa

Percebe-se um aumento da umidade ótima em todos os casos quando comparadas com o solo natural, isso ocorre 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 assim a floculação (FERREIRA *et al.*, 2017), comportamento similar ao produzido por Al-Swaidani *et al.* (2016).

A massa específica diminui apenas na adição da cal hidratada, aproximadamente de 1%, semelhante ao trabalho desenvolvido por Alcantara *et al.* (2017), que teve uma redução de aproximadamente 2%. No entanto, houve aumento em todas as combinações que receberam o resíduo, quando comparada 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 um acréscimo 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 foram divididas de acordo com as adições realizadas. O primeiro caso exposto na Figura 4 é a amostra do solo sem adição.

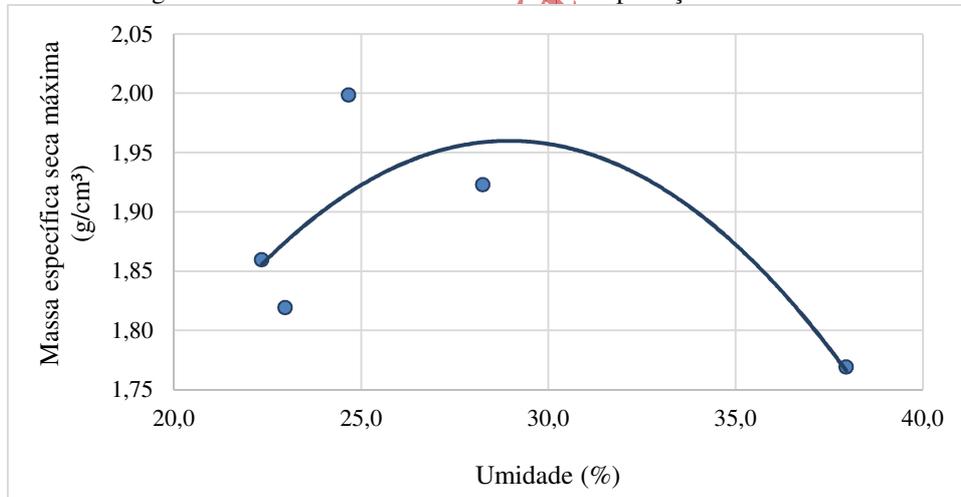
Figura 4 – Curva resultante do ensaio de compactação do solo natural



Fonte: dados da pesquisa

A curva de compactação do solo natural se comporta como Pinto (2011) descreve os solos siltes-argilosos, com uma massa específica menor que 2 g/cm^3 e uma umidade ótima maior que 10%. Ainda se percebe que essa não ultrapassa a curva de saturação, e segundo Caputo (1996), esse comportamento se deve ao fato de que o processo de compactação não conseguiu expulsar todo ar aprisionado, com a curva de saturação correspondendo 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, como é apresentada na Figura 5.

Figura 5 – Curva resultante do ensaio de compactação do solo + cal

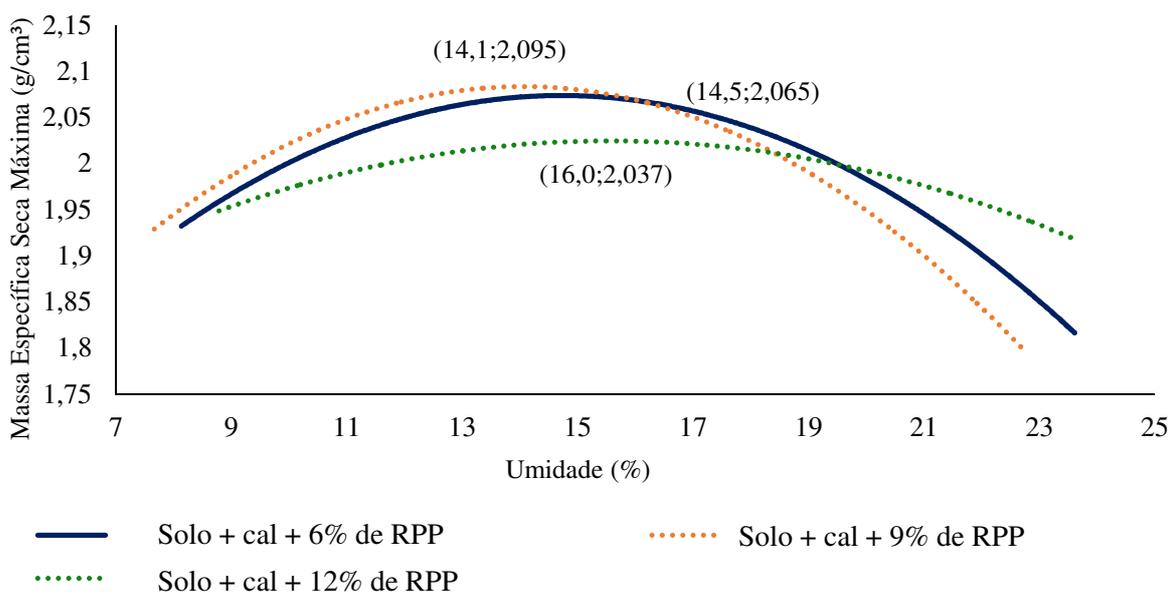


Fonte: dados da pesquisa

Quando o solo recebeu a cal hidratada houve um aumento de aproximadamente 2,47% no teor de umidade ótima. Isso se deve a necessidade de preencher os vazios gerados devido à aglomeração das partículas. Já a massa específica seca passou de $1,906 \text{ g/cm}^3$ (solo natural) para o valor de $1,889 \text{ g/cm}^3$, com a adição da cal.

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

Figura 6 – Curva resultante do ensaio de compactação do solo + cal + RPP



Fonte: dados da pesquisa

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 0,075mm. Resultado semelhante ocorreu na pesquisa de Sampaio, Martinelli e Gomes (2017), em que esses autores puderam perceber que a taxa de vazios foi reduzida depois da adição do resíduo do polimento do porcelanato. Contudo, esse acréscimo na $\rho_{dmáx}$ não é contínuo, pois a adição de 12% sofre uma redução em relação à de 9%, que por sua vez aumenta quando comparada com a anterior, 6%. Dessa forma pode-se afirmar 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 em compactação, porém, no processo de moldagem das amostras do ensaio foram realizadas as análises dos teores de umidade novamente (h_{mold}), com o intuito de verificar se as mesmas condizem com os valores de h_{ot} , como mostra a Tabela 9.

Tabela 9 – Análise do desvio padrão dos teores de umidade

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

Fonte: dados da pesquisa

Os teores de umidade para os corpos de prova moldados possuem desvios padrões pequenos, o que tornam estes resultados semelhantes aos obtidos nos ensaios de compactação.

Depois de realizar a moldagem, as amostras foram inundadas com a intenção de conhecer sua capacidade expansiva e de suporte, para que assim fosse analisada a viabilidade de incorporação dos materiais na pavimentação. A Tabela 10 expõe os resultados encontrados.

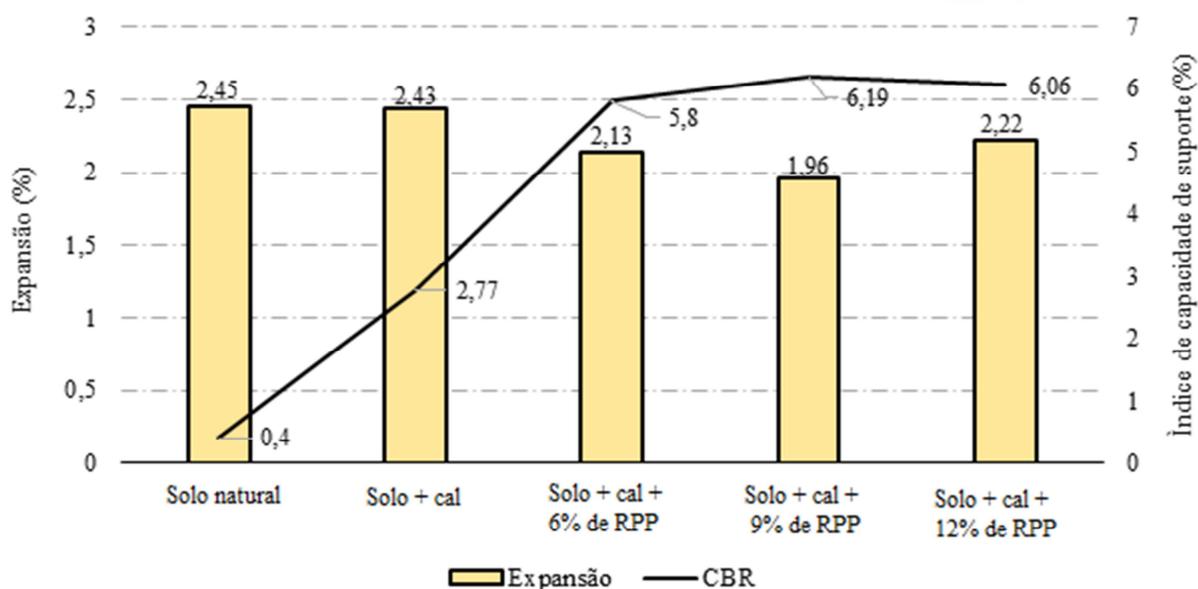
Tabela 10 – Resultados das composições para a expansão e o CBR

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

Fonte: dados da pesquisa

Diante dos valores obtidos é possível concluir que a expansão das composições apresentaram 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 possui 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 o 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 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 deste trabalho está semelhante à pesquisa de Germano e Arns (2018), que analisou a ação do resíduo até os 9%. O aumento da expansão na adição de 12% de RPP significa que a mistura com a cal hidratada atingiu o valor máximo que o solo suporta sem formar poros, que podem ser causados pelo borbulhamento da fase líquida e a liberação de gases do resíduo.

De acordo com as especificações do DNIT (2006), os CBR das adições podem ser aplicados no subleito, pois apresentam valores maiores que 2%. Porém, ao se analisar a expansão, apenas a combinação da cal e 9% do resíduo do polimento do porcelanato pode ser empregado, já que esta foi a única que possuiu 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, que possui uma produção 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 do 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 ótima, de modo que o ponto máximo destes ensaios foi a adição de 9% de RPP com a cal hidratada.

Com todos os dados obtidos nessa 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, comprovado pelos os resultados dos 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, tendo os melhores resultados com a 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 nessa pesquisa. E ainda, ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba Campus Cajazeiras – PB, Universidade Federal da Paraíba (Laboratório de Materiais Cerâmicos) e a Faculdade Santa Maria por disponibilizar os equipamentos para realização dos ensaios.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Nota

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

Referências

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

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

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 2016.

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

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: Solo – Índice Suporte Califórnia, Rio de Janeiro, 2016.

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>.

ALCANTARA, 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 J.)**, 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. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2318-3055.2019.001.0002>.

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>.

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

BERNARDIN A. M.; FELISBERTO, D. S.; DAROS, M. T.; RIELLAB, H. G. Reaproveitamento de resíduos de polimento e da 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. 330, 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 J.)**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, e12356, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0671>.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. **Relatório gerencial**: Pesquisa CNT de rodovias 2019, CNT: SEST SENAT, Brasília, 2019. Disponível em: <http://repositorio.itl.org.br/jspui/handle/123456789/322>. Acesso em: março de 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. **DNIT 164/2013 – ME: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio**, Rio de Janeiro, 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: março de 2020.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. 3 ed, Rio de Janeiro, 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: março de 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 J.)**, 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**. IPR: Rio de Janeiro, 1968.

HILT, G. H.; DAVIDSON, D. T. **Lime fixation in clayey soils**. Highway Research Record, Washington, p. 20-32, 1960. Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbulletin/262/262-002.pdf>. Acesso em: março de 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 J.)**, 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**. (Dissertação de Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 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 do 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, 2011.

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, 2011. Disponível em: <https://www.revistas.unijur.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/10.1590/0366-69432017633682139>.

SÁNCHEZ, E.; IBANEZ, M. J.; GARCIA-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. 131, 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**: state of the art review. TRL: London, 1993.

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). **Revista Matéria**, 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. DOI: <https://dx.doi.org/10.20985/1980-5160.2018.v13n3.1419>.

Revista Principia - Early View