



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE**

**MELHORAMENTO DE SOLO EXPANSIVO COM CIMENTO E
POLITEREFTALO DE ETILENO (PET) MICRONIZADO**

Letícia Agra Mendes Ramalho

Campina Grande – PB

2019

MELHORAMENTO DE SOLO EXPANSIVO COM CIMENTO E POLITEREFTALO DE ETILENO (PET) MICRONIZADO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à coordenação do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia

Orientadora: Prof. D.Sc. Carina Silvani

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, minha fé nunca foi tão forte quando nesses 5 longos anos. Sem Ele não sou nada! Nossa Senhora, por toda a interseção, pelo amor de mãe, por sempre me prestar socorro em todos meus momentos de desespero.

A minha família, por todo o amor, o apoio. Se eu cheguei até aqui foi por conta de vocês. Ao meu pai, minha razão de viver, literalmente o meu alicerce, nunca me deixou faltar nada, em momento algum. Minha primeira e eterna inspiração, é um sonho poder dividir essa profissão com o senhor, sempre tão preocupado e cheio de amor e orgulho, obrigada por todas as aulas no começo do curso, por me apoiar e por ser esse pai tão maravilhoso. A minha madrastra por acreditar em mim, por se orgulhar e por todas as orações a mim destinadas. A minha irmã Luana, minha eterna lembrança da nossa querida mãe, minha união desde o dia que nasceu para sempre, obrigada pela preocupação, pelas defesas ferrenhas quando me via chorar por qualquer coisa do curso, por querer processar até o reitor se isso me fizesse mal, por aguentar meus dramas, por me apoiar sempre que precisei, és a caçula de Leda, não poderia ser mais feliz por ter você como irmã. Aos meus queridos caçulas, luzes da minha vida, Laura e Romerinho, que são sempre uma dose de alegria e calmante em momentos de agonia, a inocência e a esperteza de vocês me inspiram. Ao meu cunhado por todas as caronas e por se fazer presente em nossa família. Sem vocês eu não seria o que sou hoje, a caminhada teria sido muito pior, obrigada família tão amada!

A minha querida orientadora, Prof. D.Sc. Carina Silvani, por todos os ensinamentos, pela paciência e até mesmo pela confiança. Por parar minutos ou até horas do seu dia para me ajudar, me orientar neste trabalho e até nas correrias da vida de graduanda. Pela preocupação constante com minha saúde e minhas agonias. A senhora sou eternamente grata, professora.

Aos meus mestres por todo o conhecimento e o incentivo, a aqueles que sempre mostraram empatia pela situação de nós, meros estudantes.

Aos meus amigos por toda a compressão, pela ajuda nos pedidos de socorro mais urgentes, por compartilhar das agonias e dos medos juntos.

E para finalizar, agradeço ao meu anjo, a mulher que olha por mim todos os dias do céu, minha amada e ETERNA mãe, Leda, por ter me criado tão bem, por ter me feito tão estudiosa, por todas as vezes que sentou comigo para estudar e de certa forma me mostrar que caminho trilhar. Amor de mãe é único e só Deus sabe o quanto eu sinto sua falta e sentirei todos os dias. Meu maior orgulho é poder dizer que sou sua filha e saber que tenho um pedaço enorme de você em mim. Te amo!

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos Gerais	11
1.2	Objetivos Específicos	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	Métodos de Melhoramento de Solos	13
2.1.1	Estabilização Química	13
2.1.2	Estabilização Solo-Cimento	14
2.1.3	Estabilização solo-cimento e resíduos.....	16
2.2	Politereftalato de Etileno – PET	17
2.2.1	Utilização de PET na Engenharia.....	18
3	MATERIAIS	23
3.1	Solo	23
3.2	Cimento CP-V ARI.....	23
3.3	Politereftalato de Etileno – PET	24
3.4	Água.....	25
3.5	Definição das variáveis	25
3.5.1	Variáveis controláveis	25
3.5.2	Variáveis fixas	26
3.5.3	Variáveis de resposta	27
4	METODOLOGIA	28
4.1	Ensaio de Caracterização.....	28
4.2	Preparação das Misturas, Moldagem e Cura dos Corpos de Prova para Ensaio de Compressão Simples.....	29
5	RESULTADOS	32
5.1	Comparativo entre Diferentes Materiais de Substituição	34
5.2	Comparativo Geral com Diferentes Estabilizantes Químicos e Materiais de Substituição com Base nas Pesquisas Realizadas com o Mesmo Solo Expansivo.....	35
5.3	Comparativo entre os Resultados do PET no Solo e no Concreto/Argamassa.....	37
6	CONCLUSÃO	38

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Previsão de quantidade de cimento em função do tipo de solo.....	15
Tabela 2 - Evolução do consumo de PET no Brasil	18
Tabela 3 - Limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos.....	24

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Reação química para formação do politereftalato de etileno (PET).....	17
Figura 2 - Resultados referentes a compressão simples devido a adição de PET em peças de concreto para uso em pavimentos.....	19
Figura 3 - Resistência a compressão simples com 5% de PET	20
Figura 4 - Resistência a compressão simples com 10% de PET	20
Figura 5 - Curvas granulométrica do solo 1 estudado, antes e após mistura com a areia de PET, respectivamente.	22
Figura 6 – Solo utilizado	23
Figura 7 - PET micronizado utilizado	25
Figura 8 - Escolha dos pontos de umidade e peso específico seco para pesquisa.....	27
Figura 9 – fluxograma das variáveis que foram fixadas para realização dos ensaios	28
Figura 10 - Solo expansivo já misturado com o cimento e o PET	30
Figura 11 - Compactação do corpo de prova.....	30
Figura 12 – Desmolde do corpo de prova	30
Figura 13 - Corpo de prova no início do ensaio	31
Figura 14 - Corpo de prova após ser rompido.....	31
Figura 15 - Relação da resistência com a variação da porcentagem de PET	33
Figura 16 - Comparativo das resistências para os materiais PET e Resíduo do polimento de rochas.....	34
Figura 17 - Comparativo geral entre os materiais de substituição e estabilizantes químicos utilizados na estabilização do solo expansivo em estudo.....	36

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Caracterização física do PET micronizado	22
Quadro 2 – variáveis controláveis	24
Quadro 3 – variáveis fixas.....	24
Quadro 4 – Ensaio de caracterização do solo.....	26
Quadro 5 – Resultados dos corpos de prova ensaiados.....	30
Quadro 6 – Resultados da pesquisa solo-expansivo cimento.....	31
Quadro 7 – Resultados da estabilização solo-cimento-resíduo de rocha	32
Quadro 8 – Resultados da estabilização com cal	33

RESUMO

O presente trabalho aborda o método de estabilização químicas de solos. Essa técnica baseia-se na adição de um aglomerante ao solo, que não possui as propriedades adequadas para uso na construção civil, no intuito de melhorá-lo. Dentre os estabilizantes mais usados, tem-se o cimento que ao ser incorporado ao solo resulta em melhores valores de resistência e rigidez. Entretanto, há na atual conjuntura ambiental um grande incentivo para uso de resíduos industriais na construção civil. O PET micronizado é um material que pode potencializar a estabilização com cimento. Portanto, este trabalho objetiva estudar o comportamento de um solo expansivo ao ser estabilizado com cimento e PET Micronizado assim como, promover um comparativo entre esta técnica e a estabilização apenas com cimento e apenas com cal. O solo utilizado foi coletado do município de Paulista-PE e foi estabilizado com adições de 30%, 40% e 50% de PET Micronizado. O teor de cimento e o peso específico seco foram fixados em 6% e 15 kN/m³, respectivamente. Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples após 6 dias de cura em câmara úmida e 1 dia de cura submersa, para minimização da sucção. A resistência a compressão simples da mistura cimento-PET Micronizado-solo expansivo aumenta linearmente com o aumento do teor de PET de micronizado, tornando-a uma alternativa sustentável de estabilização de solos.

Palavras-chave: Estabilização de Solo, PET, Geotecnia Sustentável.

ABSTRACT

The present article addresses the method of chemical stabilization of soils. This technique is based on the addition of a binder to the soil, which does not have the properties suitable for use in construction, in order to improve it. Among the most used stabilizers, there is cement that when incorporated into the soil results in better strength and stiffness values. However, in the current environmental environment there is a great incentive for the use of industrial waste in civil construction. Micronized PET is a material that can enhance stabilization with cement. Therefore, this work intent to study the behavior of an expansive soil when it is stabilized with cement and Micronized PET to develop a comparison between this technique and stabilization with cement and lime only. The soil used was collected from the city of Paulista-PE and stabilized with 30%, 40% and 50% additions of Micronized PET. Cement content and dry specific weight were set at 6% and 15 kN / m³, respectively. Simple compressive strength tests were performed after 6 days of wet chamber cure and 1 day of submerged cure to minimize suction. The simple compressive strength of the Micronized PET-Expansive Soil-Cement mixture increases linearly with increasing micronized PET content, making it a sustainable soil stabilization alternative.

Keywords: Soil Stabilization, PET, Sustainable Geotechnics.

1 INTRODUÇÃO

A geotecnia pode ser definida como um ramo da engenharia que estuda o comportamento dos solos, este tem bastante variabilidade com relação as suas características, tornando-o um material de comportamento complexo.

O solo expansivo quando umedecidos apresentam um aumento de seu volume, acabando por trazer instabilidade volumétrica à construção. Segundo Nelson & Miller (1992) Nos EUA, danos causados pelos solos expansivos em edifícios e infraestruturas excede 15 milhões de dólares anualmente. A Sociedade Americana de Engenheiros Civil estima que uma em cada quatro casas tem alguns danos causados por solos expansivos.

Já no Brasil, não se tem uma estimativa dos danos causados pelos solos expansivos. Estes estão presentes em diversas regiões, são elas: Sul, Centro Sul, Norte e Nordeste. Inclusive, em Pernambuco, estado próximo a Paraíba, este se torna um problema nos projetos.

A crescente característica humana de expansão torna necessária a utilização do solo mesmo que suas propriedades não sejam as ideais para o projeto. As fundações profundas e a substituição do material de baixa qualidade por um de boa qualidade, tornam-se uma alternativa para estes tipos de situação, porém com orçamentos mais altos, essas soluções acabavam por inviabilizar a construção.

Em meio a alternativas que envolvem custos elevados ou presença de instabilidade nos projetos, as técnicas de melhoramento de solo se tornam um caminho mais viável, pois evita o descarte da matéria prima dos projetos geotécnicos. Estas técnicas usualmente levam em consideração tanto a utilização de aglomerantes de solo, como materiais cimentantes; como a cal e o cimento, e também a utilização de técnicas como compactação dos solos.

Segundo Cruz (2004) a estabilização de solos visa sobretudo a melhoria das suas propriedades mecânicas e a manutenção de suas características ao longo do tempo.

O termo sustentabilidade é uma preocupação principalmente no que diz respeito a engenharia, principalmente quando se buscam formas de evitar o desperdício de matéria prima e finita. As técnicas de estabilização de solos também surgem como uma ramificação da engenharia sustentável, quando se utilizam outros tipos de aglomerantes, principalmente aqueles que se encontram em abundancia e prejudicam o meio ambiente. Inserir esse tipo de materiais em soluções geotécnicas traz um incentivo ao descarte correto, bem como um maior controle quanto a sua produção e reciclagem.

O politereftalato de etileno, PET, é um dos materiais mais utilizados no mundo, segundo Sousa, Moura & Fernanes (2012), no Brasil, em 2011 consumiu-se 514000 toneladas de resina

PET na fabricação de embalagens, destas mesmas embalagens, cerca de 53% não possuem o destino correto e acaba por afetar o meio ambiente.

Vieira (2018) apresentou, que em Campina Grande – Paraíba, 13,2% do peso total de resíduos presentes no aterro sanitário da cidade é composto por plástico. Já no que se trata a volume, este mesmo material apresenta 32,7%, quase metade do volume total dos resíduos do aterro.

Considerado que o plástico não é um resíduo e sim um material reciclável, essa quantidade de material poderia estar sendo distribuída nas unidades de coleta de reciclagem, trazendo uma diminuição significativa na quantidade de material aterrado, aumentando a vida útil dos aterros sanitários.

As soluções de engenharia sustentável trazem uma esperança com relação à conscientização e o incentivo ao descarte correto dos resíduos. A utilização do PET micronizado, um dos tipos de PET reciclado, acaba se tornando uma solução como aglomerante, trocando o solo comumente utilizado, por um material reciclado.

Este vem sendo utilizado buscando melhorias em diversas áreas da engenharia civil, como nas características do concreto, seja em concreto pré-moldados e nas demais formas de utilização deste; no uso de argamassas e suas alterações em relação ao traço, o uso também em correções granulométricas. Implicando o incentivo às pesquisas com aditivos reciclados.

Em meio as alternativas sustentáveis na área geotécnica, serão utilizadas as técnicas de melhoramento de solos através da adição de cimento e de PET em sua forma micronizada a um solo expansivo.

1.1 Objetivos Gerais

Avaliar a resistência a compressão simples de solo-cimento utilizando o PET como material que substitui uma fração do solo;

1.2 Objetivos Específicos

- Analisar a resistência a compressão simples de misturas de solo expansivo-cimento com diferentes teores de PET;
- Comparar as resistências a compressão simples das misturas solo expansivo-cimento-PET, solo expansivo-cimento e resíduo do polimento de rochas ornamentais, solo expansivo-cimento e solo expansivo-cal;

- Comparar as resistências a compressão simples da estabilização do solo expansivo-cimento-PET com outras soluções de engenharia envolvendo o cimento: concreto para pavimento e argamassa;
- Avaliar a solução mais adequada à estabilização de solos dentre as avaliadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Métodos de Melhoramento de Solos

A maior parte das obras de engenharia civil descarregam suas cargas, permanentes e de utilização, no solo. Quando encontrado com capacidade de carga baixa e alta deformabilidade, as alternativas para que seja utilizado sem que haja desperdícios ou maiores gastos ainda são escassas.

Casagrande (2001) e Cruz (2004), define que as técnicas de reforços de solos são bem difundidas, com a utilização de processos físicos, químicos ou mecânicos que visam o aumento da resistência e a diminuição da compressibilidade e permeabilidade dos maciços.

Estas técnicas, consideradas como melhoramento de solo ou estabilização de solos, podem ser definidas como a maneira de alterar as características do solo existente de maneira a melhorar o seu comportamento, tornando-o capaz de responder de forma satisfatória às solicitações previstas em projeto. A estabilização destes solos visa sobretudo a melhoria das suas propriedades mecânicas e a manutenção das suas características ao longo do tempo (durabilidade).

Os métodos existentes para a estabilização de solos não são adequados para todos os tipos de solos, podendo ser divididos em três grupos, ainda segundo Cruz (2014):

- Estabilização mecânica em que se procura melhorar as características dos solos através de uma melhor organização das suas partículas sólidas e/ou recorrendo a correções da sua composição granulométrica.
- Estabilização física em que as propriedades dos solos são alteradas através do uso do calor e da elasticidade
- Estabilização química em que as características dos solos são modificadas através de aditivos.

2.1.1 Estabilização Química

Dias (2012) descreveu a estabilização química no procedimento onde pode ser utilizados vários tipos de aditivos químicos, onde as partículas do solo são aglutinadas através de reações químicas.

Fernandes *et al.* (2010), mostrou as principais vantagens conseguidas através da estabilização de solos com aditivos químicos, os ligantes hidráulicos estão relacionados com a redução do índice de plasticidade, bem como com o aumento da trabalhabilidade resultante de

evoluções granulométricas, tornando o material mais granular, garantindo o aumento da rigidez a médio/longo prazo.

Guérios (2013) realizou um estudo de melhoramento de solo por estabilização química, onde utilizava a cal hidratada como agente químico. Neste, a porcentagem de 10% de cal hidratada na mistura garantiu um aumento de tensão máxima de 1,5Mpa para 3,2Mpa, aumentando aproximadamente 100% da resistência do solo. Essa mistura também permitiu que o solo apresentasse aumento da resistência ao cisalhamento, melhor trabalhabilidade, maior coesão, maior teor de umidade ótimo, um menor peso específico e o aumento da densidade relativa dos grãos da amostra.

Utilizando a adição de cimento como estabilização química, Macedo (2004) utilizou amostras de um solo de João Pessoa, na Paraíba. O solo puro no ensaio de resistência a compressão simples, apresentava uma resistência de 0,37Mpa. Nos teores acima de 2% de cimento na mistura, esses aumentos de resistência variam de aproximadamente 100% até cerca de 900% do valor inicial. O solo com teor de cimento de 11% apresentou uma resistência de 3,13Mpa.

2.1.2 Estabilização Solo-Cimento

O conceito básico de solo cimento foi definido por Rojas (2015) como o produto endurecido resultante da cura de uma mistura compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem.

Segundo Ingles & Metcalf (1972) sempre que não se dispõe de um material ou combinação de materiais com as características de resistência, deformabilidade, permeabilidade ou durabilidade adequadas ao projeto poderá utilizar-se o solo-cimento, dentre as diversas técnicas de estabilização. E que a adição de pequenas quantidades de cimento (até 2%) modificará as propriedades do solo, enquanto maiores quantidades irão alterar radicalmente suas propriedades.

Estes preveem, na Tabela 1 a quantidade de teor de cimento para um determinado tipo de solo.

Tabela 1 - Previsão de quantidade de cimento em função do tipo de solo.

TIPO DE SOLO	PORCENTAGEM A SER ADICIONADA
Pedra finamente britada	0,5 a 2
Pedregulho areno-argiloso bem graduado	2 a 4
Areia bem graduada	2 a 4
Areia mal graduada	4 a 6
Argilo-arenosa	4 a 6
Argila-siltosa	6 a 8
Argila	8 a 15

FONTE: Adaptado Ingles & Metcalf

Vários são os fatores que influenciam na resistência dos solos cimentados, Porbaha *et al.* (2000) cita estes fatores:

- Propriedades físico-químicas do solo: mineralogia, granulometria, teor de umidade, teor de matéria orgânica e pH;
- Tipo e quantidade do agente cimentante, presença de adições e relação água – cimento;
- Condições de compactação, mistura e cura;

Para o uso da técnica de solo-cimento, Minguela (2007) explica que qualquer tipo de solo pode ser tratado com cimento, desde que a mistura atinja as resistências exigidas, excluindo apenas os solos com elevado teor de matéria orgânica e sulfatos, materiais estes que afetam a resistência e a durabilidade. Uma maior eficiência é observada em solos arenosos, pela facilidade de mistura e pelas maiores resistências obtidas.

Vitali (2008) classifica a combinação de solo-cimento como um material estrutural em que a porcentagem de cimento é suficiente para conferir determinadas propriedades mecânicas e de durabilidade às misturas, depois de compactadas com um determinado teor em água que garanta a hidratação do cimento. Acrescenta que também deva se considerar a importância de que o solo possua uma fração mínima de finos para que apresente uma maior estabilidade estrutural, uma vez o solo não deve alterar sua estrutura durante a execução. Uma porcentagem mínima de finos evita dificuldades durante a compactação e bem como elevadas porcentagens de cimento.

Segundo Sandroni & Consoli (2010) as amostras de solo-cimento devem ser primeiramente submetidas a ensaios de compactação, utilizando-se a energia adequada para se

obter maior grau de compactação. Além disso, o material deve passar por um período de cura para promover o endurecimento da mistura e ser submetida posteriormente ao ensaio de compressão simples, de forma a avaliar os avanços de resistência mecânica e durabilidade.

Para a escolha dos teores de cimentos a serem adicionados na mistura de solo, Rosa (2009) descreve que a engenharia não dispõe de uma dosagem de cimento baseada em critérios racionais, mesmo após tantos anos de utilização e pesquisas sobre a mistura de solo estabilizado, as normas desenvolvidas recomendam que seja moldado uma série de corpos de prova com teores de aditivo variados, e através de uma interpolação dos resultados obtidos se chegue ao teor ideal.

2.1.3 Estabilização solo-cimento e resíduos

Com o intuito de otimizar as alternativas de estabilização de solos, bem como a diminuição do uso do cimento, pesquisadores utilizam resíduos afim de testar o desempenho do solo nestas condições.

Freire & Milani (2004) pesquisaram a estabilização de solo-cimento com o aditivo de cinza da casca de arroz. Os objetivos iniciais eram a diminuição do uso de cimento na mistura. Os resultados mostram que a massa específica aparente seca máxima, a resistência à compressão simples e a tração na compressão diametral das composições de solo-cimento-casca de arroz, decresceram com o aumento do teor de casca de arroz. Já os valores de umidade ótima e absorção d'água elevaram-se, conforme o acréscimo do teor de casca de arroz. Os valores de resistência mecânica foram sempre maiores aos 28 dias do que aos 7 dias, o que demonstrou que o aumento da resistência era consequência de um maior tempo.

Pereira (2012) utilizou como resíduo, as cinzas de lodo resultado de esgotos calcificados, o solo utilizado tinha como finalidade a utilização em pavimentos. A adição das cinzas foi feita nos percentuais de 5%, 10%, 20% e 30%. O aumento da resistência a compressão simples no solo foi observado em todos os traços que continham as cinzas, apresentando um aumento de 25,87% na resistência do solo em relação ao traço de referência.

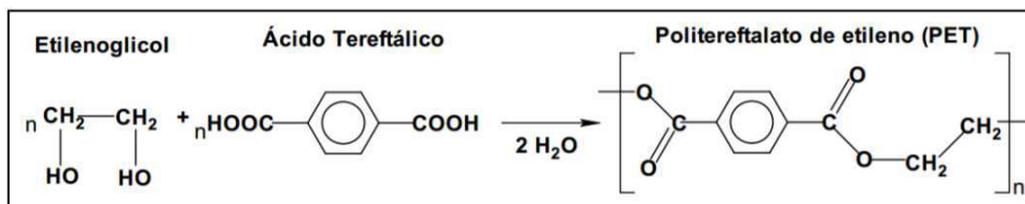
Aguiar (2019) utilizou o resíduo de rochas ornamentais como material de substituição no estudo de um solo expansivo com cimento, nesta pesquisa os resultados indicaram que o resíduo de mármore é capaz de promover maior resistência ao solo conforme se eleva seu teor comparando-se com um solo estabilizado apenas com cimento. Observou-se um aumento de 30 kPa ao adicionar 30% de resíduo à mistura solo-cimento.

Franck *et al.* (2019) realizou um estudo de solo-cimento com os resíduos de escória de chumbo, foram definidos dois traços para o estudo de solo-cimento-resíduo com valores correspondentes a 2,5% e 5% de escória de chumbo, combinado a 15% de cimento Portland CPV ARI sobre a massa de solo seco, em períodos de cura variados, bem como a diferentes temperaturas. A incorporação do resíduo escória de chumbo teve maior significância aos 60 dias de cura, e o aumento da resistência evoluía de acordo com o aumento da temperatura. Foi concluído então que é possível o uso a mistura solo-cimento-escória para fins de melhoramento de solos, estando aos 7 dias com resistência máxima de 5,9 MPa, e 10,33 MPa aos 60 dias de cura.

2.2 Politereftalato de Etileno – PET

Bittencourt & Koschevic (2016) descreve o politereftalato de etileno – PET como um polímero termoplástico, cuja obtenção é através da polimerização de um ácido dicarboxílico e um glicol ou bifenol que pode ser formado pela reação entre o ácido tereftálico e o etilenoglicol, que reúnem as características ideais para uma reação gradual de policondensação. A Figura 1 demonstra a reação química de formação do PET.

Figura 1 - Reação química para formação do politereftalato de etileno (PET)



FONTE: Adaptado de Bittencourt & Koschevic (2016).

Romão *et al.* (2009) explica que no Brasil, a principal aplicação do PET é na indústria de embalagens (71%). O segmento do mercado nacional da indústria alimentícia e de embalagens corresponde a 32% do mercado brasileiro de polímeros envolvendo diretamente o uso do PET para embalagens de bebidas carbonatadas. Ele também descreve que em 2005 o PET contribuiu com cerca de 20% dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil.

A ABIPET em 2013 fez um panorama de consumo do PET no Brasil. A tabela 2 demonstra a evolução do consumo de PET no Brasil ao longo dos anos. Os anos de 2014 e 2016 foram valores estimados.

Tabela 2 - Evolução do consumo de PET no Brasil

Ano	Toneladas
2009	522
2010	561
2011	572
2014	720
2016	840

FONTE: ABIPET (2013)

Sousa, Moura & Fernandes (2012) descrevem que apesar de estar acontecendo um aumento da reciclagem no Brasil, a destinação inadequada desse material vem se tornando um grande problema. Mesmo com inúmeras alternativas de reciclagem e reaproveitamento que reintegrem estes materiais no ciclo produtivo, a demanda de produção continua aumentando e como consequência aumenta-se o descarte destes resíduos, prejudicando o meio ambiente e aumentando o uso da matéria prima virgem, estendendo o ciclo.

Sabendo que o plástico é um derivado de petróleo a reciclagem promove economia desse insumo, bem como a economia de energia na produção de mais plástico, geração de renda e empregos (catadores, sucateiros, operários, etc.) e redução dos preços para produtos que têm como base materiais reciclados (aproximadamente 30% mais baratos do que os mesmos produtos fabricados com matéria-prima virgem).

Uma das formas de reutilização do PET, é em sua forma micronizada, Almeida (2016) descreve que a micronização do PET constitui um procedimento físico onde navalhas são utilizadas em um equipamento com a finalidade de triturar as garrafas em pequenas partículas. Este mesmo processo garante mais uma forma de viabilizar a reutilização e diminuir os procedimentos de descarte incorreto. A reutilização do PET pode ainda reduzir o volume do material destinado aos aterros sanitários, prolongando sua vida útil.

2.2.1 Utilização de PET na Engenharia

Estudos realizado por Carvalho *et al.* (2015) com fibras provenientes de garrafas PET, com diferentes formatos, na proporção de 1000 g/m³ de concreto mostraram que a resistência à compressão do concreto composto foi reduzida em até 10%, em comparação com o concreto puro. A resistência à compressão foi reduzida, porém as fibras fizeram com que o concreto composto tenha uma deformação menor para o mesmo nível de tensão.

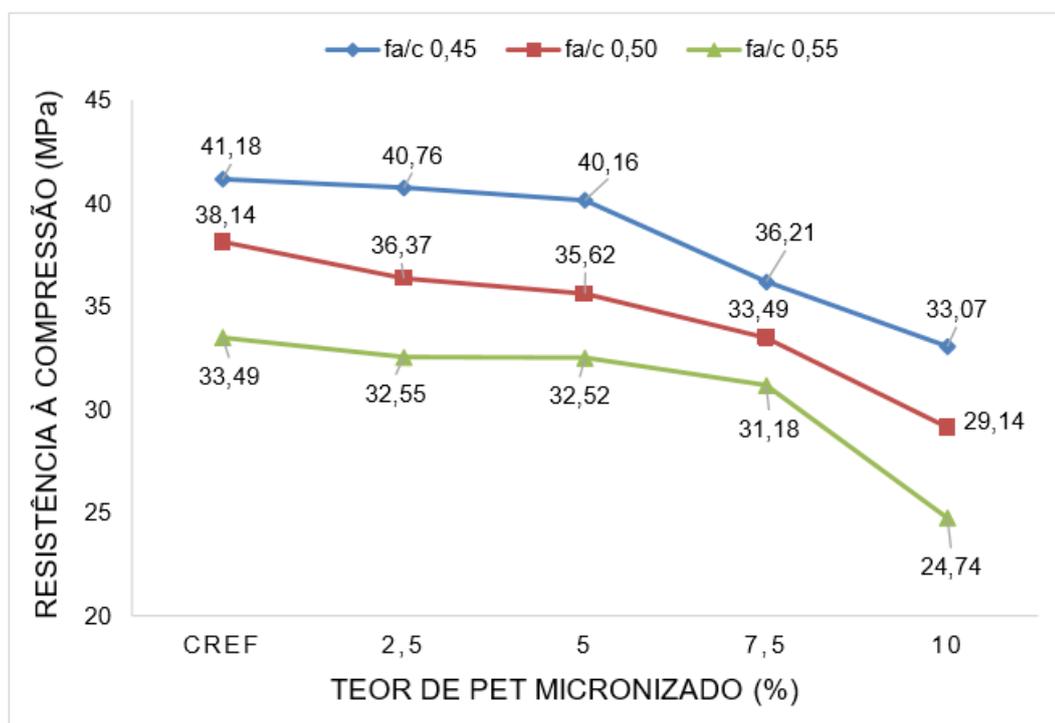
Almeida (2016) adicionou PET em pavimentos de concreto intertravado, os traços de concreto que continham o PET micronizado suportaram efeitos de abrasão acentuados, por isso, são indicados para áreas onde a circulação é intensa, como: pátios de carga; indústrias

petroquímicas; indústrias metalúrgicas, especialmente nas áreas produtivas como os setores de usinagem, tratamento térmico, estamparia, forjaria e fundição; indústrias frigoríficas e alimentícias, onde a higiene é fundamental; entre outras.

Os seus resultados, mostrados na Figura 2 abaixo, pode-se notar que quanto maior o teor de PET acrescentado no concreto, menor sua resistência. Na pesquisa essa redução é explicada pelo aumento do fator água cimento em decorrência do aumento do teor de PET, é explicado que este evento ocorreu pelo aumento da absorção de água no concreto, devido a ausência de interação química entre o polímero e a matriz cimentícia, aumentando a porosidade no concreto, por consequência, a absorção de água.

Ainda assim, ele justifica que os resultados obtidos apontam um êxito, mesmo ocasionando uma perda na resistência, o benefício acumulado pela eliminação segura destes resíduos (que de outra forma teria ido para aterros sanitários ou lixões a céu aberto causando danos ao meio ambiente) não pode ser desconsiderado. Com os resultados, também se determina que para a adição em concreto, o traço de PET não deve ultrapassar os 2,5%.

Figura 2 - Resultados referentes a compressão simples devido a adição de PET em peças de concreto para uso em pavimentos



FONTE: Almeida (2016)

Já Silva (2019) substituiu parcialmente o agregado miúdo por PET em argamassas. Nesta pesquisa foram utilizados os teores de 5% e 10%. Assim como apresentado na pesquisa anterior, quanto maior o teor de PET, maior foi a absorção da argamassa. Já no quesito resistência a compressão, houveram aumentos porém pouco significativos, que praticamente não se afastavam dos valores iniciais. A Figura 3 representa os valores da resistência com o teor de PET de 5% e a figura 4 os resultados a 10%.

Figura 3 - Resistência a compressão simples com 5% de PET

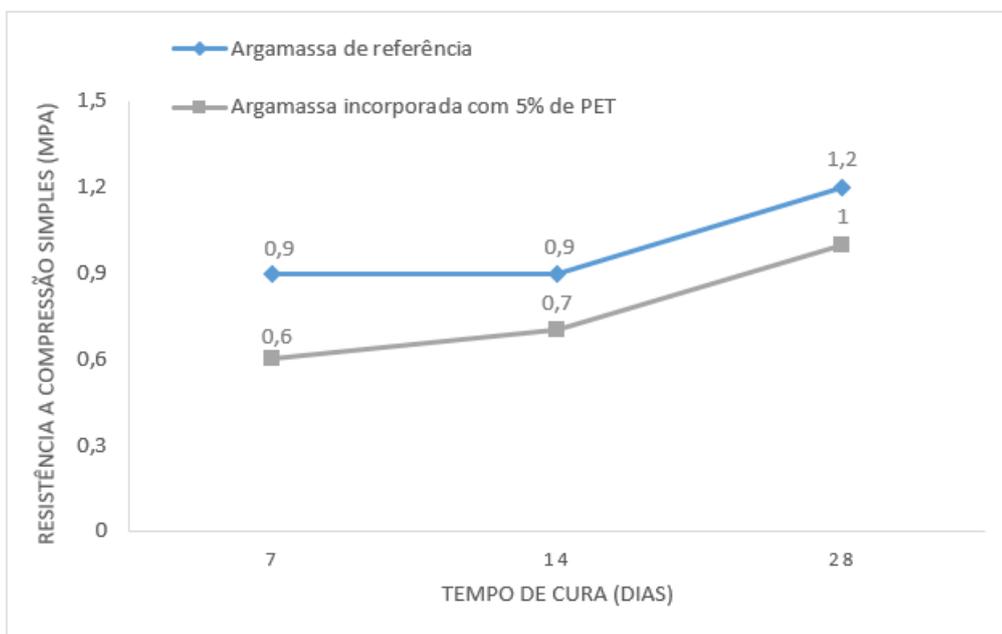
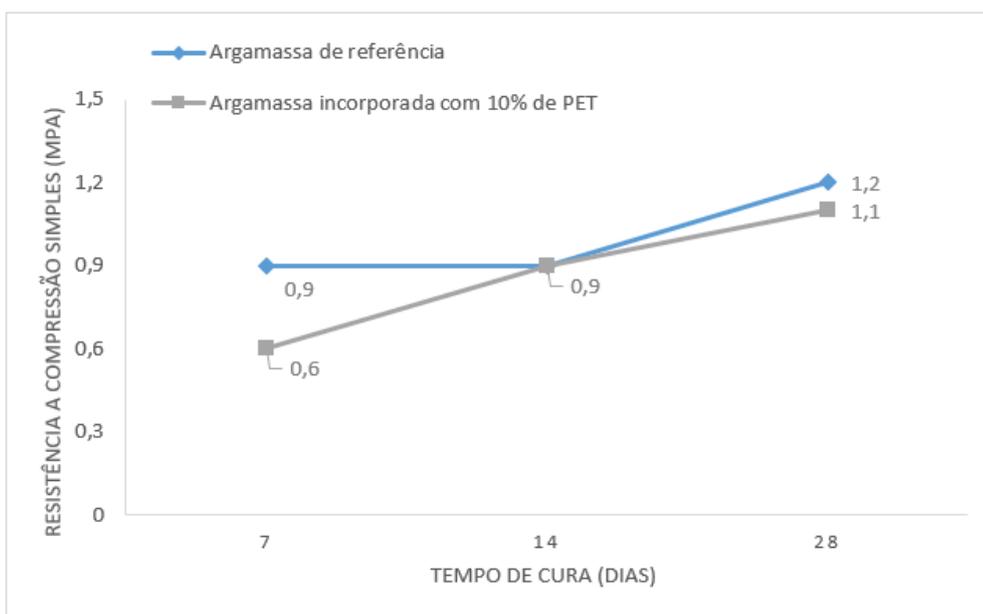


Figura 4 - Resistência a compressão simples com 10% de PET



FONTE: Silva (2019)

Silva (2007) utilizou vários aditivos com a finalidade de reforçar um solo siltoso, um deles foi a fibra do PET, o uso de fibras PET e de polipropileno fino mostrou uma melhoria no suporte do material, medida através do Índice de Suporte Califórnia e nas envoltórias de resistência ao cisalhamento, pôde-se notar uma tendência com a adição de fibras em reduzir a tensão cisalhante máxima obtida para níveis baixos de tensão normal.

Vidal *et al.* (2010) utilizou uma espécie de PET moído, com uma granulometria similar à de uma areia, como um resíduo para melhoramento de um solo que seria destinado a um subleito de rodovia.

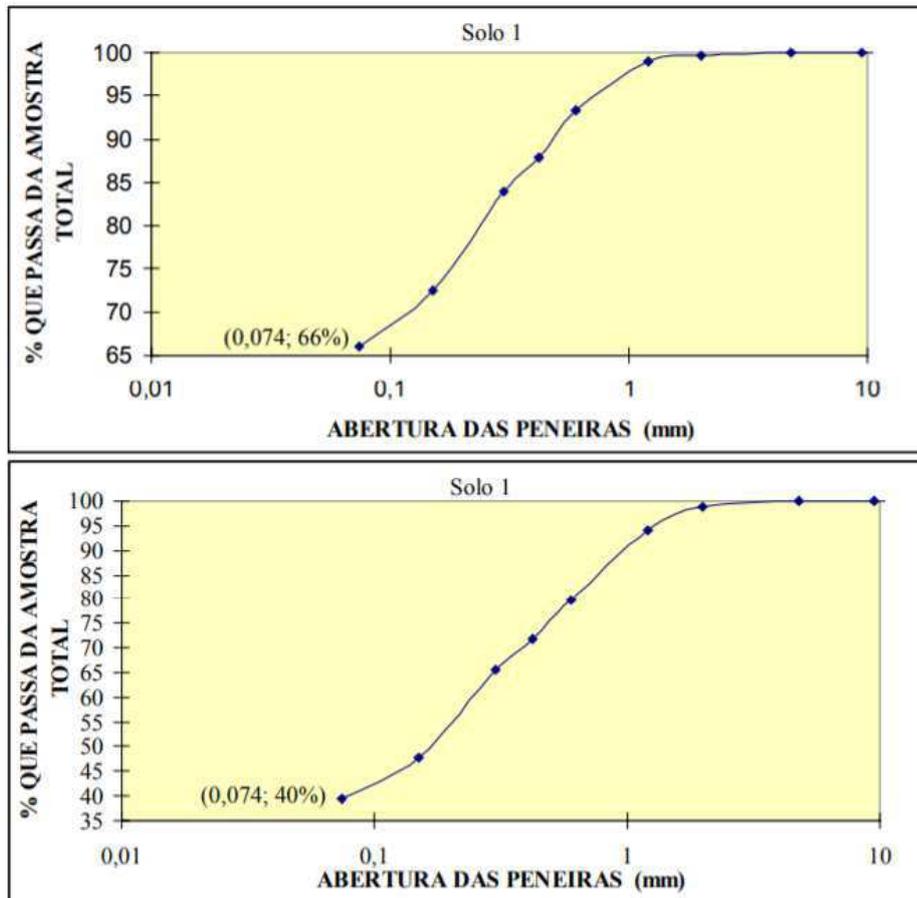
Foi realizada uma correção granulométrica em solos não recomendados para utilização em subleitos e verificado que para acréscimos de 30% em peso do PET moído, o solo passava a ser classificado como bom para execução de subleitos rodoviários, de acordo com o Highway Research Board – HRB.

Um dos solos estudados apresentava a característica de solo fino, que não se adequava ao necessário para execução do subleito, após adicionados 30% do PET, através da correção granulométrica, o solo apresentou características granulométricas próximas dos patamares recomendados pelo HRB, a partir de 35% da amostra total passando na peneira nº 200.

Garantindo então que um solo antes classificado como inadequado para uso em subleitos, fosse utilizado e com o uso de um resíduo reciclado.

A Figura 5 representa as curvas granulométricas do solo antes e depois da adição do PET com granulometria similar a areia, respectivamente.

Figura 5 - Curvas granulométrica do solo 1 estudado, antes e após mistura com a areia de PET, respectivamente.



FONTE: Vidal *et al.* (2010).

3 MATERIAIS

3.1 Solo

O solo utilizado na pesquisa, Figura 6, é proveniente de um depósito de solo expansivo não saturado próximo à cidade de Paulista, situada a 20 km ao norte de Recife – PE na região litorânea do nordeste do Brasil.

Figura 6 – Solo utilizado



FONTE: Acervo pessoal (2019)

3.2 Cimento CP-V ARI

Para a pesquisa foi utilizado o cimento Portland, cuja classificação é determinada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas como CP V-ARI - NBR 5733/1991.

Braz (2018), explica que o desenvolvimento da alta resistência inicial do cimento é dado pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquire elevadas resistências, com maior velocidade. O cimento continua ganhando resistência até os 28 dias, atingindo valores mais elevados que os demais, proporcionando maior rendimento quando se trata do concreto. Além disso, o CP V-ARI, também, não contém adições significativas (pode conter até 5% em massa de material carbonático).

A escolha do estabilizante químico (cimento), CP-V ARI, foi definida a partir dos parâmetros de economia e tempo de execução, além do fato dos componentes químicos conferirem maior coesão aos solos devido à cimentação e aglutinação das partículas, firmando a estrutura e diminuindo o tamanho dos poros.

3.3 Politereftalato de Etileno – PET

O PET utilizado nesta pesquisa apresenta-se na forma micronizada, ou seja, fragmentado em partículas cuja dimensão máxima é de 0,6 mm. O Quadro 1 apresenta os valores de caracterização física do PET micronizado.

Quadro 1 - Caracterização física do PET micronizado

Ensaio		Unidades	Resultados
Granulometria	Módulo de finura		1,29
	Dimensão máxima	mm	0,6
	Massa unitária (estado solto)	Kg/m ³	629
	Massa unitária (estado compactado)	Kg/m ³	768

FONTE: Almeida (2019)

Segundo Pinto (2000) os limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos segundo a ABNT, estão apresentados na tabela 3. A partir destes limites, pode-se então classificar o PET micronizado como um dos solos apresentados.

Tabela 3 - Limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos

Solo	Diâmetro
Matacão	25cm a 1m
Pedra	7,6cm a 25cm
Brita	4,88cm a 7,6cm
Areia grossa	1,2mm a 4,8mm
Areia média	0,3mm a 1,20mm
Areia fina	0,05mm a 0,3mm
Silte	0,005mm a 0,05mm
Argila	Inferior a 0,005mm

FONTE: Adaptado, Pinto (2000)

O PET micronizado, com o diâmetro máximo de 0,6mm seria então classificado como uma areia média.

A Figura 7 representa o PET utilizado nos ensaios desta pesquisa.

Figura 7 - PET micronizado utilizado



FONTE: Acervo pessoal (2019)

3.4 Água

Segundo Mendes *et al.* (2011) a água é um reagente utilizado na maioria dos testes laboratoriais e por isso deve seguir um padrão de controle de qualidade rigoroso. O fornecimento urbano de água apresenta moléculas orgânicas, íons inorgânicos, partículas, coloides, gases, bactérias e seus produtos, que podem alterar os resultados dos exames laboratoriais e causar eventuais erros e falhas mecânicas em equipamentos analíticos. Assim sendo, foi escolhido utilizar na realização da presente pesquisa a água destilada.

3.5 Definição das variáveis

As variáveis, para esta pesquisa, foram divididas em três categorias.

3.5.1 Variáveis controláveis

Estas são as variáveis que terão seus níveis variados a fim de encontrar respostas sobre sua participação nas reações da mistura, estão listadas no Quadro 2. Nesta pesquisa variou-se o nível de PET, buscando avaliar sua influência na resistência a compressão simples no solo cimentado.

Quadro 2 - Variáveis controláveis

Variáveis controláveis	
Teor de PET (%)	0 – 30 – 40 – 50

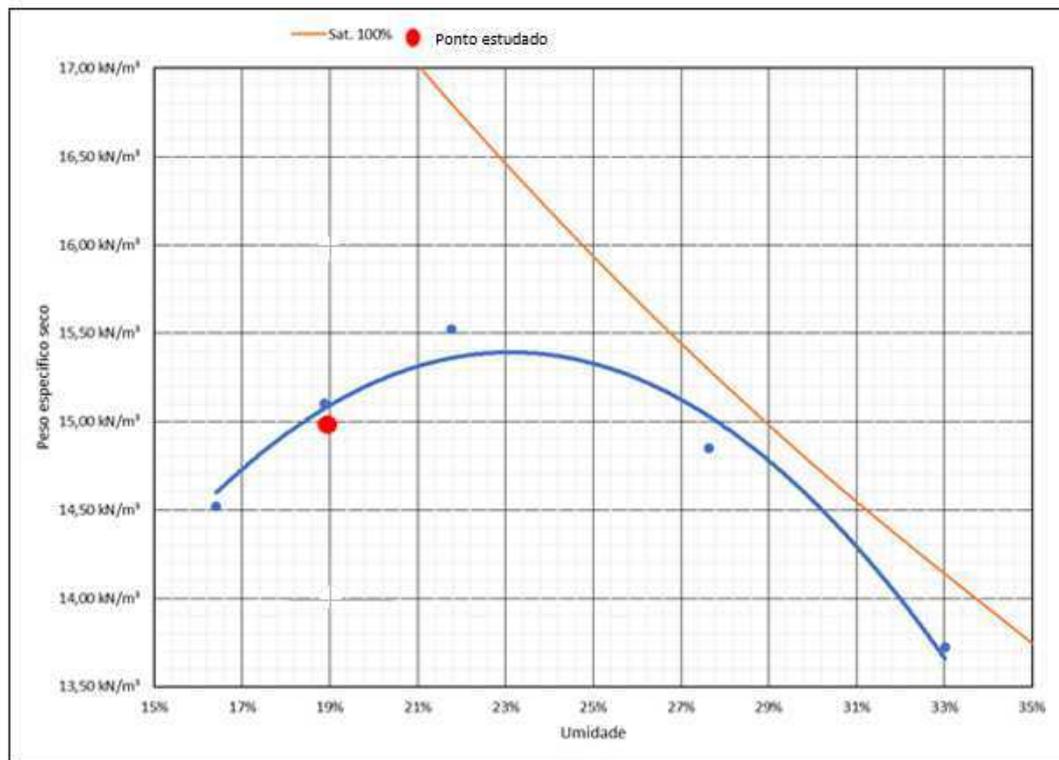
3.5.2 Variáveis fixas

São as que permaneceram fixas ao longo dos ensaios. O teor de cimento utilizado nesta pesquisa foi baseado no teor médio utilizado por Aguiar (2019) demonstrado no quadro 3. Os valores da umidade e do peso específico seco (γ_d) foram retirados da pesquisa de Braz (2018), como mostra a Figura 8. A escolha do solo expansivo dá-se pois este é comum na região do Nordeste.

Quadro 3 -Variáveis Fixas

Variáveis fixas	
Teor de cimento CP-V ARI (%)	6
γ_d (kN/m ³)	15
Tipo de solo	Solo expansivo
Tempo de cura	7 dias
Umidade (%)	19

Figura 8 - Escolha dos pontos de umidade e peso específico seco para pesquisa



FONTE: Braz (2018)

3.5.3 Variáveis de resposta

A variável de resposta é aquela que foi medida no experimento visando o estabelecimento de relações causais. Neste caso, foi a resistência a compressão simples.

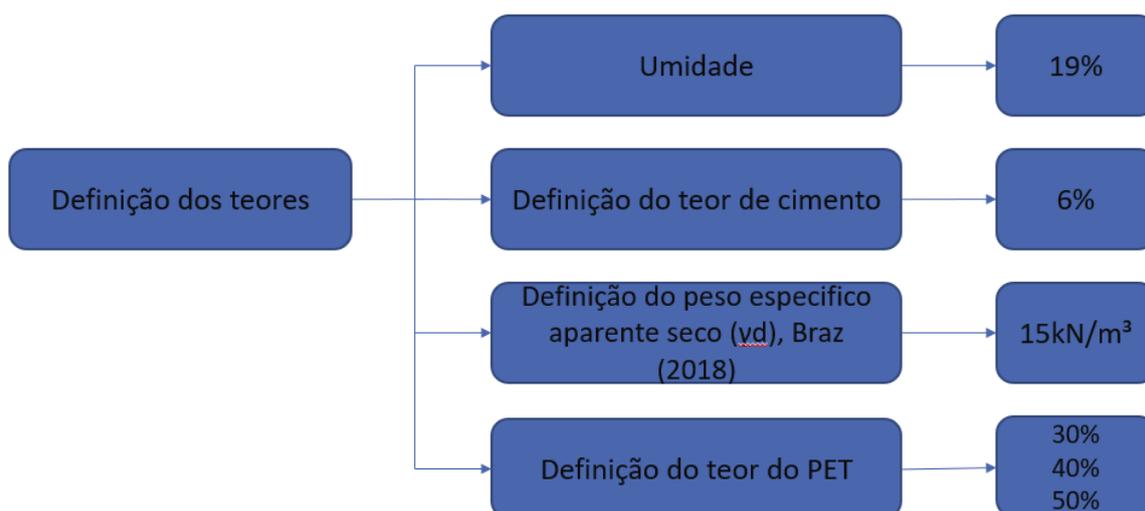
4 METODOLOGIA

Para que os objetivos sugeridos por essa pesquisa fossem alcançados, foram adotadas metodologias e informações contidas na literatura. Os métodos de ensaios utilizados foram baseados em normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O trabalho contemplou ensaios para verificação da resistência mecânica.

Os ensaios foram realizados no laboratório de Laboratório de Engenharia de Pavimentos – LEP localizado na Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

A figura 9 ilustra um fluxograma criado com as variáveis fixas que foram definidas para início dos ensaios.

Figura 9 – fluxograma das variáveis que foram fixadas para realização dos ensaios



4.1 Ensaios de Caracterização

Os ensaios aos quais o solo foi submetido para caracterização fizeram parte do programa de pesquisa de Tenório (2018), como mostra o Quadro 4.

Quadro 4 - Ensaio de caracterização do solo

Ensaio	Resultado	Norma
Granulometria por peneiramento e sedimentação	Solo siltoso arenoso	NBR 7181 (ABNT, 2018)
Limite de Liquidez (LL)	49%	NBR 6459 (ABNT, 2016)
Limite de Plasticidade (LP)	21%	NBR 7180 (ABNT, 2016)
Compactação Proctor	Umidade ótima: 23% Densidade seca máxima: 15,4 kN/m ³	NBR 7182 (ABNT, 2016)

FONTE: Tenório (2018)

4.2 Preparação das Misturas, Moldagem e Cura dos Corpos de Prova para Ensaio de Compressão Simples

O ensaio de resistência à compressão simples foi utilizado nesta pesquisa visando analisar o efeito da estabilização química no solo. As figuras 10 representa o solo já misturado, onde este é compactado em 3 camadas iguais, representado na figura 11 e então desmoldados, ilustrado na figura 12. Após a cura por no mínimo 6 dias, os corpos de prova foram imersos em água por 24 horas antecedentes ao ensaio de compressão simples, para garantir minimização da sucção. Deste modo, os valores obtidos nesse ensaio serviram de referência para mostrar a evolução da resistência ao se adicionar teores do material de substituição em relação ao peso seco de solo.

Para o ensaio de resistência à compressão simples foi utilizada uma prensa automática da SHIMADZU AG-IS com velocidade de 1,14mm/mim. A Figura 13 mostra os corpos de provas posicionados para o ensaio e Figura 14 apresenta o corpo de prova durante o ensaio de compressão simples.

Figura 10 - Solo expansivo já misturado com o cimento e o PET



FONTE: Acervo pessoal (2019)

Figura 11 - Compactação do corpo de prova



FONTE: Acervo pessoal (2019)

Figura 12 - Desmolde do corpo de prova



FONTE: Acervo pessoal (2019)

Figura 13 - Corpo de prova no início do ensaio



FONTE: Acervo pessoal (2019)

Figura 14 - Corpo de prova após ser rompido



FONTE: Acervo pessoal (2019)

5 RESULTADOS

O Quadro 5 representa os dados dos corpos de prova ensaiados à compressão simples com massa específica e teor de cimento fixos de 15kN/m³ e 6%, respectivamente. Os valores que não estão representados na tabela foram descartados por não apresentarem valores relevantes estatisticamente.

Quadro 5 - Resultados dos corpos de prova ensaiados

Nº do CP	Teor de cimento	Teor de resíduo	Teor de Umidade	Massa Específica Aparente Seca (kN/m ³)	Tempo de Cura (dias)	q _u (kPa)	q _u médio (kPa)
1	6%	30%	15,39%	15	41	429,46	429
2	6%	30%	16,70%	15	27	-	
3	6%	30%	17,67%	15	27	-	
4	6%	40%	12,16%	15	27	-	494
5	6%	40%	15,61%	15	20	540,74	
6	6%	40%	16,73%	15	20	447,67	
7	6%	50%	16,80%	15	20	479,88	516
8	6%	50%	17,55%	15	13	522,16	
9	6%	50%	17,65%	15	13	547,37	

As técnicas mais comuns de estabilização de solo expansivo envolvem a substituição de uma fração deste por uma fração de areia. Os resultados do quadro 5 mostram que quanto maior o teor de PET micronizado na mistura maior a resistência a compressão simples. Isso pode ser explicado devido a substituição do solo por um material estável volumetricamente, o PET, que mantém sua granulometria próxima à da areia.

O Quadro 6 abaixo, representa os valores do solo expansivo sem adição de outros aglomerantes, apenas com o cimento CPV-ARI, os dados apresentados são da pesquisa de Braz (2018).

Quadro 6 - Resultados da pesquisa solo-expansivo cimento

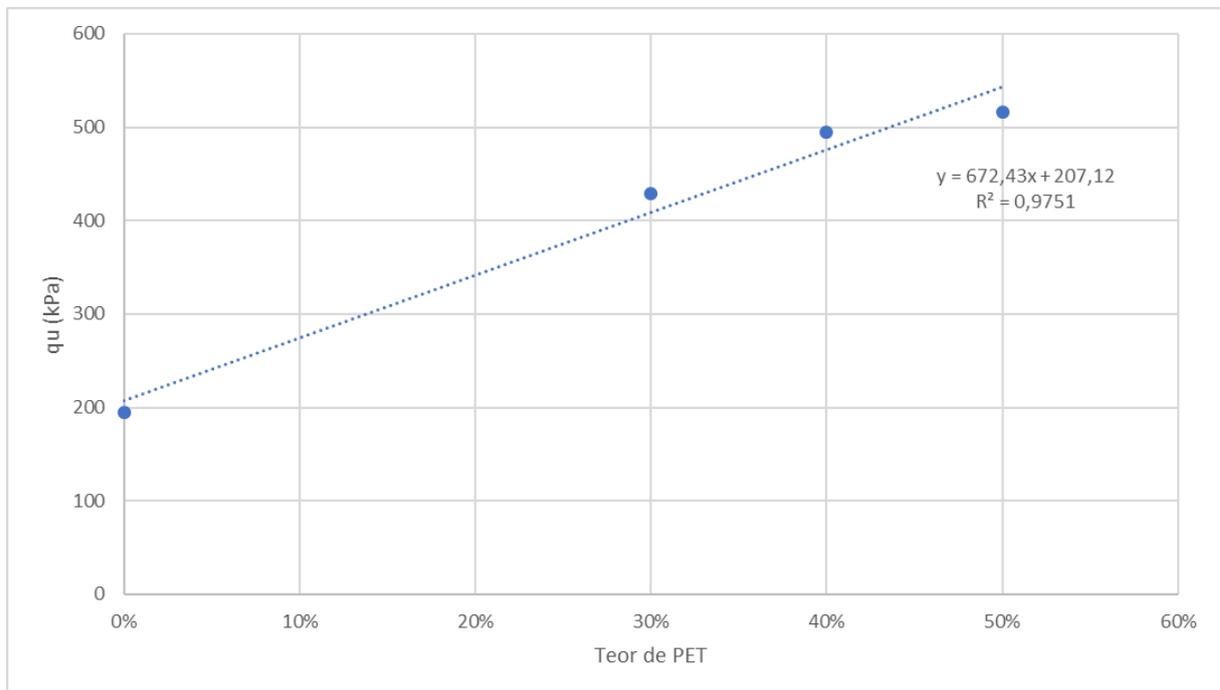
Nº do CP	Teor de cimento	Teor de resíduo	Teor de Umidade	Massa Específica Aparente Seca (kN/m ³)	q _u (kPa)	q _u médio (kPa)
17	6%	0%	11,02%	15	205,58	195,25
18	6%	0%	16,09%	15	403,35	
19	6%	0%	16,09%	15	184,92	

Fonte: Braz (2018)

Comparado com os valores encontrados por Braz (2018) equivalentes apenas ao solo expansivo com o cimento, a estabilização com o PET, mesmo em seu menor valor de resistência média, 429kPa, chega a ser 119% maior que utilizando apenas cimento.

A Figura 15 demonstra a variação da resistência do solo em relação ao teor de PET que substituiu uma fração do solo.

Figura 15 - Relação da resistência com a variação da porcentagem de PET



5.1 Comparativo entre Diferentes Materiais de Substituição

Aqui serão analisados os diferentes materiais que agora compõem o volume substituído do solo. O estudo de Aguiar (2019) utilizou a estabilização do solo em estudo com cimento e resíduo do polimento de rochas ornamentais, o Quadro 7 apresenta os resultados encontrados.

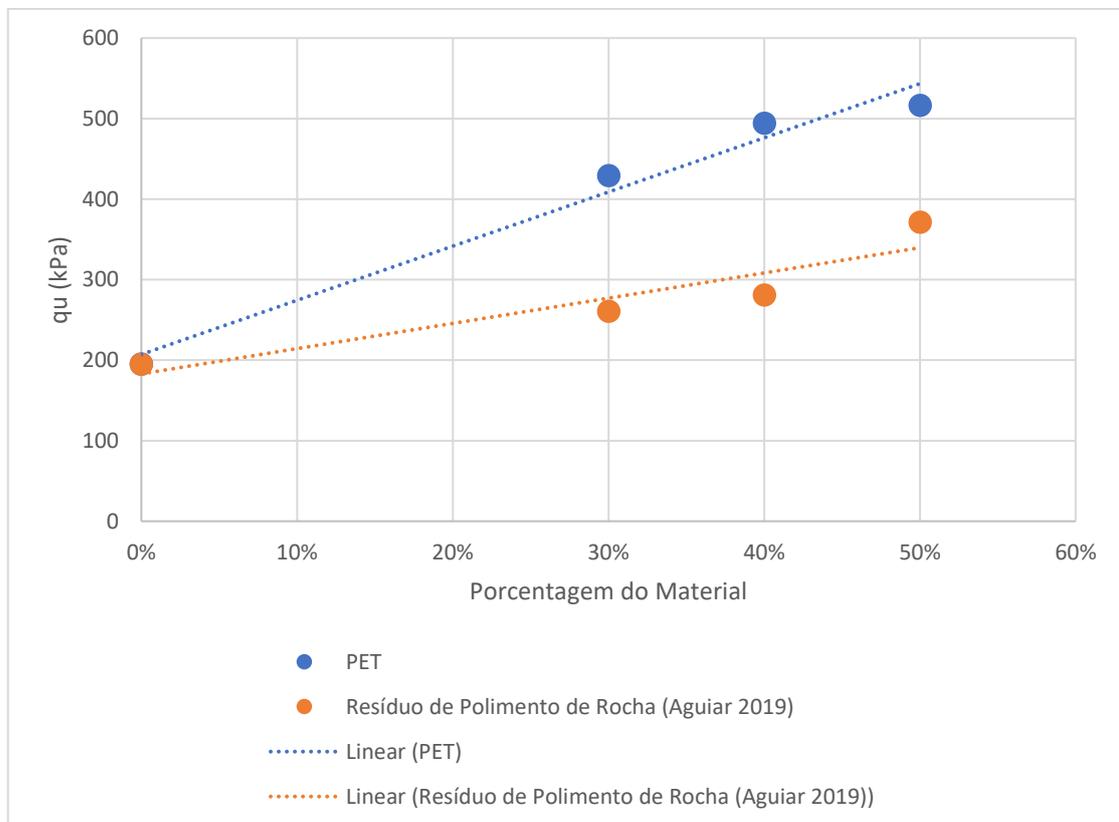
Quadro 7 - Resultados da estabilização solo-cimento-resíduo de rocha

Teor de cimento	Teor de resíduo	Teor de Umidade	Massa Específica Aparente Seca (kN/m ³)	q _u médio (kPa)
6%	30%	11,02%	15	260,7
6%	40%	16,09%	15	280,88
6%	50%	16,09%	15	371,38

FONTE: Aguiar (2019)

A Figura 16 apresenta o comparativo encontrado para os mesmos teores com os diferentes materiais: PET e resíduo do polimento de rocha.

Figura 16 - Comparativo das resistências para os materiais PET e Resíduo do polimento de rochas



Em todas as porcentagens apresentadas, os valores da estabilização solo-cimento-PET implica maiores valores de resistência. O menor valor médio da resistência quando substitui-se o solo pelo PET, de 429kPa, equivalente a 30% de substituição; quando comparado com o maior valor médio do resíduo de rocha ornamental, equivalente a 50% de substituição, com resistência de 371kPa, os valores da resistência com o PET como material chegam a ser 15% superior a resistência quando utilizado o resíduo de rocha ornamental.

Este fato devesse, provavelmente, a maior angulosidade dos grão do PET micronizado, já que este é fabricado através do corte com navalhas. Essa maior angulosidade provavelmente desencadeia um maior ângulo de atrito, porém este fato não pode ser testado nesta pesquisa, devido a complexidade dos ensaios.

Utilizando o maior valor médio como parametro, 50% de substituição, temos que o PET apresenta uma porcentagem de resistência 39% maior quando comparado com o resíduo de rocha ornamental, também a 50%.

5.2 Comparativo Geral com Diferentes Estabilizantes Químicos e Materiais de Substituição com Base nas Pesquisas Realizadas com o Mesmo Solo Expansivo

Ténorio (2018) utilizou o cal como estabilizante químico para o solo expansivo estudado, seus resultados encontram-se no Quadro 8.

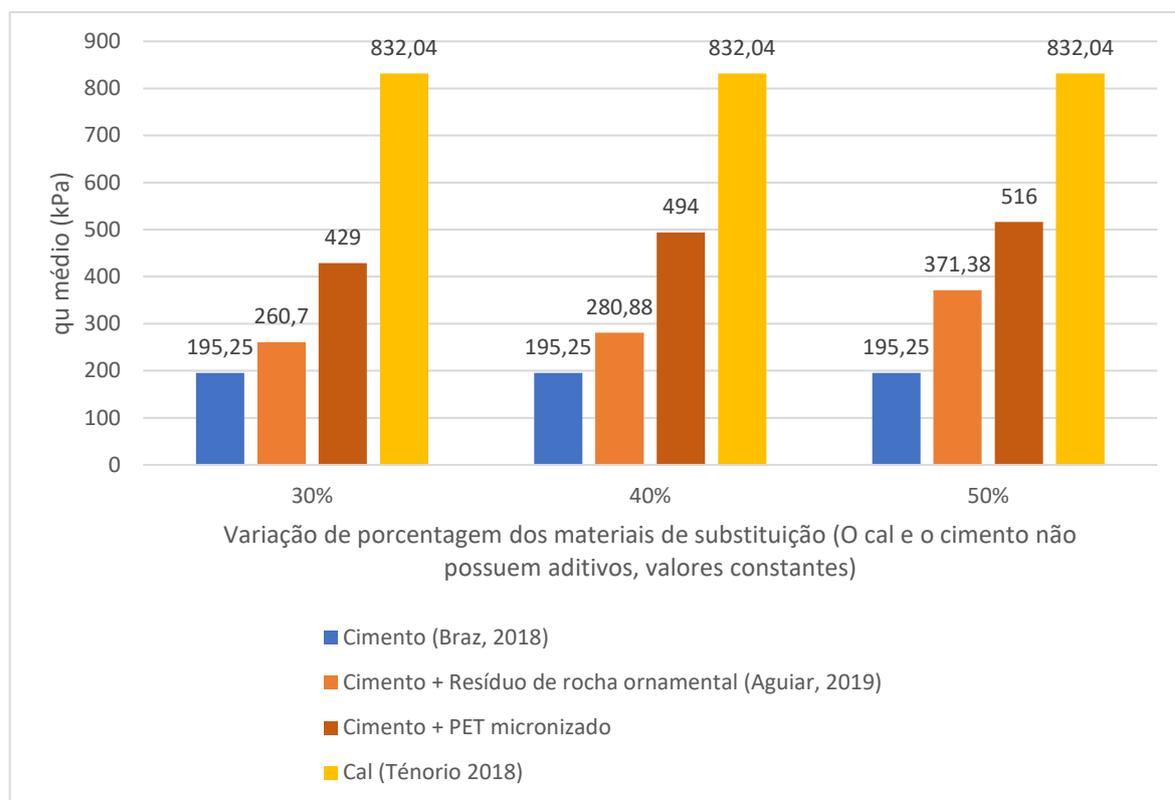
Quadro 8 - Resultados da estabilização com cal

Teor de cal	Teor de resíduo	Teor de Umidade	Massa Específica Aparente Seca (kN/m ³)	q _u (kPa)	q _u médio (kPa)
6%	0%	18,60%	15,1	873,82	832,04
6%	0%	18,60%	15,2	778,13	
6%	0%	18,60%	15,1	844,18	

FONTE: Ténorio (2018)

A Figura 17 compara todos os estudos feitos com o solo expansivo estudado.

Figura 17 - Comparativo geral entre os materiais de substituição e estabilizantes químicos utilizados na estabilização do solo expansivo em estudo



Das alternativas analisadas, a estabilização com cal é a que apresenta maior valor da resistência média, 832kPa.

O resultado de 50% de PET substituindo o solo, maior valor médio de resistência apresentado, de 516kPa, encontrando-se 37,9% abaixo do valor de resistência média do solo expansivo com a cal.

Isto pode ser explicado devido a cal conseguir conter a expansão do solo, já o cimento não, mantém apenas a função de agente cimentante, mantendo o material que foi substituído ligado ao solo expansivo.

No caso do solo expansivo com cimento como agente estabilizante, dentre as opções de aglomerante já analisadas, o PET mostra os melhores resultados de resistência.

A depender do tipo de projeto e da resistência exigida por este, o PET consegue corresponder as exigências de maneira sustentável utilizando-o como aglomerante reciclado, que possui granulometria similar com a areia, implicando no aumento da vida útil de aterros sanitários e maior conscientização quanto aos benefícios da reciclagem.

5.3 Comparativo entre os Resultados do PET no Solo e no Concreto/Argamassa.

Quando comparamos os resultados referentes ao uso do mesmo solo expansivo, que estão disponíveis na revisão bibliográfica de item 2.2.1 referentes as pesquisas de Almeida (2019) e Silva (2019), nota-se que para estas soluções envolvendo o cimento, o PET acabou por aumentar a absorção de água no concreto e na argamassa, devido a falta de interação entre suas partículas e o agente cimentante. Já no solo, a substituição em teores de 30% a 50% garantiram um aumento na resistência. O uso do PET como solução para estabilização de solos torna-se mais viável que como substituição de agregados em usos de argamassa e concreto.

6 CONCLUSÃO

O uso da engenharia sustentável na geotecnia é um meio que precisa ser explorado. O uso de materiais reciclados, serve de incentivo para a realização de pesquisas como a realizada e que acaba por dar finalidade em soluções de engenharia a um material que antes não apresentava funcionalidade.

As soluções para estabilização de solos expansivo-PET-cimento apresentaram resultados positivos. As resistências médias apresentadas pela estabilização de solo expansivo com cimento e PET, variaram de 420kPa até 516kPa. A substituição de 15% do solo por PET Micronizado promoveu um aumento de 119% da resistência apresentada pelo solo expansivo estabilizado com cimento, trazendo uma solução sustentável para os métodos de estabilização de solo.

Ao comparar os valores da estabilização do solo PET Micronizado com outro material de substituição, o resíduo do polimento de rocha ornamental, a estabilização com o PET Micronizado apresentou maiores valores de resistência. O maior valor médio de resistência encontrado para a estabilização com o resíduo de rocha, no teor de 50%, de 371,38kPa, é 15% inferior ao menor valor de resistência, de teor de 30%, da estabilização com PET Micronizado. Em termos substituições recicladas, a saída mais viável para o aumento da resistência do solo expansivo é a estabilização de solo expansivo com cimento e PET Micronizado; podendo-se variar o teor de PET Micronizado conforme a necessidade de aumentar a resistência do solo.

Dentre as soluções avaliadas, que incluem a variação do tipo de estabilizante químico, cimento e cal, a estabilização com cimento e PET, mesmo em seu maior valor médio, de 516kPa, encontra-se abaixo da resistência pela estabilização do solo expansivo apenas com cal, logo, a solução de estabilização com cal é a mais viável em termos de aumento de resistência.

No viés outros usos na construção civil, como o concreto e a argamassa, o PET Micronizado acabou por aumentar a absorção de água nos materiais, no caso do concreto sua resistência inicial foi diminuindo com o aumento do teor de PET, e na argamassa esses valores aumentaram insignificativamente, permanecendo muito próximo ao valor inicial. Logo, uso do PET como substituto do solo em soluções de estabilização de solos, se torna viável, já que este aumentou significativamente a resistência do solo de maneira sustentável.

Sugestão de pesquisas futuras:

- Estabilização de solo expansivo com cal e diferentes teores de PET;

- Estabilização de solo expansivo com maior ou menor teor de cimento afim de redução de custos e diferentes teores de PET;
- Avaliar o ângulo de atrito do solo com o PET.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIPET, Associação brasileira da indústria do PET.
- AGUIAR, P. A. **Avaliação da resistência de um solo do município de Paulista – PE estabilizado com cimento Portland e resíduo do polimento de rochas ornamentais.** Universidade Federal de Campina Grande, 2019.
- ALMEIDA, S. P. **Peças de concreto para pavimento intertravado produzidas com politereftalato de etileno (PET) micronizado.** Tese (Doutorado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – Paraíba. 2016.
- BRAZ, R. I. F. **Avaliação da resistência de um solo expansivo do município de Paulista-PE melhorado com cimento Portland.** Universidade Federal de Campina Grande, 2018.
- CARVALHO, W. C. et al. A aplicação de fibras de garrafa PET como agregado estrutural do concreto. **In: Revista Polímeros.** 2015.
- CASAGRANDE, M. D.T. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – Rio Grande do Sul, 2001.
- CRUZ, M. L. S. **Novas Tecnologias da Aplicação de Solo-Cimento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Geotecnia). Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil. Braga – Portugal. 2004.
- DIAS, J. J. F. M. S. **Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas.** (Mestrado em Engenharia Civil – Geotecnia). Universidade Nova de Lisboa – Faculdade de Ciências e Tecnologia. Lisboa – Portugal. 2012.
- FERNANDES, J. et al. Contribuição para o estudo da combinação de cal com cimento no tratamento de solos. **In: 12º Congresso Nacional de Geotecnia.** 2010, Braga – Portugal.
- FRANCK, R. R. *et al.* Utilização do resíduo de alto forno (escória de chumbo) em melhoramento de misturas de solo-cimento-resíduo. **Unoesc & Ciência - ACET Joaçaba.** v. 10, n. 1, p. 59-68. Rio de Janeiro, 2019.
- GUÉRIOS, E. M. **Estudo do melhoramento de solo com adição de cal hidratada para uso em pavimento urbano.** Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil de Produção. Universidade Tecnológica do Paraná. Curitiba – PR. 2013.
- INGLES, O. G. METCOLF, J. **Soil Stabilization – Principles and Practice.** 1972. Sidney – Austrália.

- KOSCHEVIC, M. T.; BITTENCOURT, P. R. S. Meio Ambiente e materiais poliméricos: Breves considerações com ênfase ao Politereftalato de Etileno (PET) e processos de degradação. **R. Eletr. Cient. Inov. Tecnol., Medianeira**. v. 2, n. 14, p. 60-80. 2016.
- MENDES, M. e. et al. A importância da qualidade da água reagente no laboratório clínico. **J Bras Patol Med Lab**. v. 47. n. 3. p. 217-223. 2011.
- MILANI, A. P. S. FREIRE W. J. Características físicas e mecânicas de mistura de solo, cimento e casca de arroz. **Unicamp. Jaboticabal**. v.26, n.1, p.1-10. 2006
- MINGUELA, J. D. **Suelocemento: Jornada Explanadas Estabilizadas Y Capas de Firmes Tratadas com Cimento – Aspectos Prácticos**. Barcelona – Espanha. 2007.
- NBR 12770: Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada. 1992.
- NELSON, J.D., MILLER, D.J. **Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering**, New York, John Wiley & Sons, 1992
- PEREIRA, K. L. A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de iodo para uso em pavimentos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2012.
- PINTO, C. S. 2010. **Curso básico de mecânica dos solos**. 1ª Ed. Editora: Oficina de textos – São Paulo. 2000.
- ROSA, F. D. **Efeito do estado de tensões de cura no comportamento de uma areia artificialmente cimentada**. (Tese de Doutorado). Universidade Federal do rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS. 2009.
- ROJAS, J. W. J. *et al.* **Estabilização de Solos** – Coleção Ciências do Pampa. Caderno 1 – Universidade Federal do Pampa. Caçapava do Sul – RS. 2015.
- ROMÃO, W. *et al.* - PET: Uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **In: Polímeros: Ciência e Tecnologia**. vol. 19, n. 2, p. 121-132, 2009.
- SANDRONI, S., CONSOLI, N. C. Sobre a Prática da Engenharia Geotécnica com Dois Solos Difíceis: Os Extremamente Moles e os Expansivos. **COBRAMSEG 2010**. P. 97– 186. 2010.
- SILVA, C. C. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

SILVA, R. O. **Avaliação da viabilidade da substituição parcial do agregado miúdo por politeraftalato de etileno (PET) em argamassas.** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2019.

SOUSA, T.; MOURA, J.; FERNANDES, A. Reutilização de PET como prática de educação ambiental na creche municipal Wilmon Ferreira de Souza. **In: III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental.** Goiânia – GO. 2012.

SONCIM, S. P. *et al.* **O emprego do resíduo da reciclagem de garrafas PET como agregado em reforço de subleitos de rodovias.** Universidade Vale do Rio Doce. 2010.

VIEIRA, E. M. S. **Avaliação da resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos dispostos em aterro sanitário.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Campina Grande – Paraíba, 2018.

VITALI, O. P. M. **Efeito da composição de misturas de solo-cimento nos parâmetros de rigidez e rigidez de resistência.** Dissertação (Mestrado). Universidade do Porto. Porto – Portugal, 2008.