

Study of the application of recycled aggregate in geotextile protected road substrate layers

CARDOSO, J.R. e NOGUEIRA, L.E.M.

Graduandos, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil

CASTRO, Rodrigo Martinez

Professor MSc., Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil

jorgecardoso777@gmail.com; lucasmnogueira@hotmail.com; rmartinez@pucgoias.edu.br

RESUMO: Unindo-se à alta quantidade de resíduos gerados na construção com a importância da reciclagem, o presente trabalho teve por objetivo buscar melhorar a qualidade, aumentar a vida útil e diminuir os custos de construção e manutenção das rodovias. Foi analisado a viabilidade da adição de geossintéticos e agregados reciclados nas camadas de pavimentação do condomínio Parqville Quaresmeira. Ao realizar o ensaio de Granulometria, classificou-se o solo como “areia silto argiloso” mal graduado, grupo A-4 AASHTO, principalmente por sua falta de pedregulhos. A partir dos resultados dos ensaios de Compactação, Expansão, e ISC com solo mais as adições de RCD e geomanta, e comparando aos resultados de sol o natural, pode-se concluir melhora em todos os ensaios com os reciclados, ressaltando o aumento da massa específica aparente em 8% com geomanta, sua capacidade (em umidade ideal) em ser extremamente drenante no ensaio de expansão, o ganho de resistência com a adição de RCD, e, o aumento do ISC em quase 11% quando o RCD foi adicionado.

Palavras-chaves: sustentabilidade; pavimento; geomanta; vida útil; granulometria.

ABSTRACT: Combining the high amount of construction waste generated with recycling importance, the present work aimed to improve the road quality and endurance, reducing costs. It was analyzed the feasibility of adding geosynthetics and recycled aggregates to the paving layers at Parqville Quaresmeira condominium. Trought granulometry test, the soil was classified as poorly graded “clayey silt sand”, A-4 AASHTO group, mainly due to its lack of gravel. Results of the Compaction, Expansion, and CBR tests with soil plus additives, was possible to conclude improvement in all tests with additives, emphasizing the increase in apparent specific mass in 8% with geotextile. Ability (in ideal moisture) to be extremely draining in the expansion test, the strength gain with the addition of construction waste (CW) and the increase in CBR by almost 11% when the CW is added.

Keywords: sustainability; pavement; geomanta; service life; granulometry.

Área de Concentração: 03 – Geotécnica.

1 INTRODUÇÃO

Os meios de locomoção em um país interferem diretamente na economia, que se possui diversos meios de locomoção, consegue distribuir suas matérias com mais economia, menos tempo e mais eficiência.

Lugares mais desenvolvidos investem muito em infraestrutura de transporte como, por exemplo, os EUA que cerca de 20% do crescimento econômico se dá devido a infraestrutura do país (BÜHLER&WICKERT, 2004 *apud* ANTUNES, 2008).

Tendo em vista a qualidade das rodovias no Brasil e em busca de uma solução econômica em curto prazo de construção, surge a necessidade de se utilizar misturas em solos a fim de promover um aumento na qualidade e vida útil dos pavimentos, consolidando assim a ideia de se utilizar resíduos da construção.

Segundo Scarlato e Pontin (1992) *apud* Alencar (2005), por motivos ecológicos e econômicos, a reciclagem é considerada a solução mais adequada, pois diminui os detritos da natureza, que junto com a reutilização dos materiais, poupa os recursos naturais não renováveis, reduz os resíduos urbanos, prolonga a vida útil dos aterros e gera mais empregos a catadores. Levando-se em consideração essas informações, um local apropriado para se descartar principalmente o entulho da construção civil é em camadas de pavimentos urbanos, sobretudo nas camadas de base e sub-base, permitindo assim que reduzam se os custos da infraestrutura urbana e preserve o meio ambiente.

Unindo-se a quantidade de resíduos gerados na construção, a importância da reciclagem de materiais e a baixa qualidade das rodovias no Brasil, o processo de reutilização do material em rodovias auxilia na diminuição de camadas de solo, nos descartes de resíduos da construção e uma melhora na durabilidade e qualidade das vias. No Brasil, em meados da década de 80 se iniciou as experiências com agregados, porém desde então poucas pesquisas com o tema vêm sendo realizadas mesmo com a necessidade da procura por novas técnicas e materiais, uma vez que somente cerca de 10% de suas ruas e avenidas de perímetro urbano, estão em condição pavimentada (MOTTA, 2005).

Em busca de melhorar a qualidade, aumentar a vida útil e diminuir as manutenções das rodovias, a utilização de geossintéticos pode trazer resultados satisfatórios ao processo. Esses compostos fabricados de polímeros, em formatos de fitas ou filamentos, que quando adicionado ao solo podem exercer diversas funções como drenagem, reforço, filtração e separação, juntamente com outras técnicas de aproveitamento de materiais apresentam bom desempenho em exigências de esforços mecânicos, baixos custos operacionais, e reduzem o tempo de execução, tornando-os assim, uma alternativa de substituição de parte dos materiais utilizados em pavimentação convencional. (GÓNGORA, 2015).

Buscando-se uma solução de destinação para os resíduos sólidos urbanos, e uma maior durabilidade e qualidade dos materiais de solo utilizado nas rodovias brasileiras, a junção dos resíduos com os geossintéticos nas camadas de pavimento surgem como uma opção na obtenção de tais objetivos. O histórico positivo em testes já realizados, como de Ante (2012) no tratamento antireflexão de trincas e na diminuição dos

afundamentos nas superfícies utilizando a geogrelha e Anselmi (2015) no estudo da curva do Índice de Suporte Califórnia (ISC) na mistura solo-agregado, preveem resultados promissores ao proposto trabalho.

Por se tratar da maior parte da matriz de transporte brasileiro, o modal rodoviário necessita atenção especial principalmente nos quesitos segurança, baixo custo, durabilidade e conforto de tráfego. Tendo em vista tais requisitos, buscou-se alternativas que sejam solução e inovação nos modos em que hoje tradicionalmente se faz as camadas de pavimentação.

O presente trabalho teve por objetivo analisar a viabilidade da adição de geossintéticos e agregados reciclados nas camadas da pavimentação nas ruas do condomínio Parqville Quaresmeira localizado em Trindade. Os parâmetros foram definidos através da classificação dos materiais do solo e a realização dos ensaios de compactação, expansão e ISC.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Características mecânicas do solo

Os solos são os mais complexos e antigos materiais da engenharia e desde os primórdios já procede a necessidade de sua estabilização. Inicialmente seu melhoramento estava presente na construção de pavimentos rodoviários nas civilizações mesopotâmia e romana, porém vários outros povos já utilizavam, para estabilização, o emprego de cal juntamente com pozolana na intenção de obter superfícies rígidas que suportassem os veículos com rodas (HAMZAH, 1983).

Porém, Branco (1988) *apud* Dias (2012) afirmou que com o aumento progressivo do tráfego e das cargas por eixo dos veículos, conduziu a ruína antecipada de muitos pavimentos, surgindo assim a necessidade de soluções mais resistentes.

Segundo Fernandes (2010), as principais propriedades dos solos que são objeto de melhoramento e preocupação aos engenheiros são resistência, controle das deformações, permeabilidade e durabilidade.

2.2 Estabilização ou melhoramento dos solos

De acordo com Dias (2012), se caracteriza como qualquer processo de natureza física, química ou mecânica, com a função de melhorar as propriedades do solo existente em relação ao seu comportamento como “material” de Engenharia, no qual esse, deve se tornar

apto a responder de forma satisfatória as solicitações previstas.

São aplicados segundo Van Impe (1989) a estabilização temporária, permanente sem adição de materiais e permanente com adição de materiais dependendo do tipo de solo sobre o qual se vai construir. E são subdivididas em:

Mecânica: procura-se melhorar a arrumação das partículas sólidas e/ou recorrendo a correção de sua composição granulométrica;

Física: alteram-se as propriedades dos solos através do uso de calor e eletricidade;

Química: são colocados aditivos para modificar as características dos solos;

Granulométrica: adição ou retirada de partículas do solo com a finalidade de alterar suas propriedades.

2.3 Pavimentação

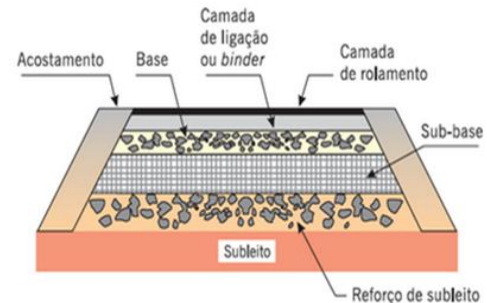
De acordo com Santana (1993) *apud* Marques (2012) pavimento é uma estrutura construída após a realização da terraplanagem tendo como principal função dar conforto e segurança aos usuários, levando-se em consideração o ponto de vista da engenharia, devendo ser realizado com mínimo custo e máxima qualidade.

Segundo Marques (2012) essencialmente classifica-se as estruturas de um pavimento em:

- Pavimento rígido: tipo de pavimento em que suas camadas trabalham à tração. Constituído por placas de concreto (raramente é armado) que se apoiam sobre o solo de fundação ou Sub-base intermediária;
- Pavimento flexível: tipo de pavimento em que suas camadas não trabalham à tração. Constituído por um revestimento betuminoso sobre uma base granular ou de solo estabilizado granulometricamente;
- Pavimento semirrígido: Quando se tem uma base cimentada sob o revestimento betuminoso;
- Pavimento composto: Quando se tem um reforço de concreto asfáltico sobre a placa e concreto.

O pavimento possui as camadas de: revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito (Figura 1) de forma que cada um exercerá sua função específica.

Figura 1 -Camadas genéricas de um pavimento



Fonte: Bernucci (2010)

➤ Revestimento

Os revestimentos costumam ser subdivididos em camadas, por motivos técnicos, construtivos e de custo. As possíveis subdivisões das camadas de pavimento são: Camada de rolamento (Camada de desgaste, capa de rolamento ou revestimento), camada de ligação (*binder*), camada de ligação (reperfilagem) e a camada de reforço (Pano asfáltico ou recape).

➤ Base

Segundo Scherer (2016), base é a camada que tem como função resistir aos esforços verticais que advêm da ação do tráfego e do ambiente, assim como distribuir esses esforços às camadas mais inferiores. Normalmente podem ser compostos por brita graduada, solos estabilizados naturalmente ou quimicamente, por uma mistura de solo e agregado, dentre outras opções atendendo as necessidades do projeto.

➤ Sub-base

Por fatores de custo e de construção, quando a espessura da base é muito grande devido à alta exigência dos esforços solicitantes, a base pode ser subdividida em duas camadas, assim originando a sub-base. Ela pode ser composta pelos mesmos materiais da base, porém segundo Senço (2007) *apud* Scherer (2016), é de praxe utilizar materiais de qualidade inferior para torná-la menos onerosa. Já Sanches (2011), essa camada exerce principalmente na função de resistir as cargas transmitidas pela base do pavimento.

➤ Reforço do subleito

Senço (2007) *apud* Scherer (2016) define como uma camada complementar da sub-base ou camada suplementar do subleito. Já Balbo (2015) *apud* Scherer (2016) afirma que quando o subleito apresenta baixa resistência aos esforços verticais, é necessária a construção de uma camada com espessura constante, chamada de reforço do subleito. Normalmente constituído por um solo de melhor qualidade que o original, resultando a menores pressões em sua fundação.

➤ Subleito

De acordo com Marques (2012) subleito é o terreno de fundação em que todo o pavimento será apoiado. Segundo Balbo (2015) sua constituição provém de material natural consolidado e compactado como, por exemplo, nos cortes do corpo estradal ou por um material transportado e compactado.

2.4 Agregados reciclados ou resíduos

Segundo Leite (2001), agregados reciclados são definidos como um material granular, proveniente do processamento de materiais inorgânicos, nos quais anteriormente e exclusivamente foram utilizados na construção, e são aplicados novamente na construção.

Agregados reciclados em camadas de pavimentos

De acordo com Carneiro (2001), a utilização de entulho como agregado reciclável é uma das formas mais difundidas desses materiais quando utilizados em camadas de pavimentos urbanos, sobretudo em camadas de base e sub-base. Ele é considerado “não plástico” permitindo que seja utilizado em áreas com água porque gera pouca ou nenhuma lama, pode ajudar na estabilização de solos como redutor de plasticidade e possui expansibilidade baixa ou nula, assim não fragmentando nenhuma camada compactada. Sua aplicação também possui inúmeras vantagens:

- Utilização de parte dos materiais em granulometrias graúdas na qual reduz o consumo de energia na reciclagem de entulho;
- Possibilita a utilização dos diversos componentes do entulho (argamassa, cerâmica, areia, pedras etc.);

- Os aterros sanitários têm sua vida útil aumentada reduzindo a implantação de novas áreas de descarte;
- Diminui os custos da infraestrutura urbana;
- Preserva do meio ambiente.

2.5 Aplicação de geossintéticos para reforços em solos.

Segundo Góngora (2011) os geossintéticos são compostos fabricados de polímeros, em formatos de fitas ou filamentos, que quando adicionado ao solo pode exercer diversas funções, sendo as principais: reforço, drenagem, filtração e separação. E ainda diminuem a quantidade de manutenções necessária para garantir a qualidade do pavimento. Araújo (2021) ressalta que estes são produtos sintéticos desenvolvidos a fim de solucionar problemas na engenharia civil como, por exemplo, em estradas.

Segundo o GMA (2000) *apud* Antunes (2008), a FHWA (“Federal Highway Administration”) enumera vários benefícios em se utilizar reforço geossintético em rodovias, dentre os quais merecem destaque os seguintes:

- Prevenir que finos do subleito passem para base; Aumento na resistência do subleito; Redução dos recalques diferenciais da rodovia.
- Prevenção da contaminação do material de base com agregados mais drenantes;
- Redução da profundidade de escavação requerida para remoção de materiais de subleito indesejáveis;
- Redução da espessura de agregado do subleito;
- Redução de manutenções e extensão da vida útil do pavimento.

Segundo Azambuja (1994) *apud* Antunes (2008) os geossintéticos mais utilizados e recomendados em projetos de rodovias são os geotêxteis e os geogrelhas.

3 METODOLOGIA

A coleta de amostras foi realizada em uma obra da empresa CINQ Desenvolvimento Imobiliário, no condomínio Parville Quaresmeira, localizado na cidade de Trindade, Estado de Goiás. Trata-se de um empreendimento de condomínio horizontal residencial de alto padrão, nas margens da rodovia dos Romeiros,

principal via de ligação entre Goiânia e Trindade, cujas vias de trânsito serão prioritariamente para o uso de automóveis de pequeno a grande porte. O empreendimento possui uma área de 412.566 metros quadrados, com 434 lotes variando de 264 a 905m².

Os agregados foram obtidos através da empresa RNV Gestão de Resíduos, empresa que promove soluções sustentáveis na valorização de resíduos, e descrita como a maior recicladora de resíduos de construção e demolição do Centro-Oeste. As geomantas foram adquiridas via “internet”, de fornecedores idôneos, com certificação e atestado de qualidade suficiente para aplicações em rodovias e pavimentos.

As fases de testes e ensaios com os materiais coletados, testes adicionais além daqueles já feitos pelo empreendimento até a época de coleta de dados, e que servirão para analisar resultados com as adições previstas nos objetivos, foram realizados no laboratório Bloco J da área III sala 11, laboratório de mecânica dos solos, Setor Leste Universitário, Goiânia – GO.

Vale ressaltar que para a construção dos gráficos de resultado dos ensaios, os valores presentes de “umidade” representam os valores da umidade real (umidade da amostra + umidade adicionada) e não apenas da umidade adicionada.

3.1 Caracterização e classificação do solo

Segundo a ABNT NBR6502:1995 – Rochas e solos – Terminologia, visou classificar o solo a partir da sua granulometria, sendo argila menor que 0,002 mm, silte entre 0,002 e 0,06 mm, areia entre 0,06 e 2,0 mm e pedregulho entre 2,0 e 60,0 mm. A determinação do material foi feita a partir do processo de peneiramento e sedimentação de sólidos em meio líquido.

Segundo a citação do Sistema Rodoviário de Classificação "AASHTO" (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), o solo é classificado em sete grupos (BREWER, 2007). Após o processo de classificação por peneiramento, outros fatores como o Limite de Liquidez, Índice de Plasticidade e o cálculo do Índice de Grupo (Ensaios feitos segundo as Normas ABNT NBR6459:2016 – Determinação do limite de liquidez e ABNT NBR7180:2016 – Determinação do limite de plasticidade), foram parâmetros importantes para a determinação da classe do solo. Na Figura 2, imagem

do ensaio de sedimentação, o qual realizado para o cálculo do índice de grupo.

Figura 2 - Ensaio de sedimentação



Fonte: Dos autores (2021)

3.2 Ensaio de compactação

O ensaio foi realizado de acordo com a ABNT NBR7182:2016 – Ensaio de Compactação de Solos, que determina a relação entre umidade e massa específica aparente seca de solos compactados. Foram feitos 5 corpos de prova com solo + RCD e 5 corpos de prova com solo + RCD + geomanta, com o nível de umidade adicionado de 6%, 8%, 10%, 12% e 14% em ambos os tipos de amostra. Inicialmente para cada corpo de prova se obteve o “peso do solo compactado” a fim de calcular o “ γ ” (peso específico aparente do solo úmido). Com os dados anotados, calculou-se o “h” (teor de umidade) e por fim o “ γ_s ” (peso específico aparente seco). O resultado do ensaio é a capacidade máxima de compactação do material testado. Na Figura 3, imagens do ensaio de compactação.

Figura 3 - Ensaio de compactação



Fonte: Dos autores (2021)

3.3 Ensaio de Expansão

A norma ABNT NBR 9895:2016 – Solo – Índice de Suporte Califórnia, que prescreve o método para determinar a expansão de solos, utilizando amostras deformadas, de materiais que passam pela peneira 19 mm, tendo no mínimo 5 corpos de prova. Os mesmos corpos de prova do ensaio de compactação foram posteriormente colocados em um tanque com água para o ensaio de expansão. Os cilindros tiveram suas medidas do extensômetro aferidas diariamente, no mesmo horário, por um período de 3 dias.

3.4 Ensaio de ISC (Índice de Suporte Califórnia)

Seguindo a norma ABNT NBR 9895:2016 – Solo – Índice de Suporte Califórnia, que prescreve o método para sua determinação, foram utilizados os mesmos corpos de prova do ensaio de compactação e expansão. Feito o ensaio de expansão, os corpos de prova foram retirados da água e deixados para secar por um período de 15 minutos, e então foram levados até uma prensa eletro hidráulica SOLOTESTE modelo CH-502, para realizar a penetração, de maneira a seguir a norma se atentando a anotar os valores previstos no quadro 2 – modelo de leituras do relógio comparador (deflectômetro).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do solo sem adição de RCD e geomanta foram fornecidos pela empresa GF Engenharia e Geotecnia, que foi a responsável contratada pela CINQ Desenvolvimento Imobiliário para a realização de testes efetuados “*in situ*”.

É importante ressaltar que o solo apresentou melhora em todos os ensaios realizados com adição de RCD se comparado aos ensaios da empresa com solo “puro”.

A partir desta afirmação, a discussão será mais bem discutida a partir da Figura 9 onde se inicia a comparação dos diferentes resultados.

4.1 Granulometria

O ensaio de granulometria mostrou um solo do tipo “areia silto argiloso” com textura predominante “areia”. A amostra quando destorroada já apresentava visualmente uma pequena quantidade de grossos, como se pode perceber na Figura 4.

Figura 4 - Solo no processo de destorroamento

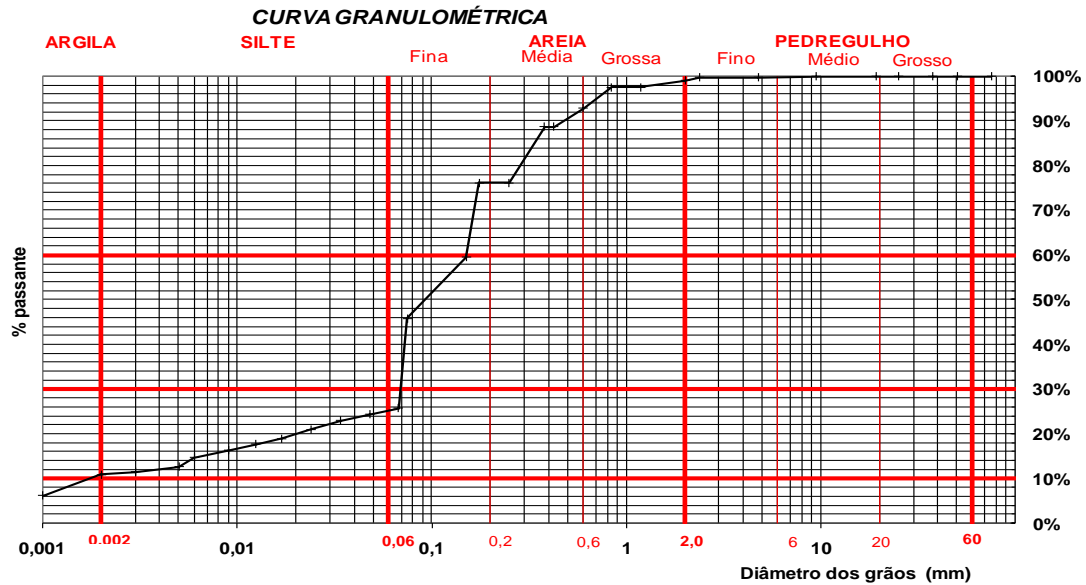


Fonte: Dos autores (2021)

O resultado do peneiramento dos grossos, sedimentação e peneiramento dos finos nos permitiu a construção da seguinte curva granulométrica presente na Figura 5.

Após a análise da curva granulométrica, foi possível perceber que o solo em questão é mal graduado, pois apresenta uma heterogeneidade na sua distribuição, com falha na faixa granulométrica dos materiais grosseiros, e não apresenta pedregulhos em sua composição, tornando assim a curva desuniforme – distribuição essa característica de materiais que como estes foram classificados anteriormente.

Figura 5 – Curva granulométrica



4.2 Limites de Atterberg

Os limites de liquidez, plasticidade e o índice de plasticidade foram parâmetros fundamentais para a classificação do solo. Na Figura 6 estão os resultados dos testes realizados.

Figura 6 - Resultados dos limites de Atterberg

RESULTADOS	
LIMITE DE LIQUIDEZ	24,3
LIMITE DE PLASTICIDADE	20,4
ÍNDICE DE PLASTICIDADE	3,9

A partir destes resultados é possível classificar o solo como um solo do grupo A-4, seguindo o Sistema Rodoviário de Classificação AASHTO. De acordo com o sistema, essa classificação não é recomendada para subleito, pois seu comportamento é de sofrível a mau.

Já através do Sistema Unificado de Classificação, este solo se classificou no grupo SC, de forma a apresentar boa trabalhabilidade, resistência de regular a boa, peso específico variando de 1,7 a 2,0 g/cm³ e seu valor como fundação entre má a bom.

O solo, de acordo com o sistema rodoviário de classificação, não é recomendado para subleito, porém esta classificação se contradiz com o Índice de Grupo (IG). O solo analisado apresentou IG = -0,5642, no qual adota-se IG = 0, sendo este um valor de solos com ótima capacidade de suporte. Apesar de pertencer ao sistema rodoviário de classificação, este IG ficou mais

condizente com a classificação do sistema unificado, pois para este sistema o solo variou de regular a bom, concordando com o IG ótimo obtido nos cálculos.

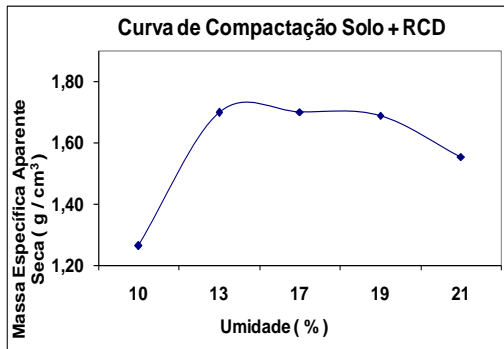
A ausência de pedregulhos na curva granulométrica do solo pode ter sido o motivo do solo ser classificado como um solo A-4, visto que o solo apresentou uma ótima capacidade de suporte segundo seu IG. Após a adição do RCD o solo apresentou uma melhora quando comparado com os resultados do solo puro. Essa melhora se deu provavelmente por sua nova distribuição granulométrica, já que este solo é pobre em pedregulhos que supriu seus vazios com a adição dos agregados.

Se levado em consideração o trabalho de Sousa e Balduino (2019), com um solo de características parecidas, os pesquisadores concluíram que ao adicionar RCD, acima de 5%, em um solo com predominância argilosa apresenta resultados satisfatórios para reforço de subleito. O presente trabalho adicionou 10% de RCD, que ao decorrer dos resultados que serão expostos a seguir, mostrará válida a afirmação de resultados satisfatórios acima.

4.3 Ensaio de compactação

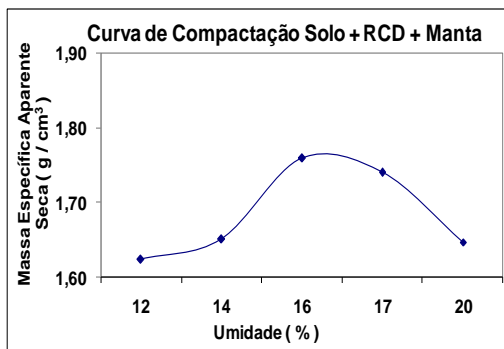
Os corpos de prova tanto de solo + RCD quanto de solo + RCD + geomanta, com o nível de umidade adicionado de 6%, 8%, 10%, 12% e 14%, apresentaram os resultados de ensaio com as seguintes curvas de compactação presentes nas Figura 7 e Figura 8.

Figura 7 - Curva de compactação solo + RCD



A Figura 7 apresenta a curva de compactação do solo com adição de RCD. É possível notar certa similaridade nos cilindros de 13%, 17% e 19% quanto sua massa específica aparente e uma baixa nos cilindros de 10% e 21%. O menor valor (10%) representa uma queda de 25% da massa específica aparente se comparado ao de maior (13%).

Figura 8 - Curva de compactação solo + RCD + Manta



A Figura 8 representa também uma curva de compactação, porém além da adição de RCD, também se adicionou a manta geotêxtil ao solo. Com a adição da manta, o gráfico apresentou maior uniformidade. A curva foi progressiva até o cilindro de 16% de umidade

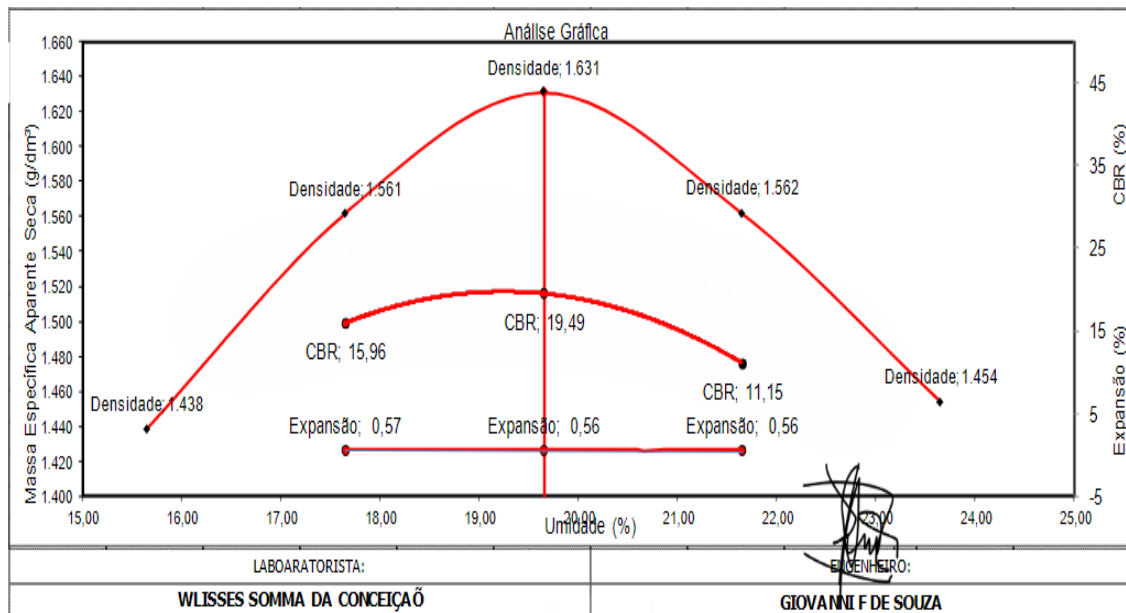
(pico de maior valor) e regressiva após este valor. O menor valor (12%) representa uma queda de 10% da massa específica aparente se comparado ao pico (16%).

Além do quesito “massa específica aparente”, quando adicionado a manta para uma mesma quantidade de solo e adicionando uma mesma umidade, é possível perceber que nos cilindros de menor umidade houve uma retenção de água e nos cilindros de maior umidade, houve o efeito inverso.

Almeida (2021) em sua pesquisa adicionou diferentes tipos de geotêxteis ao solo e durante os ensaios de compactação pode concluir que os geotêxteis fornecem distintas funções de drenagem, o que pode justificar essa variação no seu comportamento.

A Figura 9 representa o resultado dos ensaios de compactação, expansão e ISC realizados pela empresa GF Engenharia e Geotecnia. Estudos realizados por Pinto (2000) *apud* Sousa e Balduino (2019) afirmam que a compactação de um material utilizado em camadas de pavimento permite aumentar sua densificação e reduzir o número de vazios. Comparando a afirmação os resultados dos ensaios, por se tratar de um solo pobre em pedregulhos, uma possível resposta para o aumento da densidade quando adicionado o RCD, está justamente no complemento em que o RCD dará ao solo no quesito distribuição granulométrica, a falta de partículas com diâmetros maiores no solo é suprida reduzindo assim o número de vazios.

Figura 9 - Resultados da GF Engenharia e Geotecnia



Fonte: GF Engenharia e Geotecnia (2020)

Analisando as imagens, é possível perceber a diferença de uniformidade do gráfico quando há a presença da manta geotêxtil (Figuras 10 e 11). O RCD possui densidade própria e com a adição da manta, houve uma uniformização do comportamento do solo. Em termos de compactação, a densidade máxima atingida foi de $1,7 \text{ g/cm}^3$ sem a manta, de $1,76 \text{ g/cm}^3$ com a manta e de $1,63 \text{ g/cm}^3$ com solo apenas, já a umidade ótima foi de 16,54%, 15,94% e 19,7% respectivamente. Analisando os resultados da Figura 9, e comparando aos resultados de solo + RCD e solo + RCD + manta, é possível perceber que para valores de umidades similares, a massa específica aparente apresentou aumento. Essa densidade com a Manta apresentou ganho de 5% em relação a curva da Figura 7 e um ganho de 8% em relação a Figura 9.

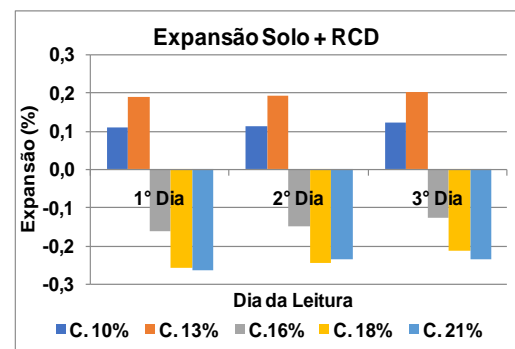
Quanto ao aumento de densidade devido a adição da manta, uma alternativa está no fato do geotêxtil ter capacidade de alterar na distribuição das deformações horizontais de tração como já dito em Bins (2019) causada pela compressão de alguma carga sobre o pavimento, que nesse caso a compressão veio do pistão do ensaio de compactação.

4.4 Ensaio de expansão

Os corpos de prova tanto de solo + RCD quanto de solo + RCD + geomanta, com o nível de umidade adicionado de 6%, 8%, 10%, 12% e 14%, foram submetidos ao

ensaio de expansão. Os resultados do ensaio são apresentados nos seguintes gráficos nas Figura 10 e 11.

Figura 10 - Gráfico da expansão Solo + RCD

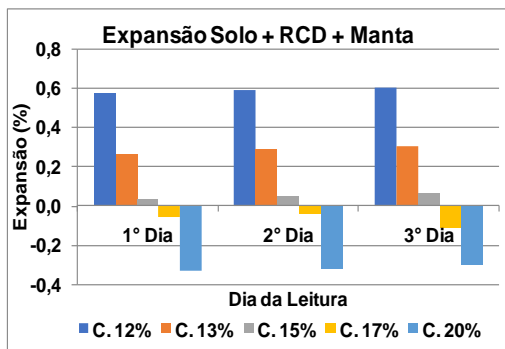


A Figura 10 apresenta o gráfico de expansão para solo + RCD. No período de 3 dias, os cilindros com 10% e 13% de umidade apresentaram resultados de expansão enquanto os demais cilindros apresentaram resultados de retração. A maior expansão foi anotada no 3º dia pelo cilindro de 13% e a maior retração foi pelo cilindro de 21% no primeiro dia.

Se comparado ao gráfico de expansão da Figura 9, é possível perceber que para o intervalo de 17,5% de umidade até 21%, o solo apresenta expansão de 0,56% de média, já nos resultados com a adição de RCD, para este mesmo intervalo de umidades, a média foi de -0,2%.

Este fenômeno de retração pode ser explicado a partir dos estudos de Motta (2005), nele foi possível verificar que o agregado reciclado em geral absorve muita água, que pelo autor, este fenômeno se dá provavelmente por sua alta porosidade. Ou seja, o RCD possivelmente absorveu a água que estava no solo fazendo assim com que ele retraísse.

Figura 11 - Gráfico da expansão Solo + RCD + Manta



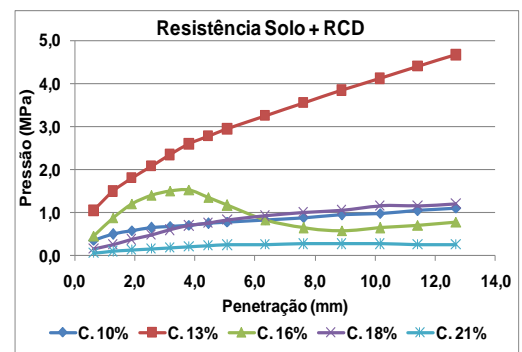
Já a Figura 11 representa os resultados da expansão com a adição de RCD + manta geotêxtil. Assim como no gráfico da Figura 10 é possível perceber que os cilindros com menor porcentagem de umidade apresentaram expansão e os cilindros com maiores umidades apresentaram retração. A partir dos 3 gráficos de expansão considerando a umidade ótima por volta dos 16%, a média do solo ficou em 0,56%, do solo + RCD -1,5% e do solo + RCD + Manta 0,03%. A diferença da adição da manta foi no cilindro de 15%, que se considerado a umidade ótima, é possível perceber a capacidade da manta em condições ideais do solo em não permitir a expansão ou retração desse solo. Essa característica se fez presente nas pesquisas de Mendes e Souza (2015) que concluiu que a utilização de geotêxtil é muito abrangente na pavimentação asfáltica tendo como uma de suas características ser um material bastante drenante. O que explica essa capacidade da manta em não permitir a expansão do solo está na definição de “sistemas drenantes” (SUZUKI *et al*, 2013) que diz que drenos tem o objetivo de coletar e remover a água que infiltra, ou seja, a manta provavelmente realizou essa função de dreno no ensaio de expansão.

4.5 Ensaio de ISC

Após 15 minutos da retirada dos corpos de prova do tanque de água, iniciou-se o ensaio de penetração. A Figura 12 e Figura 13 representam os resultados de

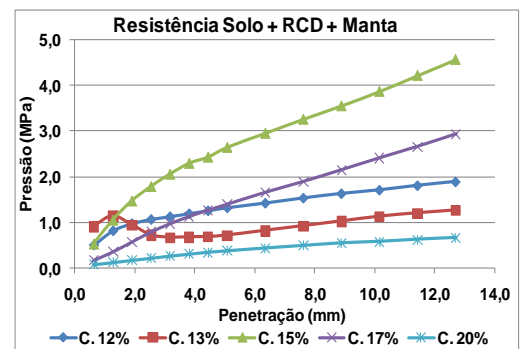
resistência do solo quando adicionados RCD e RCD + Manta.

Figura 12 - Resistência do Solo + RCD



A Figura 12 representa o gráfico com a pressão em função da penetração do solo adicionado RCD. No gráfico é possível perceber uma similaridade nas curvas quanto sua resistência se destoando apenas o cilindro com 13% de umidade, que teve um valor 75% maior que o segundo mais resistente (18%).

Figura 13 - Resistência do Solo + RCD + Manta

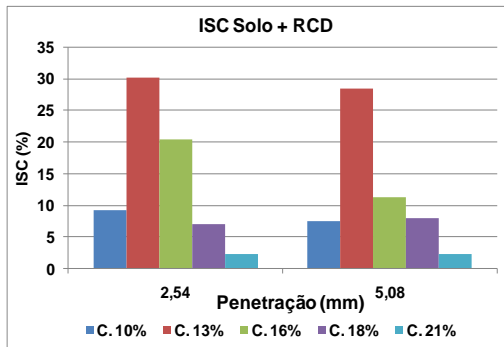


Já a Figura 13, também é um gráfico de resistência, porém com a adição de RCD + manta geotêxtil. Os resultados foram mais próximos de forma crescente uns dos outros, ou seja, a manta permitiu uma curva crescente em seus resultados (no geral) e não apenas que uma única curva se diferenciasse tanto das demais. A porcentagem de aumento de resistência entre o maior e o segundo maior agora foi de 55%.

Estes resultados se destoam de Motta (2005) quem seus testes perceberam um ganho de resistência praticamente imperceptível. Tal variação ocorreu provavelmente pelo diferente tipo de agregado e diferente tipo de solo utilizado entre os autores.

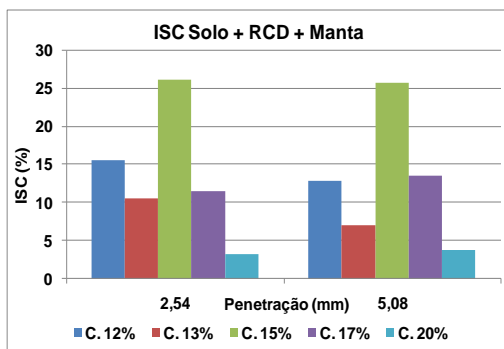
A partir dos resultados encontrados de resistência, foi possível a realização do ISC, que estão expostos nas Figura 14 e Figura 15.

Figura 14 - ISC Solo + RCD



A Figura 14 apresenta o gráfico do ISC do solo + RCD. Com a análise do gráfico é possível perceber que seu pico ocorreu com 13% de umidade alcançando um ISC de 30%, que representa 90% do valor de menor ISC (21% de umidade).

Figura 15 - ISC Solo + RCD + Manta



Já a Figura 15 apresenta o gráfico do ISC do solo + RCD + Manta. Com a análise do gráfico é possível perceber que seu pico ocorreu com 15% de umidade alcançando um ISC por volta de 26%, que representa 85% do valor de menor ISC (20% de umidade).

Ao comparar os resultados, tanto a adição de RCD quanto a adição de RCD + Manta, apresentaram aumento significativo no ISC. O pico de ISC no solo foi de 19,49%, em solo + RCD foi de 30% e no solo + RCD + Manta, foi de 26%. Com essa análise, é possível perceber que a utilização de agregados reciclados não só contribui como material de substituição de solo, como também melhorou a resistência do solo. Este resultado de aumento de ISC com adição de RCD já se apresenta nas pesquisas de Araújo e Sales (2018) que

alcançaram ISC na casa dos 33,5% e de Leite *et.al* (2016) que apresentou ISC de 22,5%, ambos com porcentagens diferentes de adição de agregados, porém com resultados satisfatórios. Essa característica de resistência deve ter sido atingida justamente pela melhor compactação do solo devido ao preenchimento de vazios, que fez com que o solo resistisse melhor aos esforços no ensaio de compactação e consequentemente na penetração, gerando assim mais resistência e maior ISC do que com o solo sem aditivos.

5 CONCLUSÕES

De acordo com as pesquisas e a metodologia aplicada, pode-se concluir que:

A partir da granulometria, o solo coletado categorizou-se do tipo “areia silto argiloso” mal graduado. A partir dos limites de Atterberg, seguindo o Sistema Rodoviário de Classificação AASHTO este solo se classificou como parte do grupo A-4, seguindo o Sistema Unificado de Classificação, se classificou no grupo SC e seu Índice de Grupo foi calculado em 0.

Os resultados de compactação apresentaram valores máximos de massa específica aparente do solo natural, solo com adição de RCD e solo + RCD + Geomanta respectivamente: 1,63 g/cm³, 1,7 g/cm³ e 1,76 g/cm³, apresentando uniformidade gráfica quando adicionado a manta geotêxtil, e o maior resultado para o tratamento com agregados e manta.

Sobre a Expansão, pode-se concluir que os valores de expansão das amostras com adições, diminuíram em relação aos resultados do solo natural. Considerando a umidade ideal de 16%, o solo natural apresentou expansão de 0,56%, solo + RCD de -1,5% e o solo + RCD + Manta de 0,03%.

O solo com aditivos apresentou bons parâmetros de resistência. O ISC com solo + RCD e solo + RCD + Manta apresentaram respectivamente valores de quase 11% e 7% a mais que o resultado de ISC do solo natural.

A adição de RCD e Geomanta se mostrou em teste ter resultados satisfatórios quando misturados às camadas de subleito de solo analisado. Estes resultados geram expectativas positivas para aplicação do RCD não só no subleito, mas também nas demais camadas do pavimento, o que propicia a previsão de que a união

desses materiais contribua para as características buscadas de durabilidade e redução de custos em pavimentos rodoviários.

6 AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradecemos a Deus e a nossa família que juntamente, formaram a base sólida da fundação necessária para alcançar os objetivos traçados. Em especial à um ente querido, que tanto almejou ver a realização desse momento único em nossas vidas Amélia Silva Moreira (*in memoriam*), que hoje conforta nossos corações com a sensação de dever cumprido.

À Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC), e aos nossos professores pelas horas de ensinamentos passados, pelas experiências adquiridas ao longo do percurso.

Ao nosso Professor Orientador MSc. Rodrigo Martinez Castro, por todo apoio, dedicação e ensinamentos compartilhados, proporcionando um melhor desempenho na nossa carreira profissional.

Aos Professores da banca de avaliação, Dr. Benjamim Jorge Rodrigues dos Santos e Msc. Priscilla Borges de F. Rodrigues pela disponibilidade sendo fundamental para a concretização da investigação.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, Mariléia Muniz Mendes. Reciclagem de lixo numa escola pública do município de Salvador. *Revista Virtual*, v. 1, n. 2, p. 96-113, 2005.

ALMEIDA, Déborah Castro. Análise do comportamento mecânico de sistemas de solos reforçados com geotêxteis. 2021.

ARAÚJO, Caio César Luz; DA SILVA SALES, Natássia. Análise da mistura do agregado de resíduos da construção e demolição (RDC) associado ao solo laterítico para aplicação em sub-base de pavimentos, 2018.

ARAÚJO, Isis Magalhães. Análise da aplicação de materiais geossintéticos em fundações de barragens de terra. 2021.

ANSELMÍ, Elvis Elton Gomes. Estudo da curva de índice de suporte califórnia na mistura de solo-agregado: analisando seu comportamento com diferentes porcentagens de argila-arenosa vermelha. 2015.

ANTE, Jaime Rafael Obando. Geossintéticos como reforço de revestimentos em pavimentação. 2012.

ANTUNES, Luiz Gustavo de Souza. Reforço de pavimentos rodoviários com geossintéticos. 2008.

BALBO, José Tadeu. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. Oficina de Textos, 2015.

BINS, Bianca. Estudo de alternativas da utilização de camadas anti-reflexão de trincas em restauração de pavimentos flexíveis. 2019.

CARNEIRO, Alex Pires; BURGOS, Paulo César; ALBERTE, Elaine Pinto Varela. Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos. Projeto Entulho Bom. Salvador: EDUFBA/Caixa Econômica Federal, p. 190-227, 2001.

BREWER, Kenneth A. AASHTO Maintenance Manual for Roadways and Bridges. AASHTO, 2007.

DE OLIVEIRA, Matheus Kennedy et al. Aproveitamento do RCD como base e sub-base em pavimentações com baixo volume de tráfego no município de Porto Nacional. *Inventionis*, v. 1, n. 2, p. 19-29, 2019.

DIAS, João José da Fonseca Marques Simões. Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas. 2012. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia.

FERNANDES, Diogo Amaro Freitas. A aplicação estrutural de betões de elevado desempenho (HPC e UHPC). 2011. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia.

GÓNGORA, Ivonne Alejandra Gutiérrez. Utilização de geossintéticos como reforço de estradas não pavimentadas: influência do tipo de reforço e do material de aterro. 2011.

HAMZAH, Muhamad Nasir. Root biomass, production, and decomposition in the riparian forests of an agricultural watershed (GEORGIA). 1983. Tese de Doutorado. University of Georgia.

LEITE, Cássio Adler Vitorino Gonçalves et al. Análise de melhoramento de solo com brita e resíduos de construção e demolição para camadas de pavimentos no estado do Ceará. *Conexões-Ciência e Tecnologia*, v. 10, n. 2, p. 17-23, 2016.

LEITE, Mônica Batista. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. 2001.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. Pavimentação. Notas de aula. Universidade, 2012.

MENDES, Deyverson de Souza; SOUZA, Josimar Vieira De. A aplicação do geotêxtil na pavimentação asfáltica. 2015.

MOTTA, Rosângela dos Santos. Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego. 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

RICCI, Gino; BALBO, José Tadeu. Resistência e elasticidade de concretos compactados com agregados reciclados de construção e de demolição para aplicações em pavimentação. *Transportes*, v. 17, n. 2, 2009.

SANCHES, Murilo Henrique. Aplicação de sistema de gestão da qualidade na execução de obras de pavimentação asfáltica, baseado nas diretrizes da ABNT NBR ISO 9001: 2008. 2011.

SCHERER, Camila. Influência do comportamento resiliente do subleito no desempenho de pavimentos flexíveis. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso.

SUZUKI, Carlos Yukio; AZEVEDO, Angela Martins; JÚNIOR, Felipe Issa Kabbach. Drenagem subsuperficial

de pavimentos: Conceitos e dimensionamento. Oficina de Textos, 2013.

VAN IMPE, William F. Soil improvement techniques and their evolution. 1989.