

Karoline Costa Bulhões Duarte

Estudo de viabilidade técnica para o uso de RCC em camadas de base e sub-base de
pavimento flexível utilizados em vias urbanas

Palmas – TO
2020

Karoline Costa Bulhões Duarte

Estudo de viabilidade técnica para o uso de RCC em camadas de base e sub-base de
pavimento flexível utilizados em vias urbanas

Projeto de Pesquisa elaborado e apresentado como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) II do curso de bacharelado em Engenharia Civil do Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientador: Prof. Esp. Euzir Pinto Chagas.

Palmas – TO

2020

Karoline Costa Bulhões Duarte

Estudo de viabilidade técnica para o uso de RCC em camadas de base e sub-base de
pavimento flexível utilizados em vias urbanas

Projeto de Pesquisa elaborado e apresentado como
requisito parcial para aprovação na disciplina de
Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) II do curso de
bacharelado em Engenharia Civil do Centro
Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientador: Prof. Esp. Euzir Pinto Chagas.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Esp. Euzir Pinto Chagas

Orientador

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

Prof.a Dra. Jacqueline Henrique

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

Prof.a Msc. Edivaldo Alves dos Santos

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

Palmas – TO

2020

Dedico este trabalho aos meus pais pelo o incentivo que recebi para alcançar este grande objetivo. A eles eu ofereço minha eterna gratidão.

O Senhor é refúgio para os oprimidos, uma torre segura na hora da adversidade. Os que conhecem o teu nome confiam em ti, pois tu, Senhor, jamais abandonas os que te buscam.

Salmos 9:9-10

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me guiar em todos os momentos, conceder paciência e sabedoria para esperar pela concretização deste sonho. Ele que foi minha Rocha e refúgio, esperança e conforto para enfrentar as dificuldades desta árdua jornada.

Aos meus pais, Joscélia e José Carlos, pelo amor que sempre foi conferido a mim e meus irmãos, as palavras de motivação que jamais cessaram, mesmo em dias sombrios. A vocês digo: serei eternamente grata, pois sei todo o esforço e abdições necessárias para que pudessem dar aos seus três filhos o ensino superior.

Aos meus irmãos, Rayane e Josafá Neto, pelo amor e confiança de que eu conseguiria trilhar qualquer caminho que escolhesse. Você minha irmã, sempre cuidou de mim como mãe, carinhosa, gentil, forte e dura quando preciso foi, toda conquista obtida até este momento é essencialmente sua.

Ao meu namorado, Matheus, que sempre me apoiou e acreditou no meu potencial mesmo quando eu mesma duvidara, suportou pacientemente todos os dias difíceis. E ajudou-me na coleta dos insumos para a pesquisa.

Ao meu cunhado, Leandro, por me incentivar e ajudar durante esta jornada. Grande bênção o Senhor deu a minha família quando permitiu que pudéssemos tê-lo conosco.

A todos os meus amigos do curso de graduação que compartilharam dos inúmeros desafios que enfrentamos, sempre com o espírito colaborativo, em especial a minha amiga Josllanda Thaynara, que com sua amizade e companheirismo sempre me motivou e ajudou em momentos difíceis.

Minhas sinceras congratulações ao meu, Professor Orientador, Euzir Chagas, que prontamente aceitou orientar-me. E em todo o momento pôs-se a disposição para ensinar-me e apoiar neste Projeto de Pesquisa.

À Usina de Reciclagem do Ambiental, que me forneceu os agregados reciclados para a sua caracterização para a concretização desta pesquisa.

RESUMO

DUARTE, Karoline Costa, Bulhões. **Estudo de viabilidade técnica para o uso de RCC em camadas de base e sub-base de pavimento flexível utilizados em vias urbanas**. 2020. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas/TO, 2020.

O presente trabalho discorre sobre Estudo de viabilidade técnica para o uso de RCC em camadas de base e sub-base de pavimento flexível utilizados em vias urbanas. A pesquisa foi realizada por intermédio de ensaios laboratoriais, que tem como objeto de estudo do solo coletado em seu estado puro, e amostras produzidas com teores de RCC em 30%, 50% e 60%, em substituição a massa total do solo. Para atingir o objetivo proposto, foram realizados ensaios comuns à caracterização de agregados convencionais, como: análise granulométrica, limites de consistência, compactação, índice de suporte Califórnia e expansão. Os resultados obtidos com as substituições foram, satisfatórios, no que tange o seu comportamento mecânico, superou em uma mistura, o solo *in natura*, sendo considerado apto ao uso em camada de base para tráfego leve. As misturas apresentaram graduação descontínua, mal graduada, com IP aceitável somente na amostra de solo natural e mistura 3. A expansão dos corpos-de-prova foram inferiores aos limites mínimos, ora para camada de sub-base nas misturas de (30% RCC e 70% solo) e (50% RCC e 50% solo), ora para emprego em base na proporção de (60% RCC e 40% solo). Portanto, os estudos realizados apontaram para promissora viabilidade técnica, sustentável e economicamente atraente, para o emprego de resíduos da construção civil como agregado estabilizante, em substituição aos convencionais.

Palavras Chaves: Resíduos da construção civil; pavimentação; base; sub-base.

ABSTRACT

DUARTE, Karoline Costa, Bulhões. **Technical feasibility study for the use of RCC in flexible base and sub-base layers used in urban roads.** 2020. 54 f. Course Conclusion Paper (Graduation) - Civil Engineering Course, Lutheran University Center of Palmas, Palmas / TO, 2020.

The present work discusses the Technical Feasibility Study for the use of RCC in base and sub-base layers of flexible pavement used in urban roads. A research was carried out through laboratory tests, which have as object of study soil collected in its pure state, and produced with RCC content in 30%, 50% and 60%, replacing the total mass of the soil. To achieve the proposed objective, common tests were carried out to characterize applied aggregates, such as: granulometric analysis, consistency limits, compaction, California support index and expansion. The results obtained as substitutions were, satisfactory, no type of mechanical behavior, surpassed a mixture, or soil in natura, being considered suitable for use in the base layer for light traffic. The mixtures shown in the graduation are discontinuous, poorly graded, with an acceptable IP only in the sample of natural soil and mixture 3. The expansion of the specimens is below the minimum limits, that is, in the sub-base in the base mixes (30% RCC and 70% soil) and (50% RCC and 50% soil), that is, for employment based on the proportion of (60% RCC and 40% soil). Therefore, the studies carried out point to promises of technical, sustainable and economically attractive viability, for the use of construction waste as a stabilizing aggregate, replacing applications

Key words: Construction waste; paving; base; sub-base.

Lista de Figuras

FIGURA 1 - PERFIL DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO PAVIMENTO RÍGIDO	24
FIGURA 2 - PERFIL DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO PAVIMENTO FLEXÍVEL	24
FIGURA 3 - GRADUAÇÃO DO SOLO	28
FIGURA 4 - LIMITES DE CONSISTÊNCIA	29
FIGURA 5 - CLASSIFICAÇÃO DA PLASTICIDADE DOS SOLOS.	30
FIGURA 6 - CURVAS DE PROCTOR PARA UM MESMO SOLO, COM DIFERENTES ENERGIAS DE COMPACTAÇÃO	31
FIGURA 7 - LOCALIZAÇÃO DA USINA DE RECICLAGEM DE RCC.....	33
FIGURA 8 – LOCALIZAÇÃO DA JAZIDA DE COLETA DO SOLO NATURAL.....	34
FIGURA 9 - FLUXOGRAMA	34
FIGURA 10 - RCC APÓS SER BRITADOR.....	36
FIGURA 11 - JOGO DE PENEIRAS USADO PARA O ENSAIO DE GRANULOMETRIA.	38
FIGURA 12 - APARELHO CASAGRANDE, UTILIZADO PARA O ENSAIO DE LIMITE DE PLASTICIDADE.	39
FIGURA 13 - AMOSTRA PARA O ENSAIO DE LIMITE DE PLASTICIDADE.	40
FIGURA 14 - CORPOS DE PROVA APÓS A COMPACTAÇÃO.....	42
FIGURA 15 - CURVA GRANULOMÉTRICA.	44
FIGURA 16 - FAIXAS GRANULOMÉTRICAS.	45
FIGURA 17 - CURVA DE COMPACTAÇÃO SOLO NATURAL.....	48
FIGURA 18 - CURVA DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA 1.	48
FIGURA 19 - CURVA DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA 2.	49
FIGURA 20 - CURVA DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA 3.	50
FIGURA 21:GRÁFICO ISS X EXPANSÃO	51
FIGURA 22 - ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA DAS AMOSTRAS.....	52

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - REQUISITOS PARA AGREGADO RECICLADO DESTINADO A PAVIMENTAÇÃO	35
TABELA 2 - COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS SOLO-AGREGADO RECICLADO	37
TABELA 3 - MASSA DO MATERIAL QUE PASSA EM CADA PENEIRA.....	44
TABELA 4 - COEFICIENTES DE CURVATURA E UNIFORMIDADE.....	46
TABELA 5 - RESULTADOS DOS LIMITES DE ATTERBERG.....	47
TABELA 6 - RESULTADOS DA UMIDADE ÓTIMA E PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO.....	50

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD)	27
QUADRO 2 - QUADRO PARA O CÁLCULO DE EXPANSÃO	42
QUADRO 3 - LEITURAS OBTIDAS NO ENSAIO DE PENETRAÇÃO DO PISTÃO NO SOLO.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBR	California Bearing Ratio
CEULP	Centro Universitário Luterano de Palmas
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DNIT	Departamento Nacional de Trânsito
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice Suporte Califórnia
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
RCC	Resíduo de Construção Civil
SIDUSCON	Sindicato da Indústria e da Construção Civil
TO	Tocantins
ULBRA	Universidade Luterana do Brasil

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	14
1.2	HIPÓTESES	14
1.3	OBJETIVOS	15
1.3.1	Objetivo Geral.....	15
1.3.2	Objetivos Específicos.....	15
1.4	JUSTIFICATIVA.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1	RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	17
2.1.1	Legislação e Normas técnicas.....	17
2.1.2	Definição de Resíduos da Construção Civil.....	18
2.1.3	Classificação	18
2.1.4	Aspectos Ambientais	19
2.1.5	Uso de Resíduos da Construção Civil na Pavimentação	21
2.2	PAVIMENTO DO PONTO DE VISTA ESTRUTURAL	23
2.2.1	Camadas Constituintes.....	24
2.3	SOLO.....	25
2.3.1	Classificação do Solo	26
2.4	ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	28
2.4.1	Análise Granulométrica	28
2.4.2	Limites de Consistência.....	29
2.4.3	Compactação	30
2.4.4	Índice de Suporte Califórnia – CBR.....	31
3	METODOLOGIA	33
3.1	CLASSIFICAÇÃO DO ESTUDO	33
3.2	LOCAL E PERÍODO DE REALIZAÇÃO	33
3.3	DESENHO DO ESTUDO	34
3.4	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	35
3.4.1	Coleta e Preparação de Amostras de Solo Natural	35
3.4.2	Coleta e Preparação de Amostras de Agregados Reciclados	36
3.4.3	Dosagens com Agregado Reciclado.....	37

3.4.4	Distribuição Granulométrica	37
3.4.5	Limites de Atterberg	39
3.4.6	Ensaio de Compactação	41
3.4.7	Expansão.....	42
3.4.8	Índice de Suporte Califórnia.....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	44
4.2	LIMITES DE ATTERBERG.....	46
4.3	CURVAS DE COMPACTAÇÃO.....	47
4.4	EXPANSÃO	51
4.5	ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA	51
5	CONCLUSÃO	53
	REFERÊNCIAS.....	55
	RELATÓRIO ANTIPLÁGIO- COPYSPIDER.....	59

1 INTRODUÇÃO

Denomina-se pavimento, uma estrutura de finitas camadas e espessuras construídas sobre a fundação, superfície de terraplenagem, que tem como objetivo técnico e econômico suportar os esforços advindos do tráfego de veículos, sob quaisquer condições climáticas, gerando conforto, segurança e conseqüentemente melhorando a trafegabilidade (BERNUCCI, 2008).

Com o crescimento das cidades, naturalmente surge a necessidade de expansão da malha viária urbana que configura um serviço básico para uma melhor condição de tráfego daqueles que a utilizam. No entanto, o crescimento desordenado e o reflexo da ausência de plano diretor definido, associado a falta de recursos financeiros para obras de pavimentação que possuem custo elevado, dificultam o processo de pavimentação urbana.

Em termos urbanos nos municípios brasileiros há uma considerável parcela de vias urbanas que ainda não são pavimentadas (MOTTA, 2005). Levando em consideração a extensão de todo o território nacional e a pouca disponibilidade de material granular em algumas regiões, é imprescindível o estudo de materiais que substituam a matéria prima natural.

E a utilização de agregados reciclados provenientes de resíduos da construção civil tem se mostrado uma alternativa viável, do ponto de vista estrutural e econômico. Os agregados reciclados apresentam menores custos de energia e de transporte devido a possibilidade de serem produzidos nas proximidades da obra de pavimentação de vias urbanas.

Tendo em vista os impactos causados pela exploração de jazidas minerais para extração e produção de agregados minerais como, poeira, poluição visual e sonora, poluição dos recursos hídricos com assoreamento dos mesmos. E a disponibilidade resíduos da construção civil que possam ser reciclados e reutilizados, esta pesquisa propõe o estudo da viabilidade técnica para uso de RCC em camadas de base e sub-base de pavimento flexível utilizado em vias urbanas.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Visando a necessidade da destinação adequada para resíduos sólidos provenientes da construção civil e a busca por materiais alternativos de alto desempenho com menor custo na pavimentação, quais as vantagens do uso de Resíduos da Construção Civil (RCC) como agente estabilizante nas camadas de base e sub-base de pavimento flexível?

1.2 HIPÓTESES

- A mistura solo-agregado reciclado apresentará baixo Índice de Plasticidade (IP);

- A mistura solo-agregado reciclado sofrerá aumento da resistência à penetração quando comparada ao solo *in natura*;
- A mistura solo-agregado reciclado apresentará baixa ou nula expansividade;
- A mistura sofrerá o aumento do Índice de Suporte Califórnia (ISC) diretamente proporcional a adição de agregado reciclado;

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade técnica para uso de RCC em camadas de base e sub-base do pavimento flexível, em substituição de materiais convencionais com enfoque em vias urbanas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analisar e qualificar resíduos de construção civil “Classe A” conforme CONAMA N° 307/2002, provenientes da Usina Reciclagem;
- Caracterizar o solo através de ensaios em laboratório: limites de Atterberg, distribuição granulométrica, compactação, ISC e expansão;
- Avaliar a influência do teor de agregado reciclado no comportamento mecânico do solo;
- Apresentar a mistura com melhor desempenho para o emprego em camadas de base e sub-base;

1.4 JUSTIFICATIVA

A indústria da construção civil, é responsável pela geração de um grande volume de resíduos provenientes de reformas, construções e demolições. Estudos demonstram que 40% a 70% do volume dos resíduos urbanos são produtos do processo construtivo, conforme observado por alguns pesquisadores como Hendriks (2000) e Pinto (1999). Em função disto, a preocupação com gerenciamento, deposição em locais incorretos, e problemas socioambientais tem despertado o interesse de pesquisadores na busca por alternativas que minimizem os impactos ambientais causados.

Haja vista, a necessidade do manejo correto e destinação de resíduos da construção civil, a busca por inovação tecnológica, métodos construtivos e materiais alternativos sustentáveis, tornaram esses insumos atraentes para o setor construtivo e principalmente para pavimentação, considerando a grande quantidade de matéria-prima consumida neste tipo de obra.

Deste modo, esta pesquisa propõe o estudo de viabilidade técnica na reciclagem de resíduos provenientes da construção civil para o uso em camadas de base e sub-base do

pavimento flexível urbano de baixo volume de tráfego, conferindo ao solo a capacidade de resistir e distribuir os esforços horizontais e verticais solicitantes.

Ademais, apresentará uma solução para problemas de logísticas na obtenção de materiais granulares estabilizantes, em virtude das grandes distâncias de jazidas minerais dos centros urbanos, com o propósito de diminuir custos operacionais, assim como, a desocupação de aterros sanitários.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

2.1.1 Legislação e Normas técnicas

Com o objetivo de alcançar a sustentabilidade e minimizar os impactos causados, foram criados conjuntos de políticas públicas, leis e normas técnicas para nortear o manejo de RCC's, são estas:

- Lei Nº 12.305, institui a PNRS, objetivos e diretrizes referentes à gestão integrada e gerenciamento de resíduos sólidos, atribui responsabilidades aos geradores e poder público. Também define princípios de prevenção, da ecoeficiência, do desenvolvimento sustentável, da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. Tem como objetivos a preservação da saúde pública e qualidade do meio ambiente, a não geração de resíduos sólidos, redução e incentivo às indústrias reciclar, a adoção e melhoramento de técnicas não poluidoras, etc.
- Planos De Gestão De Resíduos Sólidos: Manual De Orientação, faz recomendações de licenciamento para o manejo dos resíduos da construção civil, apresenta metodologias para elaboração dos planos, define diretrizes e estratégias. Este manual está embasado na resolução do CONAMA.
- Resolução CONAMA nº 307- A de maior destaque, leva em consideração a necessidade de implantação de diretrizes capaz de reduzir os impactos ambientais causados por resíduos provenientes da construção civil, define e classifica os resíduos, estabelece princípio prioritário para a não geração de resíduos, serve como instrumento para a implementação de um Plano Integrado de Gerenciamento que deve ser elaborado pelos municípios e Distrito Federal, e sugere destinação adequada para cada classe e estabelece prazos mínimos para elaboração de planos integrados.

Segundo o Sinduscon-SP, as normas técnicas juntamente as políticas públicas são fortes instrumentos para viabilizar a responsabilidade aos gestores do poder público e os geradores de resíduos. Dessa forma, foram preparadas normas que viabilizam o manejo correto em determinadas áreas, conforme as normas técnicas:

- ABNT NBR 15112:2004 - Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação – possibilitam o recebimento, manejo e triagem das diversas classes de resíduos poderão ser processados para valorização e aproveitamento enquanto matéria-prima.

- ABNT NBR 15113:2004 - Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação – sugerem procedimentos para o preparo da área para disposição dos resíduos de classe A, considerando a preservação para o futuro uso do material e área, para tanto, são desenvolvidos planos de controle e monitoramento.
- ABNT NBR 15114:2004 - Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação – possibilitam a transformação dos resíduos da construção classe A em agregados reciclados destinados à reinserção na atividade da construção.

As normas técnicas que estabelecem critérios para o uso de agregados reciclados, produto de resíduos da construção civil como potencial matéria-prima, são:

- ABNT NBR 15115:2004 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil- Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos
- NBR 15116:2004 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural.

2.1.2 Definição de Resíduos da Construção Civil

Segundo a resolução do CONAMA 2002, resíduos da construção civil são definidos como materiais “provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha”.

No Art. 13 da Lei n° 12.305/2010 consta que, os resíduos da construção civil são aqueles oriundos de construções, reparos, reformas e demolições, inclusive produto da escavação para preparação de terreno. Ainda sobre a lei, estão sujeitos à elaboração de um plano de gerenciamento “as empresas de construção civil, nos termos do regulamento ou de normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama.”.

2.1.3 Classificação

A resolução do CONAMA ainda classifica os resíduos da construção civil, da seguinte forma:

Classe A: são resíduos com grande potencial de reutilização ou reciclagem. Sendo eles, materiais advindos de reparos ou construção, demolição, reformas e peças pré-moldadas, como tijolos, telhas, blocos, placas de revestimento, meio fio e etc.

Classe B: esses são resíduos de diferentes destinações, tais como: vidros, papelão/papel, metais, madeiras, plásticos entre outros.

Classe C: são aqueles resíduos que ainda não possuem tecnologias e aplicações economicamente viáveis para serem reciclados.

Classe D: são os resíduos oriundos do processo construtivo, tais como: solventes, tintas, óleos e outros, ou aqueles contaminados, oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais, quaisquer produtos nocivos à saúde.

2.1.4 Aspectos Ambientais

Os impactos ambientais provenientes da cadeia produtiva da indústria da construção civil estão diretamente ligados aos principais estágios de produção como ocupação de terras, extração da matéria-prima, processamento e transporte da mesma, processo construtivo e disposição de resíduos gerados ao longo das atividades desenvolvidas na cadeia (Blumenschein, 2004).

O setor da construção civil “além de ser um dos maiores da economia ele produz os bens de maiores dimensões físicas do planeta, sendo conseqüentemente o maior consumidor de recursos naturais de qualquer economia” (JOHN, 2000). A grande quantidade de resíduos da construção civil gerados no mundo é motivo de preocupação para a preservação do meio ambiente. Conforme Motta (2005), a geração de resíduos no Brasil é motivo de preocupação decorrente da disposição em lugares irregulares como vias, rios, córregos, terrenos baldios e áreas de mananciais.

Para Pinto (2005), os resíduos da construção civil representam uma parcela de 40 a 70% da massa total dos resíduos sólidos urbanos nas cidades de médio e grande porte no Brasil.

O desperdício no setor é o maior gerador de resíduos sólidos quando comparado ao produto final, onde as perdas podem atingir 20 a 30% da matéria prima destinada à obra de edificações (LATTERZA, 1998).

Para John (2000), do ponto de vista técnico as possibilidades de aproveitamento dos resíduos dependem da sua composição e aplicação desejada, frações compostas com predominância de concreto estrutural podem ser beneficiadas como agregado para a produção de concreto estrutural, no entanto, argamassas e produtos cerâmicos que apresentam maior porosidade não possuem boa resistência enquanto agregados, por conseqüência, o seu uso é

limitado à blocos de concreto com menor resistência, camadas drenantes, contra-piso e camadas de base e sub-base de pavimentação quando misturadas ao solo.

A resolução do CONAMA 307, de 05 de julho de 2002, estabelece que para utilização do resíduo da construção civil, o material deve ser classificado como pertencente a classe A, e passar por um processo de reciclagem transformando-o em agregado reciclado de resíduo da construção civil.

É importante ressaltar que variáveis como indústria local, qualidade da mão de obra, clima, métodos construtivos, matéria-prima utilizada, causam diferenças na composição, e características do RCC, portanto, suas propriedades físicas, químicas e mecânicas podem diferir entre regiões. Motta (2005), afirma que existe uma considerável diferença nos valores encontrados de agregado reciclado natural no Brasil comparado aos internacionais.

Um problema latente na reciclagem é a variedade das características dos resíduos e a presença de tintas, solventes, asfaltos, óleos e outros poluentes químicos que podem prejudicar a qualidade do resíduo quando reciclado. Um exemplo simples é a contaminação de resíduos provenientes de obras marinhas que podem estar contaminados por sais corrosivos, que limita o seu uso em estruturas de concreto armado devido ao poder de corrosão dos cloretos (BOSCOV, 2008).

O processo de beneficiamento tradicional para reciclagem consiste em classificar o material, separar as fases indesejadas e britagem por compressão ou impacto. No Brasil existem tecnologias que permitem a separação de materiais com diferentes densidades, evidentemente esse processo de triagem aumenta consideravelmente os custos de operação (JOHN, 2000). Dessa forma, o processo de produção mais difundido no país é a separação manual.

Uma importante etapa no processo de beneficiamento do RCC é a britagem, tendo em vista que a fragmentação ocorre na região de menor resistência do material. Dessa forma, a porção menos resistente é reduzida à pequenas granulometrias, o produto da britagem resulta em uma curva granulométrica com capacidade de suporte maior, conforme Bodi et al. (1995) e Carneiro et al. (2001 apud FERNANDES, 2004, p. 14).

De acordo com, Triches e Kryckyj (1999) citado por Cardoso, alegam que a reciclagem de RCC apresenta muitas vantagens econômicas para administração Pública:

- Menor custo com a remoção de material depositado de forma clandestina;
- Aumento da vida útil de aterros sanitário;
- Diminuição nos custos de operação dos aterros sanitários;
- Redução nos custos de pavimentação e infraestrutura urbana.

2.1.5 Uso de Resíduos da Construção Civil na Pavimentação

Na bibliografia encontram-se relatos de uso dos resíduos da construção civil em camadas dos pavimentos, em virtude da sua disponibilidade, da possibilidade de reciclagem e resultados satisfatórios em testes de resistência e baixa ou nula expansão. Dessa forma, os agregados reciclados provenientes da construção civil tornam-se interessantes na substituição à matéria-prima convencional e não-renovável.

A reciclagem de RCC tem se desenvolvido bem nas últimas décadas, no entanto, há evidências da sua aplicação desde a antiguidade. Levy (1997), afirma que muitos autores alemães relatam que obras do Império Romano, foram construídas com agregado reciclado. Mas só a partir de 1928 que começaram a se desenvolver pesquisas para avaliar a granulometria e fator água cimento dos agregados (PORTO e SILVA, 2008).

Na Segunda Guerra Mundial, ocorreu o primeiro registro de reciclagem de entulho, utilizados na reconstrução das cidades europeias, portanto, a partir de 1946 teve início o desenvolvimento da tecnologia de reciclagem deste material.

Outra vantagem encontrada para o beneficiamento do RCC é o custo inferior quando comparado a brita graduada simples. Conforme Leite (2007), nos Estados Unidos essa diferença de custo é em torno de 30% menor.

Ainda de acordo Leite (2007), a primeira via pavimentada com RCC no Brasil encontra-se na zona oeste cidade de São Paulo, no ano de 1984, que recebeu o resíduo da construção civil na camada de reforço do subleito. Na década seguinte a cidade, implementou um programa de reciclagem para fins de pavimentação.

No Brasil a primeira cidade a implantar a primeira usina de reciclagem de resíduos da construção civil com a finalidade de produzirem agregados reciclados para a construção de base e sub-base de pavimentos, foi a Prefeitura de São Paulo, no ano de 1991, em Itatinga, na zona sul da cidade (CARNEIRO et al., 2001).

Mas São Paulo não é única pioneira no Brasil, desde meados da década de 90, a Prefeitura Municipal de Belo Horizonte emprega resíduos da construção civil em camadas de bases e sub-bases de pavimentos em projetos embasados no ISC e na experiência dos Engenheiros. O agregado do município é produzido sob gerenciamento da Prefeitura na Estação de reciclagem de Entulho da Construção Civil, onde são divididos em tipo A e B, compostos respectivamente de concreto e material de composição cerâmica e cimentícia (FERNANDES, 2004).

Em Salvador, também foram desenvolvidas pesquisas de viabilidade do uso de agregados reciclados em camadas de bases e sub-bases de pavimentos. Procederam com ensaios de caracterização física e mecânica, para agregados em sua fração graúda e miúda em diferentes teores. Os resultados encontrados atestaram a viabilidade técnica do uso do material de Salvador na pavimentação (CARNEIRO et al., 2001).

Conforme Carneiro et al. (2001), o uso de agregado reciclado em camadas de pavimento urbanos se tornou uma das soluções de reciclagem mais difundidas deste material nos últimos tempos. A utilização dos agregados reciclados na pavimentação dispõe de muitas vantagens como simplicidade dos processos de execução dos pavimentos e de produção do agregado reciclado provenientes de resíduos da construção civil; reaproveitamento de grande volume resíduos, na fração graúda e miúda. Contribuindo para redução de custos da obra, diminuição de materiais em aterros, ou em áreas inapropriadas.

No entanto, o maior atrativo para o uso de agregados reciclados em camadas de pavimento é o baixo custo, já que esses materiais são vendidos com preço inferior aos convencionalmente utilizados na pavimentação (MOTTA, 2005).

No final da década de 90, Trichês e Kryckyj (1999) realizaram um estudo para o aproveitamento RCC em Florianópolis. Foram realizados ensaios para avaliar as propriedades físicas e mecânicas do solo, do resíduo e solo-resíduo em diferentes porcentagens. Os resultados encontrados demonstraram que os resíduos apresentavam expansão nula quando estudados separadamente, e diminuía a expansibilidade das misturas. Os autores obtiveram valores de ISC menores para o resíduo em relação às misturas com solo, e chegaram à conclusão que a inserção do material fino dos solos propiciou um melhor entrosamento das partículas, consequentemente aumentou-se a capacidade de suporte.

Trichês e Kryckyj (1999), afirmam que o uso desse material na pavimentação urbana possui outras vantagens como: do ponto de vista da geotecnia o agregado reciclado não possui grande plasticidade, por este motivo pode ser usado em locais com lençol freático elevado; pode ser utilizado em solos de fundação para redução da plasticidade; apresenta baixa ou nenhuma expansibilidade; favorece a preservação de jazidas naturais; consome os rejeitos da construção civil e diminui o grande índice de entulho depositado em locais inapropriados; reduz o custo de implantação e gerenciamento de aterros.

Motta (2005), realizou estudos em laboratório das características físicas e mecânicas do agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil, provenientes da Usina de Reciclagem da Prefeitura Municipal da cidade de São Paulo, para o uso em camadas de base, sub-base e reforço de subleito em vias urbanas de baixo volume de tráfego. Os resultados

obtidos mostraram que uma grande parcela dos agregados é composta do material cimentício, portanto o ISC do agregado reciclado aumentou com o tempo de cura, em virtude da sua atividade pozolânica ativada com o processo de compactação. O agregado estudado apresentou resistência superior ao da brita graduada, mesmo em energia de compactação mais elevada.

A Secretaria de Serviços Urbanos do município de Uberlândia, juntamente com Câmara de Entulhos do SIDUSCON-TAP, Universidade Federal de Uberlândia e empresas transportadoras desenvolveram uma logística para a atividade de transporte e despejo de entulhos para o atendimento à Resolução do CONAMA. Então, no ano de 2003 foi construída primeira pista experimental com 1,60 quilômetros com RCC. A pista foi constantemente monitorada e só então quando julgado satisfatório seu desempenho, em 2005 a Secretaria de Obras utilizou o RCC beneficiado na construção da base de um pavimento em uma pista que interliga uma avenida e o Anel Viário da cidade em questão (MOREIRA et al., 2006).

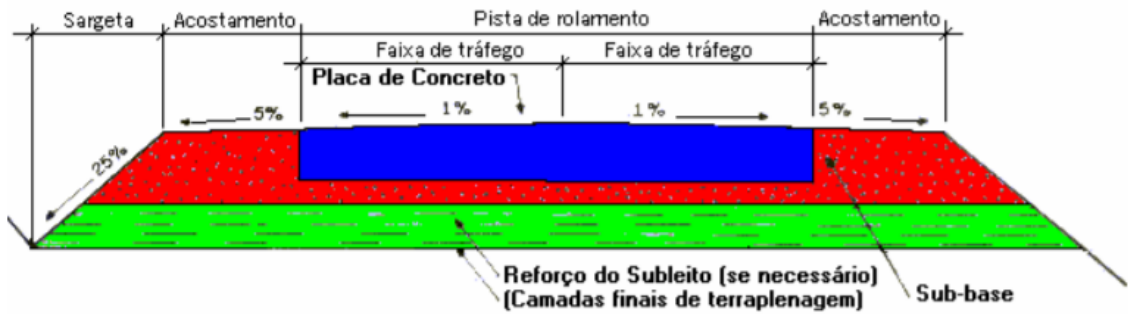
2.2 PAVIMENTO DO PONTO DE VISTA ESTRUTURAL

Segundo Bernucci (2008), pavimento pode ser definido como estrutura de múltiplas camadas de espessura finitas, situada acima do serviço de terraplenagem, destinadas a resistir os esforços provenientes do tráfego de veículos, condicionantes climáticas, assim como, proporcionar aos usuários conforto e segurança em seu deslocamento.

As funções dos pavimentos são: apresentar uma superfície mais regular, onde haja melhor conforto para passagem do veículo, uma superfície mais aderente, com mais segurança para pista úmida ou molhada e uma superfície menos ruidosa, com menor desgaste ambiental nas vias urbanas e rurais, de acordo com Balbo (2007).

Para Senço (2007, p.23) o pavimento rígido pode ser definido como aquele que sofre poucas deformações por apresentar elevada rigidez em relação as demais camadas, dessa forma absorve grande parte das tensões proveniente do tráfego, são constituídos principalmente de concreto de cimento e rompem por tração quando submetidos a deformações.

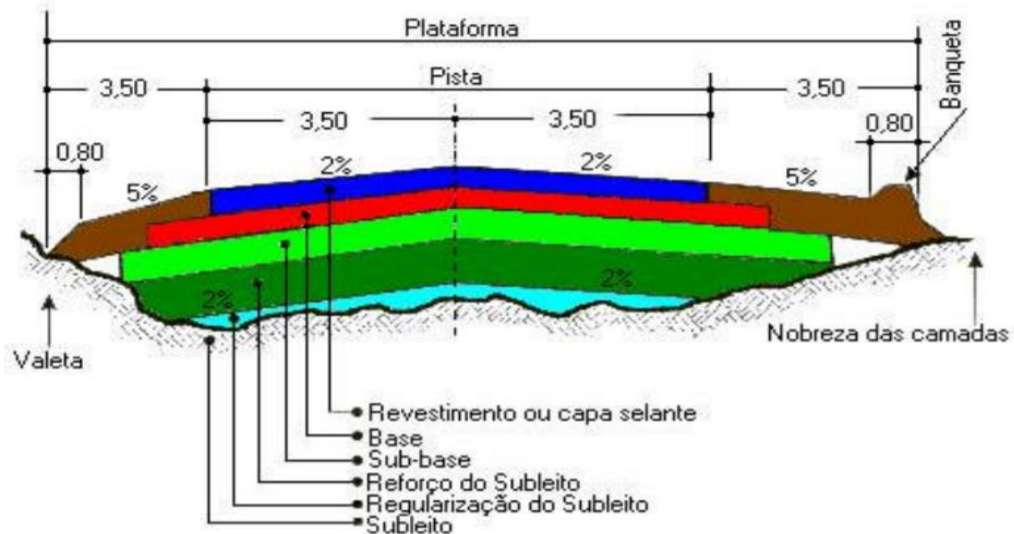
Figura 1 - Perfil da seção transversal do pavimento rígido



Fonte: Marques (2006)

Ainda segundo o autor, pavimentos flexíveis são os aqueles em que as deformações, até um certo limite, não levam ao rompimento. São dimensionados normalmente a compressão e a tração na flexão, provocada pelo aparecimento das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, que levam a estruturas a deformações permanentes, e ao rompimento por fadiga.

Figura 2 - Perfil da seção transversal do pavimento flexível



Fonte: Marques (2006)

2.2.1 Camadas Constituintes

- Subleito

Segundo Senço (2007), é denominado fundação do pavimento. Os esforços impostos à essa camada são aliviados à medida que se aprofunda, são consideradas desprezíveis efetivamente de um a um e meio metro.

- Reforço do subleito

Definida como uma camada de espessura constante, não obrigatória, construída acima da camada de regularização do subleito, propriedades geotécnicas superiores à regularização e

inferior à camada de sub-base. O reforço do subleito é parte integrante do pavimento, com função resistir e distribuir esforços verticais, sem absorvê-los totalmente, função essa designada à fundação (MARQUES, 2006).

- Sub-base

Trata-se da camada imediatamente inferior à base, de caráter complementar, portanto, em algumas situações por motivos técnico-econômico, pode ser dispensável quando possível construir a camada de base diretamente sobre o reforço do subleito ou regularização (DNIT, 2006).

- Base

É a camada do pavimento destinada a resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos, distribuindo os adequadamente à camada subjacente, executada sobre a sub-base, subleito ou reforço do subleito devidamente regularizado e compactado (MARQUES, 2006).

- Revestimento

A camada de revestimento se encontra na parte superior do pavimento, destinada a resistir diretamente aos esforços do tráfego e passá-las de forma atenuada para as camadas abaixo, impermeabilizar e propiciar melhores condições de rolamento aos usuários da via (BERNUCCI et al. 2008).

2.3 SOLO

O solo é um dos materiais mais antigos empregados na construção civil, sendo necessário na maioria das obras de engenharia, serve de suporte para estruturas de fundações, sendo assim a necessidade do homem de trabalhar com esse material gerou a necessidade do conhecimento de suas propriedades físicas e mecânicas, para que possa ser feita uma previsão do seu comportamento diante das solicitações requeridas (CAPUTO, 1988).

No entendimento do autor os solos são, ” materiais que resultam do intemperismo ou meteorização das rochas, por desintegração mecânica ou decomposição química.” Caputo (1988, pg.14). Ainda conforme Caputo, a desintegração mecânica se dá através de agentes naturais como água, temperatura e vento. Em contrapartida, a decomposição química ocorre a mudança química ou mineralógica das rochas e tem como principal agente causador a água e mecanismos de ataque sendo, a oxidação, hidratação e carbonatação.

Para a pavimentação, solo pode ser definido como material inconsolidado ou parcialmente consolidado, orgânico ou não que pode ser extraído sem o emprego de cargas explosivas ou técnicas especiais (PEREIRA, 2012). Ou seja, material que não apresente grande resistência ao desmonte.

2.3.1 Classificação do Solo

Para o manual de pavimentação do DNIT IPR-719, o solo é um material presente na natureza que pode se manifestar de diferentes formas, e para ser empregado em obras de pavimentação precisa ser classificado, de modo que para cada tipo de solo possa ser formulado métodos de projeto baseado em particularidades das propriedades que cada grupo possui.

Dentre os sistemas de classificação geotécnica, encontra-se o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), criada por um grupo de engenheiros, entre eles o professor Arthur Casagrande, publicado somente em 1953, baseado na qualidade da textura e plasticidade dos solos, agrupando-os de acordo com seu comportamento quando usado em aeroportos, aterros, estradas e fundações (DNIT, 2006). No entanto, o mais utilizado na pavimentação é o Highway Research Board (HRB), devidamente aprovado em 1945. O HRB classifica o solo considerando a granulometria, o limite de liquidez, o índice de liquidez e índice de grupo.

Para classificar o solo de acordo com os sistemas Highway Research Board, deve-se levar em consideração a granulometria, limites de consistência e índice de grupo do mesmo. O processo acontece por exclusão, da esquerda para direita, com o qual os valores encontrados do solo ensaios coincidir, será o grupo ao qual pertence.

Quadro 1 - Classificação dos solos (Transportation Research Board)

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: Manual de Pavimentação (2006).

- **ÍNDICE DE GRUPO**

Chama-se Índice de Grupo a um valor numérico, variando de 0 a 20, que retrata o duplo aspecto de plasticidade e graduação das partículas do solo. O IG é calculado pela fórmula:

$$IG = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd$$

em que:

a - % de material que passa na peneira nº 200, menos 35. Se a % obtida nesta diferença for maior que 75, adota-se 75; se for menor que 35, adota-se 35. (a varia de 0 a 40).

b - % de material que passa na peneira nº 200, menos 15. Se a % obtida nesta diferença for maior que 55, adota-se 55; se for menor que 15, adota-se 15. (b varia de 0 a 40).

c = Valor do Limite de Liquidez menos 40. Se o Limite de Liquidez for maior que 60, adota-se 60; se for menor que 40, adota-se 40 (c varia de 0 a 20).

d = Valor de Índice de Plasticidade menos 10. Se o índice de Plasticidade for maior que 30, adota-se 30; se for menor que 10, adota-se 10 (d varia de 0 a 20).

2.4 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

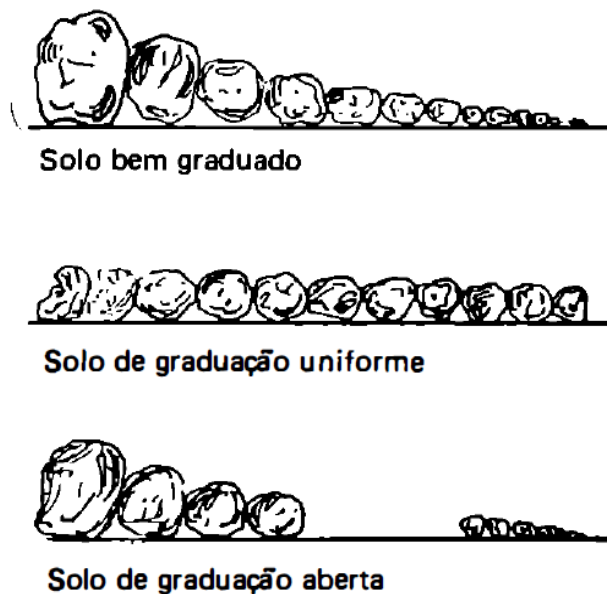
2.4.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica de um solo permite o conhecimento das partículas constituintes em razão das suas dimensões, saber esta característica possui grande valia para o estudo do comportamento do solo enquanto material de fundação ou como camada do próprio pavimento (SENÇO, 2007). A granulometria é a dimensão das partículas de solo, compreendidas dentro de determinados limites convencionados. As frações de solo retidas em peneiras com diferentes escalas granulométrica de acordo com ABNT, podem ser nomeadas em ordem decrescente como pedregulho, areia, silte, argila.

Para tanto, a análise granulométrica consiste na determinação das proporções relativas, em peso, das diferentes frações das dimensões das partículas que constituem a fase sólida do solo. Este estudo é representado por intermédio de um diagrama onde é traçada a curva granulométrica, no qual o eixo das abscissas são os logaritmos dos tamanhos das partículas e sobre o eixo das ordenadas, encontra-se em peso, a parcela retida na peneira, de um todo da amostra.

A partir da curva granulométrica, é possível diferenciar os solos de acordo com predominância das suas dimensões. Dessa forma, teremos solos de granulometria contínua também denominado bem graduado, descontínua e uniforme, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Graduação do Solo



Fonte: Caputo (1988)

No Brasil, as normas que especificam materiais de base e sub-base de pavimentos estabilizados por granulometria são: DNER e ABNT (NBR11804). Que estabelecem que a

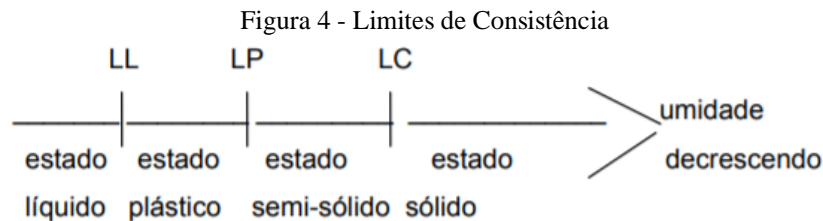
curva granulométrica deve apresentar comportamento contínuo, ou seja, sua composição apresente grãos de diversos tamanhos, permitindo que as partículas tenham maior imbricamento e por consequência diminua o número de vazios conferindo ao pavimento maior resistência e menor deformabilidade.

2.4.2 Limites de Consistência

Os limites de consistência se referem à transição de um estado de consistência para outro, também denominado limites de Atterberg (CALCIAN, 2013). Conforme Caputo (1998), a experiência adquirida por pesquisadores, mostrou que a granulometria não é o suficiente para caracterizar solos com certa porcentagem de finos, tendo em vista que suas propriedades estão intimamente ligadas à umidade e a forma das partículas, além da sua composição mineralógica.

No início da década de 90, os limites de consistência foram definidos pelo Sueco Atterberg, denominados, limite de liquidez e limite de plasticidade.

A definição de plasticidade dada por Caputo (1988, p. 52) é “uma propriedade dos solos, que consiste na maior ou menor capacidade de serem eles moldados, sob certas condições de umidade, sem variação de volume”.



Fonte: Manual de pavimentação (2006)

- **Limite de Liquidez**
O limite de liquidez é o teor de umidade presente no solo quando aplicados 25 golpes para o fechamento da ranhura aberta na superfície da amostra. Este limite indica o quanto de água a fração de solo pode absorver (DNIT, 2006).
- **Limite de Plasticidade**
A umidade referente ao limite entre o estado plástico e semissólido do solo é chamada de limite de plasticidade (DNIT, 2006).
Corresponde ao menor teor de umidade com
- **Índice de Plasticidade**
O índice de plasticidade corresponde a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade (DNIT, 2006).

Figura 5 - Classificação da plasticidade dos solos.

IP	Descrição
0	Não plástico
0 - 5	Ligeiramente plástico
5 - 10	Plasticidade baixa
10 - 20	Plasticidade média
20 - 40	Plasticidade alta
> 40	Plasticidade muito alta

Fonte: Sousa Pinto (2006 apud CALCIAN, 2013, p. 35)

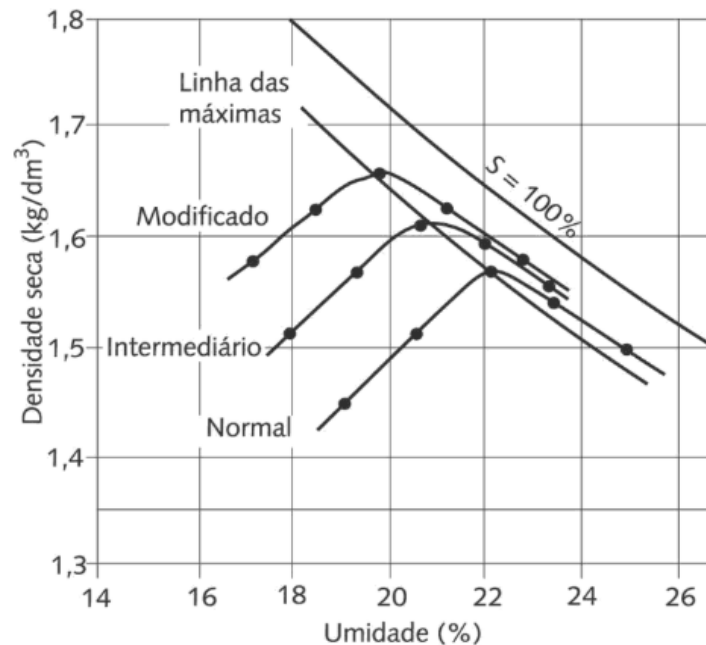
2.4.3 Compactação

Compactação, é o processo manual ou mecânico que tem como objetivo a redução de vazios do solo, garante ao mesmo o aumento da resistência, diminuição da permeabilidade, compressibilidade, e aumento da estabilidade. É importante ressaltar que solos cuja partículas possuem tamanhos diferentes são mais suscetíveis ao processo de compactação, isto se dá, devido ao fato de as partículas de diferentes dimensões preencherem com maior facilidade os poros, quando submetidas à pressão.

O grau de compactação das camadas constituintes do pavimento tem grande influência no comportamento da estrutura, quanto maior grau de compactação do material, maior sua resistência à deformação. Essa premissa, é válida para solos granulares que aumentam o contato intrínseco das partículas e porventura diminui o índice de vazios, em contrapartida, materiais com características argilosas tendem a sofrer deformações quando compactados demasiado (SENÇO, 2008).

Boscov (2008), ainda ressalta que a energia de compactação influi diretamente no peso específico máximo e umidade ótima dos solos, quanto maior o grau de compactação, menor é sua umidade ótima e maior o seu peso específico seco máximo (Fig. 6). Consequentemente menor o coeficiente de permeabilidade.

Figura 6 - Curvas de Proctor para um mesmo solo, com diferentes energias de compactação



Fonte: Boscov (2008)

Quanto à curva de compactação, é expressa com diferentes teores de umidade, para mesma energia de compactação, ocorre a variação do peso específico em virtude das diferentes umidades. Esta curva nos permite descobrir para qual umidade o solo atinge o seu peso específico máximo, denominada, umidade ótima. Caputo (1988) constata, que as curvas de compactação diferem para cada solo, mas apresentam comportamento quanto à forma.

Considerando o modelo de agregados deformáveis, ou seja, o seu tamanho e resistência são diretamente influenciados pela umidade, é possível entender a relação da umidade com eficiência da compactação. No processo de compactação com baixo teor de umidade, as partículas apresentam elevada resistência às pressões e poder de sucção, no entanto, com o aumento da umidade, a resistência dos agregados diminui, tornando suscetíveis às deformações e aproximação dos grãos, conseqüentemente há o aumento do peso específico (BOSCOV, 2008). Por este motivo, no ponto da umidade ótima, os solos tornam-se altamente moldáveis e quando submetidos à pressão causada pela compactação, ocorre o entrosamento das partículas.

2.4.4 Índice de Suporte Califórnia – CBR

Para Senço (2007), o *California Bearing Ratio* (CBR), traduzido Índice de Suporte Califórnia, é a relação em percentual entre a pressão necessária para um pistão na amostra de solo previamente preparada e a pressão para penetrar à mesma profundidade, numa amostra padrão de brita. É uma das características mais buscadas em materiais para o emprego em pavimentação. Segundo o DNIT (2006), a relação expressa em percentagem permite a

determinação da espessura do pavimento flexível, em função do volume do tráfego, por intermédio de equações empíricas.

Para efeito de conhecimento, o ensaio de CBR foi criado por O.J. Porter, no fim da década de 30, com o intuito de determinar a resistência dos materiais granulares usados em obras de pavimentação. Os resultados eram relacionados ao tráfego leve e pesado com curvas que continham a espessura necessária para cada valor de CBR (SENÇO, 2007).

De acordo com Caputo (1988), usualmente em projetos de pavimentos flexíveis o ISC utilizado é o equivalente à penetração de 0,1”, a não ser que o índice para 0,2” seja superior.

Segundo Senço (2007), juntamente com o ISC é determinada a expansão, expressa em porcentagem com precisão de 0,1% e corresponde ao acréscimo de altura sofrido pelo corpo-de-prova, comparada à altura inicial. A expansão é característica comum de solos compactados possuem tendência a expandir quando são colocados em contato com água, à medida que expandem diminuem a massa específica e diminuem seu suporte.

3 METODOLOGIA

3.1 CLASSIFICAÇÃO DO ESTUDO

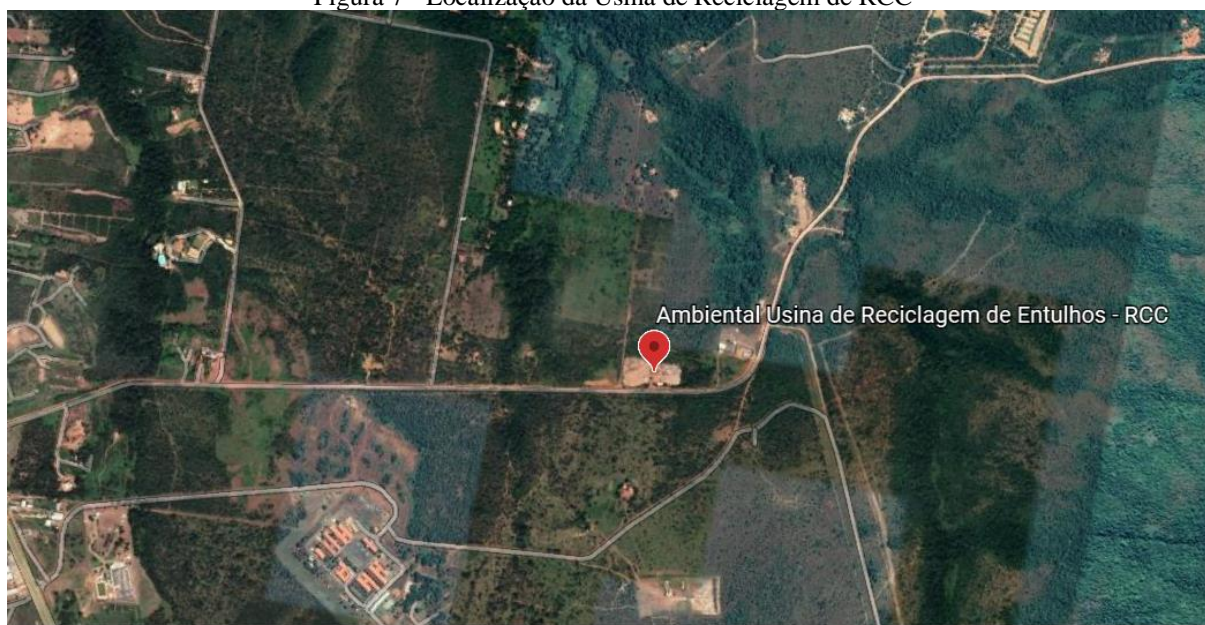
O seguinte trabalho trata-se de uma pesquisa experimental de natureza quali-quantitativa que tem como objetivo geral estudar a viabilidade técnica do uso de RCC em camadas de base e sub-base de pavimento flexível urbano. Inicialmente foi realizado um levantamento bibliográfico em livros, artigos científicos, dissertações, teses e normas regulamentadas pela ABNT.

Neste capítulo será descrito a metodologia utilizada para a execução desta pesquisa como a coleta do solo referência, coleta do RCC, dosagem da mistura solo-agregado reciclado e ensaios laboratoriais.

3.2 LOCAL E PERÍODO DE REALIZAÇÃO

A coleta do solo natural foi concebida em uma jazida, no município de Palmas – TO, localizada próximo ao Atacadão, nas coordenadas 10°15'10.6" S e 48°18'19.5" W. O RCC foi coletado na Usina de reciclagem de resíduos de construção civil, inaugurada no começo do ano de 2018, localizada na chácara N°50 – Loteamento de Chácaras de Recreio, na cidade de Palmas - TO. O período de realização da pesquisa iniciou-se no primeiro semestre de 2020, no laboratório de engenharia do CEULP/ULBRA, onde foram efetuados todos os ensaios.

Figura 7 - Localização da Usina de Reciclagem de RCC



Fonte: Google Earth (2020)

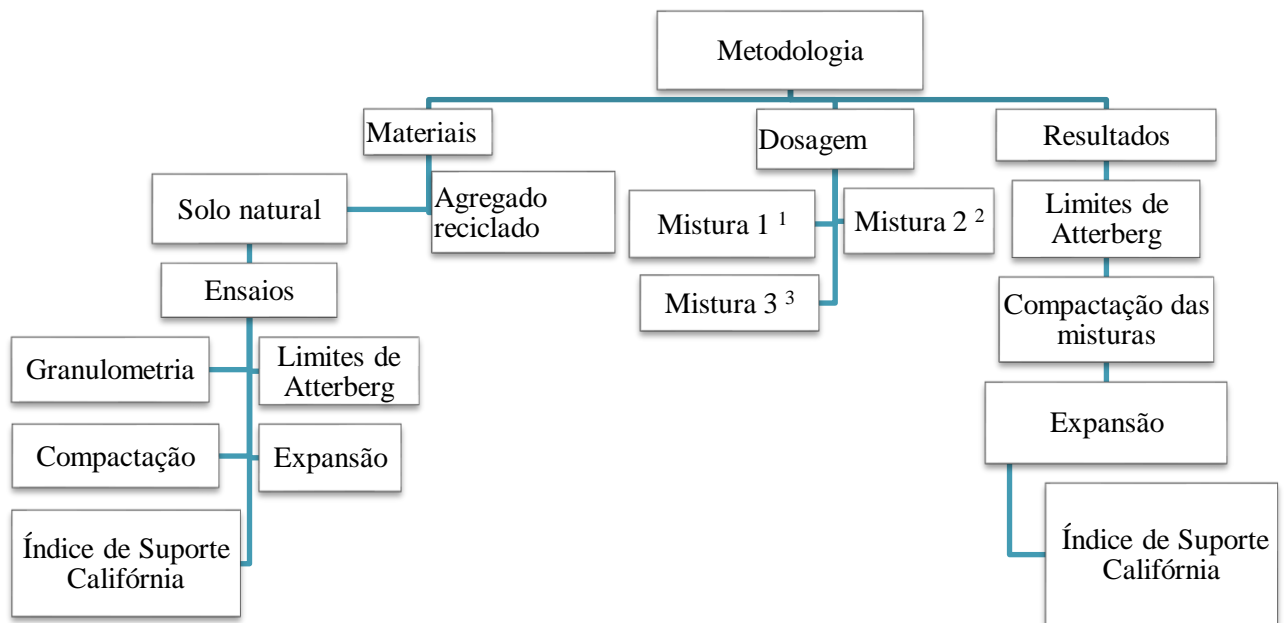
Figura 8 – Localização da jazida de coleta do solo natural.



Fonte: Google Earth (2020)

3.3 DESENHO DO ESTUDO

Figura 9 - Fluxograma



¹) Adição de 30% de agregado reciclado; ²) Adição de 50% de agregado reciclado; ³) Adição de 60% de agregado reciclado.

Fonte: Autor (2019)

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para o dimensionamento de pavimentos com a utilização de agregados reciclados, exige-se que sigam os mesmos princípios para o dimensionamento de um pavimento com agregados convencionais, levando em consideração os materiais utilizados e controle tecnológico na execução. Deve-se definir as propriedades físicas e mecânicas do material utilizado nas camadas do pavimento.

Para o solo *in natura*, ou seja, em seu estado natural, sem adições, realizou-se ensaios de: limites de Atterberg, distribuição granulométrica por peneiramento, compactação na energia Proctor intermediária, expansão e ISC. Da mesma maneira também se procedeu com ensaios para conhecer as propriedades físicas do agregado reciclado, distribuição granulométrica.

No tocante, aos ensaios que as misturas obtidas foram submetidas após a dosagem do solo-RCC, realizou-se os seguintes procedimentos: análise granulométrica, limite de liquidez, limite de plasticidade, compactação, expansão e ISC. A tabela a seguir apresenta alguns requisitos para o uso de agregados reciclados na pavimentação.

Tabela 1- Requisitos para agregado reciclado destinado a pavimentação

Características	Recomendações NBR 15115
Dimensão Máxima Característica (mm)	63,5
Passante na peneira 0,42mm (%)	Entre 10 e 40 %
Coeficiente de Uniformidade	≥ 10
CBR (%)	≥ 60 (para base) e ≥ 20 (para sub-base)
Expansão (%)	$\geq 0,5$ (para base) e $\geq 1,0$ (para sub-base)

*Permitido o uso como material de base somente para vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições do eixo padrão de 8,2 tonelada-força (80 Quilonewton) no período de projeto.

Fonte: NBR 15116 (ABNT, 2004).

3.4.1 Coleta e Preparação de Amostras de Solo Natural

O material foi extraído utilizando pás e sacos de fibras. A amostra recebida do campo no laboratório passou por secagem prévia ao ar livre para tornar conhecida a umidade higroscópica do material, e posteriormente destorroada no almofariz com a mão de grau

revestida de borracha de maneira que os grãos agrupados foram desagregados, no entanto, sem que ocorra a quebra dos mesmos para que não fosse alterado seu tamanho natural.

Em seguida, a amostra com auxílio do quarteador foi reduzida, a fim de se obter uma amostra representativa com peso aproximado de 2000g. Esta fração de solo passou-se-à peneira de 2mm. Repetiu-se o processo de desagregação das partículas, para que somente ficasse retido material com grãos maiores que a abertura da peneira.

Para determinação do limite de plasticidade e limite de liquidez, o material restante retido na peneira de 2mm foi passado na peneira de 0,042mm e com uso do quarteador obteve-se quantidade aproximada de 70g para o ensaio do Limite de Liquidez (LL) e 50g para o ensaio do Limite de Plasticidade (LP).

3.4.2 Coleta e Preparação de Amostras de Agregados Reciclados

O material analisado foi coletado na (Ambiental) Usina de Reciclagem de Entulhos, se enquadra na Classe A, em conformidade com ABNT NBR 10007/2004- Amostragem de resíduos sólidos. Para a realização da pesquisa foram coletadas amostras em um único dia, em pontos distintos, no topo, meio e base da pilha de resíduo, sendo coletadas 04 alíquotas em distâncias equidistantes, em cada seção. O resíduo coletado foi armazenado em sacos de fibras para que não houvesse a contaminação. A figura 10 mostra o RCC após a britagem.

Figura 10 - RCC após ser britador.



Fonte: Autor (2020)

Em laboratório, o resíduo da construção civil foi espalhado para homogeneização e secagem prévia, até que, visualmente observou-se uma mistura homogênea. Para preparação da

amostra representativa que foram utilizadas nos ensaios laboratoriais, salienta-se que, o material utilizado é misto, ou seja, material composto por tijolos, telhas, blocos, placas de revestimento, entre outros.

Para efeito da NBR 15115, deve-se ter observância quanto a curva granulométrica obtida, onde o $C_U \geq 10\%$, a percentagem que passa na peneira de nº 40 deve ficar compreendida entre 10% e 40%, a dimensão característica máxima 63,5mm com tolerância de 5% retida em massa na peneira.

3.4.3 Dosagens com Agregado Reciclado

Na pesquisa realizada por Camelo (2018), foram estudadas as adições de 5, 10, 15 e 20% de RCC na massa de solo. O desempenho do material utilizado não alcançou resultados satisfatórios para todas as incorporações, a autora relata que o melhor desempenho alcançado foi com a adição de 5% de RCC, porém com estabilização insatisfatória para camada de base.

Portanto, a definição de dosagem deste trabalho, baseia-se nos resultados obtidos por Camelo, porém com adições maiores de RCC à massa de solo. Neste trabalho adicionou-se ao solo três diferentes porcentagens de resíduos da construção civil, nas proporções de 30%, 50% e 60%, em massa, em relação a porcentagem total das misturas. Dessa forma serão analisadas amostras com percentual de RCC menor que a massa de solo, igual e maior que a massa de solo, dessa maneira conhecendo o comportamento das misturas.

As proporções de solo e agregado reciclado para as três diferentes misturas estão representadas na tabela 2, os ensaios realizados para avaliar o desempenho das misturas são: limite de liquidez e limite de plasticidade para determinação do índice de plasticidade, expansão e índice suporte Califórnia.

Tabela 2 - Composição das misturas solo-agregado reciclado

MATERIAL	MISTURA 1	MISTURA 2	MISTURA 3
SOLO	70%	50%	40%
RCC	30%	50%	60%

Fonte: Autor (2019)

3.4.4 Distribuição Granulométrica

A composição granulométrica possui grande relevância para o estudo do comportamento do solo, permitindo o conhecimento das porcentagens das partículas constituintes em função do seu tamanho, conforme (SENÇO, 2007). Peneiramento realizado com jogo mostrado na figura 11.

Figura 11 - Jogo de peneiras usado para o ensaio de granulometria.



Fonte: Autor (2020)

- Solo Natural

Com a amostra representativa, o solo foi agitado sob as peneiras de 2mm e 0,075mm, uma sobre a outra, o procedimento repetiu-se por vezes o suficiente para que se obtivesse massa de solo suficiente para realizar os ensaios.

Após o processo de peneiramento o material que ficou retido nas peneiras supracitadas acima, foram transferidas para uma cápsula e secas em estufa a 105°C-110°C.

Com o jogo de peneiras devidamente encaixado ao agitador, e as aberturas de malhas em ordem decrescente do topo para a base, o solo seco foi distribuído sobre a peneira superior e a agitação sucedeu-se por um período de um minuto.

Com o peso obtido em cada peneira calculou-se a porcentagem sobre o peso total da amostra de solo seco, a porcentagem acumulada e porcentagem acumulada de solo passante em cada peneira.

- Misturas Solo-RCC

O ensaio de distribuição granulométrica para as misturas solo-RCC por peneiramento das amostras foi realizado conforme preconiza a norma DNER-ME 083/98. As amostras de solo foram previamente secas em estufa a 110°C-115°C, após secagem foram colocadas em um conjunto de peneiras com vibração manual, durante 1 minuto, de tal modo que permitiram aos grãos a passagem pela abertura das malhas.

Realizado o peneiramento, o material retido em cada peneira foi pesado, tomando cuidado de retirar com ajuda de uma escova de cerdas metálicas toda as partículas que eventualmente tenham ficado presas na malha. O somatório do material retido em cada peneira não foi maior que 0,5% da massa seca do material que se iniciou o ensaio, se ocorresse, o ensaio deveria ser repetido.

Para os resultados, com a massa de material obtido em cada peneira calculou-se a porcentagem sobre o peso total da amostra de solo-RCC.

Após a realização dos ensaios e obtenção dos resultados foi possível expressá-los por intermédio de uma curva granulométrica, onde os eixos das abcissas representam as aberturas das peneiras e o eixo das ordenadas corresponde ao percentual de material passante nas peneiras. Segundo o DNIT, com a curva granulométrica classifica o material como uniforme, bem graduado e mal graduado.

3.4.5 Limites de Atterberg

- Limite de Liquidez

Para realização do ensaio foi colocado metade da amostra separada em uma cápsula de porcelana e adicionado água destilada em pequenas quantidades, misturando e amassando energeticamente por aproximadamente 15 minutos até o instante em que se notou a formação de uma pasta homogênea. Finalizada a homogeneização, parte da mistura foi transferida para a concha do aparelho Casa Grande de modo que não se formaram bolhas de ar, e na parte central a espessura atingida igual à 10mm.

Em seguida, com o cinzel a massa de solo foi dividida em duas partes, de modo que se formou uma ranhura na parte central da concha. A manivela foi girada com constância golpeando a concha sobre a base até que a abertura se fechou ao longo de 13mm de comprimento, o número de golpes foi anotado e o material de estudo transferido para outro recipiente com a ajuda de uma espátula, sendo apenas, uma pequena porção do solo de ambos os lados da abertura, abrangendo a porção em que se verificou a união das bordas para determinação da umidade como estabelecido na NBR 6457, como demonstrado na figura a seguir.

Figura 12 - Aparelho Casagrande, utilizado para o ensaio de limite de plasticidade.



Fonte: Autor (2020)

Posteriormente, retirado o solo remanescente da concha, prosseguiu-se com a mistura do restante contido na cápsula de porcelana, adicionando mais água destilada à amostra o procedimento foi repetido no mínimo 3 vezes com adições de água gradativa e crescente de maneira a obter-se golpes próximos de 50, 40, 20 e 10.

Para o cálculo do limite de liquidez foram anotados os resultados obtidos e construído um gráfico no qual os eixos abscissas são os teores de umidades, o eixo das ordenadas representa o número de golpes dados. O LL está compreendido na intersecção do número de 25 golpes com a umidade relativa correspondente.

- Limite de Plasticidade

Para a determinação do Limite de Liquidez do solo estudado, foi tomado metade da amostra representativa do solo passante na peneira de 0,42mm de abertura na malha, em uma cápsula de porcelana, a água destilada foi acrescentada gradativamente, e o solo foi amassado vigorosamente com uma espátula metálica, até que foi obtida uma mistura homogênea de consistência plástica, com o tempo aproximado de 15 minutos.

Em seguida, pegou-se cerca de 10g da mistura homogênea obtida e, com as mãos, moldada uma pequena esfera que foi colocada sobre uma placa de vidro fosco e rolada em movimentos de vai-e-vem, submetida à pressão suficiente para que se obtivesse uma forma cilíndrica.

Figura 13 - Amostra para o ensaio de limite de plasticidade.



Fonte: Autor (2020)

Repetiu-se o procedimento por algumas vezes até o momento em que ocorreu a fragmentação da amostra com diâmetro de 3mm e comprimento de 10 cm. Obtido o rompimento respeitando as condições estabelecidas, transferiu-se os fragmentos para um recipiente, a fim de

determinar a umidade, obtida a partir da secagem do material em estufa em temperatura de 100 °C a 110°C. A operação repetiu-se de modo que foram obtidos 03 valores que não diferiram da média em mais de 5% para mesma amostra de solo, no resultado final é considerado a média dos valores de umidade encontrados, expresso em porcentagem.

$$h = \frac{P_h - P_s}{P_s} \quad (1)$$

Onde:

h - teor de umidade, em porcentagem;

P_h - peso do solo úmido;

P_s - peso do material seco em estufa a 105°C-110°C.

ÍNDICE DE PLASTICIDADE

Com o resultado obtido do ensaio de plasticidade, foi possível calcular o Índice de Plasticidade a partir da expressão:

$$IP = LL - LP, em \% \quad (2)$$

Onde:

LL - limite de liquidez;

LP - limite de plasticidade.

3.4.6 Ensaio de Compactação

Para realização deste ensaio, a amostra representativa foi compactada em cinco camadas de igual espessura, em um molde de base metálica com disco espaçador, como fundo fácil, de tal maneira que a espessura final tenha cerca de 12,5 cm.

Em cada camada foi aplicado golpes com o soquete em queda livre de 45,72cm, distribuídos igualmente por toda superfície. Consequente, foi removido o cilindro complementar e com uma régua de aço rasado o material excedente na exata altura do molde. Em uma balança, determinou-se o peso do solo úmido compactado e subtraído o peso do molde. A figura 14 mostra os corpos de prova após a compactação, preparados para serem submersos.

Figura 14 - Corpos de prova após a compactação.



Fonte: Autor (2020)

Terminado o processo de compactação do solo no molde cilíndrico, foram removidas duas pequenas frações de aproximadamente 250g de amostra da parte central do corpo-de-prova que posteriormente foram levadas à estufa em temperatura de 110 °C para determinar a umidade da amostra, a partir da média de peso do solo seco. Os procedimentos descritos foram repetidos com diferentes teores de umidade crescente em 05 corpos-de-prova para a elaboração da curva de compactação.

3.4.7 Expansão

Após a compactação da amostra de solo em molde cilíndrico, para caracterização da curva de compactação, o corpo de prova ficou totalmente submerso em água por um período de 96h em uma câmara de imersão, onde foi anotado a leitura inicial do extensômetro e repetiu-se a leitura a cada 24h.

Terminado o período de 96h de submersão o corpo-de-prova foi retirado para escoamento da água com duração de 45 minutos. Após o escoamento de água, foi realizada a aferição do acréscimo de altura sofrido pelo corpo-de-prova, comparada à altura inicial. O cálculo foi feito como demonstrado na fórmula 3.

Quadro 2 - Quadro para o cálculo de expansão

Data	Hora	Tempo decorrido min.	Molde nº		Expansão %
			Leituras no extensômetro Mm	Diferenças de leituras no extensômetro mm	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)

Fonte: DNER (2016)

$$\text{Expansão (\%)} = \frac{\text{leitura final} - \text{leitura inicial}}{\text{altura inicial do corpo de prov}} \quad (3)$$

3.4.8 Índice de Suporte Califórnia

O ensaio de determinação da resistência à penetração foi realizado em uma prensa composta por macaco de engrenagem, com movimento giratório por manivela e um conjunto de dinamométrico com capacidade de resistir 50 KN e sensível a 25 KN, onde um extensômetro é fixado ao anel para medir o encurtamento diametral do mesmo ligado ao pistão de penetração.

Levou-se o corpo-de-prova ao prato da prensa, e então, o pistão foi posicionado sobre o solo, com a aplicação de uma carga devidamente controlada pelo extensômetro do anel com dínamo, posteriormente foi zerado o extensômetro que mede a penetração no solo. E com velocidade constante a manivela foi girada manualmente, onde, cada leitura realizada pelo extensômetro do anel está em função da deformação sofrida. As leituras foram devidamente anotadas em tempos determinados, conforme apresentado no quadro a seguir:

Quadro 3 - Leituras obtidas no ensaio de penetração do pistão no solo

Tempo (min)	Penetração		Leitura no extensômetro do anel (mm)
	pol	mm	
0,5	0,025	0,63	-
1,0	0,050	1,27	-
1,5	0,075	1,90	-
2,0	0,100	2,54	-
3,0	0,150	3,81	-
4,0	0,200	5,08	-
6,0	0,300	7,62	-
8,0	0,400	10,16	-
10,0	0,500	12,70	-

Fonte: DNER (2016)

Para calcular o Índice de Suporte Califórnia para cada corpo de prova utilizou-se a fórmula 4:

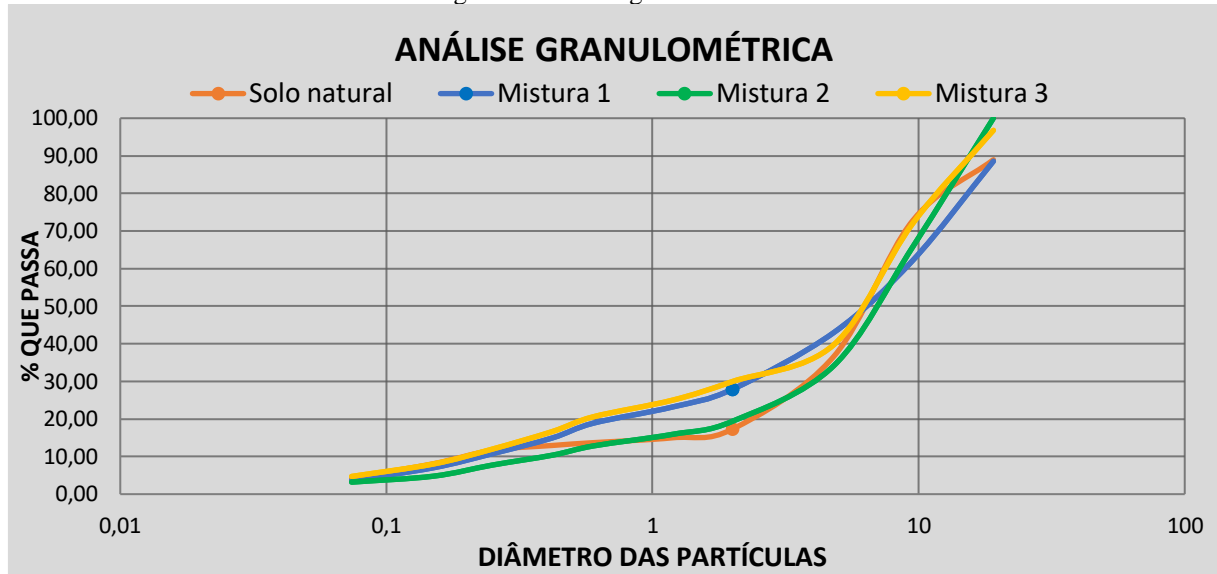
$$ISC = \frac{\text{Pressão calculada ou corrigida}}{\text{pressão padrão}} \times 100 \quad (4)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Os resultados alcançados na realização dos ensaios de granulometria para o solo natural e para as misturas de RCC, em 30%, 50% e 60% de substituição em relação a massa de solo, são devidamente apresentados na figura 15.

Figura 15 - Curva granulométrica.



Fonte: Autor (2020)

A distribuição granulométrica é uma das características que asseguram estabilidade às camadas do pavimento. Sem a presença de agentes cimentantes, isso ocorre principalmente em função intertravamento das partículas. Dessa forma, como ponto de partida, buscou-se conhecer a distribuição granulométrica de todas as amostras elaboradas. A Tabela 3 mostra a massa acumulada de partículas que passam em cada peneira, para a solo referência e demais misturas.

Tabela 3 - Massa do material que passa em cada peneira.

Massa do material que passa em cada Peneira em %				
Peneiras (mm)	Solo natural	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3
19,1	88,97	88,56	100,00	96,78
9,5	72,76	62,15	65,76	71,99
4,8	36,62	42,98	34,16	39,74
2	17,32	27,92	19,40	29,97
1,19	14,99	23,19	15,92	25,01
0,6	13,70	18,89	12,83	20,60
0,42	12,95	14,95	10,36	16,65
0,25	11,68	10,76	7,74	11,98
0,15	8,09	7,01	4,78	8,02
0,074	4,32	3,64	3,19	4,71

Fonte: Autor (2020)

Nota-se na figura 15 e tabela 3, que o solo em seu estado natural, sem substituição de RCC, apresenta uma granulometria não uniforme, mal graduada. Concentrando maior percentual de partículas entre as peneiras com aberturas de 19,00mm e 4,8mm.

De acordo com a escala granulométrica brasileira (ABNT), são: pedregulho - conjunto de partículas cujas dimensões (diâmetros equivalentes) estão compreendidas entre 76 e 4,8 mm; areia, entre 4,8 e 0,05 mm; silte, entre 0,05 e 0,005 mm; argila, inferiores a 0,005 mm.

Portanto, o solo natural e as demais amostras são predominantemente compostas por pedregulhos e areia grossa.

Figura 16 - Faixas granulométricas.

Tipos Peneiras	Para $N > 5 \times 10^6$			Para $N < 5 \times 10^6$			Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	±7
1"	-	75-90	100	100	100	100	±7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	±7
N° 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	±5
N° 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
N° 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	±2
N° 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	±2

Fonte: DNIT (2006)

Relacionado a curva granulométrica com a figura 16, percebe-se que o solo natural em análise, enquadra-se como material de construção empregado em camadas de bases, na faixa de trabalho "A", de acordo com manual DNIT, e se adequa como A-1-A segundo a classificação geral dos solos TRB. Diante desse fato, a presente faixa permite, segundo esse critério, a utilização desse material em aplicações cuja intensidade de tráfego esteja condicionada a um valor de "N" maior que 5×10^6 , no entanto, todo o estudo está condicionado para o emprego do material em vias urbanas de tráfego leve. Lembrando que, não há recomendações normativas a serem observadas para a composição de misturas de agregados reciclados.

Nos resultados expressos na tabela 3, verifica-se que a porcentagem que passa pela peneira 0,42mm (n° 40) satisfaz a norma NBR 15115 (2004), cujo valor deve estar entre 10% e 40% da massa total da amostra. Esse um parâmetro importante para que haja uma maior interação entre as frações graúdas, decorrente do preenchimento entre os grãos maiores.

A dimensão máxima características do solo natural e misturas propostas, ou seja, a abertura da peneira em que fica retida acumulada um percentual igual ou imediatamente inferior a 5% do material, são para o solo natural, mistura 1, mistura 2 e mistura 3 (19,00mm).

Tabela 4 - Coeficientes de curvatura e uniformidade.

Tabela com Coeficientes			
Amostras	Cu	CC	Resultado
Solo natural	33,16	12,06	DESUNIFORME
Mistura 1	38,70	7,05	DESUNIFORME
Mistura 2	22,97	4,59	DESUNIFORME
Mistura 3	33,16	12,06	DESUNIFORME

Fonte: Autor (2020)

Ambas as curvas granulométricas das amostras de agregados reciclado e o solo *in natura* em estudo podem ser consideradas não-uniforme, tabela 4.

O decréscimo do coeficiente uniformidade encontrado na mistura 2 de solo-RCC, comparada ao solo *in natura* e a mistura 1 está relacionado à fragmentação do RCC, dada à resistência que cada um dos materiais constituintes do RCC possui quando da incidência do processo de britagem. Vale notar que o próprio movimento de agitação das peneiras provocava um fracionamento dos grãos, devido à abrasividade do material, o que pode diversificar a granulometria.

No que tange o coeficiente de curvatura, as misturas apresentam valor maior que 3%, sendo assim, denominado, material mal graduado, isto, deve-se ao fato de haver a ausência de partículas com certas dimensões em sua composição, com insuficiência de material fino para preencher os vazios deixados pelos maiores. Justificando o coeficiente de curvatura não estar compreendido nos limites (1% e 3%). Nota-se que com o aumento de percentual de RCC incorporado à mistura 2, este coeficiente decresce de modo considerável, e aumenta novamente na mistura 3.

4.2 LIMITES DE ATTERBERG

Os limites permitem avaliar a plasticidade dos solos. Essa propriedade dos solos argilosos consiste na maior ou menor capacidade de serem eles moldados sem variação de volume, sob certas condições de umidade (DNIT, 2006).

No que concerne à resistência ao fechamento do sulco, medida pelo número de golpes requerido para aquela umidade, denominado, limite de liquidez. Através da tabulação dos dados, para o uso em camada de base, dentre as misturas proposta, a com proporção de 60% RCC e 40% solo, é a única que atende a norma DNER 122/94, que determina que o LL deve ser menor ou igual a 25%. Portanto, para as demais amostras, essa norma ressalta que quando esses limites forem ultrapassados, deve-se avaliar, o valor apresentado pelo ensaio de equivalência de areia, de modo que, o mesmo resulte maior que 30%.

De acordo com os resultados da tabela 5, o solo natural foi a amostra estudada em que se verificou-se o menor IP, seguida da mistura 3 que apresentou comportamento não plástico. Segundo Senço (2007), o índice elevado de plasticidade pode ser um inconveniente, ocasionando aumento sensível de volume e elevado recalque. Ao contrário de materiais com baixos índice de plasticidade ou não plásticos, como encontrado na mistura 3.

Tabela 5 - Resultados dos limites de Atterberg.

Amostras	LL%	LP%	IP%
Solo natural	44,00	38,90	5,10
Mistura 1	26,00	19,90	6,10
Mistura 2	31,00	18,30	12,70
Mistura 3	12,00	NP	NP

Fonte: Autor (2020)

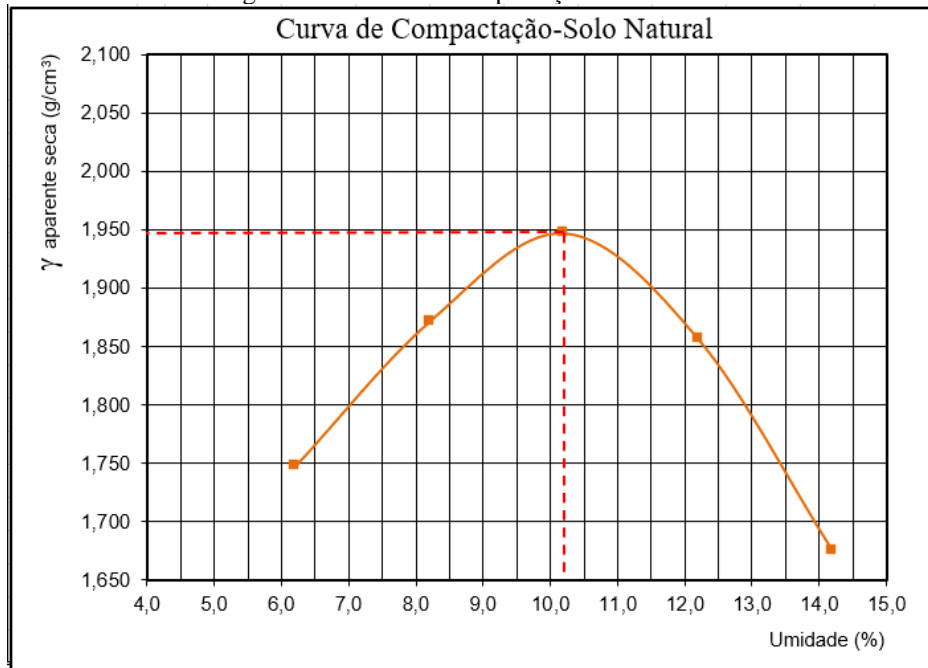
Conforme Caputo, a amostra de solo natural e a mistura 1 são classificadas como material fracamente plástico, enquanto a mistura 2 é medianamente plástico, e a mistura 3, composta com maior massa de RCC, é denominada como material não plástico.

4.3 CURVAS DE COMPACTAÇÃO

As curvas de compactação foram traçadas a partir da adição de uma linha de tendência, obtida pela regressão polinomial de 2ª ordem, que considerasse quatro ou todos os cinco pontos (umidade, peso específico aparente seco) deste ensaio, gerando-se assim uma equação de 2º grau onde o ponto de máximo (vértice da parábola) corresponde à umidade ótima e ao peso específico aparente seco máximo ($\omega_{ót\text{m}}$, $\gamma_{S\text{max}}$).

Com vistas ao emprego dos agregados reciclados de RCC em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis, submeteram-se as amostras neste ensaio à energia de compactação intermediária. O intuito deste ensaio é avaliar as propriedades mecânica das misturas para possível utilização em camadas de pavimentação, conforme especificado na NBR 15115. Os resultados obtidos de $\omega_{ót\text{m}}$ e $\gamma_{S\text{max}}$ são apresentados, na tabela 6, e as curvas de compactação obtidas, nas figuras.

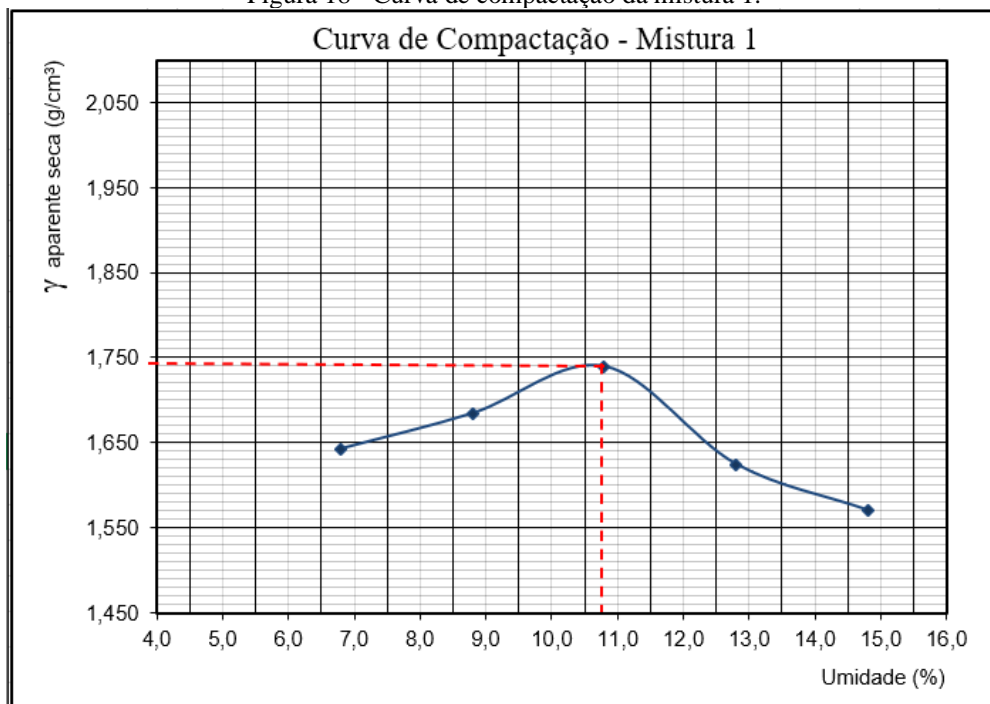
Figura 17 - Curva de compactação solo natural.



Fonte: Autor (2020)

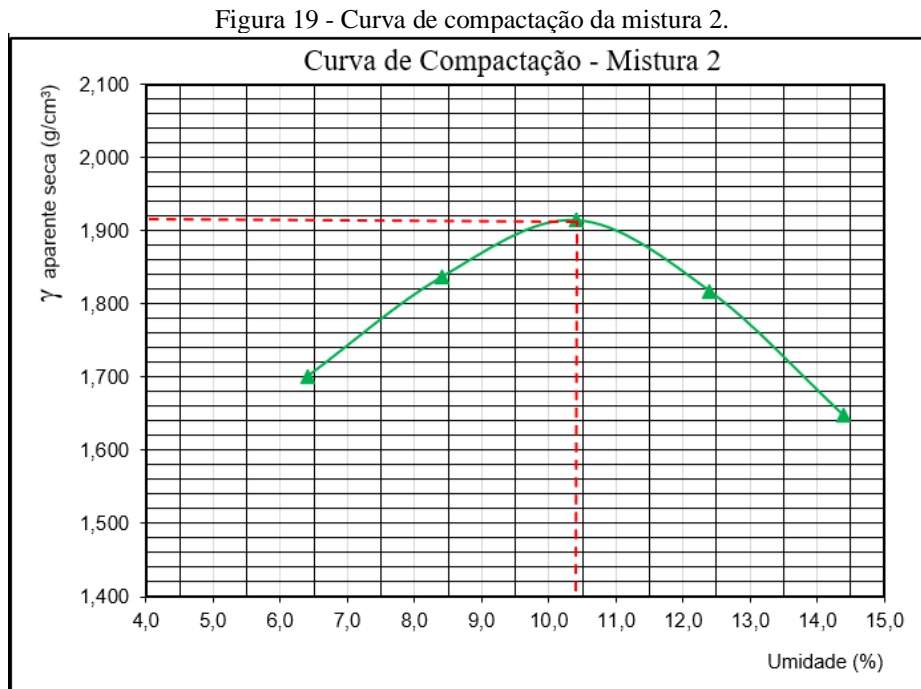
A curva de compactação para o solo *in natura*, demonstrada na figura 17, caracteriza um material com peso específico aparente seco de 1,948 g/cm³ e uma umidade ótima equivalente à 10,20%, este gráfico será referência para avaliar a mudança de comportamento das amostras com a substituição crescente de solo por RCC.

Figura 18 - Curva de compactação da mistura 1.



Fonte: Autor (2020)

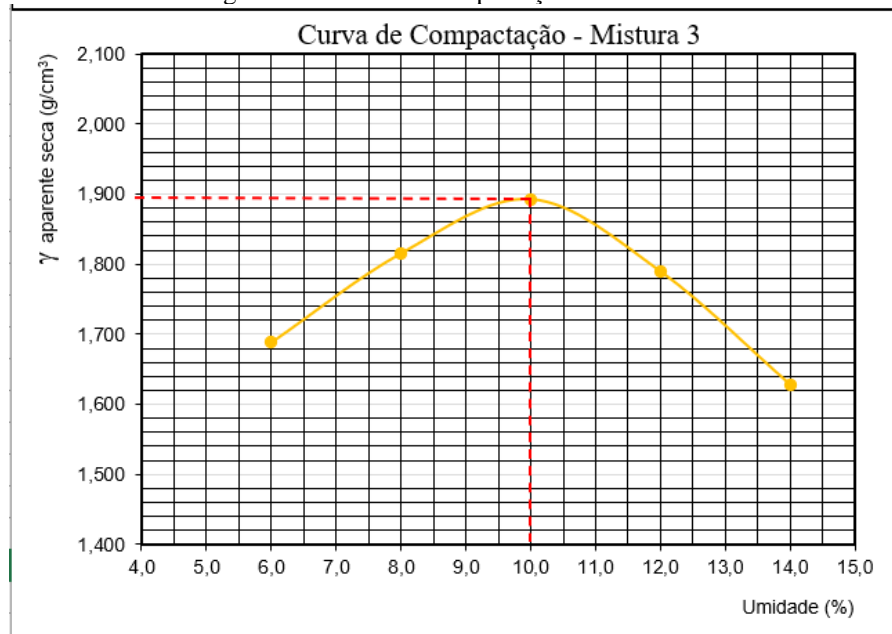
Com a substituição de 30% da massa do solo referência por RCC, é notado a diminuição do peso específico aparente seco, com um gradiente de $0,204 \text{ g/cm}^3$. Figura 19.



Fonte: Autor (2020)

Observa-se que uma quantidade equilibrada de RCC e solo, modifica o formato da curva comparada à mistura 3, e promove uma diminuição na umidade ótima, visto a menor influência da água na densificação de uma mistura com maior percentual de resíduo, em relação à mistura anterior.

Figura 20 - Curva de compactação da mistura 3.



Fonte: Autor (2020)

As curvas produzidas pelas amostras apresentaram oscilações, que podem ser resultantes da variabilidade na composição, onde as porcentagens podem sofrer alterações significativas a cada amostra, mesmo sendo coletadas no mesmo local e dia.

Tabela 6 - Resultados da umidade ótima e peso específico aparente seco.

Amostras	Composição do Material	$\omega_{\text{ót}} (\%)$	$\gamma_{S_{\text{max}}} (\text{g}/\text{cm}^3)$
Solo Natural	Solo Natural 100%	10,20	1,948
Mistura 1	70% Solo e 30% RCC	10,80	1,744
Mistura 2	50% Solo e 50% RCC	10,40	1,919
Mistura 3	40% Solo e 60% RCC	10,00	1,898

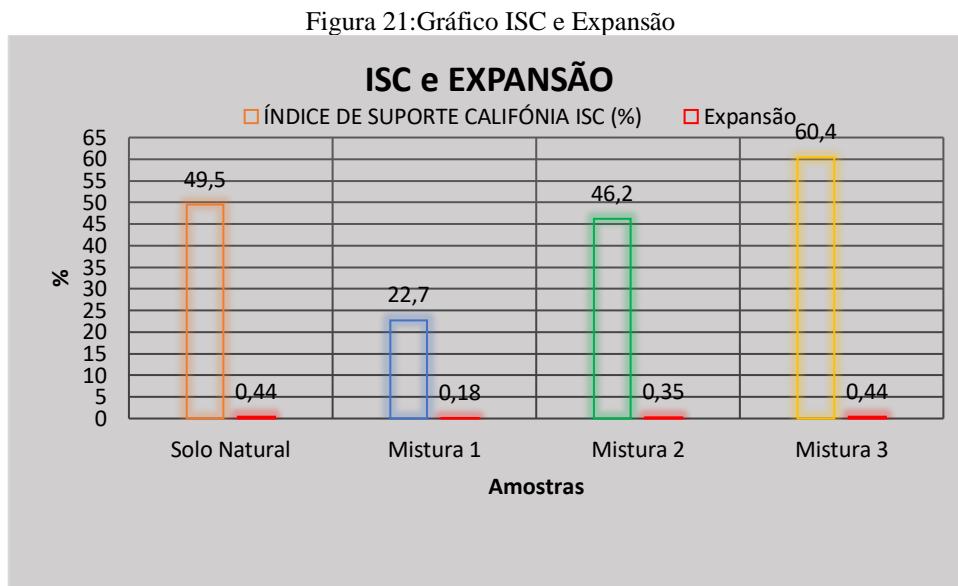
Fonte: Autor (2020)

No que diz respeito aos valores encontrados para os pesos específicos dos grãos, a influência da incorporação do RCC, gerou reduções nos valores, quando comparado ao peso específico obtido para o solo puro. Segundo Amorim (2013), esta situação já era esperada tendo em vista que os materiais componentes do RCC apresentam pesos específicos dos grãos, de forma individualizada e em conjunto, inferior ao encontrado para o solo. Angulo (2000), reforça em estudos realizados na usina de Santo André-SP, observou-se uma considerável variabilidade, quando os agregados que apresentam alta taxa de absorção de água, são os mesmo que tendem a apresentar massa específica com valores menores.

Diante disso, a mistura de solo-RCC que apresentou maior densidade, com menor índice de vazios foi a mistura 2, composta de 50% solo e 50% RCC, sendo a mistura que mais se assemelha à curva granulométrica ao solo em seu estado natural.

4.4 EXPANSÃO

A expansão do solo, diferente dos índices de CBR não afeta diretamente no dimensionamento de pisos e pavimentos, porém a sua avaliação é de extrema importância, pois um solo potencialmente expansivo poderá provocar manifestações patológicas irreparáveis. Para a análise do gráfico abaixo, foi observado as determinações citadas na norma do DNIT 141/2010-ES. No gráfico a seguir será possível avaliar a expansividade do solo natural e misturas de solo-RCC.



Fonte: Autor (2020)

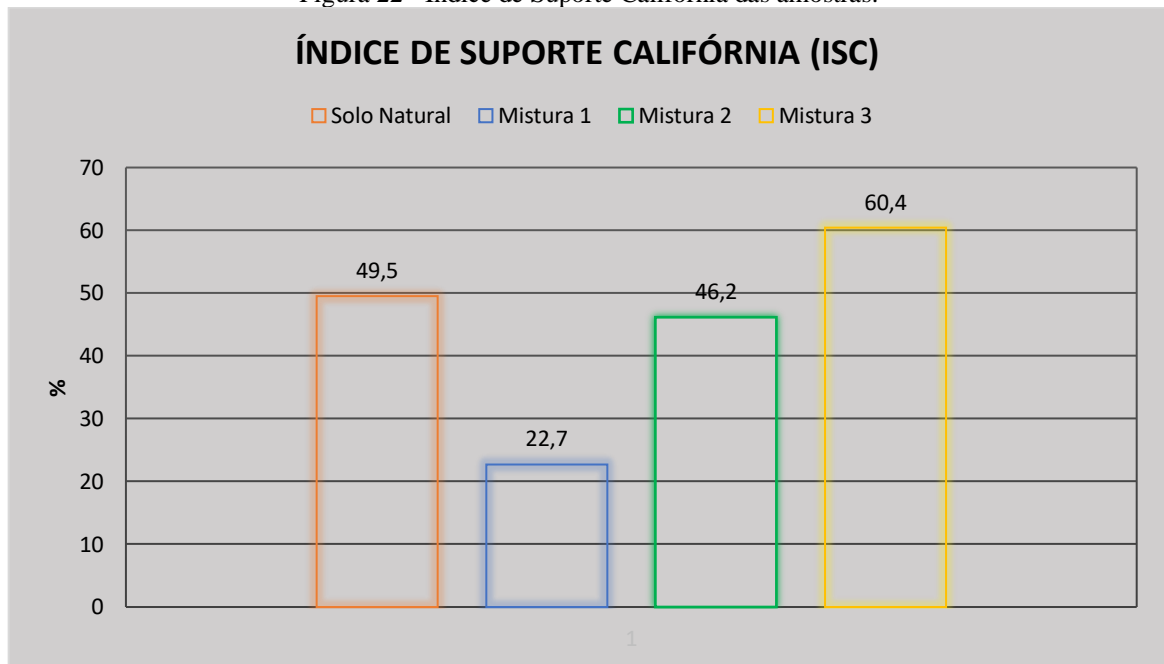
Analisando o gráfico anterior pode-se verificar que o valor da expansão das misturas propostas, atendem as especificações que determina para camada de base do pavimento a expansão do material deve ser menor ou igual a 0,5%, e sub-base menor ou igual a 1%.

4.5 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

Para à obtenção de uma medida de resistência indireta, apresentada pelos corpos de prova compactados, realizou-se o ensaio do índice de suporte Califórnia (CBR) seguindo os procedimentos recomendados pela norma NBR 9895.

Analisando a figura 22, é possível observar que a substituição do RCC pela massa de solo natural somente começa a apresentar indícios de aumento significativo quando sua massa é 50% maior ou igual à massa de solo. Zordan (2006), menciona que se pode utilizar os mais diversos tipos de RCC, Classe A, e até mesmo, com solo misturado, desde que nessa mistura, o solo não se faça presente numa quantidade maior que 50% do peso da mistura.

Figura 22 - Índice de Suporte Califórnia das amostras.



Fonte: Autor (2020)

De posse dos resultados, pode-se constatar que, à luz das especificações rodoviárias, em termos de resistência a penetração, vulgo ISC, a mistura 3 (40% solo e 60% RCC) está dentro do limite determinado, e poderia ser utilizada como camada de base, enquanto as demais misturas poderiam ser empregadas em camadas de sub-base. Todavia, o ISC não pode ser considerado um fator determinante.

Vale ressaltar que autores como, Amorim (2013), realizaram estudos que comprovam o aumento de ISC de misturas solo-RCC para diferentes idades, isto é, com tempo de cura de até 28 dias, as amostras obtiveram aumento significativo, isso ocorre em virtude do processo de cimentação interna da mistura, onde a mistura de matrizes cimentícias livres reagiram com água proporcionado uma maior condição de estabilidade, no período de 28 dias semelhantes aos de concreto.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho consistiu na avaliação da viabilidade técnica da utilização do RCC na estabilização granulométrica de um solo, com substituições crescentes do mesmo pelo rejeito, para o uso em pavimentação em camadas de base e sub-base. Em proporções de 30%, 50% e 60% de RCC em relação a massa de solo das amostras.

Referente a granulometria, o solo puro possui granulometria não uniforme, bem graduada e este aspecto permaneceu mesmo com o incremento de RCC, o mesmo se encontra no grupo A-1-A, segundo a TRB e se enquadra na faixa A do DNIT. A dispersão encontrada nas faixas granulométricas não é significativa, mesmo após a inserção de RCC, a predominância das partículas grossas prevalecerá, seguida da areia, e por último uma pequena parcela de finos.

Quanto aos limites de consistência o solo natural foi classificado com baixa plasticidade, enquanto nas misturas de solo-RCC houve o aumento do IP diretamente proporcional à substituição do solo pelo material de rejeito. As amostras, denominadas: solo natural, mistura 1, mistura 2 e mistura 3, obtiveram respectivamente IP; 5,10 (fraca plasticidade), 6,10 (baixa plasticidade), 12,70 (medianamente plástico) e NP (não plástico). Portanto, somente o solo puro e a mistura 3, atende a especificação para que o IP seja menor ou igual à 6%.

Na compactação, notou-se que houve o decréscimo do peso específico seco aparente e umidade ótima, comparada ao solo puro, porém de forma análoga ao aumento do percentual de RCC adicionado ao solo também ocorreu o acréscimo das duas variáveis acima citadas.

No que tange ao comportamento mecânico obtido por meio do ensaio de resistência à penetração do pistão, comparando-se a mistura 3 de solo-RCC, contendo 60% de RCC e 40% de solo, com o solo na condição pura, foi constatado que o incremento do agregado ao solo elevou o ISC para 60,4% comparada aos 49,5% do solo natural, de modo a produzir um material de maior resistência, atendendo as exigências do DNIT (2006), que determina ISC maior ou igual à 60% para o emprego do material em camadas de base para tráfego com N menor ou igual à $5 \cdot 10^6$. No que concerne, ao índice de suporte, vale ressaltar que nem todas as misturas atenderam as especificações para base, as misturas de 30% RCC para 60% solo, 50% RCC para 50%, atingiram respectivamente a marca de, 22,7% e 46,2% de ISC, portanto, atendem à imposição de limite mínimo de 20% de CBR, para o aproveitamento em camadas de sub-base.

Da expansividade das amostras estudadas, todas satisfizeram a norma do DNIT e a NBR 15115, com valores inferiores ao limite máximo. Nota-se uma diminuição da expansão na mistura 1, comparada ao solo natural, no entanto, para as misturas 2 e 3 percebe-se o aumento da expansão imediatamente proporcional ao aumento de RCC incorporada a amostra, acontece devido à heterogeneidade do RCC, e a presença de finos no material.

Dos resultados obtidos, a mostra de solo-RCC que apresentou melhor condições de uso para pavimento flexível de tráfego leve para camada de base, foi a mistura 3 (60% RCC e 40% solo), a mesma apresentou plasticidade nula, percentual de partículas passante na peneira de 0,42mm entre 10% e 40 %, ISC maior que 60% e expansividade menor que 0,5%.

Sabe-se que o uso desse material é alvo de preconceito por parte de profissionais, devido a sua heterogeneidade. Não obstante, faz-se necessário ponderar os aspectos ambientais que rodeiam essa reciclagem, bem como, os econômicos que são indiscutivelmente atraentes, tendo em vista, o baixo custo do RCC, contraposto aos materiais convencionais.

REFERÊNCIAS

_____. **DNER-ME 035/98:** Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro.

_____. **DNER-ME 080/94:** Solos – Análise granulométrica por peneiramento. Rio de Janeiro, 2013. 7 p.

_____. **DNER-ME 082/94:** Solos – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.

_____. **DNER-ME 122/94:** Solos – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2013. 7 p.

_____. **DNIT 141/2010:** Pavimentação: Base estabilizada granulometricamente - Especificação de Serviço. Espírito Santo, 2010.

_____. **DNER-ME 164/2013:** Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Rio de Janeiro.

_____. **DNER-ME 122/1994:** Solos - Determinação do limite de liquidez - método de referência e método expedito. Rio de Janeiro.

_____. **DNER-ME 41/94:** Solos – Preparação de amostras para ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.

_____. **DNER-ME 083/98:** Agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007:** Amostragem de resíduos. Rio de Janeiro, 2004.

ANGULO, S.C. Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. São Paulo, 2000. 155p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

ABNT NBR 10007:2004 – Amostragem de resíduos sólidos

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007:** Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15112:** Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15113:** Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15114:** Resíduos sólidos da construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 9 p, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solos - Determinação do Limite Liqueidez. Rio de Janeiro: ABNT, 6 p, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: Solo – Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. L. B., *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 1ºed. Programa Asfalto nas Universidades, Petrobras Distribuidora S.A. 2008.

BLUMENSCHNEIN, R. N. **A Sustentabilidade na Cadeia Produtiva da Indústria da Construção**. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) – Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, DF 263 p., 2004.

BOSCOV, Maria Eugenia Gimenez. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 248p., 2008.

CAMELO, G. G. A. **Melhoramento de Solo com Resíduos Sólidos da Construção Civil para Pavimentação**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA), Palmas, 64p., 2018. 2018.

CANCIAN, Max Alberto. **INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE, POROSIDADE E DO TEMPO DE APLICAÇÃO NA MISTURA SOLOCIMENTO PARA PAVIMENTO RODOVIÁRIO DE UM SOLO DA BACIA DO PARANÁ**. 2013. 202 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2013.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, ed. 6, 234 p., 1988.

CONAMA - **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Resolução nº307/2002 Diário Oficial da União. Brasília – DF

DNIT, Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**. - 3 ed. - Rio de Janeiro, 274p. (IPR. Publ., 719), 2006.

FERNANDES, C. G. **Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte para uso em pavimentação**. Dissertação (Mestrado) –Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ). Rio de Janeiro. 109p., 2004.

GRUBBA, David C. R. P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária**. Dissertação – Universidade de São Paulo, São Carlos, 163p., 2009.

HENDRIKS, CH. F. **The building cycle**. The Netherlands: Aeneas Technical Publishers, 2000. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., 2008, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: ABEPRO, 2008. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_TN_STP_079_551_11839.pdf>. Acesso em: 12 out. 2018.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 102p., 2000.

JOHN, V.M. AGOPYAN, J. **Seminário de Reciclagem de Resíduos Sólidos Domiciliares**. São Paulo – SP, 45p., 2000.

LATTERZA, L. M. **Concreto com Agregado Graúdo Proveniente da Reciclagem de Resíduos de Construção: Um Novo Material para Fabricação de Painéis Leves de Vedação**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 116p., 1998.

Lei 12.305/2010 – **Política Nacional dos Resíduos Sólidos**, Brasília, 2010.

LEITE, F. C. **Comportamento Mecânico de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil em Camadas de Base e Sub-base de Pavimentos**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo - SP. 216p., 2007.

LEVY, Salomon Mony; HELENE, Paulo R. L. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

MARQUES, G. L. O. **Notas de aula da disciplina de pavimentação**. Disciplina de Pavimentação. Faculdade de Engenharia. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 204 p., 2012. Disponível em: Acesso em 05 de abril de 2016, 20:27:35.

MARQUES, Geraldo L. de Oliveira. **Pavimentação**. Notas de Aulas – Pavimentação TRN 032 - Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 210 p., 2006.

MOTTA, R. S. **Estudo Laboratorial de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil para Aplicação em Pavimentação de Baixo Volume de Tráfego**.

Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, 134p.

PINTO, T. P. **Gestão ambiental de resíduos da construção civil – A experiência do SINDUSCON-SP**. São Paulo: Obra Limpa; Instituto e Técnicas em Construção Civil; SINDUSCON-SP, 48 p., 2005.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 190 p., 1999.

PORTO, Maria Edelma Henrique de Carvalho; SILVA, Simone Vasconcelos.

Reaproveitamento dos entulhos de concreto na construção de casas populares.

Resíduos Sólidos: Manual de Boas Práticas e Planejamento. São Paulo: ABRELPE. 108p., 2013.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação - volume I - 2ª edição**. PINI. São Paulo - SP. 761p., 2007.

SINDUSCON - SP. **Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil - A Experiência do TRICHÊS, G., KRYCKYJ, P. R. (1999)**. Aproveitamento de entulho da construção civil na pavimentação urbana. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 4., São José dos Campos. Anais. São Paulo: ABMS. p.259-265., 2005.

ZORDAN; S.E. **Entulho da indústria da construção civil**. Artigo. São Paulo: PCC-EPUSP. Disponível em <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2006.

Moreira, J. F.; DIAS, J. F.; REZENDE, M. E. B. **Utilização de resíduos de construção e demolição em base de pavimentos na cidade de Uberlândia-MG**. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 13., Maceió, 2006. Anais. Rio de Janeiro: ABPv, 2006.

ENIO FERNANDES AMORIM- **Viabilidade Técnica Econômica de Misturas de Solo-RCC em camadas de base de pavimentos urbanos. Estudo de caso: Município De Campo Verde – MT**. Tese de doutorado em geotecnia. Brasília – DF, 2013.

RELATÓRIO ANTIPLÁGIO- COPYSPIDER

Arquivo encontrado		Total de termos	Termos comuns	Similaridade (%)
scielo.br/scielo.php...	[1,28%]	3164	173	1,28
cnpsa.embrapa.br/sgc...	[0,41%]	3256	56	0,41
licenciamento.cetesb...	[0,37%]	679	42	0,37
docs.ufpr.br/~nutric...	[0,28%]	1377	33	0,28
agrolink.com.br/fert...	[0,22%]	1781	27	0,22
agroceresmultimix.co...	[0,17%]	1777	21	0,17
agronomiacomgismonti...	[0,15%]	864	17	0,15
embrapa.br/busca-de-...	[0,04%]	488	5	0,04
normas.com.br/visual...	[0%]	62	1	0
target.com.br/product...	[0%]	62	1	0

Documentos candidatos

scielo.br/scielo.php... [1,28%]

cnpsa.embrapa.br/sgc... [0,41%]

licenciamento.cetesb... [0,37%]

docs.ufpr.br/~nutric... [0,28%]

agrolink.com.br/fert... [0,22%]

agroceresmultimix.co... [0,17%]

agronomiacomgismonti... [0,15%]

embrapa.br/busca-de-... [0,04%]

normas.com.br/visual... [0%]

target.com.br/product... [0%]