

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE EXPRESSÕES GRÁFICAS E TRANSPORTES
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RUAN CARLOS LIMA DA SILVA

ESTABILIZAÇÃO DE CAMADAS DE PAVIMENTO UTILIZANDO RESÍDUOS DE
CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

São Luís

2019

RUAN CARLOS LIMA DA SILVA

ESTABILIZAÇÃO DE CAMADAS DE PAVIMENTO UTILIZANDO RESÍDUOS DE
CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Estadual do Maranhão, para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Teresinha de Medeiros
Coelho

São Luís

2019

Silva, Ruan Carlos Lima da.
Estabilização de camadas de pavimento utilizando resíduos
de corpos de prova de concreto / Ruan Carlos Lima da Silva. – São Luís,
2019.

142 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil,
Universidade Estadual do Maranhão, 2019.

Orientador: Profa. Dra. Maria Teresinha de Medeiros
Coelho.

1.Pavimentação. 2.Estabilização de solos. 3.Agregado
reciclado de concreto. 4.Corpo de prova de concreto. I.Título

CDU: 625.8

À minha avó, Assunção de Maria (*in memoriam*) que sempre colocou todos os netos para estudar.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado forças e me acompanhado durante toda a minha caminhada.

Aos meus pais, João Carlos e Rosana, pela paciência e incentivo, levando lanches e café durante estudos de madrugada.

Ao meu irmão, Renan Carlos, por me acalmar e dizer que eu ia conseguir.

À minha companheira maravilhosa, Patrícia Furtado, por estar ao meu lado sempre, e nos momentos difíceis lembrar que eu sou alguém importante nesse mundo.

À mês chères vaches, Yanik Araújo, Patrícia Pinheiro e Mayra Shinzato, qui m'ont fait changer, grandir, être plus mature, sprit ouvert et un être-humain meilleur. Merci beacoup!

Aos meus companheiros da Atlética Protensão, em especial à equipe de vôlei, aos amigos Arthur Valente, Ana Carolina, Gabriel Araruna, Renan Sousa e meus companheiros de equipe.

Aos meus tios, Carlos Henrique e Cláudio Gomes, por terem ido ajudar na parte pesada desta pesquisa, quebrando e triturando corpos de prova de concreto durante uma manhã inteira.

Ao engenheiro Hector Araújo, pelo auxílio ao conseguir contatos para levantamento de dados para esta pesquisa.

À minha orientadora, Profa. Maria Teresinha, que fez mágica ao orientar e dar suporte a sete orientandos ao mesmo tempo.

"I wonder what will happen".

(Eu imagino o que vai acontecer).

Red guy

RESUMO

Diante do cenário de obras de pavimentação, onde observa-se escassez em materiais para uso em pavimento, tem-se, cada vez mais, a necessidade de encontrar materiais alternativos e que possuem as características geotécnicas mínimas necessárias para sua aplicação, de acordo com as normas técnicas rodoviárias. Uma solução alternativa e sustentável é a estabilização granulométrica de solos utilizando agregados reciclados de concreto (ARC). O objetivo desta pesquisa é estudar a viabilidade de utilização de ARC, provenientes de corpos de prova de concreto gerados no Laboratório de Concreto e Materiais de Construção (LABCOM) do Campus Paulo VI, em São Luís – MA, para estabilização granulométrica de solos, fazendo um levantamento de quantitativos de corpos de prova gerados, estudando as características de misturas de ARC e solo, comparando os resultados com outros estudos já realizados sobre o tema. Foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica do ARC, ensaios de caracterização física e mecânica de um solo arenoso laterítico, assim como a caracterização mecânica das misturas propostas para aplicação em camadas de base e sub-base de pavimento. Constatou-se uma evidente geração de resíduos de corpos de prova de concreto sem destinação apropriada dentro do Campus Paulo VI e em outros locais de São Luís – MA. Em relação aos ensaios realizados observou-se que na medida em que aumenta a proporção de ARC nas misturas com o solo, existe um aumento proporcional considerável do Índice de Suporte Califórnia (CBR) da mistura. Comparando-se os ARC desta e de outras pesquisas, constatou-se que os materiais estudados possuem características similares, indicando que não há diferenças de ordem físicas e mecânicas entre ARC de corpos de prova de concreto e ARC em geral. Por fim, baseado nos resultados obtidos nesta pesquisa, concluiu-se que o ARC de corpos de prova de concreto pode ser empregado como uma alternativa sustentável para a estabilização granulométrica de solos, nas camadas de base e sub-base de pavimento.

Palavras-chave: Pavimentação. Estabilização de solos. Agregado reciclado de concreto. Corpo de prova de concreto.

ABSTRACT

In the face of a paving works scenario, where it is seen a shortage in material for use in pavement, it has, increasingly, the need to find alternative materials that has the minimum required geotechnical characteristics for its application, according to roads technical norms. An alternative and sustainable solution is the soil particle size stabilization using recycled concrete aggregates (RCA). The goal of this research is to study the feasibility of the use of the RCA, derived from concrete specimens generated at the Concrete and Construction Materials Laboratory (LABCOM) of the Campus Paulo IV, in São Luis – MA, to a soil particle size stabilization, mapping the amount of generated concrete specimens, studying the characteristics of RCA and soil mixtures, comparing the results with other researches already conducted related to the subject. Tests were conducted for the physical and mechanical characterisation of the RCA, tests for the physical and mechanical characterisation of a laterite sandy soil, as well as mechanical characterisation of the proposed mixtures for base and sub-base pavement layers application. It was found a patent concrete specimen waste generation without its appropriate disposal, inside the Campus Paulo VI and in other locations of São Luís – MA. According to the tests conducted it was observed that insofar as the proportion of RCA in the mixtures with soil is increased, there is a proportional substantial rise of the mixture California Bearing Ratio (CBR). Comparing the RCA from this and other researches, it was found that the studied materials have similar characteristics, indicating that there are no physical or mechanical differences between RCA from concrete specimens and RCA in general. Lastly, based on the results obtained in this research, it was concluded that RCA from concrete specimens can be used as a sustainable alternative to the soil particle size stabilization, in base and sub-base pavement layers

Key Words : Paving. Soil stabilization. Recycled concrete aggregates. Concrete specimen.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Produção anual de corpos de prova por fontes consultadas	54
Tabela 3.1 – Misturas analisadas nesta pesquisa.....	88
Tabela 4.1 – Umidades coletadas de diferentes pontos da do solo.....	98
Tabela 4.2 – Resultados do limite de plasticidade e do limite de liquidez.....	99
Tabela 4.3 – Resultado do ensaio de equivalente de areia.....	100
Tabela 4.4 – Abertura das peneiras e porcentagens passantes do ARCPC.....	101
Tabela 4.5 – Porcentagens retidas para determinação da dimensão máxima.....	102
Tabela 4.6 – Resultado da dimensão máxima ($D_{m\acute{a}x}$) do ARCPC.....	102
Tabela 4.7 – Quantidade ponderada de partículas de cada fração.....	103
Tabela 4.8 – Resultado do índice de forma	103
Tabela 4.9 – Resultado de densidade e absorção do ARCPC	104
Tabela 4.10 – Resultados da massa específica do agregado miúdo do ARCPC	104
Tabela 4.11 – Resultados da abrasão Los Angeles na graduação B do ARCPC	105
Tabela 4.12 – Análise de traços, em porcentagem, de ARCPC e solo para estudo.....	106
Tabela 4.13 – Traços selecionados, nomenclaturas adotadas, destinação e tipo de traço	107
Tabela 4.14 – Resultados da relação entre a porcentagem que passa na # 200 e na # 40	110
Tabela 4.15 – Resultado do ensaio de compactação para o traço 0A100S.....	111
Tabela 4.16 – Umidade ótima de compactação e peso específico aparente seco do traço 0A100S.....	112
Tabela 4.17 – Resultado do ensaio de compactação para o traço 30A70S.....	112
Tabela 4.18 – Umidade ótima de compactação e peso específico aparente seco do traço 30A70S.....	113
Tabela 4.19 – Resultado do ensaio de compactação para o traço 50A50S.....	114
Tabela 4.20 – Umidade ótima de compactação e peso específico aparente seco do traço 50A50S.....	115
Tabela 4.21 – Resultado do ensaio de compactação para o traço 70A30S.....	115

Tabela 4.22 – Umidade ótima de compactação e peso específico aparente seco do traço 70A30S.....	116
Tabela 4.23 – Resultado do ensaio de compactação para o traço 80A20S.....	116
Tabela 4.24 – Umidade ótima de compactação e peso específico aparente seco do traço 80A20S.....	117
Tabela 4.25 – Resultados do ensaio de CBR para o traço 0A100S.....	118
Tabela 4.26 – Resultados do ensaio de CBR para o traço 30A70S.....	119
Tabela 4.27 – Resultados do ensaio de CBR para o traço 50A50S.....	120
Tabela 4.28 – Resultados do ensaio de CBR para o traço 70A30S.....	121
Tabela 4.29 – Resultados do ensaio de CBR para o traço 80A20S.....	122
Tabela 4.30 – Comparação de resultados do ensaio de CBR com relação às normas do DNIT.....	123
Tabela 4.31 – Relação de aumento de CBR a mistura com a adição de ARCPC.....	127
Tabela 4.32 – Resultados do índice de degradação de Ruiz para o traço 70A30S.....	128
Tabela 4.33 – Resultados do índice de degradação de Ruiz para o traço 70A30S.....	129
Tabela 4.34 – Análise comparativa de estudos de características do ARC.....	131
Tabela 4.35 – Comparação de resultados de estabilização de solos.....	131
Tabela 4.36 – Comparação de resultados do índice de degradação de Ruiz.....	132
Tabela 4.37 - Consumo de ARCPC para traço de mistura para base.....	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema estrutural de um pavimento rígido	25
Figura 2.2 - Esquema estrutural de um pavimento flexível	26
Figura 2.3 - Caracterização e classificação de resíduos sólidos	33
Figura 2.4 – Ponto de disposição inadequada de RCD na estrada Val Paraíso (a e b) e na Área de Preservação Ambiental (APA) do Itapiracó (c e d).....	39
Figura 2.5 – Entulho gerado pela destinação final inadequada de corpos de prova de concreto na UEMA	41
Figura 2.6 – Planta esquemática e detalhes do Pantheon Romano	42
Figura 2.7 – Relação entre idade do concreto x resistência à compressão.....	44
Figura 2.8 – Esquema básico de um corpo de prova submetido a forças de compressão	45
Figura 2.9 – Corpos de prova em período de cura (24h)	46
Figura 2.10 – Corpos de prova em tanque de solução saturada de hidróxido de cálcio	46
Figura 2.11 – Corpos de prova conservados ao ar	47
Figura 2.12 - Ensaio de resistência à compressão simples.....	48
Figura 2.13 – Reutilização de corpos de prova de concreto em calçadas.....	50
Figura 2.14 – Reaproveitamento de corpos de prova para reutilização em jardins.....	50
Figura 2.15 – Reaproveitamento de corpos de prova para utilização como marco topográfico para aulas de Topografia (UEMA).....	51
Figura 2.16 – Reaproveitamento de corpos de prova de concreto para canteiros de árvores (UEMA)	51
Figura 2.17 – Reaproveitamento de corpos de prova de concreto para fixação de lonas e divisão de amostras de solo (UEMA).....	52
Figura 2.18 – Esquema de britador de mandíbula.....	56
Figura 2.19 – Esquema de britador de impacto	56
Figura 3.1 – Coleta de solo utilizado neste estudo.....	60
Figura 3.2 – Local de coleta de solo utilizado neste estudo	60
Figura 3.3 – Situação de descarte de corpos de prova de concreto	62
Figura 3.4 – Coleta de corpos de prova de diferentes pontos da pilha de descarte	63

Figura 3.5 – Amostra coletada (a) e amostra reduzida e quebrada manualmente (b) ...	64
Figura 3.6 – Etapas de quebra do material: (a) britamento manual; (b) peneiramento do material britado; (c) seleção de partículas retidas em peneira para novo ciclo de britamento	65
Figura 3.7 - Ensaio de limite de liquidez com o aparelho Casagrande.....	68
Figura 3.8 - Gráfico golpes x umidade para determinação do limite de liquidez.....	68
Figura 3.9 - Ensaio de limite de plasticidade	70
Figura 3.10 – Etapas da determinação do equivalente de areia: (a) amostra de solo; (b) mistura de solução+amostra; (c) leitura das alturas de argila e areia.....	71
Figura 3.11 – Peneiras utilizadas no peneiramento	72
Figura 3.12 – Amostra separada em frações granulométricas	73
Figura 3.13 – Exemplo de curva granulométrica.....	74
Figura 3.14 – Frações da amostra utilizadas no ensaio do índice de forma.....	75
Figura 3.15 – Quarteamento de frações retidas	76
Figura 3.16 – Medição de grãos com a utilização do paquímetro	77
Figura 3.17 – Amostra submersa em ensaio de absorção.....	79
Figura 3.18 – Frasco de Chapman e fração miúda do agregado	81
Figura 3.19 – Fração miúda do agregado em ensaio no frasco de Chapman	82
Figura 3.20 – Determinação da carga abrasiva pela graduação escolhida no ensaio de abrasão Los Angeles	83
Figura 3.21 - Escolha de graduação e n° de rotações do tambor para o ensaio de abrasão Los Angeles.....	84
Figura 3.22 – Amostra utilizada em ensaio de abrasão Los Angeles e carga abrasiva .	85
Figura 3.23 – Ensaio de abrasão Los Angeles	86
Figura 3.24 – Faixas granulométricas para camada de base.....	89
Figura 3.25 – Execução de compactação de camadas.....	91
Figura 3.26 – Corpo de prova gerado durante o ensaio de compactação	92
Figura 3.27 – Exemplo de curva de compactação.....	93
Figura 3.28 – Amostra compactada no molde cilíndrico em imersão e aferição da expansão.....	95

Figura 3.29 – Posicionamento de corpo de prova e execução de ensaio CBR	96
Figura 3.30 – Execução de Ensaio CBR.....	96

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 – Cenário das empresas do setor da construção civil de São Luís com relação a RCD	37
Gráfico 2.2 – Destinação final de RCD de empresas de São Luís	37
Gráfico 2.3 – Fiscalização de órgãos públicos com relação à gestão de RCD	38
Gráfico 4.1 – Curva granulométrica do solo	99
Gráfico 4.2 – Curva granulométrica do ARCPD	101
Gráfico 4.3 – Curvas granulométricas das misturas 0A100S, 30A70S e 50A50S, que não se enquadram em faixas para utilização em camadas de base	108
Gráfico 4.4 – Curva granulométrica da mistura 70A30S enquadrada nas faixas B e C para camadas de base	109
Gráfico 4.5 – Curva granulométrica da mistura 80A20S enquadrada nas faixas A, B e C para camadas de base	109
Gráfico 4.6 – Curva de compactação do traço 0A100S	111
Gráfico 4.7 – Curva de compactação do traço 30A70S	113
Gráfico 4.8 – Curva de compactação do traço 50A50S	114
Gráfico 4.9 – Curva de compactação do traço 70A30S	116
Gráfico 4.10 – Curva de compactação do traço 80A20S	117
Gráfico 4.11 – Curva pressão x penetração do ensaio de CBR do traço 0A100S	119
Gráfico 4.12 – Curva pressão x penetração do ensaio de CBR do traço 30A70S	120
Gráfico 4.13 – Curva pressão x penetração do ensaio de CBR do traço 50A50S	121
Gráfico 4.14 – Curva pressão x penetração do ensaio de CBR do traço 70A30S	122
Gráfico 4.15 – Curva pressão x penetração do ensaio de CBR do traço 80A20S	123
Gráfico 4.16 – Granulometria da mistura 50A50S na Faixa C para Base	124
Gráfico 4.17 – Granulometria da mistura 50A50S na Faixa D para Base	125
Gráfico 4.18 – Granulometria da mistura 50A50S na Faixa E para Base	125
Gráfico 4.19 – Relação entre % de ARC e CBR	126
Gráfico 4.20 – Relação de incremento de CBR da mistura com o aumento de ARCPD	127

Gráfico 4.21 – Curva granulométrica antes e após compactação do traço 70A30S	129
Gráfico 4.22 – Curva granulométrica antes e após compactação do traço 80A20S	130

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. JUSTIFICATIVA	21
1.2. OBJETIVOS.....	23
1.2.1. Objetivo Geral	23
1.2.2. Objetivos Específicos	23
2. REFERENCIAL TEÓRICO	24
2.1. PAVIMENTAÇÃO	24
2.1.1. Pavimento	24
2.1.2. Camadas de Pavimentos	27
2.1.3. Estabilização Granulométrica de Camadas de Base e Sub-base	29
2.2. GESTÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	30
2.2.1. Resíduos de Construção e Demolição (RCD)	30
2.2.2. Legislações e Normas Brasileiras para Gestão de RCD	31
2.2.3. Gestão de RCD em São Luís	36
2.3. CORPOS DE PROVA DE CONCRETO.....	42
2.3.1. Concreto	42
2.3.2. Resistência à Compressão do Concreto	44
2.3.3. Ensaio de Resistência à Compressão: Produção de Corpos de Prova de Concreto	45
2.3.4. Situação Final de Corpos de Prova de Concreto Rompidos: Produção de RCD	49
2.4. AGREGADOS RECICLADOS	55
2.4.1. Beneficiamento de Agregados Reciclados	55
2.4.2. Mercado de Agregados Reciclados	56
2.4.3. Agregado Reciclado de Concreto (ARC)	57
3. METODOLOGIA	59
3.1. MATERIAIS UTILIZADOS.....	59

3.1.1.	Solo	59
3.1.2.	Agregado Reciclado de Concreto.....	61
3.2.	ENSAIOS REALIZADOS.....	66
3.2.1.	Solo	66
3.2.2.	Agregado Reciclado de Corpo de Prova de Concreto.....	72
3.2.3.	Misturas	87
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	98
4.1.	ENSAIOS REALIZADOS.....	98
4.1.1.	Solo	98
4.1.2.	Agregado Reciclado de Corpo de Prova de Concreto (ARCPC)	100
4.1.3.	Misturas	105
5.	CONCLUSÃO.....	134
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	136

1. INTRODUÇÃO

Em obras de pavimentação o material utilizado deve atender uma gama de propriedades determinadas em normas, afim de atender requisitos mínimos para garantir uma execução e funcionamento eficiente da estrada. Porém quando ocorre de os materiais disponíveis na região de execução da obra se apresentarem insatisfatórios quanto à sua aplicação torna-se necessário melhorar sua qualidade através de um processo conhecido como estabilização de solos, que consiste em misturar uma certa quantidade de material ao solo original visando sua melhoria e adequação à aplicação em obras de pavimentação.

Recentemente, devido à alta geração de resíduos de construção civil, buscou-se reciclar esse tipo de material para aplicação em pavimentos. Dentre os resíduos utilizados para estabilizar o solo, tem-se os provenientes do rompimento de corpos de prova de concreto, objeto deste estudo (LEITE, 2007).

Na construção civil observa-se sempre a existência de atividades em canteiros de obras, seja na construção de edifícios, pontes, barragens, entre outros, onde na maioria das vezes utiliza-se um material que é um dos principais no que tange a um esqueleto estrutural eficiente: o concreto.

Para garantir a qualidade técnica e um correto traço de mistura do concreto é necessário que haja um padrão afim de que todo material produzido atenda às necessidades as quais foi solicitado. O controle de qualidade do concreto é regido pela NBR 12655 (ABNT, 2015), onde é mostrado que um dos ensaios realizados é o de resistência à compressão, no qual corpos de prova de concreto são produzidos segundo a NBR 5378 (ABNT, 2003) e rompidos em idades distintas para teste de resistência à ruptura seguindo o determinado na NBR 5379 (ABNT, 2007). Após todos estes procedimentos os corpos de prova rompidos não possuem mais nenhuma finalidade aparente ou estrutural.

Dentre os locais que produzem corpos de prova de concreto, pode-se citar o laboratório de concreto do curso de Engenharia Civil. Geralmente, esses corpos de prova, após os ensaios realizados, são colocados em aterros de entulhos. Porém este destino final não possui em seu desenvolvimento planos de reutilização nem de reciclagem dos

materiais descartados, gerando um acúmulo cada vez maior de corpos de prova à medida que vão sendo produzidos e rompidos.

A Resolução CONAMA n° 307/02 enfatiza que resíduos de corpos de prova de concreto se enquadram nesta resolução.

Art. 3º Os resíduos da construção civil deverão ser classificados, para efeito desta Resolução, da seguinte forma:

I - Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:[...]

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;" (RESOLUÇÃO CONAMA n° 307/02, p. 96).

Sendo considerado um resíduo de construção e demolição (RCD) é possível planejar formas de reutilização e reciclagem de corpos de prova, afim de evitar o acúmulo e aprimorar a destinação final de tais materiais. A geração desses resíduos pode ocorrer de diversas formas, cuja atividade é feita por geradores de resíduos.

Segundo a Resolução CONAMA n°307, geradores são pessoas, físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis pela geração de resíduos de construção civil através de empreendimentos ou atividades. Tais geradores devem priorizar a não geração de resíduos, sua redução, reutilização, reciclagem e destinação final. Sendo que resíduos de classe A, onde corpos de prova de concreto se incluem, possuem destinação das seguintes formas: reutilização ou reciclagem sob forma de agregados ou encaminhados para áreas de aterro da construção.

Os geradores que não tem planos de destinação final adequado para os RCD os descartam no meio ambiente, gerando um impacto negativo à área afetada, causando o comprometimento da paisagem (poluição visual); degradação de mananciais; impermeabilização de solo em regiões de recarga de lençol freático e rios/córregos; assoreamento de quaisquer córregos d'água; proliferação de vetores causadores de doenças, a exemplos de ratos, baratas, e outros (PINTO, 2001).

Dentro deste contexto entende-se que é necessário a destinação final adequada para os resíduos sólidos gerados pela produção de corpos de prova nos laboratórios. Com isso em mente, e sabendo que a utilização de agregados reciclados é uma alternativa viável na construção civil, sendo objeto de análise em diversas áreas de

estudo e pesquisa, é possível ainda dar a esses agregados reciclados um destino final mais eficaz, que no caso é seu uso na pavimentação.

Em pavimentação existe uma classificação de utilização de agregado reciclado para execução de base, sub-base e reforço de subleito, através da NBR 15116 (ABNT 2004). Desta forma é possível reciclar o corpo de prova de concreto, reduzindo-o e triturando-o à nível de agregado reciclado e estudando sua viabilidade de aplicação em pavimentação.

Este trabalho tem como finalidade a reciclagem de corpos de prova de concreto sob forma de agregados reciclados para estabilização de solos em camadas de pavimentação. Esses corpos de prova são gerados no Laboratório de Concreto e Materiais de Construção do Campus Paulo VI serão estudados e analisados quanto a sua viabilidade de aplicação como resíduos reciclados, possibilitando, ainda, uma destinação final apropriada e reduzindo, ao mesmo tempo, o impacto ambiental gerado ao meio ambiente.

Lembrando que o material reciclado será utilizado na estabilização de um solo, com a finalidade de melhorar sua resistência como camada de pavimento. O solo utilizado no presente estudo é um solo arenoso fino laterítico – SAFL, coletado nas proximidades da Via Expressa, entrada para o bairro do Cohafuma, em São Luís – MA.

1.1. JUSTIFICATIVA

Os laboratórios do Centro de Ciências Tecnológicas - CCT da UEMA geram, a cada semestre, diversos materiais para estudos e testes. Porém esses materiais gerados não possuem métodos de reuso, reciclagem nem destinação final correta, como pré-estabelecido na Resolução do CONAMA nº 307. Materiais provenientes do concreto, materiais betuminosos, querosene, entre outros, são descartados de forma incorreta e até de forma prejudicial ao meio ambiente. O que fazer com todo este resíduo gerado que não possui destinação adequada?

É necessário que haja uma intervenção e atenção de todo o corpo acadêmico para esta atual situação do futuro destes materiais descartados, estudando, analisando

e propondo soluções para o problema, assim como todo engenheiro deve atuar no meio em que está inserido.

Dando continuidade à esta ideia, é crucial dar um início aos estudos sobre reuso, reciclagem e destinação final dos resíduos gerados nos laboratórios do CCT do Campus Paulo VI.

Um dos problemas mais aparentes é a destinação de materiais de concreto, que são descartados no meio ambiente após o fim da função para os quais foram moldados, gerando impactos ambientais e, não havendo estudos e viabilizações de disposição final destes materiais, podem ocorrer consequências mais graves para o meio ambiente no futuro.

Uma das soluções é utilizar corpos de prova de concreto gerados no Laboratório de Concreto e Materiais de Construção (LABCOM), como agregados reciclados de concreto (ARC), onde a cada semestre é gerado uma grande quantidade desse material para testes provenientes: de aulas práticas; de monografias, pesquisas e consultorias na área de concreto; e de empresas da construção civil que realizam obras no Campus Paulo VI, mas que são descartados indevidamente após o uso.

Na pavimentação existe a possibilidade de utilizar tais agregados reciclados para execução de reforço de subleito, sub-base e base cuja aplicação trata-se de uma destinação final, de alternativa e correta de acordo com a Resolução do CONAMA nº 307.

O presente trabalho busca uma aplicação de reciclagem de corpos de prova de concreto em camadas de pavimentação, propondo estudos de viabilização de aplicação e de caráter econômico, abrindo assim espaço para outras pesquisas na área e buscar soluções viáveis para os resíduos sólidos gerados nos laboratórios do CCT do Campus Paulo VI.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Estudar a estabilização de camadas de pavimento utilizando agregados reciclados de corpos de prova de concreto (ARCPC).

1.2.2. Objetivos Específicos

- a) Fazer um levantamento dos corpos de prova de concreto gerados pelo Laboratório de Concreto e Materiais de Construção (LABCOM)
- b) Estudar as características físicas e mecânicas dos agregados reciclados de corpos de prova de concreto (ARCPC) e do solo utilizado
- c) Estudar as características mecânicas das misturas propostas
- d) Comparar resultados com outros trabalhos acadêmicos

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. PAVIMENTAÇÃO

2.1.1. Pavimento

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras determinadas, construída sobre a superfície final de terraplanagem executada em um terreno com a função de, através de técnica e custo adequado, resistir a esforços provenientes do tráfego de veículos e do clima, proporcionando aos usuários da mesma boas condições de rolamento, com conforto, segurança e economia (BERNUCCI et al., 2006).

Pavimento, por definições de ordem técnico-econômicas é uma estrutura de camadas onde materiais de diferentes características são colocados em contato, resultando numa elevada complexidade de cálculo de tensões e deformações nessas camadas, solicitadas pelo tráfego de veículos (DNIT, 2006).

Santana (1993 apud MARQUES, 2006, p.1), complementa:

Pavimento é uma estrutura construída sobre a superfície obtida pelos serviços de terraplanagem com a função principal de fornecer ao usuário segurança e conforto, que devem ser conseguidos sob o ponto de vista da engenharia, isto é, com a máxima qualidade e o mínimo custo.

O pavimento rodoviário é classificado em pavimento rígido, pavimento flexível e pavimento semi-rígido, sendo o pavimento rígido mais conhecido como pavimento de concreto de cimento Portland, e o pavimento flexível sendo mais conhecido como pavimento asfáltico (MARQUES, 2006; MATOS, 2018).

Para cada tipo de pavimento apresenta metodologia de dimensionamento distintas, bem como uma composição estrutural de diferentes camadas. Neste estudo o foco será nas camadas que compõem a estrutura de um pavimento abordadas nos próximos itens.

2.1.1.1. Pavimento Rígido

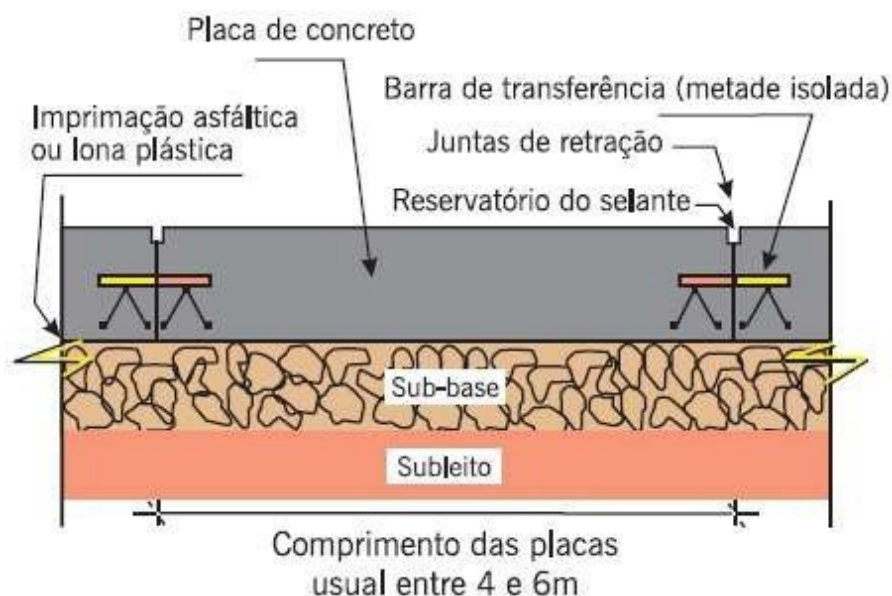
O pavimento rígido tem como revestimento uma placa de concreto de cimento Portland, cuja espessura é dimensionada segundo à resistência à flexão das placas de concreto e da resistência das camadas subjacentes a ela (BERNUCCI et al., 2006).

É constituído por camadas que trabalham essencialmente à tração e são aplicadas considerações baseadas na fadiga, no coeficiente de reação do subleito e das cargas aplicadas, sendo usual designar a subcamada deste tipo de pavimento como sub-base, pois possui resistência semelhante à camada de sub-base do pavimento flexível ou asfáltico (BERNUCCI et al., 2006; MARQUES, 2006).

A camada de revestimento de concreto possui uma rigidez maior em relação às camadas inferiores e assim irá absorver a maior parcela dos esforços horizontais provenientes do tráfego, gerando assim uma pressão mais bem distribuída e aliviada sobre as camadas inferiores (BALBO, 2007; DNIT, 2006).

Na Figura 2.1 pode-se observar o esquema estrutural de um pavimento rígido, notando suas camadas e suas distribuições ao longo do pavimento.

Figura 2.1 - Esquema estrutural de um pavimento rígido



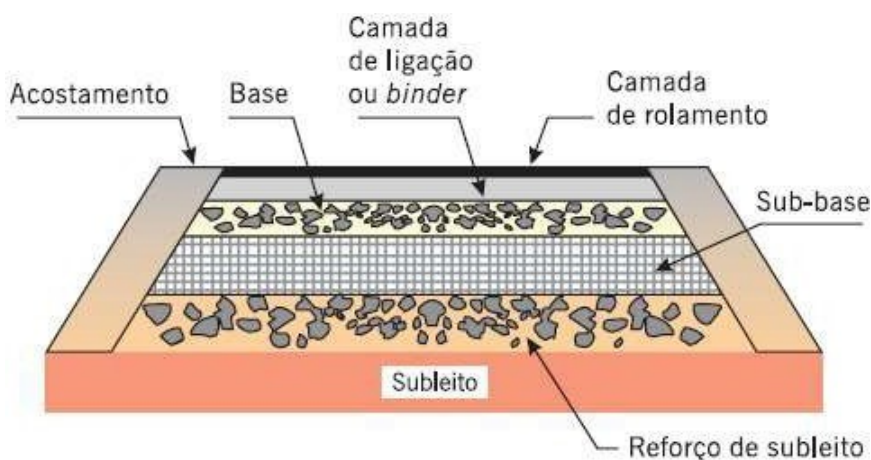
Fonte: Bernucci et al., 2006.

2.1.1.2. Pavimento Flexível

O pavimento flexível é aquele cujo revestimento é composto por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos sobre camadas puramente granulares. Ao contrário do pavimento rígido, o pavimento flexível é constituído por camadas que não trabalham à tração, mas sim sofrem deformação elástica. Sua capacidade de suporte vem da distribuição de cargas sobre um sistema de camadas superpostas, onde as de melhor qualidade se encontram mais próximas ao ponto de aplicação da carga (BERNUCCI et al., 2006; MARQUES, 2006).

“É formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito[...]. As camadas da estrutura repousam sobre o subleito, ou seja, a plataforma da estrada terminada após cortes e aterros.” (BERNUCCI et al., 2006, p. 9). Pode-se observar o esquema estrutural de um pavimento flexível na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Esquema estrutural de um pavimento flexível



Fonte: Bernucci et al., 2006.

2.1.1.3. Pavimento Semi-rígido

É considerada uma estrutura de pavimento intermediária entre o pavimento rígido e o pavimento flexível. O pavimento semi-rígido caracteriza-se por um revestimento

asfáltico que possuem camadas de base ou sub-base compostas por materiais cimentados como solo-cimento, solo-cal, solo-betume, entre outras, solicitadas à tração.

2.1.2. Camadas de Pavimentos

Os pavimentos possuem diferentes camadas, cada uma com sua função, resistência e características. Segundo Bernucci et al. (2006), dependendo das condições de tráfego, da capacidade de suporte do subleito, da resistência e espessura das camadas, pode haver a eliminação de uma ou mais camadas.

Durante muitos anos a principal característica resistente de material utilizada para dimensionamento de camadas de pavimento foi o Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *Califórnia Bearing Ratio* (CBR), como é mais usualmente conhecido, e a sua expansão, segundo o método do DNER. Atualmente tem-se o dimensionamento mecanicista, levando-se em conta o Módulo de Resiliência dos materiais.

2.1.2.1. Subleito

É considerado como fundação do pavimento, sendo o solo original após a terraplenagem do terreno. Seu estudo deve seguir até profundidades onde a carga do tráfego atuam (MARQUES, 2006).

O material utilizado como subleito deve possuir uma expansão $\leq 2\%$ e um CBR $\geq 2\%$. Caso o CBR do subleito seja $< 2\%$ ele deve ser substituído por um material melhor de no máximo 20% de CBR em 1,0 m de profundidade (DNIT, 2006; MARQUES 2006).

2.1.2.2. Reforço do Subleito

Camada utilizada por questões técnico-econômicas, acima do subleito com características geotécnicas inferiores à sua camada superior e melhor que o material do

subleito. É utilizado para melhorar a qualidade do subleito e regularizar a camada para a sub-base (DNIT, 2006; MARQUES, 2006).

O material utilizado para subleito deve possuir CBR maior que o do subleito e expansão $\leq 1\%$ (DNIT, 2006).

2.1.2.3. Sub-base

A camada de base exigida para distribuir os esforços para as camadas inferiores do pavimento pode ser muito espessa. Por razões econômicas e técnicas divide-se a camada de base em duas camadas, criando-se assim a camada de sub-base, gerando menos custos (BALBO, 2007).

O material utilizado para sub-base deve possuir expansão $\leq 1\%$ e um CBR $\geq 20\%$ (DNIT, 2006).

2.1.2.4. Base

Camada responsável por resistir e distribuir ao subleito os esforços provenientes do tráfego e também é a camada construída abaixo do revestimento (DNIT, 2006).

O material utilizado para base deve possuir expansão $\leq 0,5\%$ e um CBR $\geq 80\%$ para tráfego pesado e CBR $\geq 60\%$ para tráfego leve (DNIT, 2006).

2.1.2.5. Revestimento

É a camada, impermeável quanto possível, responsável por receber diretamente os esforços oriundos do tráfego e também responsável por melhorar a qualidade, comodidade e segurança de rolamento dos veículos. Deve ser resistente ao desgaste e pode ser conhecido como capa ou camada de desgaste (DNIT, 2006; MARQUES, 2006).

2.1.3. Estabilização Granulométrica de Camadas de Base e Sub-base

As bases e sub-bases podem ser constituídas por solo estabilizado por natureza, mistura de solos e agregados, brita graduada, brita graduada tratada com cimento, solo estabilizado quimicamente, entre outros (BALBO, 2007).

Os materiais utilizados em base e sub-base podem ser classificados segundo seu comportamento diante de esforços, podendo ser: materiais granulares e solo, materiais estabilizados quimicamente ou cimentados e materiais asfálticos (BERNUCCI et al., 2006).

Bernucci et al. (2006, p.352) explica que:

Entende-se por materiais granulares aqueles que não possuem coesão (a não ser aparente pela sucção) e que não resistem a tração, trabalhando eminentemente aos esforços de compressão. Os solos coesivos resistem a compressão, principalmente, e também a tração de pequena magnitude, graças a coesão dada pela fração fina. Os materiais cimentados são materiais granulares ou solos que recebem adição de cimento, cal ou outro aditivo, de forma a proporcionar um acréscimo significativo de rigidez do material natural e um aumento da resistência a compressão e a tração. Há ainda misturas asfálticas e solo-asfalto que se destinam a camada de base e que poderiam ser classificadas como coesivas. Nesse caso a ligação entre agregados ou partículas é dada pelo ligante asfáltico, sendo a resistência a tração bastante superior aos solos argilosos, e por isso são enquadrados em classe diferente dos solos e dos materiais cimentados.

Camadas puramente granulares são flexíveis e estabilizadas granulometricamente pela compactação de um material ou da mistura de materiais que atendam uma granulometria apropriada e índices geotécnicos específicos, determinados em normas e especificações (DNIT, 2006).

Os materiais mais utilizados na pavimentação da classe de materiais granulares e solos são: brita graduada simples (BGS), bica ou brita corrida, macadame hidráulico, macadame a seco, misturas estabilizadas granulometricamente (combinação de materiais para atender requisitos e atingir características mecânicas necessários), solo-agregado, solo natural, solo melhorado com cimento ou cal. Devem ser ressaltados ainda outros materiais que vem recebendo uma utilização crescente em pavimentação, provenientes de reutilização e reciclagem: escórias de alto forno (provenientes de misturas de impurezas da fabricação de ferro), agregado reciclado de construção civil e

demolições, rejeitos de extração de rochas ornamentais, mistura asfáltica fresada e etc. (BERNUCCI et al., 2006).

Neste estudo será apresentado a utilização de agregados reciclados de corpos de prova de concreto (ARCPC).

Destacam-se aqui as pesquisas de MATOS (2018), HORTEGAL (2009) e SOUZA (2015), em estudos utilizando resíduos da construção civil e demolição (RCD) na pavimentação, provenientes desta mesma instituição.

2.2. GESTÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

2.2.1. Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

De acordo com a Resolução CONAMA n° 307 (2002), resíduos de construção e demolição (RCD) são aqueles gerados através de atividade da construção civil, comumente chamados de entulhos de obras.

A reciclagem de RCD vem desde a Antiguidade, tendo sido amplamente utilizada na Europa para reconstrução dos danos causados na 2ª Guerra Mundial. Atualmente é praticada por toda a Europa, dando ênfase à Holanda (JOHN; AGOPYAN, 2000).

No Brasil, as primeiras pesquisas científicas envolvendo o uso de agregados reciclados de resíduos de construção civil (RCD) foram realizadas por Pinto (1986) em argamassas, Bodi (1997) em pavimentos, Levy (1997) em argamassas e Zordan (1997) em concretos. As primeiras usinas de reciclagem instaladas foram pelas Prefeituras de São Paulo, SP (1991), de Londrina, PR (1993), e de Belo Horizonte, MG (1994). Em 1999, foi confirmada por Pinto (1999) a relevância do tema, apontando que o RCD pode corresponder a mais de 50% da massa dos resíduos sólidos municipais (MIRANDA, 2009, p.58).

O Brasil encontra-se em um contexto onde 50% dos resíduos sólidos urbanos (RSU) são compostos por RCD (MIRANDA; ANGULO; CARELI, 2009). A massa gerada de RCD nas cidades é maior ou igual à massa gerada de resíduos domiciliares (JOHN; AGOPYAN, 2000). Pinto (1999 apud ÂNGULO, 2005) mostrou em sua pesquisa que no Brasil é estimada uma geração de 500 kg/hab.ano, uma média entre algumas cidades brasileiras.

A disposição irregular ou indevida de RCD acarretam consequências ao meio nos quais são descartados. Enchentes, proliferação de vetores nocivos à saúde, interdição parcial de vias e degradação do ambiente urbano são algumas causas de resíduos depositados irregularmente (JOHN; AGOPYAN, 2000).

2.2.2. Legislações e Normas Brasileiras para Gestão de RCD

No Brasil, devido ao valor e relevância de pesquisas realizadas ao longo dos anos, foram elaboradas normas e legislações afim de referenciar empresas do setor da construção civil e geradores de RCD sobre sua gestão e disposição adequadas.

A seguir serão abordadas políticas que já se encontram em vigor, servindo como a base da gestão de RCD no Brasil.

2.2.2.1. ABNT NBR 10004:2004 (Resíduos Sólidos – Classificação)

Trata-se da norma para a classificação de resíduos sólidos. Vale ressaltar que não trata especificamente de RCD, mas serve de base para a classificação de todo os outros tipos de resíduos sólidos gerados.

A NBR 10004 (2004) é uma norma atualizada e corrigida de outra norma, de mesma numeração e título, porém com dados de 1987. Hoje esta norma possui dados atualizados baseados em estudos realizados por uma comissão de estudos.

A norma define resíduos sólidos como resíduos no estado sólido ou semi-sólido, provenientes de atividade industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e de varrições. Os resíduos sólidos são classificados segundo a sua origem, podendo ser conhecida ou não conhecida, e em seguida sua classificação é complementada pelo risco e periculosidade do resíduo (ABNT NBR 10004, 2004).

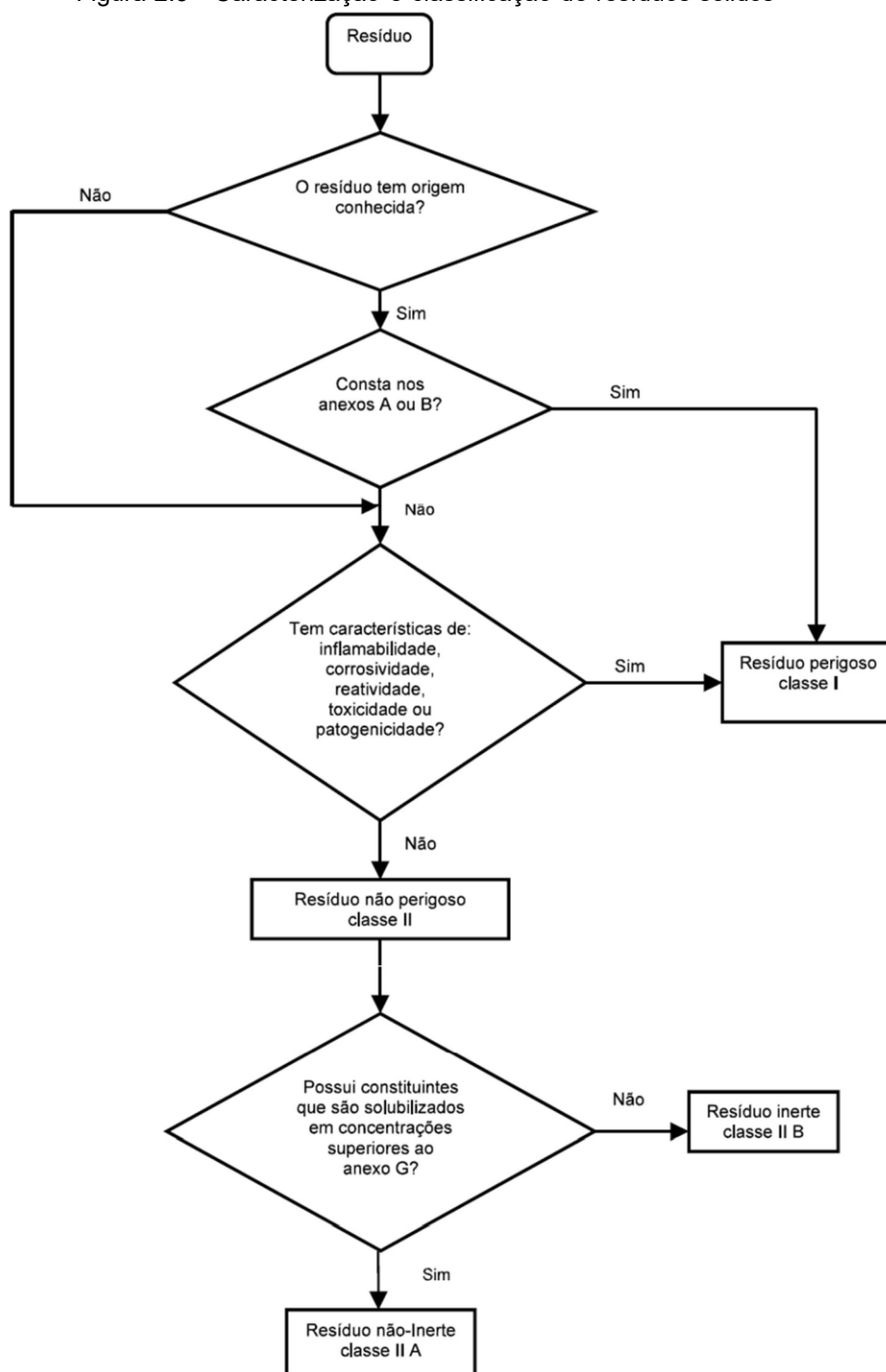
Os grupos de classificação de resíduos sólidos, segundo a NBR 10004 (2004) são:

- Resíduos classe I – Perigosos;
- Resíduos classe II – Não perigosos;

- Resíduos classe II A – Não inertes.
- Resíduos classe II B – Inertes.

De maneira geral os RCD se classificam nesta norma em “Resíduos Classe II B – Inertes”, sendo necessária sempre verificações e estudos para comprovações de classificação. Um esquema de classificação simplificado pode ser visto na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Caracterização e classificação de resíduos sólidos



Fonte: ABNT NBR 10004, 2004.

2.2.2.2. Resolução CONAMA n° 307 de 2002

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) através desta resolução publicada no Diário Oficial da União (DOU) estabelece diretrizes, critérios e gestão de resíduos na construção civil, considerando fatores como: desenvolvimento de políticas urbanas; redução de impactos ambientais gerados por RCD; a degradação ambiental proveniente de disposições inadequadas de RCD; RCD de um significativo percentual dos resíduos sólidos urbanos; responsabilidade dos geradores de RCD; viabilidade técnica e econômica de materiais de reciclagem de RCD; gestão de RCD como gerador de benefícios de ordem social, econômica e ambiental (BRASIL, 2002).

Segundo a Resolução CONAMA n° 307 (2002), que define alguns conceitos para efeito da mesma: RCD são os provenientes de construções, reformas reparos de demolições de obras da construção civil; geradores são pessoas físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, que geram RCD em suas atividades; gerenciamento de RCD é o sistema de gestão que visa reduzir, reutilizar ou reciclar RCD.

A classificação dos RCD é feita da seguinte forma:

I - Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;

b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;

III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;

IV - Classe D: são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde. (nova redação dada pela Resolução n° 348/04) (BRASIL, 2002).

Esta Resolução visa ainda diretrizes de gestão de RCD, onde os geradores devem priorizar, primariamente, a não produção de resíduos e, secundariamente, a redução, reutilização, reciclagem e a destinação final adequada. Os Municípios e Distrito

Federal devem elaborar um Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil. Por fim a Resolução determina as destinações adequadas para cada classe de resíduo de construção civil.

Tendo em vista que o presente estudo visa RCD será dado o destaque à destinação de resíduos da Classe A cuja destinação final é reutilização ou reciclagem na forma de agregados, ou encaminhados para áreas de aterro de RCD, sendo dispostos de modo a permitir sua reutilização ou reciclagem futura.

2.2.2.3. Outras Legislações Importantes

É válido ressaltar outras normas técnicas que, baseadas na Resolução nº307 do CONAMA, possuem diretrizes próprias de gestão, manejo e aplicação de RCD, reciclados ou reutilizados, para fins específicos.

A ABNT NBR 15112 (2004) fixa diretrizes para projeto, implantação e operação de áreas de transbordo e triagem para resíduos da construção civil e resíduos volumosos.

A ABNT NBR 15113 (2004) fixa diretrizes para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos sólidos da construção civil classe A e de resíduos inertes.

A ABNT NBR 15114 (2004) fixa diretrizes para projeto, implantação e operação de áreas de reciclagem de resíduos sólidos da construção civil classe A.

A ABNT NBR 15115 (2004) estabelece critérios para execução de camadas de reforço de subleito, sub-base e base de pavimentos, e ainda camada de revestimento primário utilizando agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil, ou somente “agregado reciclado”, em obras de pavimentação.

A ABNT NBR 15116 (2004) estabelece critérios para o emprego de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil, em obras de pavimentação rodoviária: camadas de reforço do subleito, sub-base e base, ou até revestimento primário de vias não pavimentadas; em concreto sem função estrutural.

2.2.3. Gestão de RCD em São Luís

A cidade de São Luís, segundo o último censo realizado em 2010, possui uma população de 1.014.837 habitantes, com uma população estimada para o ano de 2018 de 1.094.667 habitantes (IBGE, 2010). Se for considerada a geração média de RCD descrita por Pinto (1999 apud ÂNGULO, 2005) é possível estimar a geração média de 547.333,5 ton/ano de RCD em São Luís.

Segundo dados levantados por Floram (2018), São Luís produz em média 417,64 t/dia de RCD, sendo este volume cerca de 70% de todo RCD gerado na Região Metropolitana da Grande São Luís. Na Ilha de Maranhão, ou Ilha de São Luís (São Luís, Raposa, São José de Ribamar e Paço do Lumiar), estima-se a produção de 603,26 t/dia.

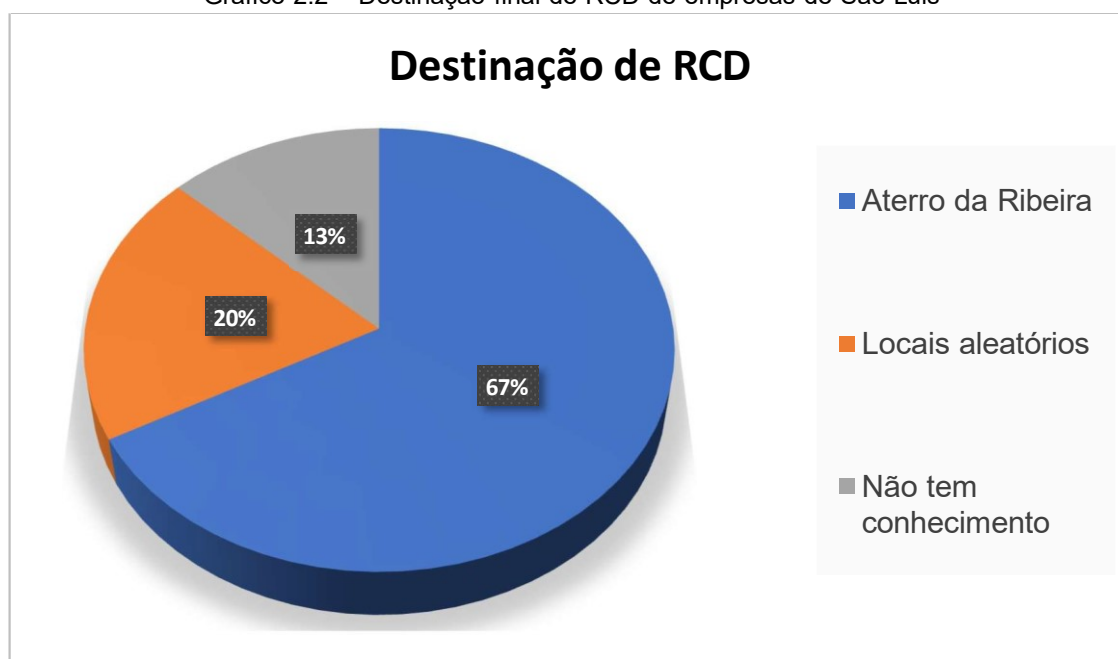
Segundo pesquisa recente com 15 empresas de São Luís realizada por Mendes (2014), o cenário atual das empresas do setor da construção civil mostrou que 27% das empresas não tinham conhecimento sobre a Resolução do CONAMA n° 307, 60% afirmaram possuir um Plano de Gerenciamento de RCD, 47% afirmaram oferecer treinamento para segregação de RCD para os seus funcionários mas somente 33% possuíam uma área específica para destinação final de RCD. Somente 64% das empresas possuíam um controle de geração de volume de RCD. Com relação a reaproveitamento na própria obra, 53% utilizavam práticas de aproveitamento de material. Quanto à destinação final de RCD, 67% afirmaram que seus resíduos são destinados ao Aterro da Ribeira, 20% não tinham conhecimento do local de descarte e 13% afirmaram que o descarte é realizado em locais aleatórios. Para melhor visualização temos os Gráficos 2.1 e 2.2.

Gráfico 2.1 – Cenário das empresas do setor da construção civil de São Luís com relação a RCD



Fonte: Mendes, 2014.

Gráfico 2.2 – Destinação final de RCD de empresas de São Luís



Fonte: Mendes, 2014.

Ainda segundo a pesquisa de Mendes (2014), no quesito de fiscalização de órgãos públicos com relação à gestão de RCD, 80% das empresas afirmam que não passaram por nenhum tipo de fiscalização de órgãos públicos responsáveis (Gráfico 2.3).

Gráfico 2.3 – Fiscalização de órgãos públicos com relação à gestão de RCD



Fonte: Mendes, 2014.

São Luís possui duas leis que tratam da gestão de RCD: a Lei Municipal n° 4.653/06 e a Lei n° 4.996/08, sendo a primeira tratando também do Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil. Contudo, ao ser apresentado o cenário em que a cidade se encontra, não se verifica a eficiência de leis ou de fiscalizações.

Mesmo com a eficiência da prática de RCD reciclado em pavimentação, na forma de brita corrida ou na produção de tijolos, comprovada e utilizada, especialmente em Minas Gerais, referência nacional no uso de RCD reciclado, além de existirem reuso e reaproveitamento de certa fração destes, o volume gerado ainda é muito maior do que o volume reutilizado, gerando muito pontos de disposição inadequada (FLORAM, 2018). Exemplos de disposição inadequada, na região de São Luís, são apresentados na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Ponto de disposição inadequada de RCD na estrada Val Paraíso (a e b) e na Área de Preservação Ambiental (APA) do Itapiracó (c e d)



Fonte: Floram, 2018.

Segundo pesquisas realizadas em 2010 o RCD reciclado apresentou boa qualidade e custo vantajoso, indicando mercado em potencial, porém principiante, pois a cidade só possuía uma usina de reciclagem de RCD, que se encontra desativada (FLORAM, 2018). Mendes (2015) relata que ao entrar em contato com gestores da antiga usina de reciclagem de RCD e questionar o motivo de sua desativação obteve como resposta que foi pelo fato da mesma nunca operar a 100% de sua capacidade, além disso o mercado não estava preparado para receber seu produto além de que grande parte dos resíduos recebidos estavam contaminados com resíduos de outros tipos, dificultando todo o processo de segregação e aumentando o custo e o tempo de produção.

De uma maneira geral, os empresários se mostram desacreditados da reciclagem de RCC [mesmo RCD] nos municípios da Ilha do Maranhão. Eles alegaram que não vislumbram melhorias enquanto a gestão de resíduos for marcada pela ausência de políticas de divulgação e incentivo quanto ao uso de RCC [RCD] beneficiado [reciclado] aliada à fiscalização deficiente dos grandes geradores que, em sua maioria, não elaboram um PGRCC [Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil], conseqüentemente não realizam segregação eficiente dos resíduos nos canteiros de obra (FLORAM, 2018, p.222).

Ao contextualizar este cenário para dentro da área de estudo desta pesquisa, o Campus Paulo VI – UEMA, é verificada uma continuidade do padrão de geração de RCD e disposição final inadequada que ocorre em São Luís. Ainda que numa escala micro, observa-se uma disposição inadequada resultante da produção de volume de RCD e pela falta de reuso ou reaproveitamento dos mesmos.

Corpos de prova de concreto produzidos pelo Laboratório de Concreto e Materiais de Construção (LABCOM) são produzidos em grande quantidade, e por este motivo, não havendo políticas nem gestões adequadas para disposição final deste material, é descartado indevidamente, gerando áreas de entulho (Figura 2.5).

Figura 2.5 – Entulho gerado pela destinação final inadequada de corpos de prova de concreto na UEMA



Fonte: Autor, 2018.

Sendo este material objeto de estudo desta pesquisa, pois foi verificado um potencial gerador de volume de RCD, optou-se por estudar sua origem e sua qualidade quando aplicado reciclado ou reaproveitado. Assuntos estes abordados nos próximos itens.

2.3. CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

2.3.1. Concreto

O concreto é considerado um material novo, pois até o século XIX a madeira e a alvenaria ainda eram os materiais mais empregados. Desde as primeiras experiências com alvenarias de pedras, as primeiras civilizações buscavam um material que unisse de forma coesa essas pedras, utilizando inicialmente argamassas de barro e posteriormente argamassas de cal. O material de vedação da Pirâmide de Quéops (2.700 a.C.) demonstrou que os egípcios já possuíam domínio na utilização da argamassa de cal. Mais tarde durante o domínio romano, que eram um povo de uma cultura aberta e receptiva, que copiava e adaptava o que consideravam útil dos povos conquistados, foi utilizada a argamassa de cal e melhorada com uma cinza pozolânica, que produzia um material semelhante ao cimento atual. Os romanos foram os primeiros a introduzir regulamentos de construção, qualidade de materiais, entre outras normas que se assemelham aos que possuímos nos dias atuais (CARVALHO, 2018).

Esse cimento romano foi passando por grandes construções como o Pantheon (Figura 2.6), grande parte do Fórum Romano, o Coliseu, a Basílica de Constantino, além de estradas, aquedutos e prédios. Até que este cimento romano ficou perdido na Idade Média, sendo resgatado somente no séc. XVIII (CARVALHO, 2008).

Figura 2.6 – Planta esquemática e detalhes do Pantheon Romano



Fonte: Pantheon..., [2006, 2008a, 2008b] apud CARVALHO, 2018.

Passando por pesquisas: John Smeaton (1755), responsável pela reconstrução do farol de Eddystone; James Parker (1796), fundador de uma fábrica de

cimento segundo as pesquisas de Smeaton; Louis Vicat (1817), apresentou uma pesquisa onde obtinha cimento através da queima de misturas de calcário e argila, sendo considerado o pai do cimento artificial; e, finalmente, Joseph Aspdim (1824), solicitou e obteve patente para aperfeiçoamento do cimento artificial de Vicat, chamando-o de cimento Portland, por sua semelhança com pedras calcárias extraídas da península de Portland (CARVALHO, 2008; PEDROSO, 2009).

O sucesso do cimento Portland veio em 1825, quando num túnel construído sob o rio Tamisa, em Londres, houve um acidente onde o teto caiu e o túnel inundou, matando trabalhadores. Após a drenagem do túnel, o engenheiro responsável substituiu o cimento romano que estava usando nas paredes pelo cimento Portland para refazer a parte danificada e vedar qualquer entrada de água, tendo então finalizado a obra com sucesso em 1843, a qual ainda se encontra em uso até os dias atuais (CARVALHO, 2008; PEDROSO, 2009).

Deste modo é possível finalmente definir o concreto como sendo um material de construção resultante da mistura, quantidades racionais de aglomerante (cimento), agregados (pedra e areia) e água (ALMEIDA, 2002).

Neville e Brooks (2013) definem o concreto como sendo qualquer produto ou massa produzida a partir de um material cimentante.

A composição dos materiais no concreto varia com as especificações do material, como resistência mecânica, podendo ser identificada participação do cimento no concreto, em situações correntes, entre 9% e 21%. Os agregados representam aproximadamente 70% a 80% da massa do concreto.

O concreto é um dos materiais mais consumidos no mundo e apresenta características [...] que o tornam importantes para a construção de edificações e infra-estrutura (ABCP, s.d.; EATMON, 2009; GARTNER, 2004; HUNTZINGER; METHA; MONTEIRO, 2008; van OSS; PADOVANI, 2002; apud LIMA, 2010).

O concreto é um material amplamente utilizado, sendo estimado um consumo mundial de 11 bilhões de ton/ano, o que dá cerca de 1,9 ton/hab.ano, valor inferior somente ao consumo de água (PEDROSO, 2009). Segundo Santos (2013), projeções otimistas presumem que até 2025 o consumo de concreto será maior que o de água. A *European Concrete Platform* (2009) relata um consumo mundial entre 21 e 31 milhões de toneladas de concreto em 2006. O *Concrete Centre* (2009 apud LIMA, 2010) faz uma estimativa de consumo anual mundial de 24 bilhões de toneladas de concreto, o que condiz com a informação da *European Concrete Platform*. No Brasil o concreto

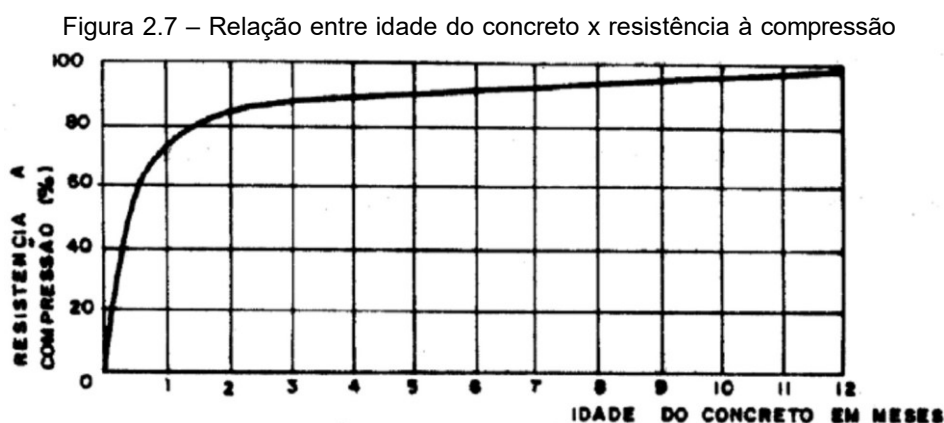
proveniente de centrais dosadoras é de cerca de 30 milhões m³/ano (PEDROSO, 2009). Santos (2013) afirma que, no Brasil, concreteiras produziram 51 milhões de m³ de concreto em 2012 e que em 2017 projetou-se uma produção de 72,3 milhões de m³ de concreto, com um crescimento de 7,1% entre 2013 e 2017.

2.3.2. Resistência à Compressão do Concreto

Para ser produzido um “bom concreto” existem critérios a serem atendidos, pelos quais ele pode ser definido, sendo um deles o estado do concreto endurecido. Para este estado é considerada como exigência usual uma resistência à compressão satisfatória. Mesmo que os resultados obtidos em testes não sejam os mesmos do concreto na estrutura, a resistência à compressão é uma maneira fácil de verificar o atendimento às especificações, além de outras propriedades importantes do concreto relacionadas (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A resistência à compressão é a característica mais importante de um concreto, sendo determinada em corpos de prova padrão afim de possibilitar uma comparação entre diferentes concretos (ALMEIDA, 2002).

Vale ressaltar ainda que um dos fatores que influenciam na resistência do concreto é o tempo de cura ou sua idade. Quanto maior a idade de um concreto maior será sua resistência à compressão, como visto na Figura 2.7.

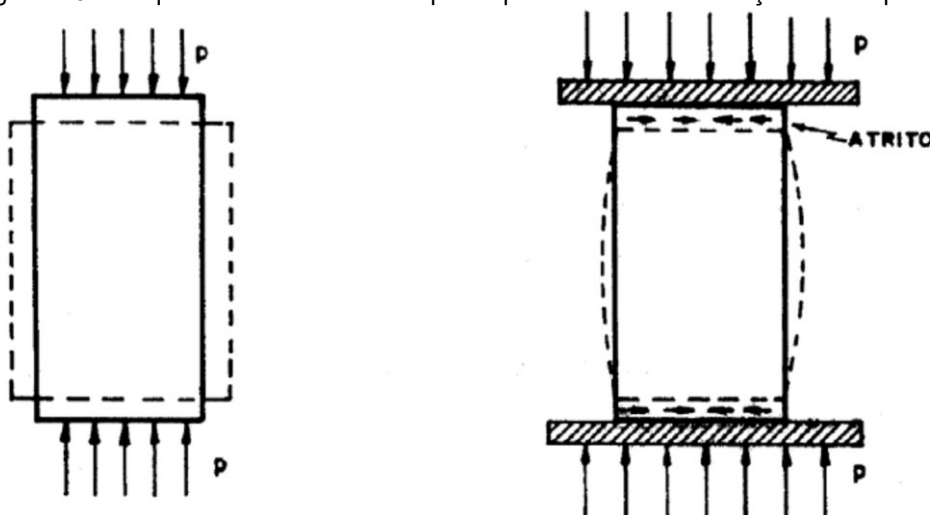


Fonte: Almeida, 2002.

2.3.3. Ensaio de Resistência à Compressão: Produção de Corpos de Prova de Concreto

Corpos de prova são peças constituídas do material em estudo para testes e análises de laboratório em pequena escala. Nesta pesquisa trata-se do corpo de prova de concreto produzido para teste no ensaio de resistência à compressão (Figura 2.8).

Figura 2.8 – Esquema básico de um corpo de prova submetido a forças de compressão



Fonte: Almeida, 2002.

Para a realização dos ensaios de resistência à compressão deve ser consultada as normas NBR 5738:2015, NBR 5739:2007 e a NBR 7212:2012, que definem a máquina de ensaio, quantidade de corpos de prova a serem produzidos, dimensão dos corpos de prova, moldagem dos corpos de prova e execução do ensaio.

A NBR 5738:2015 determina que os corpos de prova cilíndricos devem possuir diâmetros de 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm ou 40 cm; e devem ter altura do dobro do diâmetro. Após a mistura e moldagem dos corpos de prova, estes permanecem por um período de cura (endurecimento), sem perturbações, durante 24h (Figura 2.9). Ao fim do tempo de cura os corpos de prova são retirados do molde e colocados num tanque de solução saturada de hidróxido de cálcio a $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ (Figura 2.10). Ao fim de sete dias os corpos de prova são retirados do tanque e conservados ao ar a $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ até o momento do ensaio (Figura 2.11).

Figura 2.9 – Corpos de prova em período de cura (24h)



Fonte: Autor, 2019.

Figura 2.10 – Corpos de prova em tanque de solução saturada de hidróxido de cálcio



Fonte: Autor, 2019.

Figura 2.11 – Corpos de prova conservados ao ar



Fonte: Autor, 2019.

A NBR 5739:2007 determina que os corpos de prova devem ser rompidos à compressão conforme a idade à qual eles foram destinados para teste. O corpo de prova é inserido na máquina de ensaio (Figura 2.12) onde é submetido à um carregamento contínuo até atingir uma força de ruptura.

Figura 2.12 - Ensaio de resistência à compressão simples



Fonte: Autor, 2019.

A partir dos dados de força de ruptura e das dimensões do corpo de prova determina-se, pela Equação 2.1 a resistência à compressão do concreto ensaiado.

$$f_c = \frac{4F}{\pi x D^2} \quad (2.1)$$

Onde:

f_c é a resistência à compressão, em MPa;

F é a força máxima alcançada, em N;

D é o diâmetro do corpo de prova, em mm.

A NBR 7212:2012 determina que sejam coletadas amostras do concreto, aleatoriamente. Cada exemplar deve ser constituído de dois corpos de prova para cada idade de rompimento destinados. Toma-se como resistência dos corpos de prova o maior

valor encontrado dos dois valores obtidos no ensaio. Usualmente encontramos quatro idades de rompimento para testes de resistência: 7 dias, 14 dias, 21 dias e 28 dias; podem haver variações de idades de rompimento segundo a produtora de concreto.

2.3.4. Situação Final de Corpos de Prova de Concreto Rompidos: Produção de RCD

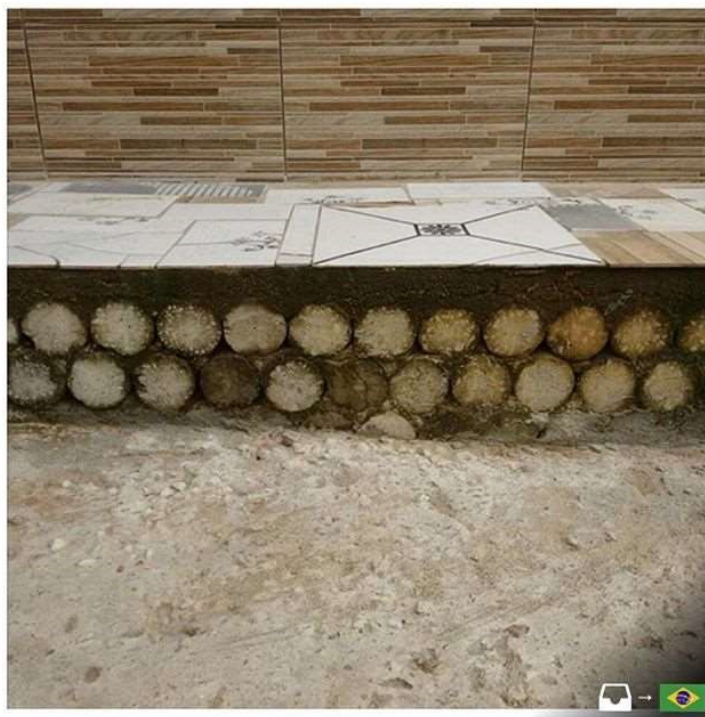
Finalizados os ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de concreto as normas não prescrevem nenhuma utilização ou reutilização dos mesmos, tornando-se peças descartáveis, cabendo então aos laboratórios onde são produzidas estas peças, denominados nesta pesquisa como geradores, segundo a Resolução CONAMA n° 307 (2002), dar uma destinação adequada aos mesmos.

Por serem materiais produzidos com resistências e aplicações na construção civil, ainda que em menor escala para controle de qualidade, os corpos de prova rompidos tornam-se RCD.

Dependendo do laboratório e do porte da empresa/instituição que realizam estes ensaios podem existir diferentes disposições finais para os resíduos de corpos de prova gerados. Seguindo a lógica de levantamento de dados de Mendes (2014) e do levantamento de dados do LABCOM (UEMA) e de Laboratórios da SEMOSP, no ano de 2019, foram previstos três tipos de destinação final para resíduos de corpos de prova na região de São Luís.

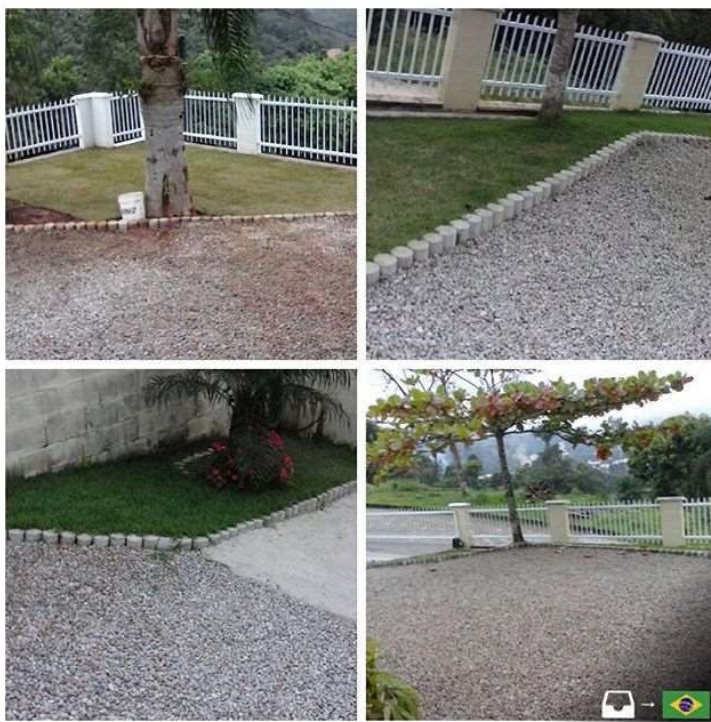
- a) Armazenamento dos resíduos de corpos de prova até o recolhimento dos mesmos por empresas com licenciamento ambiental para descartes em aterros de inertes;
- b) Reutilização dos resíduos de corpos de prova para fins não estruturais (Figuras 2.13 a 2.17)

Figura 2.13 – Reutilização de corpos de prova de concreto em calçadas



Fonte: Construção Civil, 2015a.

Figura 2.14 – Reaproveitamento de corpos de prova para reutilização em jardins



Fonte: Construção Civil, 2015b

Figura 2.15 – Reaproveitamento de corpos de prova para utilização como marco topográfico para aulas de Topografia (UEMA)



Fonte: Autor, 2019.

Figura 2.16 – Reaproveitamento de corpos de prova de concreto para canteiros de árvores (UEMA)



Fonte: Autor, 2019.

Figura 2.17 – Reaproveitamento de corpos de prova de concreto para fixação de lonas e divisão de amostras de solo (UEMA)



Fonte: Autor, 2019.

c) Descarte de resíduos de corpos de prova em locais inapropriados, gerando entulhos e causando impactos negativos ao meio ambiente.

Como visto em Mendes (2014), a geração de RCD é muito maior que o volume de reaproveitamento, portanto, mesmo com soluções criativas e interessantes para resíduos de corpos de prova, o volume de produção deste resíduo ainda é muito maior que o do reaproveitamento.

Segundo dados levantados pelo LABCOM – UEMA, através do laboratorista Jurandir Amorim, a produção média de corpos de prova por semestre é de aproximadamente 350 corpos de prova, provenientes de monografias utilizando concreto e das aulas de Materiais de Construção II onde os alunos devem produzir e testar a resistência do concreto. Vale ressaltar que no semestre de 2018.2, no qual as obras da

UEMA testavam o concreto utilizado no LABCOM e houve um número elevado de pesquisas e monografias que precisavam testar a resistência do concreto, a contagem foi de 657 de corpos de prova (3,5 kg/corpo de prova) e 78 blocos de concreto (5,5 kg/bloco de concreto). Ao todo, em peso relativo de corpos de prova de concreto, são cerca de 780 corpos de prova.

Segundo dados levantados pelos laboratórios da SEMOSP, através do laboratorista Luan Fernandes e do engenheiro Antônio de Araújo Pontes, são produzidos 4 corpos de prova a cada caminhão betoneira que chega no local da obra. Como exemplo, uma obra executada que dure cerca de 1 mês e meio tem a utilização de 20 a 30 caminhões betoneira por obra, sendo um máximo já utilizado de 40 caminhões betoneira por obra.

Segundo a empresa Supermix Concreto, através do engenheiro e gerente Rodrigo Carvalho de Oliveira, são produzidos mensalmente de 100 a 150 corpos de prova de concreto para testes de qualidade de concreto distribuídos pelos caminhões betoneira que saem para as obras solicitantes.

Na Tabela 2.1 é feita uma melhor visualização deste cenário de produção de corpos de prova estimado anualmente levantado por esta pesquisa.

Tabela 2.1 – Produção anual de corpos de prova por fontes consultadas

Corpos de Prova						
Gerador	por Caminhão Betoneira	por Mês	por Obra (1,5 mês)	por Semestre	média por Ano ¹	média por Ano (ton) ²
LABCOM - UEMA	-	-	-	350 máx. 780	700 máx. 1560	2,45 máx. 5,46
Laboratórios da SEMOSP	4	-	80 - 120 máx. 160	-	640 - 960 ³ máx. 1280	2,24 - 3,36 máx. 4,48
Laboratórios da Supermix Concreto	-	100 - 150	-	600 - 900	1200 - 1800	4,20- 6,30

Fonte: Autor, 2019.

Através dos dados levantados é possível observar que laboratórios independentes como o LABCOM possuem usualmente a metade de produção de corpos de prova de que uma concreteira como a Supermix Concretos produz.

Também é possível ver que o total produzido das três fontes juntas é de 8,89 a 12,11 ton de resíduos de corpos de prova em um ano (não contabilizando eventos máximos). Levando em consideração que a produção da Região Metropolitana da Grande São Luís envolve uma quantidade maior de geradores, é confirmado o potencial de uso de corpos de prova de concreto em obras de engenharia, sendo que neste estudo, em camadas de pavimento.

¹ Média estimada calculada a partir dos dados fornecidos usuais e máximos, relacionando produção unitária (por mês, semestre, ou tempo de obra) em produção anual.

² Levando em consideração que um corpo de prova de concreto pesa, em média, 3,5 kg.

³ Para esta estimativa foi levado em consideração o evento de uma obra (1,5 mês) acontecendo a cada 1,5 mês durante um ano, sem levar em consideração obras acontecendo simultaneamente.

2.4. AGREGADOS RECICLADOS

A reciclagem de RCD possui vários tipos de finalidades. Uma das mais usuais é a de agregados reciclados de RCD, que consiste na substituição de agregados naturais por agregados reciclados, em parte ou como um todo, em diversas aplicações.

Visto que as características dos agregados de RCD estão diretamente relacionadas à forma como são fabricados e mais ainda das características da fração mineral dos RCD disponível para produzir os mesmos (DAMINELI, 2007). Pinto (1986 apud VIEIRA et al., 2004) afirma que a composição dos RCD é de 60% de argamassa, 30% de componentes de vedação 9% de outros materiais como concreto, pedras e metais, e finalmente 1% de orgânicos.

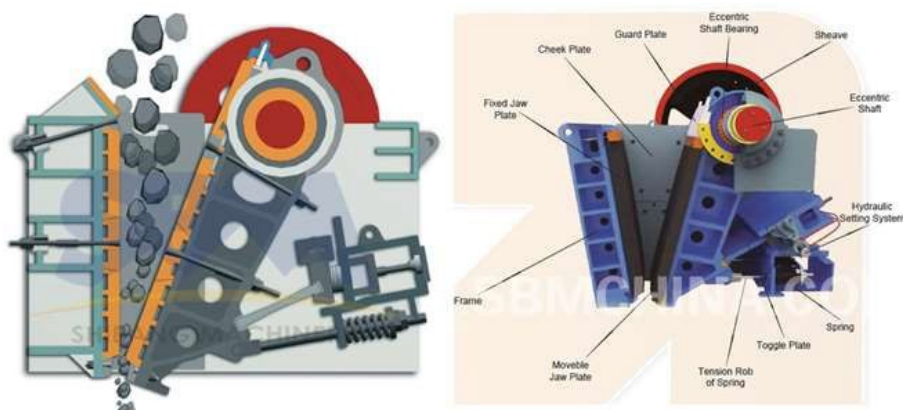
2.4.1. Beneficiamento de Agregados Reciclados

Os RCD podem ser reciclados na forma de agregados reciclados através de um beneficiamento que envolve etapas como triagem, britagem, peneiramento e armazenamento (GRUBBA, 2009).

O processo de produção de agregados reciclados a partir de RCD, segundo Daminieli (2007), segue as seguintes etapas:

- Triagem de RCD na chegada dos mesmos à usina de reciclagem para separação de predominantes cinzas (de origem cimentícia) ou predominantes vermelhos (de origem cerâmica);
- Catação manual para retirada de materiais não-minerais e/ou contaminantes dentre o montante de RCD, cinzas ou vermelhos
- Britagem dos RCD por compressão – britador de mandíbula (Figura 2.18); ou por impacto – britador de impacto (Figura 2.19);
- Eventual retirada de materiais metálicos utilizando um separador magnético;
- Peneiramento dos agregados gerados e divisão dos mesmos em faixas granulométricas específicas.

Figura 2.18 – Esquema de britador de mandíbula



Fonte: Alibaba, [20-].

Figura 2.19 – Esquema de britador de impacto



Fonte: Frank e Sustentabilidade, 2016.

2.4.2. Mercado de Agregados Reciclados

Com o surgimento de novas legislações e diretrizes para a correta gestão e reciclagem de RCD surgiu, em 2011, a Associação Brasileira para a Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON). Em 2015 foi realizada uma pesquisa setorial pela ABRECON que traz informações atualizadas sobre a atividade de reciclagem de resíduos da construção civil.

A maioria das usinas de reciclagem de RCD no Brasil possuem capacidade instalada de produção entre 5.000 e 10.000 m³/mês, no entanto somente 11% atingem

esse patamar. Das empresas que responderam à pesquisa, somente 72% estão operando plenamente. A maior parte das usinas se encontra em cidades de grande porte, porém a presença de 12% das usinas em cidades com população menor que 100.000 habitantes é um indicador de um negócio rentável. A pesquisa mostra que ainda não faz parte da rotina da usina os ensaios técnicos dos materiais produzidos, mas são realizados ensaios mediante preocupação com a qualidade e quando o consumidor exige. Os principais clientes das usinas são as construtoras e os órgãos públicos. Sobre o preço de venda dos agregados reciclados temos cerca de 34% das empresas cobram entre R\$ 20,00 e R\$ 30,00 por m³ e cerca de 32% cobram menos que R\$ 20,00 por m³ (ABRECON, 2017).

Frasson; Filho; Faria (2016) complementam que, para uma mesma obra de pavimentação, o custo de aquisição médio do agregado reciclado foi de 55% do preço médio do agregado natural, pois enquanto o preço médio do agregado reciclado foi de R\$ 31,00/m³, o agregado natural teve um preço médio de R\$ 56,60/m³. Uma análise da composição do pavimento comprovou que a utilização de agregados naturais foi 1,8 vezes maior do que a mesma obra utilizando agregados reciclados.

Em meio a um mercado promissor, porém com um cenário não favorável, a ABRECON (2015) através de sua Pesquisa Setorial mostra como principais causas de dificuldades de venda: a inexistência de uma legislação que incentive o consumo, a elevada carga tributária e a falta de conhecimento sobre o mercado de agregados reciclados. Mas o cenário pode vir a melhorar muito através de medidas como:

uma maior aquisição de agregados reciclados pela iniciativa pública, exigindo o uso prioritário deste no edital de licitação, maior fiscalização do destino do RCD em pequenas e grandes obras, redução de ICMS para agregados reciclados e isenção de IPTU (ABRECON, 2015, p.28).

2.4.3. Agregado Reciclado de Concreto (ARC)

Um dos maiores potenciais de reutilização dentre os tipos de RCD são os dos resíduos de concreto, devido ao conhecimento de suas características base, como resistência e idade, além de possuir um baixo teor de contaminação de materiais, como vidros e borrachas, em comparação a outros tipos de resíduos. A geração destes resíduos de concreto vem geralmente de fábricas de pré-moldados, demolições de

construções e de pavimentos rodoviário de concreto, e de usinas de concreto pré-misturado (GONÇALVES, 2010).

Uma propriedade a ser mencionada do ARC é o efeito de cimentação própria quando aplicado em camadas de base e sub-base. Arm (2001), Blanknagel (2005), Poon et al. (2006) e Grubba (2009) em seus estudos realizaram testes e ensaios de módulo de resiliência e resistência à compressão simples de ARC, nos quais obtiveram como resultado um aumento considerável de ambas propriedades com o tempo, enquanto um agregado natural, também para a mesma aplicação de camadas de base e sub-base, essas mesmas propriedades não tinham alteração com o tempo.

Grubba (2009), sobre o efeito de cimentação própria do ARC, diz que todos os elementos de concreto e argamassa possuem, em seu interior, partículas de cimento que não tiveram contato com água e não se hidrataram, independentemente de sua idade. Ao ser compactado o ARC quebra ligeiramente, possibilitando que essas partículas tenham contato com a umidade de compactação, gerando assim uma cimentação ao longo do tempo.

Nos Estados Unidos, a utilização de ARC para construção de camadas de base de pavimentos é bem grande, sendo que cerca de 85% de todo resíduo de concreto reciclado é aplicado em camadas de base de pavimento, com alguma fração para concretos asfálticos (WILBURN; GOONAN, 1998 apud GRUBBA, 2009).

No Brasil os resíduos de concreto correspondem cerca de 53% de todo o RCD gerado (CARNEIRO et al., 2001 apud GRUBBA, 2009). Sua reutilização como ARC é interessante pois é vantajoso inserir um novo material de construção no mercado, podendo ser aplicados na construção de camadas de base e sub-base de pavimentos como substitutos aos agregados naturais, que possuem custo mais elevado e são recursos naturais não renováveis (GRUBBA, 2009).

3. METODOLOGIA

3.1. MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1. Solo

O solo utilizado foi coletado nas proximidades da Via Expressa (Figura 3.1), no bairro do Cohafuma, sentido Renascença – Ipase, nas coordenadas 2°30'51.4"S 44°16'12.2"W, São Luís, MA (Figura 3.2), com a utilização de pás e enxada, como mostrado na Figura 3.2. A amostra foi transportada até o Laboratório de Solos e Pavimentação (LSP) do Campus Paulo VI da UEMA onde ficou acondicionada em sacos e baldes em um ambiente livre de intempéries e outro tipo de origem de contaminação. Posteriormente o material foi disposto para secagem ao ar livre como ponto de partida para futuros ensaios.

Figura 3.1 – Coleta de solo utilizado neste estudo



Fonte: Autor, 2019.

Figura 3.2 – Local de coleta de solo utilizado neste estudo



Fonte: Google Maps⁴, 2019.

Segundo Soares (2018), este solo é caracterizado como solo arenoso fino laterítico – SALF, de acordo com a classificação MCT (Miniatura, Compactado e Tropical) preconizado por Nogami e Villibor, em 1981.

⁴ Google Maps nas coordenadas 2°30'51.4"S 44°16'12.2"W

3.1.2. Agregado Reciclado de Concreto

O agregado reciclado de concreto (ARC) utilizado nesta pesquisa são provenientes de corpos de prova de concreto rompidos no Laboratório de Concreto e Materiais de Construção (LABCOM) que são descartados na parte externa do mesmo, como visto na Figura 3.3.

Os corpos de prova são moldados e rompidos para teste de resistência à compressão de concreto no LABCOM. Após o teste o corpo de prova rompido perde utilidade e é descartado aos poucos na área externa ao laboratório. Com o tempo, em consequência do descarte de corpos de prova, formou-se um ponto de acúmulo de material, o qual nesta pesquisa é denominado ponto de coleta.

Figura 3.3 – Situação de descarte de corpos de prova de concreto



Fonte: Autor, 2018.

Para garantir a representatividade da amostra foram retirados corpos de prova de diferentes partes do ponto de coleta, com o objetivo de classificar a totalidade da pilha de descarte (Figura 3.4).

Figura 3.4 – Coleta de corpos de prova de diferentes pontos da pilha de descarte



Fonte: Autor, 2019.

Em seguida as amostras foram conduzidas ao LSP onde foram reduzidas a tamanhos de agregados através de quebra manual transformando a amostra em agregados reciclados (Figura 3.5). Tem-se então o tipo de agregado reciclado utilizado nesta pesquisa: o Agregado Reciclado de Corpo de Prova de Concreto (ARCPC).

Figura 3.5 – Amostra coletada (a) e amostra reduzida e quebrada manualmente (b)



Fonte: Autor, 2019.

Normalmente a padronização e controle de quebra deste material deve ser executada através de uma máquina trituradora de entulho, cuja regulagem de tamanho de quebra permite estabelecer uma dimensão máxima do agregado, além de uma ótima velocidade de processamento. Porém na falta desta máquina trituradora, o método utilizado para processamento dos corpos de prova de concreto foi o método manual, utilizando marretas como instrumento de quebra e trituração.

Foram estabelecidas normas para a quebra dos corpos de prova rompidos. Primeiramente utilizou-se dois corpos de prova que receberam golpes de marreta ao longo de sua superfície lateral enquanto são mantidos em posição inclinada. Os golpes foram acompanhados da rotação do corpo de prova, garantindo assim a distribuição dos golpes livres ao longo de toda sua superfície lateral. A quebra dos fragmentos continuou até ser verificada, por análise visual, a inexistência de fragmentos que mantivessem a forma cilíndrica original do corpo de prova, ou seja, até que atingissem formatos parecidos aos de pedras e britas. Tendo como parâmetro esta primeira amostra com dimensão máxima de agregado de 25 mm, o restante do material foi quebrado, utilizando o mesmo procedimento, e em seguida, passou por um peneiramento preliminar utilizando a peneira 1 ½" (38,1 mm) para evitar fragmentos de dimensões maiores que a

estabelecida como parâmetro. Os fragmentos retidos na peneira 1 ½" (38,1 mm) foram separados e golpeados novamente por cerca de 5 minutos, certificando-se da distribuição dos golpes ao longo da amostra. O material golpeado passou novamente na peneira 1 ½" (38,1 mm). Caso ainda existisse algum fragmento que ficou retido, repetiu-se o passo anterior até que todos os fragmentos passassem pela referida peneira. O passo a passo pode ser observado na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Etapas de quebra do material: (a) britamento manual; (b) peneiramento do material britado; (c) seleção de partículas retidas em peneira para novo ciclo de britamento



Fonte: Autor, 2019.

O material reduzido e transformado em agregado reciclado foi guardado no Laboratório de Solos e Pavimentação (LSP) do Campus Paulo VI da UEMA, em um ambiente livre de intempéries e outros tipos de origem de contaminação.

3.2. ENSAIOS REALIZADOS

3.2.1. Solo

3.2.1.1. Composição granulométrica

A determinação da composição granulométrica de solos é baseada na norma DNER-ME 080/94, que fixa o modo de análise granulométrica de solos.

Após o material ter sido seco ao ar o procedimento se inicia ao ser coletada uma amostra e quartejada até que se chegue a um peso de amostra representativa. Para solos argilosos e siltsos é necessária uma amostra de 1500 g e para solos arenosos ou pedregulhosos é necessária uma amostra de 2000 g. Do restante é separada uma amostra de aproximadamente 50 g que passa na peneira de 4,75 mm para determinação de umidade higroscópica, cuja determinação pode ser expressa pela Equação 3.1.

$$h = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde:

h = teor de umidade (%)

P_h = peso do material úmido (g)

P_s = peso do material seco em estufa a 105 °C – 110 °C (g)

Para o ensaio de análise granulométrica toma-se a amostra representativa e em um recipiente com água, afim de desagregar os torrões ainda existentes. A amostra é então passada juntamente com a água de lavagem através das peneiras de 2,0 mm e de 0,075 mm. A peneira de 2,0 mm é utilizada para que não haja sobrecarga por materiais de diâmetro maior na peneira de 0,075 mm, podendo danificar sua malha. Em seguida as amostras retidas são transferidas para um recipiente com água e todo o processo de lavagem através das peneiras se repete até que a água de lavagem esteja limpa.

A amostra de solo retida deve ser seca em estufa a 105 °C – 110 °C até constância de peso. O peneiramento da amostra seca em estufa deve utilizar as peneiras

50 – 38 – 25 – 19 – 9,5 – 4,8 – 2,0 – 1,2 – 0,60 – 0,42 – 0,30 – 0,15 e 0,075 mm, incluindo tampa e fundo.

Após o peneiramento seco, é construída a curva granulométrica, que juntamente com outros ensaios possibilita a classificação do solo utilizado neste estudo.

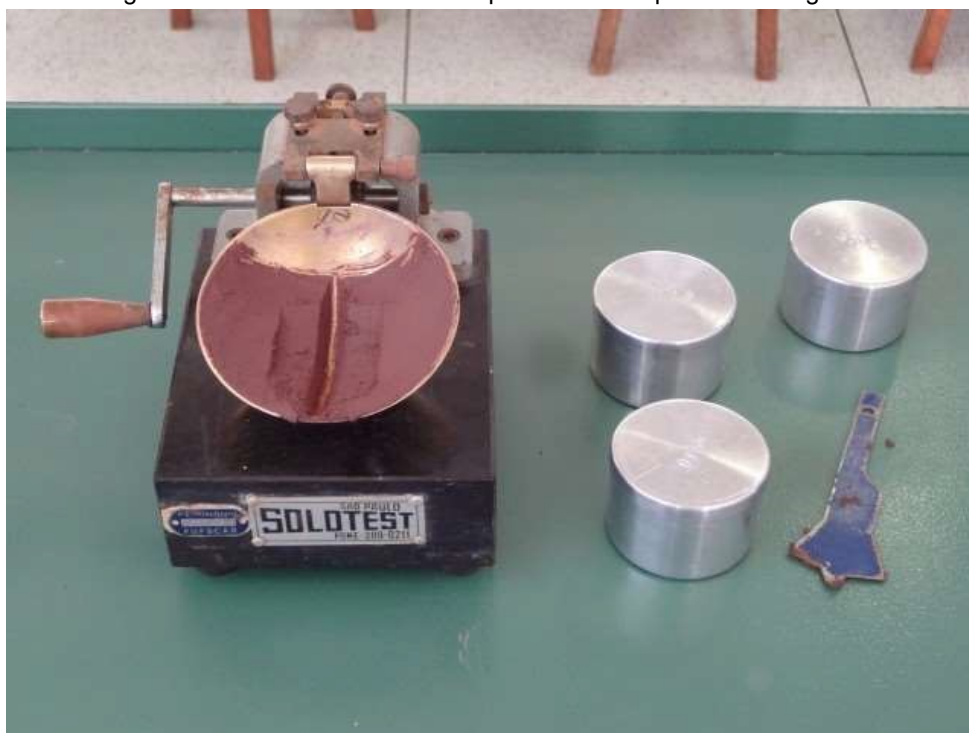
3.2.1.2. Limite de Liquidez

O limite de liquidez (LL) é determinado como a umidade na qual o solo passa do estado plástico para o estado líquido, ou seja, o ponto de umidade em que o solo deixa de ter capacidades de ser moldado (estado plástico) e começa a se comportar como um líquido (DAS, 2007).

A norma DNER-ME 122/94 rege o ensaio de limite de liquidez de solos. Seu procedimento consiste em separar uma amostra de cerca de 70g e colocá-la numa capsula de porcelana e adicionar entre 15 cm³ a 20 cm³ de água destilada e homogeneizar toda a mistura com uma espátula. Novas adições de água devem ser da ordem de 1 cm³ a 3 cm³, homogeneizando até atingir uma massa plástica.

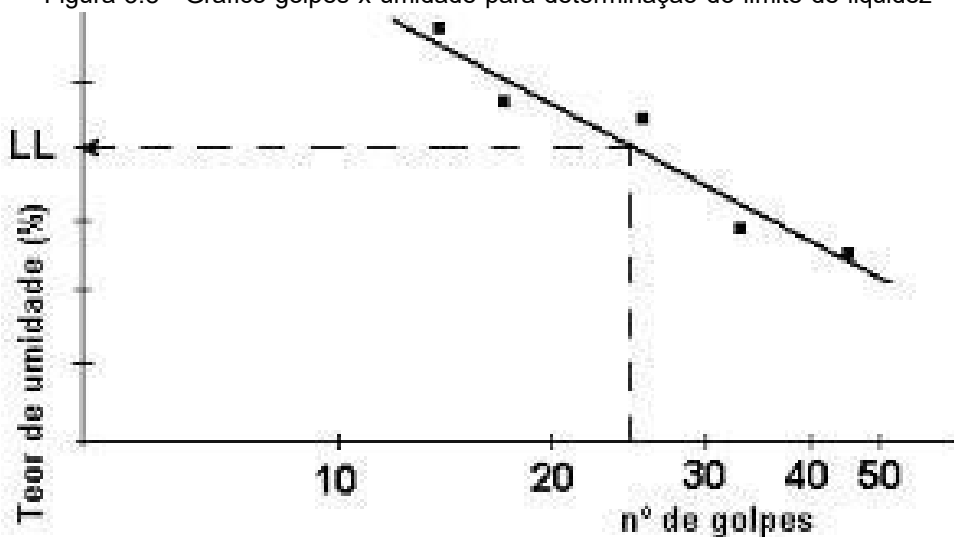
De acordo com essa mesma norma o material homogeneizado e plástico é colocado no aparelho Casagrande, que consiste em uma concha ligada a uma manivela que quando acionada provoca golpes da concha na base do aparelho (Figura 3.7). O material deve ocupar cerca de 2/3 da concha e posteriormente deve ser produzida uma canelura com o auxílio de um cinzel. Após esta abertura ser realizada o aparelho deve ser acionado, produzindo golpes na concha até que pelo menos 1 cm da abertura se una. Anota-se o número de golpes necessária e a umidade na qual os golpes foram realizados. Repete-se ainda mais 3 vezes o procedimento, com adições crescentes de água, afim de encontrar a umidade, através de um gráfico produzido com golpes x umidade, na qual sejam necessários 25 golpes para que a amostra se una na abertura (Figura 3.8).

Figura 3.7 - Ensaio de limite de liquidez com o aparelho Casagrande



Fonte: Laboratório de Geotecnia – UFSCar, [20-].

Figura 3.8 - Gráfico golpes x umidade para determinação do limite de liquidez



Fonte: Cava, 2018.

O limite de liquidez é expresso em teor de umidade, em porcentagem, no valor que coincide com a ordenada de 25 golpes.

Caso não seja possível a abertura da canelura ou seu fechamento com mais de 25 golpes, o solo é tido como não apresentando limite de liquidez. Se o solo apresentar

características muito arenosas, realizar o ensaio do limite de plasticidade (Item 3.2.1.3.) antes do ensaio do limite de liquidez. Se o limite de plasticidade não puder ser determinado, anotar ambos como NP (não plástico).

3.2.1.3. Limite de Plasticidade

O limite de plasticidade (LP) é dado pela umidade na qual o solo passa do estado semissólido para o estado plástico, ou seja, o menor teor de umidade no qual o solo tem comportamento plástico (DAS, 2007).

A norma DNER-ME 082/94 rege o método para determinação do limite de plasticidade. Toma-se cerca de 50 g de solo, colocando a amostra numa cápsula de porcelana, adicionando-se água destilada até o ponto de massa plástica. Separa-se cerca de 20 g da amostra, modelando-a na forma elipsoidal. Rola-se esta massa entre os dedos e a face esmerilhada de uma placa de vidro, afim de moldá-la na forma de um cilindro de espessura constante de cerca de 3 mm (Figura 3.9). Caso a amostra não atinja o formato de cilindro ou se parta antes disso deve-se retornar a amostra para a cápsula de porcelana e proceder com a adição de água. A seguir o cilindro é dividido em seis ou oito pedaços para determinação da sua umidade.

Figura 3.9 - Ensaio de limite de plasticidade



Fonte: Torres Geotecnia, [20-].

O limite de plasticidade é dado pelo teor de umidade no qual é possível a moldagem dos referidos cilindros. O índice de plasticidade (IP) é dado pela diferença numérica entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade. Caso não seja possível a moldagem dos cilindros, o solo é classificado como não plástico (NP).

3.2.1.4. Equivalente de Areia

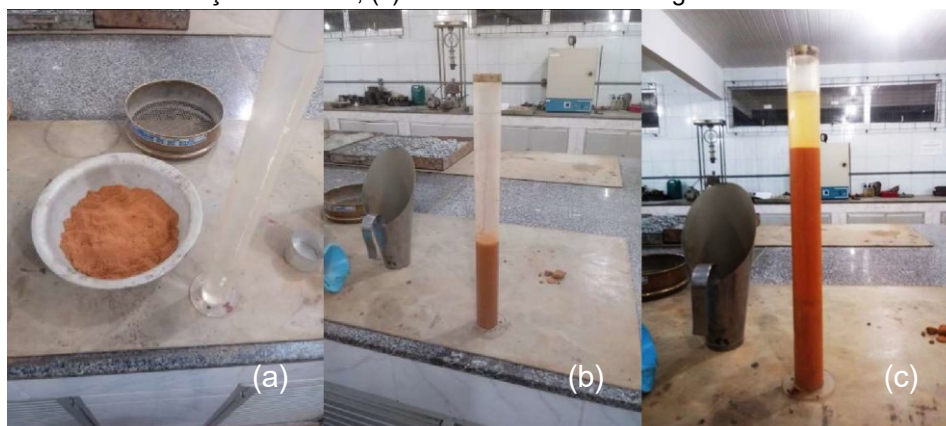
O equivalente de areia é a relação entre a quantidade de areia com relação ao volume total de material.

A norma DNER-ME 054/97, que rege este ensaio, define como equivalente de areia a razão volumétrica entre a altura do nível superior de areia e a altura do nível superior de suspensão argilosa de uma determinada quantidade de solo.

A amostra de ensaio é obtida com o solo passante na peneira 4,8 mm. Coloca-se a solução de equivalente de areia na proveta de ensaio até atingir uma altura da base de 10 cm. Em seguida, com o auxílio de um funil, transfere-se a amostra do conteúdo de

um recipiente de medida cheio e rasado na superfície para a proveta com a solução. Bater no fundo da proveta para promover o desprendimento de bolhas de ar e a molhar a amostra. Deixar a proveta em repouso durante 10 minutos. Após este tempo, a proveta deve ser tampada e agitada vigorosamente, com movimento alternado e na horizontal. Devem ser performados 90 ciclos num intervalo de 30 segundos. Em seguida procede-se com mais solução de equivalente de areia na proveta para preenchimento até atingir a marcação superior (38 cm). Deixa-se repousar por 20 min sem perturbação alguma. As etapas do ensaio podem ser vistas na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Etapas da determinação do equivalente de areia: (a) amostra de solo; (b) mistura de solução+amostra; (c) leitura das alturas de argila e areia.



Fonte: Autor, 2019.

Finalizados os 20 minutos, determina-se o nível superior da mistura argilosa. Para a altura da areia deve ser introduzido um pistão cuidadosamente na proveta até atingir e assentar na camada de areia. Girar com cuidado até que um dos parafusos de ajustagem se torne visível. Por fim, determina-se então a altura do nível superior da areia.

O equivalente de areia é calculado através da Equação 3.2:

$$EA = \frac{\text{Leitura no topo da areia}}{\text{Leitura no topo da argila}} \times 100 \quad (3.2)$$

O resultado é expresso em porcentagem, arredondando-se para o número inteiro.

3.2.2. Agregado Reciclado de Corpo de Prova de Concreto

3.2.2.1. Composição Granulométrica

A análise granulométrica do ARPCPC foi feita através de peneiramento baseado na NBR NM 248/2001, que determina a composição granulométrica de agregados miúdos e graúdos.

Neste ensaio foram usadas as peneiras da série normal e algumas intermediárias previstas em norma, sendo elas: 37,5; 25; 19, 12,5; 9,5; 6,3; 4,75; 2,36; 1,18; 0,60; 0,30 e 0,15 mm, como observado na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Peneiras utilizadas no peneiramento



Fonte: Autor, 2019.

O ensaio foi executado através da agitação das peneiras de aberturas de malhas colocadas em ordem crescente de baixo para cima, e adicionando um fundo e uma tampa para não haver perda de material no conjunto, de modo a promover uma

separação efetiva do material nas diferentes dimensões que o compõe, anotando-se a fração que fica retida em cada peneira com relação ao peso da amostra total. As frações retidas em cada peneira podem ser melhor visualizadas na Figura 3.12.

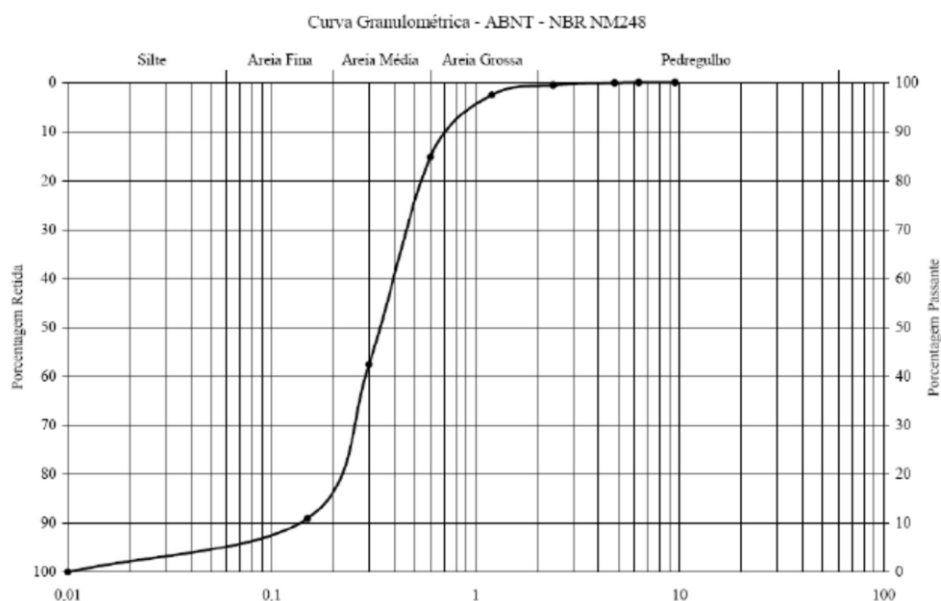
Figura 3.12 – Amostra separada em frações granulométricas



Fonte: Autor, 2019.

Após o peneiramento é possível analisar a granulometria do agregado através de uma curva granulométrica que é disposta num gráfico onde o eixo horizontal é representado pelas dimensões das partículas do agregado em escala logarítmica e o eixo vertical representa a porcentagem de agregado que passa em cada peneira, como mostra a Figura 3.13, com um exemplo de uma curva granulométrica.

Figura 3.13 – Exemplo de curva granulométrica



Fonte: ABNT, 2003.

Finalmente, através da curva granulométrica, é possível determinar a classificação do material através de dois coeficientes. O coeficiente de uniformidade (C_u) determina se o material é uniforme ou desuniforme e o coeficiente de curvatura (C_c) que determina se o material é bem graduado ou mal graduado. Pode-se calcular os coeficientes C_u e C_c através das Equações 3.3 e 3.4.

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3.3)$$

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} \times d_{10}} \quad (3.4)$$

Onde:

d_{10} , d_{30} e d_{60} = diâmetro do material do qual 10%, 30% ou 60% da amostra em peso é menor que este diâmetro, respectivamente, sendo:

$C_u < 5$ – muito uniforme

$5 < C_u < 15$ – uniformidade média

$C_u > 15$ – não uniforme

$1 < C_c < 3$ – bem graduado

$C_c < 1$ ou $C_c > 3$ – mal graduado

3.2.2.2. Dimensão Máxima Característica

A dimensão máxima característica é determinada, segundo a NBR NM 248/2001, pela dimensão da peneira onde a porcentagem de material retido acumulado é igual ou imediatamente inferior a 5%. Após o ensaio de Composição Granulométrica é possível observar qual peneira o material apresentou a porcentagem retida prevista em norma e, desta forma, estabelecer a dimensão máxima característica.

3.2.2.3. Índice de Forma

Para a determinação do índice de forma foi utilizada a NBR 7809/83, que apresenta o método do paquímetro.

O índice de forma do agregado é a média da relação entre seu comprimento e a espessuras dos grãos do agregado, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica que o compõe. (ABNT, 1983).

A amostra deve ser analisada granulometricamente, desprezando-se as frações passantes na peneira de 9,5 mm e as frações cujas porcentagens retidas individuais sejam inferiores a 5% (Figura 3.14).

Figura 3.14 – Frações da amostra utilizadas no ensaio do índice de forma



Fonte: Autor, 2019.

De modo geral são necessários 200 grãos para o ensaio, onde serão escolhidos, dentre o material retido de cada peneira, um determinado número de grãos ponderado pela porcentagem retida individual em cada fração, mostrada na Equação 3.5.

$$N_i = \frac{200}{F_1 + F_2 + \dots + F_i + \dots + F_n} \times F_i \quad (3.5)$$

Onde:

200 - número de necessários para o ensaio

N_i - número de grãos para medição, da fração i

F_i - porcentagem em massa retida individual correspondente à fração i

$F_1 + F_2 + \dots + F_i + \dots + F_n$ - soma das porcentagens em peso retidas individuais das frações obtidas

A amostra de cada fração deve ser quarteada até atingir o número de grãos previamente determinado, como mostrado na Figura 3.12.

Figura 3.15 – Quarteamento de frações retidas



Fonte: Autor, 2019.

A medição dos grãos é realizada com a utilização do paquímetro, como visto na Figura 3.13. São medidos o comprimento “ c ” e a espessura “ e ” de cada um dos grãos obtidos, sendo o comprimento a maior dimensão possível do grão e a espessura a menor distância possível entre planos paralelos entre si e na direção do comprimento do grão.

Figura 3.16 – Medição de grãos com a utilização do paquímetro



Fonte: Autor, 2019.

O resultado é calculado pela média das relações entre o comprimento e a espessura, visto na Equação 3.6.

$$\frac{"c"}{"e"} \quad (3.6)$$

3.2.2.4. Absorção e Densidade

Segundo definições da norma DNER-ME 081/98, absorção é o aumento da massa de agregado devido ao preenchimento dos seus vazios através de água, em porcentagem, com relação à massa seca. Já a densidade aparente é a razão entre o peso ao ar e ao volume de água ocupada por esse mesmo peso de um material.

O estudo de absorção e densidade do ARCPC toma, neste estudo, uma atenção importante.

“Sua determinação [absorção] pode ser considerada como uma quantificação indireta da porosidade, da resistência mecânica e da durabilidade de corpos porosos, uma vez que a ciência dos materiais correlaciona estas grandezas” (CALLISTER, 2000; VAN VLACK, 1970 apud DAMINELI, 2007, p.8).

Tanto a absorção e a densidade aparente estão relacionadas à estrutura porosa permeável do corpo, ou seja, sua porosidade. Sabendo que a porosidade é inversamente proporcional à resistência mecânica de um sólido, determinar a porosidade, em outras palavras sua absorção e densidade, é um controle eficaz do comportamento mecânico do material (DAMINELI, 2007).

Para o ensaio de determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo foi utilizada a norma DNER-ME 081/98, onde é indicado que a amostra deve desprezar o material passante na peneira 4,8 mm, a não ser que o material passante nesta peneira seja maior que 2% ou se o material apresentar alterações mineralógicas. Neste caso o material menor que 4,8 mm deve ser ensaiado com a norma DNER-ME 194/98, que será explicado no próximo subitem.

Após a massa mínima de amostra ser separada de acordo com a dimensão máxima característica do agregado reciclado, esta foi lavada utilizando a peneira 4,8 mm. Em seguida foi seca até constância de massa numa temperatura entre 105 °C e 110 °C e resfriada ao ar durante um período de 1 h a 3 h, de modo a permitir sua manipulação, em torno de 50 °C. Seguiu-se o ensaio onde imergiu-se o material em água, à temperatura ambiente por um período de 24 ± 4 h, sendo necessário agitar algumas vezes para expulsar bolhas de ar que possam estar presentes (Figura 3.17).

Figura 3.17 – Amostra submersa em ensaio de absorção



Fonte: Autor, 2019.

Após o período imerso a amostra é removida da água e espalhada sobre um pano absorvente, de modo a eliminar películas de água visíveis. A amostra deve ser enxugada cuidadosamente para evitar qualquer perda de massa ou evaporação de água dos poros na superfície dos grãos. Após enxuta, a amostra deve ser pesada e registrada a sua massa na condição saturada superfície seca (M_h).

Em seguida deve ser colocado o material num recipiente para amostra e imergir completamente em água potável à temperatura ambiente. Deve ser medido o peso na balança do agregado submerso (L), com a balança zerada com o recipiente da amostra vazio e imerso em água.

Após esse procedimento a amostra deve ser seca em estufa à temperatura entre 105 °C e 110 °C. Em seguida, ao atingir uma temperatura para manipulação, a amostra deve ser pesada e assim determinar sua massa seca (M_s).

Por fim, para a determinação da absorção e densidade aparente do ARCPC são utilizadas as Equações 3.7 e 3.8.

$$D_{ap} = \frac{M_s}{M_h - L} \quad (3.7)$$

$$a = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (3.8)$$

Onde:

D_{ap} = densidade aparente

a = absorção do agregado, em porcentagem

M_s = massa, ao ar, do agregado seco em estufa, em g

M_h = massa, ao ar, do agregado na condição saturada superfície seca, em g

L = leitura na balança correspondente ao agregado submerso, em g

3.2.2.5. Massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman

De acordo com a norma DNER-ME 194/98, faz-se necessário determinar a massa específica da fração miúda do ARCPC sempre que o material que passa na peneira 4,8 mm for superior a 2%.

Inicialmente a amostra deve ser seca em estufa até constância de massa, numa temperatura entre 105 °C e 110 °C.

Este ensaio foi realizado utilizando o frasco de Chapman, que é um frasco de vidro composto de dois bulbos e um gargalo graduado, possuindo um traço correspondente a 200 cm³ entre os dois bulbos, conforme a Figura 3.18.

Figura 3.18 – Frasco de Chapman e fração miúda do agregado



Fonte: Autor, 2019.

Deve ser colocada água no frasco até a marca de 200 cm³, deixando o mesmo em repouso para que a água aderida as faces internas escorram completamente. A seguir deve ser introduzida uma amostra seca de 500 g no frasco (Figura 3.19), tomando cuidado e agitando para a eliminação das bolhas de ar.

Figura 3.19 – Fração miúda do agregado em ensaio no frasco de Chapman



Fonte: Autor, 2019.

Por fim obtém-se o nível atingido pela água no gargalo do frasco, sendo o volume, em cm^3 , do conjunto agregado miúdo-água. A massa específica do agregado miúdo é determinada pela Equação 3.9.

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (3.9)$$

Onde:

γ – massa específica do agregado miúdo (g/cm^3);

L – leitura do nível final atingido pela água.

3.2.2.6. Abrasão Los Angeles

A Abrasão Los Angeles é uma medida preliminar da resistência do agregado graúdo à degradação por abrasão e impacto (MARQUES, 2006).

A norma DNER-ME 035/98 descreve o método de ensaio da abrasão Los Angeles a ser executado, onde o agregado é submetido a um certo número de revoluções da máquina “Los Angeles”, juntamente com uma carga abrasiva sob a forma de esferas de aço, a uma velocidade de 30 rpm a 33 rpm (Figura 3.20).

Figura 3.20 – Determinação da carga abrasiva pela graduação escolhida no ensaio de abrasão Los Angeles

Graduação	Número de esferas	Massa de carga (g)
A	12	5.000 ± 25
B	11	4.584 ± 25
C	8	3.330 ± 20
D	6	2.500 ± 15
E	12	5.000 ± 25
F	12	5.000 ± 25
G	12	5.000 ± 25

Fonte: ABNT, 1998.

A amostra de ensaio deve ser escolhida de acordo com a graduação mais próxima a ser utilizada em campo (Figura 3.21).

Figura 3.21 - Escolha de graduação e nº de rotações do tambor para o ensaio de abrasão Los Angeles

Peneiras Abertura em mm		Amostra - massa parcial em gramas						
Passando em	Retido em	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76	63	—	—	—	—	2500 ± 50	—	—
63	50	—	—	—	—	2500 ± 50	—	—
50	38	—	—	—	—	5000 ± 50	5000 ± 50	—
38	25	1250 ± 25	—	—	—	—	5000 ± 25	5000 ± 25
25	19	1250 ± 25	—	—	—	—	—	5000 ± 25
19	12,5	1250 ± 10	2500 ± 10	—	—	—	—	—
12,5	9,5	1250 ± 10	2500 ± 10	—	—	—	—	—
9,5	6,3	—	—	2500 ± 10	—	—	—	—
6,3	4,8	—	—	2500 ± 10	—	—	—	—
4,8	2,4	—	—	—	5000 ± 10	—	—	—
Massas totais em gramas		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	10000 ± 100	10000 ± 75	10000 ± 50
Nº de rotações do tambor		500	500	500	500	1000	1000	1000

Fonte: ABNT, 1998.

Fixada a granulometria a amostra é lavada e seca em estufa com temperatura entre 105 °C e 110 °C, até atingir constância de peso. Em seguida o agregado é peneirado e quarteado até atingir a massa exigida por cada peneira na graduação escolhida, como visto na Figura 3.22, pesando-se então a amostra seca antes do ensaio (m_n).

Figura 3.22 – Amostra utilizada em ensaio de abrasão Los Angeles e carga abrasiva



Fonte: Autor, 2019.

A amostra é colocada dentro do tambor cilíndrico da máquina o agregado para ensaio junto com a carga abrasiva e, em seguida, o tambor é fechado. Durante o ensaio a máquina “Los Angeles” realiza um número de rotações baseado na graduação previamente escolhida, como pode ser visto na Figura 3.23.

Figura 3.23 – Ensaio de abrasão Los Angeles



Fonte: Autor, 2019.

Após completar o ciclo de rotações o material é retirado da máquina, é em seguida passada na peneira 1,7 mm. Para garantir que não tenha restado partículas indesejáveis a amostra retida é lavada na própria peneira 1,7 mm e em seguida colocada para secagem em estufa com temperatura entre 105 °C e 110 °C.

Após o material ser retirado da estufa, espera-se até atingir uma temperatura que permita manuseio e é determinada a massa da amostra lavada seca (m'_n).

O desgaste sofrido é a porcentagem em peso do material que passa na peneira 1,7 mm após o ensaio, sendo calculado pela Equação 3.10.

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100 \quad (3.10)$$

Onde:

A_n = abrasão Los Angeles da graduação n , em porcentagem

n = graduação escolhida para o ensaio, podendo ser A, B, C, D, E, F ou G

m_n = massa total da amostra seca colocada na máquina

m'_n = massa da amostra lavada e seca após o ensaio, que fica retida na peneira 1,7 mm

3.2.3. Misturas

Com as características e composições dos materiais já definidos, foram estudadas condições de misturas em diferentes proporções (traços), visando um potencial de aplicação para camadas de base e/ou sub-base.

3.2.3.1. Estudo de traços – Composição granulométrica

Para definir os traços das misturas a serem estudados nesta pesquisa, realizou-se inicialmente uma análise computacional, na qual foram dispostas as composições granulométricas do ARCPC e do solo, em proporções distintas de cada material afim de gerar uma curva granulométrica de cada uma. Foram analisados 21 traços com variações de 5% (de 0% até 100%) (Tabela 3.1) em proporção, verificando se a composição granulométrica gerada atendia, em primeiro lugar, as faixas granulométricas para base segundo a norma DNIT 141/2010-ES (Figura 3.24). Não havendo o ajuste adequado da mistura nas faixas granulométricas para base, o traço foi automaticamente destinado ao estudo de sub-base.

Tabela 3.1 – Misturas analisadas nesta pesquisa

% de material	
ARCPC	Solo
0	100
5	95
10	90
15	85
20	80
25	75
30	70
35	65
40	60
45	55
50	50
55	45
60	40
65	35
70	30
75	25
80	20
85	15
90	10
95	5
100	0

Fonte: Autor, 2019.

Figura 3.24 – Faixas granulométricas para camada de base

Tipos	Para $N > 5 \times 10^5$				Para $N < 5 \times 10^5$		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, 2010.

As faixas granulométricas para base, segundo a norma DNIT 141/2010-ES, possuem limites de tolerância de projeto para cada fração, como visto na Figura 3.24. Nesta pesquisa as faixas granulométricas utilizadas para estudo de traços são as referentes às tolerâncias de faixa permitidas em norma.

3.2.3.2. Ensaio de Compactação Proctor Intermediário

A compactação é o aumento de densidade de um solo ou mistura através da remoção de ar, aplicando energia mecânica. Ao ser adicionada água à mistura, as partículas do solo tendem a deslizarem entre si e se posicionam numa formação compacta de alta densidade (DAS, 2007).

A norma DNER-ME 162/94 estabelece o método de determinação da correlação entre o teor de umidade e sua massa específica aparente seca quando o solo passante na peneira 19 mm é compactado utilizando amostras trabalhadas.

Por conta da quantidade de material disponível para o ensaio, foi escolhido o ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas, pois este método utiliza somente uma amostra durante todo o ensaio, enquanto que o ensaio de compactação utilizando amostras não trabalhadas utiliza, no mínimo, cinco amostras.

A amostra é utilizada sendo seca ao ar, reduzida e homogeneizada pelo repartidor de amostras. A norma estabelece uma amostra de cerca de 6 kg para solos siltosos ou argilosos e de cerca de 7 kg para solos arenosos ou pedregulhosos. Neste ensaio foram selecionados 7 kg devido ao solo apresentar características arenosas.

Em seguida a amostra é passada na peneira de 19 mm. Havendo material retido nesta peneira deve ser substituído, em peso, por uma quantidade igual de material passante na 19 mm e retido na 4,8 mm. Sendo então selecionada a amostra de 7 kg dentro do determinado pela norma, procede-se ao ensaio.

O ensaio consiste em adicionar uma porção de água à amostra, cerca de 2% do peso total, misturando bem para garantir homogeneidade e boa distribuição de umidade. Caso 2% de adição de água se mostre insuficiente para dar liga ao material, ou seja, se o material ainda se apresentar muito seco ou arenoso, aconselha-se a adicionar uma fração superior de água para oferecer boas condições de mistura. Após a mistura e homogeneização executadas é tomado uma porção desta amostra com um recipiente para garantir a padronização da quantidade de cada porção e é colocado em um cilindro para compactação de 150 mm de diâmetro e 125 mm de altura, com a instalação de um anel de extensão complementar de 50 mm de altura e uma disco espaçador como fundo falso. A porção então recebe golpes de um soquete metálico cilíndrico de dimensões e peso pré-determinados assim como a altura do golpe (Figura 3.25). São executadas cinco camadas 5 camadas de igual quantidade utilizando as etapas citadas.

Figura 3.25 – Execução de compactação de camadas



Fonte: Autor, 2019.

A quantidade de golpes a serem executados depende da energia de compactação solicitada de estudo. A energia normal aplica 12 golpes por camada, a energia intermediária aplica 26 golpes por camada e a energia modificada aplica 55 golpes por camada (DNER-ME 162/94). Para este ensaio foi utilizada a energia intermediária por ser o tipo de energia indicado para camadas de base de pavimentação.

Durante a execução do ensaio é retirada uma porção de material passante na peneira de nº 10 (4,75 mm) da amostra de ensaio, após a compactação da terceira camada, para determinação da umidade na qual aquele ponto está sendo compactado.

Após o fim da compactação das 5 camadas é determinado o peso do corpo de prova (Figura 3.26) compactado e em seguida ele é desmanchado. Adiciona-se água novamente na fração de 2% da amostra total e homogeneiza-se a mesma. Repetir todo o processo quantas vezes necessárias para a caracterização da curva de compactação, o que geralmente ocorre quando a pesagem do corpo de prova de certo ponto começa a decair com relação ao ponto anterior de compactação.

Figura 3.26 – Corpo de prova gerado durante o ensaio de compactação

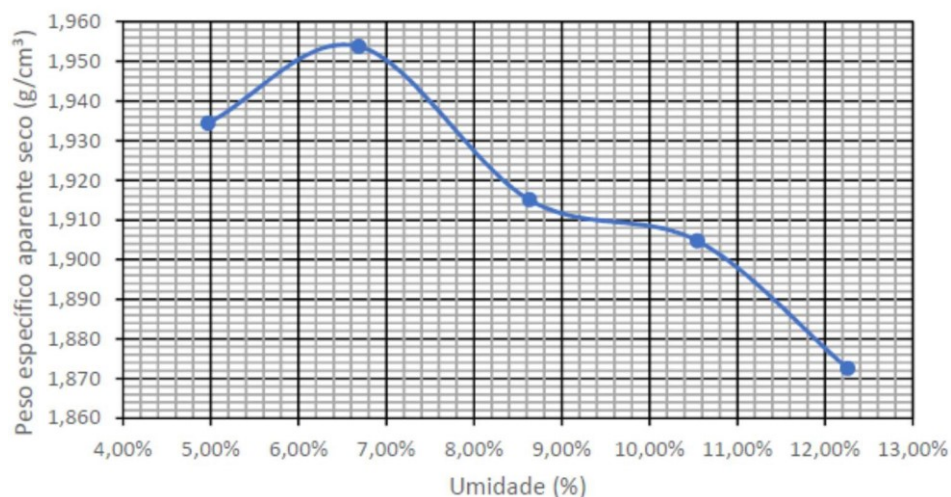


Fonte: Autor, 2019.

Por fim, é construído um gráfico de umidade (%) x peso específico aparente seco (Figura 3.27) utilizando as Equações 3.11, 3.12 e 3.13.

Figura 3.27 – Exemplo de curva de compactação⁵

Mistura S100



Fonte: Matos, 2018.

$$h = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad (3.11)$$

$$\gamma_h = \frac{P_h}{V} \quad (3.12)$$

$$\gamma_s = \gamma_h \times \frac{100}{100 + h} \quad (3.13)$$

Onde:

- h - Teor de umidade em percentagem do solo compactado (%);
- P_u - Peso da amostra úmida (g);
- P_s - Peso da amostra seca em estufa na temperatura de 110 °C ± 5 °C (g);
- γ_h - Massa específica aparente do solo úmido (g/cm³);
- P_h - Peso do solo úmido compactado (g);
- V - Volume do solo úmido compactado (cm³);
- γ_s - Massa específica aparente do solo seco (g/cm³).

⁵ Curva de compactação de uma mistura com 100% de solo, executada por Matos (2008, p.104).

3.2.3.3. Índice de Suporte Califórnia

Segundo Leite (2001), o Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou como é mais comumente conhecido por *Califórnia Bearing Ratio* (CBR) é um ensaio bastante utilizado no meio rodoviário. Através dele é possível dimensionar pavimentos através de métodos empíricos.

O ensaio é caracterizado pela pressão necessária de um pistão aplicado a um corpo de prova compactado na umidade ótima, como explicado no item anterior, para penetrar certa profundidade deste mesmo corpo de prova. É produzida uma relação, em porcentagem, dos dados obtidos com os dados obtidos de uma amostra padrão (DNIT, 2006).

Bernucci et al. (2006, p.342), complementa:

A resistência no ensaio ISC é uma resposta que combina indiretamente a coesão com o ângulo de atrito do material. O ISC é expresso em porcentagem, sendo definido como a relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo-de-prova de solo ou material granular e a pressão necessária para produzir a mesma penetração no material padrão referencial.

O ensaio realizado nesta pesquisa segue as etapas descritas por Bernucci et al. (2006, p.343-344) que por sua vez se baseiam na norma DNER 049/94.

Primeiramente o material foi passado na peneira de 19 mm e em seguida compactado na umidade ótima encontrada no ensaio de compactação visto no item anterior, novamente com 5 camadas.

Após a compactação do corpo de prova na umidade ótima o mesmo é colocado em imersão total por um período de 4 dias, com uma sobrecarga-padrão de cerca de 10 libras, que simula um pavimento de 2,5 polegadas de pavimento sobre o material e é posicionado um extensômetro para medição da expansão axial do material, como pode ser visualizado na Figura 3.28 (BERNUCCI et al., 2006).

Figura 3.28 – Amostra compactada no molde cilíndrico em imersão e aferição da expansão



Fonte: Autor, 2019.

Após período imerso o corpo de prova é submetido a uma penetração através de um pistão automatizado, com velocidade de penetração constante (Figuras 3.29 e 3.30). Através desta penetração é possível verificar a pressão necessária para atingir cada profundidade atingida. Com estes dados obtidos é traçada uma curva pressão x penetração, de onde obtém-se os valores encontrados de pressão para as marcas de 2,54 mm (0,1 pol.) e 5,08 mm (0,2 pol.).

Figura 3.29 – Posicionamento de corpo de prova e execução de ensaio CBR



Fonte: Autor, 2019.

Figura 3.30 – Execução de Ensaio CBR



Fonte: Autor, 2019.

Os valores encontrados de pressão nas penetrações mencionadas são relacionados, em porcentagem, com os valores padrão referenciais (2,54 mm – 70,31 kgf/cm²; 5,08 – 105,46 kgf/cm²). O valor final de CBR encontrado da amostra será o maior entre as duas porcentagens encontradas. Caso a porcentagem encontrada para 2,54 mm seja maior que a encontrada para 5,08 é necessário que haja um estudo mais detalhado da amostra e o ensaio precisa ser refeito.

3.2.3.4. Índice de Degradação de Ruiz

O índice de degradação (ID) utilizado neste estudo baseia-se nos estudos de Buzatti (1984 apud VALLE, 1994) que utiliza como parâmetro o índice de degradação de Ruiz.

Este método de análise de degradação proposto por Ruiz pode ser usado como complemento do ensaio de abrasão Los Angeles. Caso os agregados possuam uma boa qualidade de abrasão Los Angeles e possuam um ID elevado, esta informação seria útil para racionalizar o uso de equipamentos de compactação, evitando assim o desgaste excessivo do agregado e sua alteração granulométrica (VALLE, 1994).

A realização deste ensaio consiste em analisar a composição granulométrica de amostras antes e após a compactação, na energia do ensaio, que nesta pesquisa foi utilizada a intermediária. Com a variação da curva granulométrica em cada peneira é determinado o índice de degradação Ruiz pela Equação 3.14.

$$ID = \frac{\sum \Delta i}{n} \quad (3.14)$$

Onde:

ID = índice de degradação de Ruiz;

Δi = deslocamento na curva granulométrica em cada abertura (antes e após compactação);

n = número de peneiras utilizadas no ensaio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ENSAIOS REALIZADOS

4.1.1. Solo

4.1.1.1. Composição Granulométrica

O resultado da composição granulométrica do solo utilizado neste estudo fornece, pela norma DNER-ME 080/94, a umidade higroscópica (Tabela 4.1) e a curva granulométrica do solo (Gráfico 4.1). Como houve um dia chuvoso durante a medição da umidade higroscópica, foi realizado novamente a medição no dia seguinte, para comparação entre o dia chuvoso e o dia sem chuva.

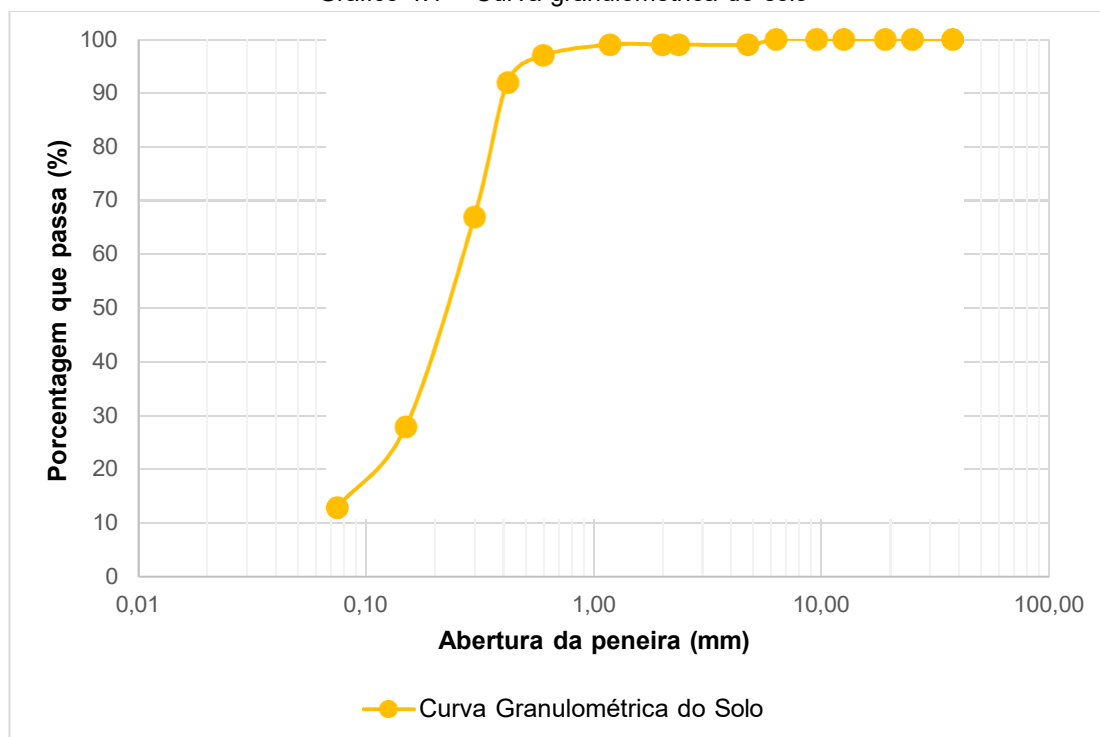
Tabela 4.1 – Umidades coletadas de diferentes pontos da do solo

Umidade higroscópica – 04/04/2019 (Dia chuvoso)	Umidade higroscópica – 05/04/2019 (Dia sem chuva)
Umidades medidas (%)	Umidades medidas (%)
3,94	2,43
3,13	2,64
3,16	3,06
3,88	2,9
Umidade média (%)	Umidade média (%)
3,53	2,76

Fonte: Autor, 2019.

A partir desta análise observou-se que o peso do solo seco ao ar sofreu alterações para o dia chuvoso e não chuvoso, assim entende-se que a umidade do ar durante o dia chuvoso influenciou também na umidade higroscópica do solo, que possui importância de estudo para sua influência na umidade ótima da mistura à qual será aplicada.

Gráfico 4.1 – Curva granulométrica do solo



Fonte: Autor, 2019.

4.1.1.2. Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade

Durante o ensaio de limite de plasticidade não foi possível moldar os cilindros conforme a norma DNER-ME 082/94, situação na qual a mesma determina que se o limite de plasticidade não puder ser determinado, ambos, os limites de liquidez e de plasticidade, são tidos como NP (não plástico). Os resultados encontram-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resultados do limite de plasticidade e do limite de liquidez

Resultados do Solo			Limites da norma	
LP (%)	LL (%)	IP (%)	LP (%)	IP (%)
NP	NP	NP	≤ 25%	≤ 6%

Fonte: Autor, 2019.

A norma DNIT 141/2010-ES estabelece para material a ser usado como base que o limite de liquidez deve ser menor ou igual a 25% e o índice de plasticidade

(diferença numérica entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade) deve ser menor ou igual a 6%. Os resultados obtidos estão dentro da norma, visto que não apresentaram plasticidade (NP). A norma DNIT 139/2010-ES não possui especificações para limites de plasticidade ou liquidez para uso de material para sub-base.

4.1.1.3. Equivalente de Areia

Os resultados de equivalente de areia obtidos conforme a norma DNER-ME 054/97 se encontram na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resultado do ensaio de equivalente de areia

Resultados do Solo			Limite da norma DNIT 141/2010-ES
H1 (cm)	H2 (cm)	EA (%)	EA (%)
33,9	6,8	20	> 30%

Fonte: Autor, 2019.

A norma DNIT 141/2010-ES estabelece que o equivalente de areia seja maior que 30%, se os limites de plasticidade e liquidez forem ultrapassados. Como o solo teve um resultado não plástico, não havendo ultrapassagem de limites de plasticidade ou liquidez, o equivalente de areia não se torna, neste caso, uma característica limitante de utilização para base. A norma DNIT 139/2010 não possui especificações de equivalente de areia para uso de material para sub-base.

4.1.2. Agregado Reciclado de Corpo de Prova de Concreto (ARCPC)

4.1.2.1. Composição Granulométrica

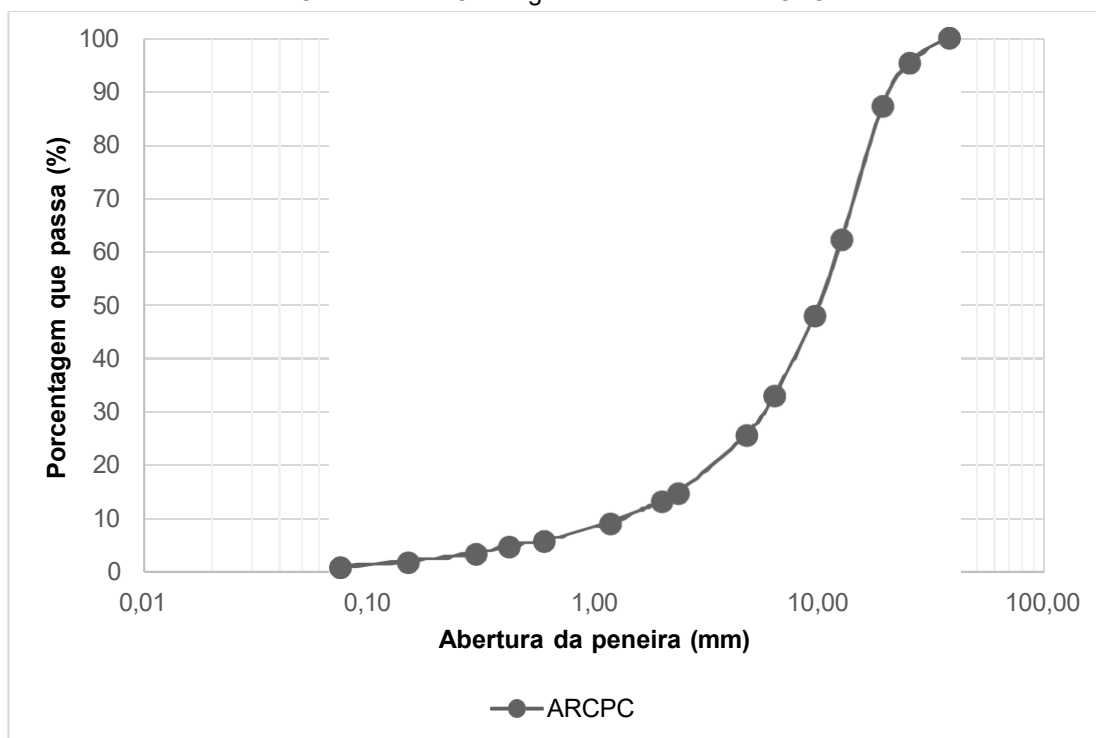
Através do método da norma NBR NM 248:2003, a determinação da composição granulométrica é demonstrada na Tabela 4.4 com a porcentagem que passa em cada peneira e no Gráfico 4.2 com a curva granulométrica do ARCPC.

Tabela 4.4 – Abertura das peneiras e porcentagens passantes do ARCPC

Peneira	Abertura da peneira (mm)	Porcentagem que passa (%)
1½"	37,50	100
1"	25,00	95
¾"	19,00	87
½"	12,50	62
3/8"	9,50	48
1/4"	6,30	33
Nº 4	4,75	26
Nº 8	2,36	15
Nº 10	2,00	13
Nº 16	1,18	9
Nº 30	0,60	6
Nº 40	0,42	5
Nº 50	0,30	3
Nº 100	0,15	2
Nº 200	0,075	1

Fonte: Autor, 2019.

Gráfico 4.2 – Curva granulométrica do ARCPC



Fonte: Autor, 2019.

4.1.2.2. Dimensão Máxima Característica

As porcentagens retidas em cada peneira são dispostas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Porcentagens retidas para determinação da dimensão máxima

Peneiras	Abertura da peneira (mm)	Porcentagem retida (%)
1½"	37,50	0
1"	25,00	5
¾"	19,00	8
½"	12,50	25
3/8"	9,50	14
¼"	6,30	15
Nº 4	4,75	7
Nº 8	2,36	11
Nº 10	2,00	1
Nº 16	1,18	4
Nº 30	0,60	3
Nº 40	0,42	1
Nº 50	0,30	1
Nº 100	0,15	2
Nº 200	0,075	1

Fonte: Autor, 2019.

A norma NBR 15116:2004 determina como requisito de aplicação de agregado reciclado a dimensão máxima menor ou igual a 63 mm. A primeira peneira a atingir a porcentagem de 5% ou imediatamente inferior, em destaque na tabela, foi a peneira de 25,00 mm. A dimensão máxima desta amostra de ARCPC é de 25 mm (Tabela 4.6), satisfazendo os requisitos da norma.

Tabela 4.6 – Resultado da dimensão máxima ($D_{m\acute{a}x}$) do ARCPC

$D_{m\acute{a}x}$ ARCPC	$D_{m\acute{a}x}$ NBR 15116:2004
25,00 mm	≤ 63 mm

Fonte: Autor, 2019.

4.1.2.3. Índice de Forma

A norma NBR 7809/83 prescreve o método pra determinação do índice de forma do ARCPC. O cálculo do número de partículas a serem utilizadas é demonstrado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Quantidade ponderada de partículas de cada fração

Abertura da peneira (mm)	% retida	N° de Partículas
25	5	18
19	8	31
12,5	25	96
9,5	14	55
Soma Fi	52	200

Fonte: Autor, 2019.

O resultado obtido através das médias das relações c/e de cada partícula, que define o índice de forma, está demonstrado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Resultado do índice de forma

Resultado ARCPC	NBR 15116:2004
Índice de forma	Índice de forma
2,3	≤ 3

Fonte: Autor, 2019.

Segundo a norma NBR 15116:2010, o índice de forma do agregado reciclado para pavimentação deve ser menor ou igual a 3. O índice de forma do ARCPC encontrado foi de 2,3, sendo satisfatório para os requisitos da norma.

4.1.2.4. Densidade e Absorção

A norma DNER-081/98 apresenta os procedimentos para a determinação de densidade aparente e de absorção de água de agregados graúdos. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Resultado de densidade e absorção do ARCPC

Massa Saturada	Massa Seca	Volume Deslocado de Água	Dens. Aparente	Absorção
Mh (g)	Ms (g)	L	Dap	a (%)
4159	3930,5	2663,4	2,628	5,81

Fonte: Autor, 2019.

A norma NBR 15116:2004 não possui especificações de densidade aparente ou absorção do agregado graúdo para uso de agregado reciclado em pavimentação. Em relação às normas NBR 139/2010-ES e NBR 141/2010-ES, estas também não possuem especificações de densidade aparente ou absorção do agregado graúdo para base e sub-base estabilizadas. Estes resultados serão utilizados neste estudo para caracterização do ARCPC.

4.1.2.5. Massa específica dos agregados miúdos através do frasco de Chapman

A determinação da massa específica dos agregados miúdos do ARCPC, através do frasco de Chapman, segundo a norma DNER-ME 194/98, obteve como resultado o mostrado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Resultados da massa específica do agregado miúdo do ARCPC

Leitura L	Massa Específica (g/cm³)
400	2,500

Fonte: Autor, 2019.

Em relação a este resultado a norma NBR 15116:2004 não possui especificações de massa específica para o agregado miúdo para uso de agregado reciclado em pavimentação. Da mesma forma, as normas NBR 139/2010-ES e NBR 141/2010-ES não possuem especificações de densidade aparente ou absorção do agregado graúdo para base e sub-base estabilizadas. Estes resultados serão utilizados neste estudo para caracterização do ARCPC.

4.1.2.6. Abrasão Los Angeles

A determinação da abrasão Los Angeles do ARCPC, segundo a norma DNER-ME 035/98, obteve como resultado o mostrado na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Resultados da abrasão Los Angeles na graduação B do ARCPC

Passa na Peneira (mm)	Retida na Peneira (mm)	Peso (g)	Total (g)	Massa de Agregado Retida na Peneira N° 12 (1,7 mm)	Abrasão Los Angeles da Graduação B (Ab) (%)	DNIT 141/2010-ES (%)
19	12,5	2501,8	5002,7	3641,3	27	≤ 55
12,5	9,5	2500,9				

Fonte: Autor, 2019.

Os resultados obtidos pelo ensaio de abrasão Los Angeles se mostraram satisfatórios quando consultada a norma 141/2010-ES. O ARCPC apresenta-se como um agregado de desgaste razoável devido à sua folga entre o limite da norma e o resultado obtido.

4.1.3. Misturas

Com as características e composições dos materiais levantados, foram verificadas condições de utilização dos materiais em diferentes proporções, de modo a ensaiar o comportamento de cada traço selecionado para estudo para um potencial de aplicação para camadas de base e/ou sub-base.

4.1.3.1. Estudo de Traços por Composição Granulométrica

Pode-se verificar na Tabela 4.12 a análise geral de cada traço, proporção, faixas para base (caso encaixe) e destinação (base/sub-base).

Tabela 4.12 – Análise de traços, em porcentagem, de ARCPC e solo para estudo

ARCPC (%)	Solo (%)	Faixa	Destinação
0	100	-	
5	95	-	
10	90	-	
15	85	-	
20	80	-	
25	75	-	
30	70	-	SUB-BASE
35	65	-	
40	60	-	
45	55	-	
50	50	-	
55	45	-	
60	40	-	
65	35	-	
70	30	BC	
75	25	BC	
80	20	ABC	
85	15	ABC	BASE
90	10	ABC	
95	5	A	
100	0	A	

Fonte: Autor, 2019.

Afim de testar uma variabilidade média de proporção de ARCPC e do solo, foram escolhidos 5 traços, sendo 3 traços principais, 1 traço de controle e 1 traço adicional. Os traços principais visam obter resultados de comportamento da mistura ao modificarmos a proporção utilizada de ARCPC. O traço adicional foi obtido através de análise granulométrica por se tratar de uma mistura cuja granulometria se encaixa em 3 faixas da norma DNIT 141/2010-ES e o traço de controle para comparação do solo estudado sem nenhuma adição de ARCPC. Totalizando 5 traços escolhidos, cada um recebeu uma nomenclatura segundo sua proporção de ARCPC, como mostrado na Tabela 4.13.

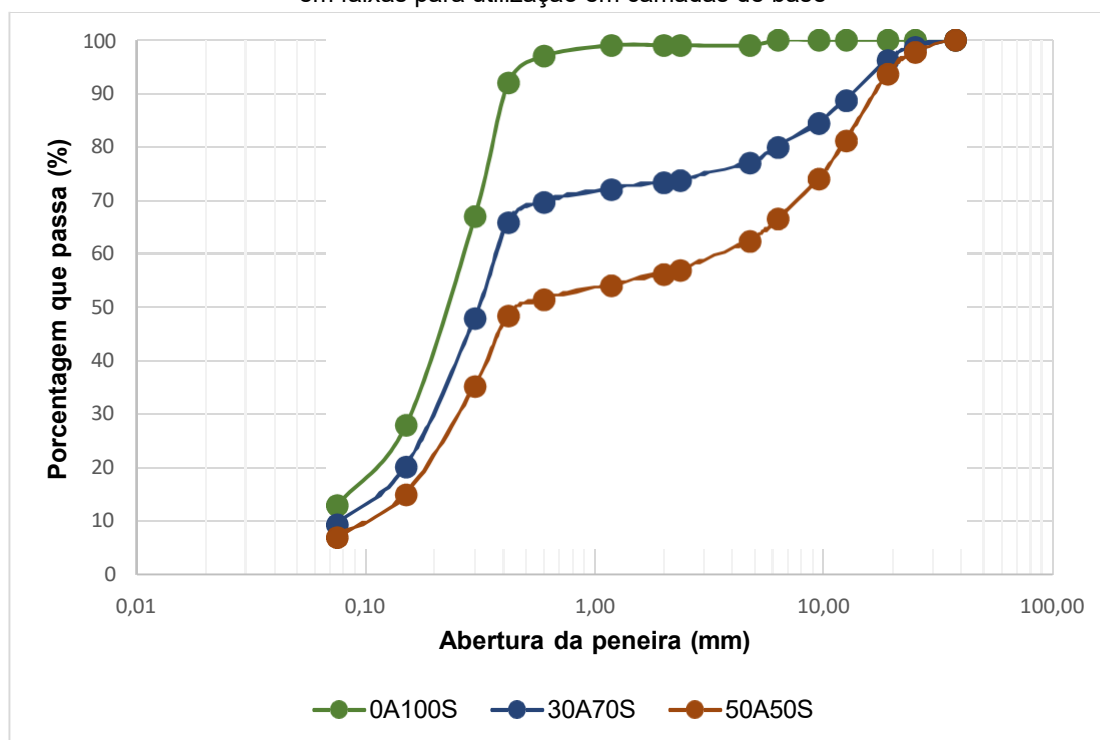
Tabela 4.13 – Traços selecionados, nomenclaturas adotadas, destinação e tipo de traço

Traço	Nomenclatura	Destinação	Tipo de Traço
0% ARCPC 100% Solo	0A100S	Sub-base	Controle
30% ARCPC 70% Solo	30A70S	Sub-base	Principal
50% ARCPC 50% Solo	50A50S	Sub-base	Principal
70% ARCPC 30% Solo	70A30S	Base	Principal
80% ARCPC 20% Solo	80A20S	Base	Adicional

Fonte : Autor, 2019.

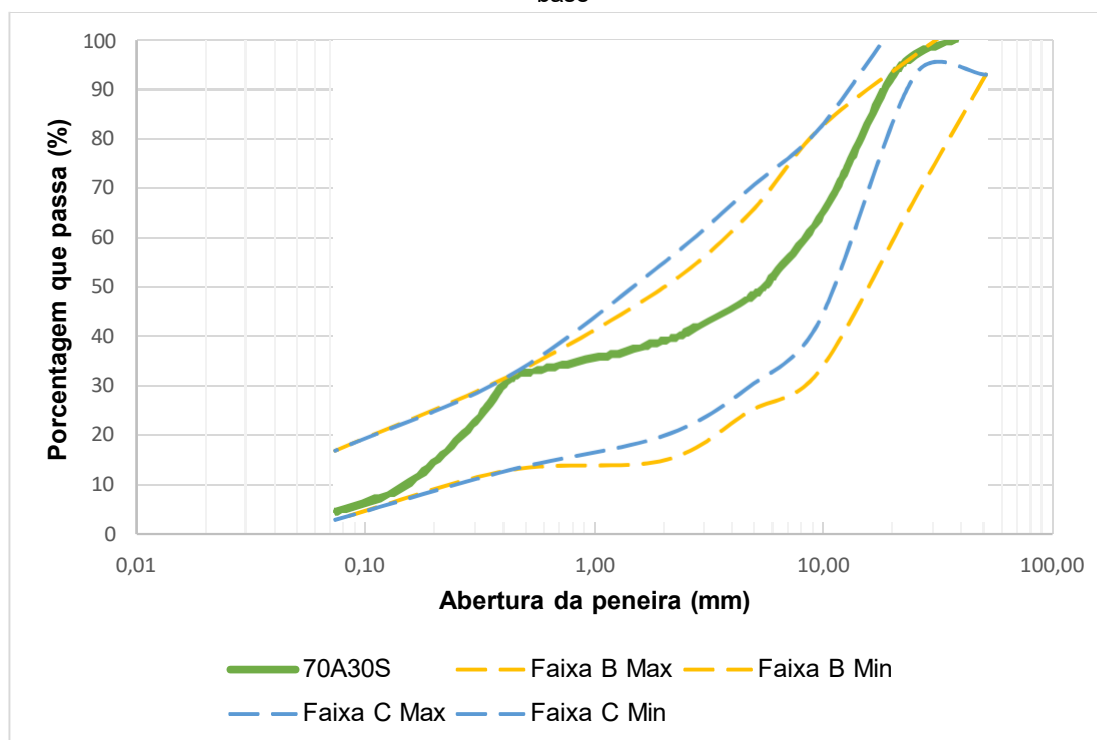
A seguir pode ser visualizada a granulometria de cada traço escolhido para estudo (Gráfico 4.3). Para os traços 70A30S e 80A20S, as respectivas curvas granulométricas estão apresentadas em comparação com as faixas granulométricas as quais se encaixam (Gráficos 4.4 e 4.5).

Gráfico 4.3 – Curvas granulométricas das misturas 0A100S, 30A70S e 50A50S, que não se enquadram em faixas para utilização em camadas de base



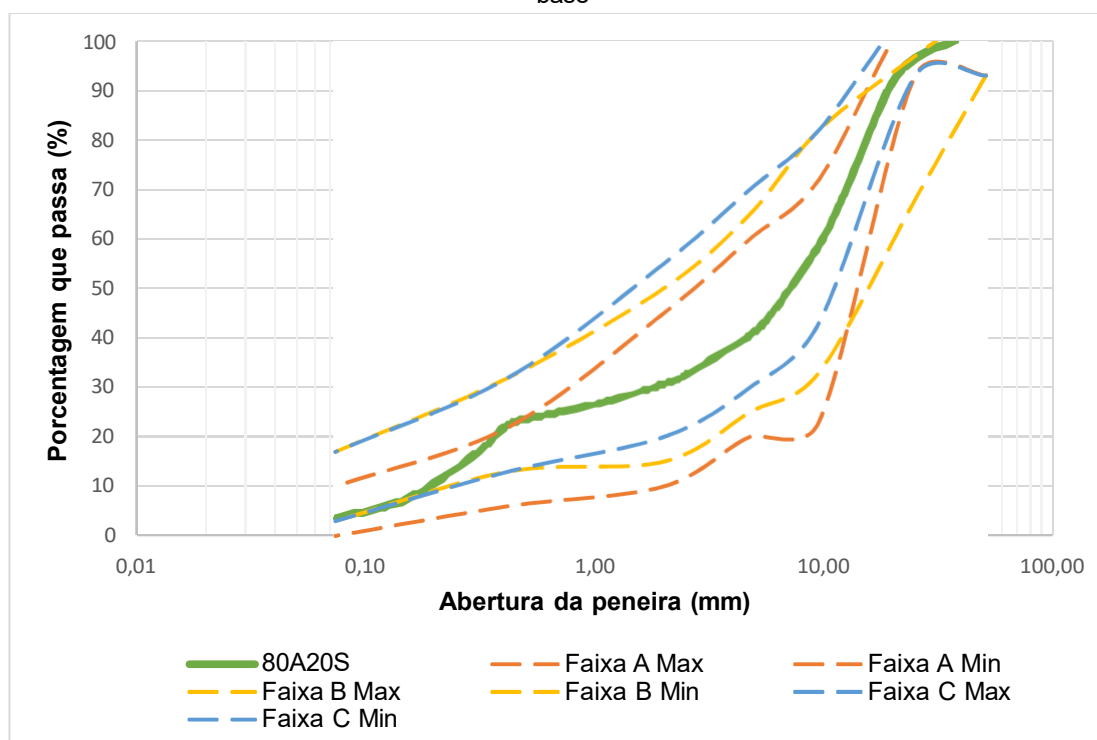
Fonte: Autor, 2019.

Gráfico 4.4 – Curva granulométrica da mistura 70A30S enquadrada nas faixas B e C para camadas de base



Fonte: Autor, 2019.

Gráfico 4.5 – Curva granulométrica da mistura 80A20S enquadrada nas faixas A, B e C para camadas de base



Fonte: Autor, 2019.

Embora os traços das misturas 70A30S e 80A20S se encaixem nas faixas granulométricas mostradas nos Gráficos 4.4 e 4.5, vale lembrar que foram utilizados os limites de tolerância de projeto de cada faixa.

Através das análises granulométricas de cada traço obtém-se resultados da relação da porcentagem de material que passa na peneira n° 200 com a porcentagem de material que passa na peneira n° 40 para camadas de base, conforme a norma DNIT 141/2010-ES, que são mostrados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Resultados da relação entre a porcentagem que passa na # 200 e na # 40

Traço	% que passa na n° 40	% que passa na n° 200	Relação % n°200/n° 40	DNIT 141/2010-ES
0A100S	92	13	1/7	
30A70S	66	9	1/7	
50A50S	48	7	1/7	< 2/3
70A30S	31	5	1/6	
80A20S	22	3	1/7	

Fonte: Autor, 2019.

A norma DNIT 141/2010-ES estabelece que a relação da porcentagem que passa na peneira n° 200 não pode passar 2/3 da porcentagem que passa na peneira n° 40. Verifica-se então que todos os traços estudados atendem a esta especificação.

4.1.3.2. Ensaio de Compactação Proctor Intermediário

Os resultados do ensaio de compactação realizado com cada traço deste estudo são apresentados nas Tabelas de 4.15 a 4.24 e nos Gráficos de 4.6 a 4.10.

Para o traço 0A100S o ensaio de compactação apresentou na Tabela 4.15 os seguintes resultados.

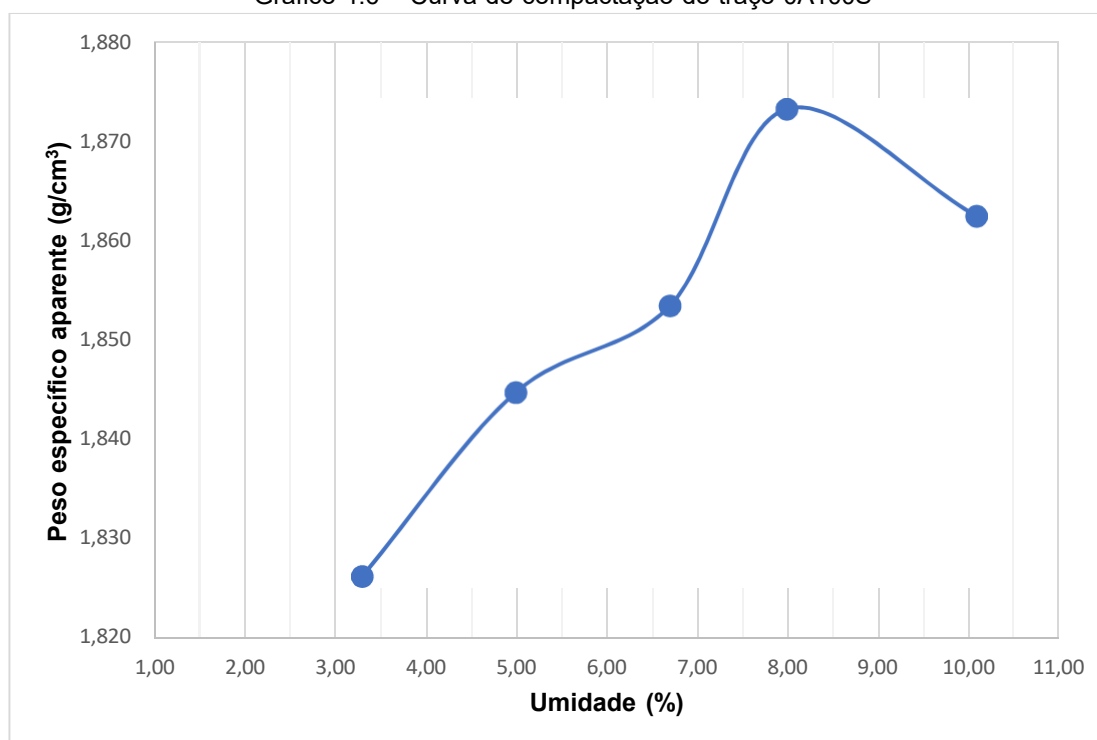
Tabela 4.15 – Resultado do ensaio de compactação para o traço 0A100S

Número de compactação	Peso	
	específico aparente (g/cm ³)	específico aparente seco (g/cm ³)
1	1,886	1,826
2	1,937	1,845
3	1,977	1,853
4	2,023	1,873
5	2,050	1,862

Fonte: Autor, 2019.

A partir da Tabela 4.15 foi possível traçar a curva de compactação do traço 0A100S e determinar a umidade ótima de compactação através do Gráfico 4.6.

Gráfico 4.6 – Curva de compactação do traço 0A100S



Fonte: Autor, 2019.

O resultado encontrado para a umidade ótima de compactação é apresentado na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Umidade ótima de compactação e peso específico aparente seco do traço 0A100S

Umidade ótima (%)	Peso específico aparente seco (g/cm³)
8,1	1,873

Fonte: Autor, 2019.

Para o traço 30A70S o ensaio de compactação apresentou, na Tabela 4.17, os seguintes resultados.

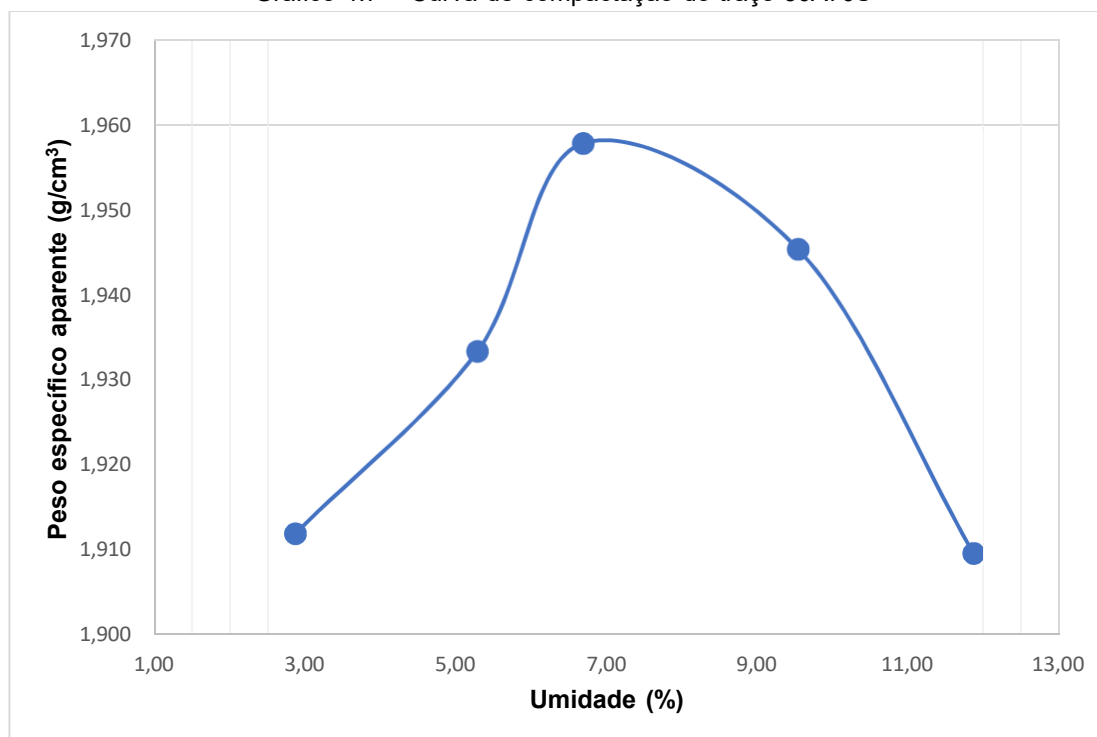
Tabela 4.17 – Resultado do ensaio de compactação para o traço 30A70S

Ponto de compactação	Peso específico aparente (g/cm³)	Umidade (%)	Peso específico aparente seco (g/cm³)
1	1,967	2,86	1,912
2	2,035	5,29	1,933
3	2,089	6,69	1,958
4	2,131	9,55	1,945
5	2,136	11,88	1,910

Fonte: Autor, 2019.

A partir da Tabela 4.17 foi possível traçar a curva de compactação do traço 30A70S e determinar a umidade ótima de compactação através do Gráfico 4.7.

Gráfico 4.7 – Curva de compactação do traço 30A70S



Fonte: Autor, 2019.

O resultado encontrado para a umidade ótima de compactação é apresentado na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Umidade ótima de compactação e peso específico aparente seco do traço 30A70S

Umidade ótima (%)	Peso específico aparente seco (g/cm³)
7,00	1,958

Fonte: Autor, 2019.

Para o traço 50A50S o ensaio de compactação apresentou, na Tabela 4.19, os seguintes resultados.

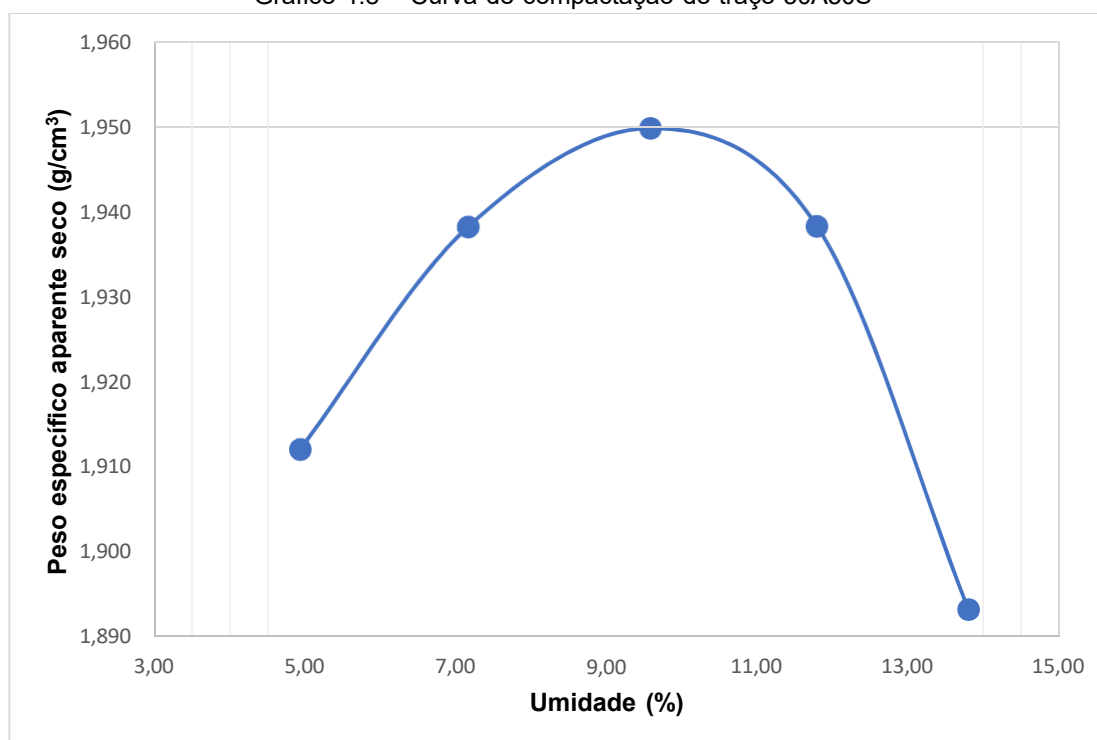
Tabela 4.19 – Resultado do ensaio de compactação para o traço 50A50S

Número de compactação	Peso específico aparente (g/cm ³)	Umidade (%)	Peso específico aparente seco (g/cm ³)
1	2,007	4,94	1,912
2	2,077	7,16	1,938
3	2,137	9,58	1,950
4	2,167	11,79	1,938
5	2,154	13,80	1,893

Fonte: Autor, 2019.

A partir da Tabela 4.19 foi possível traçar a curva de compactação do traço 50A50S e determinar a umidade ótima de compactação através do Gráfico 4.8.

Gráfico 4.8 – Curva de compactação do traço 50A50S



Fonte: Autor, 2019.

O resultado encontrado para a umidade ótima de compactação é apresentado na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Umidade ótima de compactação e peso específico aparente seco do traço 50A50S

Umidade ótima (%)	Peso específico aparente seco (g/cm³)
9,75	1,950

Fonte: Autor, 2019.

Para o traço 70A30S o ensaio de compactação apresentou, na Tabela 4.21, os seguintes resultados.

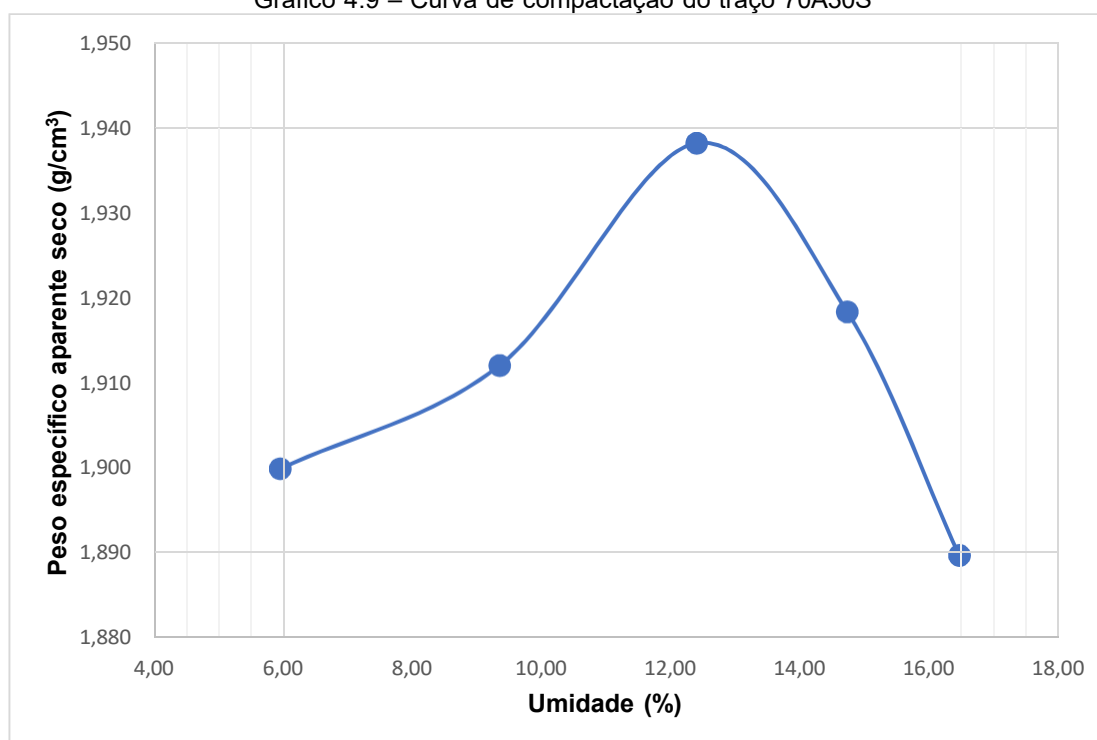
Tabela 4.21 – Resultado do ensaio de compactação para o traço 70A30S

Ponto de compactação	Peso específico aparente (g/cm³)	Umidade (%)	Peso específico aparente seco (g/cm³)
1	2,013	5,95	1,900
2	2,091	9,35	1,912
3	2,179	12,40	1,938
4	2,201	14,73	1,918
5	2,201	16,47	1,890

Fonte: Autor, 2019.

A partir da Tabela 4.21 foi possível traçar a curva de compactação do traço 70A30S e determinar a umidade ótima de compactação através do Gráfico 4.8.

Gráfico 4.9 – Curva de compactação do traço 70A30S



Fonte: Autor, 2019.

O resultado encontrado para a umidade ótima de compactação é apresentado na Tabela 4.22.

Tabela 4.22 – Umidade ótima de compactação e peso específico aparente seco do traço 70A30S

Umidade ótima (%)	Peso específico aparente seco (g/cm ³)
12,50	1,939

Fonte: Autor, 2019.

Para o traço 80A20S o ensaio de compactação apresentou, na Tabela 4.23, os seguintes resultados.

Tabela 4.23 – Resultado do ensaio de compactação para o traço 80A20S

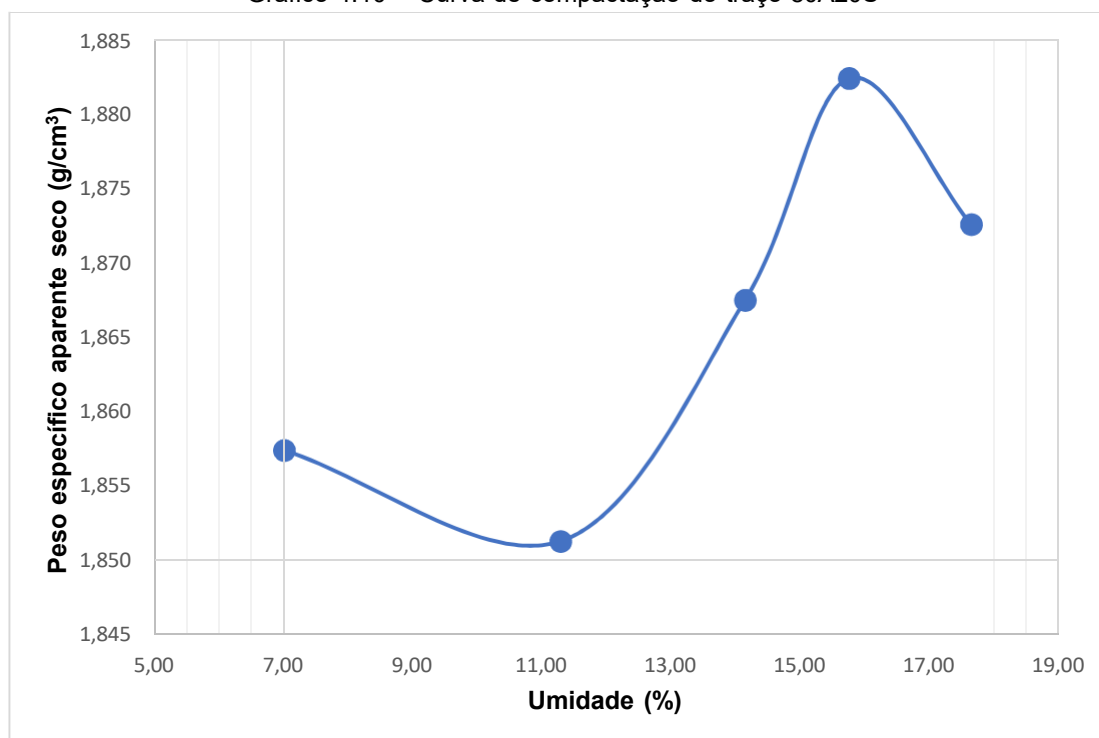
Índice de compactação	Peso específico aparente (g/cm ³)	Umidade (%)	Peso específico aparente seco (g/cm ³)
1	1,988	7,01	1,858
2	2,060	11,29	1,851
3	2,132	14,14	1,868

4	2,179	15,75	1,882
5	2,203	17,64	1,873

Fonte: Autor, 2019.

A partir da Tabela 4.23 foi possível traçar a curva de compactação do traço 80A20S e determinar a umidade ótima de compactação através do Gráfico 4.10.

Gráfico 4.10 – Curva de compactação do traço 80A20S



Fonte: Autor, 2019.

O resultado encontrado para a umidade ótima de compactação é apresentado na Tabela 4.24.

Tabela 4.24 – Umidade ótima de compactação e peso específico aparente seco do traço 80A20S

Umidade ótima (%)	Peso específico aparente seco (g/cm ³)
15,80	1,883

Fonte: Autor, 2019.

4.1.3.3. Índice de Suporte Califórnia

Os resultados do ensaio de Índice de Suporte Califórnia, ou CBR, realizado com cada traço deste estudo são apresentados nas Tabelas de 4.25 a 4.29 e nos Gráficos de 4.11 a 4.15. As umidades ótimas apresentadas são as obtidas nos ensaios de compactação de cada mistura. As umidades de ensaio são as medidas durante o ensaio de CBR, de modo a obter um controle comparativo em relação à umidade ótima. Segundo a norma DNIT 141/2010-ES determina que a umidade de execução de camadas de base deve ter erro tolerável de 2% para menos e de 1% para mais da umidade ótima.

Para o traço 0A100S o ensaio de CBR apresentou, na Tabela 4.25, os seguintes resultados.

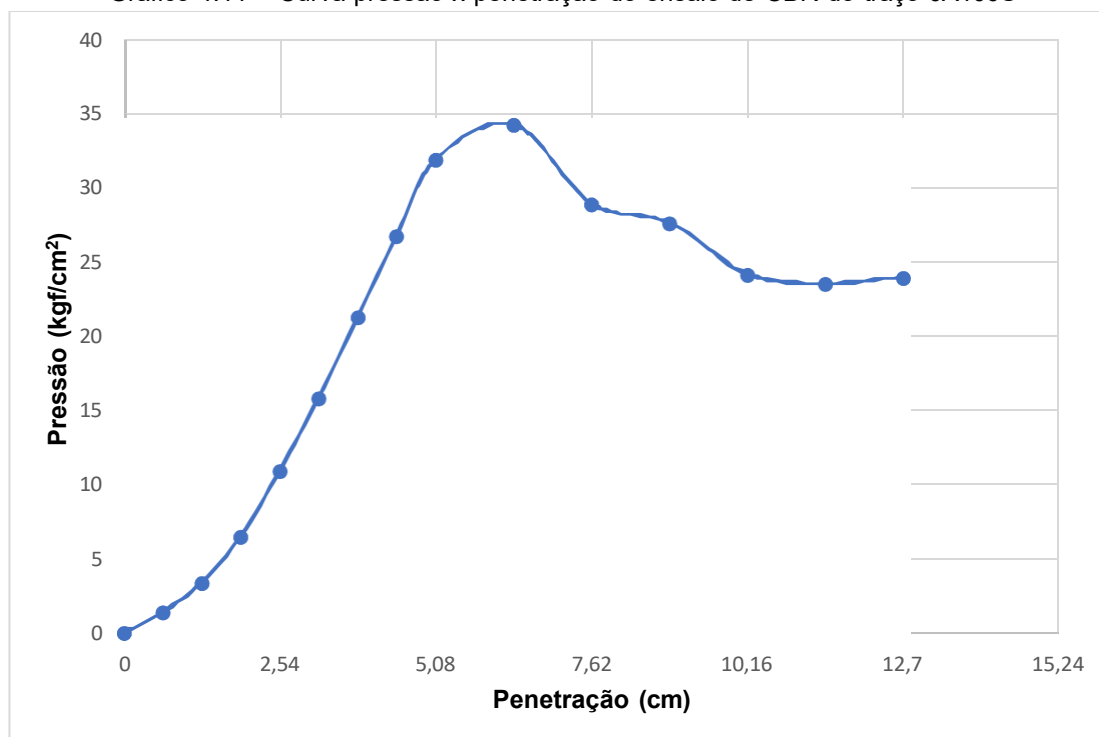
Tabela 4.25 – Resultados do ensaio de CBR para o traço 0A100S

Umidade ótima (%)	Umidade de ensaio (%)	Expansão (%)	CBR (%)
8,10	8,39	0,000	30

Fonte: Autor, 2019.

Os dados obtidos através do ensaio de CBR estão mostrados no Gráfico 4.11, através de uma curva de pressão x penetração.

Gráfico 4.11 – Curva pressão x penetração do ensaio de CBR do traço 0A100S



Fonte: Autor, 2019.

Para o traço 30A70S o ensaio de CBR apresentou, na Tabela 4.26, os seguintes resultados.

Tabela 4.26 – Resultados do ensaio de CBR para o traço 30A70S

Umidade ótima (%)	Umidade de ensaio (%)	Expansão (%)	CBR (%)
7,00	7,30	0,017	27

Fonte: Autor, 2019.

Os dados obtidos através do ensaio de CBR estão mostrados no Gráfico 4.12, através de uma curva de pressão x penetração.

Gráfico 4.12 – Curva pressão x penetração do ensaio de CBR do traço 30A70S



Fonte: Autor, 2019.

Para o traço 50A50S o ensaio de CBR apresentou, na Tabela 4.27, os seguintes resultados.

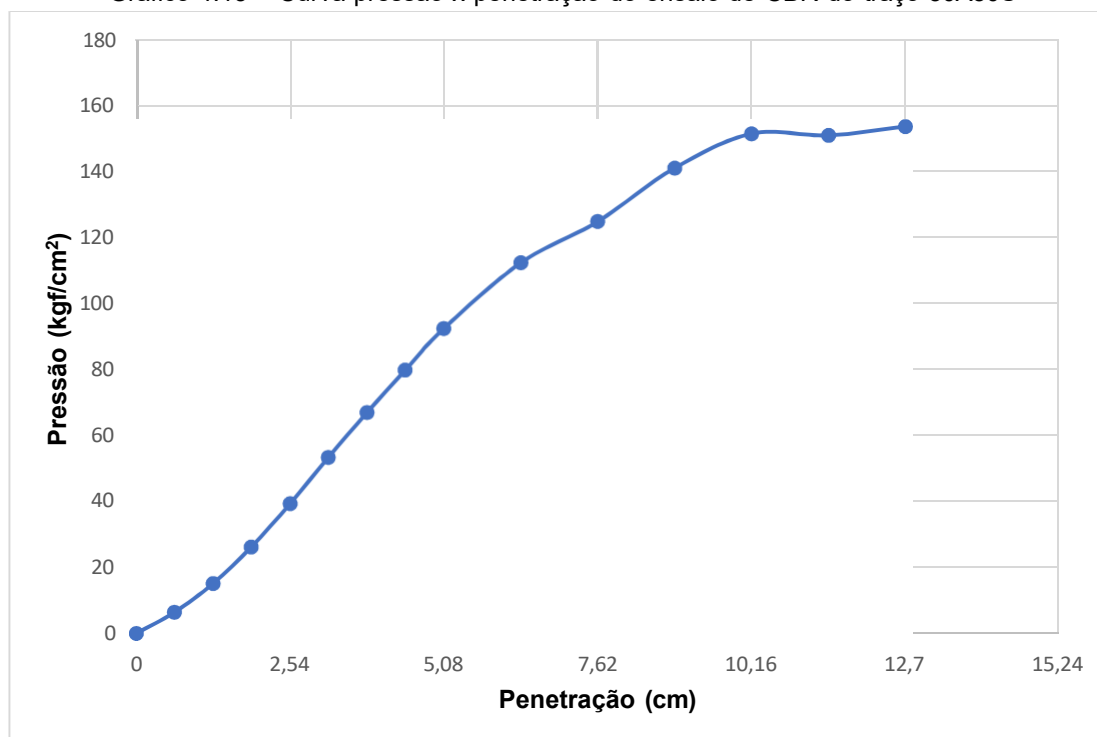
Tabela 4.27 – Resultados do ensaio de CBR para o traço 50A50S

Umidade ótima (%)	Umidade de ensaio (%)	Expansão (%)	CBR (%)
9,75	9,2	0,015	88

Fonte: Autor, 2019.

Os dados obtidos através do ensaio de CBR estão mostrados no Gráfico 4.13, através de uma curva de pressão x penetração.

Gráfico 4.13 – Curva pressão x penetração do ensaio de CBR do traço 50A50S



Fonte: Autor, 2019.

Para o traço 70A30S o ensaio de CBR apresentou, na Tabela 4.28, os seguintes resultados.

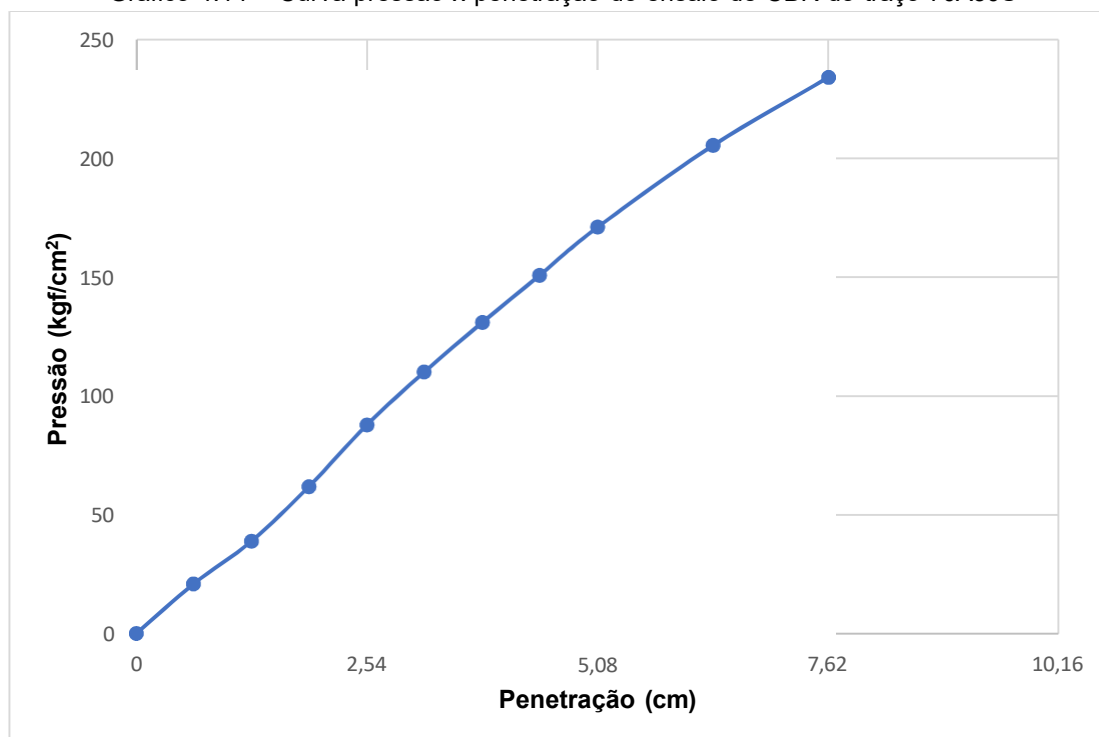
Tabela 4.28 – Resultados do ensaio de CBR para o traço 70A30S

Umidade ótima (%)	Umidade de ensaio (%)	Expansão (%)	CBR (%)
12,5	10,68	0,017	162

Fonte: Autor, 2019.

Os dados obtidos através do ensaio de CBR estão mostrados no Gráfico 4.14, através de uma curva de pressão x penetração.

Gráfico 4.14 – Curva pressão x penetração do ensaio de CBR do traço 70A30S



Fonte: Autor, 2019.

Para o traço 80A20S o ensaio de CBR apresentou, na Tabela 4.29, os seguintes resultados.

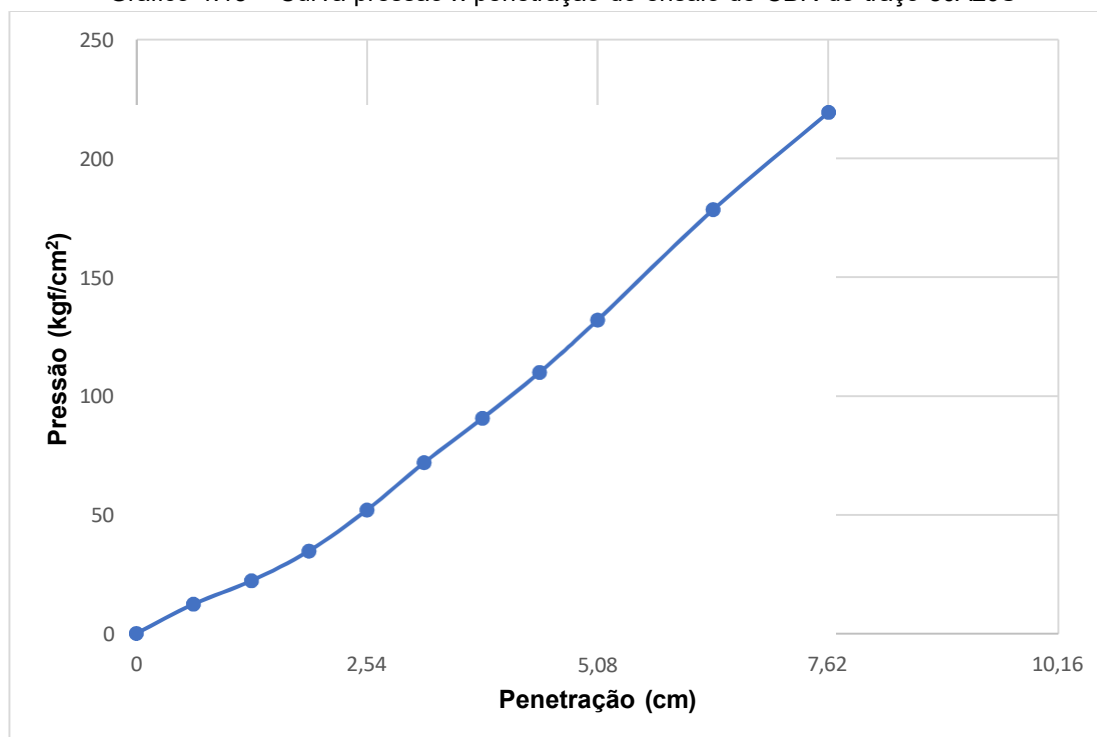
Tabela 4.29 – Resultados do ensaio de CBR para o traço 80A20S

Umidade ótima (%)	Umidade de ensaio (%)	Expansão (%)	CBR (%)
15,8	15,2	0,017	125

Fonte: Autor, 2019.

Os dados obtidos através do ensaio de CBR estão mostrados no Gráfico 4.15, através de uma curva de pressão x penetração.

Gráfico 4.15 – Curva pressão x penetração do ensaio de CBR do traço 80A20S



Fonte: Autor, 2019.

Através dos dados obtidos dos ensaios de CBR realizados verifica-se na Tabela 4.30 a adequação à norma de cada mistura ensaiada.

Tabela 4.30 – Comparação de resultados do ensaio de CBR com relação às normas do DNIT

Traço	CBR (%)	Expansão (%)	CBR (%) - DNIT 141/2010-ES	Expansão (%) - DNIT 141/2010-ES	Finalidade mais adequada
0A100S	30	0,000			Sub-base
30A70S	27	0,017			Sub-base
50A50S	88	0,015	Sub-base ≥ 20 Base $\geq 60^6$	Sub-base ≤ 1 Base $\leq 0,5$	Sub-base
70A30S	162	0,017			Base
80A20S	125	0,017			Base

Fonte: Autor, 2019.

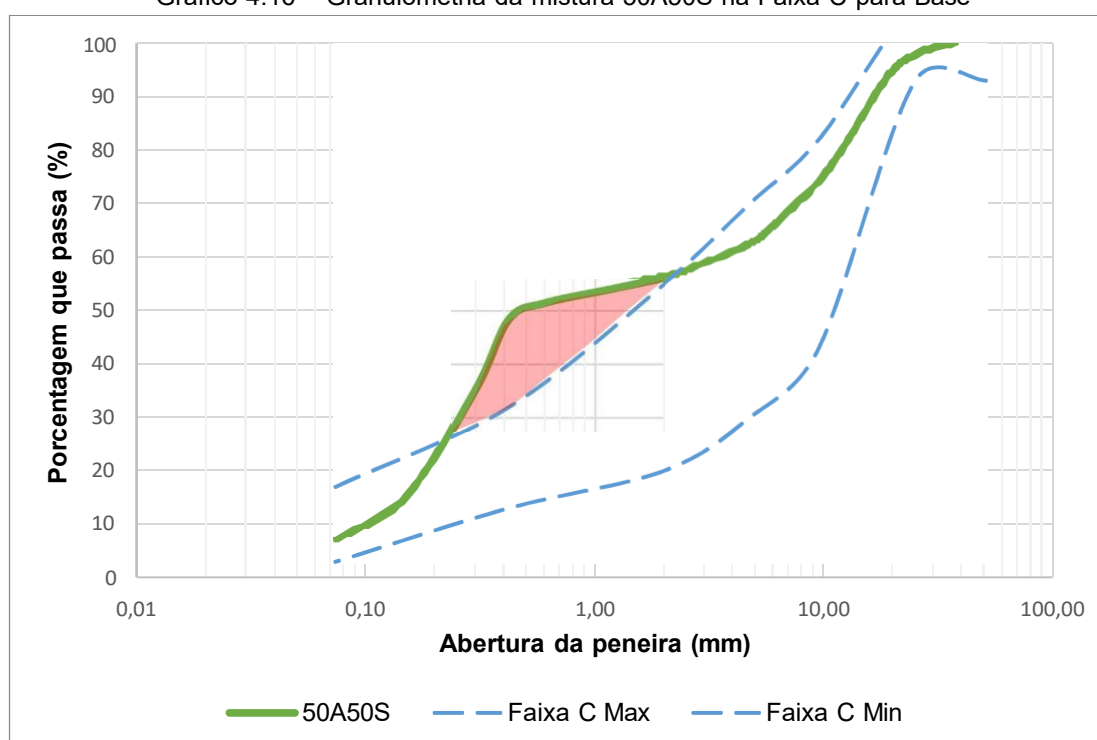
Verifica-se que a expansão de todas as misturas é baixa ou nula, adequando-se à norma tanto para base como pra sub-base. Com relação ao CBR de cada mistura,

⁶ Quanto ao uso de agregados reciclados para pavimentação é permitido o uso como material de base somente para vias de tráfego leve ($N \leq 10^6$), segundo a NBR 15116:2004.

os traços 50A50S, 70A30S e 80A20S adequam-se em aplicações para base, enquanto os traços 0A100S e 30A70S adequam-se para aplicação em sub-base.

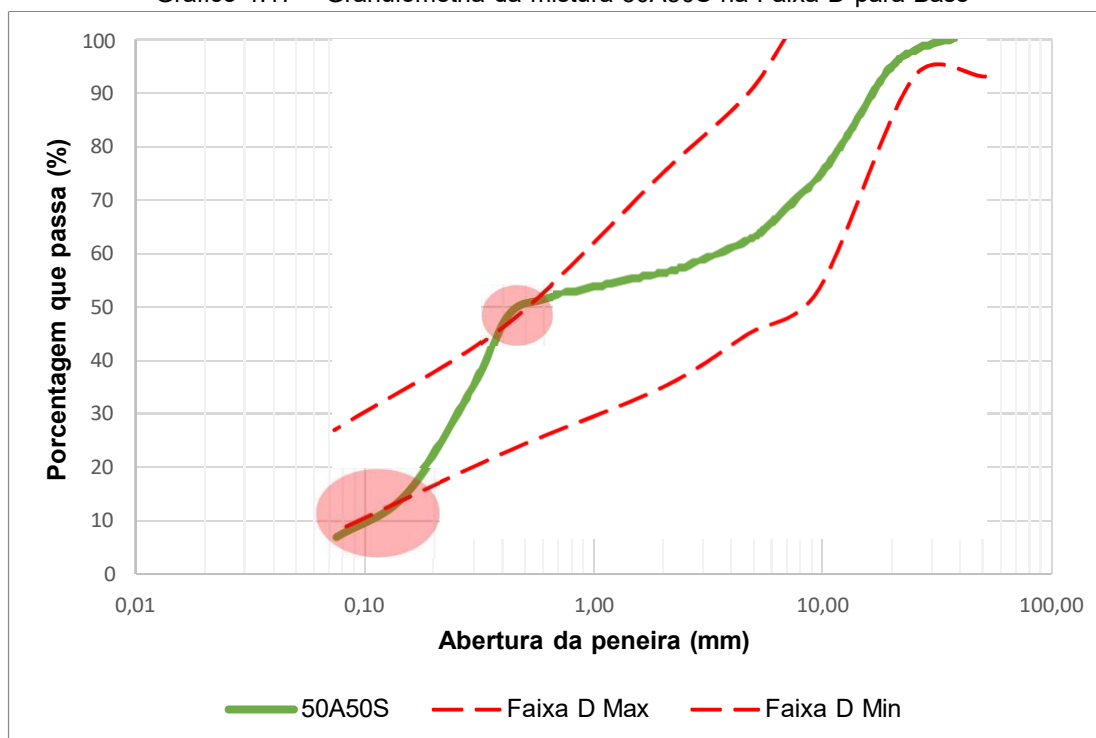
A mistura de traço 50A50S merece ser estudada mais a fundo, pois ainda que apresente expansão e CBR satisfatórios, sua granulometria não se encaixa totalmente nas faixas granulométricas da norma DNIT 141/2010-ES. O estudo específico de enquadramento da mistura 50A50S é verificado nos Gráficos de 4.16 a 4.18, havendo o destaque, em vermelho, dos pontos da mistura que não se enquadra nas faixas.

Gráfico 4.16 – Granulometria da mistura 50A50S na Faixa C para Base



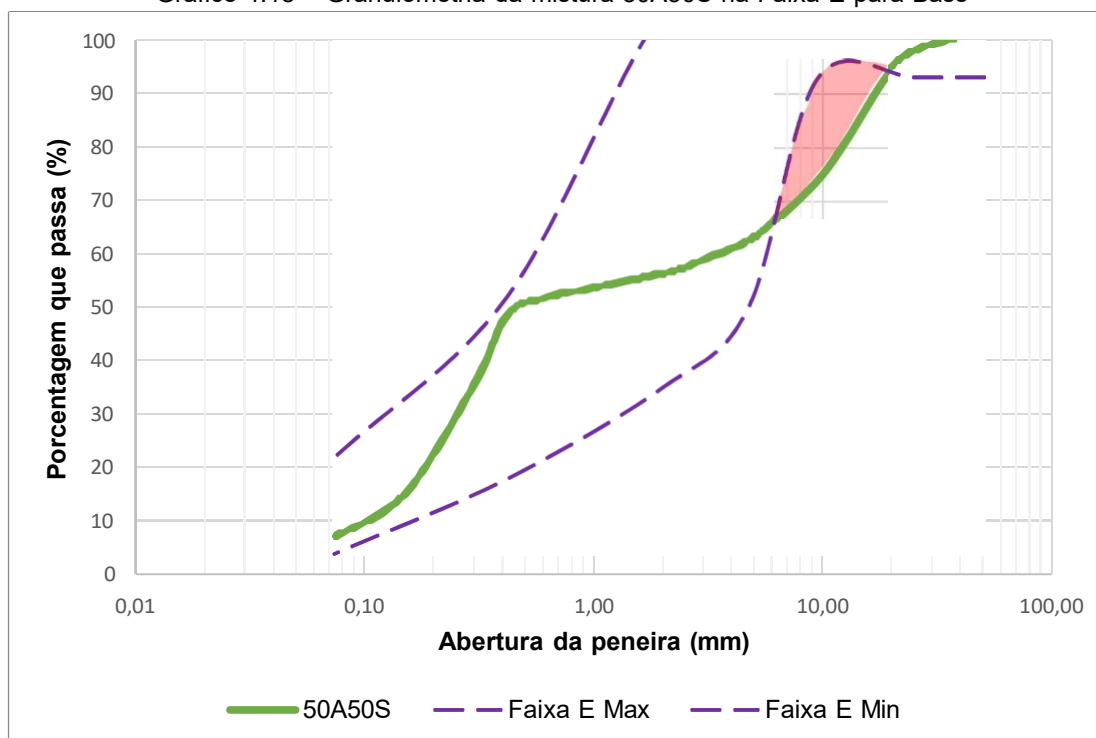
Fonte: Autor, 2019.

Gráfico 4.17 – Granulometria da mistura 50A50S na Faixa D para Base



Fonte: Autor, 2019.

Gráfico 4.18 – Granulometria da mistura 50A50S na Faixa E para Base



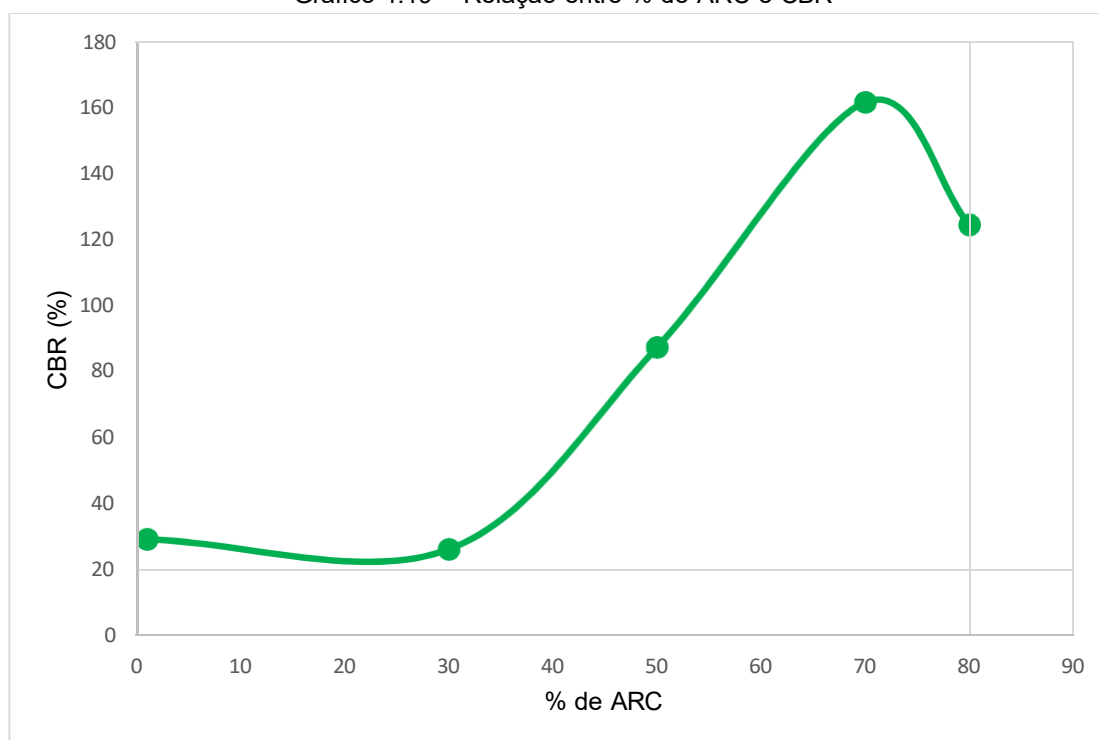
Fonte: Autor, 2019.

Através das análises específicas realizadas para enquadramento da mistura 50A50S, verificou-se que, para as faixas às quais a mesma mais se enquadra (Faixas C, D e E), ela não se enquadra totalmente nas mesmas, porém é possível observar que, em relação à Faixa D, existem pontos de saída dos limites, porém não tão expressivos, justificando assim seu elevado resultado de CBR.

Ressalta-se o fato de que mesmo que cada traço tenha sido verificado granulometricamente segundo as tolerâncias limites de projeto, em lugar de utilizar os limites sem tolerância, os resultados de CBR das misturas 70A30S e 80A20S atingiram mais do que o dobro exigido pela norma, o que permite seu enquadramento usando os referidos limites.

A seguir pode ser observado um gráfico relacionando a porcentagem de agregado reciclado e o CBR de cada mistura (Gráfico 4.19)

Gráfico 4.19 – Relação entre % de ARC e CBR



Fonte: Autor, 2019.

Pelo Gráfico 4.16 verifica-se que a utilização de ARC neste solo começa a surtir efeito com porcentagens acima de 30% na mistura. Após atingir um valor de CBR

máximo em 70% de ARCP o valor volta a cair ao ultrapassar esta porcentagem, porém ainda conservando um valor alto.

Na Tabela 4.31 verifica-se em quanto cada adição de ARCP refletiu em incremento de CBR com relação ao CBR do solo natural.

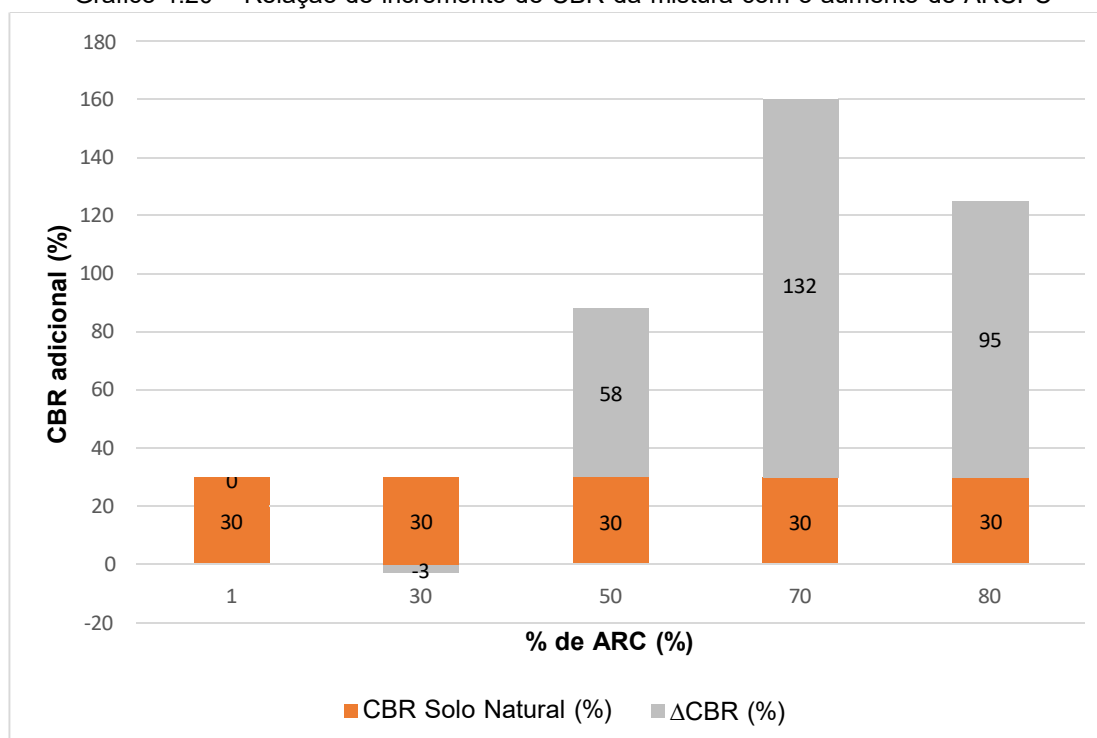
Tabela 4.31 – Relação de aumento de CBR a mistura com a adição de ARCP

Traço	% de ARC	Δ CBR (%)
0A100S	0	0
30A70S	30	-3
50A50S	50	58
70A30S	70	132
80A20S	80	95

Fonte: Autor, 2019.

Através da Tabela 4.31 é possível criar o Gráfico 4.20 para melhor visualização de incremento de CBR ao solo com a adição de ARCP.

Gráfico 4.20 – Relação de incremento de CBR da mistura com o aumento de ARCP



Fonte: Autor, 2019.

4.1.3.4. Índice de Degradação de Ruiz

Os resultados do índice de degradação de Ruiz são apresentados nas Tabelas 4.32 e 4.33 e nos Gráficos 4.21 e 4.22.

Para o traço 70A30S o índice de degradação de Ruiz apresentou, na Tabela 4.32, os seguintes resultados.

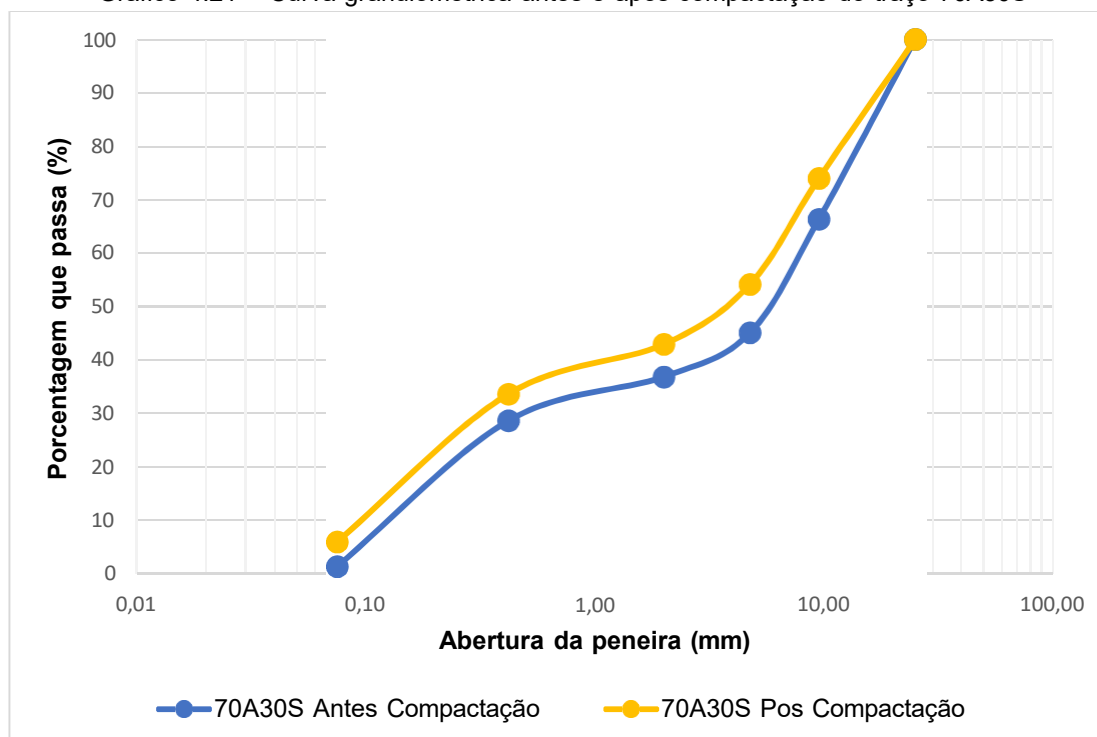
Tabela 4.32 – Resultados do índice de degradação de Ruiz para o traço 70A30S

mm	Passante Acumulada (%)	Passante Acumulada (%)	Δi (%)	ID
25,00	100	100	0	
9,50	66	74	8	
4,75	45	54	9	
2,00	37	43	6	5,40
0,42	29	34	5	
0,075	1	6	5	

Fonte: Autor, 2019.

A variação da curva granulométrica antes e após a compactação do material de traço 70A30S é apresentada no Gráfico 4.21.

Gráfico 4.21 – Curva granulométrica antes e após compactação do traço 70A30S



Fonte: Autor, 2019.

Para o traço 80A20S o índice de degradação de Ruiz apresentou, na Tabela 4.33, os seguintes resultados.

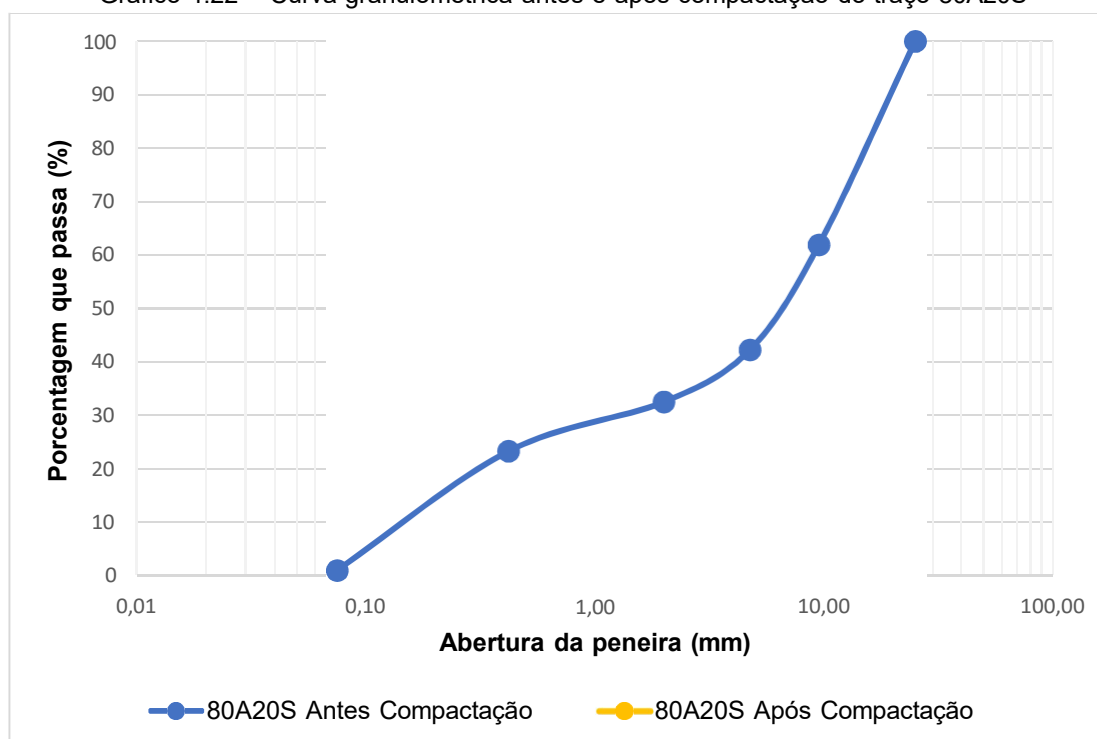
Tabela 4.33 – Resultados do índice de degradação de Ruiz para o traço 70A30S

mm	Passante Acumulada (%)	Passante Acumulada (%)	Δi (%)	ID
25,00	100	100	0	
9,50	62	69	7	
4,75	42	49	6	
2,00	32	37	4	4,08
0,42	23	26	2	
0,075	1	5	4	

Fonte: Autor, 2019.

A variação da curva granulométrica antes e após a compactação do material de traço 70A30S é apresentada no Gráfico 4.19.

Gráfico 4.22 – Curva granulométrica antes e após compactação do traço 80A20S



Fonte: Autor, 2019.

Os valores encontrados de índice de degradação para as misturas 70A30S e 80A20S foi de 5,40 e 4,08, respectivamente. Segundo a classificação de Ruiz (BUZATTI, 1984 apud VALLE, 1994) misturas de índice de degradação são classificadas como ótimas enquanto que um índice de degradação de 100 é considerada como péssima, portanto as misturas com maior porcentagem de agregados, onde teoricamente deveria haver a maior degradação, apresentou índices de degradação satisfatórios.

4.1.3.5. Análise e Comentários de Resultados

Estudos já realizados com agregados reciclados de concreto em comparação a esta pesquisa são mostrados na Tabela 4.34.

Tabela 4.34 – Análise comparativa de estudos de características do ARC

	Gonçalves, 2000	Grubba, 2009	Motter, 2013	Esta pesquisa
Dimensão máxima característica (mm)	12,5	25	19	25
Massa específica aparente (g/cm³)	2,610	2,403	2,398	2,628
Absorção (%)	4,90	4,57	5,20	5,80
Massa específica do agregado miúdo (g/cm³)	2,48	-	2,15	2,50
Abrasão Los Angeles (%)	-	31	28	27

Fonte: Autor, 2019.

Verifica-se que o ARCPC possui características similares aos ARCs já estudados, portanto a diferença de classificação entre agregados reciclados de concreto e agregados reciclados de corpos de prova de concreto diferencia-se somente quanto à origem.

Os resultados obtidos em estudos já realizados sobre a aplicação de agregados reciclados de concreto em pavimentação em comparação a esta pesquisa são mostrados na Tabela 4.35.

Tabela 4.35 – Comparação de resultados de estabilização de solos

	Tipo de solo	Energia de compactação	Traços	CBR (%)		
				Solo	ARC-Solo	ARC
Grubba (2009)	Laterítico argiloso	Modificada	75A25S	41	164	182
Esta pesquisa	Laterítico arenoso	Intermediária	70A30S	30	162	-
			80A30S			

Fonte: Autor, 2019.

Verifica-se através da Tabela 4.35 que, independente da energia de compactação, os valores de CBR para solos estabilizados com ARC em proporções parecidas obtiveram resultados próximos.

Para a análise do índice de degradação de Ruiz na Tabela 4.36 foram comparados os resultados com outros trabalhos que também utilizaram este método para determinar a degradação de misturas para camadas de pavimento.

Tabela 4.36 – Comparação de resultados do índice de degradação de Ruiz

	Material	Energia de compactação	ID
Grubba (2009)	ARC	Modificada	2,33
Leite (2007)	Agregado	Intermediária	3,70
	Reciclado Misto	Modificada	6,30
Esta pesquisa	ARC-solo		5,40
	70A30S	Intermediária	
	ARC-solo 80A20S		4,08

Fonte: Autor, 2019.

Ao comparar os resultados entre diferentes tipos de materiais que utilizaram este método de índice de degradação em diferentes pesquisas verifica-se que, independente do material reciclado ou da mistura de material reciclado com solo, o índice de degradação de Ruiz mostrou valores próximos entre os estudos realizados. Comparando-se Grubba (2009) e Leite (2007) o ARC apresentou um índice de degradação menor do que o agregado reciclado misto (que contém resíduos de concreto com outros materiais). De semelhante modo observa-se a mesma relação entre as misturas de traço 70A30S e 80A20S, onde a mistura com maior quantidade de concreto possui menor índice de degradação Ruiz.

Com relação à execução de camadas de pavimentação procurou-se estimar o consumo do material desta pesquisa aplicado a uma camada de base de dimensões: 8 m de largura e 20 cm de altura (Tabela 4.37).

Tabela 4.37 - Consumo de ARCPC para traço de mistura para base

Base (8m x 15cm)			
Traço	Massa de ARC por metro de base (kg)	Volume de ARC por metro de base (m³)	Metro de base por m3 de ARC (m)
50A50S	1120,10	0,43	2,35
70A30S	1634,04	0,62	1,61
80A20S	1855,75	0,71	1,42

Fonte: Autor, 2019.

5. CONCLUSÃO

O ARCPC apresentou características similares às de ARC, concluindo-se então que o ARCPC não possui vantagens ou desvantagens por ter sido produzido em um controle maior de laboratório, sendo o ARCPC o mesmo que o ARC. Portanto é possível ampliar o objeto deste estudo para resíduos de concreto em geral.

Para esta pesquisa foi utilizada a quebra manual enquanto que outros estudos utilizaram equipamentos para britagem mecânica, porém constatou-se que independentemente do método de beneficiamento dos resíduos de concreto realizado os resultados obtidos foram similares. Porém o tempo gasto para beneficiar uma certa quantidade de resíduos de concreto é muito maior quando realizada manualmente, em comparação com o método mecânico.

A absorção do ARCPC é um fator importante a ser considerado na sua aplicação em camadas de pavimento, pelo fato de ser necessário atingir uma umidade ótima de compactação para que cada mistura atinja os valores de resistência visados. Este efeito é resolvido ao pré-saturar o ARC antes de realizar a mistura e adição de água.

As misturas de traço 50A50S, 70A30S e 80A20S apresentaram um incremento de CBR ao solo de 58%, 136% e 95%, respectivamente, gerando materiais de CBR satisfatórios para aplicação em camadas de base e sub-base, verificando-se então a possibilidade de uso do ARC como material para estabilização de solos.

A mistura de traço 30A70S não apresentou melhoras ao solo. O presente estudo atribui este baixo desempenho da referida mistura devido à baixa interação entre as partículas que a compõem ou pode ter havido algum problema durante o ensaio de compactação.

Para uma aplicação prática o LABCOM não produz quantidades expressivas de corpos de prova de concreto para aplicação em massa de ARC em pavimentação. Porém, se for levado em consideração todos os outros geradores de corpos de prova de concreto da Região Metropolitana da Grande São Luís, existe um potencial de material a ser estudado e aplicado. De semelhante modo, se forem expandidos os limites deste estudo de corpos de prova de concreto para concretos em geral, tendo como base que ARCPC é o mesmo ARC, temos um potencial de resíduos de concreto gerados com

quantidade suficiente para aplicação em grande escala na pavimentação, com custos de materiais reciclados mais baratos que materiais convencionais.

Para futuros trabalhos sugere-se:

- Realizar o ensaio de resistência à compressão simples e módulo de resiliência com as misturas e analisar o resultado, levando em consideração o efeito de cimentação própria;
- Realizar estudos sobre a absorção do ARC e sua influência sobre os ensaios de compactação e de CBR e sobre a execução de camadas de pavimento, buscando um método para que camadas de pavimento de misturas ARC-solo atinjam a umidade ótima;
- Realizar estudos de uso de ARC em revestimento de pavimento rígido, devido à sua larga aplicação nos EUA;
- Realizar estudos de uso de ARC em revestimento asfáltico;
- Realizar estudos de uso de ARC para estabilização de diferentes solos;
- Realizar estudos de utilização de ARC como camada de pavimento;
- Realizar estudos de utilização de ARC como alternativa para outras destinações;
- Realizar estudos de reuso e reciclagem de outros resíduos gerados pelos laboratórios da UEMA aplicados à engenharia civil;
- Criação de um laboratório para gestão, estoque e estudos de RCD gerados no Campus Paulo VI e, se for viável, da Região Metropolitana da Grande São Luís;
- Criação de trechos de pista experimentais no Campus Paulo VI para estudos, pesquisas, aulas e aplicações, realizados na área de pavimentação;

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, L. C. **Notas da aula da disciplina Concreto IV - Concreto armado.** Campinas, 2002.

ÂNGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos.** Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15112:** Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 7 p., 2004.

_____. **NBR 10004:** Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 71 p., 2004.

_____. **NBR 15113:** Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 12 p., 2004.

_____. **NBR 15114:** Resíduos sólidos da construção civil – Área de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 7 p., 2004.

_____. **NBR 15115:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 10 p., 2004.

_____. **NBR 15116:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 7 p., 2004.

_____. **NBR 7809:** Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 3 p., 1983.

_____. **NBR NM 248:** Agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 6 p., 2003.

_____. **NBR NM 26:** Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 10p., 2001.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração.** São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. L. B., et al. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros.** 1ªed. Programa Asfalto nas Universidades, Petrobras Distribuidora S.A., 2010.

BLANKENAGEL, B. J. **Characterization of Recycled Concrete For Use as Pavement Base Material.** Provo, 2005. 66 f. Master Dissertation - Department of Civil and Environmental Engineering Brigham Young University. Provo, 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 307, de 05/07/2002.** Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para gestão de resíduos da construção civil. Diário Oficial da República do Brasil, Brasília, DF, nº136, 17/07/2002. Seção 1, p.95-96, 2002.

CARVALHO, João Dirceu Nogueira de. Sobre as origens e desenvolvimento do concreto. **Revista Tecnológica,** Maringá, v. 17, n. 1, 2008.

DAMINELI, B. L. **Estudo de métodos para caracterização de propriedades físicas de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados.** -- ed. rev. -- São Paulo, 2007. 107 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. 2007.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. Tradução All Tasks. Revisão Técnica Pérsio Leister de Almeida Barros. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 035/98**: Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 6 p., 1998.

_____. **DNER-ME 054/97**: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 10 p., 1997.

_____. **DNER-ME 080/94**: Solos – análise granulométrica por peneiramento. Rio de Janeiro, 4 p., 1994.

_____. **DNER-ME 081/98**: Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 6 p., 1998.

_____. **DNER-ME 082/94**: Solos – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 3 p., 1994.

_____. **DNER-ME 122/94**: Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito. Rio de Janeiro, 4 p., 1994.

_____. **DNER-ME 162/94**: Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Rio de Janeiro, 7 p., 1994.

_____. **DNER-ME 194/98**: Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 4 p., 1998.

_____. **DNER-ME 398/99**: Índice de Degradação após compactação Proctor (ID_p). Rio de Janeiro, 6 p., 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de pavimentação**. 3.ed. - Rio de Janeiro, 2006. 274p.

_____. **DNIT 139/2010-ES:** Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 8 p., 2010.

_____. **DNIT 141/2010-ES:** Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 9 p., 2010.

_____. **DNIT 164/2013-ME:** Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 7 p., 2013.

_____. **DNIT 172/2016-ME:** Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 17 p., 2016.

FLORAM Engenharia e Meio Ambiente Ltda. Etapa 1.0. Produto 04 - **Diagnóstico da Gestão Integrada de Resíduos Sólidos - Região Metropolitana da Grande São Luís.** Volume único. 350 p. Eunápolis, Bahia, 2018.

FRASSON, S. A.; FILHO, J. A. P.; FARIA, A. C. Estudo comparativo entre custos de utilização de agregado natural e reciclado na execução de rodovias. In: **SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE GESTÃO DE PROJETOS, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE - SINGEP**, 5., 2016, São Paulo. **Resumos...**São Paulo: UNINOVE, 2016.

GONÇALVES, R. D. C. **Agregados reciclados de resíduos de concreto - Um novo material para dosagens estruturais.** São Carlos, 2000. 132p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2000.

GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto pra utilização na construção rodoviária.** 2009. 139 f. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infra-Estrutura de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009, São Carlos, 2009.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ma/sao-luis/panorama>>. Acesso em: 11 jun. 2019.

JOHN, V. & AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção**. Seminário - Reciclagem de Resíduos Sólidos Domiciliares. São Paulo, 2000. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

LEITE, F. C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos**. 2007. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

LIMA, J. A. R. **Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas**. -- ed. rev. -- 2010, 129 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. 2010.

MARQUES, G. L. O. **Notas da aula da disciplina de Pavimentação**. Juiz de Fora, 2006.

MATOS, A. C. R. **Estabilização de solos com utilização de revestimento asfáltico fresado em camadas de pavimentos**. 2018. 138f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2018.

MENDES, C. S. **Potencial Energético e Aproveitamento dos Resíduos da Construção Civil em São Luís, MA**. 2014, 117 f. Dissertação (Mestrado em Energia e Ambiente) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2014.

MIRANDA, L. F. S.; ANGULO, S. C.; CARELI, E. C. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 57-71, jan./mar. 2009.

MOTTER, J. S. **Propriedades de concretos betuminosos usinados a quente com o uso de agregado graúdo reciclado de concreto**. 2013. 260p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia da Construção Civil, Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 448 p., 2013.

PEDROSO, Fábio Luís. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Revista Concreto & Construções**, São Paulo, ano XXXVII, n. 53, janeiro, fevereiro e março, 2009.

PESQUISA realizada em usina de reciclagem de RCD da construção civil denominada Usina de Reciclagem B. **Frank e Sustentabilidade**, 2016. Disponível em: <<https://engenhafrank.blogspot.com/>>. Acesso em: 16 de jun. de 2019.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999, 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

REAPROVEITAMENTO de corpos de prova de concreto que uma empreiteira descartava. **Construção Civil**, 2015. Disponível em: <<https://construcaocivil.info/reaproveitamento-de-corpos-de-prova-de-concreto-que-uma-empreiteira-descartava/>>. Acesso em: 14 de jun. de 2019.

REAPROVEITAMENTO de corpos de prova descartados em uma concreteira e utilizados em jardins. Localização: Guabiruba, Santa Catarina. **Construção Civil**, 2015. Disponível em: <<https://construcaocivil.info/reaproveitamento-de-corpos-de-prova-descartados-em-uma-concreteira-e-utilizados-em-jardins-localizacao-guabiruba-santa-catarina/>>. Acesso em: 14 de jun. de 2019.

RELATÓRIO Pesquisa Setorial 2014/2015. **ABRECON**, 2017. Disponível em: <https://abrecon.org.br/pesquisa_setorial/>. Acesso em: 16 de jun. 2019.

ROSSI, A. C. **Etapas de uma obra de pavimentação e dimensionamento para uma via na Ilha do Fundão**. 2016. 65p.: il.; 29,7 cm. Projeto de Graduação - UFRJ, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2016.

SANTANA, H. Introdução à Mecânica dos Pavimentos de Baixo Custo. **27ª Reunião Anual de Pavimentação ABPv**, 1993.

SANTOS, A. Pesquisa ressalta presente e futuro do concreto. **Massa Cinzenta**, 13 de set. de 2013. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/pesquisa-ressalta-presente-e-futuro-do-concreto/>>. Acesso em: 14 de jun. de 2019.

SBM Britador de Cobre de fácil instalação e manutenção conveniente. **Alibaba.com**, [20-]. Disponível em: <<https://portuguese.alibaba.com/>>. Acesso em; 16 de jun. de 2019.

SOUZA, W. F. **Estudo sobre a aplicação do agregado reciclado de concreto em construção de pavimentos**. 122p. Dissertação (Mestrado) - Escolha de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2011.

VALLE, N. **Utilização de solos residuais saprolíticos na pavimentação rodoviária em Santa Catarina**. 1994. 189 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Santa Catarina, 1994.