

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**JOÃO VICTOR PESTANA SANTIAGO**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA REUTILIZAÇÃO DE MATERIAL  
FRESADO PROVENIENTE DA BR-135**

SÃO LUÍS  
2016

**JOÃO VICTOR PESTANA SANTIAGO**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA REUTILIZAÇÃO DE MATERIAL  
FRESADO PROVENIENTE DA BR-135**

Projeto de monografia que deverá ser apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA para análise.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho

SÃO LUÍS

2016

Santiago, João Victor Pestana.

Análise da Viabilidade Técnica da Reutilização de Material Fresado Proveniente da BR-135 / João Victor Pestana Santiago. – São Luís, 2016.

109 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2016.

Orientador: Profa. Dra. Maria Teresinha Medeiros Coelho.

1.Fresagem. 2.Pavimentação. 3.Misturas asfálticas. 4.Reciclagem.  
I.Título

CDU: 625.8

**JOÃO VICTOR PESTANA SANTIAGO**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA REUTILIZAÇÃO DE MATERIAL  
FRESADO PROVENIENTE DA BR-135**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil, da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, para obtenção do grau de Bacharel.

Aprovada em: 13 / 07 / 2016

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Profa. Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho (Orientadora)**

Doutorado em Urbanismo  
Universidade Estadual do Maranhão

---

**Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana**

Doutorado em Engenharia de Transportes  
Universidade Estadual do Maranhão

---

**Prof. Me. Demerval Dias Ramos**

Mestrado em Administração  
Universidade Estadual do Maranhão

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder a vida, a saúde e todas as oportunidades.

Aos meus Pais, João Ferreira Santiago Filho e Vera Maria Pestana Santiago, por todos os ensinamentos, amor, carinho ao longo da minha vida.

A meu irmão, Marcus Vinícius Pestana Santiago, pela ajuda que sempre me fornece.

A toda minha família, que sempre me apoiou em todas as decisões.

A minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Teresinha de Medeiros Coelho, pelo auxílio e oportunidade para o desenvolvimento do estudo.

Ao Prof. Dr. Walter Canales Sant'Ana pelo suporte, fornecendo informações importantes para o desenvolvimento do estudo.

A construtora CBEMI pelo fornecimento dos materiais utilizados no estudo.

Aos amigos Bruno Henrique, Samuel Costa, Guilherme Barbosa e João Marinho que foram de grande importância para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos amigos do grupo de concreto: Hugo Leonardo, Gustavo Beckman, Vitor Hugo, Paulo Case.

A todas as amizades desenvolvidas ao longo do curso de engenharia civil.

## **RESUMO**

A pesquisa realizada tem a finalidade de abordar sobre a viabilidade da reutilização de material proveniente da fresagem da BR-135. A análise é realizada em misturas asfálticas, dessa forma tratando-se de uma técnica utilizada em pavimentação, a reciclagem. O objetivo do estudo é avaliar se o material fresado da BR-135 pode ser reutilizado para construção de novas estradas. Para iniciar a análise, foram obtidos os materiais necessários, e esses verificados, a partir de ensaios laboratoriais, se poderiam ser utilizados em misturas asfálticas recicladas com base nas normas do DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES (normas brasileiras de misturas recicladas a quente). Após os ensaios foram definidos duas misturas a serem analisadas, e as proporções de cada material que as compõe. Em seguida foram moldados corpos de provas (Cp's) com teores de 2,5% a 4,5% de cimento asfáltico de petróleo (CAP) e realizado ensaios neles para a determinação de suas características. A partir dos resultados, moldaram-se novos corpos de provas (CP's) nos teores ótimos de ligante (teor de projeto) e esses novamente analisados. Os resultados obtidos para as misturas asfálticas recicladas propostas mostraram-se insatisfatórios de acordo com as normas de reciclagem.

Palavras-chave: Fresagem. Reciclagem. Misturas asfálticas. Pavimentação.

## **ABSTRACT**

The objective in this conducted research is to approach the reuse viability of the material income pavement milling from the road BR-135. The analysis was conducted with asphalt mixtures and it is a technique used in paving, the recycling. The study's goal is to evaluate if the milled material from the BR-135 can be reused as a construction material of new roads. To start the analysis, it was obtained necessary materials and, these were verified through laboratory tests if they can be reused as an asphalt mixture based on the DNIT 033/2005 – ES and DNIT 034/2005 – ES regulations (Brazilian regulations about hot recycled mixtures). After the tests, two mixtures were defined to be analyzed and the proportion of each material that constitute them. Then, test specimens were molded with a Petroleum Asphalt Cement (PAC) percentage from 2.5% to 4.5% and they were tested to determine their characteristics. From the results, new test specimens were molded using an ideal binder (percentage of project) and these were analyzed again. The acquired results to the proposed recycled asphalt mixture, in accordance with the recycling regulations, were unsatisfactory.

Keywords: Milling. Recycling. Asphalt mixtures. Paving.

## SUMÁRIO

|                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>CAPÍTULO 01: INTRODUÇÃO.....</b>                           | <b>16</b> |
| <b>1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....</b>                        | <b>16</b> |
| <b>1.2 OBJETIVOS.....</b>                                     | <b>18</b> |
| <b>1.2.1 Objetivo geral .....</b>                             | <b>18</b> |
| <b>1.2.2 Objetivos específicos.....</b>                       | <b>18</b> |
| <b>1.3 JUSTIFICATIVA.....</b>                                 | <b>18</b> |
| <b>1.4 METODOLOGIA DA PESQUISA.....</b>                       | <b>19</b> |
| <b>1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....</b>                      | <b>20</b> |
| <b>CAPÍTULO 02: ASPECTOS GERAIS SOBRE PAVIMENTAÇÃO .....</b>  | <b>22</b> |
| <b>2.1 LIGANTES ASFÁLTICOS .....</b>                          | <b>22</b> |
| <b>2.1.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....</b>         | <b>22</b> |
| <b>2.1.2 Asfalto Diluído de Petróleo (ADP).....</b>           | <b>23</b> |
| <b>2.1.3 Emulsão Asfáltica de Petróleo (EAP) .....</b>        | <b>23</b> |
| <b>2.1.4 Agentes Rejuvenescedores.....</b>                    | <b>24</b> |
| <b>2.2 AGREGADOS.....</b>                                     | <b>24</b> |
| <b>2.2.1 Classificação dos Agregados .....</b>                | <b>24</b> |
| <b>2.2.1.1 Quanto à Natureza .....</b>                        | <b>25</b> |
| <b>2.2.1.2 Quanto ao Tamanho.....</b>                         | <b>25</b> |
| <b>2.2.1.3 Quanto à Distribuição dos Grãos .....</b>          | <b>26</b> |
| <b>2.3 TIPOS DE PAVIMENTO .....</b>                           | <b>27</b> |
| <b>2.3.1 Pavimento Rígido .....</b>                           | <b>27</b> |
| <b>2.3.2 Pavimento Flexível .....</b>                         | <b>28</b> |
| <b>2.3.3 Pavimento Semi-Rígido .....</b>                      | <b>28</b> |
| <b>2.4 REVESTIMENTO .....</b>                                 | <b>29</b> |
| <b>2.4.1 Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) .....</b> | <b>30</b> |
| <b>2.4.2 Pré-Misturado a Frio (PMF).....</b>                  | <b>30</b> |
| <b>CAPÍTULO 03: FRESAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS .....</b>   | <b>31</b> |
| <b>3.1 FRESAGEM .....</b>                                     | <b>31</b> |
| <b>3.2 TIPOS DE FRESAGEM .....</b>                            | <b>31</b> |
| <b>3.2.1 Quanto à espessura do corte .....</b>                | <b>32</b> |
| <b>3.2.1.1 Fresagem Superficial.....</b>                      | <b>32</b> |
| <b>3.2.1.2 Fresagem Rasa .....</b>                            | <b>32</b> |



|                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.1.3 Fresagem Profunda.....                                                | 32        |
| <b>3.2.2 Quanto à Rugosidade Resultante na Pista .....</b>                    | <b>33</b> |
| 3.2.2.1 Fresagem Padrão.....                                                  | 33        |
| 3.2.2.2 Fresagem Fina .....                                                   | 33        |
| 3.2.2.3 Microfresagem.....                                                    | 34        |
| <b>3.3 TIPOS DE EQUIPAMENTOS DE FRESAGEM .....</b>                            | <b>35</b> |
| <b>3.3.1 Equipamentos de Fresagem de Pequeno Porte .....</b>                  | <b>35</b> |
| <b>3.3.2 Equipamentos de Fresagem de Médio Porte .....</b>                    | <b>35</b> |
| <b>3.3.3 Equipamentos de Fresagem de Grande Porte.....</b>                    | <b>36</b> |
| <b>CAPÍTULO 04: RECICLAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS .....</b>                 | <b>37</b> |
| <b>4.1 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS.....</b>                                      | <b>37</b> |
| <b>4.2 CLASSIFICAÇÃO .....</b>                                                | <b>38</b> |
| <b>4.2.1 Reciclagem à Quente .....</b>                                        | <b>39</b> |
| 4.2.1.1 Reciclagem a Quente In Situ .....                                     | 39        |
| 4.2.1.2 Reciclagem a Quente em Usina.....                                     | 40        |
| <b>4.2.2 Reciclagem a Frio.....</b>                                           | <b>42</b> |
| 4.2.2.1 Reciclagem a Frio In Situ .....                                       | 43        |
| 4.2.2.2 Reciclagem a Frio em Usina .....                                      | 44        |
| <b>CAPÍTULO 05: MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                  | <b>45</b> |
| <b>5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....</b>                                        | <b>45</b> |
| <b>5.2 ENSAIOS LABORATORIAIS .....</b>                                        | <b>45</b> |
| <b>5.2.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....</b>                         | <b>45</b> |
| 5.2.1.1 Determinação da Penetração .....                                      | 45        |
| 5.2.1.2 Determinação do Ponto de Amolecimento – Método do Anel e Bola .....   | 46        |
| 5.2.1.3 Determinação da Viscosidade Saybolt-Furol.....                        | 48        |
| <b>5.2.2 Agregados Virgens.....</b>                                           | <b>49</b> |
| 5.2.2.1 Análise Granulométrica .....                                          | 49        |
| 5.2.2.2 Massa Específica do Agregado graúdo .....                             | 50        |
| 5.2.2.3 Massa Específica de Agregados Miúdos por Meio do Frasco Chapman ..... | 51        |
| 5.2.2.4 Determinação da Massa Específica pelo Frasco Le Chatelier .....       | 53        |
| 5.2.2.5 Índice de Forma .....                                                 | 54        |
| 5.2.2.6 Absorção do Agregado Graúdo .....                                     | 54        |
| 5.2.2.7 Adesividade a Ligante Betuminoso .....                                | 56        |
| 5.2.2.8 Determinação da abrasão “Los Angeles” .....                           | 57        |

|                                                                           |            |
|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.2.2.9 Equivalente de Areia .....                                        | 58         |
| <b>5.2.3 Material Fresado .....</b>                                       | <b>59</b>  |
| 5.2.3.1 Percentagem de Betume .....                                       | 60         |
| 5.2.3.2 Análise Granulométrica .....                                      | 61         |
| 5.2.3.3 Índice de Forma .....                                             | 61         |
| 5.2.3.4 Determinação da Massa Específica .....                            | 62         |
| <b>5.3 Dosagem e Moldagem dos Corpos de Prova (CP) .....</b>              | <b>63</b>  |
| <b>5.3.1 Dosagem Marshall.....</b>                                        | <b>63</b>  |
| 5.3.1.1 Estabilidade Marshall .....                                       | 67         |
| 5.3.1.2 Resistência a Tração por Compressão Diametral .....               | 68         |
| 5.3.1.3 Desgaste Cântabro.....                                            | 70         |
| <b>CAPÍTULO 06: RESULTADOS .....</b>                                      | <b>71</b>  |
| <b>6.1 RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>                                    | <b>71</b>  |
| <b>6.2 ENSAIOS LABOTARORIAIS .....</b>                                    | <b>71</b>  |
| <b>6.2.1 Cimento Asfáltico De Petróleo (CAP) .....</b>                    | <b>71</b>  |
| <b>6.2.2 Agregados Virgens.....</b>                                       | <b>73</b>  |
| <b>6.2.3 Agregado Fresado.....</b>                                        | <b>82</b>  |
| <b>6.3 ENQUADRAMENTO GRANULOMÉTRICO .....</b>                             | <b>85</b>  |
| <b>6.4 ENSAIOS REALIZADOS NAS MISTURAS.....</b>                           | <b>87</b>  |
| <b>6.4.1 Resultado dos Ensaio Realizados na Mistura CAUQ – REC A.....</b> | <b>88</b>  |
| <b>6.4.2 Resultado dos Ensaio Realizados na Mistura CAUQ – REC B.....</b> | <b>91</b>  |
| <b>6.4.3 Resultados dos Ensaio Realizados nos Teores Ótimos .....</b>     | <b>94</b>  |
| <b>CAPÍTULO 07: CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES .....</b>                       | <b>96</b>  |
| <b>7.1 CONCLUSÃO .....</b>                                                | <b>96</b>  |
| <b>7.2 RECOMENDAÇÕES.....</b>                                             | <b>97</b>  |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                                    | <b>98</b>  |
| <b>APÊNDICES .....</b>                                                    | <b>102</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Distribuição granulométrica dos agregados.....                                                                | 26 |
| Figura 2 - Estrutura de Pavimento Rígido .....                                                                           | 27 |
| Figura 3 - Rodovia de Pavimento Rígido.....                                                                              | 27 |
| Figura 4 - Estrutura de Pavimento Flexível .....                                                                         | 28 |
| Figura 5 - Rodovia de Pavimento Flexível.....                                                                            | 28 |
| Figura 6 - Estrutura de Pavimento Semi-Rígido .....                                                                      | 29 |
| Figura 7 - Fresagem Padrão. ....                                                                                         | 33 |
| Figura 8 - Fresagem Fina.....                                                                                            | 34 |
| Figura 9 - Microfresagem .....                                                                                           | 34 |
| Figura 10 - Fresadora W 50, da Wirtgen.....                                                                              | 35 |
| Figura 11 - Fresadora PL 1000, da Dynapac.....                                                                           | 36 |
| Figura 12 - Fresadora W 1900, da Wirtgen.....                                                                            | 36 |
| Figura 13 - Esquema do equipamento de reciclagem a quente no local.....                                                  | 40 |
| Figura 14 - Esquema de Usina Gravimétrica.....                                                                           | 41 |
| Figura 15 - Esquema de Usina do tipo “Drum Mixer”. ....                                                                  | 42 |
| Figura 16 - Dispositivo de Reciclagem a Frio no Local .....                                                              | 44 |
| Figura 17 - Amostra para Penetração e Realização do Ensaio.....                                                          | 46 |
| Figura 18 - Anel com CAP e Conjunto Posicionado no Béquer com Água .....                                                 | 47 |
| Figura 19 - Realização do ensaio do Ponto de Amolecimento .....                                                          | 47 |
| Figura 20 - Realização do Ensaio de Viscosidade .....                                                                    | 48 |
| Figura 21 - Cesto Utilizado e Posicionado no Reservatório, para determinar a massa específica dos agregados graúdos..... | 51 |
| Figura 22 - Conjunto Água-agregado no Frasco Chapman.....                                                                | 52 |
| Figura 23 - Frasco Le Chatelier e Querosene .....                                                                        | 53 |
| Figura 24 - Amostra Imersa no ensaio de Absorção .....                                                                   | 55 |
| Figura 25 - Ensaio de Adesividade: mostra imersa em água após 72 horas .....                                             | 56 |
| Figura 26 - Máquina “Los Angeles” e Amostra pronta para ser passada na Peneira de 1,7 mm. ....                           | 57 |
| Figura 27 - Ensaio de Equivalente de Areia: conjunto proveta-pistão com agregado .....                                   | 59 |
| Figura 28 - Prato do Rotarex e Rotarex .....                                                                             | 60 |
| Figura 29 - Material Retido na Peneira de 12,7mm.....                                                                    | 61 |

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 30 - Medição das Dimensões do Agregado Fresado .....                                                      | 62 |
| Figura 31 - Determinação do volume da parte graúda (a) e realização da massa específica da parte miúda (b) ..... | 63 |
| Figura 32 - Dosagem Marshall: Controle da Temperatura de Compactação e Moldagem do CP.....                       | 65 |
| Figura 33 - Dosagem Marshall: Métodos de Determinação do Peso e do Volume dos CP's.....                          | 66 |
| Figura 34 - Prensa Marshall .....                                                                                | 68 |
| Figura 35 - Molde Específico para o Rompimento da Resistência a Tração .....                                     | 69 |
| Figura 36 - CP's Após 300 Rotações da Máquina “Los Angeles” .....                                                | 70 |

## LISTA DE QUADROS

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 - Tipos de Reciclagem.....                                                                      | 38 |
| Quadro 2 - Série de peneiras utilizadas na granulometria .....                                           | 50 |
| Quadro 3 - Classificação da Forma das Partículas de acordo com a ABNT NBR 6954/1989 .....                | 54 |
| Quadro 4 - Resultados do ensaio de penetração para o CAP 50/70.....                                      | 71 |
| Quadro 5 - Resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento .....                                           | 72 |
| Quadro 6 - Resultados do ensaio de Viscosidade Saybolt-Furol .....                                       | 72 |
| Quadro 7 - Temperaturas Utilizadas .....                                                                 | 72 |
| Quadro 8 - Características do CAP utilizado.....                                                         | 73 |
| Quadro 9 - Granulometria da Brita 0 .....                                                                | 74 |
| Quadro 10 - Granulometria da Brita 1 .....                                                               | 75 |
| Quadro 11 - Granulometria do Pó de Brita.....                                                            | 76 |
| Quadro 12 - Granulometria da Areia .....                                                                 | 77 |
| Quadro 13 - Granulometria da Fíler .....                                                                 | 78 |
| Quadro 14 - Médias para Classificação da Brita 1 em Relação a Forma.....                                 | 79 |
| Quadro 15 - Resultados Obtidos a Partir do Princípio de Arquimedes.....                                  | 79 |
| Quadro 16 - Resultados Obtidos a Partir do Ensaio de Absorção.....                                       | 79 |
| Quadro 17 - Resultados da Abrasão a “Los Angeles” para os agregados graúdos ..                           | 80 |
| Quadro 18 - Resultados da massa específica dos agregados miúdos.....                                     | 80 |
| Quadro 19 - Resultados obtidos do equivalente de areia.....                                              | 80 |
| Quadro 20 - Resultado da Massa Específica do Fíler .....                                                 | 81 |
| Quadro 21 - Características dos Agregados Graúdos.....                                                   | 81 |
| Quadro 22 - Características dos Agregados miúdos.....                                                    | 82 |
| Quadro 23 - Resultados do Ensaio de Extração de Betume .....                                             | 82 |
| Quadro 24 - Granulometria do material fresado com betume .....                                           | 83 |
| Quadro 25 - Granulometria do material fresado sem betume .....                                           | 83 |
| Quadro 26 - Classificação do material fresado em relação a forma.....                                    | 84 |
| Quadro 27 - Massa Específica do Agregado Fresado.....                                                    | 84 |
| Quadro 28 - Faixas Granulométricas de Acordo com as Normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES ..... | 85 |
| Quadro 29 - Proporção de Materiais para Mistura CAUQ – REC A .....                                       | 86 |
| Quadro 30 - Proporção de Materiais para Mistura CAUQ – REC B .....                                       | 87 |

|                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Quadro 31 - Análise dos Cp's da Mistura CAUQ – REC A.....                                                                                      | 88  |
| Quadro 32 - Resultados obtidos a partir do ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral (CAUQ – REC A) .....                        | 90  |
| Quadro 33 - Comparação entre os parâmetros exigidos pelas normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES e a Mistura CAUQ – REC A.....         | 90  |
| Quadro 34 - Análise dos Cp's da Mistura CAUQ – REC B.....                                                                                      | 91  |
| Quadro 35 - Resultados obtidos a partir do ensaio de resistência a tração por compressão diametral (CAUQ – REC B) .....                        | 93  |
| Quadro 36 - Comparação entre os parâmetros exigidos pelas normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES e a Mistura CAUQ – REC A.....         | 93  |
| Quadro 37 - Comparação entre os Parâmetros das Normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES com as Misturas CAUQ – REC A e CAUQ – REC B..... | 94  |
| Quadro 38 - Desgaste Cântabro da Mistura CAUQ – REC A .....                                                                                    | 95  |
| Quadro 39 - Desgaste Cântabro da Mistura CAUQ – REC B .....                                                                                    | 95  |
| Quadro 40 .....                                                                                                                                | 106 |
| Quadro 41 .....                                                                                                                                | 108 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gráfico 1 - Curva Granulométrica da Brita 0 .....                                                         | 74  |
| Gráfico 2 - Curva Granulométrica da Brita 1 .....                                                         | 75  |
| Gráfico 3 - Curva Granulométrica do Pó de Brita .....                                                     | 76  |
| Gráfico 4 - Curva Granulométrica da Areia .....                                                           | 77  |
| Gráfico 5 - Curva Granulométrica do Fíler .....                                                           | 78  |
| Gráfico 6 - Granulometrias do material fresado.....                                                       | 84  |
| Gráfico 7 - Comparação entre a curva granulométrica da mistura CAUQ – REC A e os limites da Faixa B ..... | 86  |
| Gráfico 8 - Comparação Entre a curva granulométrica da mistura CAUQ –REC B e os Limites da Faixa B .....  | 87  |
| Gráfico 9 - Variação da estabilidade em função da variação do teor de CAP (CAUQ – REC A) .....            | 88  |
| Gráfico 10 - Variação da Dap em Função da Variação do Teor de CAP (CAUQ – REC A) .....                    | 89  |
| Gráfico 11 - Variação Vv em Função da Variação do Teor de CAP (CAUQ – REC A) .....                        | 89  |
| Gráfico 12 - Variação de Vv e de RBV em Função da Variação do Teor de CAP (CAUQ – REC A).....             | 89  |
| Gráfico 13 - Variação da Estabilidade em Função da Variação do Teor de CAP (CAUQ – REC B).....            | 91  |
| Gráfico 14 - Variação de Dap em Função da Variação do Teor de CAP (CAUQ – REC B) .....                    | 92  |
| Gráfico 15 - Variação de Vv em Função da Variação do Teor de CAP (CAUQ – REC B).....                      | 92  |
| Gráfico 16 - Variação de Vv e RBV em Função da Variação do Teor de CAP (CAUQ – REC B) .....               | 92  |
| Gráfico 17.....                                                                                           | 104 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                   |                                                        |
|-------------------|--------------------------------------------------------|
| %                 | -Por cento                                             |
| °C                | -Graus Celsius                                         |
| ABNT              | -Associação Brasileira de Normas Técnicas              |
| ANP               | -Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Energia   |
| CAP               | -Cimento Asfáltico de Petróleo                         |
| ADP               | -Asfalto diluído de Petróleo                           |
| CAUQ              | -Concreto Asfáltico Usinado à Quente                   |
| CAUQ – REC A      | -Concreto Asfáltico Usinado à Quente Reciclado A       |
| CAUQ – REC B      | -Concreto Asfáltico Usinado à Quente Reciclado B       |
| CBEMI             | -Construtora Brasileira e Mineradora Ltda              |
| CCT               | -Centro de Ciências Tecnológicas                       |
| cm                | -centímetro                                            |
| cm <sup>3</sup>   | -centímetro cúbico                                     |
| CNT               | -Confederação Nacional de Transporte                   |
| CONAMA            | -Conselho Nacional de Meio Ambiente                    |
| CP                | -Corpo de Prova                                        |
| Dap               | -Massa específica aparente da mistura                  |
| DNER              | -Departamento Nacional de Estradas de Rodagem          |
| DMT               | -Densidade Máxima Teórica                              |
| DNIT              | -Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes |
| EAP               | -Emulsão Asfáltica de Petróleo                         |
| ES                | -Especificação de Serviço                              |
| g                 | -gramas                                                |
| g/cm <sup>3</sup> | -gramas por centímetros cúbico                         |
| h                 | -horas                                                 |
| kgf               | -Quilograma-força                                      |
| km                | -Quilômetros                                           |
| LSP               | -Laboratório de Solos e Pavimentação                   |
| LABCOM            | -Laboratório de Concreto                               |
| ME                | -Método de Ensaio                                      |
| mm                | -milímetro                                             |
| MPa               | -Mega Pascal                                           |



|      |                                    |
|------|------------------------------------|
| N    | -Newton                            |
| NBR  | -Norma Brasileira                  |
| RBV  | -Relação Betume/Vazios             |
| SSF  | -Segundo Saybolt-Furol             |
| UEMA | -Universidade Estadual do Maranhão |
| VAM  | -Vazios do Agregado Mineral        |
| VCB  | -Vazios Com Betume                 |
| Vv   | -Volume de vazios                  |

## **CAPÍTULO 01: INTRODUÇÃO**

### **1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

No Brasil, pode-se observar que o modal rodoviário é o mais utilizado, sendo para transporte de cargas e de passageiros. De acordo com a CNT (2015), em relação à primeira finalidade há predominância de utilização pelas rodovias, de aproximadamente 61%. Já em relação à segunda, a predominância pela sua utilização é mais significativa, chegando em 95%. Desse modo pode-se observar a importância desse modal para o Brasil.

Ao longo da história pode-se observar que houve a criação de várias estradas pavimentadas no mundo. As origens das estradas pavimentadas datam entre 2600 – 2400 a. C., no Egito, porém essas não possuíam a finalidade do tráfego de veículos com rodas, mas trenós, e foram utilizadas para o transporte de cargas, para a construção das pirâmides.

Segundo Bernucci *et al.* (2006), existiram significativas estradas pavimentadas ao decorrer do tempo, cujas possuíam diversas finalidades, dentre elas podemos destacar, na Ásia Menor, a Estrada Real (500 a.C.), com mais de 2000 km de extensão, e além disso possuía postos de correio, pousadas e pedágios. Podemos observar também a Estrada da Seda, localizada no deserto do Taklimakan, na China, construída com a finalidade de comércio, dentre várias mercadorias, a seda era o que mais se destacava. Porém o comércio não era o único destaque dessa estrada, pois possuía também caráter religioso, para a propagação do budismo.

Destacam-se ainda as estradas construídas pelos romanos, consideradas de grande valor, pois possuíam um maior nível de planejamento, além disso, apresentavam um sistema de manutenção, possuindo vias de qualidade, e tinha um caráter militar para manutenção da ordem. Na América Latina, as estradas que merecem destaque ficam a cargo dos Incas.

No Brasil, apenas no início do séc. XX foi criada a primeira lei com intenção de dispor subsídio federal, para a criação de vias. Porém, apenas em 1920 foi criado um órgão público, a Inspetoria Federal de Obras contra as Secas, com o intuito de cuidar das implementações de rodovias, mas sem um fim rodoviário específico. Em 1934, ocorreu a criação do Departamento de Estradas de Rodagem,

órgão esse, que possuía autonomia técnica e administrativa. A primeira estrada de rodagem do Brasil teve início de sua construção em 12 de abril 1856, com o apoio de D. Pedro II, e sua conclusão ocorreu em 23 de julho de 1861 (DNIT, 2016).

Ao longo da evolução do processo de construções de pavimentos, foi-se buscando sempre encontrar formas de melhorá-los, sempre visando dois aspectos: econômico e estrutural, com o objetivo de obter uma estrutura com qualidade aceitável. Existe várias possibilidades na construção de um pavimento, dentre elas podemos destacar a reciclagem de pavimentos a partir de materiais provenientes de fresagem. De acordo com Bernucci *et al.* (2006), fresagem é a técnica responsável pelo corte parcial ou total da camada de revestimento asfáltico.

A reutilização desse material é interessante, pois isso é um dos princípios da “política dos 3 R’s” da sustentabilidade, esse nome é devido a se basear em três princípios, sendo eles: reduzir, reutilizar e reciclar. A reciclagem funciona, pois os componentes dos pavimentos asfálticos envelhecidos, mesmo após a fresagem, os agregados, ainda possuem perfeitamente suas características físicas e mecânicas, enquanto o ligante possui alteração em suas características, porém isso sendo facilmente resolvido. A partir disso pode-se observar que esse material pode ser utilizado como matéria prima para desse modo sofrer as transformações necessárias para ser usado novamente como componente de novos pavimentos asfálticos. (BERNUCCI *et al.*, 2006).

A fresagem é uma operação que depende muito de máquinas de grande porte, que são especializadas nesse tipo de operação, sendo necessária mão de obra especializada para sua operação, com isso deve-se analisar o custo para sua execução, possuindo um sistema de planejamento adequado para a sua realização. Além disso, existem vários tipos de fresadora, desse modo deve-se determinar o tipo de serviço, para assim determinar qual o tipo de equipamento que mais se adequa ao serviço.

No Brasil, já foram realizadas obras de reciclagem de pavimentos asfálticos com a utilização de material fresado, pode-se destacar as restaurações de aproximadamente 56 km da BR-116 pela empresa Terrabrás e a reciclagem de 400 mil metros cúbicos da BR-135, em Minas Gerais, pela empresa Paulivan (CIBER, 2010). De acordo com a M&T: Materiais e Tecnologia (2011), no Maranhão, ocorreu a restauração de cerca de 251 Km da BR-010 pela empresa Construmil, onde utilizou-se 15% de material reciclado na composição da mistura asfáltica.

Com base no que foi exposto até o momento, esse projeto busca responder os seguintes questionamentos: É possível que ocorra a reutilização de materiais fresados para a construção de novos pavimentos asfálticos? Esses novos pavimentos possuem características aceitáveis tanto físicas como mecânicas? É realmente viável a sua reutilização?

O presente estudo tem a finalidade de esclarecer os questionamentos propostos, visando colaborar cientificamente para futuros estudos de aplicação do material que será analisado.

Para o estudo proposto será utilizado material fresado da rodovia BR-135, obtido na obra de sua duplicação no trecho compreendido entre as cidades de São Luís – MA e Rosário – MA.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Avaliar a possibilidade da reutilização de asfalto fresado da BR-135 para a construção de novas estradas, apresentando características aceitáveis pelo DNIT.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Avaliar em laboratório, por meio de ensaios realizados, os materiais reciclados;
- Analisar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas com material fresado;
- Determinar traços adequados para a utilização do material fresado;
- Propor teores ótimos de ligante para as misturas estudadas.

## **1.3 JUSTIFICATIVA**

A partir do Art. 2º, da Resolução 307 do CONAMA, podemos compreender que reciclagem é um processo a qual se reutiliza resíduos que foram submetidos a alguma transformação. Para a pavimentação, esse é um processo

significativo, já que o seu objetivo é restaurar em condições viáveis, os pavimentos, tanto da perspectiva técnica como econômica.

Atualmente vivemos em um mundo o qual possui recursos em grandes escala para a construção de uma estrada pavimentada, possuindo numerosas jazidas. Porém devemos observar que esses materiais, se não forem conservados ficarão escassos e devido a sua exploração, afetarão o meio ambiente. Nesse aspecto o processo de fresagem é de grande importância, pois consiste na retirada do material dos pavimentos asfálticos e, dessa forma, se possível, reutilizar esse material para a construção de novos pavimentos.

É de grande valor lembrar sobre o aspecto financeiro da construção de pavimentos a partir de material fresado, pois, com a utilização do mesmo, os gastos com os insumos diminuirão, já que serão necessárias quantidades menores desses, apenas para a correção do material fresado, para assim obter características mecânicas adequadas para a aplicação em estradas.

Apesar de existir na natureza uma grande quantidade de materiais, há locais que para se obtê-los, existe certa dificuldade. Nesses casos, a reutilização de material fresado seria uma possibilidade, podendo ser vantajoso a sua utilização, uma vez que apresente uma boa qualidade e custo menor.

No Brasil existe uma grande quantidade de estradas, sendo que as federais, conhecidas como BR, são as mais utilizadas, e as que possuem maior tráfego de veículos com altas cargas. Partindo disso é de fundamental importância analisar, se as características do material fresado possuem o necessário para a seu reaproveitamento na pavimentação asfáltica.

## **1.4 METODOLOGIA DA PESQUISA**

Essa pesquisa almeja alcançar os objetivos propostos, tendo como embasamento teórico um estudo bibliográfico e um estudo experimental realizado em laboratório.

O estudo bibliográfico foi realizado a partir de pesquisa de literatura científica sobre o assunto, analisando os pontos necessários para o desenvolvimento da pesquisa, e fazendo os fichamentos dos pontos principais das mesmas, buscando demonstrar os pontos principais para reutilização do material fresado.

O estudo experimental ocorreu no laboratório de Solos e Pavimentação (LSP), localizado no Centro de Ciências Tecnológicas (CCT), no campus Paulo VI, da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA). Nele serão realizados os ensaios de caracterização do material e a moldagem de corpos de provas, com objetivo de se obter suas características mecânicas. Após a sua realização, foram analisados os resultados, e então elaborado a redação final.

## **1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

O presente trabalho busca alcançar suas metas, procurando informações, desenvolvendo os pontos principais sobre o assunto, argumentando de forma científica, e assim chegando a suas conclusões.

Inicialmente, foi desenvolvido em 7 (sete) capítulos, dispostos da seguinte forma:

O capítulo 01 apresenta a introdução, elencando de forma sucinta sobre o tema, apresentando um breve histórico sobre a pavimentação e demonstrando os objetivos buscados e a metodologia de elaboração.

O capítulo 02 aborda sobre pavimentação, tentando evidenciar o que é um pavimento, as suas características. Abordará brevemente sobre revestimentos asfálticos e seus componentes.

O capítulo 03 discorre sobre a fresagem, pois para a reciclagem de pavimentos esse é um procedimento importante, deve-se abordar o conceito, os tipos de fresagem, os equipamentos utilizados, e demonstrando a sua importância.

O capítulo 04 discorre sobre a reciclagem de pavimentos asfálticos, apresentando os procedimentos, os tipos, os equipamentos e as suas vantagens.

O capítulo 05 apresenta a metodologia do estudo, contendo os ensaios que foram realizados em laboratório, demonstrando os procedimentos para sua realização e os equipamentos necessários. Dentre os ensaios que serão realizados podemos destacar: granulometria, porcentagem de betume, índice de forma, equivalente areia, compressão, tração, entre outros.

O capítulo 06 apresenta os resultados dos ensaios realizados que foram comentados no capítulo anterior, tecendo comentários sobre os resultados e em seguida, classifica-los.

O capítulo 07 apresenta as conclusões obtidas a partir desse estudo e recomendações para estudos futuros.

Ao final será expostos as referências utilizadas para a elaboração desse trabalho.

## **CAPÍTULO 02: ASPECTOS GERAIS SOBRE PAVIMENTAÇÃO**

### **2.1 LIGANTES ASFÁLTICOS**

Os ligantes asfálticos são materiais betuminosos, que tem sua origem da destilação do petróleo. São utilizados na pavimentação por apresentar características termoviscoplasticas, impermeáveis a água e pouco reativo. Porém ao longo do tempo sofrem processo de envelhecimento, por oxidação, quando em contato com ar e água (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Esses materiais são encontrados de diferentes formas no mercado brasileiro, dentre elas podemos destacar: cimento asfáltico de petróleo (CAP), asfalto diluído de petróleo (ADP), emulsão asfáltica de petróleo (EAP) e agentes rejuvenescedores (BERNUCCI *et al.*, 2006).

#### **2.1.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)**

Para se analisar e compreender o CAP deve-se ficar claro que suas propriedades físicas estão associadas à sua temperatura, devido a disposição em que suas moléculas se encontram. Esse material, em temperaturas muito baixas, apresenta-se quase em estado sólido, devido a dificuldade de interação entre suas moléculas, evitando o seu movimento. Com a elevação da temperatura, ocorre essa movimentação, e desse modo, em altas temperaturas, os CAP's se comportam como líquido. Essa transformação é reversível a medida que diminui a temperatura, voltando ao estado sólido (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Para sua classificação deve ser observada principalmente 2 características: viscosidade e dureza. Na primeira, a temperatura é de grande importância, pois para analisar o CAP é necessário a realização de ensaios, esses com a finalidade de observar a sua viscosidade em diferentes temperaturas, ou seja, a faixa de temperatura em que ocorre a transição sólido-líquido. Na segunda, também são realizados ensaios, através da penetração de uma agulha padrão. Atualmente, nas especificações brasileiras, é apresentado da seguinte forma: inicialmente aparece seu nome, seguido pela faixa de penetração. Ex: CAP 50-70 (PETROBRAS, 2016).



### 2.1.2 Asfalto Diluído de Petróleo (ADP)

Asfaltos diluídos são produtos que se originam da adição de um diluente volátil (solvente) ao CAP. O solvente utilizado também é um derivado do petróleo e sua função é baixar a viscosidade do CAP, e desse modo utilizar em temperatura ambiente (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Os ADP's são utilizados em pavimentação para a realização de serviços de imprimação da base dos pavimentos (GRECA, 2016). Eram utilizados também na realização de tratamentos superficiais, mas por motivos de segurança e ambientais, parou de utiliza-los devido à emissão de hidrocarbonetos (BERNUCCI *et al.*, 2006).

A classificação dos ADP's ocorre de 2 (duas) maneiras. A primeira em relação à perda de voláteis, e depende da velocidade de evaporação do solvente, podendo ser de cura rápida (CR) ou média (CM). A segunda em relação ao início da faixa de viscosidade.

### 2.1.3 Emulsão Asfáltica de Petróleo (EAP)

Uma emulsão é uma mistura onde se encontram 2 (dois) líquidos que não se misturam (imiscíveis). Em relação às emulsões asfáltica esses líquidos são a água e o CAP. Para que ocorra a produção delas para a utilização em temperaturas ambientes, é necessária a adição de um agente emulsificante, o que permite que glóbulos de CAP fiquem em suspensão na água e dessa maneira não se misturarem (BETUNEL, 2016a).

Emulsões asfálticas são utilizados basicamente em 2 tipos de serviços em pavimentação: por penetração e mistura. No primeiro caso, são representados por tratamentos superficiais (simples, duplos ou triplos) e capa selante. E em relação ao segundo pelos serviços de lama asfáltica, microrrevestimento e reciclagem in situ (BERNUCCI *et al.*, 2006).

De acordo com as especificações brasileira, a classificação das emulsões são feitas, analisando 3 (três) fatores: do tempo necessário para ocorrer a ruptura, podendo ser lenta, média ou rápida; do teor de asfalto presente na emulsão; e da sua carga iônica (BERNUCCI *et al.*, 2006).

#### **2.1.4 Agentes Rejuvenescedores**

O CAP com o passar do tempo, ao envelhecer vai perdendo suas características elásticas e sofrendo enrijecimento. Uma maneira de recuperar a flexibilidade é a utilização de um produto químico, o agente rejuvenescedor, bastante utilizado em obras de reciclagem (BETUNEL, 2006b).

Para os processos de reciclagem a quente (usina ou in situ), são utilizados esses agentes, já nos processos a frio, é necessária a utilização de agentes rejuvenescedores emulsionados (BERNUCCI *et al.*, 2006).

### **2.2 AGREGADOS**

De acordo com a norma ABNT NBR 9935/2005, pode-se compreender que agregado é um material que não possui forma ou volume definido, que apresenta dimensões e propriedades necessárias para a produção de argamassas e de concreto.

Para a sua utilização em pavimentação, o agregado deve ser estudado em laboratório de forma a prevenir e analisar seu comportamento na estrutura do pavimento. O agregado utilizado deve apresentar características que suportem a ação das forças impostas na superfície e no interior do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Em vista da importância do conhecimento das características dos agregados, faz-se necessário saber informações sobre o tipo de rocha de origem, a sua composição, o tamanho das suas partículas, a abrasão, e a adesão do ligante a sua superfície, entre outras características.

#### **2.2.1 Classificação dos Agregados**

Existe uma grande quantidade de agregados que podem ser utilizados em revestimentos asfálticos, porém há necessidade que apresentem características específicas.

Quanto a sua classificação, pode-se analisá-los de acordo com 3 (três) critérios: quanto a sua natureza, em relação ao seu tamanho e em relação a disposição de seus grãos (BERNUCCI *et al.*, 2006).

### 2.2.1.1 Quanto à Natureza

Quanto à natureza, podem ser classificados como: natural, artificial ou reciclado (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Os naturais são obtidos a partir de processos tradicionais de desmonte, escavação ou dragagem. Apresentam-se de várias formas: pedregulhos, britas, areias e outros. Podem ser utilizados da maneira como são obtidos na natureza ou então podem passar por processos como a britagem, e são compostos de vários minerais (DNIT, 2006a)

Os artificiais são agregados que possuem origem a partir de processos industriais ou fabricados com o intuito de apresentar alto desempenho. Dentre eles podemos destacar: escória de alto-forno, argila calcinada e argila expansiva. Atualmente, os mais utilizados são as escórias, que se originam da indústria de aço, pois apresentam grande resistência ao atrito, porém podem apresentar dificuldade de expansão e heterogeneidade (DNIT, 2006a).

Os reciclados, como o próprio nome deixa claro, são agregados reutilizados, podendo ser de diversos materiais, dentre eles têm-se a reciclagem de revestimentos asfálticos. A utilização desses materiais tem aumentado com o passar do tempo devido a restrições ambientais. Pode-se também ocorrer reutilização a partir de resíduos provenientes da construção civil (BERNUCCI *et al.*, 2006).

### 2.2.1.2 Quanto ao Tamanho

Quanto ao tamanho, os agregados podem ser classificados em: graúdo, miúdo e material de enchimento (fíler).

Os agregados graúdos são os materiais que apresentam suas dimensões maiores que 2,00mm, ficando retido na peneira N° 10. Exemplo: britas, cascalhos e outros (SENÇO, 2007).

Miúdos são os agregados cujas dimensões são menores que 2,00mm e maiores que 0,075mm, ou seja, eles passam na peneira N°10 e ficam retidos na peneira N° 200. Exemplos: areia, pó de pedra e outros (SENÇO, 2007).

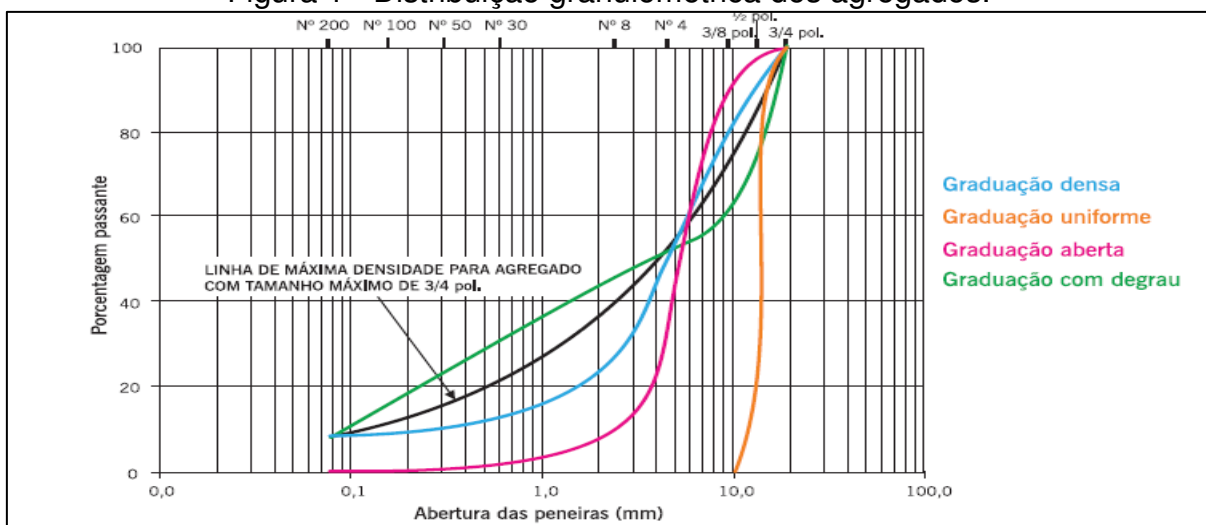
O material de enchimento ou fíler é o material em que pelo menos 65% de suas partículas são menores que 0,075mm, ou seja, passam na peneira N° 200. Exemplos: cal hidratada, cimento Portland e outros (DNIT, 2006a).

### 2.2.1.3 Quanto à Distribuição dos Grãos

A distribuição do tamanho das partículas de um agregado é bastante importante, pois ela influencia o modo como se comporta um revestimento. A distribuição da granulometria de um agregado geralmente é analisada por peneiramento, a qual é separada uma amostra seca do material e através de peneiras de diferentes tamanho é observado o quanto fica retido em cada uma. Segundo Bernucci *et al.* (2006), podem ser divididos em agregados de:

- Graduação densa ou bem graduados: eles possuem granulometria contínua bem distribuída, que se aproxima da densidade máxima (Figura 1);
- Graduação aberta: são materiais que possuem granulometria contínua, porém apresenta carência de finos, o que resulta em volume de vazios maiores (Figura 1);
- Graduação uniforme: são materiais que apresentam curva granulométrica bastante íngreme, apresentando as partículas em uma faixa estreita (Figura 1);
- Graduação com degrau ou descontínua: são materiais que apresenta pequena porcentagem de agregados com tamanho intermediário, apresentando um degrau (Figura 1).

Figura 1 - Distribuição granulométrica dos agregados.



Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

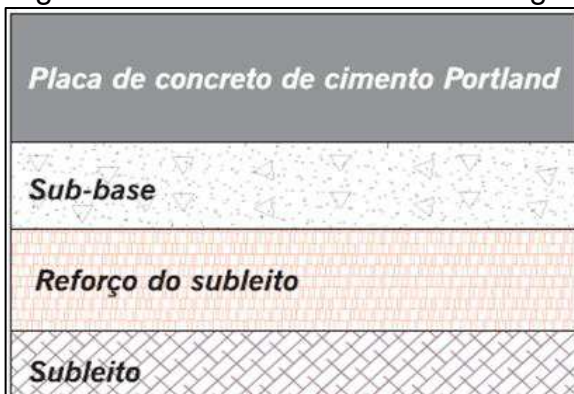
## 2.3 TIPOS DE PAVIMENTO

Todas as rodovias constituem de pavimentos formados por várias camadas, cada um possuindo espessuras diferentes, sendo dimensionadas de acordo com a necessidade. Essas camadas são construídas a partir superfície final de terraplenagem. Esse conjunto pode ser chamado de pavimento. Nele deve haver interação entre as camadas com o objetivo de resistir à ação das cargas geradas pela a ação do tráfego de veículos, as variações climáticas das regiões onde se localizam, além de ter que propiciar conforto, economia e segurança a quem utiliza-lo (BERNUCCI *et al.*, 2006). Basicamente os pavimentos são classificados de acordo com sua rigidez, podendo ser de três tipos: rígido, flexível e semirrígido (DNIT, 2006a).

### 2.3.1 Pavimento Rígido

Um pavimento é classificado como rígido (Figura 2), quando o seu revestimento apresenta elevada rigidez em comparação às camadas inferiores, evitando que os esforços causados pelas cargas dos veículos se propaguem a essas camadas. Este tipo de pavimento geralmente é associado a pavimentos compostos por concreto de cimento Portland (Figura 3), possuindo uma camada superficial desse componente, geralmente em forma de placas, que podem ser armadas por barras de aço, sendo apoiado por uma camada granular ou material cimentado, e esta sobre o subleito ou reforço do subleito, quando necessário (BERNUCCI *et al.*, 2006). Segundo Senço (2007), pavimentos rígidos são pouco deformáveis.

Figura 2 - Estrutura de Pavimento Rígido      Figura 3 - Rodovia de Pavimento Rígido



Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

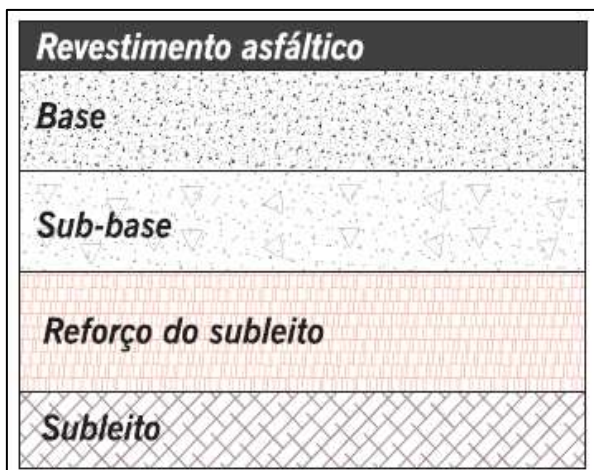


Fonte: ABCP (2012)

### 2.3.2 Pavimento Flexível

Um pavimento é classificado dessa forma quando todas as camadas do pavimento sofrem ação dos esforços das cargas causada pelos veículos, havendo distribuição dos esforços, de forma proporcional entre as camadas, gerando uma deformação elástica. Este tipo está, geralmente, associado a pavimentos asfálticos, e são basicamente formados por quatro camadas: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito (Figura 4 e Figura 5). Essas camadas são constituídas por materiais granulares ou solos, sem a presença de cimento. De acordo com as condições do tráfego e dos materiais pode-se haver a exclusão de alguma camada (BERNUCCI *et al.*, 2006). Segundo Senço (2007), até certo ponto, nesse tipo de pavimento as deformações não levam ao rompimento.

Figura 4 - Estrutura de Pavimento Flexível      Figura 5 - Rodovia de Pavimento Flexível



Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

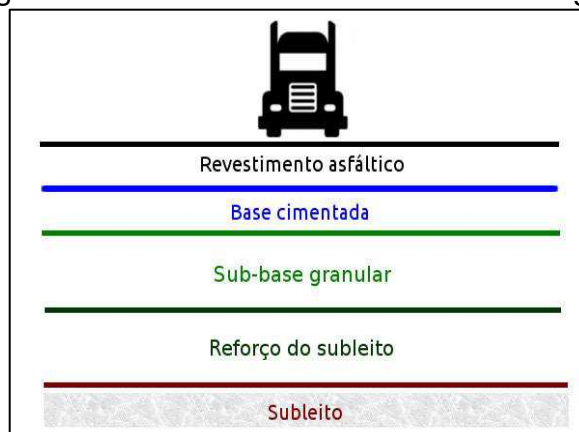


Fonte: ViaRondon (2012)

### 2.3.3 Pavimento Semi-Rígido

Um pavimento pode ser considerado como semi-rígido (Figura 6) quando é caracterizado por apresentar deformações maiores que de um pavimento rígido, porém menor do que um flexível. É caracterizado por apresentar camada de revestimento asfáltico sobre uma base ou sub-base que possui material cimentado (DNIT, 2006a).

Figura 6 - Estrutura de Pavimento Semi-Rígido



Fonte: E-Civil (2016)

## 2.4 REVESTIMENTO

Como exposto, o pavimento é uma estrutura formada por várias camadas, sendo a camada superior o revestimento. Essa é a que sofre mais a ação das cargas dos veículos e do clima, devendo ser o quanto possível impermeável, e resistente à ação dessas cargas (BERNUCCI *et al.*, 2006).

A partir da ABNT NBR 7207/82, podemos compreender que revestimento é a camada impermeável (tanto quanto possível), que recebe a ação dos veículos, que se destina, econômica e simultaneamente a melhorar as condições de rolamento, de comodidade e segurança, além de resistir aos esforços horizontais sofridos.

Os requisitos técnicos e de qualidade de um revestimento serão determinados a partir de um projeto e poderá ser produzido em usina fixa ou móvel. Sua classificação pode variar de acordo com o ligante utilizado, sendo a quente quando há a utilização de CAP, ou a frio com EAP (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Neste estudo destaca-se para os revestimentos a quente o CAUQ (concreto asfáltico usinado a quente) e para o frio o PMF (pré-misturado a frio), comumente utilizados com materiais fresados.

### **2.4.1 Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ)**

O CAUQ é uma mistura composta por uma granulometria continua e bem graduada, de forma a possuir poucos vazios devido aos agregados menores preencherem os vazios dos maiores (BERNUCCI *et al.*, 2006).

O CAUQ é uma mistura de agregados variados com diferentes tamanhos e CAP, com proporções determinadas em projeto, com base nas suas características volumétricas e mecânicas necessárias para a utilização em pavimentação, de acordo com o tipo de estrutura (ZUBARAN; MOTTA, 2015).

Esse tipo de revestimento é o mais usual no Brasil, sendo uma mistura resistente, contanto que sejam selecionados os materiais e dosados adequadamente. A norma DNIT-ES 031/2004, que apresenta as especificações necessárias para essa mistura.

Esse tipo de mistura pode ser utilizada em duas situações: para camada de rolamento (ou “capa”), sendo a camada que é destinada a receber diretamente a ação do tráfego, ou podendo ser utilizada como camada de ligação (binder), sendo essa a camada inferior a de rolamento.

### **2.4.2 Pré-Misturado a Frio (PMF)**

Os PMF's são misturas compostas por agregados misturados com EAP à temperatura ambiente. Esse revestimento pode ser utilizado em ruas de baixo volume de tráfego, ou em camadas de ligação e operações de manutenção e conservação de estradas (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Segundo Senço (2001) é um produto resultado da mistura de agregados graúdo e miúdos com ADP ou EAP, sendo realizada em usina, e espalhado e comprimido a frio.

Esse tipo de mistura pode ser aplicada de imediato ou podendo ser armazenada, caso seja devidamente protegida por lona da chuva. Segundo a Brasquímica (2016), esse material pode ser utilizado em até 5 dias após a usinagem, contanto que seja preservado a umidade.



## **CAPÍTULO 03: FRESAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

### **3.1 FRESAGEM**

Segundo Bonfim (2010), o termo fresagem, inicialmente, refere-se a uma técnica de desbaste ou corte de metais, ou outros, através de engrenagem motora que possui um cortador, movimentando-se de forma giratória contínua. Para pavimentos asfálticos, essa técnica está relacionada ao corte do pavimento (ou parte dele), através de máquinas especializadas, a uma determinada espessura, podendo o procedimento ser a frio ou a quente.

A fresagem a frio ocorre em temperatura ambiente, sem que ocorra o aquecimento do pavimento. Nesse tipo, há a quebra dos materiais, com isso alterando a sua granulometria. Na fresagem a quente, há o pré-aquecimento do pavimento, com isso a resistência ao corte é menor, não havendo grande mudança na granulometria do material.

A partir da fresagem pode-se retirar partes com defeitos dos pavimentos, sem que altere as sem defeitos. Ela tem como objetivos: a manutenção do greide da pista; a execução de remendos sem desníveis nas emendas; a correção de defeitos no pavimento; o nivelamento em relação aos pertences de concessionárias (BONFIM, 2010).

Ao ser realizado o processo de fresagem, deve-se ter cuidados, caso contrário, podem gerar defeitos indesejáveis, como é o caso de aparecimento de panelas (buraco) ou de degraus no pavimento.

Para o processo de reciclagem de pavimentos, a fresagem é de grande importância, pois pode ser considerada a sua etapa inicial, onde gera materiais que serão utilizados na reciclagem.

### **3.2 TIPOS DE FRESAGEM**

De forma básica a fresagem pode ser classificada em relação a dois critérios, são eles: quanto à espessura do corte e quanto à rugosidade resultante na pista, especificados nos itens a seguir (BONFIM, 2010).

### **3.2.1 Quanto à espessura do corte**

Quanto à espessura do corte, a fresagem pode ser classificada em três tipos: superficial, rasa ou profunda. Para esse tipo de classificação, não leva-se em conta o tipo de cilindro utilizado, porém quando se visa a aplicação de uma nova camada de revestimento, deve-se utilizar o cilindro padrão.

#### **3.2.1.1 Fresagem Superficial**

Este tipo de fresagem ocorre na superfície do pavimento, com o objetivo de corrigir os defeitos presente no mesmo, por isso sendo conhecida como fresagem de regularização. Após a sua realização, pode ser liberado para o tráfego de veículos, pois não há a necessidade de recapeamento do pavimento, já que apresenta superfície de rolamento segura, porém não muito confortável.

#### **3.2.1.2 Fresagem Rasa**

Esse tipo de fresagem geralmente atinge as camadas superiores do pavimento, podendo chegar à camada de ligação. Em média, o corte atinge à uma profundidade de cerca de 5 cm. É utilizado na correção de defeitos funcionais e remendos superficiais. Aplicado na correção do greide, em relação aos dispositivos de drenagem superficial e obras de artes.

#### **3.2.1.3 Fresagem Profunda**

Nesse tipo a fresagem possui espessuras de corte maiores, podendo atingir além do revestimento, outras camadas como a base e a sub-base. Esse procedimento tem como objetivo o aspecto estrutural, seja para a reconstrução da estrutura do pavimento ou a reciclagem e incorporação do revestimento a base. Com o objetivo funcional de restabelecer as condições ideais de funcionamento dos dispositivos de drenagem superficial, essa técnica é utilizada para corrigir o greide original do pavimento.

### 3.2.2 Quanto à Rugosidade Resultante na Pista

Em relação a rugosidade resultante na pista, pode-se classificar a fresagem em três tipos: padrão, fina e microfresagem. A rugosidade resultante está relacionada ao tipo de cilindro utilizado, além da velocidade de realização.

#### 3.2.2.1 Fresagem Padrão

O primeiro tipo de fresagem executado denominou-se de fresagem padrão (Figura 7). Recebe esse nome, pois o cilindro utilizado é o que geralmente é oferecido nos equipamentos de fresagem. A distância lateral entre os dentes presente nesse cilindro é de aproximadamente de 15 mm. Esse tipo de fresagem é utilizada quando se visa a aplicação de nova camada de revestimento.

Figura 7 - Fresagem Padrão.



Fonte: Bonfim (2010).

#### 3.2.2.2 Fresagem Fina

Esse tipo de fresagem foi introduzida posteriormente (Figura 8). Nesse tipo, a distância lateral dos dentes foi diminuída, apresentando aproximadamente 8 mm. Apresenta menor rugosidade em relação à padrão. É utilizada para a regularização das pistas. Algumas vezes pode-se dispensar posterior recapeamento do pavimento.

Figura 8 - Fresagem Fina.



Fonte: Bonfim (2010).

### 3.2.2.3 Microfresagem

Nesse tipo, os cilindros utilizados apresentam distâncias laterais, entre os seus dentes, menores, apresentando aproximadamente de 2 a 3 mm (Figura 9). Inicialmente esses cilindros, eram presentes apenas em fresadoras de pequeno porte. É ideal para a remoção de camadas delgadas do pavimento, que a retirada de faixas de sinalização horizontais. Nesse tipo não há a necessidade da aplicação de nova camada de revestimento.

Figura 9 - Microfresagem



Fonte: Bonfim (2010).

### 3.3 TIPOS DE EQUIPAMENTOS DE FRESAGEM

Para a realização da fresagem é necessário equipamentos especializados para esta finalidade, e essas são as fresadoras. Existem diversos fabricantes no mundo todo, existindo uma grande variedade de modelos. Geralmente, os modelos de fresadora estão relacionados à largura do cilindro fresador. As fresadoras podem ser subdivididas quanto ao tamanho em três tipos: pequeno, médio e grande porte (BONFIM, 2010).

#### 3.3.1 Equipamentos de Fresagem de Pequeno Porte

São os tipos cuja finalidade está relacionada a obras de fresagem de arremates (Figura 10). Sua principal utilização é a realização de fresagem em locais específicos, como: remendos, acabamentos ao redor de tampões de ferro e outros. Como exemplos desses tipos de equipamentos têm: BM 500/15, da Bomag; PL 350 S, da Dynapac; W 50, da Wirtgen (Figura 10); e outras. Possuem versatilidade, para a realização de manobras.

Figura 10 - Fresadora W 50, da Wirtgen.



Fonte: Bonfim (2010).

#### 3.3.2 Equipamentos de Fresagem de Médio Porte

Esses tipos de equipamentos são responsáveis por fresagem de pequenas e de grandes áreas. Não são apropriados para a realização de arremates,

mas também apresentam versatilidade, para a realização de manobras, como em ruas estreitas. Dentre os modelos podemos dar destaque à: PM 102, da Caterpillar Company; PL 1000 RS (Dynapac); W 1000 (Wirtgen); e outras.

Figura 11 - Fresadora PL 1000, da Dynapac.



Fonte: Bonfim (2010).

### 3.3.3 Equipamentos de Fresagem de Grande Porte

São equipamentos ideais para fresagem de grandes áreas, sendo indicados para ruas largas, grandes avenidas e, principalmente, rodovias. Devido ao seu tamanho deve-se evitar a realização de manobras. Dentre os modelos podemos destacar: PM 200, da Caterpillar; PL 2000 S, da Dynapac; W 1900, da Wirtgen (Figura 12); e outras.

Figura 12 - Fresadora W 1900, da Wirtgen.



Fonte: Bonfim (2010).

## **CAPÍTULO 04: RECICLAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

### **4.1 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS**

A partir de BERNUCCI *et al.* (2006), entende-se que reciclagem de pavimentos é a utilização de misturas asfálticas que estão envelhecidas, aproveitando-se dos agregados e ligantes presentes, oriundos da fresagem, para a produção de uma nova mistura asfáltica, com a adição de materiais novos, caso haja necessidade.

Em 1970, com a crise do petróleo, mais a crise econômica internacional, técnicos internacionais, em conjunto a organismos, voltaram-se a ideia da reutilização de materiais de pavimentos deteriorados através da reciclagem, de maneira que se restaurassem as condições de trafegabilidade a níveis satisfatórios, levando-se em conta os quesitos técnicos e financeiros (BONFIM, 2010).

Com o tempo, os pavimentos perdem suas características, pois se deterioram, havendo a necessidade de restaura-los, acrescentar novas camadas ou remover as existentes (a partir da fresagem), para assim, executar uma nova camada de revestimento. Isso ocorre com o objetivo de transformar o pavimento degradado em uma estrutura resistente, que possua capacidade de suportar o tráfego do local (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Com a utilização de material fresado na reciclagem, existem vários benefícios, pois como nele há agregados, evita-se, ou pelo menos, diminui a exploração de jazidas, em relação a uma mistura asfáltica composta apenas de materiais virgens, favorecendo a conservação do meio ambiente. Em relação ao ligante, há também uma redução, pois apesar do ligante presente no fresado estar envelhecido, com a adição de agentes há o reaproveitamento do ligante presente nesse material. Além desses benefícios há também a redução do custo, pois a mistura não será composta apenas de materiais novos (DNIT, 2006b).

Atualmente existem várias formas de restauração de pavimentos, sendo a reciclagem uma delas. Para a sua escolha e qual o tipo, deve-se analisar alguns critérios, dentre eles, destacam-se (DNIT, 2006b):

- Observação dos defeitos no pavimento;
- Determinação das causas prováveis dos defeitos, baseados em estudos de laboratórios e de campo;

- Custo;
- Informações de projeto e histórico das intervenções de conservação;
- Tráfego.

## 4.2 CLASSIFICAÇÃO

Existem vários tipos de reciclagem, e para a escolha do tipo deve ser observada alguns critérios. De acordo com o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos, do DNIT (2006b), pode-se destacar:

- Condições da superfície degradada (trincamento, desgastes, panelas, etc.);
- Qualidade do material;
- Disponibilidade de material virgem;
- Seção transversal do pavimento;
- Condições de remanejamento do tráfego;
- Disponibilidade de equipamento.

Os tipos de reciclagem se classificam de acordo com a temperatura e o local onde ocorre a reciclagem, sendo detalhados os tipos apresentados no Quadro 1:

Quadro 1 - Tipos de Reciclagem

| TIPOS DE RECICLAGEM      |           |          |           |          |
|--------------------------|-----------|----------|-----------|----------|
| EM RELAÇÃO A TEMPERATURA | À QUENTE  |          | À FRIO    |          |
| EM RELAÇÃO AO LOCAL      | "IN SITU" | EM USINA | "IN SITU" | EM USINA |

Fonte: Autor (2016)

Deverão ser realizados ensaios laboratoriais e de campo para determinação da composição dos materiais presentes no pavimento. Isso é de grande importância, pois permite o reconhecimento dos materiais virgens que mais se adequam aos materiais presente no pavimento. A partir disso deve ser estudada a melhor modalidade de reciclagem. Posteriormente, deve-se ser estudado o comportamento da mistura reciclada.



### 4.2.1 Reciclagem à Quente

A reciclagem a quente é um método pelo qual o revestimento asfáltico fresado é misturado a quente com agregados virgens, CAP, agente rejuvenescedor (se necessário) para a produção de uma nova mistura a quente. Esse processo pode ser realizado em usina ou no próprio local (KANDHAL & MALLICK, 1997 apud REIS, 2013).

No Brasil, a reciclagem a quente é regida por duas normas a: DNIT 033/2005 – ES e a DNIT 034/2005 – ES. Essas normas apresentam o procedimento em que parte ou toda a estrutura do revestimento é removida e reduzida para ser misturada a quente, em usina ou no próprio local (in situ). A mistura do material removido com materiais virgens devem atender os parâmetros propostos nas normas (DNIT, 2006b).

#### 4.2.1.1 Reciclagem a Quente In Situ

A reciclagem à quente in situ, também conhecida como termoregeneração, trata-se de um processo onde a reciclagem ocorre no próprio local, ou seja, na própria rodovia. Para a execução dessa técnica seja viável, é necessário que ao avaliar o pavimento seja reconhecido os tipos de defeitos, a condição estrutural e de drenagem de pavimento.

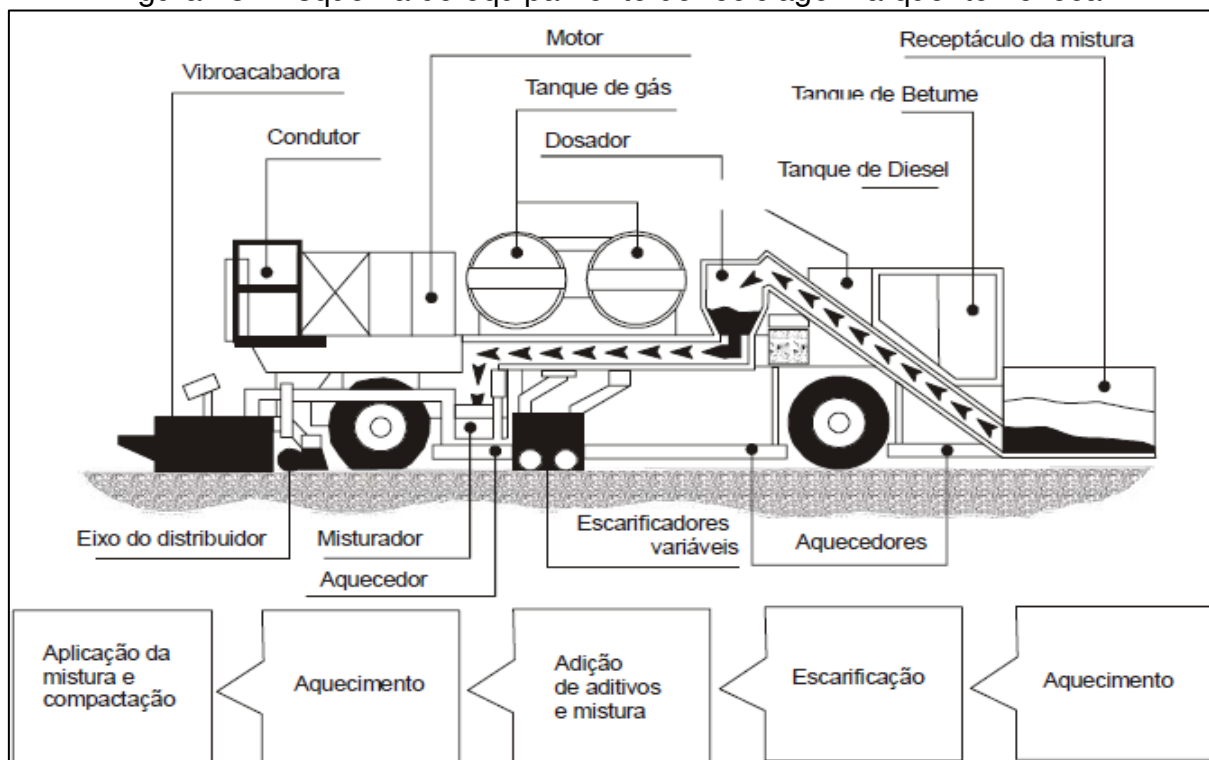
Pode-se entender, a partir do Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006b), que esse é um processo de correção de defeitos na superfície do pavimento, através do corte e fragmentação do revestimento antigo, com a adição de agente rejuvenescedor, agregados novos, e posteriormente, o espalhamento dessa mistura sobre o pavimento, sem que ocorra a remoção do material reciclado do seu local de origem.

A partir da década de 1980, ocorreu o incentivo por parte do DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), com a utilização de reciclagem in situ, e de dois métodos de fresagem, são eles (DNIT, 2006b):

- Método Marine: que consiste na utilização da fresadora Marine A.R.T. 220, que fresa a frio o pavimento. No equipamento há o processamento a quente do material e em seguida é espalhado.

- Método Wirtgen: Ocorre a utilização da Remixer da Wirtgen, em que a fresagem é realizada a quente (Figura 13).

Figura 13 - Esquema do equipamento de reciclagem a quente no local



Fonte: DNIT (2006b)

#### 4.2.1.2 Reciclagem a Quente em Usina

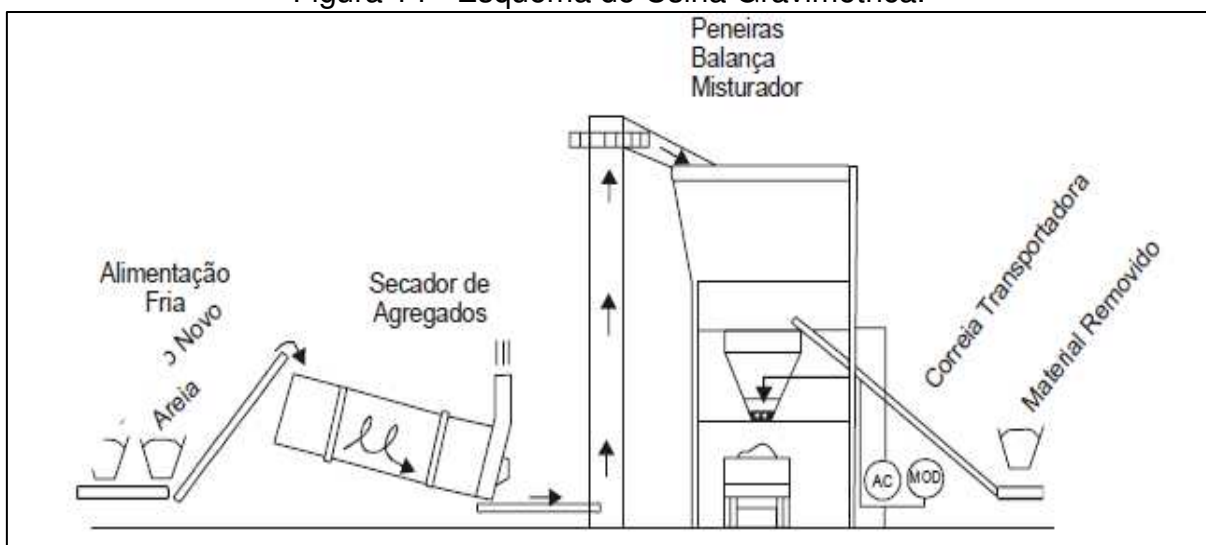
A reciclagem a quente em usina consiste em um método em que o pavimento asfáltico existente é removido parcialmente ou totalmente, através do processo de fresagem, dessa forma reduzindo o revestimento para que assim ele seja transportado para local de armazenamento, e posteriormente que seja reciclado em usina apropriada (DNIT, 2006b).

Quanto ao armazenamento desse material, é de grande importância que saiba a sua origem, se o material estocado seja oriundo de um ou mais locais. Caso o material fresado seja de fontes diferentes, deve-se ter cuidados ao misturá-lo quando estiverem combinados em uma única pilha (DNIT, 2006b).

Os tipos de usinas utilizadas para a reciclagem são dois: intermitentes (gravimétricas) ou usina do tipo “drum mixer” (DNIT, 2006b).

Nas usinas gravimétricas (Figura 14) o agregado virgem é seco e aquecido em um secador convencional, para depois ser peneirado e transportado ao misturador. Nesse tipo de usina, o material armazenado é introduzido no local de pesagem e ao mistura-lo com o agregado virgem, é seco pela troca de calor. O CAP e o agente rejuvenescedor (caso necessário) são adicionados à mistura de acordo com o projeto.

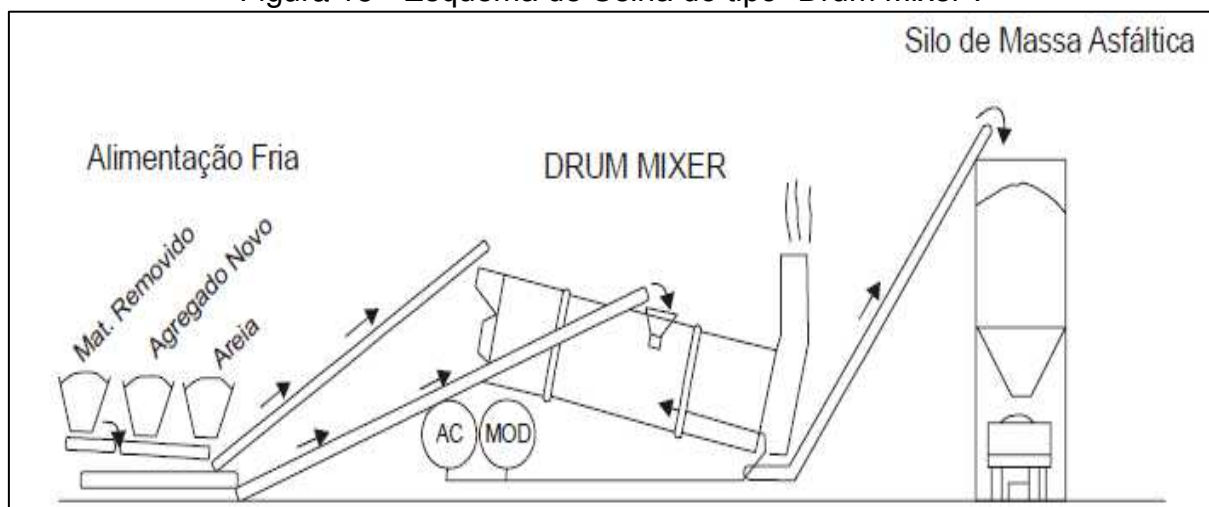
Figura 14 - Esquema de Usina Gravimétrica.



Fonte: DNIT (2006).

Segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006b), Quando se utiliza usinas do tipo “drum mixer” (Figura15) é necessário que ocorra alterações no tambor secador, pois se utiliza-lo do modo convencional, apesar de obter misturas recicladas satisfatórias, podem ocorrer de não atender a questão ambiental da qualidade do ar. Nesse tipo o agregado virgem é adicionado pela extremidade, onde é aquecido, enquanto o material armazenado é adicionado por uma entrada central. A transferência de calor entre os materiais ocorre quando ambos são combinados. Nessa fase são adicionados o CAP e o agente rejuvenescedor (caso necessário).

Figura 15 - Esquema de Usina do tipo “Drum Mixer”.



Fonte: DNIT (2006b).

Nesse tipo de reciclagem podem ser obtidos melhores resultados em relação ao controle de qualidade. Além de poder ocorrer a reparação da maioria dos defeitos dos pavimentos e melhoria estrutural.

#### 4.2.2 Reciclagem a Frio

Nesse tipo de reciclagem, na mistura do material reciclado pode ser acrescentado material betuminoso (EAP), agregados virgens, agentes rejuvenescedores ou estabilizantes químicos (cal, cimento ou cinza volante). A mistura final poderá ser utilizada em camada de base, revestida por tratamento superficial ou uma mistura asfáltica antes de submetida a ação tráfego (DNIT, 2006b).

Devido ao tipo de estabilizante utilizado, na adição ao material reciclado, esse tipo de reciclagem pode ser classificada em dois tipos, sendo eles: reciclagem com adição de material betuminoso e reciclagem com adição de estabilizante químico (DNIT, 2006b).

Na reciclagem a frio pode-se ser empregada a técnica de espuma de asfalto que consiste em uma mistura de água e CAP. Nessa técnica é adicionado ao CAP aquecido uma pequena quantidade de água à temperatura ambiente, gerando um aumento do volume do CAP por choque térmico. Esse procedimento deve ser realizado em câmara especial. O controle da espumação ocorre a partir de dois fatores: taxa de expansão (relação entre o volume máximo de CAP em estado de

“espuma” e o volume original de CAP) e meia-vida (tempo, em segundos, necessário para a espuma assentar até metade do seu volume máximo) (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Esse tipo de reciclagem apresenta significativa vantagem em relação à quente, pois a mistura ocorre em temperatura ambiente, não necessitando o aquecimento dos agregados. Isso acarreta outra vantagem, o de economia com energia.

Essa técnica é indicada principalmente para os seguintes casos (DNIT, 2006b):

- Em rodovias de baixo volume de tráfego (vicinais);
- Em acostamentos defeituosos de rodovias principais; e
- Na utilização do material reciclado como base estabilizada.

#### 4.2.2.1 Reciclagem a Frio In Situ

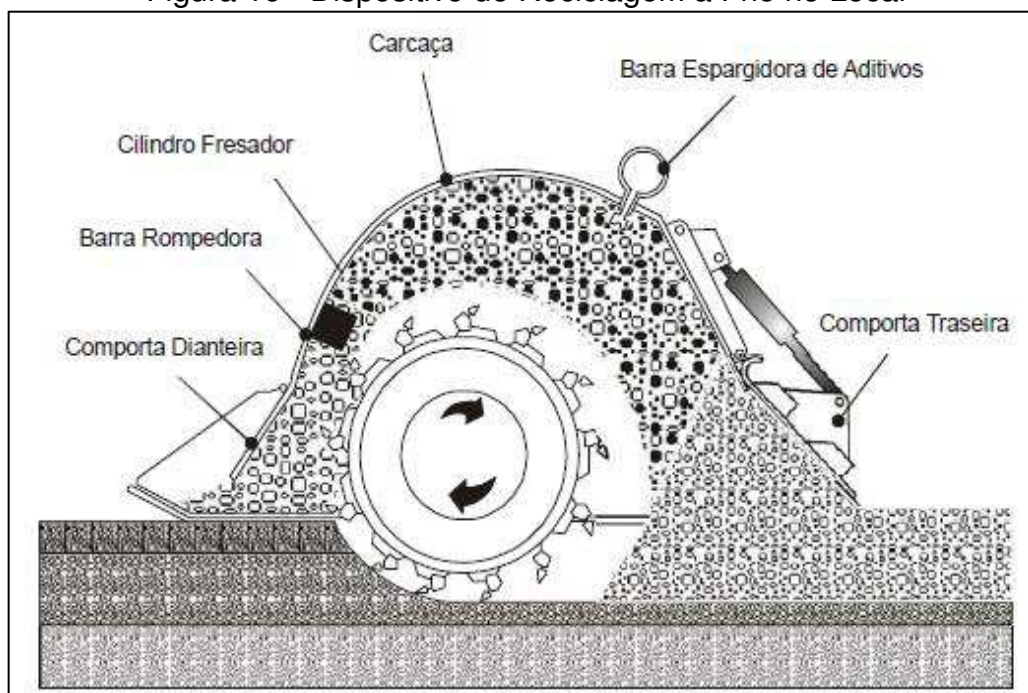
A fase inicial desse procedimento é a realização do rompimento do pavimento até a espessura determinada, geralmente realizada por fresagem, onde se diminui as partículas até o tamanho desejado.

A reciclagem pode ser parcial ou total. Quando parcial, a reciclagem acontece só no revestimento, tem o propósito de eliminação de problemas superficiais como: trincamentos por fadiga, irregularidade superficial e desgaste. Quando total refere-se a atingir a camada de base, além do revestimento, podendo ser utilizado emulsão, espuma de asfalto, cal hidratada ou cimento Portland (DAVID, 2006).

Normalmente para realização da reciclagem a frio in situ é utilizado apenas um equipamento, que realiza a fresagem e a estabilização da mistura com a adição dos materiais virgens necessários (Figura 16).

Existem algumas vantagens e desvantagens desse procedimento. Em relação à primeira, pode-se destacar: o material não necessita ser transportado para fora da rodovia; evita prolongada interrupção do tráfego; e o equipamento utilizado é mínimo e corrige rapidamente o pavimento. Já em relação ao segundo está relacionado ao controle de qualidade ser menor em relação ao procedimento realizado em usina (DNIT, 2006b).

Figura 16 - Dispositivo de Reciclagem a Frio no Local



Fonte: DNIT (2006b).

#### 4.2.2.2 Reciclagem a Frio em Usina

Na reciclagem a frio, realizada em usina, o material é removido da rodovia e transportado até a usina, onde é analisado e observado suas características. Com esse estudo é determinado a quantidade de material adicional necessário.

Segundo David (2006), a reciclagem a frio em usina é o processo de mistura do material removido com ligante novo, com agente de reciclagem (se necessário) e agregados virgens (se necessário).

O grande diferencial desse método é que com o transporte para usina o controle da qualidade da mistura é maior do que a in situ, tornando-se uma grande vantagem para a escolha desse procedimento. Porém, com esse transporte há custos adicionais para reciclagem, exigindo um maior prazo para a realização do serviço (DNIT, 2006b).

## **CAPÍTULO 05: MATERIAIS E MÉTODOS**

### **5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Neste capítulo serão apresentados os materiais e método utilizados ao longo do desenvolvimento da pesquisa. Serão abordados os ensaios realizados para a caracterização dos materiais utilizados na composição de misturas asfálticas com material fresado. Apresentam-se também os ensaios realizados na própria mistura assim como o seu procedimento de moldagem.

### **5.2 ENSAIOS LABORATORIAIS**

#### **5.2.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)**

O CAP foi fornecido pela usina de asfalto da Prefeitura de São Luís. Ele é do tipo CAP 50/70. Os ensaios realizados foram:

- Determinação da Penetração (DNIT 155/2010 – ME);
- Determinação do Ponto de Amolecimento – Método do Anel e Bola (DNIT 131/2010 – ME);
- Determinação da Viscosidade Saybolt Furol (NBR 14950/2003).

##### **5.2.1.1 Determinação da Penetração**

O ensaio de penetração foi realizado com base na norma DNIT 155/2010 – ME. Segundo a mesma, penetração é a profundidade (em décimos de milímetros) que uma agulha padrão penetra verticalmente na amostra de ligante sob condições predeterminadas de tempo, carga e temperatura.

Para esse ensaio as condições foram temperatura a 25° C, tempo de penetração de 5s e a carga de 100g. Para realização do ensaio foi colocada uma amostra de CAP em um recipiente e mantido a temperatura ambiente de 25°C. A agulha padrão foi devidamente limpa e colocada no penetrômetro. A amostra é posicionada abaixo da agulha, e essa colocada sobre a superfície da amostra. Em seguida pressiona-se uma haste por 5 segundos (Figura 17).

Em cada amostra o ensaio deve ser realizado três vezes, em locais diferentes, sendo que a cada realização a agulha deve ser devidamente limpa, para que assim o procedimento seja realizado novamente.

O valor da penetração é determinado por duas leituras (inicial e final), a partir do penetrômetro. A leitura inicial é aquela que o penetrômetro indica quando a agulha está posicionada na superfície da amostra. A leitura final é a indicada após a penetração de 5s. O valor da penetração é calculado a partir da equação:

$$P = L_f - L_i$$

Onde:

- P – Penetração da agulha padrão, em décimo de milímetro;
- Lf – Leitura inicial no penetrômetro, em decimo de milímetro;
- Li – Leitura final no penetrômetro, em decimo de milímetro;

Figura 17 - Amostra para penetração e realização do ensaio



Fonte: Autor (2016)

A penetração final da amostra é calculada pela média aritmética dos valores obtidos a partir das três realizações.

#### 5.2.1.2 Determinação do Ponto de Amolecimento – Método do Anel e Bola

A partir de Bernucci *et al.* (2006), é possível entender que o ponto de amolecimento de um ligante asfáltico é uma medida empírica que relaciona a



temperatura que o ligante amolece quando aquecido, a condições peculiares, e atinge a uma determinada situação de escoamento.

O ensaio é realizado com base na norma DNIT 131/2010 – ME. Para a realização desse ensaio o CAP foi aquecido e colocado em dois anéis. Após isso, espera-se cerca de 30 minutos, para o material resfriar. Os anéis são posicionados em suportes de latão (Figura 18), e acoplados a uma base metálica, e sobre cada um deles uma esfera metálica. Em seguida, são inseridos em um béquer preenchido com água. No conjunto posiciona-se um termômetro de mercúrio (Figura 19).

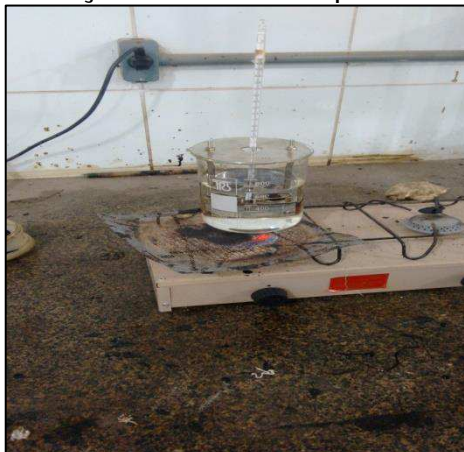
O conjunto é aquecido, e a medida que isso ocorre o CAP amolece e se aproxima da base. A temperatura de ponto de amolecimento é determinada quando o CAP dos dois anéis toca a base metálica. Essa é observada a partir do termômetro, não devendo a diferença de 2°C entre as duas amostras.

Figura 18 - Anel com CAP e Conjunto Posicionado no Béquer com Água



Fonte: Autor (2016)

Figura 19 - Realização do ensaio do ponto de amolecimento



Fonte: Autor (2016)

### 5.2.1.3 Determinação da Viscosidade Saybolt-Furol

Para a determinação da viscosidade do CAP foi utilizado o viscosímetro Saybolt – Furol, método mais difundido no Brasil. Esse ensaio é regido pela norma NBR 14950/2003. O método consiste no comportamento do ligante a diferentes temperaturas, para se analisar o seu comportamento de transição entre as fases de sólido e líquido (BERNUCCI *et al.*, 2006)

Para a realização do ensaio ocorreu a utilização de três temperaturas, escolhidas a partir da norma, sendo elas: 135° C, 150°C e 177°C. Inicialmente o óleo térmico do viscosímetro foi aquecido, até as temperaturas indicadas. Em seguida o CAP pré-aquecido é colocado no equipamento. O viscosímetro apresenta um orifício para a passagem do ligante, após atingir a temperatura ideal para realização do ensaio o orifício que inicialmente estava vedado, é liberado permitindo a passagem do CAP até um recipiente que possui uma marcação de 60 ml (Figura 20). A viscosidade é obtida a partir do tempo, em segundos, para que o CAP atinja a marcação delimitada no recipiente. Por isso a unidade do ensaio é chamada de segundos Saybolt–Furol ou simplesmente SSF.

Após a realização do ensaio nas três temperaturas é elaborado um gráfico composto pela SSF X Temperatura. Esse gráfico é de grande importância para misturas asfálticas, pois a partir dele se obtém as temperaturas que se deve utilizar para a produção das misturas. Para a escolha das temperaturas são utilizados intervalos de SSF definidos por norma.

Figura 20 - Realização do Ensaio de Viscosidade



Fonte: Autor (2016)

### 5.2.2 Agregados Virgens

Nesse trabalho, refere-se aos agregados virgens, os que não foram obtidos pela fresagem, ou seja, os agregados graúdos, miúdos e de enchimento.

Os agregados graúdos e miúdos foram fornecidos pela Construtora Brasileira e Mineradora Ltda. (CBEMI), e foram transportados até o LSP em sacos de estopa. Enquanto o material de enchimento, ou fíler, foi disponibilizado pelo Laboratório de Concreto e Materiais (LABCOM) da UEMA.

Os ensaios realizados nos agregados graúdos (Brita 0 e Brita 1) foram:

- Análise granulométrica (DNER – ME 083/98);
- Massa específica do agregado graúdo (Princípio de Arquimedes);
- Índice de forma (ABNT NBR 7809/2006);
- Absorção do agregado graúdo (DNER – 081/98);
- Adesividade a ligante betuminoso (DNER – 078/94);
- Determinação da abrasão “Los Angeles” (DNER – 035/98);

Os ensaios realizados nos agregados miúdos foram:

- Análise granulométrica (DNER – 083/98);
- Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman (DNER – 194/98);
- Equivalente de areia (DNER – 054/97);

Os ensaios realizados no material de enchimento ou fíler foram:

- Análise granulométrica (DNER – 083/98);
- Determinação da massa específica pelo frasco Le Chatelier (DNER – 085/94);

A seguir são apresentados com detalhes cada um dos ensaios mencionados.

#### 5.2.2.1 Análise Granulométrica

A granulometria de um material é de grande importância. Ela influencia diretamente no comportamento do revestimento. Essa análise é baseada na norma do DNER – ME 083/98.

A granulometria é analisada por um grupo de peneiras, organizadas de modo que, as de maior malha sejam seguida pelas de menor, e a ultima peneira seguida por um fundo. Para análise, uma amostra devidamente seca e pesada é colocada na peneira superior. O peneiramento ocorreu de modo manual, agitando-se o conjunto de peneiras.

Após a realização do ensaio, o material retido em cada peneira foi pesado, e posteriormente acumulado. Dessa maneira é possível calcular as porcentagens passantes em cada peneira. Posteriormente, após ser calculado as porcentagens é criado a curva granulométrica dos materiais.

A série de peneiras escolhidas, baseado nas normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/ 2005 – ES, estão apresentadas no Quadro 2:

Quadro 2 - Série de peneiras utilizadas na granulometria

| Peneira |       |
|---------|-------|
| #       | mm    |
| 2"      | 50,8  |
| 1 1/2"  | 38,1  |
| 1"      | 25,4  |
| 3/4"    | 19,1  |
| 1/2"    | 12,7  |
| 3/8"    | 9,5   |
| Nº 4    | 4,8   |
| Nº 10   | 2     |
| Nº 40   | 0,42  |
| Nº 80   | 0,18  |
| Nº 200  | 0,075 |

Fonte: Autor (2016)

#### 5.2.2.2 Massa Específica do Agregado graúdo

Para a determinação da massa específica da Brita 0 e da Brita 1, utilizou-se do princípio de Arquimedes. A partir desse princípio, é possível compreender que o volume de água deslocado por um sólido é numericamente equivalente ao volume do sólido.

Baseado nesse princípio, inicialmente um cesto metálico, foi preenchido com o material devidamente seco, para assim obter-se a massa seca do material. Em seguida, em um reservatório foi adicionado água, colocado sobre a balança e

tarado. O cesto preso em uma haste metálica é colocado na água e novamente tarado. Depois foi retirado da água e posicionado acima da água, e em seguida o material pesado anteriormente é inserido no cesto. Com o material, o cesto é novamente imerso na água. Deve-se ter cuidado para que o cesto não toque no fundo do reservatório. Após estabilizar o valor na balança, é anotado, sendo esse o volume do material (Figura 21).

Para a obtenção da massa específica utiliza-se a seguinte equação:

$$\mu = \frac{M_s}{V_d}$$

Onde:

- $\mu$  – Massa específica da amostra, em  $\text{g/cm}^3$ ;
- $M_s$  – Massa seca da amostra, em g;
- $V_d$  – Volume da amostra, em  $\text{cm}^3$ .

Figura 21 - Cesto Utilizado e Posicionado no Reservatório, para determinar a massa específica dos agregados graúdos.



Fonte: Autor (2016)

#### 5.2.2.3 Massa Específica de Agregados Miúdos por Meio do Frasco Chapman

Esse ensaio foi realizado nos agregados miúdos (pó de brita e areia). Ele é baseado na norma DNER – ME 194/98. A partir da norma entende-se que massa específica é a relação entre o agregado seco e o volume igual do sólido. Para a

determinação da massa específica por essa norma é necessário a utilização do frasco Chapman.

Para a realização do ensaio uma amostra do material foi seca em estufa, com temperatura de 110°C. Dessa amostra pesou-se 500 g. No Chapman foi inserido água até uma delimitação, de 200 cm<sup>3</sup>. Ao colocar a água é necessário que espere algum tempo para que a mesma escorra, presente nas faces internas do frasco. Em seguida, com o auxílio de um funil o material foi inserido cuidadosamente. São aplicadas pequenas batidas no fundo do frasco para retirar as bolhas de ar. Deve-se ter o cuidado para que não fique material aderido as faces internas. Ao final do processo, faz-se a leitura do nível atingido pela água, que indica o volume ocupado pelo conjunto água-agregado (Figura 22).

Figura 22 - Conjunto Água-agregado no Frasco Chapman



Fonte: Autor (2016)

Para a obtenção da massa específica do agrado miúdo é utilizado a seguinte equação:

$$\gamma = \frac{500}{L - 200}$$

Onde:

- $\gamma$  – Massa específica do agregado miúdo, em g/cm<sup>3</sup>;
- L – Leitura no frasco atingida pela água, em cm<sup>3</sup>.



#### 5.2.2.4 Determinação da Massa Específica pelo Frasco Le Chatelier

Esse ensaio é realizado em material finamente pulverizado, que no caso do estudo foi o fíler. É embasado pela norma DNER – ME 085/94. A determinação da massa específica por esse método ocorre por intermédio do frasco Le Chatelier (Figura 23).

Para a realização do ensaio é separada uma amostra de 60 g. No Le Chatelier é inserido querosene até atingir um nível que fique entre as graduações de 0 e 1 cm<sup>3</sup>. Em seguida anota-se o nível atingido (leitura inicial). A amostra de 60 g é cuidadosamente colocada dentro do frasco para o material não aderir na face interna do frasco. Aplicam-se movimentos giratórios no frasco para a eliminação de bolhas de ar. Ao fim do procedimento anota-se o nível atingido pelo querosene (leitura final).

Figura 23 - Frasco Le Chatelier e Querosene



Fonte: Autor (2016)

A massa específica é calculada pela seguinte equação:

$$\mu = \frac{60}{L_f - L_i}$$

Onde:

- $\mu$  – massa específica da amostra, em g/cm<sup>3</sup>;
- $L_f$  – Leitura inicial do nível de querosene, em cm<sup>3</sup>;
- $L_i$  – Leitura final do nível de querosene, em cm<sup>3</sup>.

#### 5.2.2.5 Índice de Forma

A forma das partículas dos agregados afeta a trabalhabilidade e a resistência ao cisalhamento e alteram a energia de compactação necessária para atingir determinada densidade (BERNUCCI *et al.*, 2006). Para a determinação da forma do agregado graúdo foi utilizado a norma ABNT NBR 7809/2006. Para a obtenção da forma utiliza-se o paquímetro.

Inicialmente peneirou-se uma amostra de brita 1 e a partir disso foram escolhidas as partículas que ficaram retidas na peneira de 9,5 mm e de malhas superiores. Com o auxílio do paquímetro mede-se três dimensões de cada partícula, sendo elas: comprimento (a), largura (b) e espessura(c). Ao total mediu-se 200 partículas. Ressalta-se que devido a quantidade passante de brita 0 na peneira de 9,5 mm o ensaio não foi realizado nesse material.

A determinação da forma é obtida pela média das razões b/a e c/b. Podendo ser classificado como, apresentados no Quadro 3:

Quadro 3 - Classificação da Forma das Partículas de acordo com a ABNT NBR 6954/1989

| Média das Relações b/a e c/b | Classificação da Forma |
|------------------------------|------------------------|
| $b/a > 0,5$ e $c/b > 0,5$    | Cúbica                 |
| $b/a < 0,5$ e $c/b > 0,5$    | Alongada               |
| $b/a > 0,5$ e $c/b < 0,5$    | Lamelar                |
| $b/a < 0,5$ e $c/b < 0,5$    | Alongada-Lamelar       |

Fonte: Apud Bernucci *et al.* (2006)

#### 5.2.2.6 Absorção do Agregado Graúdo

A porosidade de um agregado é indicada pela quantidade de água que ele absorve quando está imerso em água. Em agregados porosos também há absorção de ligante asfáltico, dessa forma não é indicado a utilização de agregados muito porosos, pois podem dificultar o estabelecimento da quantidade de ligante



necessário na mistura (BERNUCCI *et al.*, 2006). O ensaio é regido pela norma DNER – ME 081/98.

Para a realização do ensaio as amostras de agregados graúdos (brita 0 e brita 1) devem ser colocados na peneira de 4,8 mm, e então o material retido é lavado na peneira. Em seguida leva-se as amostras à estufa, com temperatura entre 105°C e 110°C. Após seco, retira-se o material da estufa e em temperatura ambiente deve esperar entre 1 h a 3 h para que o material resfrie. Quando frio, o material é pesado. Em seguida o material é imerso em água durante aproximadamente 24 h (Figura 24). Após esse período, escoar-se a água e então a amostra é colocada em um pano, para absorver a água, da superfície das partículas. Ao final desse procedimento a amostra é pesada novamente.

Figura 24 - Amostra Imersa no ensaio de Absorção



Fonte: Autor (2016)

A absorção é calcula pela seguinte equação:

$$A = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

Onde:

- A – Absorção da amostra, em %;
- $M_s$  – Massa da amostra seca; em g;
- $M_h$  – Massa da amostra após a secagem da superfície das partículas, em g.

#### 5.2.2.7 Adesividade a Ligante Betuminoso

A ação da água de retirar o ligante asfáltico da superfície do agregado pode torná-lo inadequado para a utilização em misturas asfálticas (BERNUCCI *et al.*, 2006). Para agregados graúdos o ensaio é realizado com base na norma DNER – ME 078/94.

Para o preparo da amostra a ser ensaiada são utilizadas as peneiras de 19 mm e 12,7 mm. O material é peneirado nessas duas peneiras, de modo que o valor da amostra a ser ensaiada seja de 500 g do material que passa pela peneira de 19 mm e fica retido na de 12,7 mm. Em seguida o material de ser lavado e colocado dentro de água destilada durante 1 (um) minuto. E com isso o material é levado a estufa com temperatura de 120°C e permanecendo durante 2 (duas) horas.

Após esse período, o ligante asfáltico e amostra são aquecidos a 120°C e a 100°C, respectivamente. Em seguida, à amostra de agregado é adicionado 17,5g de ligante, e misturados de modo que cubra toda a superfície das partículas da amostra. Com isso a amostra é colocada em uma superfície lisa afim que esfrie e posteriormente imersa em um béquer contendo água destilada. O béquer contendo a amostra deve ser colocado em estufa a 40°C, permanecendo durante 72 horas (Figura 25). Após esse período a amostra é retirada da estufa e a partir de uma análise visual é observado se houve desprendimento do ligante.

Figura 25 - Ensaio de Adesividade: mostra imersa em água após 72 horas



Fonte: Autor (2016)

#### 5.2.2.8 Determinação da abrasão “Los Angeles”

Os agregados graúdos devem ser resistentes a abrasão (quebras, degradação e desintegração). Eles estão sujeitos a isso durante o manuseio e construção dos revestimentos, além de quando afetados pelas forças de atuação geradas pelo tráfego (BERNUCCI *et al.*, 2006). Existem vários métodos de avaliação da resistência à degradação dos agregados, nesse estudo foi utilizada a norma DNER – ME 035/98, método que utiliza a máquina “Los Angeles” (Figura 26) para avaliação.

Para a realização do ensaio os materiais foram lavados e colocados em estufa para secarem, em temperatura entre 105°C e 110°C. A partir da norma, para a elaboração das amostras utilizou-se a graduação A para a brita 1 e graduação B para brita 0. Com base nas faixas, a amostra a ser ensaiada é pesada e inserida na máquina “Los Angeles”. Em seguida, também são inseridas esferas metálicas de acordo com a graduação escolhida, sendo para a A 12 e para B 11. A máquina, devidamente fechada, inicia movimentos de rotações. Após 500 rotações, todo o material é retirado de dentro da máquina, separando-se as esferas. Em seguida, todo o material é colocado na peneira de 1,7 mm, rejeitando tudo que passar. Então lava-se, na própria peneira, todo material que ficou retido nela. Após isso, o material é seco em estufa com temperatura entre 105°C e 110°C, durante o tempo de pelo menos 3 horas. Passado esse período, o material é retirado da estufa, e pesado quando estiver frio.

Figura 26 - Máquina “Los Angeles” e Amostra pronta para ser passada na Peneira de 1,7 mm.



Fonte: Autor (2016)

O valor do abrasão “Los Angeles” é calculado a partir da seguinte equação:

$$A_n = \frac{M_n - M'_n}{M_n} \times 100$$

Onde:

- $n$  – Graduação escolhida, de acordo com a norma;
- $A_n$  – Abrasão a Los Angeles da graduação  $n$ , em %;
- $M_n$  – Massa total da amostra colocada na máquina, em g;
- $M'_n$  - Massa da amostra lavada na peneira 1,7 mm, em g.

#### 5.2.2.9 Equivalente de Areia

O equivalente de areia tem como objetivo determinar a quantidade de material argiloso presente em amostras de agregado miúdo (BERNUCCI *et al.*, 2006). Para a determinação do equivalente é utilizado a norma DNER – ME 054/97.

O ensaio foi realizado nos agregados miúdos (pó de brita e areia). Para a execução do ensaio é utilizado apenas o material que passa na peneira de 4,8 mm, que deve ser colocado em uma capsula. O garrafão que contém a solução utilizada no ensaio é colocado a uma altura de 1m acima da mesa. Em seguida assopra-se um tubo presente no garrafão para que assim a solução seja colocada dentro de uma proveta até que atinja a marcação de 10 cm. Com isso o material é inserido, com auxílio de um funil, na proveta, devendo-se bater ao fundo da proveta para que sejam eliminadas as bolhas de ar. Após o material é deixado para descansar durante 10 minutos. Depois desse período a proveta é tampada e agitada horizontalmente durante 30 segundos.

A proveta é colocada em cima da mesa e então é lavado as suas faces internas, e a amostra é colocada para repousar durante 20 minutos. Após esse tempo mede-se, a partir da base da proveta, a altura da argila em suspensão. Depois um pistão é introduzido até o agregado assentar completamente, e então é medida a altura do agregado sedimentado (Figura 27).

O valor do equivalente areia é obtido a partir da seguinte equação:

$$EA = \frac{H_2}{H_1} \times 100$$

Onde:

- EA – Equivalente de areia da amostra, em %;
- $H_2$  – Altura da argila em suspensão, em cm;
- $H_1$  – Altura do agregado sedimentado, em cm;

Figura 27 - Ensaio de Equivalente de Areia: conjunto proveta-pistão com agregado



Fonte: Autor (2016)

### 5.2.3 Material Fresado

O material fresado tem origem da BR – 135, foi fornecido pela Construtora Brasileira e Mineradora Ltda. (CBEMI). Foi utilizado uma fresadora de médio porte da Wirtgen, a W1000, que realizou a fresagem de 5 cm do pavimento, caracterizando-a quanto a profundidade como rasa, e em relação a rugosidade é padrão. O material foi transportado em saco de estopa, e armazenado no laboratório de solos e pavimentação, onde foram realizados os seguintes ensaios:

- Percentagem de Betume (DNER – 053/98);
- Análise Granulométrica (DNER – 083/98);
  - Material com Betume;
  - Material sem betume;
- Classificação da Forma (ABNT NBR 7809/2005);
- Densidade (DNER – 194/98 e Princípio de Arquimedes);

### 5.2.3.1 Percentagem de Betume

O ensaio é realizado para determinar a percentagem de betume presente em uma amostra de mistura asfáltica. Esse ensaio é regido pela norma DNER – ME 053/ 94. Ele é realizado com o auxílio de um extrator centrífugo, o Rotarex elétrico.

Para a execução do ensaio, uma amostra de material é colocada na estufa a uma temperatura de 100°C a 120°C, durante um período de 1 hora. Retira-se o material, são desmanchados os grumos e então uma amostra de aproximadamente 1000g é pesada dentro do prato do Rotarex. Um papel de filtro é colocado sobre o prato, e posicionados no aparelho (Figura 28). Acrescenta-se cerca de 150 ml de solvente, que no caso foi a gasolina, e então fecha-se o aparelho e é esperado cerca de 15 minutos. Após esse tempo o Rotarex é ativado, inicialmente de forma lenta e aumentando a sua velocidade gradativamente, até que o solvente saia pelo tubo de escoamento do aparelho

. Inicialmente o solvente apresenta tonalidade escura devido a presença de betume. Após escoar todo o solvente, o aparelho é desligado e adicionado mais solvente novo. O processo é repetido até o solvente sair claro. Ao terminar a última carga de solvente, o prato, junto com o papel filtro, é retirado do Rotarex e levados a estufa com uma temperatura entre 80°C e 100°C, até que todo o solvente presente na amostra evapore. Quando a amostra tiver seca é pesada novamente.

Figura 28 - Prato do Rotarex e Rotarex



Fonte: Autor (2016).



Para obter-se o valor da percentagem de betume presente na amostra utiliza-se a seguinte equação:

$$P = \frac{P_t - P_s}{P_t}$$

Onde:

- P – Percentagem de betume da amostra;
- $P_t$  – Peso total da amostra ensaiada, em g;
- $P_s$  – Peso seco da amostra depois do Rotarex, em g.

#### 5.2.3.2 Análise Granulométrica

Para a realização da análise granulométrica desse material, foi dispensado todas as partículas retidas na peneira de 50,8 mm, pois não seria uma característica homogênea do material em estudo, dificultando a sua caracterização.

O procedimento utilizado é igual ao decorrido no item 5.2.2.1, sendo também baseado na norma DNER – ME 083/98. Nesse material foram realizado dois tipos de análise. A primeira sendo uma análise do material em seu estado natural, ou seja, com betume (Figura 29). Já a segunda foi analisada amostras do material após a extração do Rotarex, ou seja, sem betume.

Figura 29 - Material Retido na Peneira de 12,7mm



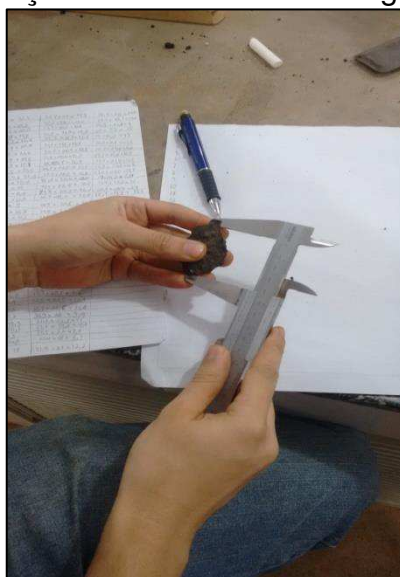
Fonte: Autor (2016)

#### 5.2.3.3 Índice de Forma

Assim como a análise granulométrica foi dispensado todo material foi dispensado todas as partículas retidas na peneira de 50,8 mm, pois não seria uma característica homogênea do material em estudo, dificultando a sua caracterização.

Para a determinação da forma do agregado fresado, método é o mesmo discorrido no item 5.2.2.5, devido a ser baseado na mesma norma a ABNT NBR 7809/2006. Dessa forma, sendo necessária a medição de três dimensões das partículas desse agregado, através do paquímetro (Figura 30).

Figura 30 - Medição das Dimensões do Agregado Fresado



Fonte: Autor (2016)

#### 5.2.3.4 Determinação da Massa Específica

Devido ao fato desse material ser uma composição de agregados graúdos e miúdos utilizou-se de duas normas. Para os graúdos o Princípio de Arquimedes e para os miúdos a norma DNER – ME 194/98.

Inicialmente separou-se os dois tipos de partículas, a partir da peneira de 4,8mm. Para o miúdo utilizou-se o frasco Chapman, procedimento esse descrito no item 5.2.2.3. Enquanto para o graúdo utilizou-se o cesto, método descrito no item 5.2.2.1 (Figura 31).

Para a determinação da massa específica utilizou-se de uma média ponderada com as porcentagens: 67% para o agregado graúdo e 33% para o agregado miúdo. Essas porcentagens foram adotadas a partir da granulometria do material fresado utilizado para a elaboração da mistura asfáltica.



Figura 31 - Determinação do volume da parte gráuda (a) e realização da massa específica da parte miúda (b)



Fonte: Autor (2016)

(a)

(b)

### 5.3 Dosagem e Moldagem dos Corpos de Prova (CP)

As misturas realizadas em estudo tratam-se de um CAUQ, que foram analisados a partir das normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES. Para a moldagem dos corpos de prova (CP) foi utilizado o método de dosagem Marshall.

Os Ensaio realizados nas misturas foram:

- Estabilidade Marshall;
- Tração por Compressão Diametral;
- Ensaio Cântabro.

#### 5.3.1 Dosagem Marshall

Para a realização desse ensaio na mistura é necessário a elaboração de CP' s. Para isso é necessário o estabelecimento das características da mistura estudada, devendo ser atendida as especificações das normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES. Algumas características a serem estudadas são: a faixa granulométrica, materiais utilizados e a determinação das suas proporções.

A dosagem Marshall é de grande importância, pois a partir dela pode-se calcular alguns parâmetros necessário para as misturas asfálticas, inclusive o teor ótimo de ligante, que é o teor utilizado no projeto (BERNUCCI *et al.* , 2006).

O ensaio de estabilidade Marshall é regido pela norma DNER – ME 043/95. Para a moldagem é necessário ter o conhecimento das temperaturas a que os componentes da mistura (agregados e ligante) e a temperatura de compactação. Essas temperaturas foram obtidas a partir do ensaio de viscosidade Saybolt-Furol realizado no ligante asfáltico.

Após o enquadramento granulométrico e as devidas proporções, os materiais devidamente secos são pesados de acordo com a sua proporção, de modo que a soma de agregados mais CAP, de uma amostra de 1200g para cada CP. Moldaram-se dois tipos diferentes de CAUQ reciclado, distintos em relação a composição da mistura.

O primeiro (CAUQ–REC A) contendo 70% de material fresado, baseado na granulometria do material em seu estado natural (com betume), porém quando os materiais que haviam sido pesados eram posteriormente aquecidos, ocorriam mudanças significativas na granulometria do material fresado, podendo obter um enquadramento granulométrico inadequado. O segundo (CAUQ–REC B) contendo 50% de fresado baseado no estudo de ZUBARAN e MOTTA (2015), sendo esse valor obtido a partir da granulometria do material após o Rotarex (sem betume), pois quando os materiais pesados eram aquecidos mudavam os tamanhos das partículas. Vale ressaltar que utilizou-se dessa granulometria (sem betume) apenas para questão de enquadramento, no entanto para a confecção dos CP's, utilizou-se o material sem passar no Rotarex (com betume).

Foram decididos 5 teores de CAP diferentes para a moldagem de cada tipo de CAUQ reciclado, sendo escolhido para ambos as seguintes porcentagens: 2,5%; 3,0%; 3,5%; 4,0%; 4,5%. A escolha desses teores foi obtida levando em consideração o CAP residual presente no agregado fresado.

Com isso definido foram moldados para cada CAUQ reciclado, 6 corpos de provas para cada teor de CAP, dessa forma totalizando 30 CP's para o CAUQ–REC A, e 30 CP's para o CAUQ–REC B. Dos 6 CP's, 3 são utilizados para obtenção da estabilidade Marshall e 3 para a resistência a tração por compressão diametral.

Em relação a moldagem, primeiro as amostras dos agregados devidamente pesadas era aquecidas em estufa. Em seguida eram transportadas para um fogão para ocorrer o aquecimento até a temperatura estabelecida na viscosidade. O CAP também era aquecido de acordo com a viscosidade. Ao chegar

nas devidas temperaturas é adicionado a quantidade CAP aos agregados, devendo-se misturá-los, durante 2 a 3 minutos, até que o CAP recubra todos os agregados. O molde metálico devidamente aquecido a uma temperatura de 100°C é posicionado, e então a mistura é inserida nele. Com o auxílio de uma espátula, acomoda-se a mistura dando 25 golpes. A compactação ocorreu em temperatura especificada a partir do ensaio de viscosidade, de forma manual, com auxílio do soquete, onde foi dado 75 golpes em cada face da mistura (Figura 32).

Figura 32 - Dosagem Marshall: Controle da Temperatura de Compactação e Moldagem do CP.



Fonte: Autor (2016)

Após 24 horas da moldagem os CP's foram desmoldados e calculados alguns parâmetros volumétricos utilizados na determinação do teor de ligando de projeto. Os parâmetros são: densidade aparente ( $D_{ap}$ ), densidade máxima teórica (DMT), volume de vazios ( $V_v$ ), vazios com betume (VCB), volume de agregado mineral (VAM) e relação betumes/vazios (RBV). Para a determinação desses parâmetros é necessário determinar o peso e o volume do CP pelo Princípio de Arquimedes (Figura 33). As equações a seguir apresentam como se determina os parâmetros.

$$D_{ap} = \frac{M_s}{V}$$

Onde:

- $M_s$  – Peso do CP, em g;
- $V$  – Volume do CP, em  $\text{cm}^3$ ;

$$DMT = \frac{100\%}{\frac{\%CAP}{D_{CAP}} + \frac{\%B_1}{\mu_{B1}} + \frac{\%B_0}{\mu_{B0}} + \frac{\%Pb}{\gamma_{Pb}} + \frac{\%F}{\mu_F} + \frac{\%Af}{\mu_{Af}}}$$

Onde:

- $M_s$  – Peso do CP, em g;
- $V$  – Volume do CP,  $cm^3$ ;
- $\%CAP$ ,  $\%B_1$ ,  $\%B_0$ ,  $\%Pb$ ,  $\%F$ ,  $\%Af$  – Porcentagem de CAP, brita 1, brita 0, Pó de brita, fíler e agregado fresagem, em relação a massa total da mistura;
- $D_{CAP}$  – Densidade relativa do CAP, em  $g/cm^3$ ;
- $\mu_{B1}$ ,  $\mu_{B0}$ ,  $\gamma_{Pb}$ ,  $\mu_F$ ,  $\mu_{Ag}$  – Massas específicas da brita 1, brita 0, pó de brita, fíler e Agregado fresado, em  $g/cm^3$ .

$$V_v = \frac{DMT - D_{ap}}{DMT}$$

$$VCB = \frac{D_{ap} \times \%CAP}{D_{CAP}}$$

$$VAM = V_v + VCB$$

$$RBV = \frac{VCB}{VAM}$$

Figura 33 - Dosagem Marshall: Métodos de Determinação do Peso e do Volume dos CP's



Fonte: Autor (2016)

Segundo Bernucci *et al.* (2006), para a determinação do teor ótimo existem 3 métodos obtidos a partir de gráficos elaborados contendo alguns parâmetros em função da variação do teor de CAP. O primeiro método consiste no teor de CAP correspondente a Vv igual a 4% (para camada de rolamento). O segundo, obtido a partir da média aritmética dos teores correspondente ao valor máximo de estabilidade Marshall, ao valor máximo da Dap e a Vv igual a 4%(camada de rolamento). O terceiro é obtido a partir dos valores de CAP correspondente aos máximos e mínimos, de acordo com a norma, de Vv e do RBV, onde se desprezam os valores extremos e faz-se a média aritmética dos valores intermediários. O método escolhido foi o de Vv igual a 4%, considerado o mais usual no Brasil (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Após a determinação dos teores ótimos correspondente a cada mistura, foram moldados mais 18 CP's, 9 para CAUQ–REC A e 9 para o CAUQ–REC B. Para cada grupo de 9, 3 foram realizados a estabilidade Marshall, 3 a resistência a tração por compressão diametral e 3 ao ensaio Cantabro.

#### 5.3.1.1 Estabilidade Marshall

Para a realização desse ensaio é necessário medir a altura e o diâmetro do CP. Para a altura mede-se 4 posições diferentes, e calcula-se a média aritmética. E para o diâmetro mede-se em 2 posições. Esse ensaio é regido pela norma DNER – ME 043/95, e utilizou-se a prensa Marshall automática (Figura 34) para o rompimento.

Inicialmente um banho maria é aquecido até uma temperatura de 60°C. Os corpos de prova ficam imersos em banho maria durante 30 a 40 minutos. Após esse tempo o CP é posicionado em molde apropriado e levado à prensa para o rompimento.

Figura 34 - Prensa Marshall



Fonte: Autor (2016)

Para a determinação da estabilidade Marshall utiliza-se a seguinte equação:

$$EM = L_p \times F_p \times F_h$$

Onde:

- EM – estabilidade Marshall, em kgf;
- $L_p$  – Leitura da prensa, em kgf;
- $F_p$  – Fator de correção da prensa;
- $F_h$  – Fator de correção em função da altura do CP.

O fator de correção em função da altura do CP ( $F_h$ ) é calculado a partir da seguinte equação:

$$F_h = 927,23 \times h^{-1,64}$$

Onde:

- $h$  – Média das alturas do Cp, em mm.

#### 5.3.1.2 Resistência a Tração por Compressão Diametral

Esse ensaio é regido pela norma DNIT 136/2010 – ME. Assim como a estabilidade Marshall é necessário medir a altura do CP em 4 posições distintas, e é adotado como altura a média aritmética entre elas, o mesmo acontecendo em



relação ao diâmetro, sendo necessário duas medições. Utiliza-se a prensa Marshall automática para o rompimento.

O ensaio consiste em colocar os CP's em um ambiente a 25°C durante o tempo de 2 horas. Como não havia um sistema de refrigeração controlada, os CP's foram colocados em uma sala em uma temperatura de 25°C. Já que o controle da temperatura é de grande importância no ensaio, um CP extra foi moldado e em seu centro criado uma abertura, possibilitando inserir um termômetro, para o controle da temperatura. Após o período de tempo, o CP é posicionado em um molde específico que possui dois frisos (Figura 35). Em seguida o CP é rompido.

Figura 35 - Molde Específico para o Rompimento da Resistência a Tração



Fonte: Autor (2016)

O cálculo do valor da resistência a tração ocorre por meio da equação a seguir:

$$\sigma = \frac{2F}{100\pi HD}$$

Onde:

- $\sigma$  – Resistência a tração, em Mpa;
- F – Carga de ruptura de acordo com o valor lido na prensa, em N;
- D – Média dos diâmetros do CP, em cm;
- H – Média das alturas do CP, em cm.

### 5.3.1.3 Desgaste Cântabro

O ensaio de desgaste Cântabro consiste na determinação da resistência à desagregação de misturas asfálticas (BERNUCCI *et al.*, 2006). Esse ensaio foi realizado apenas nos teores ótimos, sendo regido pela norma DNER–ME 383/99. Para sua realização é necessário da máquina “Los Angeles”.

Inicialmente, para a realização desse ensaio o CP deve ser pesado. Em seguida o CP é inserido na máquina “Los Angeles”, sem as cargas abrasivas, ou seja, sem as esferas metálicas. Após 300 rotações realizadas pela máquina o CP é retirado e pesado novamente (Figura 36).

Figura 36 - CP's Após 300 Rotações da Máquina “Los Angeles”



Fonte: Autor (2016)

Para a determinação do desgaste Cântabro utiliza-se a seguinte equação:

$$A = \frac{P - P'}{P} \times 100$$

Onde:

- A – Desgaste Cântabro, em %;
- P – Peso inicial do CP, em g;
- P' – Peso final do CP (após o ensaio), em g.



## CAPÍTULO 06: RESULTADOS

### 6.1 RESULTADOS E ANÁLISES

Nesse capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios realizados durante o estudo.

### 6.2 ENSAIOS LABOTARORIAIS

#### 6.2.1 Cimento Asfáltico De Petróleo (CAP)

O ligante utilizado na pesquisa foi o CAP 50/70, sendo realizados os ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade Saybol-Furol descritos no capítulo anterior. O valor da densidade desse material foi fornecido pela prefeitura. Os demais resultados apresentam-se a seguir.

Como exposto no capítulo anterior, o ensaio de penetração é realizado três vezes o ensaio em uma mesma amostra de ligante. Os resultados obtidos estão apresentados no Quadro 4:

Quadro 4 - Resultados do ensaio de penetração para o CAP 50/70

|           | Leitura Inicial - Li<br>(0,1 mm) | Leitura Final - Lf<br>(0,1 mm) | Penetração - P<br>(0,1 mm) |
|-----------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| 1º Ensaio | 108                              | 165                            | 57                         |
| 2º Ensaio | 227                              | 287                            | 60                         |
| 3º Ensaio | 204                              | 262                            | 58                         |
| Média     |                                  |                                | 58                         |

Fonte: Autor (2016)

A partir dele podemos observar que trata-se realmente de CAP cuja a especificação é 50/70, já que a média das realizações deu um resultado que está entre o intervalo de penetração de 50 a 70.

Quanto ao ensaio de ponto de amolecimento, também comentado anteriormente, foi realizado com duas amostras, sendo os resultados apresentados a no Quadro 5:

Quadro 5 - Resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento

|           | Temperatura de ponto de amolecimento (°C) |
|-----------|-------------------------------------------|
| Amostra 1 | 56                                        |
| Amostra 2 | 56                                        |
| Média     | 56                                        |

Fonte: Autor (2016)

Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), na especificação do CAP, em vigor desde 2005, apresenta que para o CAP 50/70 a temperatura mínima do ponto de amolecimento desse material é de 46°C, dessa forma o material estudado apresenta valor superior ao especificado.

No ensaio de viscosidade, utilizando a máquina Saybolt-Furol, obteve-se três temperaturas importante para a mistura, sendo: do ligante, de compactação e dos agregados. Para a do ligante, encontra-se a faixa de temperatura correspondente a 75 a 95 SSF. Para a de compactação a faixa de temperatura correspondente a 125 a 150 SSF. A temperatura do agregado é 10°C acima da do ligante. Como abordado no capítulo anterior o ensaio foi realizado em três temperaturas (135°C, 150°C e 177°C) e obteve-se o valor de SSF correspondente a elas, que são apresentadas no Quadro 6:

Quadro 6 - Resultados do ensaio de Viscosidade Saybolt-Furol

| Temperatura (°C) | Segundo Saybolt-Furol (SSF) |
|------------------|-----------------------------|
| 135              | 206                         |
| 150              | 64                          |
| 177              | 45                          |

Fonte: Autor (2016)

A partir dessas temperaturas criou-se o gráfico apresentado no Apêndice A, e com isso determinou-se as três temperaturas: do ligante, de compactação e dos agregados (Quadro 7).

Quadro 7 - Temperaturas Utilizadas

| Temperatura (°C) |     |
|------------------|-----|
| Ligante          | 155 |
| Compactação      | 140 |
| Agregado         | 165 |

Fonte: Autor (2016)

A partir desses ensaios foi possível caracterizar o ligante asfáltico utilizado na mistura, cujos resultados estão apresentados no Quadro 8, em comparação as do CAP 50/70 segundo a ANT.

Quadro 8 - Características do CAP utilizado.

| Ensaio realizado                    |       | Norma do ensaio  | Especificação brasileira de CAP (ANP,2005) | Característica do CAP Estudado |
|-------------------------------------|-------|------------------|--------------------------------------------|--------------------------------|
| Penetração: 100g, 5s à 25°C (0,1mm) |       | DNIT-ME 155/2010 | 50-70                                      | 58                             |
| Ponto de Amolecimento (°C)          |       | DNIT-ME 131/2010 | mín 46                                     | 56                             |
| Densidade relativa (g/cm³)          |       | DNER-ME 193/96   | -                                          | 1,03                           |
| Viscosidade Saybolt-Furol (SSF)     | 135°C | NBR 14950/2003   | mín 141                                    | 206                            |
|                                     | 150°C |                  | mín 50                                     | 64                             |
|                                     | 177°C |                  | 30 a 150                                   | 45                             |

Fonte: Autor (2016)

A partir desse quadro podemos observar que o ligante analisado possui características adequadas dos ensaios realizados de acordo com as especificações da ANT.

### 6.2.2 Agregados Virgens

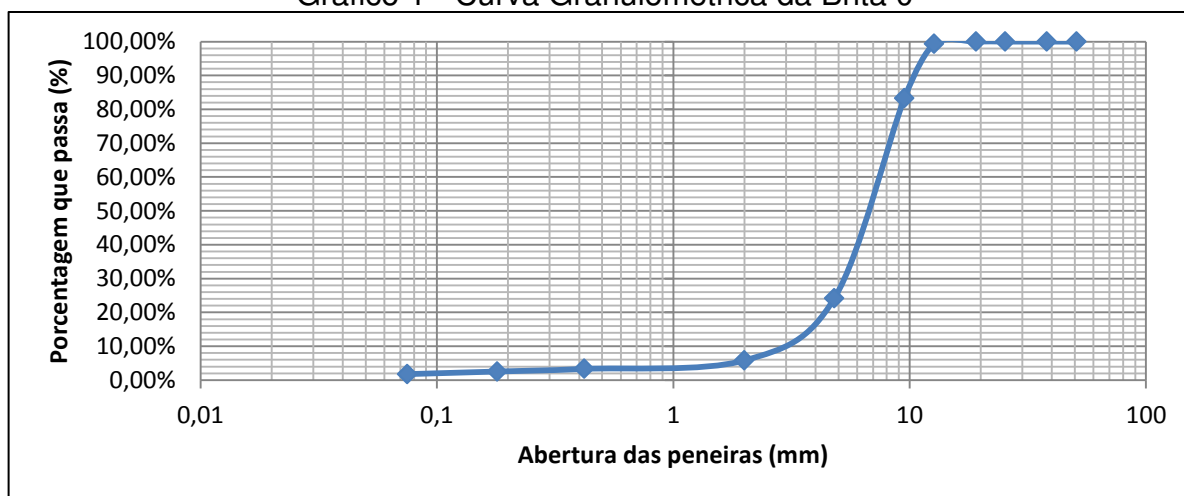
Os agregados virgens (novos) analisados para comporem as misturas foram: brita 0, brita1, pó de brita, areia e fíler. Com isso foram realizados para cada um, ensaios granulométricos (Quadros 9 ao 13) com base na norma DNER–ME 083/98, visando um futuro enquadramento das misturas. A partir dos resultados obtidos, foram elaboradas curvas granulométricas (Gráficos 1 ao 5), cujos dados estão demonstrados a seguir.

Quadro 9 - Granulometria da Brita 0

| Peneira             |       | Peso Retido<br>Parcial (g) | Peso Retido<br>Acumulado (g) | % Que<br>Passa |
|---------------------|-------|----------------------------|------------------------------|----------------|
| #                   | mm    |                            |                              |                |
| 2"                  | 50,8  | 0,0                        | 0,0                          | 100,0%         |
| 1 1/2"              | 38,1  | 0,0                        | 0,0                          | 100,0%         |
| 1"                  | 25,4  | 0,0                        | 0,0                          | 100,0%         |
| 3/4"                | 19,1  | 0,0                        | 0,0                          | 100,0%         |
| 1/2"                | 12,7  | 11,1                       | 11,1                         | 99,3%          |
| 3/8"                | 9,5   | 255,6                      | 266,7                        | 83,2%          |
| Nº 4                | 4,8   | 939,7                      | 1206,4                       | 24,1%          |
| Nº 10               | 2     | 291,6                      | 1498,0                       | 5,8%           |
| Nº 40               | 0,42  | 39,7                       | 1537,7                       | 3,3%           |
| Nº 80               | 0,18  | 12,3                       | 1550,0                       | 2,5%           |
| Nº 200              | 0,075 | 12,2                       | 1562,2                       | 1,8%           |
| Fundo               |       | 21,3                       | 1583,5                       |                |
| Peso da Amostra (g) |       |                            |                              | 1590,5         |

Fonte: Autor (2016)

Gráfico 1 - Curva Granulométrica da Brita 0



Fonte: Autor (2016)

Quadro 10 - Granulometria da Brita 1

| Peneira             |       | Peso Retido<br>Parcial (g) | Peso Retido<br>Acumulado (g) | % Que<br>Passa |
|---------------------|-------|----------------------------|------------------------------|----------------|
| #                   | mm    |                            |                              |                |
| 2"                  | 50,8  | 0,0                        | 0,0                          | 100,0%         |
| 1 1/2"              | 38,1  | 0,0                        | 0,0                          | 100,0%         |
| 1"                  | 25,4  | 0,0                        | 0,0                          | 100,0%         |
| 3/4"                | 19,1  | 375,1                      | 375,1                        | 80,2%          |
| 1/2"                | 12,7  | 1322,2                     | 1697,3                       | 10,6%          |
| 3/8"                | 9,5   | 178,3                      | 1875,6                       | 1,2%           |
| Nº 4                | 4,8   | 7,2                        | 1882,8                       | 0,8%           |
| Nº 10               | 2     | 0,2                        | 1883,0                       | 0,8%           |
| Nº 40               | 0,42  | 1,0                        | 1884,0                       | 0,7%           |
| Nº 80               | 0,18  | 2,7                        | 1886,7                       | 0,6%           |
| Nº 200              | 0,075 | 3,5                        | 1890,2                       | 0,4%           |
| Fundo               |       | 5,7                        | 1895,9                       |                |
| Peso da Amostra (g) |       |                            |                              | 1898,2         |

Fonte: Autor (2016)

Gráfico 2 - Curva Granulométrica da Brita 1



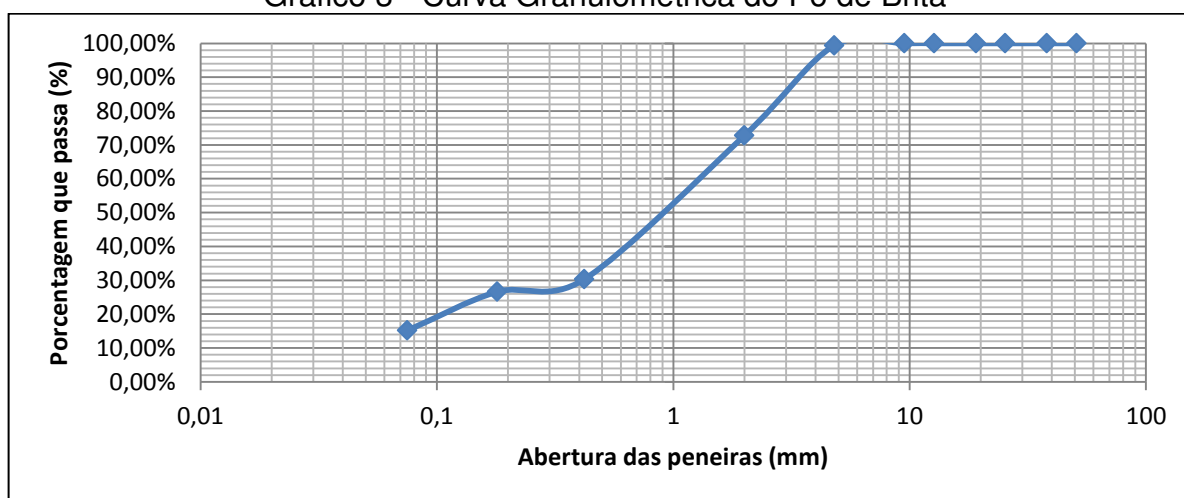
Fonte: Autor (2016)

Quadro 11 - Granulometria do Pó de Brita

| Peneira             |       | Peso Retido<br>Parcial (g) | Peso Retido<br>Acumulado (g) | % Que<br>Passa |
|---------------------|-------|----------------------------|------------------------------|----------------|
| #                   | mm    |                            |                              |                |
| 2"                  | 50,8  | 0,0                        | 0,0                          | 100,0%         |
| 1 1/2"              | 38,1  | 0,0                        | 0,0                          | 100,0%         |
| 1"                  | 25,4  | 0,0                        | 0,0                          | 100,0%         |
| 3/4"                | 19,1  | 0,0                        | 0,0                          | 100,0%         |
| 1/2"                | 12,7  | 0,0                        | 0,0                          | 100,0%         |
| 3/8"                | 9,5   | 0,0                        | 0,0                          | 100,0%         |
| Nº 4                | 4,8   | 10,1                       | 10,1                         | 99,4%          |
| Nº 10               | 2     | 417,2                      | 427,3                        | 72,7%          |
| Nº 40               | 0,42  | 665,6                      | 1092,9                       | 30,3%          |
| Nº 80               | 0,18  | 57,6                       | 1150,5                       | 26,6%          |
| Nº 200              | 0,075 | 179,3                      | 1329,8                       | 15,2%          |
| Fundo               |       | 233,9                      | 1563,7                       |                |
| Peso da Amostra (g) |       |                            |                              | 1568           |

Fonte: Autor (2016)

Gráfico 3 - Curva Granulométrica do Pó de Brita



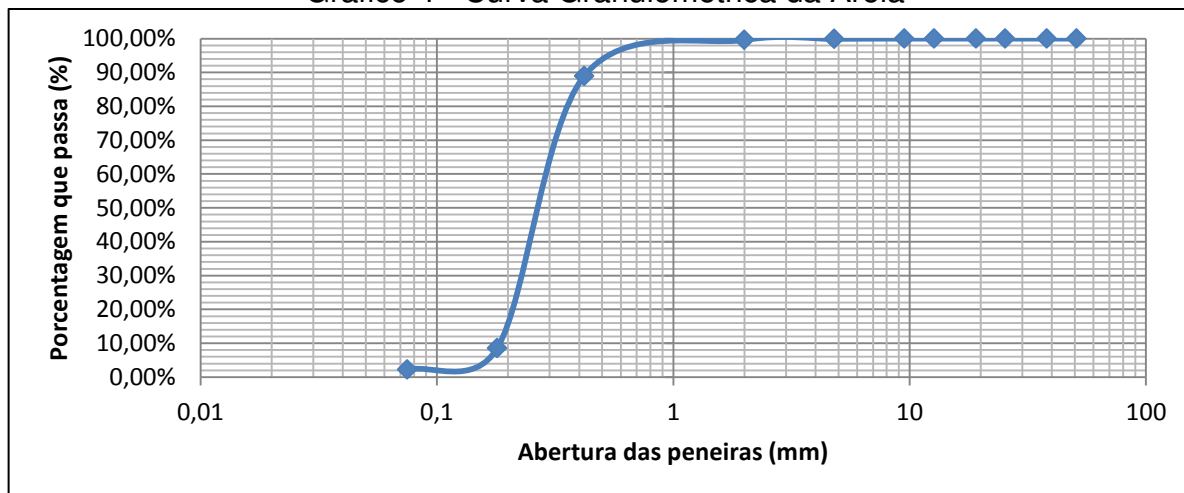
Fonte: Autor (2016)

Quadro 12 - Granulometria da Areia

| Peneira             |       | Peso Retido<br>Parcial (g) | Peso Retido<br>Acumulado (g) | % Que<br>Passa |
|---------------------|-------|----------------------------|------------------------------|----------------|
| #                   | mm    |                            |                              |                |
| 2"                  | 50,8  | 0,0                        | 0,0                          | 100,0%         |
| 1 1/2"              | 38,1  | 0,0                        | 0,0                          | 100,0%         |
| 1"                  | 25,4  | 0,0                        | 0,0                          | 100,0%         |
| 3/4"                | 19,1  | 0,0                        | 0,0                          | 100,0%         |
| 1/2"                | 12,7  | 0,0                        | 0,0                          | 100,0%         |
| 3/8"                | 9,5   | 0,0                        | 0,0                          | 100,0%         |
| Nº 4                | 4,8   | 1,0                        | 1,0                          | 99,9%          |
| Nº 10               | 2     | 4,7                        | 5,7                          | 99,6%          |
| Nº 40               | 0,42  | 154,0                      | 159,7                        | 89,0%          |
| Nº 80               | 0,18  | 1164,7                     | 1324,4                       | 8,6%           |
| Nº 200              | 0,075 | 92,2                       | 1416,6                       | 2,2%           |
| Fundo               |       | 28,4                       | 1445,0                       |                |
| Peso da Amostra (g) |       |                            |                              | 1448,6         |

Fonte: Autor (2016)

Gráfico 4 - Curva Granulométrica da Areia



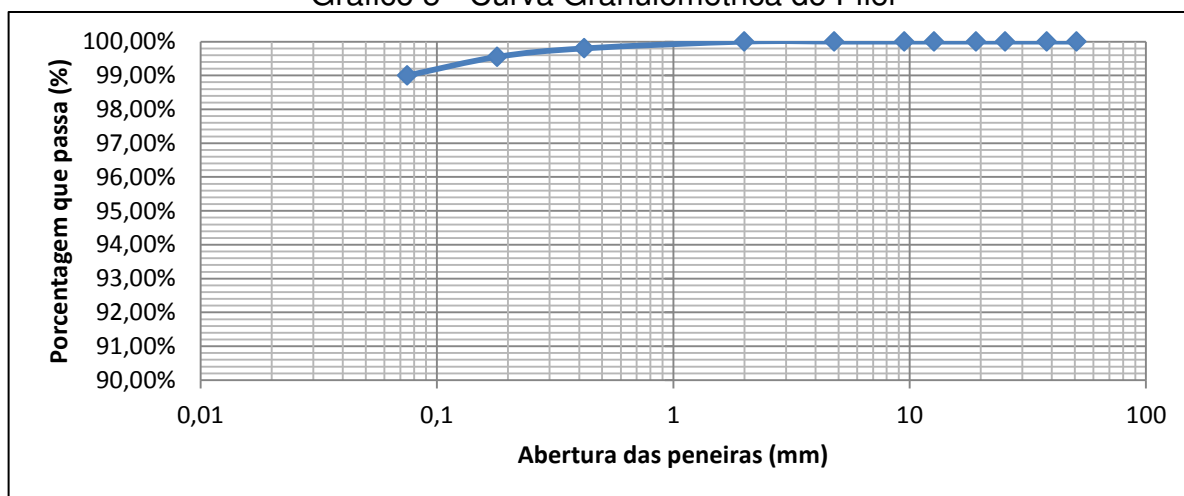
Fonte: Autor (2016)

Quadro 13 - Granulometria da Fíler

| Peneira             |       | Peso Retido Parcial (g) | Peso Retido Acumulado (g) | % Que Passa |
|---------------------|-------|-------------------------|---------------------------|-------------|
| #                   | mm    |                         |                           |             |
| 2"                  | 50,8  | 0,0                     | 0,0                       | 100,00%     |
| 1 1/2"              | 38,1  | 0,0                     | 0,0                       | 100,00%     |
| 1"                  | 25,4  | 0,0                     | 0,0                       | 100,00%     |
| 3/4"                | 19,1  | 0,0                     | 0,0                       | 100,00%     |
| 1/2"                | 12,7  | 0,0                     | 0,0                       | 100,00%     |
| 3/8"                | 9,5   | 0,0                     | 0,0                       | 100,00%     |
| Nº 4                | 4,8   | 0,0                     | 0,0                       | 100,00%     |
| Nº 10               | 2     | 0,0                     | 0,0                       | 100,00%     |
| Nº 40               | 0,42  | 0,4                     | 0,4                       | 99,80%      |
| Nº 80               | 0,18  | 0,5                     | 0,9                       | 99,55%      |
| Nº 200              | 0,075 | 1,1                     | 2,0                       | 99,00%      |
| Fundo               |       | 193,3                   | 195,3                     |             |
| Peso da Amostra (g) |       |                         |                           | 200,1       |

Fonte: Autor (2016)

Gráfico 5 - Curva Granulométrica do Fíler



Fonte: Autor (2016)

Após a granulometria nos agregados graúdos (Brita 0 e Brita 1) foram realizados os seguintes ensaios: índice de forma, massa específica, adesividade ao ligante betuminoso e determinação da abrasão a “ Los Angeles”

Vale ressaltar que os ensaios de classificação da forma e adesividade foram realizados apenas para a Brita 1. Em relação à adesividade, obteve-se resultado insatisfatório, havendo o desprendimento de ligante da superfície do material.

Para o valor do índice de forma utilizou-se o paquímetro, e a partir dos dados apresentados no Apêndice B, obteve-se as médias, expressas no Quadro 14.



Esse material foi caracterizado de forma cúbica, de acordo com a ABNT NBR 6954/1989.

Quadro 14 - Médias para Classificação da Brita 1 em Relação a Forma

| Média b/a | Média c/b | Classificação |
|-----------|-----------|---------------|
| 0,8       | 0,7       | Cúbica        |

Fonte: Autor (2016)

Quanto às massas específicas dos agregados, essas são bastante importantes, pois são necessárias para o cálculo de parâmetros volumétricos das misturas asfálticas. Para a brita 0 e brita 1 utilizou-se do Princípio de Arquimedes, e com isso obteve-se os seguintes resultados apresentado no Quadro 15:

Quadro 15 - Resultados Obtidos a Partir do Princípio de Arquimedes

|                                                  | Brita 0 | Brita 1 |
|--------------------------------------------------|---------|---------|
| Peso seco - $P_s$<br>(g)                         | 1081,70 | 1115,00 |
| Volume - $V_d$<br>(cm <sup>3</sup> )             | 389,70  | 401,50  |
| Massa Específica - $\mu$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 2,776   | 2,777   |

Fonte: Autor (2016)

Com o procedimento do ensaio de absorção descrito no capítulo anterior chegou-se aos seguintes resultados para os agregados graúdos, expressos no Quadro 16:

Quadro 16 - Resultados Obtidos a Partir do Ensaio de Absorção

|                                    | Brita 0 | Brita 1 |
|------------------------------------|---------|---------|
| Massa seca - $M_s$<br>(g)          | 1507,80 | 1519,30 |
| Massa após o ensaio - $M_h$<br>(g) | 1519,00 | 1523,60 |
| Absorção - $A$<br>(%)              | 0,7     | 0,3%    |

Fonte: Autor (2016)

Para se determinar o desgaste a abrasão sofrido pelos agregados graúdos utilizou-se o método descrito no capítulo anterior, que utiliza a máquina “Los Angeles”, obtendo-se os seguintes resultados (Quadro 17):

Quadro 17 - Resultados da Abrasão a “Los Angeles” para os agregados graúdos

|                                     | Brita 0 | Brita 1 |
|-------------------------------------|---------|---------|
| Graduação - n                       | B       | A       |
| Massa total - $M_n$ (g)             | 5000,00 | 5000,00 |
| Massa Após Lavada - $M'_n$ (g)      | 4008,50 | 4117,80 |
| Abrasão a “Los Angeles” - $A_n$ (%) | 19,83%  | 17,64%  |

Fonte: Autor (2016)

Para os agregados miúdos além da granulometria foi realizado mais dois ensaios, o equivalente de areia e a determinação da massa específica. Em relação a massa específica, foi obtida a partir do frasco Chapman, cujos resultados foram (Quadro 18):

Quadro 18 - Resultados da massa específica dos agregados miúdos

|                                                  | Areia  | Pó de Brita |
|--------------------------------------------------|--------|-------------|
| Leitura no frasco - L                            | 389,00 | 380,00      |
| Massa Específica - $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,646  | 2,778       |

Fonte: Autor (2016)

O equivalente de areia é importante, pois a partir dele é o possível descobrir a pureza do material. Para o pó de brita e areia, os valores obtidos a partir do ensaio de equivalente de areia foram (Quadro 19):

Quadro 19 - Resultados obtidos do equivalente de areia

|                                                | Pó de Brita | Areia  |
|------------------------------------------------|-------------|--------|
| Altura do Argila em Suspensão - $H_1$ (cm)     | 8,25        | 8,45   |
| Altura do Agregado em Sedimentado - $H_2$ (cm) | 5,75        | 6,30   |
| Equivalente de areia - EA (%)                  | 69,70%      | 74,56% |

Fonte: Autor (2016)

Para o fíler ou material de enchimento, o único ensaio realizado além da granulometria foi o de massa específica por meio do frasco “Le Chatelier”, cujo resultado foi o apresentado no Quadro 20:

Quadro 20 - Resultado da Massa Específica do Fíler

| Fíler                                            |       |
|--------------------------------------------------|-------|
| Leitura Inicial - Li<br>(cm <sup>3</sup> )       | 0,40  |
| Leitura Final - Lf<br>(cm <sup>3</sup> )         | 20,90 |
| Massa específica - $\mu$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 2,927 |

Fonte: Autor (2016)

A partir dos ensaios realizados, é possível analisar se os materiais podem ser utilizados em misturas asfálticas, com base nas normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES, comparadas no Quadro 21 e Quadro 22, a seguir:

Quadro 21 - Características dos Agregados Graúdos

| Ensaio Realizado                      | Norma do Ensaio | Brita 0 | Brita 1                          | Valores das Normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES               |
|---------------------------------------|-----------------|---------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Adesividade ao Ligante Asfáltico      | DNER-ME 078/94  | -       | Insatisfatório                   | Considera-se satisfatório quando não há nenhum desprendimento de ligante |
| Índice de Forma                       | NBR 7809/2006   | -       | b/a = 0,8<br>c/b = 0,7<br>Cúbica | ≥0,5                                                                     |
| Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> ) | -               | 2,776   | 2,777                            | -                                                                        |
| Absorção (%)                          | DNER-ME 081/98  | 0,7%    | 0,3%                             | -                                                                        |
| Abrasão "Los Angeles" (%)             | DNER-ME 035/98  | 19,8%   | 17,6%                            | ≤50%                                                                     |

Fonte: Autor (2016)

Quadro 22 - Características dos Agregados miúdos

| Ensaio realizado                      | Norma do ensaio | Pó de brita | Areia  | Valores das Normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES |
|---------------------------------------|-----------------|-------------|--------|------------------------------------------------------------|
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) | DNER-ME 194/98  | 2,778       | 2,646  | -                                                          |
| Equivalente de areia (%)              | DNER-ME 054/97  | 69,70%      | 74,56% | ≥55%                                                       |

Fonte: Autor (2016)

A partir desses quadros podemos perceber que tanto os materiais graúdos como miúdos podem ser utilizados, já que os valores obtidos pelos ensaios atende as normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES, com exceção da adesividade.

### 6.2.3 Agregado Fresado

O material fresado utilizado no estudo teve suas características analisadas a partir da realização dos ensaios de extração de betume, análise granulométrica (com betume e sem betume), índice de forma e de determinação de massa específica.

O ensaio de extração, com auxílio da máquina Rotarex, foi realizado em 3 amostras do material para se obter uma média da porcentagem de CAP residual no agregado, apresentados no Quadro 23:

Quadro 23 - Resultados do Ensaio de Extração de Betume

|           | Peso Total - P <sub>t</sub><br>(g) | Peso Seco - P <sub>s</sub><br>(g) | Porcentagem de Betume - P<br>(%) |
|-----------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Amostra 1 | 1001,90                            | 954,00                            | 4,78%                            |
| Amostra 2 | 1010,00                            | 960,80                            | 4,87%                            |
| Amostra 3 | 1004,70                            | 956,40                            | 4,81%                            |
| Média     |                                    |                                   | 4,82%                            |

Fonte: Autor (2016)

Após a realização do ensaio de extração de betume, as amostras, foram analisadas quanto a sua granulometria (Quadro 25). Também foi realizada análise

granulométrica do fresado em seu estado natural (com betume). Dessa forma permitiu-se a criação de uma granulometria para futuro enquadramento, e a comparação das curvas granulométricas do material com e sem betume (Gráfico 6). Para determinação da granulometria do fresado com betume (Quadro 24) utilizou-se a média obtida das porcentagens passantes de 3 amostras, sendo escolhidas as mais semelhantes (amostra 2, amostra 3 e amostra 4). Para a granulometria do fresado sem betume, utilizou-se da média das amostras obtidas a partir da extração de betume.

Quadro 24 - Granulometria do material fresado com betume

| Peneira |       | Porcentagem que Passa (%) |           |           |           |           |        |
|---------|-------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|
| #       | mm    | Amostra 1                 | Amostra 2 | Amostra 3 | Amostra 4 | Amostra 5 | Média  |
| 2"      | 50,8  | 100,0%                    | 100,0%    | 100,0%    | 100,0%    | 100,0%    | 100,0% |
| 1 1/2"  | 38,1  | 100,0%                    | 100,0%    | 100,0%    | 100,0%    | 100,0%    | 100,0% |
| 1"      | 25,4  | 87,6%                     | 93,3%     | 93,7%     | 93,3%     | 91,5%     | 93,4%  |
| 3/4"    | 19,1  | 72,1%                     | 84,3%     | 84,9%     | 85,0%     | 73,9%     | 84,7%  |
| 1/2"    | 12,7  | 49,4%                     | 66,3%     | 63,3%     | 63,8%     | 50,4%     | 64,4%  |
| 3/8"    | 9,5   | 38,5%                     | 52,6%     | 56,5%     | 49,1%     | 43,7%     | 52,8%  |
| Nº 4    | 4,8   | 24,0%                     | 33,7%     | 30,4%     | 35,2%     | 27,8%     | 33,1%  |
| Nº 10   | 2     | 15,9%                     | 23,0%     | 27,0%     | 21,4%     | 13,6%     | 23,8%  |
| Nº 40   | 0,42  | 7,5%                      | 12,1%     | 10,5%     | 8,0%      | 5,7%      | 10,2%  |
| Nº 80   | 0,18  | 1,2%                      | 1,8%      | 1,7%      | 0,9%      | 1,1%      | 1,5%   |
| Nº 200  | 0,075 | 0,1%                      | 0,6%      | 0,6%      | 0,3%      | 0,3%      | 0,5%   |

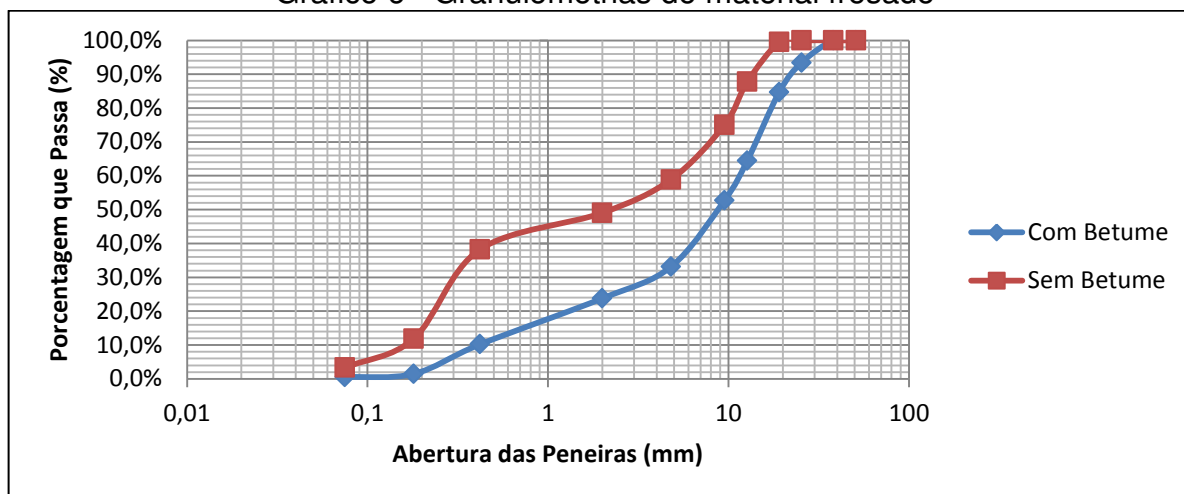
Fonte: Autor (2016)

Quadro 25 - Granulometria do material fresado sem betume

| Peneira |       | Porcentagem que Passa (%) |           |           |        |
|---------|-------|---------------------------|-----------|-----------|--------|
| #       | mm    | Amostra 1                 | Amostra 2 | Amostra 3 | Média  |
| 2"      | 50,8  | 100,0%                    | 100,0%    | 100,0%    | 100,0% |
| 1 1/2"  | 38,1  | 100,0%                    | 100,0%    | 100,0%    | 100,0% |
| 1"      | 25,4  | 100,0%                    | 100,0%    | 100,0%    | 100,0% |
| 3/4"    | 19,1  | 100,0%                    | 98,5%     | 100,0%    | 99,5%  |
| 1/2"    | 12,7  | 87,5%                     | 87,9%     | 88,0%     | 87,8%  |
| 3/8"    | 9,5   | 75,5%                     | 74,1%     | 75,7%     | 75,1%  |
| Nº 4    | 4,8   | 59,4%                     | 58,0%     | 59,6%     | 59,0%  |
| Nº 10   | 2     | 49,9%                     | 48,2%     | 49,4%     | 49,2%  |
| Nº 40   | 0,42  | 39,2%                     | 37,1%     | 38,9%     | 38,4%  |
| Nº 80   | 0,18  | 12,7%                     | 12,0%     | 11,6%     | 12,1%  |
| Nº 200  | 0,075 | 3,5%                      | 4,1%      | 3,1%      | 3,6%   |

Fonte: Autor (2016)

Gráfico 6 - Granulometrias do material fresado



Fonte: Autor (2016).

Lembrando que a granulometria do material fresado sem betume, foi utilizado no enquadramento da mistura CAUQ – REC B, porém na moldagem dos CP's utilizou-se o material com betume.

A partir da norma ABNT NBR 6954/1989, esse agregado pode ser classificado como cúbico, cujos resultados apresentam-se no Quadro 26, obtidos a partir do Apêndice C.

Quadro 26 - Classificação do material fresado em relação a forma

| Média b/a | Média c/b | Classificação |
|-----------|-----------|---------------|
| 0,7       | 0,6       | Cúbica        |

Fonte: Autor (2016)

Como abordado no capítulo anterior, esse agregado é um mistura de materiais miúdos e graúdos sendo necessário o Princípio de Arquimedes e a norma DNER – ME 194/98 para a determinação de sua massa específica (Quadro 27).

Quadro 27 - Massa Específica do Agregado Fresado

| FRESADO                             |              |
|-------------------------------------|--------------|
| Princípio de Arquimedes - Graúdo    |              |
| Peso seco - Ps (g)                  | 981,00       |
| Volume - Vd (cm³)                   | 389,20       |
| Massa Específica - $\mu$ (g/cm³)    | <b>2,521</b> |
| Frasco Chapman-Miúdo                |              |
| Leitura no frasco - L               | 410,00       |
| Massa Específica - $\gamma$ (g/cm³) | <b>2,381</b> |
| Geral                               |              |
| Massa Específica - $\mu$ (g/cm³)    | <b>2,474</b> |

Fonte: Autor (2016)

### 6.3 ENQUADRAMENTO GRANULOMÉTRICO

Após a realização dos ensaios, ocorreu o enquadramento granulométrico das misturas. Foi verificado se o material fresado se enquadrava em alguma das faixas granulométricas das normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES (Quadro 28).

Quadro 28 - Faixas Granulométricas de Acordo com as Normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES

| Peneira            |       | Porcentagem Passando (%)                      |     |                                                  |     |                                     |     |             |
|--------------------|-------|-----------------------------------------------|-----|--------------------------------------------------|-----|-------------------------------------|-----|-------------|
| #                  | mm    | Faixa A                                       |     | Faixa B                                          |     | Faixa C                             |     | Tolerâncias |
| 2"                 | 50,8  | 100                                           | -   | -                                                | -   | -                                   | -   | -           |
| 1 1/2"             | 38,1  | 95                                            | -   | 100                                              | -   | -                                   | -   | ± 7 %       |
| 1"                 | 25,4  | 75                                            | 100 | 95                                               | 100 | -                                   | -   | ± 7 %       |
| 3/4"               | 19,1  | 60                                            | 90  | 80                                               | 100 | 100                                 | -   | ± 7 %       |
| 1/2"               | 12,7  | 35                                            | 65  | 45                                               | 80  | 80                                  | 100 | ± 7 %       |
| 3/8"               | 9,5   | 35                                            | 65  | 45                                               | 80  | 70                                  | 90  | ± 7 %       |
| Nº 4               | 4,8   | 25                                            | 50  | 28                                               | 60  | 44                                  | 72  | ± 5 %       |
| Nº 10              | 2     | 20                                            | 40  | 20                                               | 45  | 22                                  | 50  | ± 5 %       |
| Nº 40              | 0,42  | 10                                            | 30  | 10                                               | 32  | 8                                   | 26  | ± 5 %       |
| Nº 80              | 0,18  | 5                                             | 20  | 8                                                | 20  | 4                                   | 16  | ± 3 %       |
| Nº 200             | 0,075 | 1                                             | 8   | 3                                                | 8   | 2                                   | 10  | ± 2 %       |
| Teor de Betume (%) |       | 4,0 a 7,0<br>Camada de<br>Ligação<br>(binder) |     | 4,5 - 7,5<br>Camada de<br>Ligação e<br>Rolamento |     | 4,5 a 9,0<br>Camada de<br>Rolamento |     | ± 0,3 %     |

Fonte: Adaptado das normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES

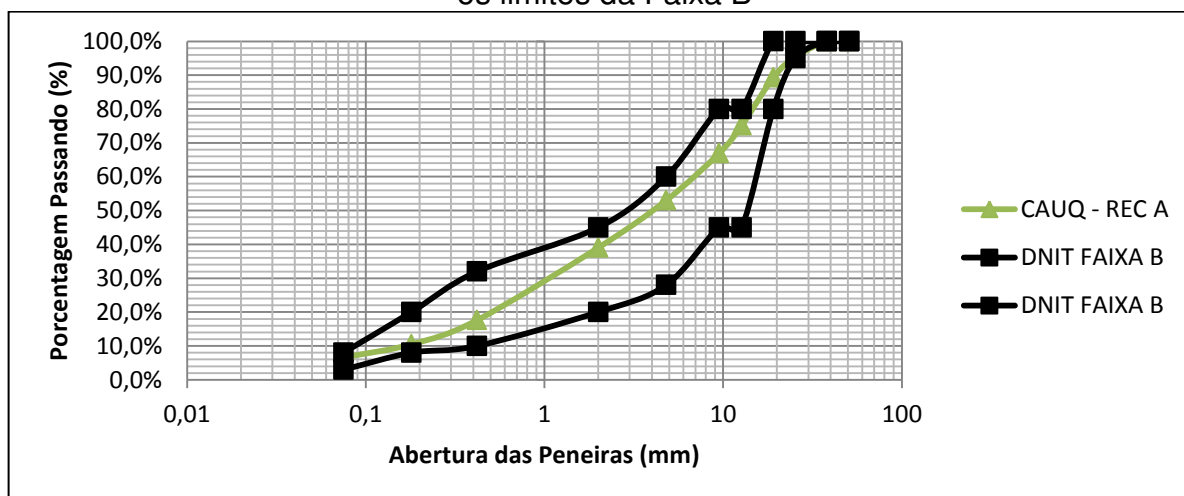
Inicialmente foi verificado se seria necessário a adição de materiais virgens. Após uma análise, verificou-se que o material fresado não se enquadrava em nenhuma das faixas especificadas. Assim foi necessários adicionar agregados virgens, para obter um enquadramento da mistura, em uma das faixas. Diante uma análise dos resultados obtidos na granulometria de cada agregado, adotou-se a Faixa B, para ambas as misturas CAUQ – REC A (Quadro 29 e Gráfico 7) e CAUQ – REC B (Quadro 30 e Gráfico 8). Cada uma apresentando uma composição diferente tanto em proporção como em materiais utilizados. Dessa forma foram escolhidas as seguintes proporções (traço), apresentadas nos quadros seguintes:

Quadro 29 - Proporção de Materiais para Mistura CAUQ – REC A

| CAUQ - REC A |       |                           |         |             |                      |        |                  |      |                  |         |
|--------------|-------|---------------------------|---------|-------------|----------------------|--------|------------------|------|------------------|---------|
| Peneira      |       | Porcentagem que Passa (%) |         |             |                      |        | Faixa B          |      | Limite Desejável | Mistura |
| #            | mm    | Brita 0                   | Brita 1 | Pó de Brita | Fresado (Com Betume) | Filer  | Limites da Faixa |      |                  |         |
| 2"           | 50,8  | 100,0%                    | 100,0%  | 100,0%      | 100,0%               | 100,0% | 100%             | 100% | 0,0%             | 100,0%  |
| 1 ½"         | 38,1  | 100,0%                    | 100,0%  | 100,0%      | 100,0%               | 100,0% | 100%             | 100% | 100,0%           | 100,0%  |
| 1"           | 25,4  | 100,0%                    | 100,0%  | 100,0%      | 93,4%                | 100,0% | 95%              | 100% | 97,5%            | 95,4%   |
| ¾"           | 19,1  | 100,0%                    | 80,2%   | 100,0%      | 84,7%                | 100,0% | 80%              | 100% | 90,0%            | 89,3%   |
| ½"           | 12,7  | 99,3%                     | 10,6%   | 100,0%      | 64,4%                | 100,0% | 45%              | 80%  | 62,5%            | 75,1%   |
| ⅜"           | 9,5   | 83,2%                     | 1,2%    | 100,0%      | 52,8%                | 100,0% | 45%              | 80%  | 62,5%            | 66,9%   |
| Nº 4         | 4,8   | 24,1%                     | 0,8%    | 99,4%       | 33,1%                | 100,0% | 28%              | 60%  | 44,0%            | 53,0%   |
| Nº 10        | 2     | 5,8%                      | 0,8%    | 72,7%       | 23,8%                | 100,0% | 20%              | 45%  | 32,5%            | 39,0%   |
| Nº 40        | 0,42  | 3,3%                      | 0,7%    | 30,3%       | 10,2%                | 99,8%  | 10%              | 32%  | 21,0%            | 17,6%   |
| Nº 80        | 0,18  | 2,5%                      | 0,6%    | 26,6%       | 1,5%                 | 99,6%  | 8%               | 20%  | 14,0%            | 10,5%   |
| Nº 200       | 0,075 | 1,8%                      | 0,4%    | 15,2%       | 0,5%                 | 99,0%  | 3%               | 8%   | 5,5%             | 6,6%    |
| Traço        |       | 0,0%                      | 0,0%    | 28,0%       | 70,0%                | 2,0%   |                  |      |                  | 100,0%  |

Fonte: Autor (2016)

Gráfico 7 - Comparação entre a curva granulométrica da mistura CAUQ – REC A e os limites da Faixa B



Fonte: Autor (2016)

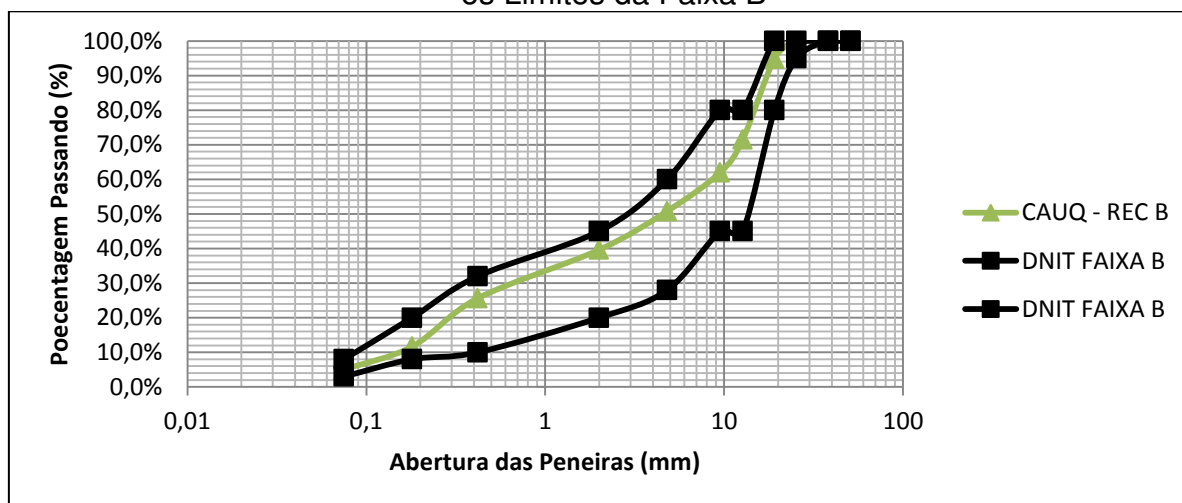


Quadro 30 - Proporção de Materiais para Mistura CAUQ – REC B

| CAUQ - REC B |       |                           |         |             |                      |        |                  |      |                  |         |
|--------------|-------|---------------------------|---------|-------------|----------------------|--------|------------------|------|------------------|---------|
| Peneira      |       | Porcentagem que Passa (%) |         |             |                      |        | Faixa B          |      | Limite Desejavel | Mistura |
| #            | mm    | Brita 0                   | Brita 1 | Pó de Brita | Fresado (Sem Betume) | Fíler  | Limites da Faixa |      |                  |         |
| 2"           | 50,8  | 100,0%                    | 100,0%  | 100,0%      | 100,0%               | 100,0% | 100%             | 100% | 100,00%          | 100,0%  |
| 1 ½"         | 38,1  | 100,0%                    | 100,0%  | 100,0%      | 100,0%               | 100,0% | 100%             | 100% | 100,00%          | 100,0%  |
| 1"           | 25,4  | 100,0%                    | 100,0%  | 100,0%      | 100,0%               | 100,0% | 95%              | 100% | 97,50%           | 100,0%  |
| ¾"           | 19,1  | 100,0%                    | 80,2%   | 100,0%      | 99,5%                | 100,0% | 80%              | 100% | 90,00%           | 94,8%   |
| ½"           | 12,7  | 99,3%                     | 10,6%   | 100,0%      | 87,8%                | 100,0% | 45%              | 80%  | 62,50%           | 71,5%   |
| ⅜"           | 9,5   | 83,2%                     | 1,2%    | 100,0%      | 75,0%                | 100,0% | 45%              | 80%  | 62,50%           | 62,0%   |
| Nº 4         | 4,8   | 24,1%                     | 0,8%    | 99,4%       | 58,9%                | 99,9%  | 28%              | 60%  | 44,00%           | 50,8%   |
| Nº 10        | 2     | 5,8%                      | 0,8%    | 72,7%       | 49,0%                | 99,6%  | 20%              | 45%  | 32,50%           | 39,6%   |
| Nº 40        | 0,42  | 3,3%                      | 0,7%    | 30,3%       | 38,3%                | 89,0%  | 10%              | 32%  | 21,00%           | 25,6%   |
| Nº 80        | 0,18  | 2,5%                      | 0,6%    | 26,6%       | 11,9%                | 8,6%   | 8%               | 20%  | 14,00%           | 11,6%   |
| Nº 200       | 0,075 | 1,8%                      | 0,4%    | 15,2%       | 3,3%                 | 2,2%   | 3%               | 8%   | 5,50%            | 5,0%    |
| Traço        |       | 5,0%                      | 25,0%   | 20,0%       | 50,0%                | 0,0%   |                  |      |                  | 100,00% |

Fonte: Autor (2016)

Gráfico 8 - Comparação Entre a curva granulométrica da mistura CAUQ –REC B e os Limites da Faixa B



Fonte: Autor (2016)

## 6.4 ENSAIOS REALIZADOS NAS MISTURAS

As misturas asfálticas estudadas foram submetidas a 3 ensaios, o de estabilidade Marshall, resistência a tração por compressão diametral e ensaio Cântabro, descritos no capítulo anterior. Valendo ressaltar que o cântabro foi realizado apenas para a mistura apresentando o teor ótimo.

Como abordado anteriormente, o método utilizado foi a dosagem Marshall.

#### 6.4.1 Resultado dos Ensaio Realizados na Mistura CAUQ – REC A

Após o período de 24 horas da moldagem, os CP's foram desmoldados, assim permitindo a obtenção dos parâmetros volumétricos e da estabilidade Marshall (Quadro 31), através da média aritmética dos valores de 3 CP's para cada teor.

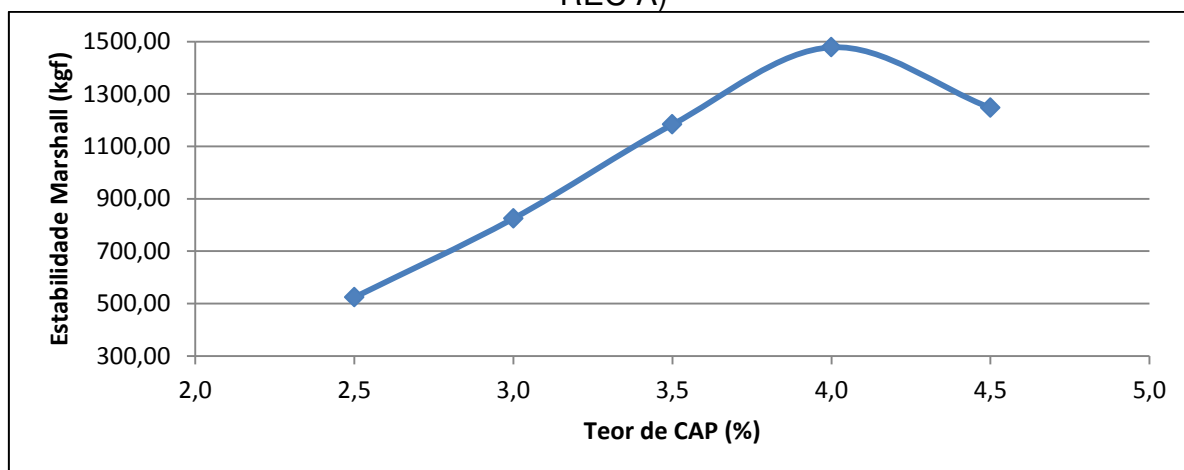
Quadro 31 - Análise dos Cp's da Mistura CAUQ – REC A

| Teor de CAP (%) | Estabilidade Marshall (kgf) | DMT (g/cm³) | Dap (g/cm³) | Vv (%) | VCB (%) | VAM (%) | RBV (%) |
|-----------------|-----------------------------|-------------|-------------|--------|---------|---------|---------|
| 2,5             | 523,67                      | 2,469       | 2,324       | 6,95   | 5,58    | 12,53   | 44,50   |
| 3,0             | 824,48                      | 2,451       | 2,338       | 5,59   | 6,76    | 12,05   | 56,13   |
| 3,5             | 1183,12                     | 2,434       | 2,333       | 4,21   | 7,93    | 12,08   | 65,65   |
| 4,0             | 1477,94                     | 2,417       | 2,336       | 3,37   | 9,07    | 12,44   | 72,92   |
| 4,5             | 1246,80                     | 2,400       | 2,330       | 2,94   | 10,18   | 13,12   | 77,59   |

Fonte: Autor (2016)

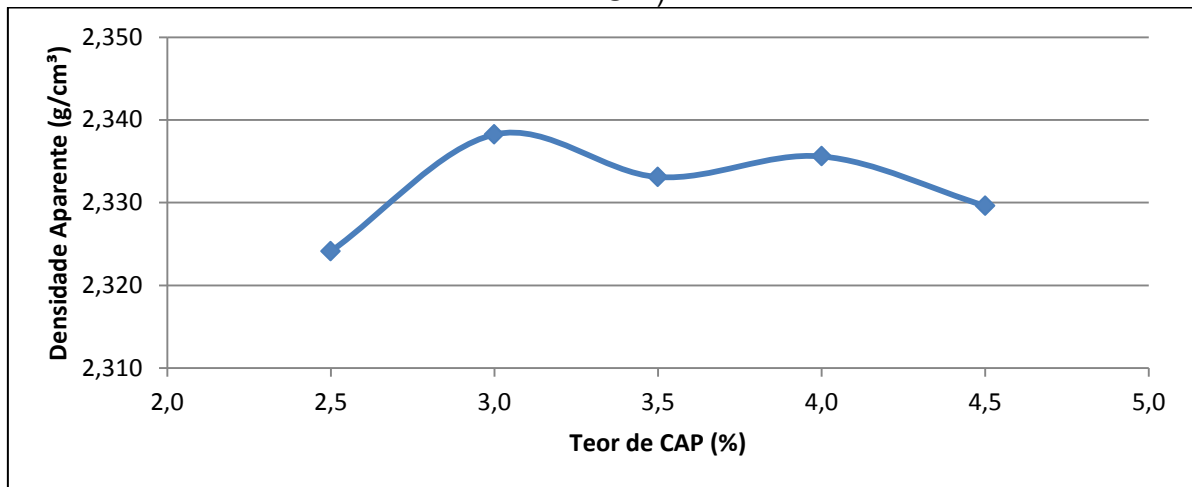
A partir dos resultados dispostos no Quadro 31, foi possível determinar o teor ótimo para a mistura CAUQ – REC A, a partir dos gráficos a seguir (Gráficos 9 ao 12) , onde mostra a variação do parâmetro em função da variação do teor de CAP.

Gráfico 9 - Variação da estabilidade em função da variação do teor de CAP (CAUQ – REC A)



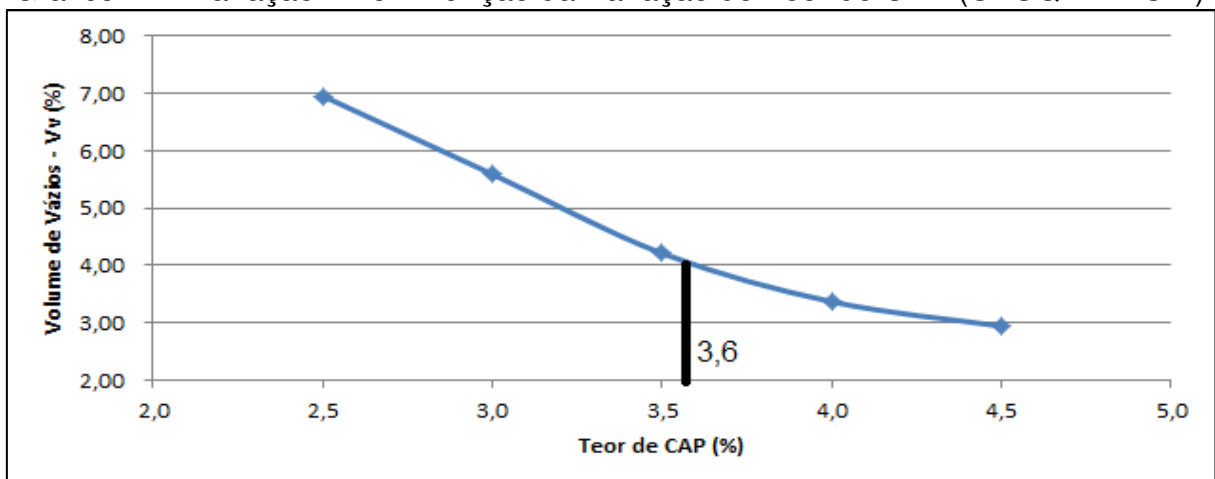
Fonte: Autor (2016)

Gráfico 10 - Variação da Dap em Função da Variação do Teor de CAP (CAUQ – REC A)



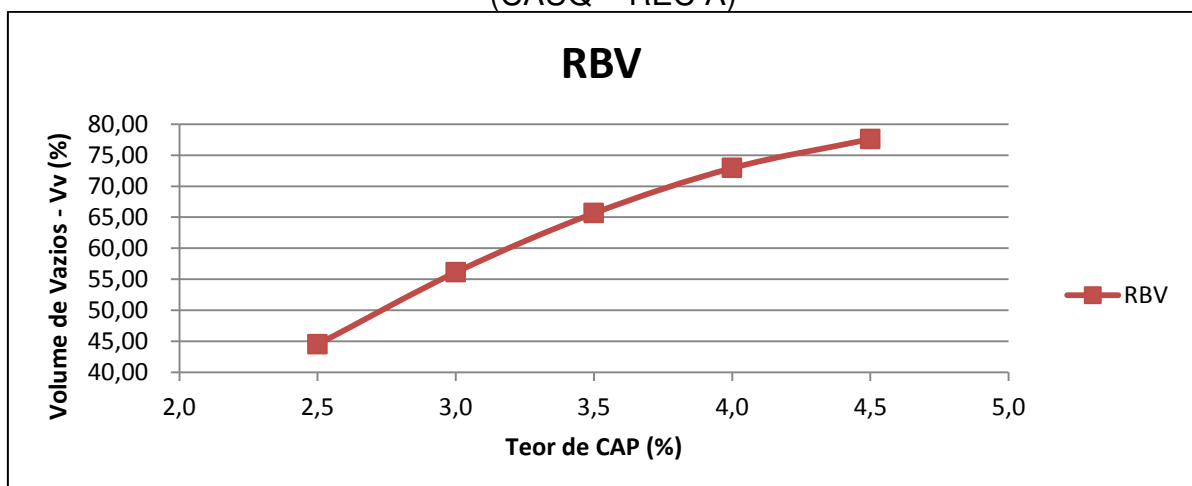
Fonte: Autor (2016)

Gráfico 11 - Variação Vv em Função da Variação do Teor de CAP (CAUQ – REC A)



Fonte: Autor (2016)

Gráfico 12 - Variação de Vv e de RBV em Função da Variação do Teor de CAP (CAUQ – REC A)



Fonte: Autor (2016)

Como abordado no capítulo anterior, existem três formas de determinar o teor de projeto. Dentre elas, utilizou-se neste estudo o teor de CAP referente a 4% do volume de vazios (Vv). Com isso determinou-se que o teor ótimo de ligante para a mistura CAUQ – REC A é de 3,6%, obtido através do Gráfico 11.

O outro ensaio realizado inicialmente na mistura CAUQ – REC A, foi o de resistência a tração por compressão diametral, realizado para uma temperatura de 25°C conforme a norma DNIT 136/2010 – ME, cujos resultados estão apresentados no Quadro 32:

Quadro 32 - Resultados obtidos a partir do ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral (CAUQ – REC A)

| Teor de CAP (%) | Resistência a tração a 25°C (Mpa) |
|-----------------|-----------------------------------|
| 2,5             | 1,25                              |
| 3,0             | 0,71                              |
| 3,5             | 0,63                              |
| 4,0             | 1,28                              |
| 4,5             | 1,23                              |

Fonte: Autor (2016)

A partir dos resultados obtidos pelos ensaios, podemos comparar com os parâmetros exigidos pelas normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES. A partir deles podemos observar que dos cinco teores analisado, nenhum ficou dentro de todos os parâmetros (Quadro 33).

Quadro 33 - Comparação entre os parâmetros exigidos pelas normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES e a Mistura CAUQ – REC A

|                                   | Teor de CAP (%) |        |         |         |         | Parâmetro da Norma<br>DNIT 033/2005 - ES e<br>DNIT 034/2005 - ES |
|-----------------------------------|-----------------|--------|---------|---------|---------|------------------------------------------------------------------|
|                                   | 2,5             | 3,0    | 3,5     | 4,0     | 4,5     |                                                                  |
| Estabilidade Marshall (kgf)       | 523,67          | 824,48 | 1183,12 | 1477,94 | 1246,80 | > 500                                                            |
| Vv (%)                            | 5,87            | 4,62   | 4,15    | 3,37    | 2,94    | 3 a 5                                                            |
| VAM (%)                           | 11,51           | 11,43  | 12,08   | 12,44   | 13,12   | >14                                                              |
| RBV (%)                           | 49,02           | 59,60  | 65,65   | 72,92   | 77,59   | 75 a 82                                                          |
| Resistência a tração a 25°C (Mpa) | 1,25            | 0,71   | 0,63    | 1,28    | 1,23    | >0,65                                                            |

Fonte: Autor (2016)

Com base nos parâmetros das normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES observa-se, que nenhum dos teores apresenta os resultados

satisfatórios em todos os parâmetros. É observado que os valores de VAM e RBV (com exceção do teor de CAP 4,5) apresentaram valores abaixo dos exigidos pelas normas, isso demonstra que o CAP presente no agregado fresado não é utilizado de forma eficaz.

#### 6.4.2 Resultado dos Ensaio Realizados na Mistura CAUQ – REC B

Assim como na mistura CAUQ – REC A, na mistura CAUQ – REC B, foram obtidos os parâmetros volumétricos e da estabilidade, cujos resultados estão dispostos no Quadro 34.

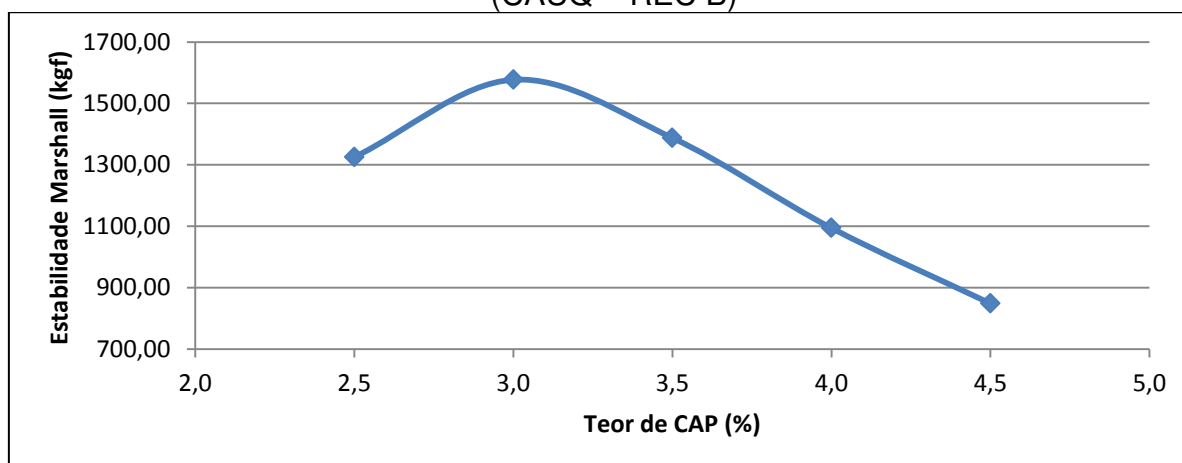
Quadro 34 - Análise dos Cp's da Mistura CAUQ – REC B

| Teor de CAP (%) | Estabilidade Marshall (kgf) | DMT (g/cm <sup>3</sup> ) | Dap (g/cm <sup>3</sup> ) | Vv (%) | VCB (%) | VAM (%) | RBV (%) |
|-----------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------|---------|---------|---------|
| 2,5             | 1325,19                     | 2,520                    | 2,373                    | 5,85   | 5,76    | 11,60   | 49,63   |
| 3,0             | 1577,08                     | 2,501                    | 2,397                    | 4,16   | 6,98    | 11,14   | 62,67   |
| 3,5             | 1387,58                     | 2,483                    | 2,413                    | 2,82   | 8,20    | 11,02   | 74,39   |
| 4,0             | 1094,24                     | 2,465                    | 2,408                    | 2,31   | 9,35    | 11,66   | 80,20   |
| 4,5             | 848,64                      | 2,447                    | 2,394                    | 2,19   | 10,46   | 12,65   | 82,69   |

Fonte: Autor (2016)

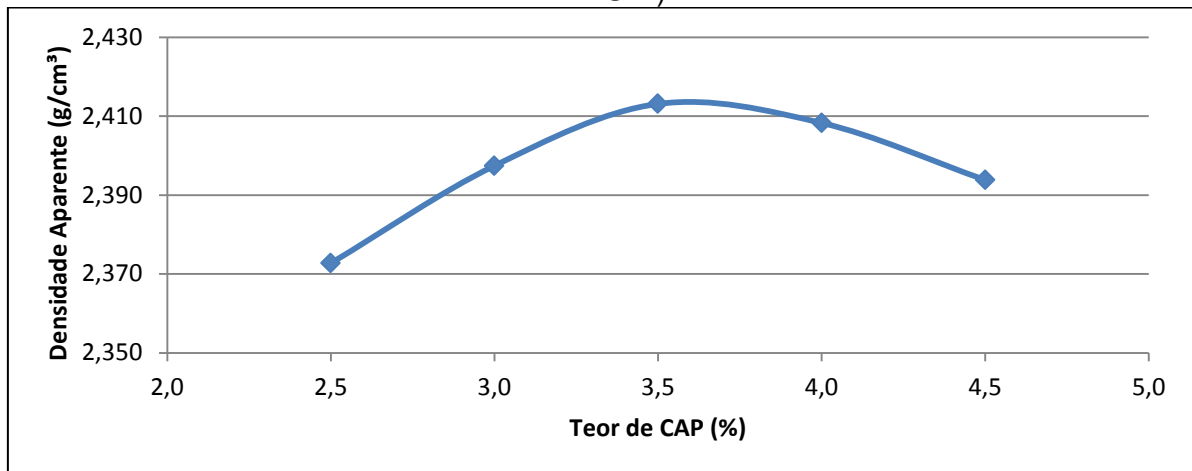
Com os resultados apresentados no Quadro 34 da mistura CAUQ – REC B foi possível a criação dos gráficos a seguir (Gráficos 13 ao 16), com o intuito de obter-se o valor do teor ótimo de ligante de projeto.

Gráfico 13 - Variação da Estabilidade em Função da Variação do Teor de CAP (CAUQ – REC B)



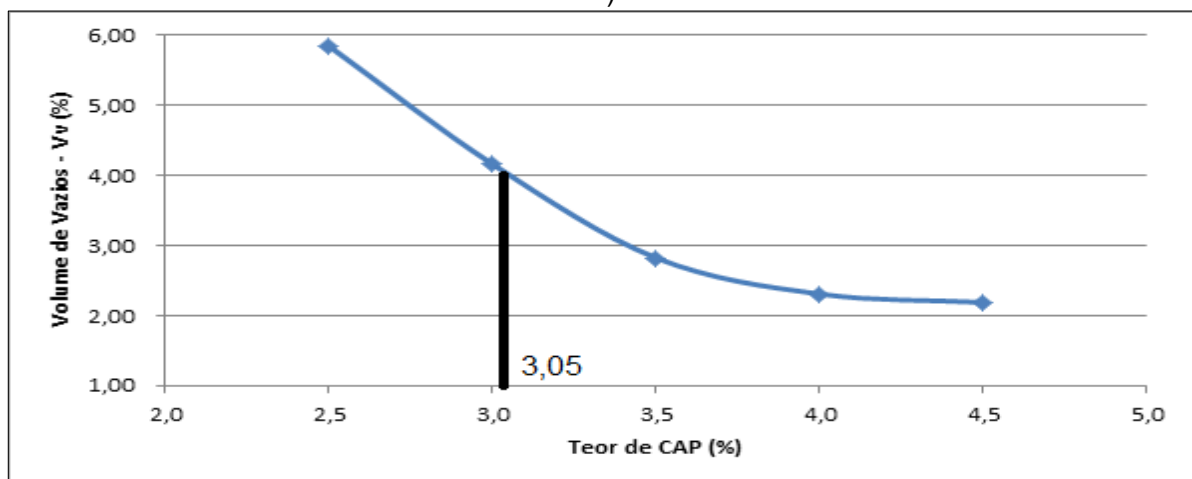
Fonte: Auto (2016)

Gráfico 14 - Variação de Dap em Função da Variação do Teor de CAP (CAUQ – REC B)



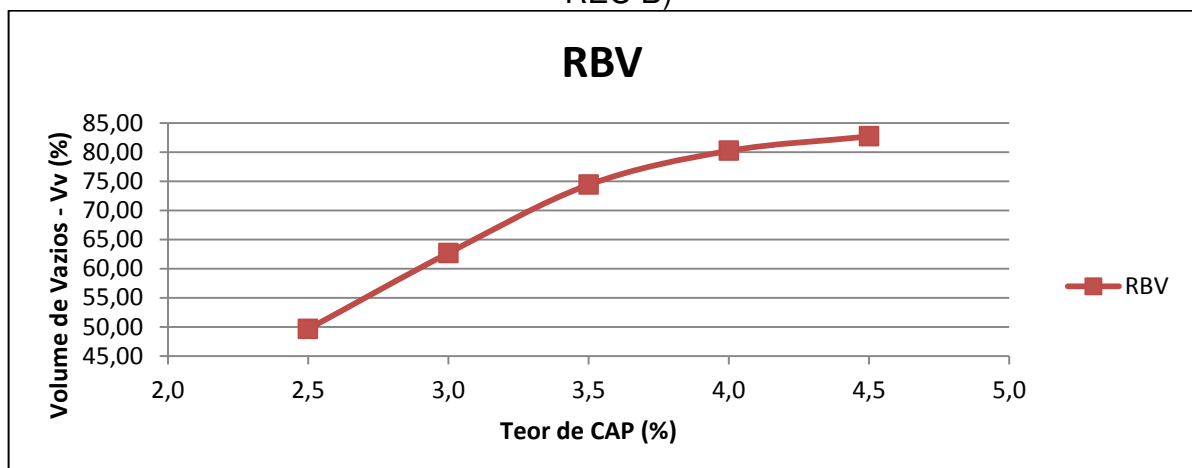
Fonte: Autor (2016).

Gráfico 15 - Variação de Vv em Função da Variação do Teor de CAP (CAUQ – REC B)



Fonte: Autor (2016)

Gráfico 16 - Variação de Vv e RBV em Função da Variação do Teor de CAP (CAUQ – REC B)



Fonte: Autor (2016)

Com esses gráficos é permitida a obtenção do teor ótimo de ligante, o qual foi obtido a partir do teor de CAP referente a Vv igual a 4%. A partir do gráfico chegou-se a conclusão que o teor de projeto para a mistura CAUQ – REC B é de 3,05%.

Assim como na mistura CAUQ – REC A, também foi realizado o ensaio para determinar a resistência à tração por compressão diametral da mistura CAUQ – REC B, cujos resultados estão expostos no Quadro 34.

Quadro 35 - Resultados obtidos a partir do ensaio de resistência a tração por compressão diametral (CAUQ – REC B)

| Teor de CAP (%) | Resistência a tração a 25°C (Mpa) |
|-----------------|-----------------------------------|
| 2,5             | 1,38                              |
| 3,0             | 1,23                              |
| 3,5             | 1,12                              |
| 4,0             | 0,85                              |
| 4,5             | 0,67                              |

Fonte: Autor (2016)

A partir desses resultados houve a possibilidade de avaliar a mistura CAUQ – REC B, com base nos parâmetros estabelecidos pelas normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2004 – ES,

Quadro 36 - Comparação entre os parâmetros exigidos pelas normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES e a Mistura CAUQ – REC A

|                                   | Teor de CAP (%) |         |         |         |        | Parâmetro da Norma DNIT 033/2005 - ES e DNIT 034/2005 - ES |
|-----------------------------------|-----------------|---------|---------|---------|--------|------------------------------------------------------------|
|                                   | 2,5             | 3,0     | 3,5     | 4,0     | 4,5    |                                                            |
| Estabilidade Marshall (kgf)       | 1325,19         | 1577,08 | 1287,58 | 1094,24 | 846,64 | > 500                                                      |
| Vv (%)                            | 5,85            | 4,16    | 2,82    | 2,31    | 2,19   | 3 a 5                                                      |
| VAM (%)                           | 11,60           | 11,14   | 11,02   | 11,66   | 12,65  | >14                                                        |
| RBV (%)                           | 49,63           | 62,67   | 74,39   | 80,20   | 82,69  | 75 a 82                                                    |
| Resistência a tração a 25°C (Mpa) | 1,38            | 1,23    | 1,12    | 0,85    | 0,67   | >0,65                                                      |

Fonte: Autor (2016)

Com base nos parâmetros das normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES observa-se, que nenhum dos teores apresenta os resultados satisfatórios em todos os parâmetros. Sendo que os valores VAM e de RBV (com

exceção dos teores de CAP 4,0% e 4,5 %), apresentaram valores abaixo do exigido pelas normas, demonstrando a ineficaz utilização do CAP residual presente no agregado fresado.

#### 6.4.3 Resultados dos Ensaios Realizados nos Teores Ótimos

A partir dos gráficos da variação do volume de vazios em função da variação do teor de CAP (Gráfico 11 e Gráfico 15) foi possível descobrir os teores ótimos para as misturas CAUQ – REC A e CAUQ – REC B, sendo eles 3,60% e 3,05%, respectivamente.

Com esse teores foram moldados novos CP's e analisados em relação aos ensaios de estabilidade Marshall, Resistência a tração por compressão diametral, desgaste cântabro e aos parâmetros das normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES. Os quadros a seguir apresentam os resultados obtidos dos ensaios.

Quadro 37 - Comparação entre os Parâmetros das Normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES com as Misturas CAUQ – REC A e CAUQ – REC B

| Mistura                              | CAUQ – REC A | CAUQ – REC B | Parâmetro da Norma<br>DNIT 033/2005 - ES e<br>DNIT 034/2005 - ES |
|--------------------------------------|--------------|--------------|------------------------------------------------------------------|
| Teor de CAP<br>(%)                   | 3,60         | 3,05         | 4,5 a 7,5                                                        |
| Estabilidade Marshall<br>(kgf)       | 1060,80      | 1274,43      | > 500                                                            |
| DMT<br>(g/cm <sup>3</sup> )          | 2,431        | 2,499        | -                                                                |
| Dap<br>(g/cm <sup>3</sup> )          | 2,339        | 2,408        | -                                                                |
| Vv<br>(%)                            | 3,78         | 3,67         | 3 a 5                                                            |
| VCB<br>(%)                           | 8,17         | 7,13         | -                                                                |
| VAM<br>(%)                           | 11,95        | 10,80        | > 14                                                             |
| RBV<br>(%)                           | 68,38        | 66,02        | 72 a 85                                                          |
| Resistência a tração a 25°C<br>(Mpa) | 0,78         | 0,97         | > 0,65                                                           |

Fonte: Autor (2016)



Podemos observar a partir do Quadro 37, que as misturas estudadas apresentam características aceitáveis para a utilização em camada de rolamento, de acordo com a Faixa B, para o volume de vazios ( $V_v$ ), estabilidade Marshall, tração. Porém em relação a relação de betume vazios (RBV) e volume de agregado mineral (VAM) não possui características aceitáveis. Dessa forma as misturas analisadas em estudo tornam-se insatisfatória.

É importante observar que os valores de RBV estão abaixo dos exigidos pelas normas (Quadro 37), por isso, é aconselhado à moldagem de CP's com teores de CAP maiores. Indicando também que o CAP residual presente no material fresado não é utilizado de forma eficaz.

Em relação ao desgaste Cântabro promovido nas misturas asfálticas, obteve-se um valor menor para a mistura CAUQ – REC B, indicando que ela possui menor desagregação em comparação a mistura CAUQ – REC A. Os Valores que são apresentados nos Quadro 38 e Quadro 39.

Quadro 38 - Desgaste Cântabro da Mistura CAUQ – REC A

|            | Peso Inicial - P (g) | Peso Final - P' (g) | Desgaste Cântabro - A (%) |
|------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| 1° Amostra | 1190,8               | 1068,7              | 10,25%                    |
| 2° Amostra | 1188,7               | 1058,7              | 10,94%                    |
| 3° Amostra | 1184,1               | 1045,6              | 11,70%                    |
| Média      |                      |                     | 10,96%                    |

Fonte: Autor (2016)

Quadro 39 - Desgaste Cântabro da Mistura CAUQ – REC B

|            | Peso Inicial - P (g) | Peso Final - P' (g) | Desgaste Cântabro - A (%) |
|------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| 1° Amostra | 1193,1               | 1119,7              | 6,15%                     |
| 2° Amostra | 1185,5               | 1128,5              | 4,81%                     |
| 3° Amostra | 1185,6               | 1105,6              | 6,75%                     |
| Média      |                      |                     | 5,90%                     |

Fonte: Autor (2016)

## **CAPÍTULO 07: CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES**

### **7.1 CONCLUSÃO**

A presente pesquisa buscou analisar a viabilidade técnica da reutilização do material fresado da BR-135. O estudo foi realizado com base na preparação de duas misturas asfáltica para analisa-las de acordo com os parâmetros mínimos exigidos pelas normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES.

Sobre o ligante asfáltico utilizado conclui-se que se trata de um CAP cuja classificação é 50/70. Para os ensaios de ponto de amolecimento, viscosidade Saybolt-Furol e penetração o CAP apresenta características com base na especificação da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Energia (ANP).

Os agregados virgens analisados possuem características aceitáveis para a utilização em misturas asfálticas, com base nas normas utilizada para o preparo das misturas estudadas em laboratório. Porém a Brita 1 apresenta adesividade ao ligante insatisfatória.

Em relação ao agregado fresado chegou-se a conclusão que quando aquecido o tamanho de suas partículas mudavam, dessa forma desconfigurando a granulometria em seu estado natural (com betume). Também determinou-se a quantidade de CAP residual presente nele e constatou-se que o mesmo apresenta a forma cúbica. Percebeu-se também que o CAP residual presente no material fresado não é utilizado de forma eficaz.

Para o enquadramento da faixa observou-se a necessidade da adição de materiais virgens para obter-se a granulometria exigidas pelas normas DNIT 033/2005 – ES e DNIT 034/2005 – ES.

Em relação aos teores ótimos as misturas CAUQ REC – A e CAUQ – REC B, apresentam só algumas das características exigidas pelas normas, apresentando dessa forma parecer insatisfatório.

A mistura CAUQ REC – A apresenta maior desagregação em relação a mistura CAUQ – REC B.

Com base nos resultados obtidos das misturas estudadas em laboratório pode-se concluir que para os traços propostos, as misturas não apresentam as características exigidas para a utilização do material fresado, da BR-135, na

construção de novas estradas. Dessa forma a pesquisa conseguiu avaliar a utilização do material e assim atingindo seus objetivos.

## **7.2 RECOMENDAÇÕES**

Para pesquisas futuras recomenda-se que:

- Moldar novos CP's considerando teores de CAP maiores, uma vez que os valores de RBV apresentam valores inferiores as normas;
- Também sugere-se a utilização de agente rejuvenescedor na mistura como forma de reutilizar de modo mais eficaz , o ligante contido no material fresado;
- Realização de misturas a frio;
- A avaliação da possibilidade da reutilização do material fresado em camada de ligação;
- O controle mais rigoroso da temperatura para realização do ensaio de determinação da tração por compressão diametral;
- A avaliação da quantidade de ligante residual reaproveitada nas misturas recicladas;
- Analisar o quanto a variação do tamanho das partículas do material fresado, quando aquecido, influencia na granulometria da mistura asfáltica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Pavimento de Concreto e Alternativa Para Melhoria de Rodovias**, 2012. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/pavimento-de-concreto-e-alternativa-para-melhoria-das-rodovias>>. Acesso em: 10 de Abr. de 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TÉCNICAS. **NBR 6576: Materiais asfálticos - Determinação da penetração**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7207: Terminologia e classificação de pavimentação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7809: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 9935: Terminologia em Pavimentação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 14950: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

AZEVEDO, Maria. **Construção e Reabilitação de Pavimentos: Reciclagem de Pavimentos**. Documento Base, INIR, Lisboa, 2010.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 3ª reimpressão. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

BETUNEL – Tecnologia em Asfalto. **Emulsões Convencionais**, 2016a. Disponível em: <[http://www.betunel.com.br/emulsoes\\_convencionais.html](http://www.betunel.com.br/emulsoes_convencionais.html)>. Acesso em: 15 de Maio de 2016.

\_\_\_\_\_. **Agentes Rejuvenescedores: Aditivos Asfálticos de Reciclagem para Misturas à Quente**, 2016b. Disponível em: <<http://www.betunel.com.br/pdf/ar.pdf>>. Acesso em: 15 de Jun. de 2016.

BEZERRA, M. F. G., **Estudo da incorporação de agregado fresado como material alternativo para revestimento asfáltico**, Monografia de Bacharel em Engenharia Civil, Unidade de Ensino Superior Dom Bosco – UNDB, 2015.

BONFIM, Valmir, **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**, 3ªed., São Paulo, Exceção Editorial, 2010.

BRASIL. Confederação Nacional de Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias 2015: relatório gerencial**. – Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2015.

\_\_\_\_\_. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação**. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006a.

\_\_\_\_\_. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2006b.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. **Resolução CONAMA nº 307/02**, de 5 de agosto de 2002 – In: Resoluções, \_\_\_\_\_, 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano1.cfm?codlegitipo=3&ano=2002>> Acesso em: 19 de Mar. de 2016.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. **Princípio do 3R's**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/producao-e-consumo-sustentavel/consumo-consciente-de-embalagem/principio-dos-3rs>>. Acesso em 19 de Mar. de 2016.

\_\_\_\_\_. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. **Transporte Rodoviário**, 2014. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/transporte-rodoviario-relevancia.html>>. Acesso em: 19 de Mar. de 2016.

BRASQUÍMICA – Produtos Asfálticos Ltda. **Concreto Asfáltico Pré-Misturado à Frio**, 2016. Disponível em: <[http://www.brasquimica.com.br/informacoes-tecnicas/prg\\_pub\\_det.cfm/concreto-asfaltico-pre-misturado-a-frio](http://www.brasquimica.com.br/informacoes-tecnicas/prg_pub_det.cfm/concreto-asfaltico-pre-misturado-a-frio)>. Acesso em: 08 de Jun. de 2016.

CASTRO, Luciana Nogueira de. **Reciclagem a Frio “In Situ” com Espuma de Asfalto**. Dissertação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 183p. 2003.

CIBER. **Usina de Notícias**. 22ª Ed. Porto Alegre, 2010. Disponível em: <[http://www.ciber.com.br/media/ciber/images\\_content\\_23/news\\_and\\_media\\_4/usina\\_denoticias/usina22/Usina-22\\_PT.pdf](http://www.ciber.com.br/media/ciber/images_content_23/news_and_media_4/usina_denoticias/usina22/Usina-22_PT.pdf)>. Acesso em: 29 de Jun. de 2016.

CRUZ, Kleyton Lisboa da. **Análise de material fresado de pavimentos flexíveis visando reciclagem**. Monografia de Bacharel em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2007.

DAVID, Daniela de. **Misturas Asfálticas Misturadas a Frio: Estudo em Laboratório Utilizando Emulsão e Agente de Reciclagem Emulsionado**. Dissertação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul. 128p. 2006.

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

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 043:** Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, DNER, 1995.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 053:** Misturas betuminosas – Percentagem de Betume. Rio de Janeiro, DNER, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 054:** Equivalente de areia. Rio de Janeiro, DNER, 1997.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 078:** Agregados – Adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro DNER, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 081:** Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado. Rio de Janeiro DNER, 1998.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 083:** Agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro DNER, 1998.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 085:** Material finamente pulverizado - determinação da massa específica real. Rio de Janeiro, DNER, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 193:** Produtos betuminosos líquidos e semi-sólidos - determinação da densidade e da massa específica. Rio de Janeiro, DNER, 1996.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 194:** Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, DNER, 1998.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 383:** Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro. Rio de Janeiro, DNER, 1999.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 033 – ES:** Pavimentação asfáltica – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina – especificação de serviço Rio de Janeiro: DNIT, 2009.

\_\_\_\_\_. **DNIT 034 – ES:** Pavimentação asfáltica – Concreto asfáltico reciclado a quente no local – especificação de serviço Rio de Janeiro: DNIT, 2009.

\_\_\_\_\_. **DNIT-ME 131:** Ponto de amolecimento: método anel e bola – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

\_\_\_\_\_. **DNIT-ME 136:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência a tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2009.

\_\_\_\_\_. **DNIT-ME 155:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Ensaio de penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

\_\_\_\_\_. **Histórico do Rodoviarismo**, 2016. Disponível em: <<http://www1.dnit.gov.br/historico>>. Acesso em: 19 de Mar. de 2016.

E-Civil. **Significado de Pavimento Semi-rígido**. 2016. Disponível em: <<http://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-pavimento-semi-rigido.html>>. Acesso em: 11 de Abr. de 2016.

FERREIRA, Elane Gomes. **Estudo de misturas asfálticas a quente utilizando material fresado de revestimento**. Monografia de Bacharel em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2012.

GRECA: Asfaltos. **ADP - Asfalto Diluído de Petróleo**, 2016. Disponível em: <<http://www.grecaasfaltos.com.br/produtos/asfaltos/asfaltos-adp-asfalto-diluido-de-petroleo>>. Acesso em: 13 de Jun. de 2016.

M&T: Manutenção e Tecnologia. **Tecnologias Viabilizam a Aplicação de Asfalto Reciclado**, 2011. Disponível em: <[http://www.revistamt.com.br/index.php?option=com\\_contenido&task=viewMateria&id=860](http://www.revistamt.com.br/index.php?option=com_contenido&task=viewMateria&id=860)>. Acesso em: 30 de Jun. de 2016.

PETROBRAS. **Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAPs)**, 2016. Disponível em: <<http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/produtos/asfalticos/cap>>. Acesso em: 01 de Abr. de 2016.

REIS, Ana Carolina da Cruz. **Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Recicladas em Usina Protótipo de Escala Reduzida**. Dissertação em Engenharia de Transporte – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. 115p. 2013.

SILVA, Anderson Nascimento; JESUS, Alysson Penha de; PEREIRA, Alexandre Costa; SANT'ANA, Walter Canales. **Perspectivas de Utilização de Material Fresado em Pavimentos Urbanos de São Luís – MA**. São Luís: 18ª RPU – REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 2012.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2ª ed. Volume 1. São Paulo: Pini, 2007.

\_\_\_\_\_. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 1ª ed. Volume 2. São Paulo: Pini, 2001.

VIARONDON: Uma empresa BRVias. **ViaRondon utiliza novo tipo de pavimento: "O Asfalto Verde"**, 2012. Disponível em: <<http://www.viarondon.com.br/noticias/viarondon-utiliza-novo-tipo-de-pavimento-o-asfalto-verde/>>. Acesso em: 10 de Abr. de 2016.

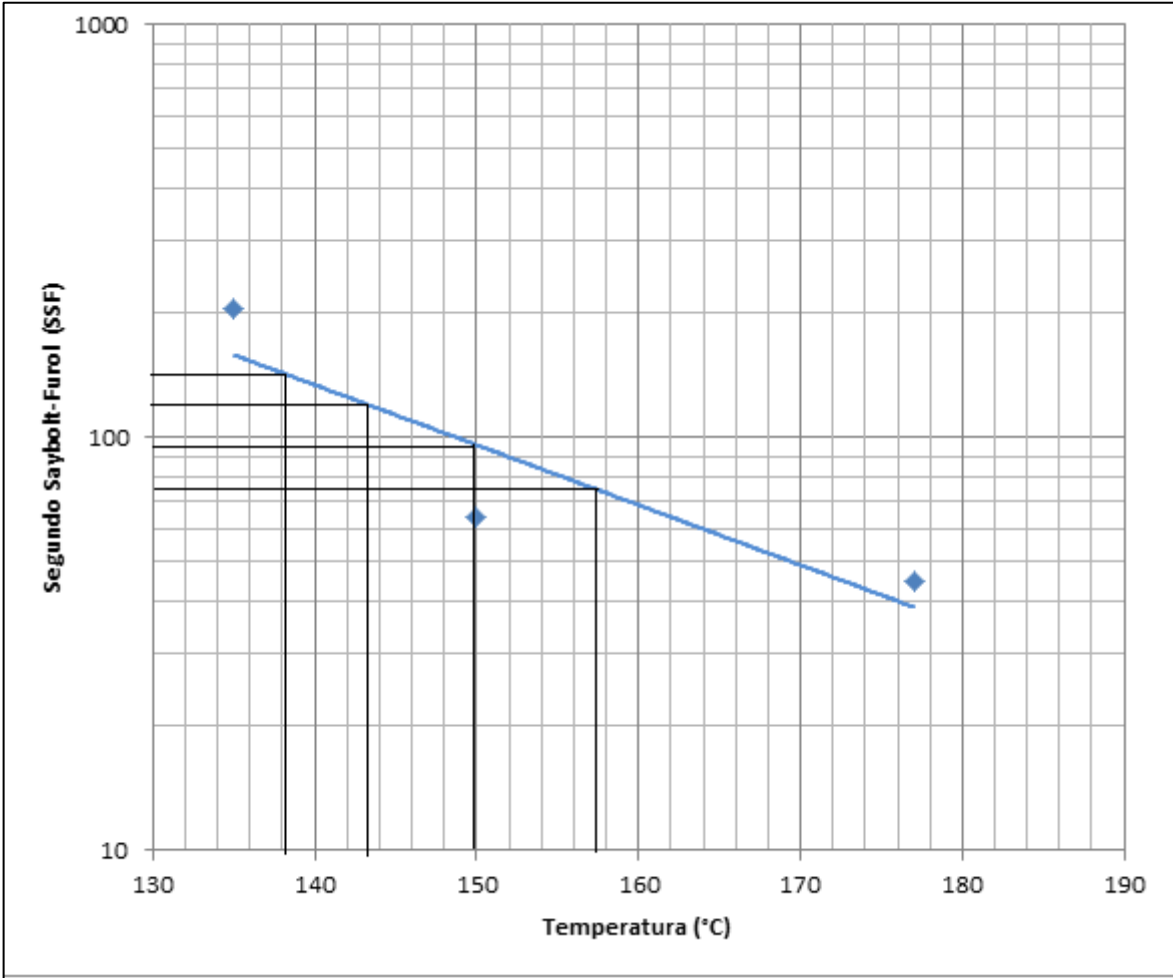
ZUBARAN, Marcelo; MOTTA, Laura Maria Goretti. **Avaliação de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas em Laboratório e Usina De Asfalto**. Foz Do Iguaçu: 42ª RAPV - REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO e 18º ENACOR – ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 2015.

## **APÊNDICES**



APÊNDICE A – GRÁFICO UTILIZADO PARA DETERMINAÇÃO DAS  
TEMPERATURAS DE COMPACTAÇÃO, DO CIMENTO ASFÁLTICO DE  
PETRÓLEO (CAP) E DOS AGREGADOS, A PARTIR DO ENSAIO DE  
VISCOSIDADE SAYBOLT – FUROL.

Gráfico 17



APÊNDICE B – MEDIDAS DAS DIMENSÕES DA BRITA PARA CLASSIFICAÇÃO  
QUANTO A FORMA

Quadro 40

| N  | a (mm) | b (mm) | c (mm) | N   | a (mm) | b (mm) | c (mm) | N   | a (mm) | b (mm) | c (mm) | N   | a (mm) | b (mm) | c (mm) |
|----|--------|--------|--------|-----|--------|--------|--------|-----|--------|--------|--------|-----|--------|--------|--------|
| 1  | 27     | 19     | 17     | 51  | 28     | 22     | 15     | 101 | 32     | 19     | 9      | 151 | 21     | 15     | 13     |
| 2  | 36     | 22     | 12     | 52  | 33     | 20     | 12     | 102 | 28     | 17     | 15     | 152 | 29     | 19     | 19     |
| 3  | 33     | 21     | 19     | 53  | 25     | 23     | 12     | 103 | 24     | 20     | 17     | 153 | 30     | 20     | 10     |
| 4  | 35     | 25     | 19     | 54  | 29     | 25     | 15     | 104 | 20     | 21     | 20     | 154 | 20     | 16     | 14     |
| 5  | 29     | 19     | 17     | 55  | 35     | 17     | 11     | 105 | 27     | 22     | 14     | 155 | 30     | 15     | 5      |
| 6  | 29     | 25     | 21     | 56  | 27     | 22     | 18     | 106 | 33     | 19     | 14     | 156 | 22     | 15     | 13     |
| 7  | 40     | 25     | 15     | 57  | 27     | 18     | 15     | 107 | 34     | 20     | 13     | 157 | 20     | 17     | 15     |
| 8  | 29     | 18     | 15     | 58  | 22     | 20     | 19     | 108 | 35     | 23     | 11     | 158 | 28     | 21     | 5      |
| 9  | 28     | 20     | 14     | 59  | 33     | 20     | 13     | 109 | 25     | 19     | 14     | 159 | 25     | 21     | 12     |
| 10 | 29     | 20     | 18     | 60  | 27     | 17     | 13     | 110 | 26     | 16     | 9      | 160 | 29     | 23     | 14     |
| 11 | 34     | 24     | 14     | 61  | 25     | 20     | 16     | 111 | 22     | 17     | 9      | 161 | 29     | 21     | 13     |
| 12 | 27     | 18     | 14     | 62  | 28     | 25     | 11     | 112 | 28     | 23     | 15     | 162 | 22     | 21     | 13     |
| 13 | 25     | 20     | 15     | 63  | 26     | 16     | 14     | 113 | 23     | 18     | 15     | 163 | 22     | 20     | 18     |
| 14 | 28     | 20     | 18     | 64  | 31     | 27     | 10     | 114 | 21     | 16     | 15     | 164 | 26     | 20     | 15     |
| 15 | 24     | 17     | 16     | 65  | 23     | 20     | 19     | 115 | 29     | 17     | 8      | 165 | 32     | 17     | 13     |
| 16 | 24     | 20     | 14     | 66  | 31     | 16     | 11     | 116 | 21     | 18     | 15     | 166 | 23     | 16     | 13     |
| 17 | 25     | 18     | 13     | 67  | 30     | 27     | 16     | 117 | 23     | 18     | 15     | 167 | 35     | 15     | 8      |
| 18 | 28     | 18     | 10     | 68  | 32     | 22     | 7      | 118 | 25     | 26     | 15     | 168 | 35     | 18     | 14     |
| 19 | 26     | 17     | 8      | 69  | 28     | 20     | 10     | 119 | 31     | 19     | 17     | 169 | 30     | 17     | 11     |
| 20 | 24     | 20     | 16     | 70  | 29     | 20     | 15     | 120 | 23     | 16     | 14     | 170 | 26     | 25     | 21     |
| 21 | 25     | 20     | 16     | 71  | 27     | 18     | 13     | 121 | 22     | 18     | 16     | 171 | 31     | 20     | 7      |
| 22 | 27     | 20     | 8      | 72  | 24     | 18     | 14     | 122 | 30     | 21     | 9      | 172 | 29     | 19     | 9      |
| 23 | 33     | 22     | 11     | 73  | 28     | 23     | 9      | 123 | 31     | 24     | 18     | 173 | 27     | 21     | 9      |
| 24 | 28     | 28     | 18     | 74  | 24     | 14     | 10     | 124 | 24     | 22     | 5      | 174 | 30     | 20     | 17     |
| 25 | 25     | 23     | 15     | 75  | 21     | 21     | 20     | 125 | 35     | 23     | 9      | 175 | 27     | 21     | 10     |
| 26 | 25     | 23     | 13     | 76  | 25     | 16     | 11     | 126 | 22     | 16     | 14     | 176 | 30     | 20     | 17     |
| 27 | 34     | 25     | 18     | 77  | 28     | 18     | 16     | 127 | 31     | 28     | 5      | 177 | 22     | 24     | 14     |
| 28 | 27     | 17     | 14     | 78  | 21     | 20     | 10     | 128 | 27     | 20     | 13     | 178 | 30     | 18     | 18     |
| 29 | 30     | 15     | 11     | 79  | 23     | 16     | 13     | 129 | 27     | 21     | 19     | 179 | 21     | 19     | 15     |
| 30 | 28     | 22     | 15     | 80  | 22     | 20     | 13     | 130 | 28     | 18     | 14     | 180 | 28     | 15     | 6      |
| 31 | 27     | 25     | 18     | 81  | 25     | 20     | 18     | 131 | 28     | 21     | 15     | 181 | 21     | 20     | 20     |
| 32 | 28     | 18     | 11     | 82  | 32     | 21     | 6      | 132 | 21     | 19     | 12     | 182 | 26     | 23     | 19     |
| 33 | 29     | 27     | 17     | 83  | 28     | 20     | 15     | 133 | 31     | 19     | 20     | 183 | 24     | 18     | 11     |
| 34 | 36     | 18     | 7      | 84  | 25     | 14     | 11     | 134 | 34     | 22     | 22     | 184 | 29     | 18     | 11     |
| 35 | 25     | 19     | 17     | 85  | 25     | 20     | 7      | 135 | 37     | 23     | 9      | 185 | 30     | 19     | 10     |
| 36 | 25     | 20     | 17     | 86  | 25     | 20     | 6      | 136 | 32     | 23     | 15     | 186 | 26     | 20     | 7      |
| 37 | 33     | 27     | 15     | 87  | 26     | 15     | 11     | 137 | 30     | 23     | 11     | 187 | 24     | 13     | 13     |
| 38 | 22     | 20     | 11     | 88  | 28     | 15     | 11     | 138 | 27     | 18     | 7      | 188 | 31     | 22     | 13     |
| 39 | 25     | 15     | 14     | 89  | 23     | 17     | 14     | 139 | 26     | 18     | 11     | 189 | 37     | 16     | 8      |
| 40 | 40     | 13     | 8      | 90  | 21     | 15     | 15     | 140 | 28     | 17     | 9      | 190 | 32     | 32     | 7      |
| 41 | 38     | 13     | 11     | 91  | 38     | 26     | 11     | 141 | 27     | 20     | 13     | 191 | 32     | 19     | 7      |
| 42 | 27     | 21     | 13     | 92  | 23     | 20     | 14     | 142 | 34     | 14     | 8      | 192 | 28     | 17     | 11     |
| 43 | 28     | 18     | 17     | 93  | 29     | 23     | 10     | 143 | 20     | 20     | 16     | 193 | 19     | 17     | 15     |
| 44 | 32     | 23     | 17     | 94  | 22     | 13     | 11     | 144 | 27     | 23     | 17     | 194 | 31     | 23     | 16     |
| 45 | 29     | 19     | 16     | 95  | 23     | 17     | 8      | 145 | 30     | 17     | 13     | 195 | 31     | 23     | 16     |
| 46 | 24     | 17     | 10     | 96  | 34     | 15     | 9      | 146 | 22     | 20     | 11     | 196 | 35     | 18     | 16     |
| 47 | 26     | 17     | 11     | 97  | 32     | 18     | 14     | 147 | 25     | 20     | 7      | 197 | 28     | 22     | 6      |
| 48 | 19     | 16     | 15     | 98  | 29     | 24     | 17     | 148 | 25     | 18     | 13     | 198 | 31     | 18     | 15     |
| 49 | 26     | 19     | 11     | 99  | 27     | 16     | 18     | 149 | 27     | 18     | 10     | 199 | 32     | 14     | 14     |
| 50 | 25     | 22     | 12     | 100 | 24     | 22     | 8      | 150 | 29     | 24     | 17     | 200 | 25     | 20     | 13     |

APÊNDICE C – MEDIDAS DAS DIMENSÕES DO MATERIAL FRESADO PARA  
CLASSIFICAÇÃO QUANTO A FORMA

Quadro 41

| N  | a (mm) | b (mm) | c (mm) | N   | a (mm) | b (mm) | c (mm) | N   | a (mm) | b (mm) | c (mm) | N   | a (mm) | b (mm) | c (mm) |
|----|--------|--------|--------|-----|--------|--------|--------|-----|--------|--------|--------|-----|--------|--------|--------|
| 1  | 43     | 31     | 14     | 51  | 34     | 32     | 16     | 101 | 16     | 13     | 13     | 151 | 20     | 11     | 9      |
| 2  | 36     | 35     | 19     | 52  | 49     | 35     | 19     | 102 | 26     | 17     | 7      | 152 | 18     | 13     | 9      |
| 3  | 48     | 32     | 19     | 53  | 44     | 31     | 15     | 103 | 23     | 18     | 7      | 153 | 15     | 10     | 14     |
| 4  | 46     | 32     | 22     | 54  | 38     | 33     | 23     | 104 | 29     | 16     | 12     | 154 | 16     | 12     | 10     |
| 5  | 49     | 32     | 18     | 55  | 35     | 31     | 28     | 105 | 22     | 16     | 13     | 155 | 16     | 12     | 11     |
| 6  | 42     | 36     | 9      | 56  | 42     | 30     | 16     | 106 | 20     | 17     | 7      | 156 | 32     | 20     | 12     |
| 7  | 43     | 30     | 18     | 57  | 48     | 36     | 17     | 107 | 19     | 17     | 8      | 157 | 31     | 21     | 7      |
| 8  | 34     | 33     | 20     | 58  | 15     | 18     | 12     | 108 | 34     | 25     | 18     | 158 | 26     | 21     | 12     |
| 9  | 36     | 33     | 22     | 59  | 18     | 13     | 9      | 109 | 28     | 23     | 17     | 159 | 19     | 10     | 7      |
| 10 | 35     | 32     | 17     | 60  | 25     | 16     | 10     | 110 | 36     | 24     | 16     | 160 | 13     | 10     | 6      |
| 11 | 32     | 31     | 7      | 61  | 31     | 17     | 12     | 111 | 39     | 24     | 15     | 161 | 19     | 12     | 11     |
| 12 | 34     | 32     | 13     | 62  | 20     | 15     | 10     | 112 | 32     | 25     | 11     | 162 | 13     | 10     | 6      |
| 13 | 26     | 22     | 12     | 63  | 20     | 17     | 7      | 113 | 39     | 25     | 14     | 163 | 19     | 12     | 6      |
| 14 | 40     | 25     | 14     | 64  | 23     | 23     | 10     | 114 | 25     | 17     | 9      | 164 | 15     | 11     | 12     |
| 15 | 40     | 25     | 11     | 65  | 30     | 22     | 11     | 115 | 22     | 17     | 8      | 165 | 21     | 11     | 10     |
| 16 | 43     | 25     | 13     | 66  | 28     | 24     | 9      | 116 | 21     | 19     | 6      | 166 | 24     | 11     | 11     |
| 17 | 36     | 23     | 13     | 67  | 32     | 24     | 10     | 117 | 19     | 17     | 17     | 167 | 21     | 10     | 7      |
| 18 | 30     | 23     | 11     | 68  | 32     | 25     | 7      | 118 | 18     | 16     | 12     | 168 | 17     | 11     | 8      |
| 19 | 30     | 24     | 10     | 69  | 32     | 23     | 12     | 119 | 24     | 17     | 11     | 169 | 19     | 12     | 10     |
| 20 | 43     | 34     | 17     | 70  | 36     | 23     | 19     | 120 | 23     | 13     | 16     | 170 | 15     | 12     | 8      |
| 21 | 48     | 37     | 22     | 71  | 32     | 25     | 13     | 121 | 25     | 17     | 6      | 171 | 19     | 11     | 12     |
| 22 | 47     | 37     | 17     | 72  | 33     | 23     | 12     | 122 | 22     | 15     | 11     | 172 | 24     | 10     | 12     |
| 23 | 44     | 34     | 13     | 73  | 22     | 22     | 11     | 123 | 33     | 18     | 7      | 173 | 31     | 11     | 11     |
| 24 | 35     | 33     | 14     | 74  | 27     | 23     | 7      | 124 | 19     | 17     | 10     | 174 | 20     | 12     | 9      |
| 25 | 35     | 32     | 12     | 75  | 35     | 25     | 17     | 125 | 20     | 15     | 12     | 175 | 17     | 11     | 13     |
| 26 | 36     | 26     | 14     | 76  | 26     | 25     | 8      | 126 | 24     | 16     | 7      | 176 | 24     | 12     | 12     |
| 27 | 37     | 26     | 10     | 77  | 34     | 23     | 10     | 127 | 25     | 17     | 11     | 177 | 24     | 18     | 10     |
| 28 | 35     | 26     | 14     | 78  | 27     | 25     | 9      | 128 | 22     | 16     | 8      | 178 | 24     | 16     | 13     |
| 29 | 34     | 33     | 20     | 79  | 31     | 23     | 9      | 129 | 19     | 13     | 11     | 179 | 27     | 15     | 17     |
| 30 | 36     | 33     | 22     | 80  | 29     | 23     | 11     | 130 | 36     | 16     | 13     | 180 | 25     | 17     | 12     |
| 31 | 35     | 32     | 17     | 81  | 24     | 22     | 13     | 131 | 32     | 17     | 9      | 181 | 21     | 18     | 16     |
| 32 | 31     | 28     | 17     | 82  | 24     | 22     | 11     | 132 | 32     | 19     | 9      | 182 | 23     | 17     | 11     |
| 33 | 37     | 30     | 10     | 83  | 29     | 25     | 12     | 133 | 34     | 19     | 10     | 183 | 24     | 18     | 13     |
| 34 | 33     | 30     | 13     | 84  | 31     | 24     | 10     | 134 | 30     | 15     | 13     | 184 | 24     | 17     | 11     |
| 35 | 32     | 31     | 7      | 85  | 35     | 24     | 15     | 135 | 30     | 18     | 10     | 185 | 20     | 11     | 9      |
| 36 | 30     | 18     | 15     | 86  | 35     | 21     | 11     | 136 | 21     | 15     | 12     | 186 | 32     | 20     | 12     |
| 37 | 25     | 16     | 9      | 87  | 41     | 25     | 12     | 137 | 21     | 17     | 14     | 187 | 31     | 21     | 7      |
| 38 | 26     | 19     | 9      | 88  | 34     | 25     | 18     | 138 | 25     | 19     | 13     | 188 | 13     | 10     | 6      |
| 39 | 24     | 14     | 8      | 89  | 28     | 23     | 17     | 139 | 29     | 19     | 16     | 189 | 19     | 12     | 6      |
| 40 | 26     | 15     | 11     | 90  | 32     | 21     | 18     | 140 | 29     | 14     | 9      | 190 | 21     | 10     | 7      |
| 41 | 24     | 18     | 9      | 91  | 27     | 19     | 9      | 141 | 23     | 19     | 13     | 191 | 17     | 11     | 8      |
| 42 | 32     | 18     | 12     | 92  | 40     | 21     | 18     | 142 | 35     | 16     | 13     | 192 | 24     | 10     | 12     |
| 43 | 25     | 14     | 6      | 93  | 36     | 24     | 16     | 143 | 27     | 14     | 12     | 193 | 21     | 11     | 12     |
| 44 | 30     | 17     | 12     | 94  | 41     | 19     | 11     | 144 | 22     | 19     | 8      | 194 | 27     | 18     | 14     |
| 45 | 32     | 16     | 15     | 95  | 39     | 24     | 15     | 145 | 23     | 19     | 16     | 195 | 38     | 17     | 11     |
| 46 | 26     | 19     | 13     | 96  | 32     | 25     | 11     | 146 | 32     | 16     | 10     | 196 | 29     | 17     | 14     |
| 47 | 23     | 17     | 11     | 97  | 23     | 11     | 18     | 147 | 30     | 16     | 11     | 197 | 21     | 18     | 20     |
| 48 | 21     | 16     | 17     | 98  | 17     | 12     | 13     | 148 | 25     | 15     | 15     | 198 | 21     | 13     | 13     |
| 49 | 26     | 15     | 8      | 99  | 16     | 10     | 10     | 149 | 20     | 15     | 9      | 199 | 18     | 16     | 10     |
| 50 | 23     | 19     | 10     | 100 | 14     | 10     | 10     | 150 | 22     | 16     | 8      | 200 | 20     | 16     | 9      |