



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS DA**  
**AMAZÔNIA – PRODERNA**

**RICARDO BENTES KATO**

**ESTUDO DA INFLUENCIA DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE**  
**COBRE SULFETADO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO ASFÁLTICO**

**Belém - PA**

**2016**



## **ESTUDO DA INFLUENCIA DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE COBRE SULFETADO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO ASFÁLTICO**

**RICARDO BENTES KATO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

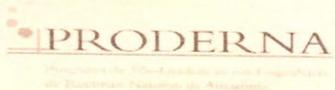
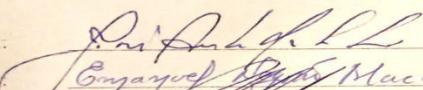
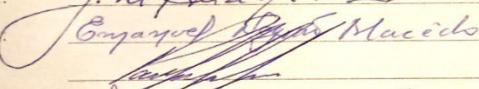
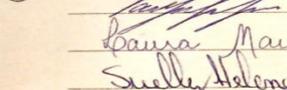
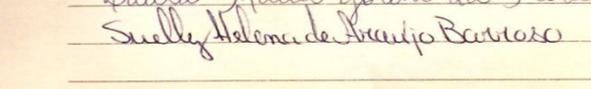
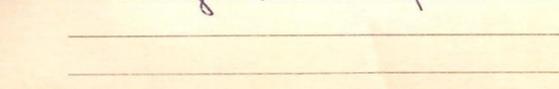
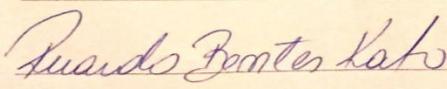
Orientador: Prof. Dr. José Antônio da Silva  
Souza

**Belém - PA  
2016**

## ESTUDO DA INFLUENCIA DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE COBRE SULFETADO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO ASFÁLTICO

**Ricardo Bentes Kato**

TESE DE DOUTORADO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO NECESSÁRIO À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.

|   |   |   |
|---|---|---|
|  <p>Universidade<br/>Federal do Pará</p>   |  <p>PRODERNA<br/>Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia</p>   |  <p>ITEC<br/>Instituto de Tecnologia da UFPA</p> |
| <p><b>ATA DA 57ª SESSÃO DE APRESENTAÇÃO E DEFESA DE TESE DE DOUTORADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA.</b></p>  |   |   |
| <p>1 Ata da 57ª sessão de apresentação e defesa de tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em<br/>2 Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia para a concessão do Grau de Doutor em Engenharia de Recursos<br/>3 Naturais na área de Uso e Transformação de Recursos Naturais, realizada às 08 horas e 30 minutos do dia 25 de<br/>4 novembro de 2016, na Sala de Reunião 03 do Edifício Síntese Plaza. A tese de doutorado intitulada "ESTUDO DA<br/>5 INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE COBRE SULFETADO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO<br/>6 ASFÁLTICO USINADO A QUENTE (CAUQ)" foi apresentada durante 50 minutos pelo candidato RICARDO<br/>7 BENTES KATO diante da banca examinadora aprovada pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em<br/>8 Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, assim<br/>9 constituída: Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza (PRODERNA/UFPA - ORIENTADOR); Prof. Dr. Emanuel Negrão<br/>10 Macêdo (PRODERNA/UFPA- EXAMINADOR); Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza (PPGEC/UFPA - EXAMINADOR);<br/>11 Prof.ª Dr.ª Laura Maria Goretti da Motta (COPPE/UFRJ - Examinadora), Prof.ª Dr.ª Suelly Helena de Araújo<br/>12 Barroso (Departamento de Engenharia de Transportes/UFC - Examinadora). Em seguida, o candidato foi<br/>13 arguido oralmente pelos membros da banca, tendo demonstrado suficiência de<br/>14 conhecimentos e capacidade de sistematização no tema objeto da tese, favorecendo a banca examinadora<br/>15 apresentar contribuições para tese e decidir pela aprovação da mesma,<br/>16 Com pequenas correções (conforme constam nos exemplares)<br/>17 e conceder o prazo de máximo de um mês (30 dias) para serem incorporadas as sugestões propostas pela banca.<br/>18 Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que é assinada pelos integrantes da banca examinadora e pelo<br/>19 candidato.</p> |   |   |
| <p>Belém, 25 de novembro de 2016.</p>   |   |   |
| <p>PRESIDENTE:</p>  |    |   |
| <p>MEMBROS:</p>   | <br><br><br> |   |
| <p>CANDIDATO:</p>   |   |   |

**Belém - PA**

**2016**

## AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre se fazer presente em minha vida.

A minha esposa e filho pela paciência, perdão pelas ausências necessárias.

Aos meus pais pelo amor, carinho e respeito que me criaram e guiaram minha vida.

Aos meus familiares que sempre torceram por mim.

Ao meu orientador José Antônio da Silva Souza pela dedicação e orientação ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Ao amigo e professor João Mota pelo grande apoio e conselhos.

A professora Laura Motta e membros de seu laboratório na COPPE, pelo apoio e valiosas orientações, em especial ao engenheiro Carlos Correia e Silva pela inestimável ajuda.

Ao amigo engenheiro Edemir Beltrão pela ajuda na coleta de material.

Às empresas que colaboraram com a pesquisa, pela confiança e atenção.

Aos que por algum motivo esqueci. Perdão.

Resumo de Tese apresentada ao PRODERNA/UFPA como requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais. (D. Eng.)

## **ESTUDO DA INFLUENCIA DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE COBRE SULFETADO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO ASFÁLTICO**

**Ricardo Bentes Kato**

Orientador: Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza

Área de Concentração: Uso e Transformação de Recursos Naturais

Com o desenvolvimento da sociedade industrial, a demanda de matéria prima vem sofrendo constantes aumentos ao longo das últimas décadas. Atrelado a este desenvolvimento ocorre a geração de resíduos, que no caso do cobre aproximadamente 1% do solo é explorado e transformado em cobre comercial, os outros 99% se tornam resíduos do processo, sendo depositado em bacias de contenção, onde estima-se em 90 milhões de toneladas a quantidade contida na planta de Canaã dos Carajás, de onde o resíduo deste trabalho foi obtido. Isto ocasiona custos elevados de construção e manutenção, além de gerar um passivo ambiental perigoso. Neste trabalho objetivou-se avaliar a adição de resíduo da mineração do cobre em substituição do agregado miúdo em CA. No projeto de dosagem verificou-se que o teor de 10% de resíduo em substituição ao agregado miúdo, mais precisamente 7,73% (obtido por regressão), como a proporção que melhor se adequou as propriedades Marshall, inclusive com menor teor de CAP em relação as demais, fato este proporcionado pelo tipo de finos do resíduo. De uma maneira geral as propriedades mecânicas medidas não foram alteradas pela presença do resíduo, exceção feita aos os dados de fadiga, onde as misturas de 20% e 25% apresentaram desempenho superior, principalmente pelo motivo dos valores de módulo de resiliência serem estatisticamente iguais. Os dados reológicos, frente a classificação Superpav, também se mostraram inalterados, assim como a espessura de revestimento dada na simulação no SisPav, ficando na ordem dos 5 cm. Ao analisar o potencial de utilização do resíduo, chegou-se a conclusão positiva quanto ao aspecto tecnológico, ambiental e econômico, com possibilidade de consumo de mais de 1.500.000 de toneladas nas vias próximas ao projeto, além da economia com consumo de CAP e cimento Portland para correção do traço.

**Palavra-Chave:** Material asfáltico, resíduos, meio ambiente.

Abstract of Thesis Project presented to PRODERNA/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Natural Resources Engineering (D.Eng.)

## **STUDY OF INFLUENCE OF COPPER PROCESSING WASTE IN PROPERTIES OF ASPHALTIC CONCRETE**

**Ricardo Bentes Kato**

Adivisor: José Antônio da Silva Souza, Dr. Eng.

Research Area: Use and Transformation of Natural Resources

With the development of industrial society, the demand for raw material has been increasing steadily over the last decades. Linked to this development occurs the generation of residues, which in the case of copper approximately 1% of the soil is exploited and transformed into commercial copper, the other 99% become waste of the process, being deposited in containment basins, where it is estimated 90 million tons the quantity contained in the Canaã dos Carajás plant, from where the residue of this work was obtained. This leads to high construction and maintenance costs, as well as generating a hazardous environmental liability. The objective of this work was to evaluate the addition of copper mining residue in replacement of the small aggregate in CA. In the dosage design it was verified that the content of 10% of residue in substitution to the small aggregate, more precisely 7.73% (obtained by regression), as the proportion that best suited the Marshall properties, even with lower CAP content. In relation to the others, fact this provided by the type of fines of the residue. In general, the measured mechanical properties were not altered by the presence of the residue, except for the fatigue data, where the 20% and 25% mixtures showed superior performance, mainly because the resilience modulus values were statistically the same. The rheological data, compared to Superpav classification, were also unchanged, as well as the coating thickness given in the simulation in the SisPav, being in the order of 5 cm. In analyzing the potential for the use of waste, a positive conclusion was reached regarding the technological, environmental and economic aspects, with the possibility of consumption of more than 1.500.000 tons in roads close to the project, besides the economy with CAP consumption and Portland cement for trace correction.

**Keyword:** asphaltic material, waste, environment.

# SUMÁRIO

|   |      |
|---|------|
| <b>RESUMO</b> .....                                   | v    |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                 | vi   |
| <b>SUMÁRIO</b> .....                                  | vii  |
| <b>LISTA DE FIGURAS</b> .....                         | x    |
| <b>LISTA DE TABELAS</b> .....                         | xiii |
| <b>LISTA DE ABREVEATURAS E SÍMBOLOS</b> .....         | xv   |
| <br>  |      |
| <b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....                  | 17   |
| 1.1 Justificativa da pesquisa.....                    | 17   |
| 1.2 Problema de pesquisa.....                         | 20   |
| 1.3 Objetivo Geral.....                               | 22   |
| 1.4 Objetivos Específicos.....                        | 22   |
| 1.5 Organização do Trabalho.....                      | 22   |
| <b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....       | 23   |
| 2.1 Modais de Transporte.....                         | 23   |
| 2.2 Modal Rodoviário.....                             | 26   |
| 2.3 O Concreto Asfáltico Usinado a Quente.....        | 29   |
| 2.3.1 Ligante Asfáltico.....                          | 30   |
| 2.3.1.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) .....     | 31   |
| 2.3.1.2 Asfaltos Diluídos.....                        | 32   |
| 2.3.1.3 Emulsões Asfálticas.....                      | 33   |
| 2.3.2 Envelhecimento de Misturas Asfálticas.....      | 33   |
| 2.3.3 Reologia.....                                   | 34   |
| 2.3.4 Agregado Mineral.....                           | 37   |
| 2.3.5 A Influencia de Finos na Mistura Asfáltica..... | 38   |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.3.6 Resistencia a Tração por Compressão Diametral.....                | 38        |
| 2.3.7 Módulo de Resiliencia.....  | 40        |
| 2.3.8 Fadiga em Pavimentos asfálticos.....                              | 41        |
| 2.4 A Questão Ambiental e a Mineração do Cobre.....                     | 43        |
| <b>CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA.....</b>                                    | <b>50</b> |
| 3.1 Considerações Iniciais.....   | 50        |
| 3.2 Agregados.....  | 51        |
| 3.3 Ligante Asfáltico.....  | 53        |
| 3.4 Misturas Asfálticas.....  | 54        |
| 3.5 Ensaio Mecânicos.....   | 55        |
| 3.5.1 Resistencia a Tração por Compressão Diametral.....                | 55        |
| 3.5.2 Ensaio Cantabro.....  | 58        |
| 3.5.3 Módulo de Resiliencia por Compressão Diametral.....               | 58        |
| 3.5.4 Fadiga por Compressão Diametral.....                              | 60        |
| 3.6 Reologia do Ligante e Adições.....                                  | 63        |
| 3.7 Previsão de Corpos de Prova a serem Moldados.....                   | 66        |
| <b>CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>          | <b>68</b> |
| 4.1 Caracterização do Resíduo de Cobre.....                             | 68        |
| 4.2 Caracterização da Areia.....  | 71        |
| 4.3 Caracterização do Seixo.....  | 74        |
| 4.4 Caracterização do CAP e Efeito do Resíduo em suas Propriedades..... | 76        |
| 4.5 Dosagem do Concreto Asfáltico Usinado a Quente.....                 | 81        |
| 4.6 MEV e EDS das Dosagens em Estudo.....                               | 83        |
| 4.7 Estabilidade Frente a Temperatura.....                              | 86        |
| 4.8 Resistencia à Tração.....   | 88        |
| 4.9 Resistencia a Tração frente a Variação de Temperatura.....          | 89        |

|  |            |
|--|------------|
| 4.10 Resistencia a Tração frente a Exposição ao Tempo.....                           | 93         |
| 4.11 Ensaio Catambro.....  | 95         |
| 4.12 Módulo de Resiliencia.....  | 96         |
| 4.13 Relação MR/RT.....  | 97         |
| 4.14 Fadiga a Tensão Controlada.....   | 98         |
| 4.15 Reologia.....   | 103        |
| 4.16 Dimensionamento de um Pavimento Hipotético pelo SisPav.....                     | 108        |
| 4.17 Potencialidade de Aplicação do Resíduo em Pavimentação Asfáltica na Região..... | 109        |
| <b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>               | <b>113</b> |
| 5.1. Principais Contribuições da Tese.....   | 113        |
| 5.2. Principais Constatações da Tese.....  | 113        |
| 5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros.....   | 116        |
| <b>BIBLIOGRAFIA.....</b>   | <b>117</b> |

## **ANEXOS**

Anexo I – Caracterização dos Materiais

Anexo II – Dosagem das Misturas

Anexo III –Parâmetros Marshall

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 - Visão sócio-econômica do transporte. ....  | 24 |
| Figura 2.2 - Mapa rodoviário do Brasil. ....  | 29 |
| Figura 2.3 - Resíduo da mineração de cobre sulfetado.....   | 49 |
| Figura 3.1 - Configuração do ensaio de resistência a tração realizados nesta pesquisa.....              | 56 |
| Figura 3.2 - Corpos de prova em exposição ao tempos.....  | 57 |
| Figura 3.3 - Equipamento utilizado para realização do ensaio de módulo de resiliência (COPPE/UFRJ)..... | 59 |
| Figura 3.4 - Equipamento utilizado para realização do ensaio de fadiga.....                             | 61 |
| Figura 3.5 - Equipamento utilizado para realização do ensaio RTFOT (CPPE/UFRJ).....                     | 64 |
| Figura 3.6 - Reômetro de Cisalhamento Dinâmico do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.....           | 64 |
| Figura 3.7 - Fluxograma da pesquisa em termos de ensaios mecânicos.....                                 | 67 |
| Figura 4.1 - Foto do resultado da granulometria do resíduo.....   | 68 |
| Figura 4.2 - Foto do ensaio de equivalente de areia do resíduo.....                                     | 69 |
| Figura 4.3 - MEV do resíduo de cobre deste estudo: (a) x120; (b) x 600.....                             | 70 |
| Figura 4.4 - EDS do resíduo utilizado nesta pesquisa.....   | 70 |
| Figura 4.5 - Foto do resultado da granulometria da areia.....   | 72 |
| Figura 4.6 - Foto do ensaio de equivalente de areia da areia.....                                       | 72 |
| Figura 4.7 - MEV da areia utilizada nesta pesquisa: (a) x 120; (b) x 1000.....                          | 73 |
| Figura 4.8 - Foto do resultado da granulometria do seixo.....   | 74 |
| Figura 4.9 - Resultados do ensaio de viscosidade Saybolt-Furol do ligante asfáltico desta pesquisa..... | 77 |
| Figura 4.10 – Resultados do ensaio de viscosidade rotacional do ligante asfáltico desta pesquisa.....   | 77 |
| Figura 4.11- Resultados do ensaio ponto de fulgor do ligante asfáltico desta pesquisa.....              | 79 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.12 - Resultados do ensaio do ponto de amolecimento do ligante asfáltico desta pesquisa..... | 80 |
| Figura 4.13 - Resultados do ensaio de penetração do ligante asfáltico desta pesquisa.....            | 81 |
| Figura 4.14 - Resultados do ensaio de Ductibilidade do ligante asfáltico desta pesquisa.....         | 81 |
| Figura 4.15 – Alguns dos corpos de prova confeccionados durante a dosagem                            | 82 |
| Figura 4.16 - Teor de projeto de CAP e resíduo.....  | 83 |
| Figura 4.17 - MEV dosagem piloto: (a) x 600; (b) x 1000.....   | 84 |
| Figura 4.18 - MEV dosagem 25% de resíduo: (a) x 600; (b) x 1000.....                                 | 84 |
| Figura 4.19 - EDS dosagem piloto. ....   | 85 |
| Figura 4.20 - EDS dosagem 25% de resíduo.....  | 85 |
| Figura 4.21 - Estabilidade na dosagem ótima a 30°C. ....   | 86 |
| Figura 4.22 - Estabilidade na dosagem ótima a 60°C.....  | 87 |
| Figura 4.23 - Redução da estabilidade frente a variação de temperatura de 30°C para 60°C.....        | 87 |
| Figura 4.24 - Exemplo de ruptura dos corpos de prova a tração por compressão diametral.....          | 88 |
| Figura 4.25 - Resultados da resistência à tração por compressão diametral.....                       | 89 |
| Figura 4.26 - Resultados da resistência à tração a tração a 50°C.....                                | 90 |
| Figura 4.27 - Resultados da resistência à tração a tração a 70°C.....                                | 90 |
| Figura 4.28 - Comparação das perdas de resistência em relação a temperatura de 25° C.....            | 91 |
| Figura 4.29 - Variação da resistência a tração frente a temperatura dentro de cada dosagem.....      | 92 |
| Figura 4.30 - Variação da resistência a tração frente a exposição ao tempo.....                      | 93 |
| Figura 4.31 - Comparação da variação da resistência a tração antes e após a exposição ao tempo.....  | 94 |
| Figura 4.32 - Porcentagem da perda da resistência a tração após a exposição ao tempo.....            | 94 |
| Figura 4.33 - Resultados do ensaio Cantabro.....   | 96 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4.34 - Resultados do ensaio de módulo de resiliência desta pesquisa....                                 | 97  |
| Figura 4.35 - Relação MR/RT. ....  | 98  |
| Figura 4.36 - Alguns corpos de prova submetidos ao ensaio de fadiga.....                                       | 98  |
| Figura 4.37 - Curva de fadiga em função de $\Delta\sigma$ para a dosagem piloto desta pesquisa.....            | 99  |
| Figura 4.38 - Curva de fadiga em função de $\Delta\sigma$ para a dosagem de 10% de resíduo desta pesquisa..... | 99  |
| Figura 4.39 - Curva de fadiga em função de $\Delta\sigma$ para a dosagem de 20% de resíduo desta pesquisa..... | 100 |
| Figura 4.40 - Curva de fadiga em função de $\Delta\sigma$ para a dosagem de 25% de resíduo desta pesquisa..... | 100 |
| Figura 4.41 - Curva de fadiga de $\Delta\varepsilon$ para a dosagem piloto.....                                | 101 |
| Figura 4.42 - Curva de fadiga de $\Delta\varepsilon$ para a dosagem de 10% de resíduo.....                     | 101 |
| Figura 4.43 - Curva de fadiga de $\Delta\varepsilon$ para a dosagem de 20% de resíduo.....                     | 102 |
| Figura 4.44 - Curva de fadiga de $\Delta\varepsilon$ para a dosagem de 25% de resíduo.....                     | 102 |
| Figura 4.45 - Ângulo de fase do ligante asfáltico em várias condições.....                                     | 104 |
| Figura 4.46 - Módulo complexo do ligante asfáltico em várias condições.....                                    | 104 |
| Figura 4.47 - Grau de desempenho do ligante asfáltico em várias condições....                                  | 105 |
| Figura 4.48 - Grau de Desempenho do ligante asfáltico em várias condições.....                                 | 106 |
| Figura 4.49 - Módulo de perda do ligante asfáltico em várias condições.....                                    | 106 |
| Figura 4.50 - Tangente de $\delta$ do ligante asfáltico em várias condições.....                               | 107 |
| Figura 4.51 - Curva do Ensaio MSCR do ligante asfáltico em várias condições.                                   | 108 |
| Figura 4.52: 5ª Regional do SETRAN. ....   | 109 |
| Figura 4.53 – Quantitativo do tipo de pavimentação na região. ....   | 110 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1.1 - Tipos e características do problema.....   | 21 |
| Tabela 2.1 - Extensão rodoviária do Brasil não pavimentada.....                                     | 26 |
| Tabela 2.2 - Frota Nacional de veículos do Brasil.....  | 27 |
| Tabela 2.3 - Perfil da frota nacional de veículos de transporte de carga. ....                      | 28 |
| Tabela 2.4 - Classificação do asfalto diluído.....  | 32 |
| Tabela 2.5 - Classificação das etapas do envelhecimento das misturas<br>asfálticas.....             | 33 |
| Tabela 2.6 - Vantagens e desvantagens do ensaio de tração por compressão<br>diametral.....          | 39 |
| Tabela 2.7 - Principais fatores que influenciam na resistência a fadiga.....                        | 42 |
| Tabela 2.8 - Classificação do mineralógica típica do minério de cobre da serra<br>de Sossego.....   | 48 |
| Tabela 2.9 - Classificação do química típica do minério de cobre da serra de<br>Sossego. ....       | 48 |
| Tabela 3.1 - Resumo dos ensaios de caracterização do agregado miúdo desta<br>pesquisa.....          | 51 |
| Tabela 3.2 - Resumo dos ensaios de caracterização do seixo desta pesquisa.....                      | 52 |
| Tabela 3.3 - Limites das propriedades do agregados para a caracterização<br>AIMS.....               | 52 |
| Tabela 3.4 - Resumo dos ensaios de caracterização do CAP desta pesquisa.....                        | 53 |
| Tabela 3.5 - Parâmetros Marshall de dosagem do concreto asfáltico.....                              | 55 |
| Tabela 3.6 - Classificação AASHTO M 332-14 do ligante asfáltico em função<br>do tráfego.....        | 65 |
| Tabela 3.7 - Relação dos corpos de prova utilizados na pesquisa.....                                | 66 |
| Tabela 4.1 - Resumo da caracterização tradicional do resíduo de cobre usado<br>nesta pesquisa ..... | 69 |
| Tabela 4.2 - Propriedades resíduo de cobre segundo análise no AIMS.....                             | 71 |
| Tabela 4.3 - Resumo da caracterização tradicional da areia usada nesta<br>pesquisa.....             | 73 |
| Tabela 4.4 - EDS da Areia.....  | 73 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 4.5 - Resumo da caracterização tradicional do seixo usado nesta pesquisa.....                        | 75  |
| Tabela 4.6 - Propriedades do seixo segundo análise no AIMS.....   | 75  |
| Tabela 4.7 – Resultados do ensaio de viscosidade Saybolt-Furol do CAP usado nesta pesquisa.....             | 77  |
| Tabela 4.8 - Tabela resumo da caracterização do CAP usado nesta pesquisa.....                               | 79  |
| Tabela 4.9 - Resultados do ensaio de ponto de fulgor do CAP usado nesta pesquisa.....                       | 79  |
| Tabela 4.10 - Resultados do ensaio do ponto de amolecimento do CAP usado nesta pesquisa.....                | 80  |
| Tabela 4.11 - Resultados do ensaio de penetração do CAP usado nesta pesquisa.....                           | 81  |
| Tabela 4.12 - Teor de projeto de CAP para cada teor de resíduo.....   | 82  |
| Tabela 4.13 - Resultados do ensaio de resistência à tração.....   | 88  |
| Tabela 4.14 - Comparação das perdas de resistência em relação a temperatura de 25° C.....                   | 91  |
| Tabela 4.15 - Parâmetros matemáticos das amostras frente a temperatura dentro de cada grupo de dosagem..... | 92  |
| Tabela 4.16 - Resultados do ensaio Cantabro.....  | 95  |
| Tabela 4.17 - Redução da perda por abrasão em relação a dosagem piloto.....                                 | 95  |
| Tabela 4.18 - Resumo dos resultados da reologia do ligante asfáltico desta pesquisa.....                    | 103 |
| Tabela 4.19 - Resultado MSCR do ligante asfáltico desta pesquisa.....                                       | 107 |
| Tabela 4.20 - Resumo das informações das curvas de fadiga das misturas asfálticas desta pesquisa.....       | 108 |
| Tabela 4.21 - Dimensionamento da espessura do pavimento segundo o SisPav.....                               | 109 |
| Tabela 4.22 – Extensão das vias urbanas da 5ª Regional.....   | 111 |
| Tabela 4.23 – Consumo de resíduo para pavimentação das vias da 5ª Regional do estado do Pará.....           | 111 |
| Tabela 4.24 - Custo de C.P em relação a massa de C.A.....   | 112 |
| Tabela 4.25 - Economia de CAP em relação as dosagens de estudo.....   | 112 |

## LISTA DE ABREVEATURAS E SÍMBOLOS

ASTM - *American Society for Testing Material*

AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Officials*

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CA – Concreto Asfáltico

CNT – Confederação Nacional dos Transportes

D<sub>1</sub> - Densidade do material betuminoso líquido

D<sub>s</sub> - Densidade do material betuminoso semi-sólido

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito

DRX – Reômetro de cisalhamento dinâmico

F – Carga vertical

G\* - Módulo Complexo

G' – Grau de desempenho

G'' – Módulo de perda

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

MR – Módulo de Resiliencia

M<sub>u</sub> – Massa Unitária do estado solto

N - Vida a Fadiga (número de repetição de carga até a ruptura)

P<sub>ar</sub> – Peso do corpo de prova ao ar

P<sub>i</sub> – Peso do corpo de prova imerso

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

P<sub>p</sub> – Peso do corpo de prova parafinado ao ar

P<sub>pi</sub> – Peso do corpo de prova parafinado imerso

PPP – Parceria Público-Privado

RT – Resistencia a Tração,

$\gamma$  – Massa específica real

$\gamma_{ap}$  – Massa específica aparente

$\delta$  – Ângulo de fase

v – Volume da amostra

VAM – Vazios do Agregado Mineral

$\Delta$  – Deformação elástica registrada no computador (cm)

$\Delta\sigma$  – Diferença de tensões no centro do corpo de prova, em MPa

$\Delta\mathcal{E}$  – Deformação resiliente

$\mu$  - Coeficiente de Poisson

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

---

### 1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Desde os primórdios da humanidade, o homem tem a necessidade de se transportar, seja em busca de alimentos, seja em busca de moradia, onde estudos apresentam os primeiros indícios de trilhas abertas por antigos povos assírios e egípcios. No início os deslocamentos eram feitos tendo o homem como força motriz, em um modelo conhecido como nomadismo, ou seja, o homem sem se fixar na terra.

A partir do momento que o homem começa a se estabelecer no solo, tendo a terra para o cultivo e criação de animais, há uma diversificação e aumento da produção, conseqüentemente, surge a tração animal para auxiliar o transporte das mercadorias, fato este marcante no Sistema Feudal (RODRIGUES, 2007).

Outro fato que descreve a evolução dos transportes na história da humanidade são os relatos de o Império Romano se utilizar da pavimentação de vias para o deslocamento de seus exércitos, principalmente em períodos chuvosos, o que lhes dava uma grande vantagem competitiva em relação a seus inimigos.

Com a evolução dos sistemas econômicos (feudalismo para o capitalismo), o ressurgimento do comércio e o renascimento da moeda motivaram a evolução acelerada dos sistemas de transporte vigentes. Incentivado pelo capital, as grandes navegações marcaram época em busca de metais preciosos, novos mercados consumidores e produtores de matéria prima. Neste contexto destacaram-se as caravelas, e por consequência o modal hidroviário, proporcionando verdadeiras aventuras em busca do Novo Mundo.

A passagem do capitalismo mercantil para o industrial foi delimitada pela revolução industrial, marcada pela intensa necessidade de energia e matéria prima para abastecer a indústria, assim como a geração de grandes quantidades de produtos acabados dado pela produção em escala industrial. Nesta nova fase os sistemas de transporte se tornaram fundamentais como suporte a esta nova dinâmica.

Com a revolução industrial, houve a gradativa substituição da madeira pelo ferro e posteriormente pelo aço, o que possibilitou o surgimento de novas formas de transporte como as ferrovias, os automóveis e o avião, além da modernização das antigas caravelas

pelos navios a vapor, o que incentivou a construção e constante evolução de veículos cada vez mais rápidos e com maior capacidade de carga. Os sistemas de transporte experimentaram uma evolução nunca antes vivenciada, onde pessoas e produtos passaram a se movimentar cada vez mais rápido, a distâncias mais longas e em maior quantidade. A revolução industrial pode ser chamada também de revolução nos transportes, o que possibilitou o seu sucesso, por conectar empresas, países e pessoas, que passou a ser elemento chave do modo de produção capitalista (SENE, 2011).

Na sociedade industrial há uma constante e crescente necessidade de extração de metais para alimentar os mais diversos setores econômicos como: setor siderúrgico e metalúrgico, construção civil, construção naval, setor aeroespacial, entre outros, associado a grande quantidade de energia das mais diversas fontes. O setor mineral atua como alavanca social e econômica de muitos países, seja pelo efetivo da quantidade de trabalhadores empregados, seja pela participação deste setor no PIB (Produto Interno Bruto).

Consequentemente a distribuição da população mundial sofreu alterações a partir do século XIX. As indústrias passaram a atrair a grandes densidades populacionais, como o nordeste dos EUA e a Europa ocidental. Nestes locais ocorre um ciclo virtuoso com melhorias nos meios de transportes, urbanização, geração de emprego, pontos fundamentais para intensificação de ainda mais deslocamentos e direcionamento de fluxos humanos e de capital, tendo como exemplo o papel das ferrovias na ocupação do oeste norte americano. As cidades surgem, crescem e se dinamizam em função de sua conectividade viabilizada por redes de transporte e de comunicação (BECKER e EGLER, 2010).

A lógica da importância dos sistemas de transporte para a sociedade resulta da constatação de que os recursos materiais e humanos se concentram em determinadas regiões, surgindo a necessidade de deslocamento segundo a oferta e demanda, logo sem transporte a produção ficaria restrita aos mercados produtores. O transporte, do ponto de vista da economia, é um *setor de serviço* ou de *demand intermediária*, que em si não cria riqueza (LANSING, 1966).

Corroborando com o parágrafo acima, Costa (2008) define que a movimentação e pessoas e produtos reflete o grau de modernização de uma sociedade, além de demonstrar as diferentes atividades desenvolvidas numa sociedade, sendo um fator determinante para a qualidade de vida das pessoas.

Em qualquer sociedade os transportes têm papel fundamental no desenvolvimento econômico, seja na movimentação de pessoas, seja no transporte de mercadorias, integrando regiões produtivas diferentes, seja no território nacional ou além das fronteiras do país. Analisando financeiramente o custo do transporte contribui positivamente ou negativamente no custo final do produto, por motivos como: o modal escolhido, as taxas cobradas pelo setor e as condições de infra-estrutura oferecidas (CALABREZI, 2005).

Semelhante ao Transporte, somente a energia pode ser comparada por participar de todas as atividades humanas, sendo por isto denominado de: insumos difusos, ou seja, que compõem todas as ações produtivas. Seu adequado planejamento, implantação, utilização e operação, por participar de todos os processos produtivos têm grande influencia na composição dos custos de produção. No Brasil, por exemplo, os custos de transporte formam uma parte significativa do conhecido “*Custo Brasil*”, que retira competitividade em muitas áreas do Comércio Exterior.

Segundo Prado Júnior (2004), no Brasil são conhecidas as dificuldades na área dos transportes, desde os tempos coloniais até os atuais. Neste ponto destacam-se as dificuldades, principalmente devido as dimensões continentais e de natureza geográficas, marcando as enormes distancias de deslocamento no interior do Brasil, e regiões Norte e Centro-Oeste.

Prado Júnior (2004) complementa que as características de colonização, ocupação e os ciclos econômicos fizeram com que partes significativas do território nacional permanecesse desprovida de adequada infraestrutura de transporte eficaz por um longo período da história, deixando esta parte do país em desvantagem em relação a outras regiões, como fachada Atlântica por exemplo.

A oferta de infraestrutura de transporte está intimamente ligada ao processo de desenvolvimento social e econômico, e deve fazer parte dos planos e objetivos de desenvolvimento de cada nação.

Neste contexto supracitado encontra-se o modal rodoviário, onde no Brasil responde por cerca de 60% da matriz de transporte de carga, por onde se escoam a produção de bens e serviços (CNT, 2011).

Contrapondo-se ao vértice do processo de desenvolvimento humano citado anteriormente, o desafio de preservar o meio onde se vive ganha notória importância pós revolução industrial a partir do século XX, onde tirar da natureza o máximo possível sem eliminar a sua capacidade de regeneração passa a ser um objetivo a ser alcançado pela

moderna sociedade. No início da década de 70, mais precisamente em 1972, ocorre a Conferência das Nações sobre Desenvolvimento Humano, reunindo vários países a tendo como produto criação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA).

Em 1992 ocorre a segunda conferência, conhecida como Rio 92, onde foi gerada uma agenda de cooperação internacional - a Agenda 21 - visando aplicar no século 21 o desenvolvimento sustentável no planeta. Em setembro de 2002, foi realizada a Conferência das Nações Unidas em Johannesburgo, África do Sul, também conhecida como Rio+10. Enfatizou-se mais uma vez a necessidade de se reduzir a geração de gases do efeito estufa, o consumo de energia, a contaminação da água e do solo (ALMEIDA, 2002).

Como pano de fundo desta tese tem-se o subtema de desenvolvimento sustentável, que para efeito conceitual adota-se o definido no Relatório de *Brundtland* onde aponta que desenvolvimento sustentável é: “*Aquele que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade de as futuras gerações satisfazerem suas próprias necessidades*”.

Segundo o descrito anteriormente, justifica-se esta pesquisa dada a importância do modal rodoviário para o Brasil, assim como a crescente necessidade de destinação aos resíduos gerados pelos processos de exploração mineral, seja como ponto de desenvolvimento econômico, seja como motriz para o desenvolvimento social de uma região.

## 1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Quando se inicia um estudo têm-se vários interesses envolvidos, como: práticos, intelectuais ou científicas. Estes interesses vêm a se tornar um problema quando se converte em interesses de algum ator social (LAKATOS, 2008).

Segundo o mesmo autor, um problema pode ser delimitado conforme o tabela 1.1:

Tabela 1.1 – Tipos e características do problema.

| <b>Tipos de Problema</b> | <b>Características do Problema</b>   |
|--------------------------|--|
| Ameaça                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Perigo de perder algo</li> <li>• Agravar uma situação</li> </ul>  |
| Oportunidade             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilidade que surge</li> <li>• Possibilidade de aproveitá-la</li> <li>• Eficácia no aproveitamento</li> </ul> |
| Obstáculo                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Deficiências observadas</li> </ul>  |

Fonte: LAKATOS, 2008.

As características geográficas do Brasil merecem atenção especial aos sistemas de transporte, onde a mobilidade se faz fundamental para conectar mercados e pessoas. Porém o que se observa é que em mais de duzentos anos de independência o território nacional permanece desarticulado e subaproveitado. Este fato leva a inúmeros problemas sociais, além de vários entraves econômicos como os elevados custos logísticos verificados (SENE, 2011).

Com a descoberta e exploração mineral na região norte, surge paralelamente o problema de geração de rejeitos ou resíduos industriais, muitas vezes armazenados em gigantescas áreas de estocagem, gerando um passivo ambiental.

Neste contexto ambiental (geração de resíduos), técnico (melhoria de desempenho) e econômico (importância dos sistemas de transporte), surge a questão de destinação do resíduo objeto deste estudo, no caso o resultante do processo de mineração do cobre, apontando o seguinte problema de pesquisa desta tese:

- ***Como se apresenta as propriedades do resíduo proveniente da exploração de cobre sulfetado, quando aplicado em material para pavimentação asfáltica?***

### 1.3 OBJETIVO GERAL

- *Estudar o desempenho de CAUQ com a utilização do resíduo da mineração de cobre como material para pavimentação asfáltica*

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar o resíduo da mineração do cobre;
- Apresentar o desempenho quando adicionado ao CAP;
- Definir a dosagem para as misturas, comparando-as a uma amostra sem resíduo;
- Estudar as variações no desempenho de propriedades mecânicas dos corpos de prova provenientes do acréscimo do resíduo;
- Analisar o desempenho a tração dos corpos de prova dosados com o resíduo frente a temperatura;
- Analisar o desempenho à fadiga nas diversas misturas nas dosagens de projeto;
- Analisar o dimensionamento da espessura da camada de rolamento com e sem resíduo;
- Estudar as interações reológicas da adição do resíduo do cobre;
- Estudar o potencial de consumo na região.

### 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 1 trata da motivação e requisitos metodológicos da tese.

O capítulo 2 relata a revisão bibliográfica necessária ao a contextualização teórica, perpassando como temas da produção do resíduo, meio ambiente e propriedades do CAUQ (Concreto Asfáltico Usinado a Quente).

O capítulo 3 descreve a metodologia utilizada na pesquisa.

No capítulo 4 são tecidos as análises dos resultados encontrados.

No capítulo 5 são emitidas as conclusões finais do estudo.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

#### 2.1 MODAIS DE TRANSPORTE

O sistema de transporte local tem forte influência no surgimento e desenvolvimento de mercados produtores e consumidores, haja vista que a produção tende a ficar limitada aos limites geográficos locais se não houver condições para o seu escoamento. Logo um sistema de transporte eficiente é fundamental para aumentar a concorrência entre centros produtores, assim como a competitividade da produção local (FLEURY, 2000; BALLOU, 2004).

Para Frazelli (2002) um sistema de transporte eficiente permite expandir mercados para além dos centros de produção, otimizando a utilização das instalações, e possibilitando maior opção na escolha de fornecedores, pois quebra a dependência dos parceiros locais, além de, por fazer parte de importante parcela do custo de produção, reduzir do preço do produto final.

Pode-se definir sistema de transporte como: o componente logístico que tem a finalidade de movimentar carga, passageiros e serviços. Os sistemas de transportes decompõem-se em três subsistemas (BOWERSOX e CROSS, 2007; BALLOU, 1993 e 2004; ALVARENGA e NOVAES, 2005):

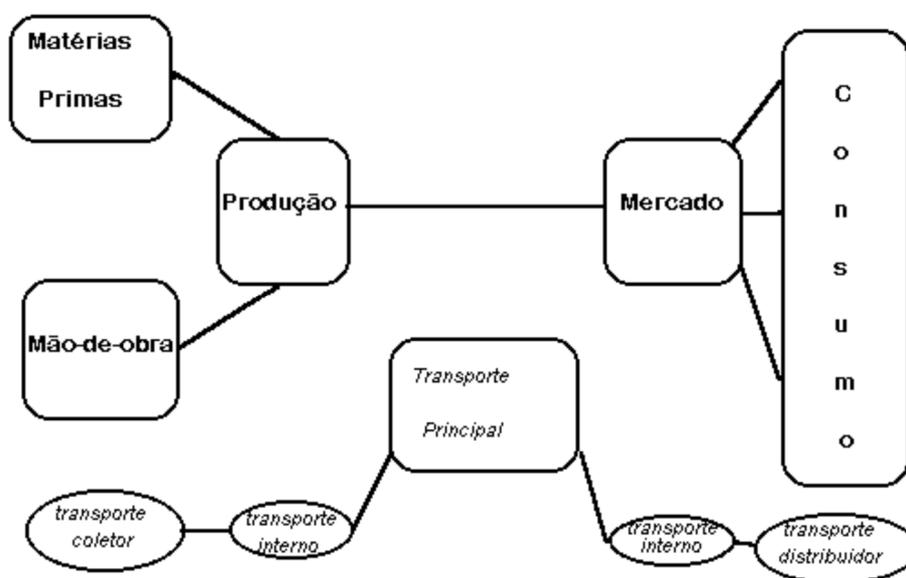
- Terrestre
  - Rodoviário
  - Ferroviário
  - Dutoviário
- Aquático
  - Fluvial
  - Lacustre
  - Marítimo
- Aéreo

Cada modal anteriormente citado (rodoviário, ferroviários, aquaviário, aéreo e dutoviário) tem diferentes utilizações que variam com alguns critérios como: distância a transportar, volume de tráfego, valor agregado da carga e quantidade de carga. Os sistemas de transporte, podem ser comparados a energia por sua característica de

participar, de maneira direta ou indireta, de todos os processos produtivos, e sua correta seleção e utilização pode trazer algumas vantagens competitivas como:

- Aumento da competitividade
- Redução dos custos de produção
- Economia de escala

No esquema da figura 2.1 a seguir é dada uma visão sócio-econômica do transporte, através de uma análise sistêmica, onde todas as etapas interagem fortemente, onde se deseja buscar a otimização do sistema pela ação integrada do conjunto de subsistemas (VOIGT, 1964).



**Figura 2.1:** Visão sócio-econômica do transporte.  
Fonte: VOIGT, 1964.

Bowersox e Cross (2007) corroboram com Voigt (1964), complementando que a funcionalidade do transporte tem duas funções principais:

- **A movimentação de produtos:** destaca-se a movimentação de produtos dentro da cadeia produtiva, utilizando recursos desde a origem até um destino final;
- **Estocagem de produtos:** esta ocorre durante o transporte, pois durante esta ação o acondicionamento dos produtos deve manter as características qualitativas desejadas do produto transportado.

Farris e Shrock (1990) defendem que as decisões de transporte são geralmente influenciadas por cinco variáveis:

- **Os embarcadores e destinatários:** coincidem em seus objetivos de movimentar a carga a um menor custo, e em condições satisfatórias de estocagem;
- **Transportadoras:** fazem parte do sistema como atravessadoras entre os clientes e os fornecedores, pertencem ao grupo intermediário, visando o aumento de receitas, ou por aumento de negociações, ou por aumento do valor cobrado pelo serviço;
- **Governo:** devido o sistema de transporte ser fundamental para a movimentação da economia, o governo tem o papel de regular, incentivar a competição e proporcionar infraestrutura eficaz;
- **Público:** parte final da cadeia produtiva, onde os custos de transporte e eficácia irão refletir nos custos dos produtos finais.

A escolha do modal de transporte, ou multimodal, deve ser orientada pela combinação das variáveis custo e qualidade, onde se sugere a análise de características básicas como (BALLOU, 2004; LIMA, 2006):

- **Preço:** taxas, seguros, locações, salários, combustível, depreciação, administrativos, etc;
- **Tempo em trânsito:** tempo médio total desde a saída até o destino final;
- **Variabilidade:** incertezas que ocorrem em embarques (condições climáticas, congestionamentos, escalas, burocracia);
- **Danos e perdas:** capacidade de manter a carga íntegra ao final do serviço.

Para Ballou (1993); Leenders; Fearon; Flynn; Johnson (2001) quando os sistemas de transportes conseguem atingir seus objetivos com eficiência e eficácia, contribui, de maneira direta e indireta, para:

- Melhoria do padrão de vida da sociedade;
- Disponibilizar bens e serviços à população por valores mais baratos;
- Efeito estabilizador nos preços das mercadorias, principalmente nas entressafras;
- Proporcionar concorrência entre produtores;
- Flexibilizar a localização da Produção, não atrelada aos mercados consumidores.

## 2.2 MODAL RODOVIÁRIO

O modal rodoviário é o mais antigo de todos, onde estudos apontam para trilhas primitivas, ou pavimentadas, onde o Império Romano, para trânsito de seus exércitos, praticava esta técnica principalmente na época de chuvas. Este modal foi o dominante na humanidade até a invenção das ferrovias no período da revolução industrial, ganhando força novamente após a invenção do automóvel em 1886 na Alemanha. Sua rápida expansão se deu principalmente após a segunda guerra mundial.

A via é composta por sub-leito, leito, sub-base, base e o pavimento, que pode ser flexível (material asfáltico) ou rígido (concreto). Obras de arte, como pontes e túneis, e obras complementares também fazem parte da estrutura da via.

O século XIX marca a aparição das primeiras estradas no Brasil, comparáveis ao padrão atual, onde a necessidade de escoamento dos produtos, e o crescimento do intercâmbio comercial entre localidades e regiões exigiam a abertura de rotas mais modernas. A primeira rodovia pavimentada do Brasil é a hoje conhecida como Washington Luís, e foi inaugurada em 1928, ligando a cidade do Rio de Janeiro a Petrópolis. A implantação da indústria automobilística, em meados do século passado, também foi fator determinante para a consolidação do transporte rodoviário como o mais utilizado no Brasil.

Dados do Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre apontam que o Brasil apresenta mais de um milhão e trezentos quilômetros de rodovias não pavimentada, distribuída conforme dados da tabela 2.1 a seguir:

Tabela 2.1: Extensão rodoviária do Brasil não pavimentada.

| <b>Extensão Rede Rodoviária não pavimentada do Brasil (Km)</b> |                      |
|--|----------------------|
| Federal  | 13.132,800           |
| Estadual   | 113.450,600          |
| Municipal  | 1.234.918,300        |
| Coincidente Federal  | 5.430,400            |
| <b>Extensão Total (km)</b>                                     | <b>1.366.932,100</b> |

Fonte: DNIT, 2012.

Os veículos podem ser de carga, passageiros ou serviço, com propulsão própria ou rebocada, utilizando como combustível de sua força motriz as mais diversas fontes: gasolina, diesel, etanol, eletricidade, solar, entre outras. A frota brasileira de veículos está

distribuída conforme a tabela 2.2 abaixo, segundo o Departamento Nacional de Trânsito (2012), onde observa-se mais de setenta e cinco milhões de veículos circulando nas vias.

Tabela 2.2 - Frota Nacional de Veículos no Brasil

| <b>Frota Nacional de Veículos – Brasil</b> |                   |
|--|-------------------|
| AUTOMÓVEL                                  | 42.415.150        |
| CAMIONETA                                  | 2.266.175         |
| BONDE                                      | 62                |
| UTILITÁRIO                                 | 400.524           |
| CAMINHÃO                                   | 2.371.543         |
| CAMINHÃO TRATOR                            | 489.221           |
| CAMINHONETE                                | 5.193.073         |
| ÔNIBUS                                     | 512.172           |
| CHASSI-PLATAFORMA                          | 2.998             |
| MICROÔNIBUS                                | 316.916           |
| MOTOCICLETA                                | 16.801.525        |
| MOTONETA                                   | 2.996.571         |
| TRATOR                                     | 27.183            |
| QUADRICICLO                                | 154               |
| REBOQUE E SEMI-REBOQUE                     | 953.359           |
| CICLOMOTOR                                 | 125.835           |
| TRICICLO                                   | 18.731            |
| SEMI-REBOQUE                               | 718.035           |
| SIDE-CAR                                   | 8.505             |
| OUTROS                                     | 9.080             |
| <b>TOTAL</b>                               | <b>75.626.812</b> |

Fonte: DENATRAN, 2012.

Para Ballou (2004) os caminhões, principal veículo do modal rodoviário de carga, só deveriam ser utilizados para o transporte de produtos acabados ou semi-acabados e à curtas distancias com linha de alcance de 1.150 quilômetros por viagem.

Desta frota apresenta-se o perfil dos veículos de carga registrados na Agência Nacional de Transporte Terrestre (ANTT, 2013), onde destaca-se o índice de aproximadamente 46% da frota composta por autônomos.

Tabela 2.3 - Perfil da frota nacional de veículos de transporte de carga.

| <b>Perfil da Frota Nacional de Veículos de Carga por Transportador</b> |                  |                 |                     |              |
|--|------------------|-----------------|---------------------|--------------|
| <b>Descrição</b>   | <b>Autônomos</b> | <b>Empresas</b> | <b>Cooperativas</b> | <b>Total</b> |
| Nº de Veículos   | 833.865          | 973.770         | 13.099              | 1.820.734    |
| Distribuição da Frota (%)  | 45,80 %          | 53,48 %         | 0,72 %              | 100,00 %     |
| <b>Distribuição da Frota por Tipo</b>                                  |                  |                 |                     |              |
| Caminhão Leve 3,5T a 7,99T   | 118.965          | 48.275          | 458                 | 167.698      |
| Caminhão Simples 8T a 29T  | 402.576          | 221.277         | 2.528               | 626.381      |
| Caminhão-Trator  | 127.343          | 267.247         | 4.312               | 398.902      |
| Caminhão Trator Especial   | 675              | 1.106           | 30                  | 1.811        |
| Caminhonete e Furgão 1,5T a 3,49T                                      | 44.678           | 22.909          | 177                 | 67.764       |
| Reboque  | 11.082           | 23.773          | 193                 | 35.048       |
| Semi-Reboque   | 106.900          | 374.124         | 5.166               | 486.190      |
| Semi-Reboque com 5ª Roda/Bitrem  | 537              | 1.871           | 73                  | 2.481        |
| Semi-Reboque Especial  | 214              | 1.100           | 32                  | 1.346        |
| Utilitário Leve 0,5T a 1,49T   | 19.024           | 9.097           | 125                 | 28.246       |
| Apoio Operacional  | 1.871            | 2.991           | 5                   | 4.867        |
| Idade Média dos Veículos (Anos)  | 16               | 8               | 11                  | 12           |

Fonte: ANTT, 2013.

Como os dados anteriores destacam, o caminhão tem sido o veículo predominante no transporte de carga no Brasil, principalmente a partir de 1929, quando as ferrovias começam a perder força no Brasil, seja pelo seu grau de degradação, seja por fatores políticos. Paralelamente ao declínio das ferrovias as rodovias ganharam importância no transporte de cargas brasileiro (BALLOU, 1993).

Segundo o Centro de Estudos Logístico (2000), A matriz de transporte brasileira é baseado no modal rodoviário onde esta modalidade corresponde a cerca de 96,2% da matriz de transporte de passageiros e a 61,8% da matriz de transporte de cargas. A CNT (2006) apresenta a estimativa da rede rodoviária na figura 2.2.



Figura 2.2 - Mapa rodoviário do Brasil.

Fonte: CNT, 2006.

O modal rodoviário é mais indicado para transporte de pequena quantidade de carga, a curtas distancias, de produtos com valor agregado maiores, por apresentarem um alto custo variável de operação, principalmente quando comparado aos modais ferroviário e hidroviário (BOWERSOX e CROSS, 2007).

### 2.3 O CONCRETO ASFÁLTICO

O Concreto Asfáltico (CA), é o tipo de mistura mais utilizada em pavimentação no Brasil, podendo ser definido como uma mistura de materiais granulares, material de enchimento e um ligante asfáltico em proporções pré-estabelecidas, sendo este atuante como elemento aglutinante entre os agregados, permitindo que resista às solicitações de tráfego, gerando ao final um material composto por três fases: agregado, ligante e ar (READ e COLLOP, 1997; PATRIOTA 2004).

As misturas asfálticas tem como papel fundamental responder a características como (PILATI, 2008; SANTOS, 2013):

- Estabilidade: Resistir a formação de deformação permanente quando submetido a carga, tendo como principais fatores de influencia o teor de ligante, a forma e textura dos agregados;
- Durabilidade: Propriedade de manter características reológicas, coesão e adesão, resistindo a desintegração provocada pelo tráfego e intempéries, tendo como principais influentes o volume de vazios, qualidade dos agregados e ligação agregado/asfalto.
- Flexibilidade: proporciona resistência à fadiga, tendo como influentes a quantidade e tipo do ligante, além da temperatura ambiente;
- Resistência a derrapagem: Resistencia ao deslizamento dos pneus dos veículos, tendo como principais influentes a distribuição granulométrica e o teor de ligante.

### 2.3.1 Ligante Asfáltico

Relatos dos povos assírios e bíblicos indicam a utilização de ligantes asfálticos há mais de 8.000 anos atrás, sendo considerado um dos materiais de construção mais antigos da humanidade. Sua utilização ia desde a calafetagem de navios, até o uso como impermeabilizantes, só sendo utilizado como material de pavimentação no ano de 1829 em Lyon na França, para melhoria das condições de rodagem (SANTOS, 2005).

Os materiais betuminosos são constituídos de hidrocarbonetos solúveis em bissulfeto de carbono, e formam grande variedade de produtos de acordo com o tratamento que venha a sofrer. Sua caracterização é basicamente um material aglutinante de cor escura, e subdivididos em duas categorias: os asfaltos e os alcatrões:

- Asfaltos: A palavra vem do grego e significa firme, estável, provém da destilação do petróleo de jazidas naturais ou da refinação;
- Alcatrões: são obtidos através da refinação de alcatrões brutos, que por sua vez vêm da destilação de carvão mineral, possui uma sensibilidade a temperatura maior que o asfalto.

Os asfaltos são ligantes poderosos, rapidamente adesivos, impermeável e de longa durabilidade, onde sua consistência plástica empresta uma grande flexibilidade controlável em misturas com agregados minerais (BAUER, 1995).

Segundo Leite (1999), os principais materiais asfálticos utilizados em pavimentação são:

- Cimento asfáltico de petróleo (CAP);
- Asfaltos diluídos;
- Asfaltos Emulsionados;
- Asfaltos Oxidados;
- Asfaltos modificados.

Na dosagem do CA uma das principais variáveis de projeto é o teor de asfalto, seja pelo fator econômico, seja pelas características que o mesmo confere à massa, por exemplo em vias de tráfego pesado o teor de CAP deve ser o mínimo possível, pois a combinação de altas temperaturas e misturas densas pode provocar exsudação na massa (MUGAYAR, 2004).

### 2.3.1.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é um material utilizado há séculos pela humanidade nas mais diversas áreas como: construção civil, agricultura e indústria. Na pavimentação o CAP é utilizado geralmente na proporção de 5 a 7% em massa da mistura, trabalhando como aglutinador entre os materiais constituintes (DOMINGOS e FAXINA, 2013).

O CAP é constituído de 90 a 99% de grandes cadeias de hidrocarbonetos e por 1 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligações covalentes. Quando encontrados em jazidas naturais recebem o nome de Cimento de Asfalto Natural (CAN), porém normalmente, são obtidos para pavimentação pelo processo de destilação do petróleo. Quanto à consistência, na temperatura ambiente são materiais semi-sólidos, logo para sua utilização é necessário seu pré-aquecimento (FAXINA, 2006).

Os CAP's produzidos no Brasil tem baixo teor de enxofre e de metais, e alto teor de nitrogênio, sendo utilizado para pavimentação proveniente do produto final da destilação do petróleo "cru", do qual frações mais leves (gasolina, querosene e diesel) são separadas do asfalto por vaporização, fracionamento e condensação (IBP, 1999).

Analisando pelo prisma da reologia o cimento asfáltico pode ser considerado um material visco-elástico, pois em temperaturas ambiente apresenta comportamento elástico, e ao ser aquecido seu comportamento se altera para viscoso, este comportamento se deve a suas características reológicas, onde as forças de ligações fracas entre os átomos deixa o material sensível a temperatura e ao cisalhamento. A temperatura influencia

diretamente a capacidade de bombeamento, facilidade de mistura e aplicação (FAXINA, 2006).

Estudos apontam que o CAP é responsável por até 20% da deformação permanente e 60% da resistência a fadiga das misturas asfálticas (FREIRE *et al.*, 2014).

Com vista a classificação do CAP, o DNIT, através de sua norma técnica ES 95/2006 os classifica segundo ensaio de penetração (0,1mm) em:

- CAP 30-45
- CAP 50-70
- CAP 85-100
- CAP 150-200

### 2.3.1.2 Asfaltos Diluídos

Quando o CAP sofre diluição por produtos destilados de petróleo, sua classificação muda para asfaltos diluídos, também conhecidos como asfaltos recortados ou “*cut-backs*”, resultando em produtos menos viscosos, aumentando a facilidade de aplicação, e posteriormente evaporado, tendo como produto final única e exclusivamente o CAP. O fenômeno de evaporação do diluente denomina-se cura, e são classificados de acordo com a velocidade em três categorias: cura rápida (CR), cura média (CM) e cura lenta (CL), tendo juntamente com a viscosidade divididos de acordo com as seguintes faixas:

Tabela 2.4 - Classificação do asfalto diluído.

| <b>Asfalto diluído</b> | <b>Viscosidade cinemática a 60°C, cSt</b> |
|------------------------|---|
| CR-30                  | 30-60                                     |
| CR-70                  | 70-140                                    |
| CR-250                 | 250-500                                   |
| CR-3000                | 3000-6000                                 |
| CM-30                  | 30-60                                     |
| CM-70                  | 70-140                                    |
| CM-250                 | 250-500                                   |
| CM-800                 | 800-1600                                  |

Fonte: Bauer, 1995.

### 2.3.1.3 Emulsões Asfálticas

Quando o asfalto é diluído em uma fase aquosa, adicionando um agente emulsificante e acrescido energia de dispersão este produto é chamado de emulsão asfáltica, sendo empregado em serviços de pavimentação à temperatura ambiente (nunca devem ser aquecidas acima de 70°C). As emulsões são classificadas segundo sua ruptura, que ocorre quando os glóbulos de asfalto dispersos em água, em contato com o agregado mineral, sofrem uma ionização por parte deste, dando origem à formação de um composto

insolúvel em água que se precipitará sobre o agregado, e que de acordo com a estabilidade, ou tempo de ruptura, pode-se ter:

- Ruptura rápida (RR): utilizada em pintura de ligação, imprimação, tratamentos superficiais, macadame betuminoso;
- Ruptura média (RM): utilizada em pré-misturados a frio;
- Ruptura lenta (RL): utilizada em estabilização de solos e preparo de lama asfáltica.

### 2.3.2 Envelhecimento das Misturas Asfálticas

Greco (2004) em sua tese de doutorado e Witczak e Mirza (1995) definem envelhecimento como as modificações ocorridas na mistura em decorrência da exposição às condições ambientais, que podem aumentar ou diminuir a rigidez, assim como deixá-la mais susceptível à desagregação. Basicamente este processo é dividido em duas etapas, indicadas na tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Classificação das etapas do envelhecimento das misturas asfálticas.

| <b>Curto Prazo</b>  | <b>Longo Prazo</b>  |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Durante a mistura e construção do pavimento</li> </ul>                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Após a construção (após o resfriamento)</li> </ul> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Superexposição as altas temperaturas</li> </ul>                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Exposição a ao clima</li> </ul>                    |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Perda dos componentes voláteis e oxidação do asfalto (ainda quente)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alteração das propriedade da mistura</li> </ul>    |

Fonte: Witczak e Mirza, 1995.

As principais formas de envelhecimento são a oxidação (contato com o oxigênio), a exposição a luz e a perda de elementos oleosos pela absorção dos agregados. A oxidação se dá pelo contato com o oxigênio, que aumenta a viscosidade pela interação das forças moleculares (polaridade do oxigênio), sendo observado nos processos durante sua estocagem, manuseio e aplicação, alterando suas características químicas e reológicas (; HERRINGTON e BALL, 1996; ARAÚJO, 2012; FORTE *et al.* 2005).

A ação dos raios ultravioletas afetam a fina camada de ligante (cerca de 2 $\mu$ m) exposta na camada de pavimentação. Devido a maior exposição da superfície do

pavimento com o ar, o envelhecimento ou oxidação do ligante ocorre em taxas diferentes ao longo da profundidade da camada. Esta exposição produz compostos solúveis em água, tendo assim um efeito erosivo na superfície exposta quando da presença de chuva, além da presença de trincas (BUTTON, 1996).

A perda de componentes oleosos depende basicamente da porosidade dos agregados e volatilidade do CAP (BELL, 1990).

Para Tonial *et al.* (2001) a temperatura e a exposição ao ar são os principais fatores que influenciam o processo de envelhecimento das misturas asfálticas, causando principalmente a redução da vida de fadiga do pavimento, devendo ser considerado no dimensionamento das misturas.

Whiteoak (1990) descreve que a oxidação é a principal forma de envelhecimento, sendo que sua taxa de envelhecimento dobra a cada 10°C a partir dos 100°C. Este efeito é representado fisicamente pelo aumento da consistência do CAP, tornando-o mais quebradiço, menos dúctil e menos elástico.

Em laboratório é possível simular o envelhecimento dos ligantes em campo. A técnica de *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT) (ASTM D 2872-88) simula o envelhecimento do ligante asfáltico nas primeiras idade (também conhecida como de curto prazo), especialmente no processo de usinagem, logo o ensaio é realizado a altas temperaturas e na presença de oxigênio (MIGLIORI e CORTÉ, 1998).

Por outro lado a técnica conhecida como *Pressure Aging Vessel* (PAV), foi desenvolvida pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP), visando simular o envelhecimento do ligante durante sua utilização na pista, logo sua realização se dá sob alta pressão, baixa temperatura e longos tempos. Recomenda-se a execução do PAV após o RTFOT chamando-se esta sequência RTFOT + PAV de envelhecimento clássico, chegando a representar as mesmas características de um ligante de 3 a 6 anos de uso. Após envelhecido o ligante pode ser submetido aos ensaios tradicionais, ou a ensaios mais elaborados para analisar sua reologia, por exemplo, sendo estes ensaios realizados em equipamentos como o DSR (Reometria de Cisalhamento Dinâmico), comparando as amostras com e sem envelhecimento (FORTE *et al.* 2005; BAHIA, et al. 2001).

### 2.3.3 Reologia

A reologia é a área da engenharia dos materiais que estuda a deformação frente a temperatura e o tempo. Neste quesito os ligantes asfálticos apresentam uma

variabilidade grande de comportamento devido suas propriedades viscosas. A altas temperaturas (usinagem e compactação), agem como fluidos Newtonianos; na temperatura de serviço da pista de rolamento (entre 10°C e 70°C) agem como um material viscoelástico; e a baixas temperaturas agem como um sólido frágil. A temperatura assume protagonismo no comportamento destes materiais, pois sua elevação aumenta a parcela viscosa do comportamento viscoelástico, já sua redução aumenta a parcela elástica (CRAVO, 2016).

No caso do ligante asfáltico, seu comportamento pode ser caracterizado como termo-viscoelástico, ou seja, depende da temperatura e frequência de carregamento. Este comportamento é refletido quando se aplica carregamentos a altas frequências, fazendo com que se comporte como um sólido elástico, sendo o módulo de rigidez (módulo de Young), uma mensuração desta característica, sendo uma grandeza constante, independente da temperatura e do carregamento. Já para cargas aplicadas a baixas frequências e altas temperaturas, estes tipos de materiais apresentam deformações permanentes, proporcional a carga (BOWERS, B. F., MOORE, J., HUANG, B., & SHU, X., 2014).

O principal objetivo de se estudar a reologia em misturas asfálticas é obter relações entre deformação, tensão, tempo de aplicação da carga e temperatura. Esta importância cresce devido os cimentos asfálticos serem materiais termo sensíveis e a mistura final submetida a tensões de deformação e térmicas (BEINGEL, SOARES E SOARES, 2009; FENG, Z., YU, J., & WU, S. 2012).

As principais grandezas observadas na reologia são:

- Módulo Complexo ( $G^*$ ): Resistência total a deformação de um material sob tensão, ou seja, a tensão de cisalhamento máxima dividido pela deformação máxima, indicando a rigidez do material;

$$G^* = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{\gamma_{m\acute{a}x}}$$

- Ângulo de Fase ( $\delta$ ): Permite avaliar a interação entre a resposta elástica (Módulo de Armazenamento) e viscosa (Módulo de Perda), quanto mais próximo de 0° mais elástico é o comportamento;
- Módulo de Armazenamento ( $G'$ ): Indica a parcela de energia temporariamente armazenada durante o ensaio e que pode ser recuperada posteriormente;

$$G' = G^* \cdot \cos\delta$$

- Módulo de Perda ( $G''$ ): Parcela de energia que foi transferida de maneira irreversível em forma de calor;

$$G'' = G^* \cdot \sin \delta$$

Quando o atraso entre a aplicação da tensão e a deformação for nulo, o  $\delta = 0^\circ$ , seu módulo de perda será zero e o módulo de armazenamento tenderá ao valor do módulo complexo, características estas de materiais completamente elásticos. Para materiais com comportamento viscoso há uma defasagem entre a aplicação da tensão e a deformação, sendo que quando  $\delta = 90^\circ$ , módulo de armazenamento tende a zero e módulo complexo igual ao módulo de perda.

No caso de materiais viscoelástico, como o CAP, o ângulo de fase situa-se entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , quanto mais próximo de  $0^\circ$  maior a tendência de comportamento elástico, quanto mais próximo de  $90^\circ$  mais viscoso será o material.

Na década de 80 o programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*) propôs investigar as propriedades reológicas a serem aplicadas na caracterização dos ligantes asfálticos, onde surgiu a especificação *Superpave* (Superior Performing Asphalt Pavements), onde o parâmetro  $G^* \cdot \sin \delta$  foi adotado como critério de fadiga, expressando a resistência ao trincamento do ligante (PAMPLONA; NUÑES; FAXINA, 2014; HINTZ *et al.*, 2012).

Foi definido o Grau de Desempenho (PG) como parâmetro que classifica o asfalto segundo seu desempenho reológico em função da temperatura do revestimento no campo, onde por exemplo um CAP PG 64-16 reflete que  $64^\circ\text{C}$  seria a temperatura mais alta na qual o ligante resistiria de maneira satisfatória a deformação permanente, e  $-16^\circ\text{C}$  a temperatura mais baixa na qual o mesmo possuiria propriedades adequadas sob o ponto de vista de trincas térmicas.

A especificação AASHTO M 332-14 – *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test* – incorporou a Superpave original incorporando um novo ensaio para classificação quanto ao volume de tráfego, tendo como parâmetro valores de fluência não recuperável a uma tensão de 0,1KPa, seguidos por 10 ciclos a uma tensão de 3.200 KPa, a variáveis temperaturas.

#### 2.3.4 Agregado Mineral

Em misturas asfálticas o agregado mineral representa de 88% a 96% do peso e até 75% do volume, logo muitas propriedades são influenciadas pelos mesmos, que compõem a estrutura sólida que irá resistir às solicitações das cargas proveniente do tráfego (SANTOS, 2007; ALECRIM, 2009, FERREIRA *et al.*, 2015).

Os agregados são os principais responsáveis por resistirem aos esforços provenientes das cargas no pavimento. Estudos apontam que os agregados são responsáveis por até 80% da resistência a deformação permanente e 40% da resistência a fadiga. Os agregados podem ser considerado o “esqueleto” da mistura, logo suas características devem ser consideradas no momento da dosagem do CAUQ (ASPHALT INSTITUTE, 1989; MENDES e MARQUES, 2012; FREIRE *et al.*, 2014).

Dentre as propriedades dos agregados está a granulometria, que afeta diretamente a relação de vazios, teor de asfalto, fluência, tração e resiliência da mistura, assim como na deformação permanente. A textura e forma são outras propriedades que influenciam o desempenho final do CA, pois a adesão ligante agregado é melhorada em agregados mais angulares e porosos (CLOPOTEL, 2012; FERREIRA, SOARES e BASTOS, 2016).

FHWA (2002) e Freire *et al.* (2014) destacam que o agregado mineral pode ser responsável por até 60% da resistência a fadiga do concreto asfáltico, combinando suas características individuais às granulométricas. Este defeito é refletido nas fissuras e microfissuras no pavimento, pela ação de carga repetidas do tráfego.

Um dos métodos mais recentes de análise de agregados é o AIMS (*Aggregate Imaging System*), que confere na amostra as características de angularidade, forma, textura e esfericidade. A metodologia caracteriza-se pela distribuição das características de uma forma global, e não de maneira pontual, ou valores médios (AL-ROUSAN, 2004; BESSA, 2012).

Os agregados graúdos (25,4 mm, 19,0 mm, 12,5 mm, 9,5 mm ou 4,75 mm) são colocados em uma bandeja que gira e a imagem do agregado é capturada, tanto em sua altura, como em sua extensão e seu nível de textura. Os agregados miúdos são colocados espalhados na bandeja opaca usando uma amostra de 50g para cada tamanho, onde é processado a análise de forma e tamanho.

### 2.3.5 A Influência de Finos na Mistura Asfáltica

Os finos, ou filer, é definido como a fração passante da peneira nº 200, ou seja de diâmetro abaixo de 0,075 mm, proveniente basicamente dos agregados minerais, ou adicionado de outras fontes (cimento Portland, cal hidratada, etc). Seu mecanismo de ação na mistura perfaz dois caminhos básicas (CRAUS, *et al.* 1978; MOTTA e LEITE, 2000; BARDINE *et al.*, 2012):

- Partículas maiores (>20  $\mu\text{m}$ ): preenchem os vazios dos agregados graúdos, promovendo maior resistência mecânica;
- Partículas menores (<20  $\mu\text{m}$ ): Mistura-se ao ligante, cimentando o agregado.

O filer tanto preenche os vazios entre os agregados graúdos nas misturas, quanto altera as propriedades dos ligantes asfálticos, pois age como parte ativa do mastique, agindo na “lubrificação” dos agregados graúdos, melhorando o consumo de ligante. Estes finos podem melhorar as propriedades mecânicas, térmicas e reológicas da massa (MOTTA e LEITE, 2000; BARDINE *et al.*, 2010 e CRAVO, 2016).

Os fileres podem ser divididos em duas frações: as partículas maiores agem com a função de preenchimento dos vazios dos agregados graúdos, promovendo maior resistência às misturas; as partículas menores agem no ligante, aumentando sua consistência e cimentando as partículas maiores

Além de diminuir o teor de vazios, o filer atua diretamente na viscosidade, penetração, ponto de amolecimento, estabilidade (aumento da resistência ao cisalhamento) e módulo de rigidez. Quanto menor o tamanho da partícula de filer, maior a incorporação do mineral no ligante, aumentando a rigidez da mistura (CRAVO *et al.*, 2014).

Com relação as propriedades mecânicas da mistura, a presença de finos, dependendo da origem, melhora o desempenho a fadiga, aumentando a resistência a microfissuras, devido sua atuação como material ativo na interface agregado/CAP (KIN *et al.*, 2003; ZAHNG, 2015).

Reologicamente o acréscimo de filer ao ligante modifica seu comportamento com o aumento do módulo complexo e redução do ângulo de fase, elevando a rigidez do ligante. A adição de filer ao ligante asfáltico também gera um acréscimo da relação do  $G^*/\text{sen}\delta$ , aumentando assim a resistência do ligante à deformação permanente (BAHIA, 1995).

### 2.3.6 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Este ensaio foi desenvolvido pelo professor Fernando Luiz Lobo Carneiro na década de 40, logo ficou conhecido como “ensaio brasileiro”, onde foi concebido inicialmente para avaliar misturas de argamassa de cimento Portland. Em asfalto este ensaio foi empregado pelo pesquisadores da *Chevron Reserch Company* em 1972 (MEDINA e MOTTA, 2005).

A aplicação da carga se dá através de frisos metálicos em planos paralelos diametralmente opostos, a uma velocidade de  $0,80 \pm 0,1$  mm/s, que produz tensão de tração no plano perpendicular ao da aplicação da carga, gerando um estado biaxial de tensão. O corpo de prova Marshall rompe-se em partes iguais ao longo de sua geratriz (PILATI, 2008; SPECHT, 2004).

Bernutti *et al.* (2008) citam que a resistência a tração de misturas asfálticas novas se encontram em valores de 0,50 a 2,00 MPa, porém quando o asfalto é submetido ao tráfego esta resistência aumenta consideravelmente, o que não quer dizer algo positivo propriamente dito, pois a massa fica mais rígida aumentando seu módulo de resiliência e consequentemente perdendo flexibilidade.

Segundo Monismith *et al.* (1980); Pinto (1991) e Balbo (2000), a seguir apresentam-se as principais vantagens e desvantagens deste ensaio:

Tabela 2.6 - Vantagens e desvantagens do ensaio de tração por compressão diametral.

| <b>VANTAGENS</b>  | <b>DESVANTAGENS</b>  |
|---|--|
| Ensaio de simples execução  | Impossibilidade na variação de proporção entre as componentes vertical e horizontal no centro da amostra, inviabilizando-se a reprodução do estado de tensões em locais críticos dentro do pavimento |
| A prensa pode ser utilizada em outros ensaios como: módulo resiliente | Subestima a vida de fadiga quando a tensão de tração principal é usada como determinante do dano (quando comparada a ensaios de flexão simples)  |

---

Os corpos de prova são de simples execução ou até mesmo retirados no campo

A ruptura se dá em uma região de tensões de tração relativamente uniforme;

O estado biaxial de tensões representa satisfatoriamente as condições de campo

Estado de tensão variável no plano vertical, ou plano de ruptura

---

Fonte: Monismith *et al.* (1980); Pinto (1991) e Balbo (2000).

### 2.3.7 Módulo de Resiliencia

A norma técnica DNIT-ME-135/2010 define módulo de resiliência como: a relação entre a tensão de tração aplicada de forma repetida no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica, e a deformação recuperável correspondente a tensão. Esta medida é um importante parâmetro de quanto o pavimento pode suportar até a sua ruptura por fadiga.

Para Mourão (2003); Medina e Motta (2015) a determinação do módulo de resiliência tem o objetivo simular o que ocorre durante a vida do pavimento, na zona de deformação por tração, ou seja, onde ocorre a fadiga do pavimento. Logo pode-se definir seu módulo como a relação entre a tensão de tração, obtida de maneira indireta (por compressão diametral), dividida pela deformação recuperável decorrente desta tensão para uma dada temperatura.

A aplicação do módulo de resiliência como fator de desempenho e dimensionamento de pavimentos asfálticos teve uma intensidade de utilização a partir da segunda metade do século passado. O pesquisador Francis Hveem foi o pioneiro em sua utilização no ano de 1955, com um estudo sistemático da deformabilidade em pavimentos na Califórnia, com a instalação de sensores no interior do pavimento. No Brasil os primeiros ensaios se deram na COPPE/UFRJ em 1977 utilizando cargas repetidas (MEDINA, 1997).

A partir de 1986 a AASHTO começou a utilizar o módulo de resiliência como propriedade mecânica para caracterização e dimensionamento das estruturas do pavimento. Este parâmetro de rigidez passou a ser fundamental para o desempenho final do pavimento, compatibilizando a solicitação do tráfego com as características da mistura (FRANCO, 2007; KLINSKY *et al.* 2014).

A energia armazenada por um corpo quando submetido a esforço faz com que este sofra deformações, após findada a carga a energia é dissipada obedecendo a teoria da elasticidade. Hveen cunhou o termo resiliente, pois as deformações no pavimento se mostraram bem superiores às elásticas que a engenharia lidava (MEDINA e MOTTA, 2005).

Segundo a teoria de Huang (1993) após aplicação de 100 a 200 ciclos de uma carga bem abaixo da carga de ruptura do material, aplicada repetidas vezes, a deformação resiliente é praticamente toda recuperável, obedecendo, assim, à teoria da elasticidade.

Não existe um valor típico de módulo de resiliência, geralmente este valor varia de 2.000 a 8.000 MPa para misturas asfáltica a quente. Vários fatores influenciam na magnitude do módulo como: faixa granulométrica, tipo de ligante e compactação da mistura. O envelhecimento do ligante também é um fator determinante, por enrijecer a mistura e transmitir esta característica ao pavimento (BERNUCCI et al., 2008).

Motta (1998) destaca que o módulo de resiliência tem forte influencia com o tipo de ligante, variando inversamente com a penetração e diretamente com a viscosidade, não sendo muito sensível ao teor de asfalto, porém maior será o módulo quanto mais grossa for a granulometria dos agregados.

Motta *et al.* (2002) e Marques (2004) apontam para os principais fatores que interferem no comportamento do módulo de resiliência de mistura asfálticas:

- Granulometria da mistura, sendo maior quanto mais grossa for a faixa adotada;
- Tipo de ligante sendo maior quanto menor a penetração do asfalto ou maior a sua viscosidade;
- Pouco influenciado pelo teor de asfalto, dentro da faixa normal de dosagem;
- Relação asfalto/ fíler assim como sua natureza.

### 2.3.8 Fadiga em Pavimentos Asfálticos

A fadiga pode ser definida como a diminuição gradativa da resistência de um corpo, quando submetido a cargas repetidas. Esta definição pode ser usada para a mistura asfalta, que frequentemente é submetida a cargas repetidas. A temperatura é um dos fatores mais influentes na resistência dos pavimentos asfálticos à fadiga, pois temperaturas altas tornam a massa mais flexível, e em temperaturas mais baixas as torna mais rígidas, logo mais quebradiças (GRECO, 2004; CAVALCANTI, 2010; HINTZ, 2012; PAMPLONA *et al.* 2014).

Monismith *et al.* (1990) define o conceito de vida a fadiga como sendo o número de aplicação de carga para que um corpo sofra ruptura sob dado estado de tensão.

No presente trabalho adota-se a definição de fadiga como a progressiva alteração estrutural no pavimento, localizadas e permanentes, ocasionando o surgimento de tensões e deformações, abaixo da tensão de ruptura, culminando com o surgimento de trincas ou até a ruptura do material após um certo número de aplicações. Resumindo, o material perde resistência com a repetição da aplicação da carga (TANGELLA, CRAUS, DEACON, MONISMITH 1990; IWANAGA, 2007; MEDINA e MOTTA, 2015).

A fadiga é a origem de um dos principais defeitos dos pavimentos asfálticos brasileiros, provocada pelas repetidas cargas em conjunto com a elasticidade da camada de base. O processo de degradação inicia-se com o surgimento de microfissuras, resultado da perda de rigidez do material. O surgimento das trincas se dá ao longo das trilhas das rodas e se propaga na forma de trincas interligadas tipo “couro de jacaré” (PINTO, 1991; FRANCO, 2007; MEDINA e MOTTA, 2015).

O processo de início do trincamento se dá no ponto de maior carregamento, e inicia em pontos críticos, onde as tensões são maiores (fibras inferiores do revestimento), neste ponto há a passagem da água que enfraquece e diminui ainda mais o desempenho do pavimento. Após iniciado o fenômeno ocorre em cadeia e se espalha por todo o pavimento (AYRES, 1997; RAAD, SABOUNDJIAN e MINASSIAN, 2001).

Os principais fatores que influenciam a resistência a fadiga de misturas asfálticas são mostradas na tabela 2.7, resumidas dos seguintes autores: KIM *et al.*, 1992; HARVEY *et al.* 1995; SOARES *et al.*, 2000; CAPITÃO *et al.*, 2004; VASCONCELOS, 2004.

Tabela 2.7 – Principais fatores que influenciam a resistência a fadiga.

| FATOR           | EFEITO   |
|-----------------|--|
| Teor de ligante | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Acima do teor ótimo, até um certo ponto, melhora a resistência a fadiga por preenchimento do vazio, se for muito acima diminui a resistência à fadiga.</li> </ul> |
| Tipo de ligante | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ligantes mais rígidos apresentam melhor vida à fadiga.</li> </ul>   |

|                           |   |
|---------------------------|---|
| Temperatura               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperaturas altas ou muito baixas tende a diminuir a vida a fadiga</li> </ul> |
| Volume de vazios          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor o volume de vazios, melhor o desempenho a fadiga</li> </ul>              |
| Propriedade dos agregados | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Agregados mais rugosos e angulares melhora o travamento.</li> </ul>            |
| Dosagem                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dosagem SUPERPAVE há uma melhor distribuição dos agregados</li> </ul>          |

---

Fonte: Kim *et al.*, 1992; Harvey *et al.* 1995; Soares *et al.*, 2000; Capitão *et al.*, 2004; Vasconcelos, 2004.

## 2.4 A QUESTÃO AMBIENTAL E A MINERAÇÃO DO COBRE

Até a revolução industrial, nos meados do século XIX, quase nenhuma preocupação ambiental pairava sobre a sociedade. A partir do processo de industrialização este tema começa a fazer parte do cotidiano, visto a necessidade crescente de matéria prima e energia que esta nova sociedade industrial demandava (STEFENON, 2013).

Apenas em 1972, sob a tutela da ONU, foi organizada a primeira Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Humano, com a participação de mais de 110 países, incluindo o Brasil, conhecida como Conferência de Estocolmo, tendo como principais assuntos tratados (ALMEIDA, 2002):

- Redução da produção de resíduos;
- Redução da emissão de gases;
- Redução do desperdício.

Esta conferencia apresentou como propostas finais o melhor aproveitamento das matérias-primas e dos recursos naturais. Após a Conferencia de Estocolmo se sucederam vários acidentes ambientais, e o mundo começa a despertar para o aquecimento global.

O Brasil responde inicialmente ao editar a Política Nacional do Meio Ambiente através da Lei 6.938/81. Em 1992 ocorre a RIO-92, conferência da ONU sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento onde participaram mais de 170 países, tendo como produto uma agenda de cooperação internacional onde os países se comprometem a cumprir uma série de mais de 2.500 ações na busca do desenvolvimento sustentável no Século XXI

(agenda 21), sendo logo após criada o Programa das Nações Unidas de Produção mais limpa, expressa pelo PNUMA (SANTOS JR, 2005).

Posteriormente foi realizada a Rio+5 em Kyoto, onde foi reforçada a importância de redução da geração de gases do efeito estufa (Protocolo de Kyoto) destacando-se o aumento das responsabilidades sociais e ambientais das empresas. Em Johannesburgo foi realizada a RIO +10, onde o tema principal foi a pobreza no mundo e os impactos negativos no meio ambiente, sendo gerados documentos com metas e serem alcançadas para (ANA, 2002):

- Erradicação da pobreza;
- Mudança de padrões de consumo e produção;
- Proteção dos recursos naturais;
- Globalização;
- Saúde;
- Situação de pequenos estados insulares;
- Desenvolvimento da África.

Estas conferencias serviram para iniciar a discussão sobre a geração e disposição dos resíduos gerados pelas mais diversas formas de produção e consumo. Quanto aos resíduos sólidos industriais, tem-se apontado para três possíveis caminhos:

- Disposição dos resíduos em aterros: O problema é o custo e áreas que aceitem este fim, principalmente pelas comunidades próximas;
- Evitar ou reduzir a geração de resíduos;
- Reciclar ou reutilização do resíduo para fabricação de outros produtos, sendo notável a aplicação na indústria da construção civil.

Neste contexto insere-se a indústria metalúrgica, que historicamente é um setor que produz grandes volumes de produto final, assim como grandes volumes de resíduos sólidos provenientes dos processos produtivos, tendo como resíduos sólidos basicamente escórias ou areias, destacando-se a escória de cobre, escória de alto forno, escória de aciaria elétrica e a areia de fundição.

O cobre é um dos metais mais antigos a serem utilizados pela humanidade, relatos apontam para seu uso há cerca de 8.000 anos A.C., chamada de idade do Bronze (cobre + estanho). Nesta época chegou a representar riqueza e poder na idade média, principalmente pelas suas características de baixo ponto de fusão, onde era propício para moldagem de pontas de lanças e flechas, sendo moeda de troca entre nações com intuito

de armar seus exércitos. Na atualidade, tanto na sociedade industrial, e principalmente na sociedade da informação, o cobre continua mantendo seu poder, visto suas características de transmissão de calor e eletricidade (RIBEIRO, 2001).

Derivado do grego “*aes cyprium*”, sendo posteriormente conhecido como “*cuprum*”, o elemento químico cobre é um metal de cor avermelhada de número atômico 29, peso atômico 63,54, dureza 2,5 a 3,0, ponto de fusão 1.023°C, onde o que o torna valioso para a indústria é o fato de ser um ótimo condutor de calor e eletricidade. Outras propriedades importantes são sua elevada resistência à tensão física e à corrosão, além de propriedade não magnética e a facilidade na formação de ligas com outros metais. Considera-se como cobre o metal que possua 99,85 % ou mais do elemento cobre, ou no mínimo 97,5 % em massa de cobre.

Segundo o BNDES (1997), como material não ferroso o cobre encontra-se apenas atrás do alumínio em utilização pela humanidade.

A indústria de cobre primário preconiza quatro tipos básicos de produtos (DNPN, 2014):

- Minério de cobre: Este é basicamente extraído da mina, e apresenta baixos teores do metal, entre 0,7% e 2,5%;
- Concentrado de cobre: Minério de cobre que sofre processo de moagem das rochas e mistura com água e reagentes, apresentando entre 30% e 38% de cobre fino;
- Cobre fundido: O concentrado sofre processos pirometalúrgicos transformando-se em cobre *blister* (98,5%) e, posteriormente, no anodo de cobre, cujo teor é de 99,7% de cobre;
- Cobre refinado: São os anodos e as soluções (no caso da lixiviação) que são refinados por processo de eletrólise, resultando nos catodos, com pureza de 99,9% de cobre.

O cobre é geralmente encontrado na natureza associado a outros elementos e basicamente em dois grupos de minerais:

- Primários ou sulfetados: explorado em zonas mais profundas da crosta terrestre, com mais alto teor em cobre (80% das reservas mundiais). Possui grande apelo econômico, pois pode ser lavrado a céu aberto, com teores de até 1,5% de cobre, sendo os mais importantes:
  - Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ , com 34,6 % de Cu);

- Calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ , com 79,9 % de Cu);
- Bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ , com 63,3 % de Cu);
- Covellita ( $\text{CuS}$ , com 66,4% de Cu);
- Enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ , com 48,3% de Cu)
- Oxidados ou secundários: explorado em zonas mais superficiais, de menor teor em cobre, com cerca de 170 espécies minerais, das quais apenas algumas apresentam importância econômica, sendo os mais importantes
  - Cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ , com 88,8% de Cu);
  - Tenorita ( $\text{CuO}$ , 79,8%Cu);
  - carbonatados malaquita ( $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ , 57,5%Cu);
  - Azurita ( $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ , 55,3% Cu);
  - Silicatados crisocola ( $\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 36 % Cu).

Como visto anteriormente as jazidas de cobre são geralmente de grandes dimensões e baixos teores, o que gera grande quantidade de resíduo proveniente de sua mineração, onde em minas de lavra subterrânea, o teor de corte não deve ficar abaixo de 1% de cobre, e nos de pequeno porte, não deve ser inferior a 3%. Em lavra a céu aberto, o teor mínimo pode atingir 0,5 % de Cobre (DNPN, 2014).

Quanto ao processo de mineração tem-se:

- Processo Pirometalúrgico

Após a extração à céu aberto ou em galerias subterrâneas o minério é submetido à britagem, moagem, flotação e secagem que já eleva o teor de algo em torno de 1% para 30%. Este concentrado é levado ao forno *flash*, de onde sai o mate com teor de 45% a 60%, e este ao forno conversor de onde obtêm-se o *blister* com 98,5% de cobre. Desejando-se uma pureza maior é processado o refino a fogo, onde se obtém cobre com 99,7% (anodo) ou até mesmo ser também refinado eletroliticamente, atingindo um grau de pureza de 99,9% (catodo).

Os catodos são submetidos ao processo de refusão para obtenção do cobre no formato de tarugos ou placas. As placas são então trefiladas e obtidas barras, perfis e tubos, quando as placas sofrem laminação, são produzidos as tiras, chapas e arames. Se o catodo for fundido e laminado em processo contínuo, obtêm-se o vergalhão, a partir do qual serão fabricados os fios e cabos.

- Processo Hidrometalúrgico

Quando o minério é de baixo teor e na forma oxidada, indica-se a hidrometalurgia, que consiste em lixiviar o minério moído com ácido sulfúrico, obtendo-se soluções ricas, posteriormente aplica-se a filtração da solução e a precipitação do metal através de concentração (utilizando-se ferro), de aquecimento ou por eletrólise. No caso da eletrólise, promove-se a eletrodeposição do cobre sob a forma de catodos com 99,9% de pureza a partir das soluções ricas.

- Processo SX-EW

Este é um processo recente, de cerca de 25 anos, e dentre suas vantagens tem-se a facilidade de aproveitamento de depósitos oxidados de baixo teor, partindo-se diretamente do minério e obtendo-se o catodo com teor 99,9% de cobre, sem necessitar de fundição e refinaria. Como vantagens tem-se a baixa emissão de poluentes e o aproveitamento de minérios com baixo teor. Como desvantagens tem-se o alto custo de implantação (cerca de 30% superior aos demais), dificuldade do aproveitamento de subprodutos como ouro e prata, pode ser viável para plantas a partir de 30.000 t/ano contra 200.000 t/ano do processo pirometalúrgico.

Quanto às reservas mundiais, os maiores detentores são Estados Unidos e Chile, que somam-se 40% do total, ao todo estima-se que as reservas descobertas atinjam cerca de 607.000.000 de toneladas de cobre contido, o que segundo previsões de demanda daria para abastecer o mundo por aproximadamente de 50 anos. As reservas brasileiras representam cerca de 2,0 % do total mundial. No Brasil o estado do Pará tem destaque na obtenção deste metal, sendo o município de Marabá com reservas medidas da ordem de 618.108.992 toneladas, com teor médio de 0,93% de cobre, correspondendo a 5.767.411 t de cobre contido.

Os principais depósitos no Pará são os de: Salobo, Cristalino, Sossego e Alemão, sendo a maioria sulfetada, contendo ouro, prata e molibdênio. Em Salobo a mineralização está relacionada a xistos em ambiente vulcano-sedimentar e constituem as reservas de cobre mais significativas e promissoras do Brasil, de nível internacional (RIBEIRO, 2001).

Neste trabalho será utilizado o resíduo da serra do Sossego, e segundo Muller e Castro Filho (2008) a composição mineralógica e química do minério deste local é representada na tabela 2.8 e 2.9:

Tabela 2.8 – Classificação do mineralógica típica do minério de cobre da serra de Sossego.

| <b>MINERAIS</b> | <b>%</b> |
|-----------------|----------|
| Quartzo         | 26       |
| Feldspato       | 27       |
| Clorita         | 14       |
| Biotita         | 10       |
| Magnetita       | 9        |
| Calcopirita     | 3        |
| Hematita        | 1        |
| Anfibólio       | 2        |
| Carbonatos      | 6        |
| Epidoto         | 2        |

Fonte: Muller e Castro Filho (2008).

Tabela 2.9 – Classificação do química típica do minério de cobre da serra de Sossego.

| <b>ELEMENTOS QUÍMICOS</b> | <b>% EM PESO</b> |
|---------------------------|------------------|
| Cu                        | 1,00             |
| S                         | 0,89             |
| Fe                        | 6,41             |

Fonte: Muller e Castro Filho (2008).

A NBR 10004/2004 classifica este material proveniente da mineração do cobre sulfetado como um resíduo sólido, que resulta de atividade de origem industrial cujo lançamento na rede pública de esgoto se torna inviável. Segundo a mesma norma técnica o resíduo utilizado nesta pesquisa é o de nível II-B (inerte). Na figura 2.3 é apresentado a figura referente ao resíduo em estudo, retirado das bacias de contenção em Canaã dos Carajás/PA.



Figura 2.3 – Resíduo da mineração do cobre sulfetado.

Fonte: Próprio autor (2015).

Muller e Castro Filho (2008) aplicaram o resíduo deste estudo na fabricação de concreto pré-moldado, onde a composição química deste apontou uma predominância de sílica, óxido de alumínio e óxido de ferro. Os autores realizaram também testes de lixiviação do resíduo, e a concentração de metais lixiviados foi muito baixa,

Segundo os autores supracitados, o resíduo apresentou boa viabilidade técnica quanto a fabricação de concreto pré-moldado, principalmente pela possibilidade de substituição do agregado miúdo, porém em virtude de sua finura, houve elevação no teor de cimento.

Moura (2000) aplicou a escória de cobre para produção de concreto como adição e agregado miúdo. Cruz (2002) também utilizou a escória de cobre em argamassas e concretos a partir da geração pelo processo pirometalúrgico denominado *Flash Smelting*, sendo granulometricamente classificada como um agregado miúdo, onde foram confeccionados corpos de provas com um fck (resistência mínima à compressão axial após 28 dias em cura saturada) de 15 MPa.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA

---

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Como definido no início desta tese, seu objetivo é: *Estudar o desempenho de CA com a utilização do resíduo da mineração de cobre como material para pavimentação asfáltica*. Inicialmente foi realizado a caracterização dos materiais constituintes da mistura (CAP, seixo, agregado miúdo natural e resíduo) e assim calculada a dosagem piloto (sem resíduo), enquadrada na faixa “C” do DNIT, que serviria como base para a substituição do agregado miúdo.

Após definida a dosagem piloto, foi-se substituindo a areia pelo resíduo da mineração de cobre sulfetado, gerando assim 4 misturas distintas, sempre enquadradas na faixa “C”, denominadas:

- Piloto (sem resíduo);
- 10% de resíduo em substituição a parte do agregado miúdo natural;
- 20% de resíduo em substituição a parte do agregado miúdo natural;
- 25% de resíduo em substituição a parte do agregado miúdo natural;

Os corpos de prova foram dosados segundo a metodologia Marshall para a definição de uma dosagem de referencia a cada teor de resíduo, que represente 4% de vazios na mistura.

Após a definição de cada teor de CAP para cada dosagem de referencia (piloto, 10%, 20% e 25% de resíduo), os corpos de prova passaram a ser confeccionados a partir destes teores para determinação das propriedades mecânicas dos mesmos. Todas as características são acompanhadas por análises estatísticas de correlação, regressão e/ou ANOVA (Análise de Variância), quando for o caso.

Foram extraídas amostras das 4 misturas no teor de referencia, e levadas ao MEV para analisar a presença de resíduo nos corpos de prova.

### 3.2 AGREGADOS

Os agregados utilizados no estudo foram:

- Agregado miúdo: areia e resíduo
- Agregado graúdo: seixo

A areia e o seixo foram selecionados diretamente dos estoques de uma grande empresa de pavimentação da região metropolitana de Belém, com o intuito de representar os materiais que se utiliza na prática na região. Quanto ao resíduo, que foi utilizado em substituição a areia, este foi coletado diretamente da bacia de contenção da mina do Sossego, em Canaã dos Carajás (PA).

A areia utilizada no estudo é proveniente do município de Ourém (PA), sendo este reconhecido fornecedor de agregados na região. A primeira caracterização efetuada foi a granulometria das amostras, pois a mesma deveria atender a faixa “C” do DNIT, para camada de rolamento. Nesta pesquisa foram realizados dois ensaios de granulometria e efetuada a média para utilização no estudo. Complementando a caracterização foram realizados os seguintes ensaios:

Tabela 3.1 – Resumo dos ensaios de caracterização do agregado miúdo desta pesquisa.

| <b>Ensaio</b>               | <b>Norma</b>     |
|-----------------------------|------------------|
| Dimensão máxima do agregado | DNER - ME 083/98 |
| Módulo de finura            | DNER - ME 083/98 |
| Material pulverulento       | DNER - ME 266/97 |
| Equivalente de Areia        | DNER - ME 054/97 |
| Massa específica            | DNER-ME 084/95   |

O seixo também é proveniente do município de Ourém (PA), onde a granulometria foi realizada em duas amostras e obtida a média para a caracterização granulométrica e encaixe na faixa “C” do DNIT. Completando a caracterização do agregado graúdo segue a tabela 3.2:

Tabela 3.2 – Resumo dos ensaios de caracterização do seixo desta pesquisa.

| <b>Ensaio</b>               | <b>Norma</b>     |
|-----------------------------|------------------|
| Dimensão máxima do agregado | DNER - ME 083/98 |
| Módulo de finura            | DNER - ME 083/98 |
| Material pulverulento       | DNER - ME 266/97 |
| Índice de forma             | DNER - ME 086/94 |
| Massa específica real       | DNER-ME 195/97   |
| Massa específica aparente   | DNER-ME 195/97   |

Como complemento a caracterização tradicional, foi realizada a caracterização no equipamento AIMS no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, com o objetivo de obter parâmetros de forma, angularidade, textura e esfericidade. Este ensaio consiste na acomodação dos agregados de diferentes tamanhos (25,4; 19,0; 12,5; 9,5 ou 4,75 mm) em bandejas específicas transparentes, em uma amostra de aproximadamente 50 g para cada tamanho. A bandeja gira e o sistema processa a aquisição dos dados.

Al Rousan (2004) realizou ensaios em vários agregados e aplicou métodos estatístico de *Cluster*, obtendo limite de classificação para cada propriedade, conforme a tabela 3.3:

Tabela 3.3 – Limites das propriedades dos agregados para a caracterização AIMS.

| <b>Propriedade</b> | <b>Valores e Classificação</b> |                |              |            |            |
|--------------------|--------------------------------|----------------|--------------|------------|------------|
| Forma 2D           | < 6,5                          | 6,5 – 8,0      | 8,0 – 10,5   | > 10,5     | -          |
|                    | Circular                       | Semicircular   | Semialongado | Alongado   | -          |
| Esfericidade       | < 0,6                          | 0,6 – 0,7      | 0,7 -0,8     | > 0,8      | -          |
|                    | Achatado/Alongado              | Baixa          | Esfericidade | Alta       | -          |
| Angularidade       | < 2.100                        | 2.100- 4.000   | 4.000-5.400  | > 5.400    | -          |
|                    | Arredondado                    | Subarredondado | Subangular   | Angular    | -          |
| Textura            | < 165                          | 165 - 275      | 275 - 350    | 350 – 460  | > 460      |
| Superficial        | Polido                         | Liso           | Baixa        | Rugosidade | Alta       |
|                    |                                |                | Rugosidade   | Moderada   | Rugosidade |

Fonte: Al Rousan (2004).

### 3.3 LIGANTE ASFÁLTICO

O ligante utilizado no estudo foi o CAP 50/60, por ser o mais utilizado nos serviços de pavimentação na região, que não tem disponibilidade de outros tipos. O material foi retirado diretamente dos caminhões tanques fornecedores da empresa de pavimentação colaboradora deste pesquisa, procedente da PETROBRAS S/A.

Um dos ensaios fundamentais para determinação das temperaturas de mistura e compactação do asfalto é o ensaio de viscosidade *Saybolt Furol*. Este foi executado segundo ABNT 14.950.

Apesar do CAP vir acompanhado de laudo do fornecedor, os ensaios de caracterização foram todos refeitos no laboratório de Misturas Asfálticas (LEMA) da UFPA, segundo a tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Resumo dos ensaios de caracterização do CAP desta pesquisa.

| <b>Ensaio</b>                     | <b>Norma</b>     |
|-----------------------------------|------------------|
| Viscosidade Saybolt-Furol a 135°C | ABNT 14.950      |
| Viscosidade Saybolt-Furol a 150°C | ABNT 14.950      |
| Viscosidade Saybolt-Furol a 177°C | ABNT 14.950      |
| Viscosidade Brookfield a 135°C    | ABNT 15.184      |
| Viscosidade Brookfield a 150°C    | ABNT 15.184      |
| Viscosidade Brookfield a 177°C    | ABNT 15.184      |
| Ponto de fulgor                   | ABNT 11.341/2004 |
| Ponto de amolecimento             | DNIT 131/2010    |
| Penetração                        | DNIT 155/2010    |
| Elasticidade                      | DNIT 163/98      |

Os ensaios de ponto de fulgor, ponto de amolecimento, penetração e ductibilidade, foram realizados também adicionando porções de resíduo passante na peneira n° 200, com o objetivo de verificar o efeito dos finos nestas características do CAP.

### 3.4 MISTURAS ASFÁLTICAS

A dosagem Marshall é o método reconhecido desde 1940, idealizado pelo pesquisador Bruce G. Marshall do Departamento de Transporte do Estado de Mississippi nos Estados Unidos.

O método ficou mundialmente conhecido no período da segunda guerra, mais precisamente em 1948 quando os EUA procuraram um novo método para dimensionamento e controle dos serviços de pavimentação em aeroportos, devido ao aumento do fluxo e quantidade de cargas.

O corpo de engenheiros do exército comparou os métodos existente e optou pelo método Marshall pela sua rapidez, simplicidade, eficiência, portabilidade e fácil disponibilidade de equipamentos. Até hoje os projetos no Brasil são quase todos realizados por este método.

O método consiste na obtenção de resultados de ensaios laboratoriais, com resultados em campo, isto é, ação sob tráfego e intemperismo. O objetivo é a obtenção de densidades próxima as que se obtém em campo, por meio de compactação por impacto, selecionando-se agregados e variando o teor de CAP (normalmente cinco teores com três réplicas cada). Após a compactação determina-se propriedades volumétricas e de resistência, para então se obter o teor de asfalto de projeto.

O método é relativamente simples, onde molda-se corpos de prova de formato cilíndrico com diferentes teores de ligante, após resfriamento de 24 horas, são retirados dos moldes, além de calculados a densidade, a relação vazios de agregado mineral e o volume de vazios e imersos em banho a 60°C e rompidos. No rompimento são analisados a fluência, a estabilidade.

Nesta pesquisa utilizou-se o método de dosagem Marshall, tendo a tabela 3.5 abaixo como principais parâmetros de dosagem utilizados:

Tabela 3.5 – Parâmetros Marshall de dosagem de concreto asfáltico.

| CARACTERÍSTICAS   | MÉTODO DE ENSAIO | CAMADA DE ROLAMENTO | CAMADA DE LIGAÇÃO |
|---|------------------|---------------------|-------------------|
| Porcentagem de Vazios   | DNER-ME 043      | 3 a 5               | 4 a 6             |
| Relação Betume / Vazios   | DNER-ME 043      | 75 – 82             | 65 – 72           |
| Estabilidade Mínima (Kgf) (75 golpes)                                       | DNER-ME 043      | 500                 | 500               |
| Resistencia à Tração por Compressão Diametral Estática à 25°C, Mínima (Mpa) | DNER-ME 138      | 0,65                | 0,65              |

Fonte: DNIT031/2006 ES.

A ideia foi substituir o agregado miúdo pelo resíduo da mineração de cobre sulfetado, em proporções pré-definidas pela granulometria da areia, até sua substituição total. Ter-se-ia então uma dosagem “piloto” (sem resíduo), duas proporções com resíduo crescente e uma sem areia, totalmente substituída por resíduo.

A partir dos 15 corpos de prova de cada uma das 4 dosagens, foi definido pela técnica da regressão, o teor de CAP referente a 4% de vazios, e então verificado se atende aos outros parâmetros também por suas equações de regressão.

Cada teor de estudo foi submetido ao conjunto MEV-EDS (Microscópio Eletrônico de Varredura – Energia Dispersiva) para verificação da microestrutura das amostras, assim como quais elementos químicos estão presentes. Os ensaios foram realizados num equipamento MEV 3000 da HITACHI que captura imagens por meio de eletros retro-espalhados, e está equipado com detector EDS (swift ED3000 *x-ray*), situados nas dependências do Laboratório de Microscopia Eletrônica da Faculdade de Engenharia Química da UFPA.

### 3.5 ENSAIOS MECÂNICOS

#### 3.5.1. Resistencia à Tração por Compressão Diametral

Para a obtenção dos valores de Resistencia a tração por compressão diametral da mistura betuminosa, foi utilizada a norma DNER-ME- 136/10. Os corpos de prova foram

rompidos em triplicata e obtida a média aritmética simples dos três corpos de prova das quatro dosagens, totalizando 12 corpos de prova para obtenção desta característica.

Os corpos de prova de aproximadamente 6,50 cm de altura e diâmetro de 10,00  $\pm$ 0,20 cm, foram levados a uma prensa e imprimida uma velocidade no êmbolo de 0,80 $\pm$ 0,1 mm/s até a ruptura em duas metades conforme figura 3.1.



Figura 3.1 - Configuração do ensaio de resistência a tração realizados nesta pesquisa.

O valor da resistência a tração é dada por:

$$\sigma_R = \frac{2 F}{\pi D H}$$

$\sigma_R$  – Resistencia a Tração, em kgf/cm<sup>2</sup>

F – Carga de ruptura, em kgf

D – Diâmetro do corpo de prova, em cm

H – Altura do corpo de prova, em cm

Ou

$$\sigma_R = \frac{2 F}{100\pi D H}$$

$\sigma_R$  – Resistência a Tração, em MPa

F – Carga de ruptura, em N

D – Diâmetro do corpo de prova, em cm

H – Altura do corpo de prova em, cm

Foi conferida também a análise da resistência a tração, quando submetidos os corpos de prova a temperaturas mais elevadas do que o ensaio tradicional. Foram realizadas duas séries a mais de ruptura, aquecendo as amostras a 50°C e 70°C em estufa por 2 horas, tentando assim simular a temperatura em campo.

Outro ensaio realizado foi a ruptura a tração, quando submetido a série de três corpos de prova de cada dosagem a exposição ao tempo por três meses, sendo semanalmente rotacionados em 90° para garantir a mesma exposição em todas as faces laterais, conforme figura abaixo.



Figura 3.2 - Corpos de prova em exposição ao tempos.

### 3.5.2 Ensaio Cantabro

O ensaio Cantabro tem a finalidade de medir a perda ao desgaste por abrasão no equipamento *Los Angeles*, além de indiretamente analisando a possibilidade a desagregação e a coesão da mistura, quando submetida ao efeito abrasivo do tráfego.

Para a obtenção dos valores do desgaste a abrasão da mistura betuminosa será utilizado a norma DNER-ME- 383/99. O ensaio também foi feito em triplicata para cada dosagem de estudo, submetido a 300 revoluções, sem carga abrasiva e a uma rotação de 30 a 33 r.p.m e determinada a abrasão:

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

A – Abrasão dos corpos de prova

P<sub>1</sub> – Massa inicial dos corpos de prova

P<sub>2</sub> – Massa final dos corpos de prova

O resultado é a média de três ensaios para um mesmo teor de ligante, não divergindo em  $\pm 20\%$  do valor médio. A perda máxima admitida é de 25%.

### 3.5.3 Módulo de Resiliência por Compressão Diametral

O módulo de resiliência é utilizado em dimensionamento racional de pavimentos, e verificação de capacidade estrutural de suportar grande número de repetições de cargas. Dentre as várias maneiras de determinação do módulo de resiliência foi feita com que os corpos de prova submetidos a tração indireta por meio de compressão diametral de cargas dinâmicas, com duração de 1 segundo para o ciclo total, dividido em 0,1 segundo a aplicação e 0,9 segundo o repouso (MOURÃO, 2003).

Para a obtenção dos valores do módulo de resiliência da mistura betuminosa foi utilizada a norma DNIT-ME- 135/2010. Este ensaio foi realizado no Laboratório da COPPE/UFRJ.



Figura 3.3 – Equipamento utilizado para realização do ensaio de módulo de resiliência (COPPE/UFRJ).

O módulo de resiliência será:

$$MR = \frac{F}{\Delta H} (0,9976\mu + 0,2692)$$

MR – Módulo de Resiliencia, em Kgf/cm<sup>2</sup>

F – Carga vertical (Kgf)

$\Delta$  – Deformação elástica registrada no computador (cm)

H – Altura do corpo de prova (cm)

$\mu$  - Coeficiente de Poisson (recomenda-se 0,30)

Para a carga em Newton:

$$MR = \frac{F}{100\Delta H} (0,9976\mu + 0,2692)$$

MR – Módulo de Resiliencia, em Kgf/cm<sup>2</sup>

F – Carga vertical (N)

$\Delta$  – Deformação elástica registrada no computador (cm)

H – Altura do corpo de prova (cm)

$\mu$  - Coeficiente de Poisson (recomenda-se 0,30)

### 3.5.4 Fadiga por Compressão Diametral

No Brasil o ensaio mais comum é o de fadiga por compressão diametral a tensão controlada, seja pela sua facilidade de realização, seja pela preparação da amostra, praticamente o mesmo processo da metodologia Marshall. Os equipamentos podem ser os mesmos de resistência a tração e módulo de resiliência, possuindo boa reprodutividade e repetitividade (TANGELLA et al., 1990; READ&COLLOP, 1997).

As amostras foram ensaiadas em triplicata na dosagem de referência de cada teor de resíduo no Laboratório de Engenharia Mecânica da UFPA. Foram aplicadas cargas a uma frequência de 1Hz (sendo 0,1 s de aplicação e 0,9 s de alívio) na relação de 10%, 20%, 30% e 40% da resistência a tração em corpos de prova. O carregamento vertical é definido pela equação

$$F = \frac{100 \cdot \pi \cdot D \cdot H \cdot \% RT}{2}$$

RT – Resistência a Tração, em MPa

F – Carga de ruptura, em N

D – Diâmetro do corpo de prova, em cm

H – Altura do corpo de prova em, cm

Definiu-se a ruptura do corpo de prova como critério para encerramento do ensaio. A acomodação do corpo de prova no equipamento está representado na figura 3.4.



Figura 3.4 - Equipamento utilizado para realização do ensaio de fadiga.

Anota-se o número de carga aplicada e calcula-se as diferenças de tensão e deformação resiliente:

$$\Delta\sigma = \frac{8 F}{100 \cdot \pi \cdot d \cdot h}$$

$$\Delta\epsilon = \frac{\% RT}{MR}$$

$\Delta\sigma$  – Diferença de tensões no centro do corpo de prova, em MPa

F – Carga aplicada, em N

d – Diâmetro do corpo de prova, em cm

h – Altura do corpo de prova em, cm

$\Delta\epsilon$  – Deformação resiliente

% RT – Resistência a tração, MPa

MR – Módulo de resiliência, Mpa

Em um gráfico *dilog* elaboram-se as curvas  $\Delta\sigma$  x N e determina-se a curva de fadiga através das equações a seguir:

$$N = K \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^n$$

N - Vida a Fadiga (número de repetição de carga até a ruptura)

K, n – Parâmetros determinados experimentalmente

$\sigma$  – Tensão de tração

$$N = K \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)^n$$

N - Vida a Fadiga (número de repetição de carga até a ruptura)

K, n – Parâmetros determinados experimentalmente

$\varepsilon$  – Deformação de tração

A análise não se limitou apenas aos dados de fadiga isolados, visto que há uma forte influencia da rigidez de cada mistura, e da estrutura completa do pavimento sobre a vida de fadiga. Neste estudo foram feitas simulações utilizando o programa SisPav desenvolvido por FRANCO (2007). No programa em questão, o modelo vigente é o que se dá em função do MR, onde fator de regressão K3 foi considerado igual a zero, sendo assim foi possível a análise com as equações obtidas pelos ensaios de fadiga das misturas desta pesquisa.

$$N = fcl \times K_1 \times \varepsilon^{K_2} \times MR^{K_3}$$

Onde:

N = Vida de fadiga;

fcl = Fator campo laboratório

K<sub>1</sub> = Coeficiente de regressão

K<sub>2</sub> = Coeficiente de regressão

K<sub>3</sub> = Coeficiente de regressão

MR = Módulo de resiliência (MPa)

$\varepsilon$  = Deformação específica de tração

Para as demais condições de contorno seguiu-se as adotadas por Cavalcanti (2010) adaptando-se algumas variáveis, onde:

- Base de material granular
  - Espessura de 20 cm
  - MR = 1.000 MPa
- Sub-base de solo laterítico
  - Espessura 20 cm
  - MR = 130 MPa
- Subleito argiloso laterítica
  - MR = 52 MPa
- Tráfego de eixo de roda dupla com volume no primeiro ano = 150.000
- Carga do eixo = 8,20 Tf
- Pressão dos pneus = 0,56 MPa
- Mês de abertura do tráfego = Julho
- Região = Belém

### 3.6 REOLOGIA DO LIGANTE E ADIÇÕES

Os ensaios reológicos foram executados no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ. Para estes ensaios foi necessário envelhecer as misturas pela técnica RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*), onde 8 frascos com 35 g de CAP são colocados horizontalmente em uma bandeja, sofrendo rotação de 15 r.p.m., formando uma camada de CAP de espessura aproximada de 1,25 mm, a 163°C por 75 minutos, conforme figura 3.5. Desta forma todo o ligante é exposto ao calor e ao fluxo de ar de aproximadamente 4.000 mL/min, evitando assim a formação de película protetora, segundo o método ASTM 2872 (2012).



Figura 3.5 - Equipamento utilizado para realização do ensaio RTFOT (COPPE/UFRJ).

Neste estudo reológico foram utilizadas amostras do CAP 50/70, com adições de 2,5% e 5,0% de resíduo passante na peneira nº200, com e sem envelhecimento. As alterações reológicas foram acompanhadas em um Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR), quanto suas propriedades de módulo de complexo ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ). Com estes parâmetros foi possível definir o grau de desempenho das misturas (PG), segundo a classificação SuperPav (ASTM D 6373-13 e AASHTO M320-10), onde é obtida a temperatura imediatamente inferior a ao valor do parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  igual a 1,0 Kpa.



Figura 3.6 – Reômetro de cisalhamento dinâmico do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

A partir do ensaio no DSR, foi possível também realizar a análise da classificação do volume de tráfego, tendo como parâmetro o ensaio de Fluência e Recuperação sob Múltipla Tensão – MSCR, ASTM D7405 – 15. Os parâmetros acompanhados e comparados com a tabela 3.5 são:

- $J_{nr}$  – Compliância não recuperável: Potencial do material sofrer deformação permanente;
- $J_{n,diff}$  – Sensibilidade do ligante a mudanças no nível de tensão.

Tabela 3.6 – Classificação AASHTO M 332-14 de ligante asfáltico em função do tráfego.

| <b>Parâmetro</b>                              | <b>Limites <math>J_{nr}</math> <sub>3200</sub></b> | <b>PG MSCR</b>           | <b>Tráfego</b>                 |
|---|--|--------------------------|--------------------------------|
| $J_{nr3200}; KPa^{-1}$<br>$J_{n,diff} < 0,75$ | $< 4,5 KPa^{-1}$                                   | S – Tráfego Padrão       | $< 10$ milhões                 |
|   | $< 2,0 KPa^{-1}$                                   | H – Tráfego Pesado       | De 10 a 30 milhões             |
|   | $< 1,0 KPa^{-1}$                                   | V – Tráfego Muito Pesado | $>30$ milhões                  |
|   | $< 0,5 KPa^{-1}$                                   | E – Tráfego Extra Pesado | $>30$ milhões e tráfego parado |

### 3.7 PREVISÃO DE CORPOS DE PROVA A SEREM MOLDADOS

Para a elaboração da pesquisa foram feitas as seguintes quantidades de corpos de prova para os referidos ensaios:

Tabela 3.7 – Relação dos corpos de prova a serem utilizados na pesquisa.

| ENSAIOS                                     | QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVAS |             |             |             |
|---|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|   | PILOTO                         | 10% REJEITO | 20% REJEITO | 25% REJEITO |
| Teor de CAP                                 | 15                             | 15          | 15          | 15          |
| Estabilidade Marshall                       | 3                              | 3           | 3           | 3           |
| Estabilidade frente a temperatura           | 3                              | 3           | 3           | 3           |
| Resistencia à tração                        | 3                              | 3           | 3           | 3           |
| Resistencia à tração a 50°C                 | 3                              | 3           | 3           | 3           |
| Resistencia à tração a 70°C                 | 3                              | 3           | 3           | 3           |
| Resistencia à tração exposto a área externa | 3                              | 3           | 3           | 3           |
| Catambro                                    | 3                              | 3           | 3           | 3           |
| Módulo de resiliencia                       | 4                              | 4           | 4           | 4           |
| Fadiga                                      | 12                             | 12          | 12          | 12          |
| <b>TOTAL PRACIAL</b>                        | <b>52</b>                      | <b>52</b>   | <b>52</b>   | <b>52</b>   |
| <b>TOTAL GERAL</b>                          |                                |             | <b>208</b>  |             |

Estes corpos de prova foram distribuídos segundo sequencia descrita pela figura a seguir:

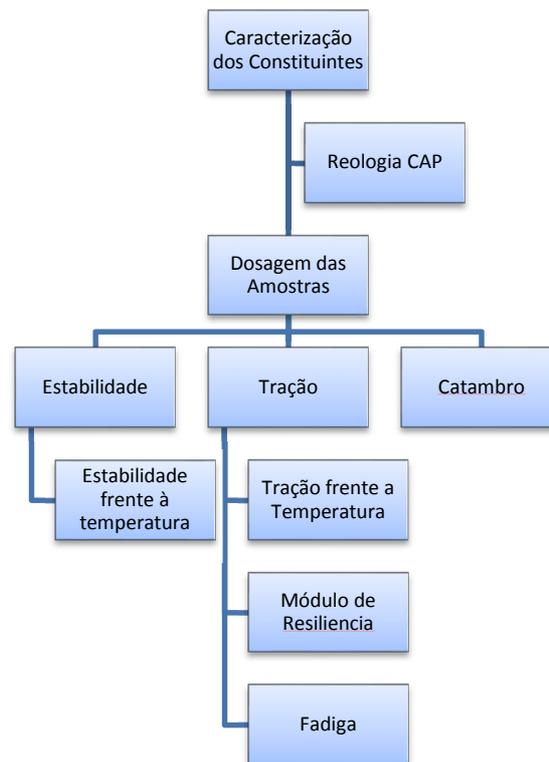


Figura 3.5 - Fluxograma da pesquisa em termos dos ensaios mecânicos.

## CAPÍTULO 4

### APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

---

#### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE COBRE

O resíduo sulfetado proveniente da mineração de cobre é oriundo da serra do Sossego situada no município de Canaã dos Carajás/PA. Inicialmente foi realizada sua análise granulométrica para definir como poderia ser utilizado na mistura asfáltica, ressaltando que foram feitas análises de duas amostras e considerado a média. Conforme gráfico e tabela pertencentes ao anexo 1, onde se encontram os dados de caracterização dos materiais desta tese, pôde-se constatar que o resíduo funcionaria como um agregado miúdo, porém com teor de finos, maior do que as areias convencionais da região. Com a granulometria realizada foi traçado a curva granulométrica, e calculados os parâmetros de dimensão máxima do agregado de 1,19 mm e módulo de finura de 0,87. Apresenta-se a figura 4.1 resultante da caracterização por peneiramento.



Figura 4.1- Foto do resultado da granulometria do resíduo.

Posteriormente foi realizado o teor de material pulverulento, que como pode-se notar na tabela 4.1 mostra um teor considerável de finos, o que corrobora com os dados da granulometria de que este resíduo funcionaria para melhor fechamento da massa asfáltica. Na região se utiliza o cimento Portland para tal função.

O resultado do ensaio de equivalente de areia reforçou a tese de usá-lo como agregado miúdo em combinação com areia, visto que 75,68% do rejeito caracteriza-se como areia, apresentado na figura abaixo.



Figura 4.2 - Foto do ensaio do equivalente de areia do resíduo.

A densidade real do resíduo foi obtido pelo método do picnômetro (DNER-ME 084/95) com valor médio para as duas amostras de 2,895 g/cm<sup>3</sup>. Como resumo geral da caracterização do resíduo de cobre foi elaborada a tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resumo da caracterização tradicional do resíduo de cobre usado nesta pesquisa.

| <b>Ensaio</b>               | <b>Norma</b>     | <b>Resultado</b>        |
|-----------------------------|------------------|-------------------------|
| Dimensão máxima do agregado | DNER - ME 083/98 | 1,19 mm                 |
| Módulo de finura            | DNER - ME 083/98 | 0,87                    |
| Material pulverulento       | DNER - ME 266/97 | 15,98%                  |
| Equivalente de Areia        | DNER - ME 054/97 | 75,68%                  |
| Densidade real              | DNER-ME 084/95   | 2,895 g/cm <sup>3</sup> |

Posteriormente a amostra do resíduo foi submetida a análise no equipamento MEV 3000 da HITACHI, sendo este equipado com detector *EDS swift ED3000 x-ray*, do Laboratório de Microscopias de Curso de Engenharia Química da UFPA, produzindo as imagens aumentada em 120 e 600 vezes respectivamente conforme figura 4.3. Pode-se notar a característica angular dos grãos de resíduo em relação aos da areia mostrados a seguir. Esta é uma característica positiva do ponto de vista mecânico, por provocar um “travamento” melhor na massa em relação ao da areia.

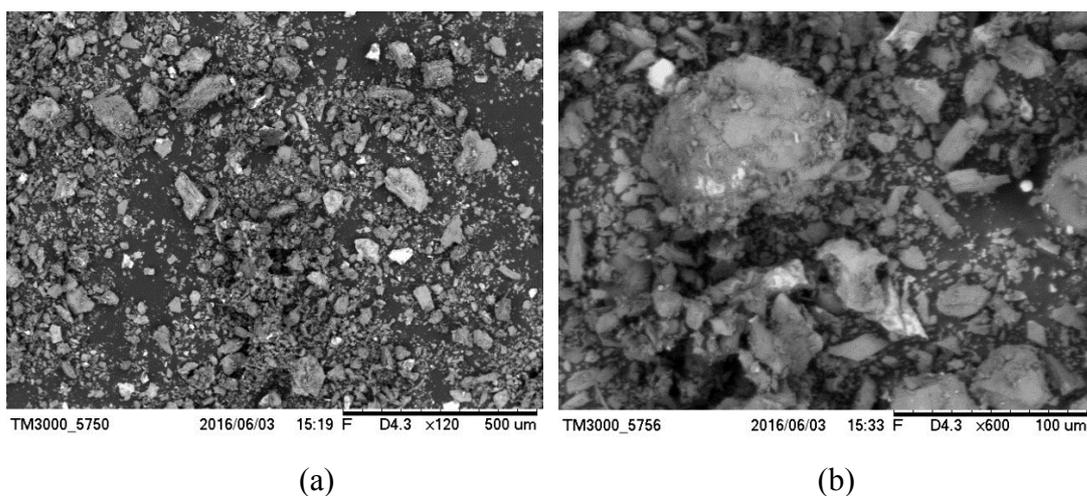


Figura 4.3 - MEV do resíduo de cobre deste estudo: (a) x120; (b) x 600.

Quanto ao EDS do resíduo pode-se notar a presença primordial de oxigênio, sílica e ferro como é o esperado para este material, conforme Muller e Castro Filho (2004), e descrito na figura 4.4 a seguir.

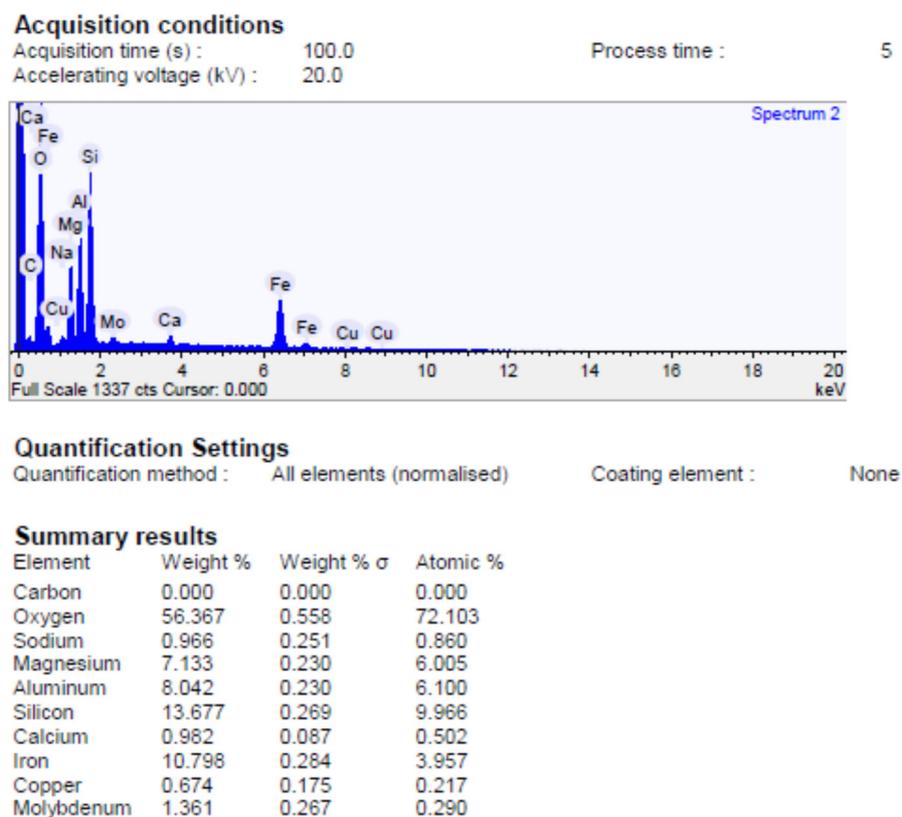


Figura 4.4- EDS do resíduo utilizado nesta pesquisa.

Para complementar o estudo das propriedades do resíduo de cobre, foi realizado uma análise no AIMS, onde as propriedades de angularidade e forma 2D estão resumidas na tabela 4.2, segundo classificação de Rousan (2004), já que por sua granulometria, os parâmetros de textura e esfericidade não puderam ser obtidos. Os dados detalhados do ensaio são apresentados no anexo 1.

Tabela 4.2 - Propriedades do resíduo de cobre segundo análise no AIMS.

| <b>Propriedades</b> | <b>Resultados do Ensaio</b> | <b>Classificação</b> |
|---------------------|-----------------------------|----------------------|
| Angularidade        | 3.093,20                    | Subarredondado       |
| Textura             | -                           | -                    |
| Forma 2D            | 7,74                        | Semicircular         |
| Esfericidade        | -                           | -                    |

#### 4.2. CARACTERIZAÇÃO DA AREIA

O agregado miúdo utilizado na pesquisa é proveniente do município de Ourém/PA. Assim como com o resíduo de cobre a areia foi submetida aos mesmos grupos de ensaios, sendo a análise granulométrica o primeiro deles, ressaltando que foram feitas duas amostras e considerado a média. Conforme anexo 1, onde se encontram as caracterizações dos materiais desta tese, pôde-se constatar que a areia caracteriza-se como uma areia fina, comumente encontrada na região. Com a granulometria realizada foi traçado a curva granulométrica, e calculados os parâmetros de dimensão máxima do agregado de 1,19 mm e módulo de finura de 1,17. Na figura 4.5 apresentam-se as frações resultante do ensaio granulométrico.



Figura 4.5 - Foto do resultado da granulometria da areia.

Assim como no resíduo, foi realizado o teor de material pulverulento, que como pode-se notar na tabela 4.3 apresenta um teor relativamente baixo o que propiciará com que a combinação com o resíduo de cobre um melhor fechamento da massa asfáltica.

No ensaio de equivalente de areia comprovou o alto teor de areia do agregado, visto que 97,32% caracteriza-se como areia, apresentado na figura 4.6.



Figura 4.6 - Foto do ensaio de equivalente de areia da areia.

A massa específica da areia foi obtida pelo método do picnômetro (DNER-ME 084/95) com valor médio para as duas amostras de  $2,644 \text{ g/cm}^3$ . Como resumo geral da caracterização da areia foi elaborada a tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Resumo da caracterização tradicional da areia usada nesta pesquisa.

| <b>Ensaio</b>               | <b>Norma</b>     | <b>Resultado</b>        |
|-----------------------------|------------------|-------------------------|
| Dimensão máxima do agregado | DNER - ME 083/98 | 1,19 mm                 |
| Módulo de finura            | DNER - ME 083/98 | 1,17                    |
| Material pulverulento       | DNER - ME 266/97 | 1,49%                   |
| Equivalente de Areia        | DNER - ME 054/97 | 97,32%                  |
| Massa específica            | DNER-ME 084/95   | 2,644 g/cm <sup>3</sup> |

Posteriormente a amostra de areia também foi submetida a análise no equipamento MEV 3000 da HITACHI, sendo este equipado com detector EDS swift ED3000 x-ray, do Laboratório de Microscopias do Museu Emílio Goeldi, produzindo as imagens aumentadas em 120 e 1000 vezes respectivamente. Pode-se notar a característica arredondadas dos grãos.

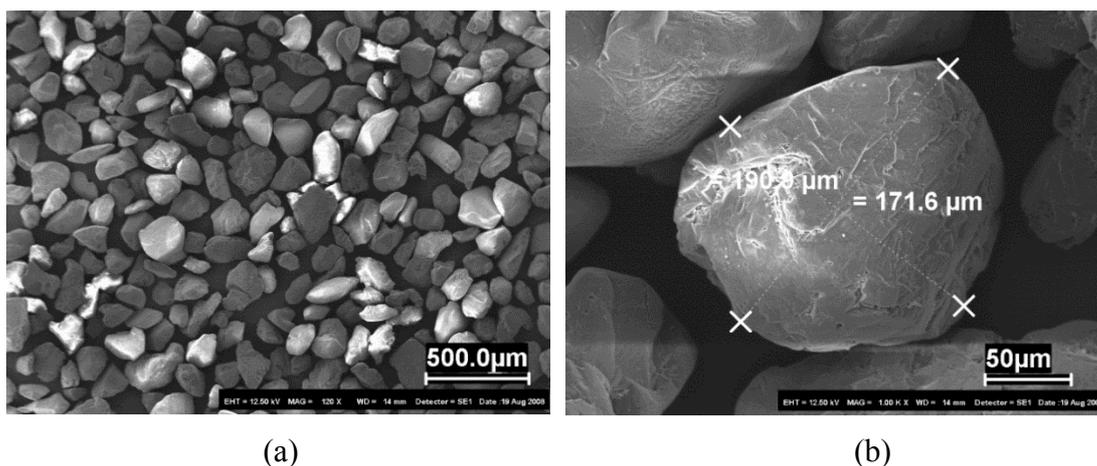


Figura 4.7 - MEV da areia utilizada nesta pesquisa: (a) x 120; (b) x 1000.

Quanto ao EDS na areia pode-se notar a presença primordial de oxigênio e Sílica, como é o esperado para este material, conforme tabela 4.3.

Tabela 4.4 – EDS da Areia.

| <b>Elemento Químico</b> | <b>Concentração em Peso (%)</b> |
|-------------------------|---------------------------------|
| O                       | 60,535                          |
| Al                      | 0,057                           |
| Si                      | 39,092                          |
| Ti                      | 0,125                           |
| Fe                      | 0,192                           |

### 4.3. CARACTERIZAÇÃO DO SEIXO

O agregado graúdo utilizado nesta pesquisa é o seixo proveniente do município de Ourém/PA, sendo este o mais utilizado para a produção de CA na região, pela sua abundância e proximidade da capital. Vale ressaltar a inexistência de brita nas proximidades, até mesmo pelas características geológicas da região Amazônica. Assim como nos demais agregados o primeiro ensaio foi o estudo granulométrico, ressaltando que foram feitas duas amostras e considerado a média.

Conforme anexo 1, pôde-se constatar que o seixo caracteriza-se como um seixo fino, próprio da região. Com a granulometria realizada foi traçada a curva granulométrica, e calculados os parâmetros de dimensão máxima do agregado de 19,10 mm ou  $\frac{3}{4}$ " e módulo de finura de 1,44. Na figura 4.8 apresenta-se as frações resultantes do ensaio de granulometria do seixo.



Figura 4.8- Foto do resultado da granulometria do seixo.

Posteriormente, assim como no resíduo e na areia, foi realizado o teor de material pulverulento, que como pode-se notar também no anexo 1, apresenta um teor baixo de finos como esperado pelas características deste agregado na região.

Para o agregado graúdo foi realizado o índice de forma, que no caso do material da pesquisa obteve-se o valor de 0,15, massa específica real de  $2,581\text{g/cm}^3$  e massa específica aparente de  $2,499\text{g/cm}^3$  pelo método DNER-ME 195/97. Como resumo geral da caracterização do seixo foi elaborada a tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Resumo da caracterização tradicional do seixo usado nesta pesquisa.

| <b>Ensaio</b>               | <b>Norma</b>     | <b>Resultado</b>            |
|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
| Dimensão máxima do agregado | DNER - ME 083/98 | 19,10 mm ou $\frac{3}{4}$ " |
| Módulo de finura            | DNER - ME 083/98 | 1,18                        |
| Material pulverulento       | DNER - ME 266/97 | 0,70%                       |
| Índice de forma             | DNER - ME 086/94 | 0,15                        |
| Massa específica real       | DNER-ME 195/97   | 2,581 g/cm <sup>3</sup>     |
| Massa específica aparente   | DNER-ME 195/97   | 2,499 g/cm <sup>3</sup>     |

Para complementar o estudo das propriedades do agregado graúdo da mistura, foi realizado uma análise no AIMS, onde as propriedades de angularidade, textura, forma 2D e esfericidade estão resumidas na tabela a seguir, segundo classificação de Rousan (2004). Os dados detalhados do ensaio são apresentados no anexo 1.

Tabela 4.6 - Propriedades do seixo segundo análise no AIMS.

| <b>Propriedades</b> | <b>Resultados do Ensaio</b> | <b>Classificação</b>  |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Angularidade        | 3.281,40                    | Subarredondado        |
| Textura             | 114,70                      | Polido                |
| Forma 2D            | 7,62                        | Semicircular          |
| Esfericidade        | 0,72                        | Esfericidade Moderada |

Como pode ser comprovado o seixo utilizado na pesquisa apresenta características pouco anguladas, que corroborando com Capitão *et al.*, 2004; Soares *et al.*, 2000; Harvey *et al.* 1995; Kim *et al.*, 1992; Vasconcelos, 2004, não teria uma resistência a fadiga tão eficiente quanto materiais mais angulados como a brita.

#### 4.4. CARACTERIZAÇÃO DO CAP E EFEITO DO RESÍDUO EM SUAS PROPRIEDADES

Nesta seção foi realizada a caracterização do CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo), assim como o a análise do efeito do resíduo nestas características, principalmente de sua porção fina. O CAP utilizado tem a procedência da PETROBRAS

S/A, e foi retirado diretamente dos caminhões da fornecedora de uma grande empresa de pavimentação na região, colaboradora da pesquisa.

O primeiro ensaio realizado foi o de viscosidade *Saybolt-Furol*, um dos mais importantes para as dosagens, por determinar as temperaturas de mistura e compactação da massa asfáltica. Os resultados estão apresentados na tabela 4.7 a seguir.

Tabela 4.7 - Resultados do ensaio de viscosidade *Saybolt-Furol* do CAP usado nesta pesquisa.

| <b>VISCOSIDADE SAYBOLT-FUROL</b>           |                        |                        |                    |                               |                                   |
|--|------------------------|------------------------|--------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Procedimento de Ensaio: ABNT 14.950</b> |                        |                        |                    |                               |                                   |
| <b>Procedencia: PETROBRAS</b>              |                        |                        |                    |                               |                                   |
| <b>Temperatura (°C)</b>                    | <b>Amostra 1 (SSF)</b> | <b>Amostra 2 (SSF)</b> | <b>Média (SSF)</b> | <b>Temperatura de Mistura</b> | <b>Temperatura de Compactação</b> |
| 135  | 208,82                 | 189,94                 | 199,38             | <b>161,33</b>                 | <b>148,36</b>                     |
| 150  | 85,19                  | 81,14                  | 83,17              | <b>à</b>                      | <b>à</b>                          |
| 177  | 27,88                  | 26,59                  | 27,24              | <b>141,88 °C</b>              | <b>140,59 °C</b>                  |
| 75 à 150 SSF - Para mistura                |                        |                        |                    |                               |                                   |
| 75 à 95 SSF – Mistura                      |                        |                        |                    |                               |                                   |
| Temperatura não inferior à 107 °C          |                        |                        |                    |                               |                                   |
| Temperatura não superior à 177 °C          |                        |                        |                    |                               |                                   |
| 125 à 155 SSF – Compactação                |                        |                        |                    |                               |                                   |

Com os dados médios foi elaborado o gráfico representado na figura 4.9, onde, pela equação de regressão, chegou-se a faixas de valores de temperatura de mistura e compactação, ressaltando uma correlação de 0,9348 entre os dados obtidos.

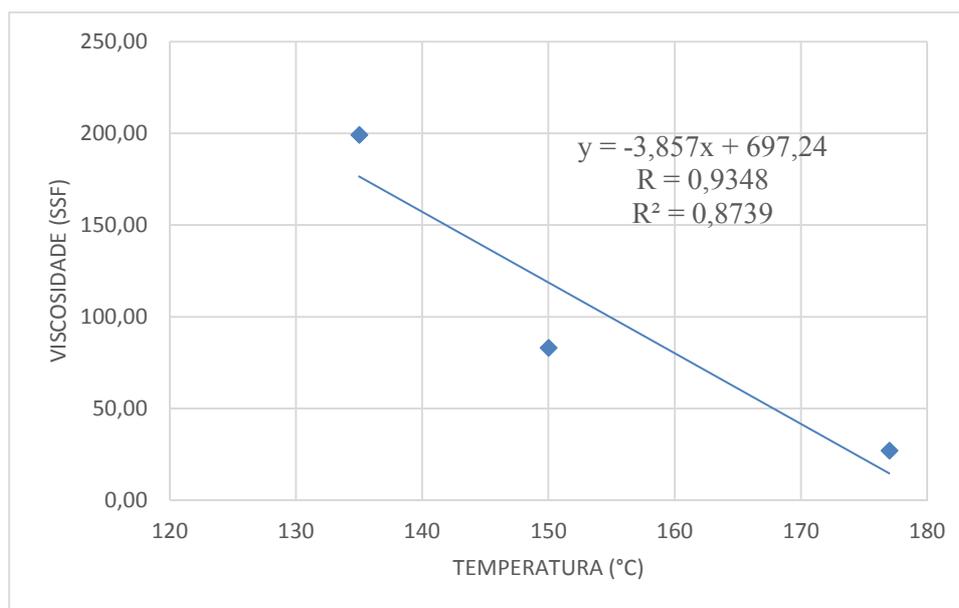


Figura 4.9 - Resultados do ensaio de viscosidade Saybolt-Furol do ligante asfáltico desta pesquisa.

Foi realizado também o ensaio de viscosidade rotacional ou *Brookfield*, conforme figura 4.10 a seguir.

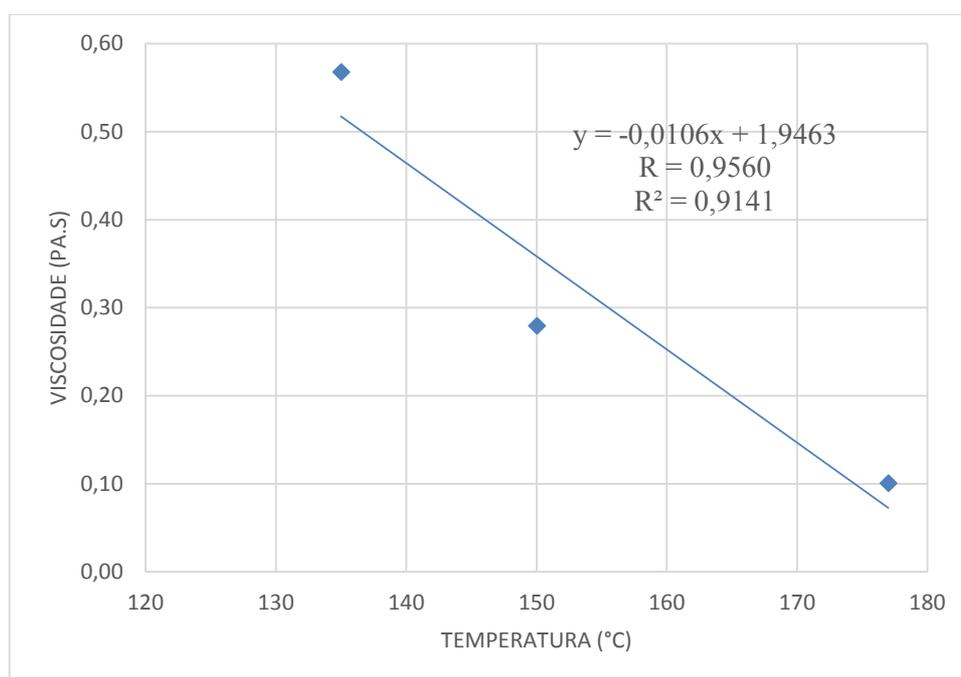


Figura 4.10 - Resultados do ensaio de viscosidade rotacional do ligante asfáltico desta pesquisa.

Dando sequência a caracterização do CAP, foram executados os ensaios de ponto de fulgor, penetração e ductibilidade, apresentados na tabela a seguir, com suas respectivas normas técnicas.

Tabela 4.8 - Resumo da caracterização do CAP usado nesta pesquisa.

| <b>Ensaio</b>                     | <b>Norma</b>     | <b>Resultado</b> |
|-----------------------------------|------------------|------------------|
| Viscosidade Saybolt-Furol a 135°C | ABNT 14.950      | 199,38           |
| Viscosidade Saybolt-Furol a 150°C | ABNT 14.950      | 83,17            |
| Viscosidade Saybolt-Furol a 177°C | ABNT 14.950      | 27,24            |
| Viscosidade Brookfield a 135°C    | ABNT 15.184      | 0,57             |
| Viscosidade Brookfield a 150°C    | ABNT 15.184      | 0,28             |
| Viscosidade Brookfield a 177°C    | ABNT 15.184      | 0,10             |
| Ponto de fulgor                   | ABNT 11.341/2004 | 296°C            |
| Ponto de amolecimento             | DNIT 131/2010    | 48,15°C          |
| Penetração                        | DNIT 155/2010    | 52,00 mm         |
| Ductibilidade                     | DNIT 163/98      | > 60 cm          |

Com o objetivo de caracterizar a influência do resíduo nas propriedades supracitadas do CAP, foi então adicionado resíduo passante na peneira de malha #200, e avaliada primeiramente o efeito deste no ponto de fulgor. Conforme tabela 4.9, pode-se notar uma certa constância nesta propriedade, podendo-se perceber uma variação apenas na proporção de 30% de rejeito, principalmente pela redução da massa de CAP em relação a mistura.

Tabela 4.9 - Resultados do ensaio de ponto de fulgor do CAP usado nesta pesquisa.

| <b>PONTO DE FULGOR</b>                          |                         |
|---|-------------------------|
| <b>Procedimento de Ensaio: ABNT 11.341/2004</b> |                         |
| <b>Procedencia: PETROBRAS</b>                   |                         |
| <b>% DE RESÍDUO</b>                             | <b>TEMPERATURA (°C)</b> |
| 0,00  | 296,00                  |
| 10,00   | 308,00                  |
| 20,00   | 296,00                  |
| 30,00   | 286,00                  |

A figura 4.11 reflete o ensaio a partir de sua equação de regressão com um fator de correlação satisfatório de 0,9278, ressaltando a pouca influencia do resíduo nesta característica.

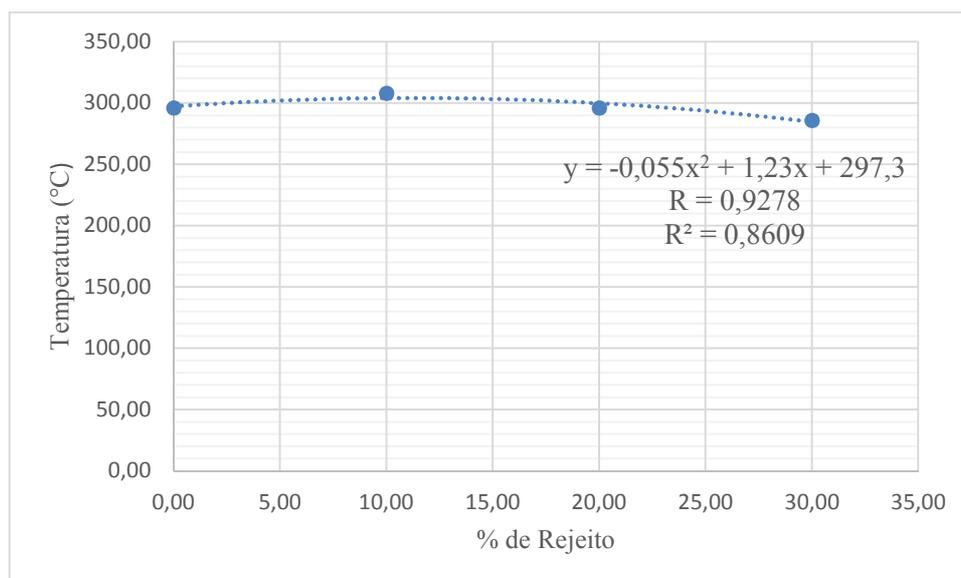


Figura 4.11- Resultados do ensaio do ponto de fulgor do ligante asfáltico desta pesquisa.

Outra característica analisada frente a adição de resíduo foi o ponto de amolecimento, onde pode-se constatar que o CAP utilizado nas misturas possui um valor de 48,15°C, porém quando adiciona-se o resíduo passante na #200 nota-se um significativo aumento da mesma conforme tabela 4.10. Este comportamento já era esperado pela alteração na rigidez da mistura na presença destes finos, porém em proporções elevadas.

Tabela 4.10 - Resultados do ensaio de ponto de amolecimento do CAP usado nesta pesquisa.

| <b>PONTO DE AMOLECIMENTO</b>                 |                |                |              |
|--|----------------|----------------|--------------|
| <b>Procedimento de Ensaio: DNIT 131/2010</b> |                |                |              |
| <b>Procedencia: PETROBRAS</b>                |                |                |              |
| <b>% de Resíduo</b>                          | <b>T1 (°C)</b> | <b>T1 (°C)</b> | <b>MÉDIA</b> |
| <b>0,00</b>                                  | 48,00          | 48,30          | 48,15        |
| <b>2,50</b>                                  | 48,60          | 48,80          | 48,70        |
| <b>5,00</b>                                  | 49,00          | 49,20          | 49,10        |
| <b>10,00</b>                                 | 50,40          | 50,80          | 50,60        |
| <b>20,00</b>                                 | 52,00          | 52,00          | 52,00        |
| <b>30,00</b>                                 | 52,40          | 52,80          | 52,60        |

Aplicando análise de variância nos resultados pode-se comprovar que existe diferença significativa entre os resultados de 2,5% à 20% de adição de resíduo, para um erro estatístico de 5%. Isto comprova que só nesta composição (20%) o resíduo causaria efeito no ponto de amolecimento. Os dados também apresentam um coeficiente de correlação positivo conforme dados tabulados graficamente segundo figura 4.12.

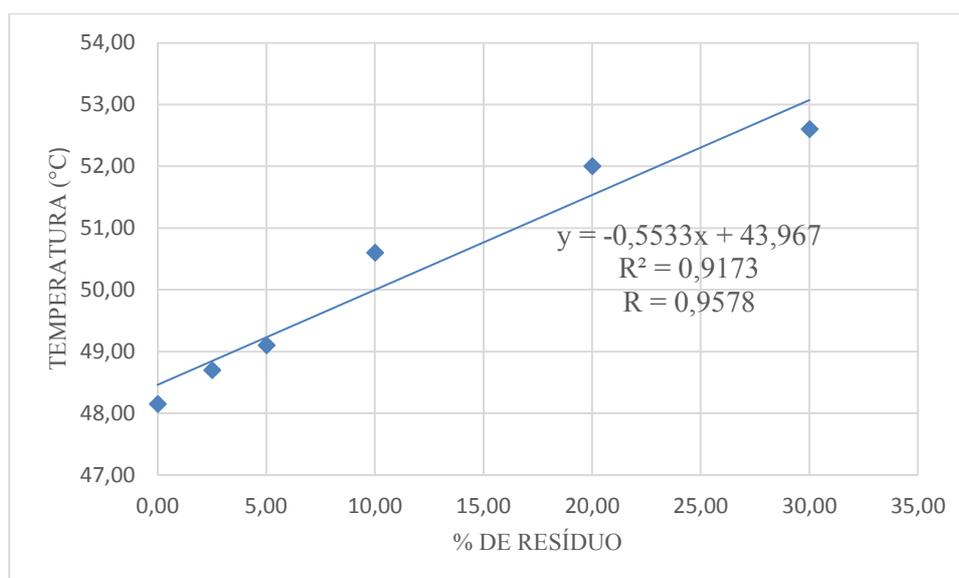


Figura 4.12- Resultados do ensaio do ponto de amolecimento do ligante asfáltico desta pesquisa.

O ensaio de penetração foi realizado segundo a norma 155/2010 do DNIT, adicionando-se parcelas de resíduo até a proporção de 30% em massa. Esta adição reduziu a penetração em todos os teores de maneira significativa segundo o teste de análise de variância com um erro de 5%, com exceção entre as misturas de 10% e 20%, conforme tabela 4.11 a seguir.

Tabela 4.11 - Resultados do ensaio de penetração do CAP usado nesta pesquisa.

| <b>PENETRAÇÃO</b>                            |                     |                     |                     |              |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|--------------|
| <b>Procedimento de Ensaio: DNIT 155/2010</b> |                     |                     |                     |              |
| <b>Procedencia: PETROBRAS</b>                |                     |                     |                     |              |
| <b>% de Resíduo</b>                          | <b>Penetração 1</b> | <b>Penetração 2</b> | <b>Penetração 3</b> | <b>Média</b> |
| <b>0,00</b>                                  | 52                  | 51                  | 53                  | 52,00        |
| <b>10,00</b>                                 | 34                  | 36                  | 36                  | 35,33        |
| <b>20,00</b>                                 | 34                  | 33                  | 35                  | 34,00        |
| <b>30,00</b>                                 | 28                  | 27                  | 28                  | 27,67        |

Pode-se perceber a relação linear da perda de penetração com a adição do resíduo, caracterizando um aumento de sua rigidez, como expresso no gráfico 4.13.

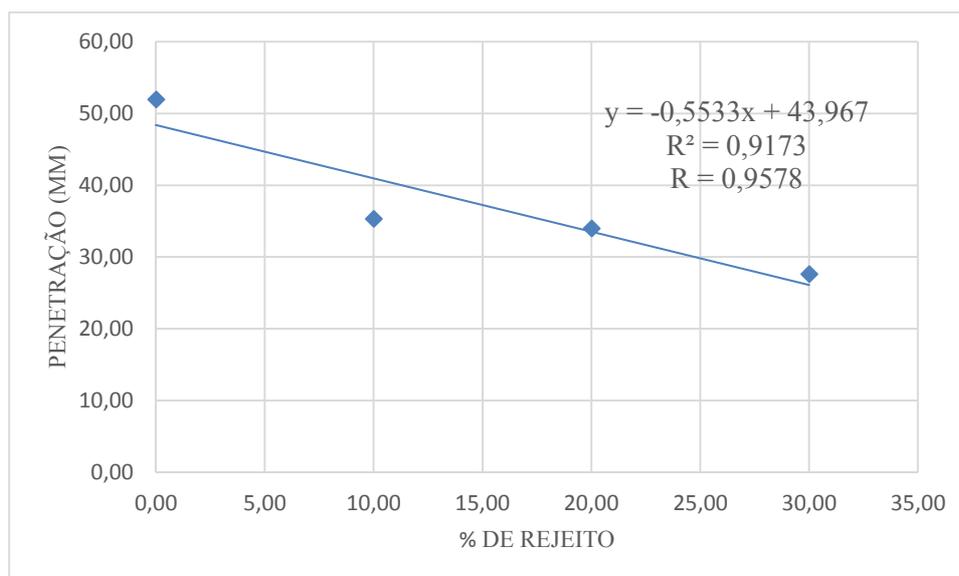


Figura 4.13 - Resultados do ensaio de penetração do ligante asfáltico desta pesquisa.

Corroborando com o ensaio de penetração, o ensaio de elasticidade demonstrou que a adição de rejeito fez com que a elasticidade caísse de maneira significativa, conforme figura 4.14.

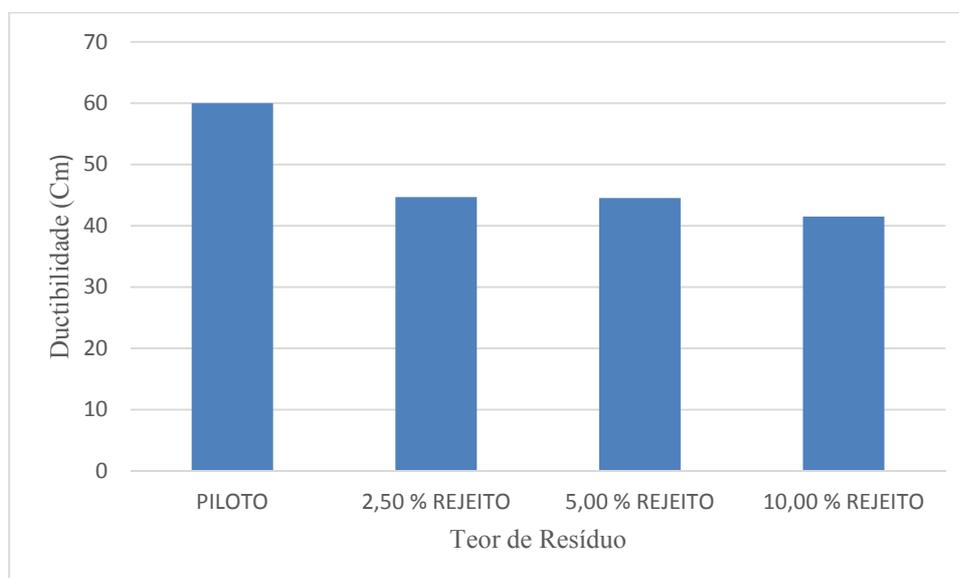


Figura 4.14 - Resultados do ensaio de ductibilidade do ligante asfáltico desta pesquisa.

#### 4.5. DOSAGEM DO CONCRETO ASFÁLTICO USINADO À QUENTE

Após caracterização dos materiais constituintes desta pesquisa, foi iniciada a dosagem dos corpos de prova com base na metodologia Marshall. Primeiramente foi

escolhida a curva granulométrica “C” da norma DNIT-ES 031/2010 referente a camada de rolamento de pavimentos asfálticos.

A partir da curva estabelecida, foi-se encaixando os teores de areia e seixo até se chegar as proporções de 75% de seixo e 25% de areia, chamada esta de dosagem piloto, com a qual as demais serão comparadas. Posteriormente foi-se substituindo a areia por resíduo nas proporções de 10%, 20% e 25% (toda a areia substituída por resíduo), conforme mostrado anexo 2.

Determinadas as proporções de agregados e resíduo procedeu-se a confecção de 15 corpos de prova para cada uma das 4 composições acima listadas, perfazendo um total de 60 corpos de prova nos quais foram obtidas as grandezas Marshall, apresentados no anexo 3. Os corpos de prova foram numerados e apresentados como exemplo na figura 4.15.



Figura 4.15 - Alguns dos corpos de prova confeccionados durante a dosagem.

Após todos os parâmetros Marshall calculados, foi estabelecido o teor de vazios de 4% como parâmetro inicial para a definição do teor de CAP de referencia, sendo este valor obtido através das equações de regressão de cada mistura, com e sem resíduo. Com base no exposto, foi elaborada a tabela 4.12 com o resumo dos teores de CAP para cada mistura.

Tabela 4.12 - Teor de projeto de CAP para cada teor de resíduo.

| Teor de Resíduo (%) | Teor Ótimo de CAP(%) |
|---------------------|----------------------|
| 0                   | 6,12                 |
| 10                  | 5,80                 |
| 20                  | 6,57                 |
| 25                  | 6,98                 |

Como pode-se notar houve uma redução do teor de CAP na ordem de 5,23% na passagem da dosagem piloto para 10% de resíduo, justificada pelo poder de filer apresentado na caracterização do material. A medida que se aumentou o teor de resíduo, houve a necessidade de aumento do teor de CAP pela maior superfície específica dos finos presentes.

Com os dados da tabela 4.12, foi então elaborado o gráfico da figura 4.16 com o objetivo de se determinar os teores ótimos de CAP e resíduo, levando em consideração que até aqui estrar somente se considerando a relação CAP x Resíduo, e não outras características. A forma do gráfico, uma parábola positiva, reflete o destacado anteriormente, onde o efeito dos finos do resíduo agem positivamente (com relação a economia de CAP) até o teor de 7,73% mais precisamente, a um teor de CAP mínimo de 5,65%. A partir deste valor há a necessidade de um maior teor de CAP para manter os 4% de vazios com teor de resíduo crescente.

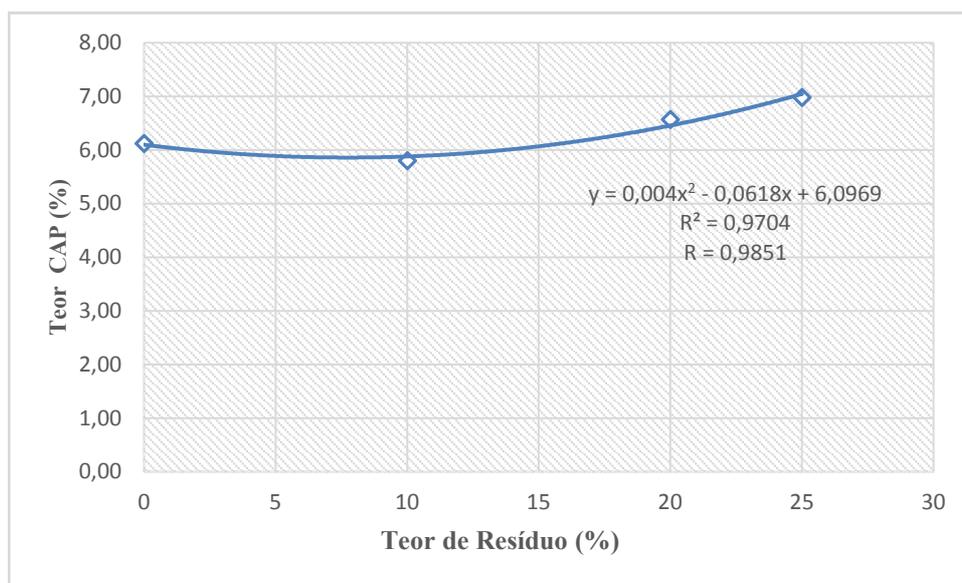
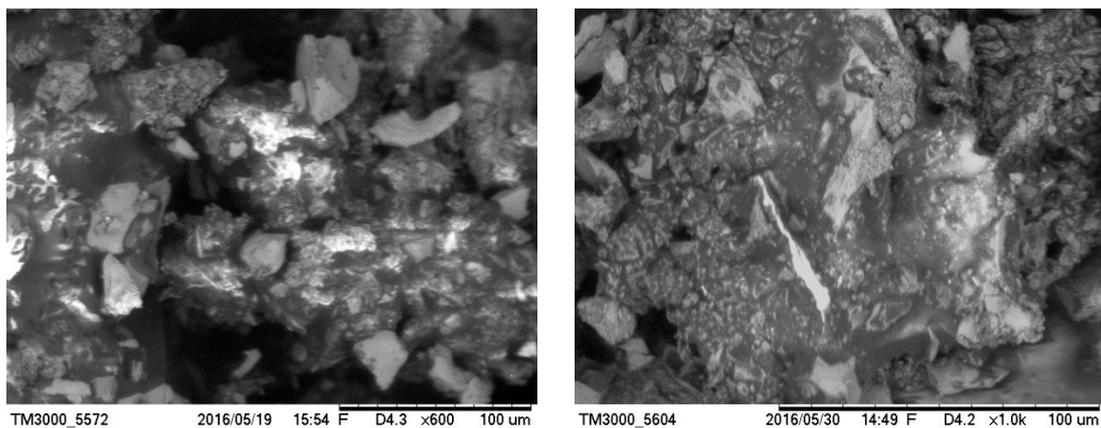


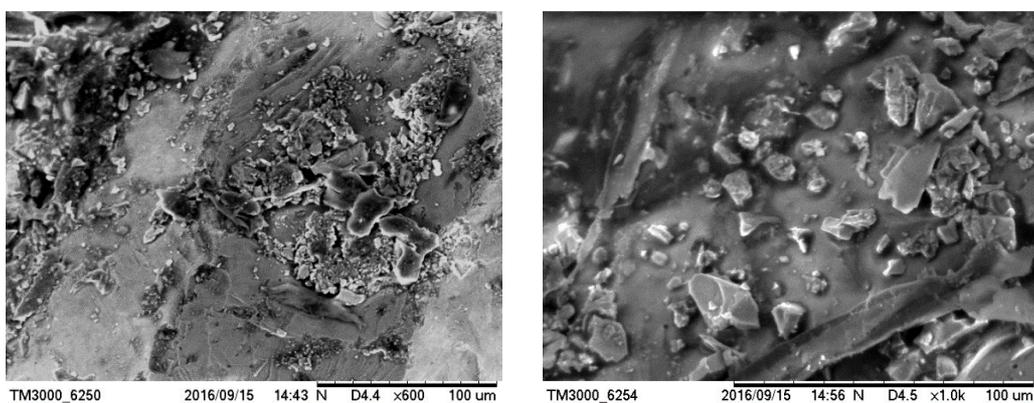
Figura 4.16 - Teor de projeto de CAP e resíduo.

#### 4.6 MEV E EDS DAS DOSAGENS EM ESTUDO

Definida as dosagens, as amostras foram submetidas a análise microscópica no equipamento MEV 3000 da HITACHI, sendo este equipado com detector EDS *swift* ED3000 x-ray, produzindo as seguintes imagens mostradas nas figuras 4.17 e 4.18.



(a) (b)  
 Figura 4.17 - MEV dosagem piloto: (a) x 600; (b) x 1000.



(a) (b)  
 Figura 4.18 - MEV dosagem 25% de resíduo: (a) x 600; (b) x 1000.

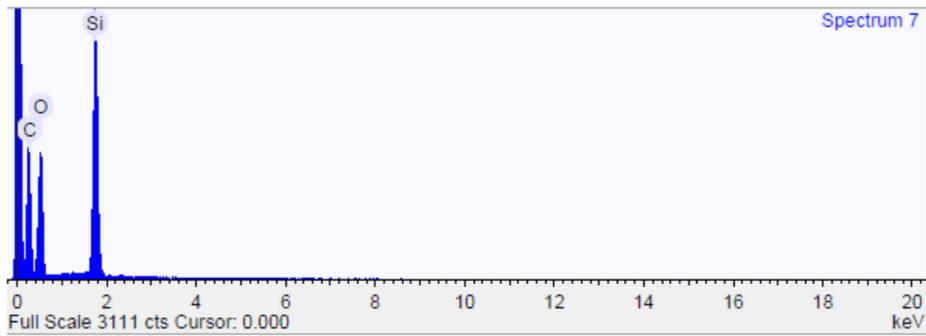
Pode-se observar a presença do resíduo na microestrutura da mistura, envolvendo o agregado graúdo, fato este que pode influenciar diversas propriedades mecânicas e reológicas, como destacado por Craus, *et al.* 1978; Motta e Leite, 2000; Bardine *et al.*, 2012.

Quanto a presença química provocada pela adição do resíduo, pode-se notar o crescente aumento de concentração de metais como: ferro, alumínio, titânio descritas nas análises de EDS mostradas nas figuras 4.19 e 4.20.

**Acquisition conditions**

Acquisition time (s) : 100.0  
 Accelerating voltage (kV) : 20.0

Process time :

**Quantification Settings**

Quantification method : All elements (normalised)

Coating element :

**Summary results**

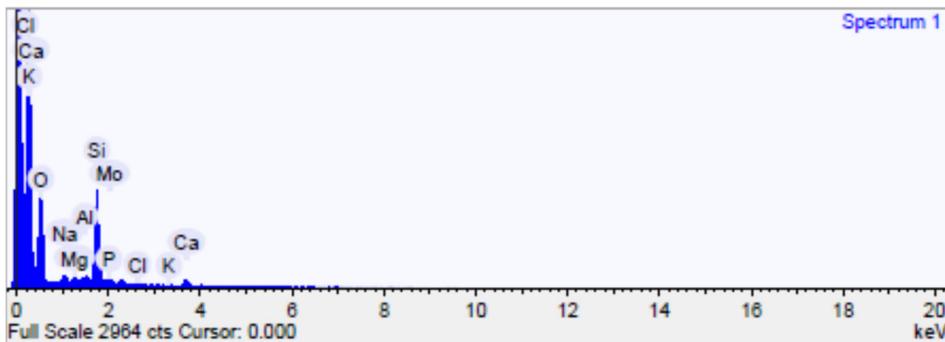
| Element | Weight % | Weight % $\sigma$ | Atomic % |
|---------|----------|-------------------|----------|
| Carbon  | 47.011   | 0.571             | 56.234   |
| Oxygen  | 43.107   | 0.555             | 38.711   |
| Silicon | 9.881    | 0.139             | 5.055    |

Figura 4.19- EDS dosagem piloto.

**Acquisition conditions**

Acquisition time (s) : 100.0  
 Accelerating voltage (kV) : 20.0

Process time :

**Quantification Settings**

Quantification method : All elements (normalised)

Coating element :

**Summary results**

| Element    | Weight % | Weight % $\sigma$ | Atomic % |
|------------|----------|-------------------|----------|
| Oxygen     | 68.801   | 0.720             | 80.522   |
| Sodium     | 2.574    | 0.343             | 2.097    |
| Magnesium  | 0.957    | 0.218             | 0.737    |
| Aluminum   | 1.421    | 0.182             | 0.986    |
| Silicon    | 19.136   | 0.426             | 12.758   |
| Phosphorus | 1.911    | 0.208             | 1.155    |
| Chlorine   | 0.629    | 0.134             | 0.332    |
| Potassium  | 0.403    | 0.105             | 0.193    |
| Calcium    | 1.495    | 0.126             | 0.698    |
| Molybdenum | 2.674    | 0.426             | 0.522    |

Figura 4.20 - EDS dosagem 25% de residuo.

#### 4.7. ESTABILIDADE FRENTE A VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

Após definido as misturas de referencia, foram dosados 3 corpos de prova para cada teor, perfazendo 12 corpos de prova e levados a medir a estabilidade. Pode-se comprovar o aumento progressivo da estabilidade com a adição de resíduo na mistura de referencia, com coeficiente de correlação acima de 0,97 o que garante uma correlação forte entre os dados, conforme figura 4.21 abaixo.

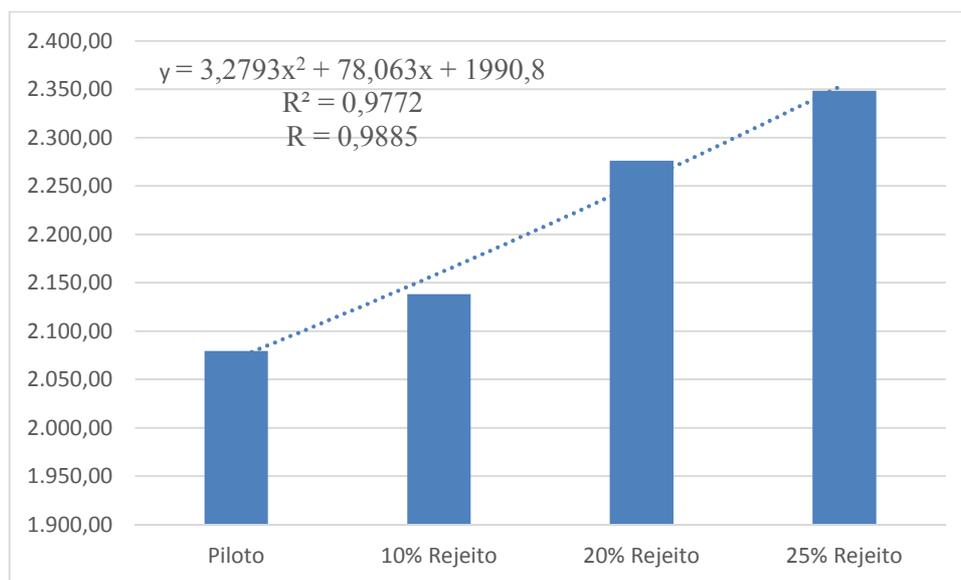


Figura 4.21 - Estabilidade na dosagem ótima a 30°C.

Foram dosados novos corpos de prova para cada teor de resíduo, e submetidos estes a uma temperatura de 60°C em banho térmico, e medida sua estabilidade, conforme figura 4.22, notando-se uma redução no valor da estabilidade, porém prevalecendo os valores com adição de resíduo, mas permanecendo acima dos 500 Kgf preconizado nas normas do DNIT.

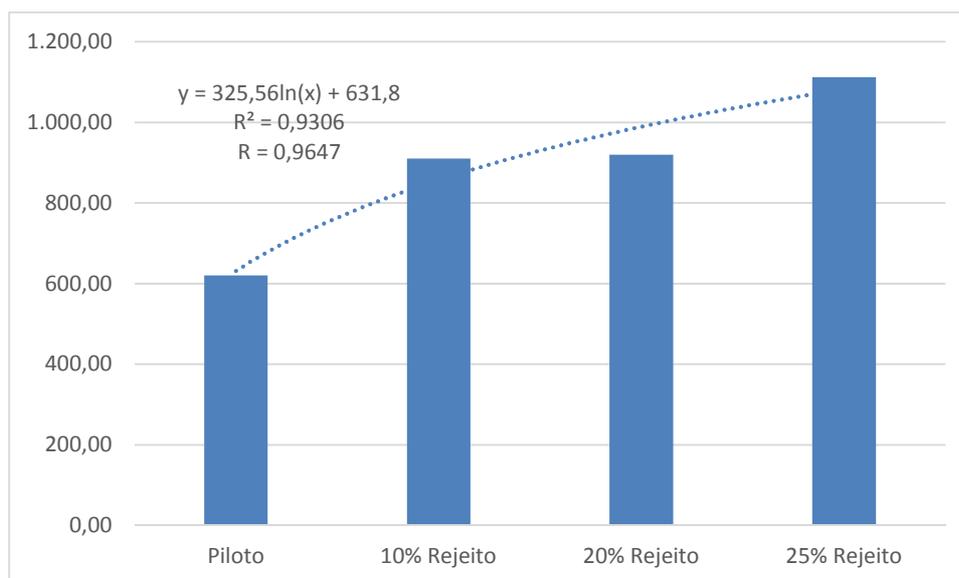


Figura 4.22 - Estabilidade na dosagem ótima a 60°C.

A figura 4.23 mostra que a presença de resíduo reduz o efeito da perda de estabilidade quando eleva-se a temperatura de 30°C para 60°C. Na dosagem piloto a perda de estabilidade foi em torno de 70%, já quando se adiciona-se 10% e 20% de resíduo a redução da estabilidade ficou na ordem de 60%, já quando a adição foi de 25% a redução ficou na casa dos 50%. O gráfico representa ainda o caráter exponencial deste efeito. Credita-se este desempenho pela matriz mais uniforme produzida pela presença do resíduo.

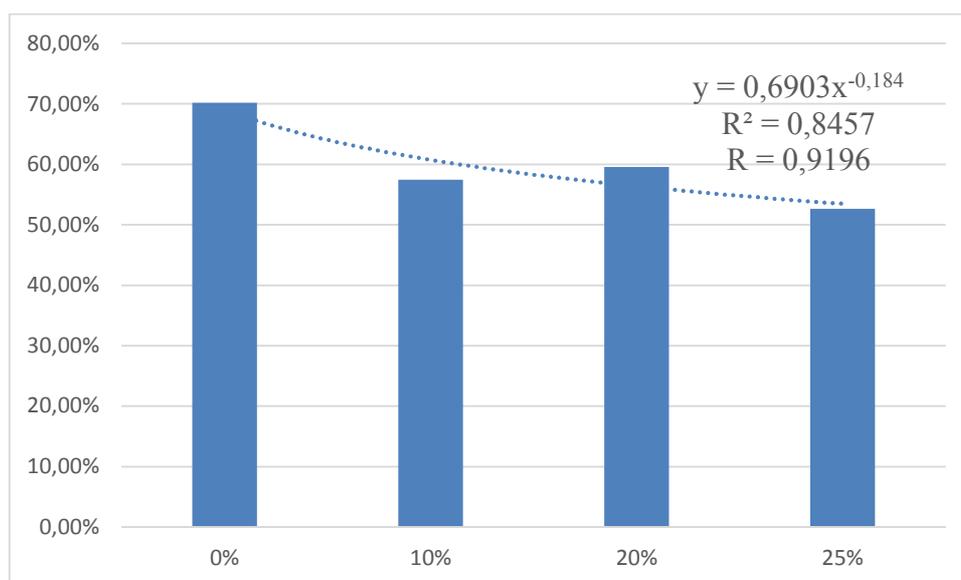


Figura 4.23 - Redução da estabilidade frente a variação de temperatura de 30°C para 60°C.

#### 4.8. RESISTENCIA À TRAÇÃO

Após definidas as dosagens de cada teor de resíduo foram moldados 16 corpos de prova (em quadruplicata a cada teor), e submetidos esforço de tração por compressão diametral, de acordo com o especificado no método do DNIT. A ruptura ocorre seccionando os corpos de prova ao meio conforme figura 4.24.



Figura 4.24 - Exemplo da ruptura dos corpos de prova a tração por compressão diametral.

A tabela 4.13 representa as resistências a tração, mostrando que atinge-se a mesma ordem de grandeza nos valores de resistência a tração para cada valor de acréscimo de rejeito.

Tabela 4.13 - Resultados do ensaio de resistencia à tração.

| <b>% de Resíduo</b> | <b>Resist. à Tração (Mpa)</b> | <b>Média</b> | <b>Desvio Padrão</b> |
|---------------------|-------------------------------|--------------|----------------------|
| 0                   | 0,90                          | 0,94         | 0,03                 |
|                     | 0,93                          |              |                      |
|                     | 0,96                          |              |                      |
|                     | 0,98                          |              |                      |
| 10                  | 0,74                          | 0,87         | 0,11                 |
|                     | 0,82                          |              |                      |
|                     | 0,93                          |              |                      |
|                     | 0,98                          |              |                      |
| 20                  | 0,87                          | 0,88         | 0,04                 |
|                     | 0,94                          |              |                      |
|                     | 0,86                          |              |                      |
|                     | 0,85                          |              |                      |
| 25                  | 0,83                          | 0,83         | 0,01                 |
|                     | 0,83                          |              |                      |
|                     | -                             |              |                      |
|                     | 0,82                          |              |                      |

No gráfico representado pela figura 4.25, demonstra-se a excelente correlação entre os dados, além do caráter logarítmico do desempenho desta propriedade. O teste de ANOVA demonstrou que os resultados são estatisticamente iguais para um erro de 5%, ou seja, a presença de resíduo não gerou uma diferença significativa nos valores de resistência a tração.

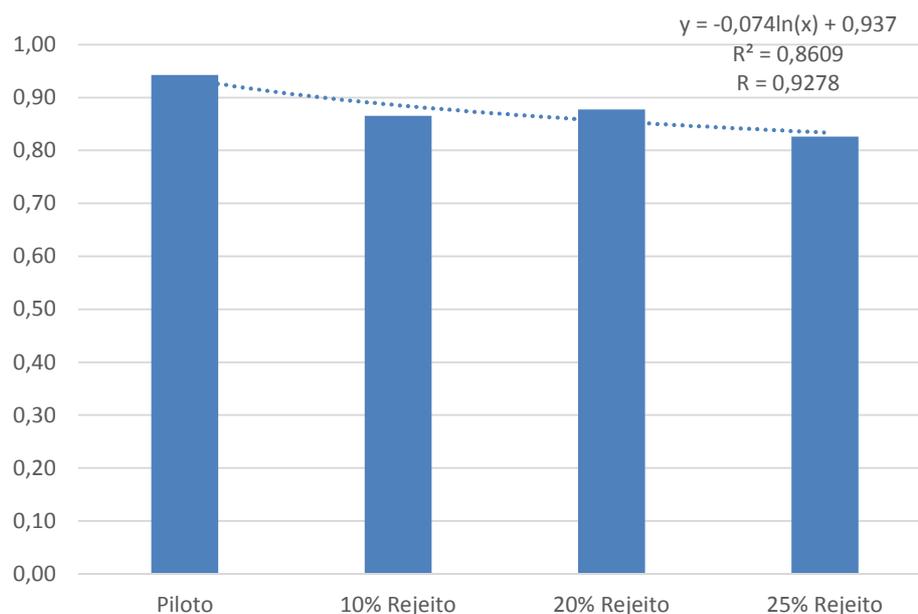


Figura 4.25 – Resultados da resistência à tração por compressão diametral.

#### 4.9 RESISTENCIA À TRAÇÃO FRENTE A VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

Realizado os ensaios de resistência a tração (a 25° C), o próximo passo foi submeter os corpos de prova em triplicata a diferentes temperaturas (50° C e 70° C), por duas horas em estufa e rompidos a tração. Imediatamente após suas rupturas foi medida a temperatura interna dos corpos de prova, registrando-se uma média de 49,2° C e 68,9° C para as duas amostras. As médias das RT estão mostradas nas figuras 4.26 e 4.27 respectivamente.

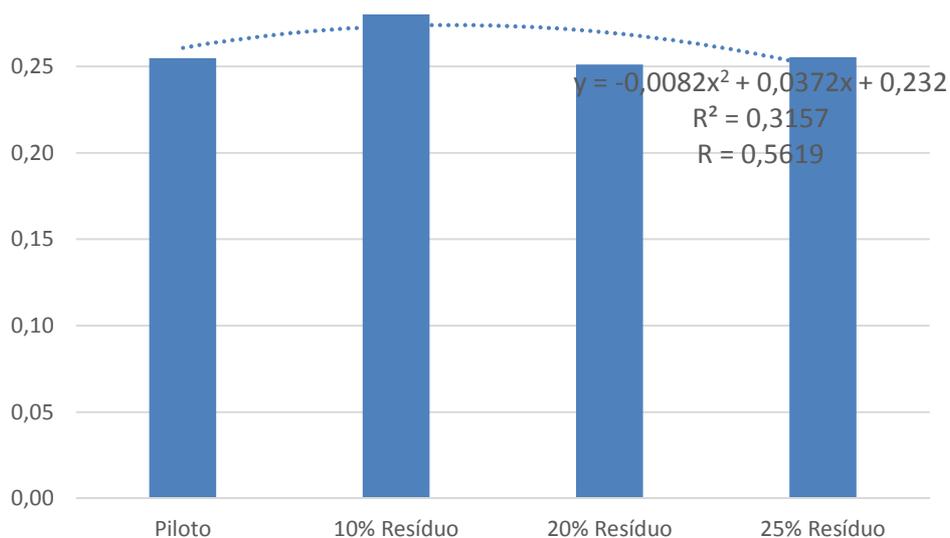


Figura 4.26 – Resultados da resistência à tração a 50°C.

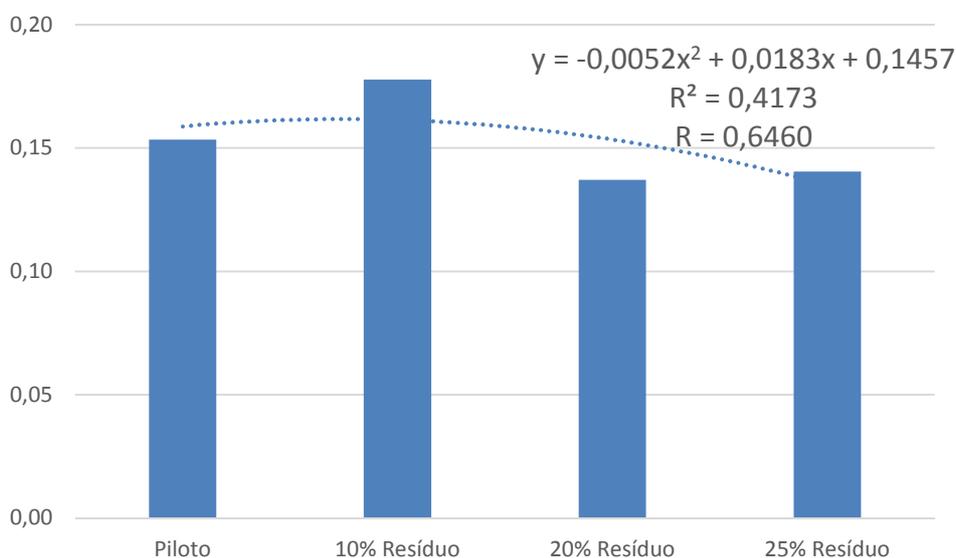


Figura 4.27 - Resultados da resistência à tração a 70°C.

Pode-se observar uma tendência quadrática no comportamento em questão, fato este explicando o inicial aumento da resistência a tração quando da adição de 10% de resíduo, gerando uma melhor estrutura no “esqueleto” das misturas. Com o aumento do teor de resíduo, houve um aumento significativo no teor de CAP, o que acabou influenciando as propriedades da mistura, causando o “escorregamento” entre os elementos constituintes.

Comparando as perdas de resistências a tração em relação a temperatura padrão do ensaio (25° C), pode-se constatar uma perda relativa menor para o teor de 10% de resíduo, tanto a temperatura de 50°C, da ordem de 67,93%, quanto a temperatura de 70°C, da ordem de 80,47%, frente a uma perda de até 72,60% para 50°C e 84,59% para 70°C.

Fato estes também explicável pela presença inicial do resíduo, que torna o “esqueleto” da mistura mais estável, porém quando esta adição extrapola este limite, há um aumento do teor de CAP provocando um “escorregamento” dos constituintes da mistura. Estes dados são demonstrados na tabela e gráfico da figura 4.28.

Tabela 4.14 - Comparação das perdas de resistência em relação a temperatura de 25° C.

| <b>Amostras</b> | <b>50° C</b> | <b>70° C</b> |
|-----------------|--------------|--------------|
| Piloto          | 72,60%       | 83,51%       |
| 10% Resíduo     | 67,93%       | 80,47%       |
| 20% Resíduo     | 71,77%       | 84,59%       |
| 25% Resíduo     | 69,23%       | 83,07%       |

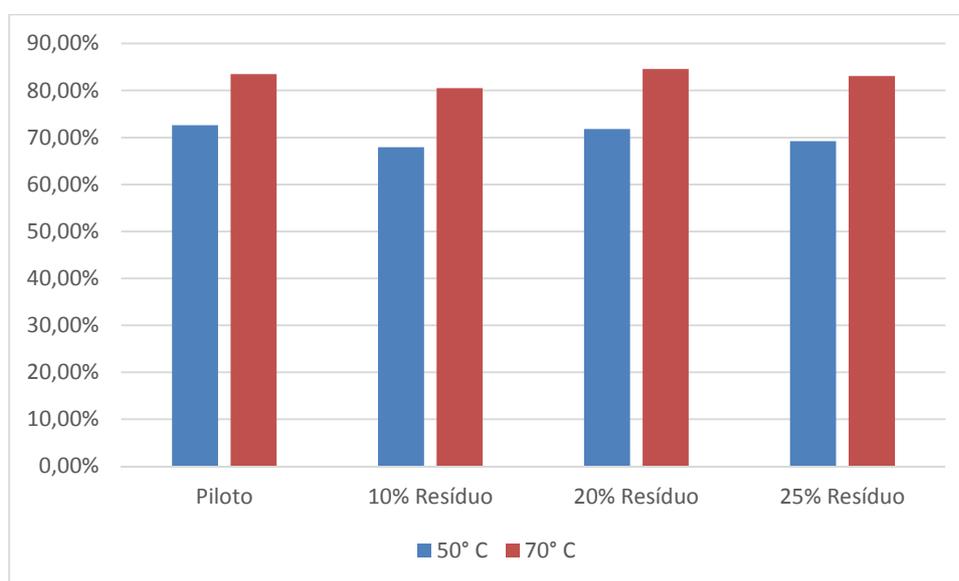


Figura 4.28 - Comparação das perdas de resistência em relação a temperatura de 25° C.

Analisando as resistências dentro de cada grupo de variação de temperatura, pode-se notar o comportamento potencial com expoente negativo das misturas, ressaltando novamente o comportamento melhorado pela adição de 10% de resíduo.

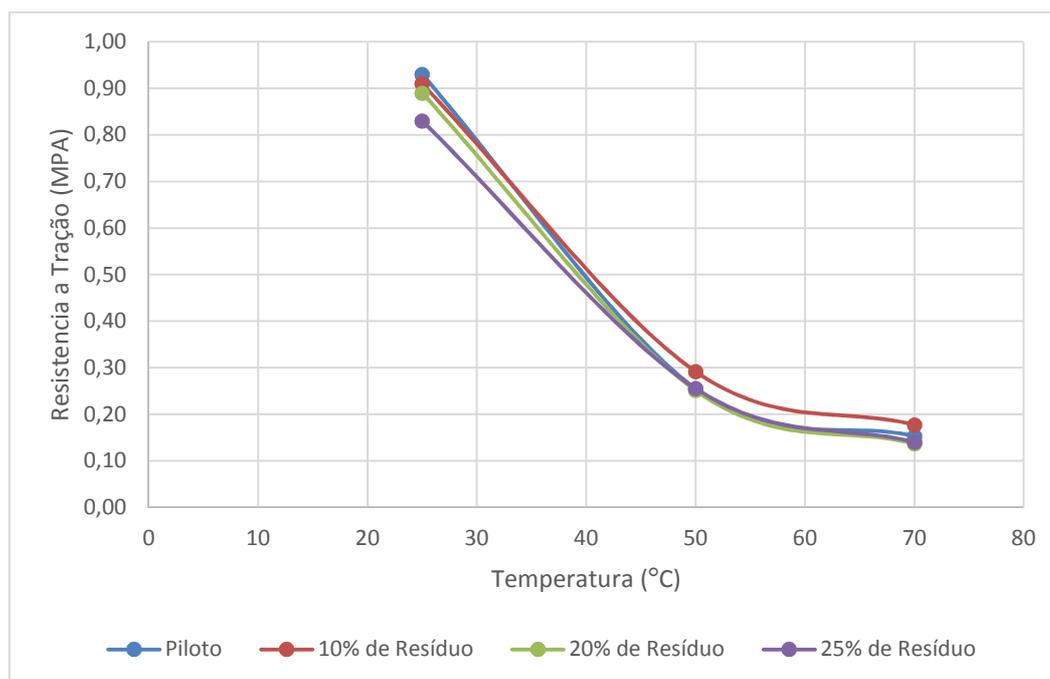


Figura 4.29 - Variação da resistência a tração frente a temperatura dentro de cada dosagem.

Os parâmetros matemáticos do fenômeno acima relatado estão dispostos na tabela 4.15, onde novamente relata-se o comportamento melhor para a adição de 10% de resíduo, onde potencial de perda de resistência ligeiramente reduzido em relação as demais dosagens ensaiadas (menor expoente). Cabe ressaltar os altos coeficientes de correlação e regressão do ensaio.

Tabela 4.15 – Parâmetros matemáticos das amostras frente a temperatura dentro de cada grupo de dosagem.

| Dosagem        | Equação                          | $r^2$  | $r$    |
|----------------|----------------------------------|--------|--------|
| Piloto         | $y = 0,8881 \frac{1}{X^{1,670}}$ | 0,9863 | 0,9931 |
| 10% de Resíduo | $y = 0,8869 \frac{1}{X^{1,503}}$ | 0,9947 | 0,9973 |
| 20% de Resíduo | $y = 0,8826 \frac{1}{X^{1,708}}$ | 0,9996 | 0,9998 |
| 25% de Resíduo | $y = 0,8358 \frac{1}{X^{1,612}}$ | 0,9997 | 0,9998 |

#### 4.10 RESISTENCIA À TRAÇÃO FRENTE A EXPOSIÇÃO AO TEMPO

Nesta etapa foram confeccionados mais 12 corpos de prova, e submetidos a exposição ao tempo por 3 meses, sendo rompidos e comparados com os resultados da tração convencional.

Na figura 4.30 pode-se notar a tendência de comportamento quadrático da resistência a tração após exposição ao tempo (comportamento este notado em várias propriedades neste estudo), fato este proporcionado pela ação mais estável que o resíduo gera a massa até a dosagem próximo a 10%. Após esta dosagem o efeito dos maiores teores de CAP são sentidos frente a presença do resíduo.

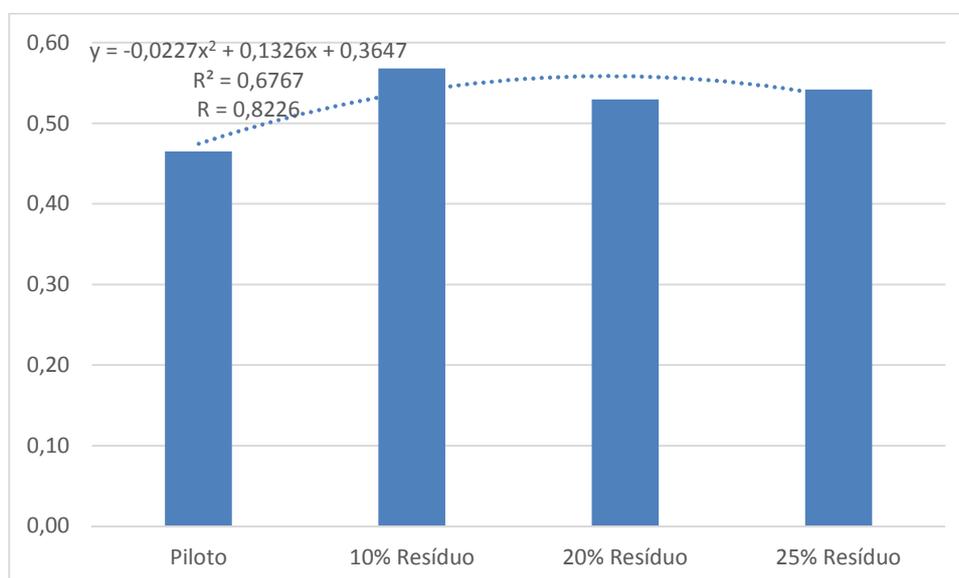


Figura 4.30 - Variação da resistência a tração frente a exposição ao tempo.

Quando posicionado os valores antes e após a exposição ao tempo, pode-se notar a marcante perda de resistência a tração por este efeito, este fato pode ser apontado como a ação do resíduo no envelhecimento do CAP, como apresentado por Cravo (2016).

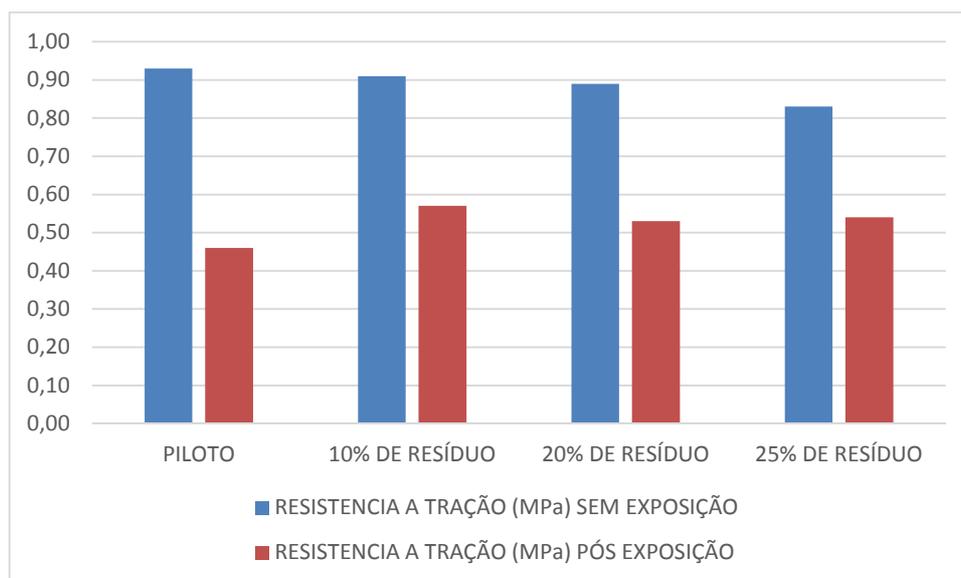


Figura 4.31 - Comparação da variação da resistência a tração antes e após a exposição ao tempo.

Na análise a seguir registra-se uma perda mais acentuada na dosagem piloto, na ordem de 50%, do que nas demais proporções. A presença de resíduo pode ser apontada como a responsável por uma massa mais estável, proporcionando perdas na ordem de 40% da resistência a tração.

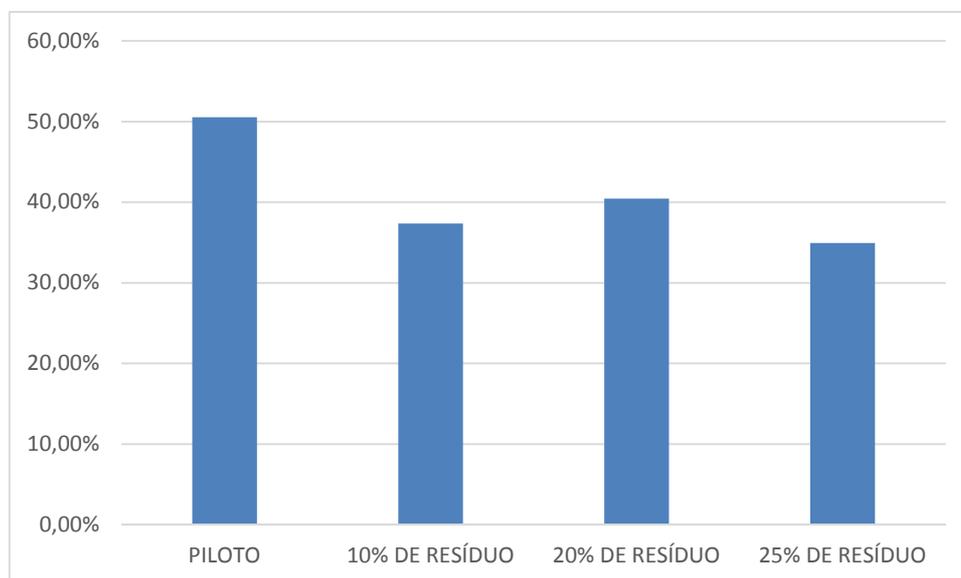


Figura 4.32 - Porcentagem da perda da resistência a tração após a exposição ao tempo.

#### 4.11 ENSAIO CANTABRO

Após determinada a dosagem de referencia de cada teor de resíduo, foram confeccionados 3 corpos de prova de cada teor, perfazendo um total de mais 12 corpos de prova, sendo estes submetidos ao ensaio de abrasão.

Conforme a tabela 4.16, observa-se uma significativa redução da perda por abrasão em relação a dosagem piloto, realizado o teste de análise de variância, foi apontado que existe diferença significativa entre as amostras, para um erro estatístico de 5%. Realizado o teste de *Turkey* foi constatado que a diferença ocorre entre as dosagens piloto em relação as dosagens de 20% e 25%, para um erro estatístico e 5%.

Tabela 4.16 - Resultados do ensaio Cantabro.

| <b>Dosagem</b> | <b>Massa Antes</b> | <b>Massa Depois</b> | <b>Abrasão</b> | <b>Média</b> | <b>Desvio Padrão</b> |
|----------------|--------------------|---------------------|----------------|--------------|----------------------|
| Piloto         | 1.124,19           | 1.068,11            | 4,99%          | 4,95%        | 0,94%                |
|                | 1.140,80           | 1.073,85            | 5,87%          |              |                      |
|                | 1.209,93           | 1.161,55            | 4,00%          |              |                      |
| 10% Resíduo    | 1.136,05           | 1.103,72            | 2,85%          | 3,36%        | 0,47%                |
|                | 1.127,36           | 1.084,99            | 3,76%          |              |                      |
|                | 1.150,95           | 1.111,08            | 3,46%          |              |                      |
| 20% Resíduo    | 1.123,39           | 1.089,70            | 3,00%          | 2,59%        | 0,36%                |
|                | 1.134,05           | 1.107,87            | 2,31%          |              |                      |
|                | 1.114,88           | 1.087,47            | 2,46%          |              |                      |
| 25% Resíduo    | 1.166,56           | 1.145,62            | 1,80%          | 1,90%        | 0,74%                |
|                | 1.160,47           | 1.129,27            | 2,69%          |              |                      |
|                | 1.159,92           | 1.145,80            | 1,22%          |              |                      |

Pode-se verificar segundo a tabela 4.17 que a redução com a adição de resíduo chega a 61% fato este pela melhor compactação da massa.

Tabela 4.17 - Redução da perda por abrasão em relação a dosagem piloto.

| <b>Dosagem</b> | <b>% Redução da Perda por Abrasão em Relação a Dosagem Piloto</b> |
|----------------|---|
| 10%            | 32,23%  |
| 20%            | 47,72%  |
| 25%            | 61,62%  |

A figura 4.30 demonstra a excelente correlação entre os dados, acima de 0,99, além do caráter logarítmico do comportamento, o que comprova o comportamento decrescente da propriedade. Todos os valores são bem baixos de perda abrasão.

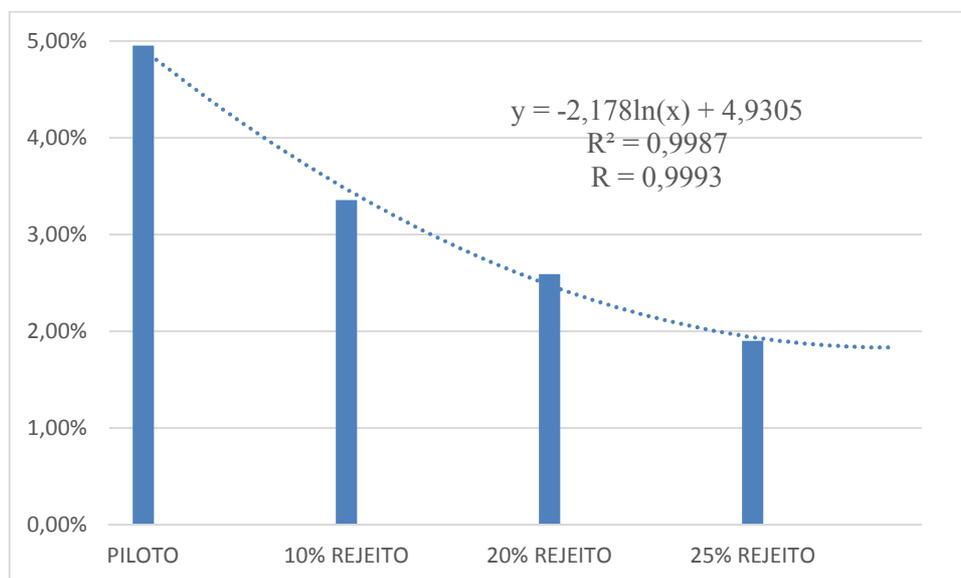


Figura 4.33 - Resultados do ensaio Cantabro.

## 4.12 MÓDULO DE RESILIENCIA

O ensaio para determinação do módulo de resiliência (MR) foi realizado nas dependências do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, em corpos de prova na dosagem de referencia para os teores piloto (sem resíduo), com 10% de resíduo, com 20% de resíduo e com 25% de resíduo em substituição ao agregado miúdo.

Quanto ao procedimento de ensaio foi utilizada a menor carga que provocasse um deslocamento possível de leitura pelo equipamento, sendo realizadas 3 medidas carga x deformação para cada corpo de prova ensaiado, e automaticamente calculado o módulo em MPa.

Como pode ser notado na figura 4.31, que representa a média de cada 3 valores, há uma tendência de aumento de rigidez com a substituição de areia pelo resíduo da mineração do cobre, com um aumento de 11% para a adição de 10% de resíduo, 12% para 20% de resíduo e 6% para adição de 25% em relação a dosagem piloto. Os dados se apresentaram dentro da margem preconizada por Bernucci *et al.*(2008), entre 2.000 e 8.000 MPa.

Porém quando se analisa estatisticamente, a análise de variância (ANOVA) aponta que não há uma diferença significativa entre os resultados de módulo, para um

nível de significância de 95%. Pode-se considerar que estatisticamente a adição do resíduo não alterou os valores de módulo das misturas.

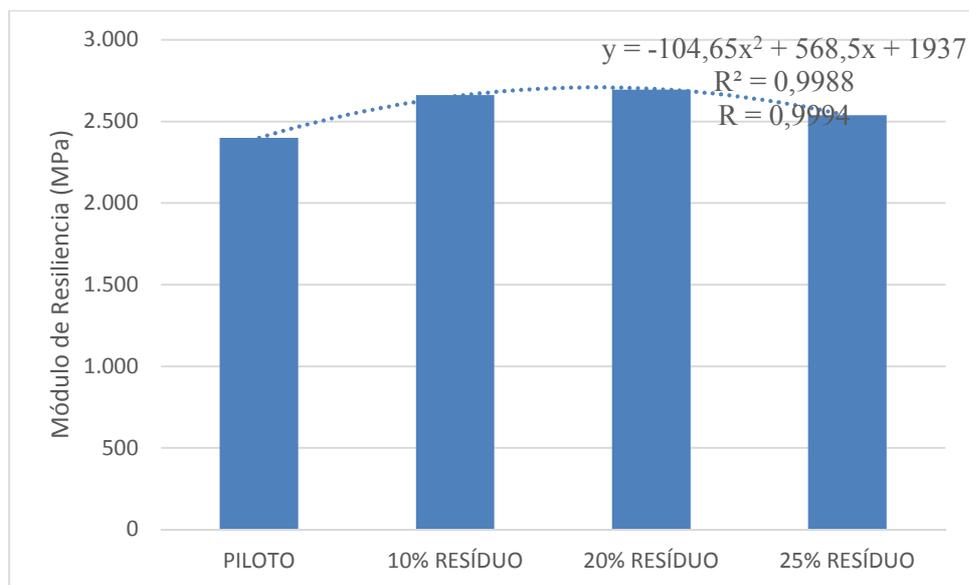


Figura 4.34 - Resultados do ensaio de módulo de resiliência desta pesquisa.

#### 4.13 RELAÇÃO MR/RT

Esta relação serve como uma comparação entre a rigidez e a resistência a tração, no que diz respeito ao comportamento a fadiga, pois misturas muito rígidas necessitam elevados valores de resistência a tração, devido a esforços desenvolvidos internamente (MORILHA, 2004).

O parâmetro MR/RT, para alguns autores, reflete uma maior vida a fadiga pela compatibilidade entre a rigidez e resistência a tração, onde maiores valores desta relação se dão em misturas mais rígidas (maior MR). Porém esta relação na verdade foi desenvolvida como alternativa de estimativa preliminar, para centros de pesquisa que não possuem o equipamento de aquisição das grandezas de módulo de resiliência (Lopes *et. al*, 2008).

Santos (2005) aponta para valores na ordem de 3.000 para um bom comportamento estrutural.

A figura 4.32 mostra misturas na ordem entre 2.500 e 3.000, ou seja, um aumento em torno de aproximadamente 20% para as misturas com 10, 20% e 25% de resíduo em relação ao traço piloto, fato este influenciado pela maior rigidez proporcionada pela presença do resíduo.

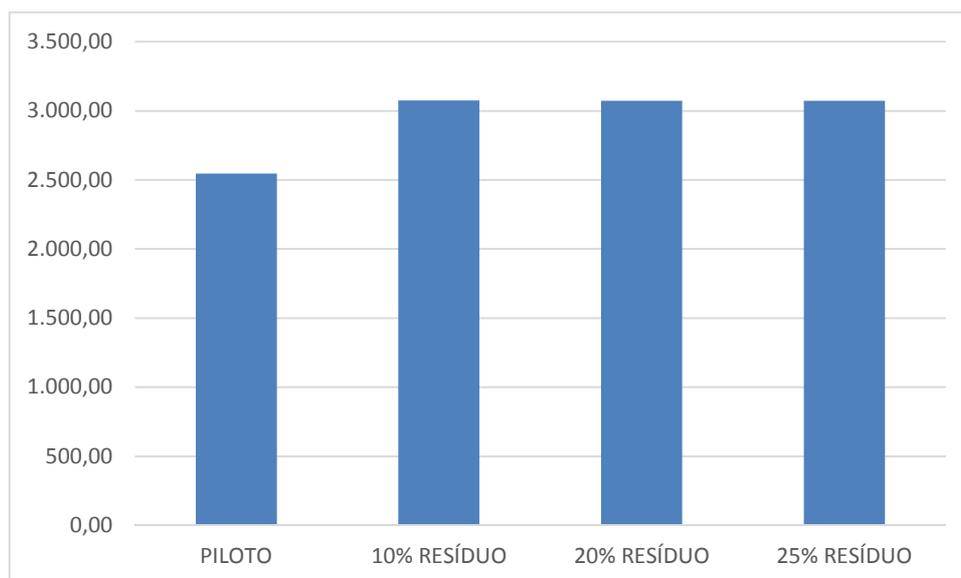


Figura 4.35 - Relação MR/RT.

#### 4.14 FADIGA A TENSÃO CONTROLADA

O ensaio de fadiga foi determinado a tensão de tração por compressão diametral controlada, sendo definido como critério de finalização do ensaio a ruptura dos corpos de prova. O modelo de vida a fadiga será representado pela diferença de tensões (tração e compressão) e número de ciclos até a ruptura dos corpos de prova. A figura 4.36 demonstra uma amostra de corpos de provas submetidos ao ensaio de fadiga, podendo-se notar que a ruptura se dá por tração, seccionando os corpos de prova ao meio.



Figura 4.36 - Alguns corpos de prova submetidos ao ensaio de fadiga.

As figuras 4.37, 4.38, 4.39 e 4.40 apresentam as curvas de fadiga nas dosagens do estudo, assim como os coeficientes de determinação e de correlação dos ajustes das equações de regressão.

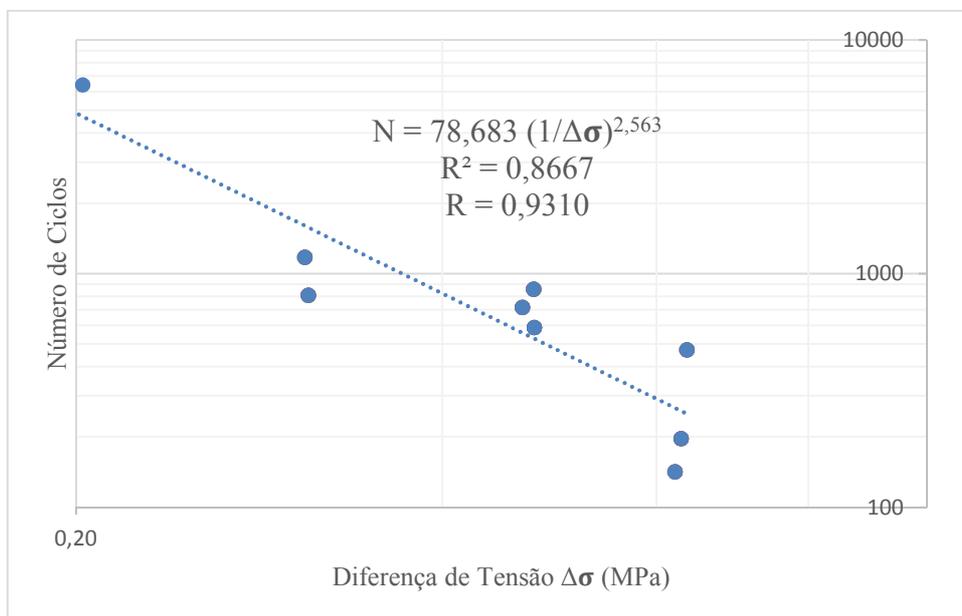


Figura 4.37 - Curva de fadiga em função de  $\Delta\sigma$  para a dosagem piloto desta pesquisa.

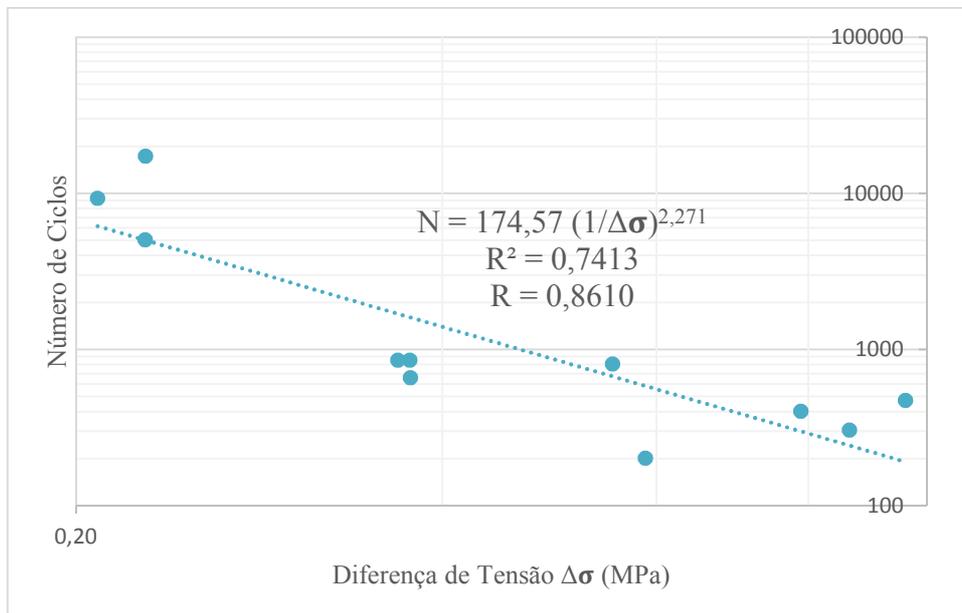


Figura 4.38 - Curva de fadiga de  $\Delta\sigma$  para a dosagem de 10% de resíduo desta pesquisa.

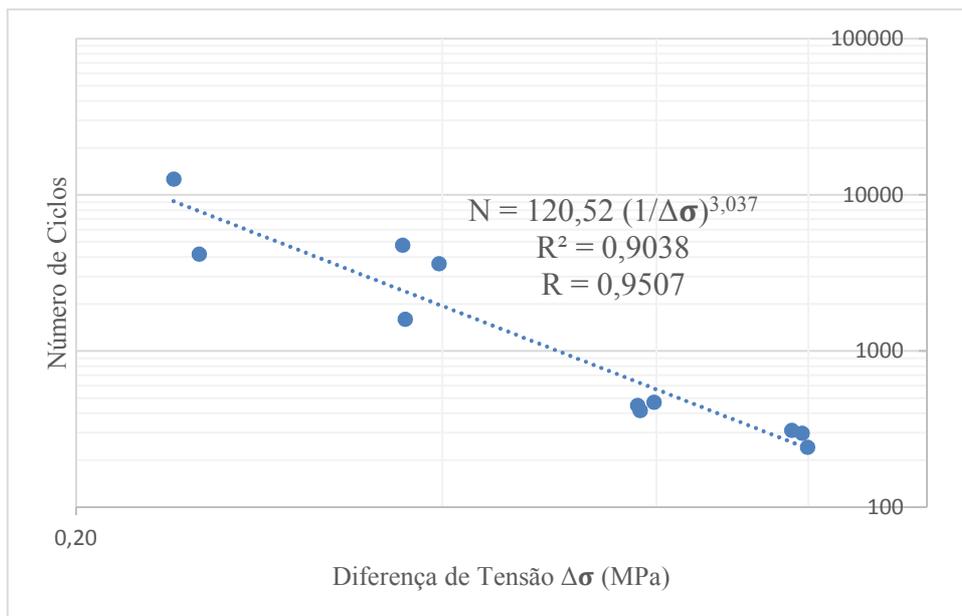


Figura 4.39 - Curva de fadiga de  $\Delta\sigma$  para a dosagem de 20% de resíduo desta pesquisa.

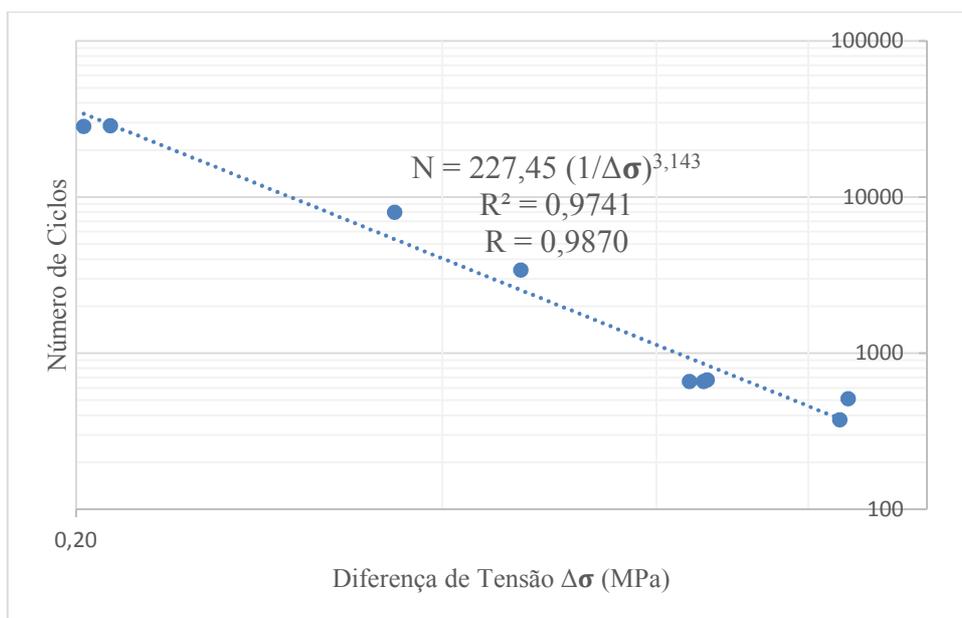


Figura 4.40 - Curva de fadiga de  $\Delta\sigma$  para a dosagem de 25% de resíduo desta pesquisa.

Nota-se bons coeficientes de correlação e regressão dos ensaios, mas principalmente uma elevação da vida a fadiga à medida que se substitui a areia pelo resíduo, representado pelos coeficientes exponenciais das equações. Atribui-se este fato a presença do resíduo enrijecer a massa e por consequência aumentar a resistência a carga repetida das misturas com resíduo em relação a piloto.

Para a análise no programa SisPav faz necessário a apresentação das curvas de fadiga em função das deformações resilientes conforme figuras 4.1 e 4.2.

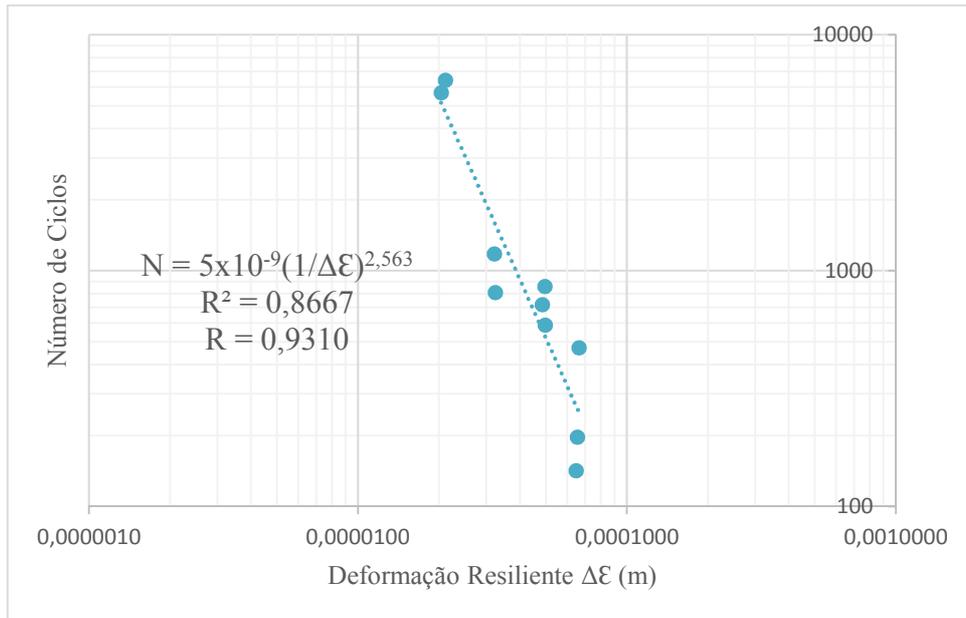


Figura 4.41- Curva de fadiga de  $\Delta \epsilon$  para a dosagem piloto.

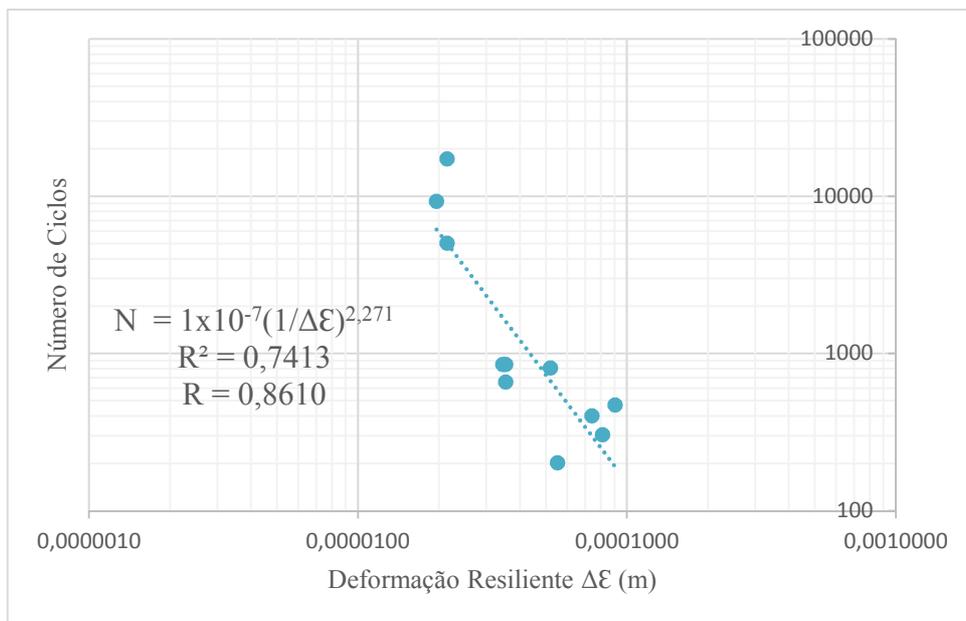


Figura 4.42- Curva de fadiga de  $\Delta \epsilon$  para a dosagem de 10% de resíduo.

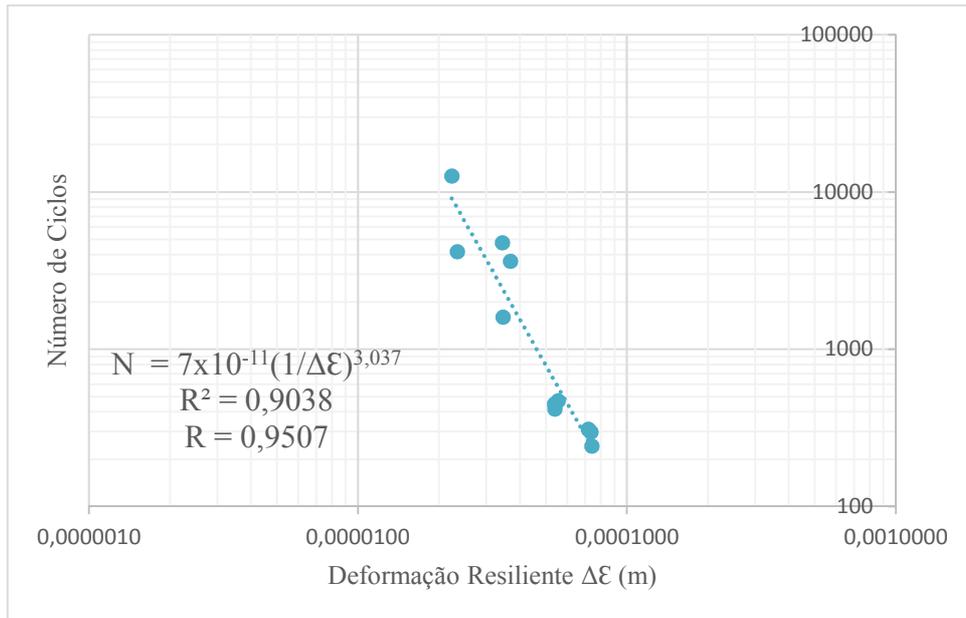


Figura 4.43- Curva de fadiga de  $\Delta \epsilon$  para a dosagem de 20% de resíduo.

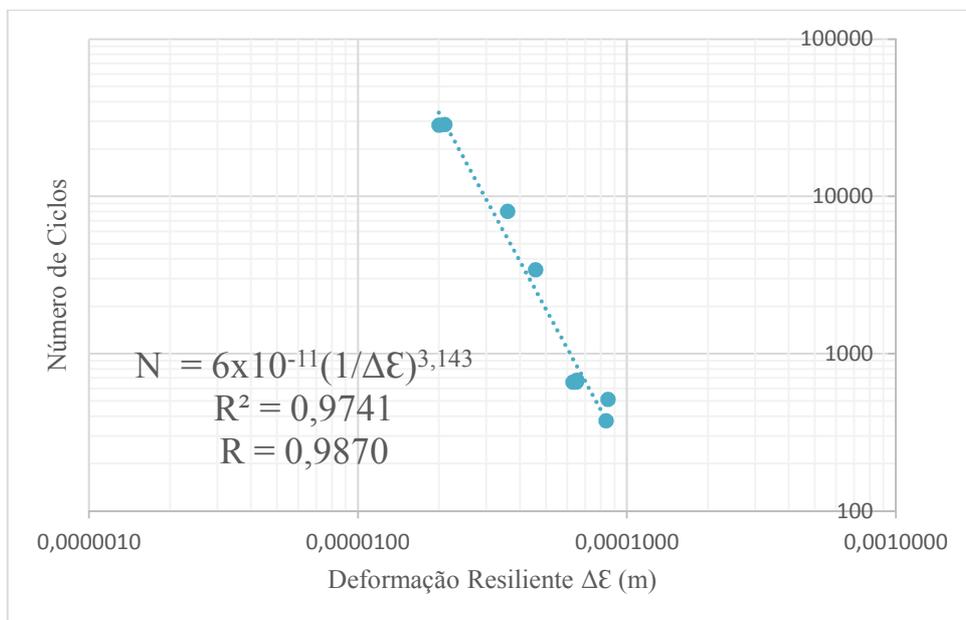


Figura 4.44- Curva de fadiga de  $\Delta \epsilon$  para a dosagem de 25% de resíduo.

A análise pura e simplesmente considerando apenas as curvas de fadiga pode levar a equívocos, pois o módulo de resiliência complementa o comportamento das misturas. Como neste estudo os módulos foram estatisticamente iguais, pode-se considerar que o comportamento das misturas com resíduo tiveram desempenho a fadiga melhores do que a dosagem piloto e mais sensíveis a tensão de tração.

## 4.15 REOLOGIA

Os ensaios reológicos foram realizados nas dependências do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, com amostras de CAP 50/70, sofrendo adição de 2,5% e 5,0% de resíduo passante na peneira nº200. A seguir são apresentados um resumo dos parâmetros reológicos desta pesquisa.

Tabela 4.18 - Resumo dos resultados da reologia do ligante asfáltico desta pesquisa.

| <b>Amostras sem Envelhecimento</b> |            |           |              |                        |
|------------------------------------|------------|-----------|--------------|------------------------|
| Amostras                           | Temp. (°C) | G (Pa)    | $\delta$ (°) | G/Sen $\delta$<br>(Pa) |
| CAP                                | 64         | 1.504,29  | 80,45        | 1.525,44               |
|                                    | 70         | 687,98    | 83,01        | 693,12                 |
|                                    | 76         | 329,94    | 85,27        | 331,06                 |
| CAP + 2,5%<br>de Resíduo           | 64         | 1.493,12  | 80,45        | 1.514,11               |
|                                    | 70         | 685,63    | 82,95        | 690,85                 |
|                                    | 76         | 326,55    | 85,22        | 327,69                 |
| CAP + 5,0%<br>de Resíduo           | 64         | 1.320,31  | 81,46        | 1.335,11               |
|                                    | 70         | 625,15    | 83,80        | 628,82                 |
|                                    | 76         | 310,96    | 85,79        | 311,80                 |
| <b>Amostras com Envelhecimento</b> |            |           |              |                        |
| Amostras                           | Temp. (°C) | G (Pa)    | $\delta$ (°) | G/Sen $\delta$<br>(Pa) |
| CAP                                | 64         | 3.807,89  | 72,69        | 3.988,43               |
|                                    | 70         | 1.834,19  | 76,28        | 1.888,06               |
|                                    | 76         | 905,88    | 79,49        | 921,36                 |
| CAP + 2,5%<br>de Resíduo           | 64         | 3.808,57  | 72,97        | 3.983,29               |
|                                    | 70         | 1.899,067 | 76,20        | 1.955,55               |
|                                    | 76         | 928,47    | 79,38        | 944,65                 |
| CAP + 5,0%<br>de Resíduo           | 64         | 4.108,390 | 72,31        | 4.312,20               |
|                                    | 70         | 1961,64   | 75,78        | 2.023,69               |
|                                    | 76         | 947,97    | 79,047       | 965,56                 |

Analisando o gráfico da figura 4.46 a seguir pode-se notar que presença do resíduo não proporcionou alteração no ângulo de fase, tanto para amostras com, quanto para as amostras sem envelhecimento.

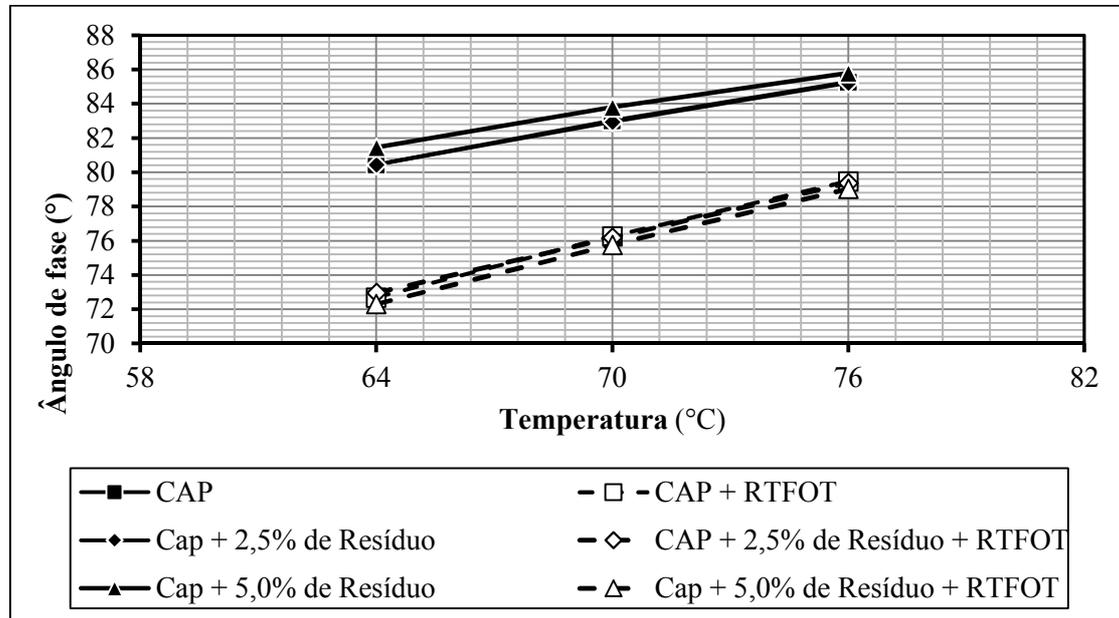


Figura 4.45 - Ângulo de fase do ligante asfáltico em várias condições.

O módulo complexo mede a rigidez do material, ou seja, a resistência a uma deformação cisalhante. A figura 4.46 mostra uma tendência de isonomia do comportamento desta grandeza frente a adição do resíduo a 2,5% e 5,0%, tanto para mostras com, quanto para amostras sem envelhecimento.

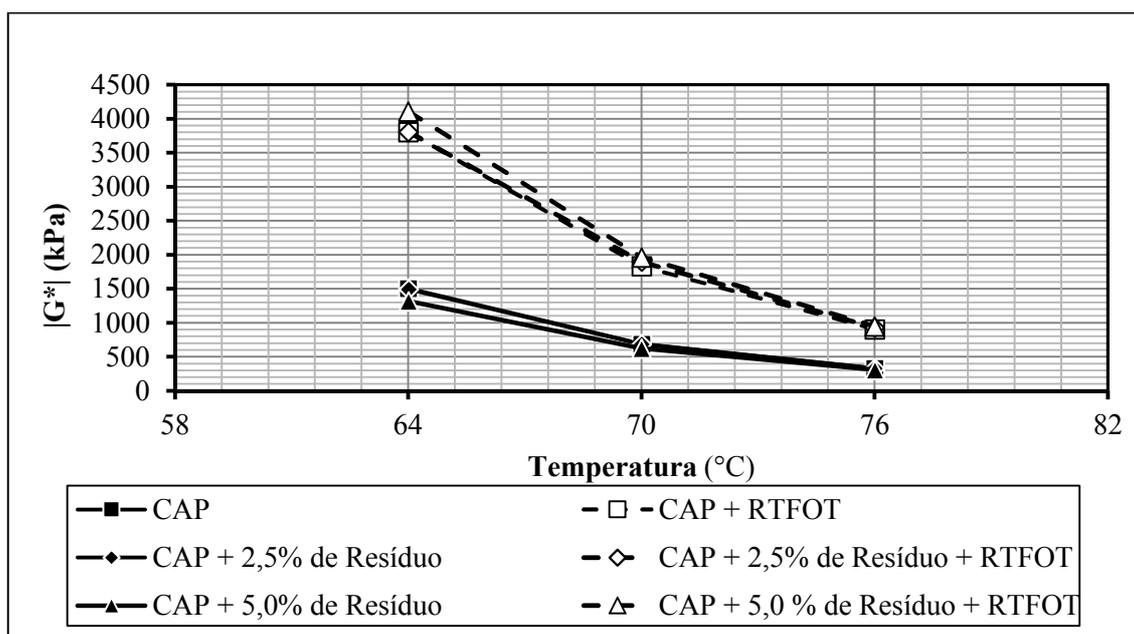


Figura 4.46 - Módulo complexo do ligante asfáltico em várias condições.

O CAP em análise pela classificação *Superpave*, foi caracterizado como um ligante PG 64-22 (64 - temperatura mais alta em que o ligante possui propriedades físicas adequadas para resistir à deformação permanente; -22 - temperatura mais baixa em que o ligante possui propriedades físicas adequadas), não sofrendo alteração classificatória pela adição de 2,5% e 5,0%, para trincamento térmico conforme figura 4.47.

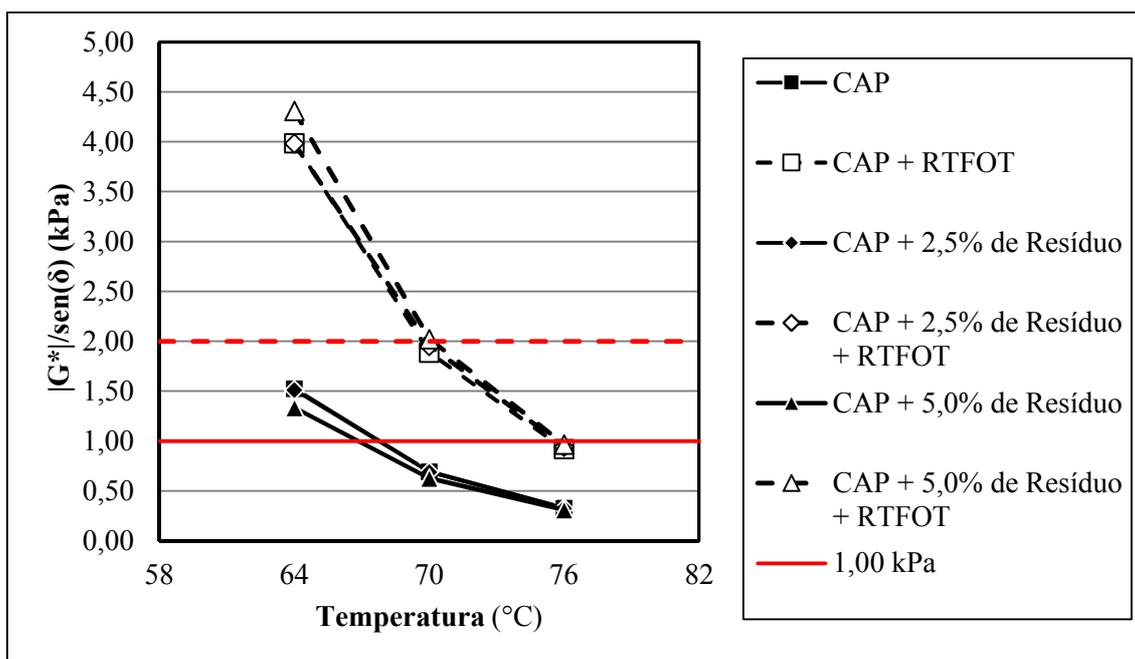


Figura 4.47 - Grau de desempenho do ligante asfáltico em várias condições.

Na figura 4.48, pode-se notar a parcela de energia que foi transferida e recuperável pelo CAP, expressa pela grandeza do grau de desempenho ( $G'$ ). Os dados mantêm o comportamento dos outros parâmetros reológicos até aqui tratados, não demonstrando diferença significativa entre as amostras, tanto as com, quanto entre as sem envelhecimento.

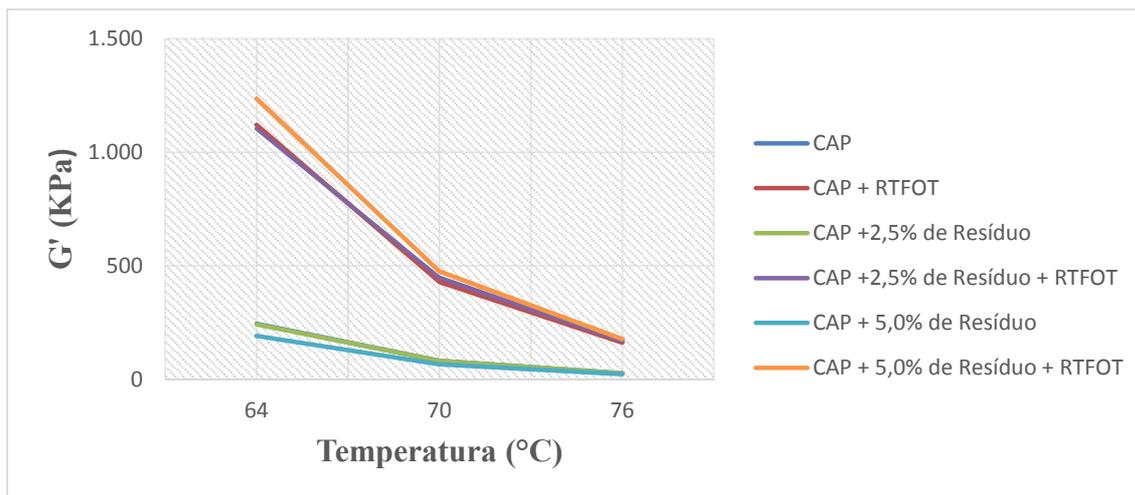


Figura 4.48 - Grau de desempenho do ligante asfáltico em várias condições.

Complementando a informação da figura 4.48, a figura 4.49 demonstra a parcela de energia que foi transferida de maneira irreversível às amostras, corroborando com os valores de  $G'$ , onde os teores demonstraram o mesmo comportamento isonômico do grau de desempenho.

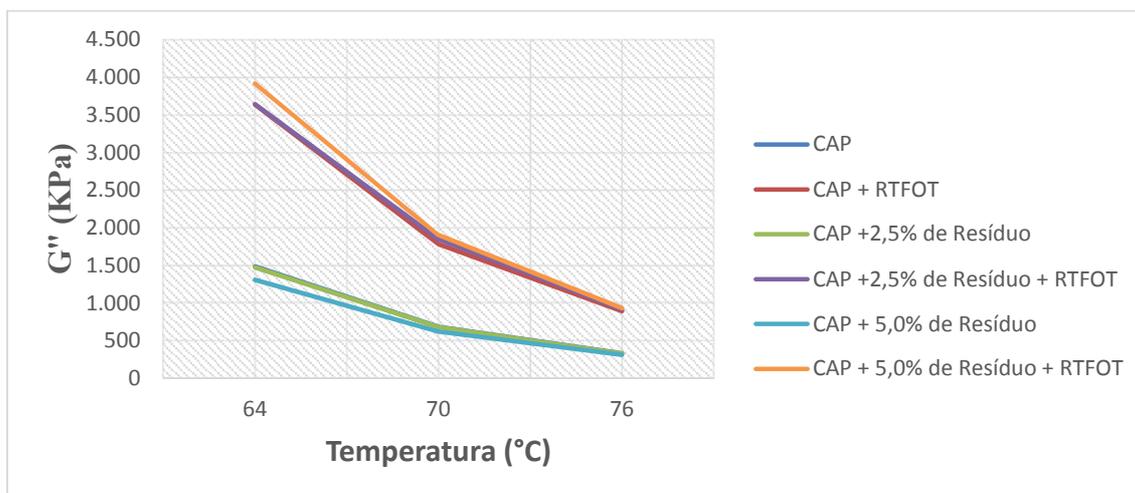


Figura 4.49 - Módulo de perda do ligante asfáltico em várias condições.

A tangente do ângulo de fase demonstra a sensibilidade a variações da composição do material, sendo expressa pela relação  $G''/G'$ , e sua redução representa uma maior elasticidade do ligante, ou maior módulo elástico. Novamente as amostras apresentaram uma tendência igualitária de comportamento.

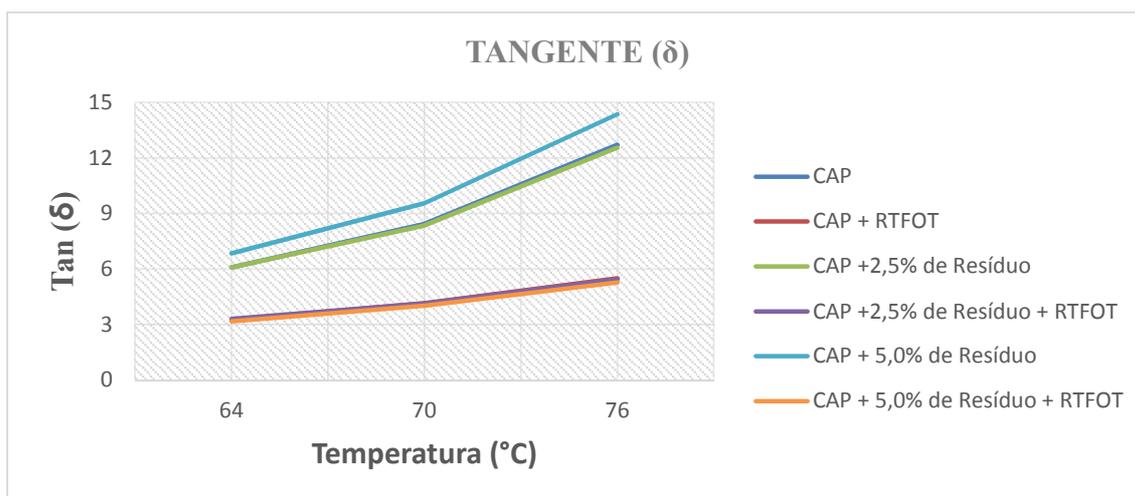


Figura 4.50 - Tangente de  $\delta$  do ligante asfáltico em várias condições.

A partir do ensaio de MSCR pôde-se obter a compliancia não recuperável (razão entre deformação não recuperável e a carga aplicada) a 3.200 Pa, e a diferença percentual entre os valores de  $J_{nr}$  a 100 Pa e 3.200 Pa ( $J_{nr, diff}$ ) não pode ser superior a 75%, evitando que o ligante seja excessivamente sensível a variação de tensão.

Os resultados apontam que o volume de tráfego para os quais as amostras estão aptas, não apresentou diferença significativa, sendo classificado como tráfego padrão com suporte para um volume de 10 milhões de eixos padrões durante a vida de projeto, como pode-se comprovar na tabela 4.19 e figura 4.51.

Tabela 4.19 – Resultado MSCR do ligante asfáltico desta pesquisa.

| Parâmetro          | CAP | CAP + 2,5% de Resíduo | CAP + 5,0 % de Resíduo |
|--------------------|-----|-----------------------|------------------------|
| $J_{nr}$ 3.200 Pa  | 2,9 | 3,0                   | 2,9                    |
| $J_{nr, diff}$ (%) | 51% | 46%                   | 54%                    |

A figura 4.51 demonstra que o resíduo não alterou a deformação específica das amostras, permanecendo os valores praticamente iguais ao longo do tempo do ensaio.

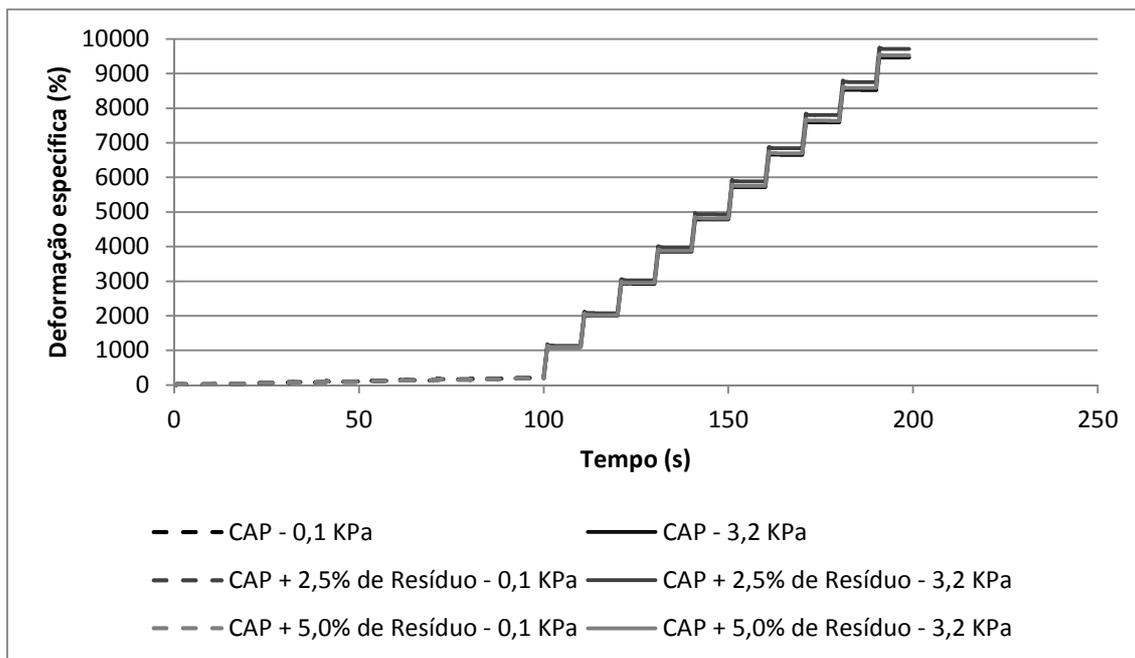


Figura 4.51 - Curva do Ensaio MSCR do ligante asfáltico em várias condições.

#### 4.16 DIMENSIONAMENTO DE UM PAVIMENTO HIPOTÉTICO PELO SisPav

A partir dos dados de fadiga elaborou-se a tabela 4.20, resumindo os dados dos ensaios, e que foram aplicados no programa SisPav para dimensionamento da espessura do pavimento asfáltico, para fins comparativos da influência do uso do resíduo.

Tabela 4.20 - Resumo das informações das curvas de fadiga das misturas desta pesquisa.

| Mistura        | $N = K_1 (1/\Delta)^{n_1}$ , $N = K_2(1/\Delta E)^{n_2}$ |                     |            | $R^2$  |
|----------------|--|---------------------|------------|--------|
|                | $K_1$  | $K_2$               | $n_1, n_2$ |        |
| Piloto         | 78,683   | $5 \times 10^{-9}$  | 2,563      | 0,8667 |
| 10% de Resíduo | 174,57   | $1 \times 10^{-7}$  | 2,271      | 0,7413 |
| 20% de Resíduo | 120,52   | $7 \times 10^{-11}$ | 3,037      | 0,9038 |
| 25% de Resíduo | 227,45   | $6 \times 10^{-11}$ | 3,143      | 0,9741 |

Os dados apresentados na metodologia proporcionaram um volume de tráfego de  $1,543 \times 10^7$  no SisPav, sendo apresentado na tabela 4.21, onde todas as misturas apresentaram uma espessura de 5,00 cm, para as condições de contorno, podendo ser utilizada a dosagem de 25%, que não acarretará aumento na espessura final do revestimento.

Tabela 4.21 – Dimensionamento da espessura do pavimento segundo o SisPav.

| Mistura        | $N = K_1 (1/\Delta)^{n1}$ , $N = K_2(1/\Delta E)^{n2}$ |                     |          | $R^2$  | Espessura do Pavimento (cm) |
|----------------|--|---------------------|----------|--------|-----------------------------|
|                | $K_1$  | $K_2$               | $n1, n2$ |        |                             |
| Piloto         | 78,683   | $5 \times 10^{-9}$  | 2,563    | 0,8667 | 5,00                        |
| 10% de Resíduo | 174,57   | $1 \times 10^{-7}$  | 2,271    | 0,7413 | 5,00                        |
| 20% de Resíduo | 120,52   | $7 \times 10^{-11}$ | 3,037    | 0,9038 | 5,00                        |
| 25% de Resíduo | 227,45   | $6 \times 10^{-11}$ | 3,143    | 0,9741 | 5,00                        |

#### 4.17 POTENCIALIDADE DE APLICAÇÃO DO RESÍDUO EM PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA NA REGIÃO

O resíduo de cobre utilizado nesta pesquisa se refere ao projeto S11D, situado na serra do sossego no estado do Pará, distante 41 km da área urbana. A figura 4.52 a seguir representa o diagrama reto do 5º Núcleo Regional do SETRAN (Secretaria Estadual de Transporte), que contempla os municípios próximos a área da mineração.

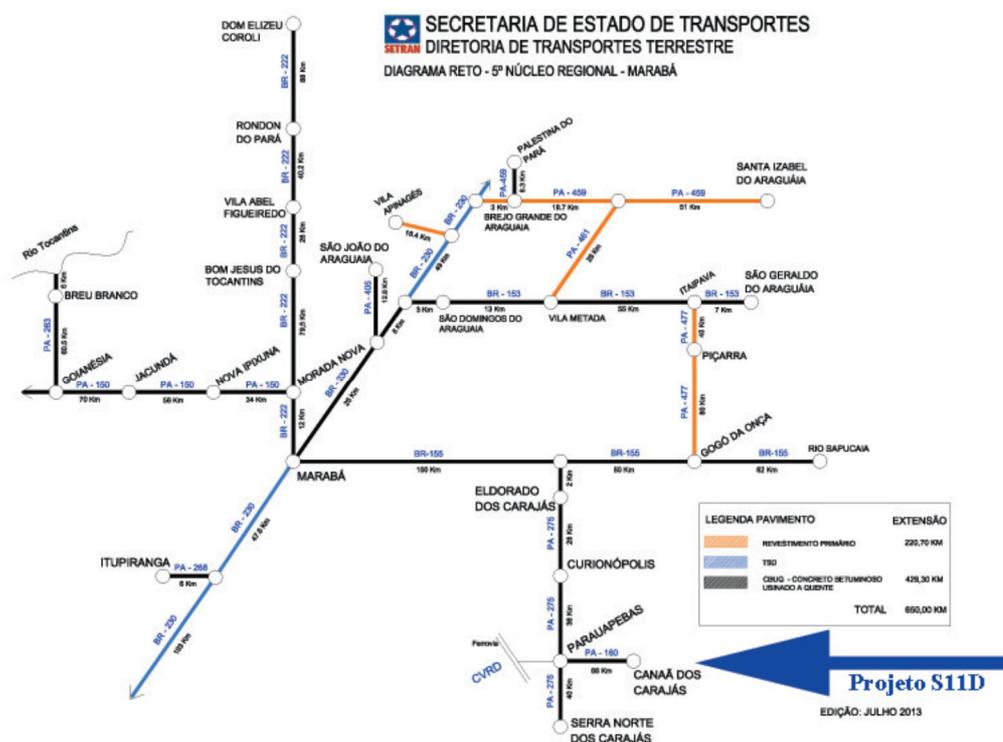


Figura 4.52: 5ª Regional do SETRAN/PA.

Fonte: Relatório 2014.

Neste contexto obtém-se um total de um total de 1.431 Km de rodovias estaduais e federais, a partir da mina até a entrada de cada cidade contemplada nesta regional. Segundo a figura 4.43 a seguir pode-se notar também quantitativo do tipo de pavimentação nestas vias, sendo 245 km em revestimento primário, 200 km em tratamento superficial duplo e 986 km em concreto asfáltico.

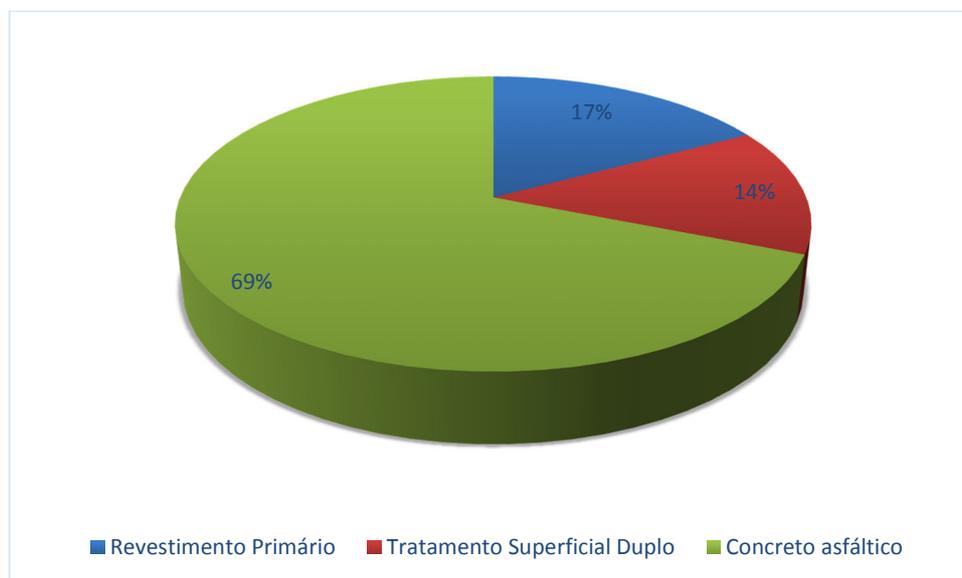


Figura 4.53 – Quantitativo do tipo de pavimentação na região.

Logo, para pavimentação asfáltica destes 1.431 km, a uma espessura de 10,00 cm e largura de pista de 10,00 m, consumiria cerca de 3.420.090 toneladas de concreto asfáltico, a uma dosagem de 7,73 % de resíduo em massa, consumiria cerca de 249.667 toneladas de resíduo.

Foi levantado também o quantitativo de vias em cada setor urbano das cidades desta regional (Marabá), obtidas por meio de um sistema *Cad*, e estimando a extensão através da tabela 4.22.

Tabela 4.22– Extensão das vias urbanas da 5ª Regional do estado do Pará.

|   | <b>Cidade</b>            | <b>Km de Vias Urbanas</b> |
|---|--------------------------|---------------------------|
| 1   | Abel Figueiredo          | 28                        |
| 2   | Bom Jesus do Tocantins   | 33                        |
| 3   | Breu branco              | 68                        |
| 4   | Canaã dos Carajás        | 220                       |
| 5   | Curionópolis             | 68                        |
| 6   | Dom Elizeu               | 123                       |
| 7   | Eldorado dos Carajás     | 85                        |
| 8   | Goianésia                | 68                        |
| 9   | Itupiranga               | 60                        |
| 10  | Jacundá                  | 120                       |
| 11  | Marabá                   | 1.350                     |
| 12  | Morada Nova              | 28                        |
| 13  | Nova Ipixuna             | 44                        |
| 14  | Palestina do Pará        | 30                        |
| 15  | Parauapebas              | 1.080                     |
| 16  | Piçarra                  | 20                        |
| 17  | Rondon do Pará           | 163                       |
| 18  | São Domingos do Araguaia | 43                        |
| 19  | São Geraldo do Araguaia  | 59                        |
| 20  | São João do Araguaia     | 9                         |
| <b>Total em quilômetros de vias urbanas</b> |                          | <b>3.699</b>              |

O revestimento asfáltico destes 3.699 km, com uma espessura de 5,00 cm e largura de pista de 7,00 m, consumiria cerca de 6.500.000 toneladas de concreto asfáltico.

Variando o teor de resíduo na mistura, obtendo-se outras características como a maior resistência a fadiga, foi elaborada a tabela a seguir com os consumos de resíduo, podendo chegar até próximo de 1.7000.000 de toneladas para um teor de 25%.

Tabela 4.23 – Consumo de resíduo para pavimentação das vias da 5ª Regional.

| <b>Detalhes</b>             | <b>Vias Urbanas</b> | <b>Rodovias</b> |
|-----------------------------|---------------------|-----------------|
| Extensão (Km)               | 3.699               | 1.431           |
| Largura da via (m)          | 7,00                | 10,00           |
| Espessura do pavimento (cm) | 5,00                | 10,00           |
| Quantidade de CAUQ (Ton)    | 3.094.213,50        | 3.420.090,00    |
| TOTAL CA (Ton)              | 6.514.303,50        |                 |
| 10,00 % de Resíduo (Ton)    | <b>651.430,35</b>   |                 |
| 20,00% de Resíduo (Ton)     | <b>1.302.860,70</b> |                 |
| 25,00% de Resíduo (Ton)     | <b>1.628.575,88</b> |                 |

Considerando um teor de finos na ordem de 16%, conforme ensaios de caracterização, pode chegar a 260.572,14 toneladas (para 25% de resíduo), conforme tabela 4.24.

Devido ao baixo teor de finos na areia, o C.A. produzido na região é geralmente complementado com cimento Portland pelas empresas de pavimentação regionais. Segundo a CBIC (Câmara Brasileira da Indústria da Construção) o cimento apresentou um valor de 0,5652 R\$/Kg para agosto de 2016, o que geraria uma economia até R\$ 147.275.373,53 para 25% de resíduo em substituição a areia. Em valores por tonelada, para 25% de resíduo corresponderia a R\$ 22,61.

Tabela 4.24 – Custo de C.P em relação a massa de C.A.

| <b>Teor de Resíduo</b> | <b>Quantidade de Finos (Ton)</b> | <b>Custo em C.P. (R\$)</b> | <b>Custo/Ton (R\$/Ton)</b> |
|------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 10,00% de Resíduo      | 104.228,86                       | 58.910.149,41              | 9,04                       |
| 20,00 % de Resíduo     | 208.457,71                       | 117.820.298,82             | 18,09                      |
| 25,00 % de Resíduo     | 260.572,14                       | 147.275.373,53             | 22,61                      |

Quanto a economia de CAP, para adição de 10% de resíduo haveria uma redução de aproximadamente 5% em relação a dosagem piloto. Em valores citados pela ANP em outubro de 2016, o preço da tonelada de CAP ficou na ordem de R\$ 1.972,13. Para a pavimentação dos 5.130 Km de vias, em valores unitários representa 6,31 R\$/Ton de C.A conforme tabela 4.25.

Tabela 4.25 – Economia de CAP em relação as dosagens de estudo.

| <b>Teor de Resíduo</b> | <b>Teor de CAP (%)</b> | <b>Redução em Relação a Dosagem Piloto</b> | <b>Peso do CAP (Ton)</b> | <b>Custo (R\$)</b> | <b>Economia por Ton. (R\$/T)</b> |
|------------------------|------------------------|--|--------------------------|--------------------|----------------------------------|
| Piloto                 | 6,12                   | 0,00%                                      | 398.675,37               | 786.239.665,72     | 0                                |
| 10% de Resíduo         | 5,80                   | 5,23%                                      | 377.829,60               | 745.129.094,96     | 6,31                             |
| 20 % de Resíduo        | 6,57                   | -7,35%                                     | 427.989,74               | 844.051.405,85     | -8,87                            |
| 25 % de Resíduo        | 6,98                   | -14,05%                                    | 454.698,38               | 896.724.324,63     | -16,96                           |

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

---

#### 5.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DA TESE

A utilização do resíduo proveniente da exploração do minério de cobre é de grande valia com relação ao passivo ambiental deixado pelas empresas destes projetos. Considerando que algo em torno de 1% de cobre é retirado do solo, resultando em 99% de resíduo deste processo, grandes volumes são verificados nesta atividade, logo soluções que consumam este material são primordiais como apêndices ao processo industrial.

Dentre as principais contribuições desta pesquisa, pode-se destacar a comprovação da viabilidade de utilização do resíduo em revestimento asfáltico, visto que as propriedades mecânicas das misturas ficaram constantes ou melhoraram com a adição do mesmo. Dentre os destaques tem-se o desempenho a fadiga melhorado para a adição de 20% e 25% de resíduo.

Outra contribuição latente foi a modelagem no SisPav, onde pode-se comprovar que o resíduo não alterou a espessura final do revestimento, podendo aplicá-lo sem prejuízo econômico quanto ao volume de C.A. Ainda na seara de viabilidade econômica, o resíduo apresentou redução de custos frente as adições de cimento Portland utilizado para correção dos traços, e redução do teor de CAP nas dosagens de 10% de resíduo.

#### 5.2 PRINCIPAIS CONSTATAÇÕES DA TESE

Como pôde-se notar durante a caracterização o resíduo da mineração do cobre sulfetado, o mesmo comportou-se como uma areia de características subarredonda e semicircular. Dosado este em proporções pré-determinadas e comparando com a mistura de referencia (sem resíduo), obteve-se as principais conclusões deste estudo:

- A substituição da areia pelo resíduo melhorou as características Marshall da mistura, tendo singular importância no aumento da massa específica e redução do teor de vazios;
- Quando definidos os teores CAP de referencia para cada mistura, nota-se a redução destes, o que pode ser dado crédito a suas características granulométricas,

contribuindo para um maior fechamento dos vazios, fato este que além de proporcionar maior resistência à massa, aumenta também sua durabilidade por dificultar a penetração de agentes agressivos;

- O benefício supracitado é notado até a dosagem de 10%, ou mais precisamente de 7,73% de resíduo, reduzindo em torno de 5% o consumo de CAP. A partir deste valor o efeito da superfície específica maior do resíduo exige maior teor de CAP para se atingir os parâmetros de projeto;

- Com relação a estabilidade, pôde-se notar uma tendência de aumento desta propriedade frente ao aumento do teor de resíduo, fato este também verificado quando os corpos de prova foram submetidos a temperaturas mais elevadas (60°C), apresentando em torno de 70% de redução da estabilidade para a mistura sem resíduo, cerca de 60% de redução de estabilidade para adições de 10% e 20% de resíduo, e 50% de redução quando a adição foi de 25%;

- Não foi notada uma diferença significativa com relação a resistência a tração dos corpos de prova;

- Quando se eleva as temperaturas do ensaio de resistência a tração por compressão diametral, tanto a 50°C, quanto a 70°C, foi observada uma tendência quadrática no comportamento das misturas dentro de cada faixa de temperatura, notando-se uma perda menor para o teor de 10% de resíduo em ambas as temperaturas;

- Dentro de cada teor de resíduo, frente a variação de temperatura da ruptura a tração, também pôde-se notar a tendência de um melhor desempenho para a mistura a 10%, visto os comportamentos exponenciais desta propriedade, logo um menor expoente nas equações de regressão;

- Apesar do baixo desgaste a abrasão, foi notado uma diferença significativa para a mistura com 25% de resíduo em relação as demais misturas, chegando a valores de 60% menores do que na dosagem piloto;

- Os módulos de resiliência ficaram dentro dos valores preconizados por Bernucci *et al.* (2008), entre 2.000 e 8.000 MPa, sem diferença significativa entre as misturas, e com comportamento quadrático;

- Pôde-se notar o ganho de rigidez das misturas de aproximadamente 20% com a adição de resíduo em relação a dosagem piloto quando comparado o parâmetro MR/RT;

- Os ensaios de fadiga demonstraram um desempenho superior das dosagens com 20% e 25% de resíduo, representado pelo comportamento das curvas de fadiga;
- O ensaios reológicos demonstraram um comportamento semelhante entre as amostras de CAP, CAP +2,5% de resíduo e CAP+5,0% de resíduo;
- O mesmo comportamento se deu com as amostras envelhecidas pelo método RTFOT;
- O ensaio de MSCR apontou para o resultado de um tráfego padrão, com suporte para um volume de 10 milhões de eixos padrões durante a vida de projeto, não apresentando diferença entre as amostras;
- O dimensionamento da espessura do pavimento pelo programa SisPav apresentou uma espessura de 5,00 cm para todas as dosagens do estudo, dentro dos parâmetros adotados na metodologia;
- Analisando a potencialidade de consumo deste resíduo em pavimentação das vias próximas ao projeto, tem-se potencial de consumo de até 1.628.575,88 toneladas para um teor de 25% de resíduo.
- Em valores monetários nos dias de hoje, a adição de 25% de resíduo (substituindo totalmente a areia) a economia chegaria a R\$ 147.275.373,53;
- Na dosagem de 25% de resíduo geraria uma redução de 5,23% de CAP, o que somente em CAP pela simples substituição da areia pelo resíduo representaria 6,31 R\$/Ton de C.A.

Logo conclui-se que a adição de rejeito na mistura asfáltica traz três benefícios latentes:

- Benefício Tecnológico: melhoria das propriedades do C.A. (redução do teor de vazios, desempenho a fadiga);
- Benefício Ambiental: Consumo do resíduo gerado pelo processo de mineração do cobre;
- Benefício econômico: redução do teor de CAP nas misturas asfálticas, e substituição da adição de finos.

### 5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS

- Aprofundar os efeitos do envelhecimento do CAP frente a presença do resíduo;
- Analisar a aplicação do resíduo frente a outros métodos de dosagem;
- Analisar a dosagem do resíduo como agregado miúdo e finos no ligante;
- Variar o teor de vazios, verificando o consumo de mais resíduo;
- Trabalhar fora da faixa “c” do DNIT, visando utilizar mais resíduo;
- Aplicação em uma pista de rolamento experimental;
- Incluir o estudo da água, simulando chuvas no revestimento;
- Verificar a aplicação em outros tipos de revestimentos;
- Estudos de iniciação e propagação de fraturas;
- Testar em outras aplicações na construção civil.

## BIBLIOGRAFIA

---

AASHTO M320-10. (2015). "Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder". **American Association of State Highway and Transportation Officials**.

ALVARENGA, A.; NOVAES, A. **Logística aplicada: Suprimento e distribuição física**. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

ALECRIM, Adson Viana. **Estudo do resíduo quartzito foliado para emprego em estrutura de pavimentos**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, SP. 2009.

AL ROUSAN, T. M. (2004). Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System. **Tese de Doutorado**. Departamento de Engenharia Civil, Texas A&M University, College Station, Texas.

ANANI, B. A.; BALGHUNAIM, F. A.; AL-HAZZAA, A.S. Laboratory and field study and pavement rutting in Saudi Arabia. **Transportation Research Record**. n 1259, p. 79-90. 1990)

ARAÚJO, M. A. (2012). **Efeito da Radiação Solar no Envelhecimento de Ligantes Asfálticos Modificados**. Tese de Doutorado – UFMG, Belo Horizonte, MG.

ARAÚJO, M. P. **Infraestrutura de Transporte e Desenvolvimento Regional: Uma abordagem de equilíbrio geral inter-regional**. 2006. 114 p. Tese (Doutorado em Economia). Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

ASCHAUER, D. Is Public Expenditure Productive? **Journal of Monetary Economics**; v. 23, p. 177-200, mar. 1989.

ASPHALT INSTITUTE (1989). **The Asphalt Handbook**. Lexington. Manual Series N°4 (MS-4).

ASTM D2872. (2012). "Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)". **American Society for Testing Material**.

ASTM D6373. (2015). "Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder". **American Society for Testing Material**.

ASTM D7405. (2015). "Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer". **American Society for Testing Material**.

AYRES JR., M., 1997, **Development of a rational probabilistic approach for flexible pavement analysis**. Ph.D. Dissertation. University of Maryland, College Park, E.U.A.

BAHIA H., HANSON D., ZENG M., ZHAI H., KHATRI M. e ANDERSON R. (2001) Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design – NCHRP Report 459. **National Academic Press**, Washington, USA.

BAHIA, H. U. (1995) Critical Evaluation of Asphalt Modification Using Strategic Highway Research Program Concepts. **Transportation Research Record**, n. 1488, p. 82–88.

BALBO, J.T. (2000). Fatos, Mitos e falácias sobre os modelos experimentais de fadiga. **2ª Reunião Anual de Pavimentação**. Brasília, DF.

BALLOU, R. H. **Logística Empresarial**. São Paulo: Atlas, 1993

BALLOU, R. H. **Business Logistic/Supply Chain Management**. 5ª Ed. New Jersey: Pearson Education Inc, 2004.

BARDINI, V. S., KLINSKY, L. M., & FERNANDES JR, J. L. (2010). "A Importância do Fíler para o Bom Desempenho de Misturas Asfálticas.". **Pesquisa e Tecnologia Minerva**, 7 (1), 71-78.

BARDINI, V. S., KLINSKY, L. M., & FERNANDES JR, J. L.; ROQUE, R (2012). A influencia do filer mineral no comportamento reológico de mastiques asfálticos. **Revista Transportes**. v. 20, n. 3, 2012. Pag. 19-26.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. Rio de Janeiro: LTC, 1995.

BECKER, Bertha; EGLER, Cláudio. **Brasil: uma nova potência regional na economia-mundo**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.

BELL, C.A. Relationship between laboratory aging tests and fielding performance of asphalt-concrete mixtures. **Serviceability and Durability of Construction Materials**. v.2 p745-754. 1990.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P. SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 3ª Reimpressão. 2008.

BESSA, I. S. **Avaliação do processamento digital de imagens como ferramenta para caracterização de agregados e misturas asfálticas**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2012.

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento. **Mineração e Metalurgia**. Brasília, 1997. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br>. Acessado em 07 set 2014

BOWERS, B. F., MOORE, J., HUANG, B., & SHU, X. (2014). Blending Efficiency of Reclaimed Asphalt Pavement: an Approach Utilizing Rheological Properties and Molecular Weight Distribution. **Fuel**, 135, 63-68.

BOWERSOX, D.; CLOSS, D. **Logística Empresarial: O Processo de Integração da Cadeia de Suprimentos**. 1ª Ed. São Paulo: Atlas, 2007.

BRINGEL, R. M. SOARES, S. A. SOARES, J. B. Análise da susceptibilidade térmica de ligantes asfálticos através da energia de ativação de fluxo. **Revista Transportes**. v. 17, n. 1, 2014. Pag. 45-52.

BROWN, E.R.; CROSS, S.A. A study of in place rutting of asphalt pavement. **Association of asphalt Pavement Technologists**. v58 p1-39. 1989.

BUTTON, J.W. Permeability of asphalt surface seals and their effect on aging of underlying asphalt concrete. **Transportation Research Record**. n 1535, p 124-130. Washington, D.C. 1996.

CALABREZI, S. R. **A multimodalidade para o transporte de cargas: identificação de problemas em terminais visando à integração dos modais aéreo e rodoviário**. Campinas, 2005. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, 2005.

CAPITÃO, S. D.; SANTOS, L. P. Resistencia a fadiga de misturas betuminosas de alto módulo de deformidades utilizadas em Portugal. **In: XIII Panamerican Confefence of Traffic in Transportation Enginnering**, 2004.

CAVALCANTI, L. S. **Efeito de alguns modificadores de ligantes na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas**. Dissertação de mestrado em engenharia. Programa de Engenharia Civil COPPE-UFRJ. Rio de Janeiro, RJ. 222f. 2010.

CENTRO DE ESTUDOS EM LOGÍSTICA. **Transporte de Cargas no Brasil**. COOPEAD. São Paulo, 2000. p. 59.

CLOPOTEL, C. S. (2012). "Filler Reinforcement Mecanism in Aphalt Mastic". **PhD Thesis**. University of Wisconsin-Madison.

CNT - Confederação Nacional dos Transportes. **Pesquisa Rodoviária 2006**. Brasília: CNT, 2006.

CNT - Confederação Nacional dos Transportes. **Atlas dos Transportes**. Brasília: CNT, 2006.

CNT - Confederação Nacional dos Transportes. **Pesquisa CNT de Ferrovias 2011**. Brasília: CNT, 2011.

COSTA, A.H. **Manual do Planejamento de Acessibilidades e Transporte**. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento da Regional Norte. Porto, Portugal. Dez. 2008.

CRAUS, J., ISHIAI, I., & SIDES, A. (1978). "Guidelines for Use of Dust in Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures". **Proceedings of Asphalt Association of Paving Technologists**, 56, 492-516.

CRAVO, M. C., LEITE, L. M., ASSUMPÇÃO, D. F., MARTINS, A. T., NASCIMENTO, L. H., & GUERRA, G. B. (2014). Influência da Radiação Ultravioleta no Envelhecimento de Ligantes Asfálticos. **21 ENCONTRO DE ASFALTO DO IBP**.

CRAVO, M. C. C. **Efeitos do Envelhecimento Térmico e Fotoquímico em Ligantes Asfálticos, Mástique e Matriz de Agregados Finos**. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito. Disponível em: [www.denatran.org.br](http://www.denatran.org.br). Acesso em: 21 fev.2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ES-148/94. **Mistura betuminosa - determinação dos pontos de fulgor e de combustão**. Rio de Janeiro. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME-004/94. **Material Betuminoso - Viscosidade Saybolt-Furol**. Rio de Janeiro. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 043/95. **Material Betuminoso - Ensaio Marshall**. Rio de Janeiro. 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 083/98. **Agregados – Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro. 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 84/95. **Agregado - Densidade Real**. Rio de Janeiro. 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 117/94. **Misturas Betuminosas - Densidade Aparente**. Rio de Janeiro. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 138. **Misturas Betuminosas - Densidade Aparente**. Rio de Janeiro. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 153/97. **Agregado em Estado Compacto Seco - Massa Específica Aparente**. Rio de Janeiro. 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 193/96. **Materiais Betuminosos - Densidade e Massa Específica**. Rio de Janeiro. 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 194/98. **Agregados - Massa Específica – Chapman**. Rio de Janeiro. 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 383/99. **Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - Ensaio Cantabro**. Rio de Janeiro. 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. ME 131/2010. **Materiais Asfálticos - Ponto de Amolecimento - Anel e Bola**. Rio de Janeiro. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. ME 135/2010. **Misturas Asfálticas - Módulo de Resiliência**. Rio de Janeiro. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. ME 155/2010. **Material asfáltico - Penetração**. Rio de Janeiro. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. ME 163/98. **Materiais betuminosos – determinação da ductilidade**. Rio de Janeiro. 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Disponível em: [www.dnit.org.br](http://www.dnit.org.br)**. Acesso em: 21 fev.2013.

DNIT – Departamento Nacional de infraestrutura de Transportes. Disponível em: [www.dnit.org.br](http://www.dnit.org.br). Acesso em: 21 fev.2013.

DNPN – Departamento Nacional de Produção Mineral. **Informe Mineral**. Brasília. Jan-Jun 2014.

DNPN – Departamento Nacional de Produção Mineral. **Informe Mineral Pará 2014**. Brasília. Jan-Jun 2014.

DOMINGOS, D. I.; FAXINA, A. L. Avaliação do comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados com SBS e ácido polifosfórico. **Revista Transportes**. v. 21, n. 1, 2013. Pag. 51-58.

DRESCHER, A.; KIM, J.; NEWCOMB, D. Pavement Deformation in Asphalt Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v5, n1. Feb, 1993.

FARRIS, M.; SHROCK, D. **Domestic transportation: practice, theory and policy**. 6 ed. Boston: Houghton Mifflin, 1990.

FAXINA, Alberto Leandro. **Estudo da viabilidade técnica do uso de resíduo de óleo de xisto como óleo extensor de ligantes asfalto-borracha**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, SP. 2006.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (2002) **User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction**, Washington, D.C.

FENG, Z., YU, J., & WU, S. (2012). "Rheological Evaluation of Bitumen Containing Different Ultraviolet Absorbers". **Construction and Building Materials**, 29, 591-596.

FERREIRA, J. L. S.; Bastos, J. S.; Soares, J. B. (2015) Validação da metodologia de faixa de agregados dominantes para avaliação e especificação da granulometria de misturas asfálticas densas. **In: XXIX Congresso Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes**, Ouro Preto – MG. Disponível em: Acesso em: 14/04/2016.

FERREIRA P.C. **Essays on Public Expenditure and Economic Growth**. University of Pennsylvania, 1993 (PhD dissertation).

FERREIRA, J.L.; SOARES, J. B.; BASTOS, J. B. Métodos de seleção granulométrica com foco na resistência à deformação permanente. **Revista Transportes**. v. 24, n. 2, 2016. Pag 46-52

FLEURY, P. F. **Logística Empresarial: A Perspectiva Brasileira**. São Paulo: Atlas, 2000.

FORTE, M. M.; SILVA, L. S.; BARTOLOMEU, P.; DURRIEU, F.; FARCAS, F. Envelhecimentos UV de ligantes asfálticos. **Revista Transportes**. v. 13, n. 2, 2005. Pag 5-20.

FRANCO, F.A. **Método de dimensionamento mecanista-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. Tese de Doutorado. UFRJ, Rio de Janeiro/RJ. 2007.

FRAZELLI, E. **World-Class Warehousing and Materials Handling**. New York: McGraw-Hill, 2002.

FREIRE, R. A.; CASTELO BRANCO, V. T.; VASCONCELOS, K. L. Avaliação da resistência ao trincamento de misturas asfálticas compostas por agregados miúdos com diferentes tamanhos máximos nominais. **Revista Transportes**. v. 22, n. 2, 2014. Pag 117-127.

GRECO, J. **Aparecida Santana. Avaliação da influencia de alguns fatores nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas, a luz da técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários assimétricos**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, SP. 2004.

HARVEY, J.T.; DEACON, J.A.; TSAY, B.W.; MONISMITH, C.L. Fatigue performance os asphalt concrete mixes and its relationship with asphalt concrete pavement performance in California. **In: Asphalt Research Programa**, Berkeley, California, USA. 1995.

HINTZ, C. (2012) **Understanding Mechanisms Leading to Asphalt Binder Fatigue**. Ph.D Thesis. University of Wisconsin - Madison, Madison

HINTZ, C.; R. VELASQUEZ, L. ZHIJUN e H. U. BAHIA (2011) Effect of Oxidative Aging on Binder Fatigue Performance. **Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 80, p. 527-548.

HUANG, Y.H. (1993). **Pavement Analysis and Design**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA. 800p

IWANAGA, F. I. **Avaliação da influencia do tipo de agregado, do tipo de ligante, do tipo de moldagem e do tipo de filer na vida de fadiga de misturas asfáltica densas**. Escola de Engenharia de São Carlos, SP. 2007.

KIM, Y.R.; KIM, N. KHOSLA, P. **Effects of aggregate types and gradation on fatigue and pavement deformation of asphalt concrete**. In: ASTM STP 1147.

KIM, Y. R., LITTLE, D. N., & SONG, I. I. (2003). Effect of Mineral Fillers on Fatigue Resistances and Fundamental Material Characteristics: Mechanistic Evaluation. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 1832, 1-8.

KLINSKY, L. M.; BARDINI, V. S.; FABBRI, G. T. Efeito da adição de areia de fundição residual e cal a solos argilosos no módulo de resiliência. **Revista Transportes**. v. 22, n. 2, 2014. Pag 1-10

LAKATOS, E. M. **Técnicas de Pesquisa**. Ed. Atlas. São Paulo. 7 Edição. 2008

LANSING, John B. **Transportation and Economic Policy**. The Free Press, New York, 1966.

LEENDERS, M.; FEARON, H.; FLYNN, A. JOHNSON, F. **Purchasing and Supply Chain Management**. 12<sup>a</sup> ed. Chicago: Irwin, 2001.

LEITE, L.F.M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero**. 1999. 266p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LIMA, M. P. Custos Logísticos na economia Brasileira. **Revista Tecnológica**, Janeiro de 2006.

Lopes, M. M., F. C. Onofre, A. C. do Vale e J. B. Soares (2008) Estudo Laboratorial de Misturas Asfálticas SMA 12,5mm Dosadas com Diferentes tipos de Ligantes Asfálticos. **In: XV Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte (PANAM)**, 2008, Cartagena de Indias, Colombia. XV Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte (PANAM).

MARQUES, G. L. **Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica; Efeito da Compactação por Impacto e Giratória**. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro/RJ. 2004.

MEDINA, J. (1997). **Mecânica dos Pavimentos**. 1a. Ed. Rio de Janeiro, RJ, COPPE/UFRJ.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2a. Ed. Rio de Janeiro, RJ, COPPE/UFRJ. 574p, 2005.

MEDINA J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3<sup>a</sup>. Ed. Rio de Janeiro, RJ, COPPE/UFRJ. 620p, 2015

MENDES, L. O.; MARQUES, G. L. Avaliação da influência do Método Bailey no processo de dosagem e desempenho de misturas asfálticas. **Revista Transportes**. v. 20, n. 4, 2012. Pag. 35-43.

MIGLIORI F., CORTÉ J-F. (1998) Comparative Study of RTFOT and PAV Ageing Simulation Laboratory Tests. **Transportation Research Record**, 1638, p. 56-63.

MONISMITH, C. L., COETZEE, N. F. (1980). **Reflection cracking: analyses, laboratory studies, and design considerations.** *Asphalt Paving Technology*, pp 268-313, Louisville, Kentucky, U. S. A.

MORILHA JR., A (2004) **Estudos Sobre a Ação de Modificadores no Envelhecimento dos Ligantes Asfálticos e nas Propriedades Mecânicas e de Fadiga das Misturas Asfálticas.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

MORLOK, Edward K.: **Introduction to Transportation Engineering and Planning,** McGraw-Hill Inc., New York, 1978.

MOTTA, L.M.G. (1998). Contribuição para a estimativa do módulo resiliente de misturas asfálticas. **In: 14º Encontro de Asfalto,** IBP, Rio de Janeiro, RJ.

MOTTA, L.; LEITE, L. (2000). **Efeito do Filer nas Características Mecânicas das Misturas Asfálticas.** *ANPET.*

MOTTA, L.M.G. e LEITE, L.F.M., 2002, “Desempenho de trechos de pavimentos observados nos últimos 10 anos”. **In: 16º Encontro de Asfalto do IBP,** 2002, Rio de Janeiro. Anais do 16º Encontro de Asfalto, v. cd.

MOURA, E. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e laboratório.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, SP. 2010.

MOURA, W. A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto.** Tese de Doutorado. Programa de pós-graduação em engenharia civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS. 2000.

MOURÃO, F. A. L., (2003). **Misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA.** Dissertação de mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

MULLER, A. S.; CASTRO FILHO, F. J. (2008). **Uso do rejeito do beneficiamento do minério de cobre na produção de concreto para elementos pré-moldados.** Monografia de especialização. UFPA, Parauapebas/PA.

PAMPLONA, T. F.; NUÑES, J. Y.; FAXINA, A. L. Desenvolvimentos recentes em ensaios de fadiga em ligantes asfálticos. **Revista Transportes.** v. 22, n. 2, 2014. Pag 12-25

PATRIOTA, M. B. **Análise Laboratorial de Concreto Betuminoso Usinado a Quente Modificado com Adição de Borracha Reciclada de Pneus – Processo Seco.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco; 2004.

PILATI, F. **Análise dos efeitos da borracha moída de pneu e do resíduo do óleo de xisto sobre algumas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, SP. 2008.

PINTO, S. (1991). **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 477p.

PRADO JR., C. **Formação do Brasil contemporâneo: colônia**. São Paulo: Brasiliense, 2004.

RAAD, L.; SABOUNDJIAN, S.; MINASSIAN, G. Field aging effects on fatigue on asphalt concrete and asphalt rubber concrete. **In: Transportation Reserch Record, 2001**.

READ, J. M.; COLLOP, A. C. Pratical fatigue characterization of betuminous paving mixtures. **Journal of the Association of Asphalt Paving**. V66. p74-101. St Paul, 1997.

RIBEIRO, J. A .S. **Balanço Mineral Brasileiro**. Brasília, 2001.

RODRIGUES, P.R. **Introdução ao Sistema de Transporte no Brasil e à Logística Internacional**. 4 ed. São Paulo: Aduaneiras, 2007.

SANTOS, C. R. G. **Avaliação das influencias do tipo de ligante e do volume de vazios na vida a fadiga de algumas misturas asfálticas**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, SP. 2005.

SANTOS, G. P. **Um Estudo Sobre a Utilização da Escória de Ferroníquel em Pavimentação Rodoviária**. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, RJ. 2013. 124 p.

SANTOS, M. G. R. **Estudo do comportamento de agregados sintéticos de argila calcinada para uso em revestimentos asfálticos para Manaus**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, DF. 2007.

SENE, T. **Economia Política Internacional, Transporte e as Origens da (Des) Articulação Territorial no Brasil**. Rio de Janeiro, 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

SOARES, J.B.; MOTTA L.M.; PAIVA, J.A.; BRANCO J.V. Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com variação de granulometria e de CAP. **In: 15º Encontro de Asfalto – IBP**.

SOUSA, J.B.; CRAUS, J.; MONISMITH, C.L. Summary report on permanent deformation in asphalt concrete. **SHRP-A/IR-91-104 Strategic Highway Research Program. National Research Council**. Washington D.C. 120p. 1991.

SOUSA, F. L. A localização da indústria de transformação brasileira nas últimas três décadas. **In: II Encontro Da Associação Brasileira De Estudos Regionais**, São Paulo, 2002. Anais. São Paulo.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneu**. Tese de Doutorado. PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, RS. 2004

STEFENON, F. **Incorporação de resíduos industriais em concreto betuminoso usinado à quente**. Dissertação de Mestrado. PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, RS. 2003.

TANGELLA, S.C.; CRAUS, F. DEACON, J.A.; MONISMITH, C.L. **Summary reports. fatigue response of asphalt mixture**. SHRP. TM-UCB-A-003A-89-3. Berkeley, 1990. 158p.

TONIAL, I.A.; MOTTA, L.M.G.; MEDINA, J. SOUZA, A.M. Características da fadiga e resiliência de concretos asfálticos brasileiros. **In: 33ª Reunião annual de pavimentação**. Florianópolis, SC. 2001.

WHITEOAK, D. **Shell Betumen Handbook**. Inglaterra. Ed. Shell, 1990.

WITCZAK, M. W. e MIRZA, M. W., 1995, "Development of global aging system for short and long term aging of asphalt cements". **In: Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 64.

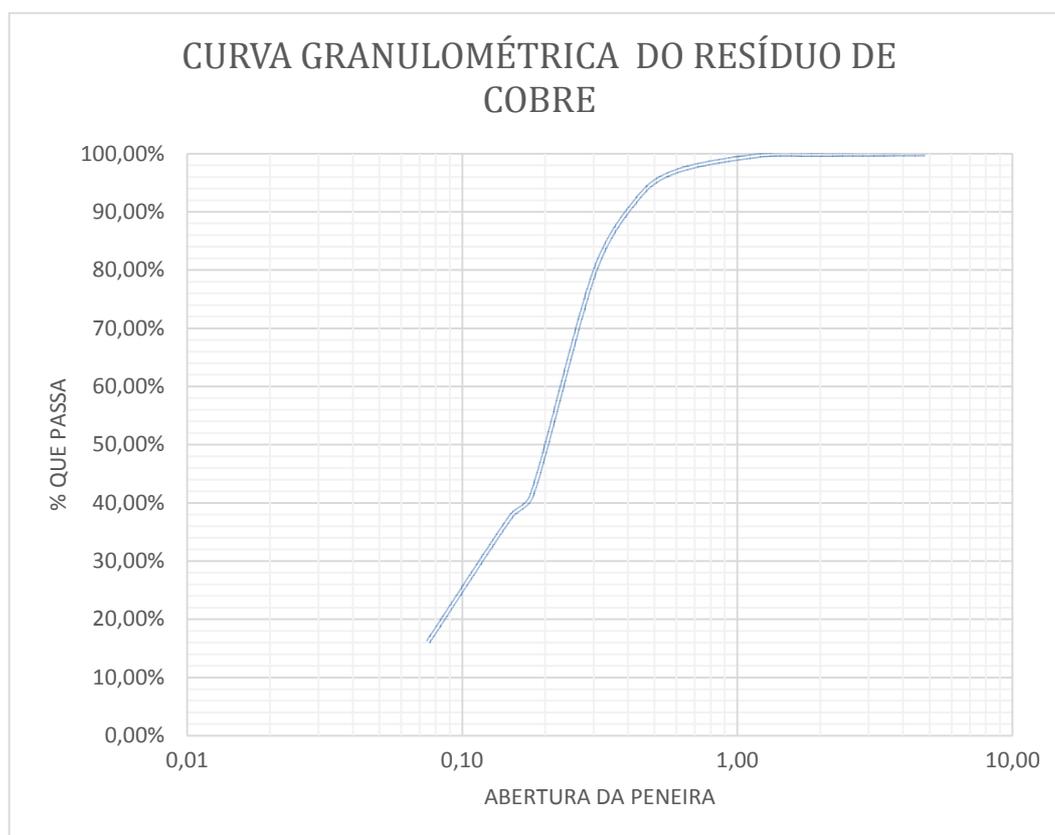
VASCONCELLOS, Marco Antônio Sandoval de; GARCIA, Manuel Enriquez. **Fundamentos de Economia**. São Paulo: Saraiva, 1998.

VOIGT, F. **Economia de los Sistemas de Transporte**. Fondo de Cultura Económica, Ciudad de México, 1964.

ZHANG, F., & HU, C. (2015). The Research for Structural Characteristics and Modification Mechanism of Crumb Rubber Compound Modified Asphalt. **Construction and Building Materials**, 76, 330-342.

**ANEXO I**  
**CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS**

| GRANULOMETRIA DO RESÍDUO DE COBRE        |       |             |                    |                       |                          |
|--|-------|-------------|--------------------|-----------------------|--------------------------|
| Procedimento de Ensaio: DNER - ME 083/98 |       |             |                    |                       |                          |
| Procedencia: Parauapebas                 |       |             |                    |                       |                          |
| Peneira                                  |       | Peso Retido | Porcentagem Retida | Porcentagem que Passa | Porcentagem Retida Acum. |
| Nº                                       | mm    |             |                    |                       |                          |
| 4  | 4,80  | 0,00        | 0,00%              | 100,00%               | 0,00%                    |
| 10                                       | 2,00  | 1,39        | 0,14%              | 99,86%                | 0,14%                    |
| 16                                       | 1,19  | 2,12        | 0,21%              | 99,65%                | 0,35%                    |
| 30                                       | 0,59  | 28,02       | 2,80%              | 96,85%                | 3,15%                    |
| 40                                       | 0,42  | 54,01       | 5,40%              | 91,45%                | 8,55%                    |
| 50                                       | 0,30  | 122,57      | 12,26%             | 79,19%                | 20,81%                   |
| 80                                       | 0,18  | 375,85      | 37,58%             | 41,61%                | 58,40%                   |
| 100                                      | 0,15  | 39,81       | 3,98%              | 37,62%                | 62,38%                   |
| 200                                      | 0,075 | 215,52      | 21,55%             | 16,07%                | 83,93%                   |

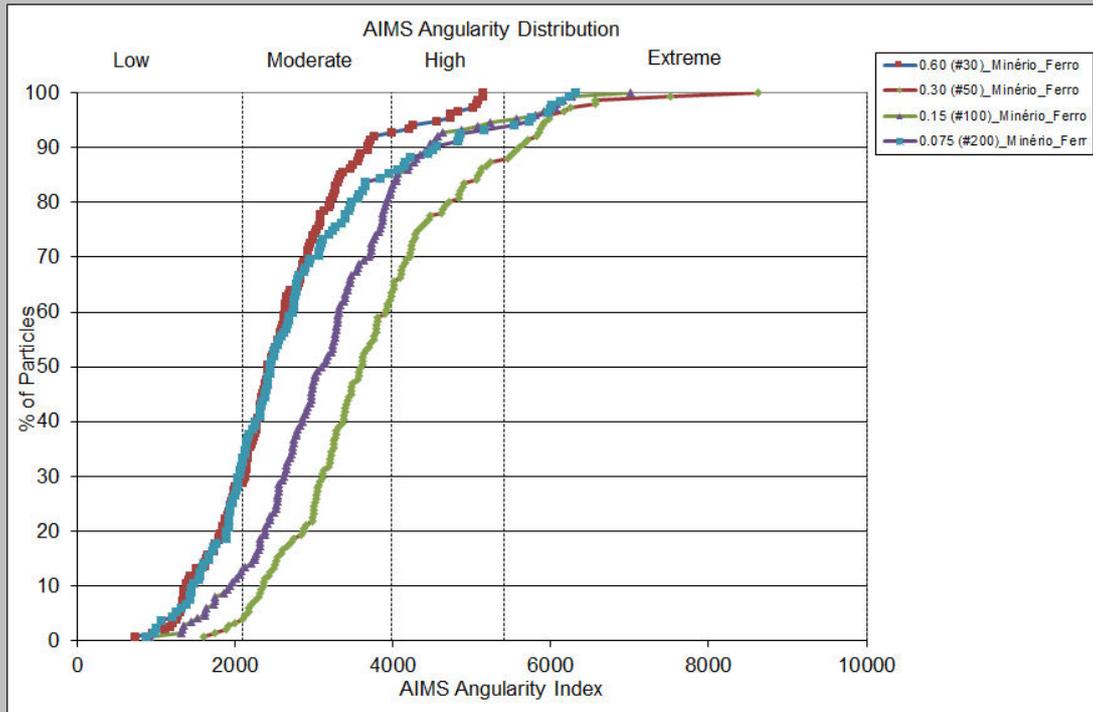


| <b>TEOR DE MATERIAL PULVERULENTO DO RESÍDUO DE COBRE</b> |                  |                  |
|--|------------------|------------------|
| <b>Procedimento de Ensaio: DNER - ME 266/97</b>          |                  |                  |
| <b>Procedencia: Canaã dos Carajás</b>                    |                  |                  |
| <b>Dados</b>   | <b>Amostra 1</b> | <b>Amostra 2</b> |
| Massa Seca (g)   | 1.000,00         | 1.000,00         |
| Massa Retida # 200                                       | 839,13           | 841,32           |
| Teor de Pulverulento                                     | 16,09%           | 15,87%           |
| <b>MÉDIA</b>   | <b>15,98%</b>    |                  |

| <b>EQUIVALENTE DE AREIA DO RESÍDUO DE COBRE</b> |                  |                  |                  |
|---|------------------|------------------|------------------|
| <b>Procedimento de Ensaio: DNER - ME 054/97</b> |                  |                  |                  |
| <b>Procedencia: Canaã dos Carajás</b>           |                  |                  |                  |
| <b>Dados</b>                                    | <b>Amostra 1</b> | <b>Amostra 2</b> | <b>Amostra 3</b> |
| Altura de Argila (mm)                           | 136,00           | 135,00           | 136,00           |
| Altura de Areia (mm)                            | 103,00           | 103,00           | 102,00           |
| Equivalente de Areia                            | 75,74%           | 76,30%           | 75,00%           |
| <b>MÉDIA</b>                                    | <b>75,68%</b>    |                  |                  |

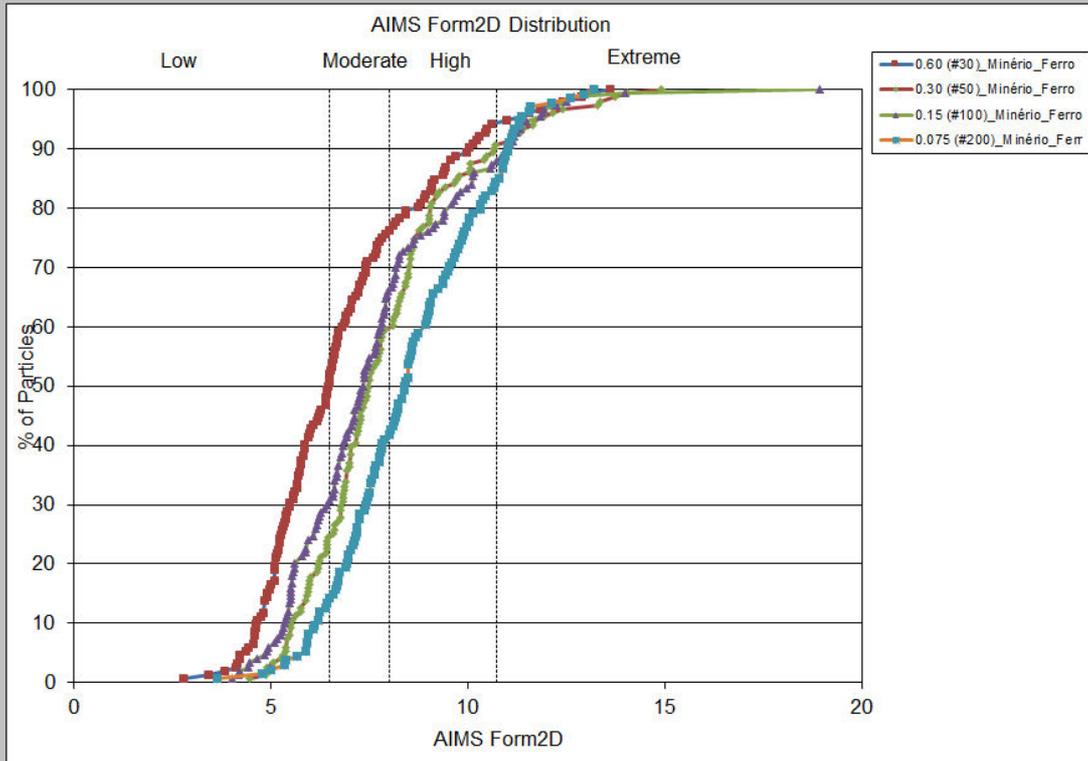
|                        |               |                                   |             |              |
|------------------------|---------------|-----------------------------------|-------------|--------------|
| <b>AIMS Angularity</b> | Project Name: | Minério_Ferro                     | Date:       | 9/27/16      |
|                        | Workbook:     | Residuo_Cobre_AIMS_Stockpile.xlsm | Technician: | Allan_Moreno |
|                        | Description:  |                                   |             |              |

|                         | #      | %     | Cum. %             | #                 | %         |
|-------------------------|--------|-------|--------------------|-------------------|-----------|
| Particles in Range      | 589    |       |                    |                   |           |
| Average                 | 3093,2 |       |                    |                   |           |
| Std. Deviation          | 1208,1 |       |                    |                   |           |
| Median                  | 2916,8 |       |                    |                   |           |
| Mode                    | 1062,7 |       |                    |                   |           |
| Low ( ≤ 2100)           | 114    | 19,4% | ( ≤ 2100 ) 19,4%   | -σ < n < σ        | 431 73,2% |
| Moderate ( 2100 - 3975) | 361    | 61,3% | ( ≤ 3975 ) 80,6%   | -2σ < n < 2σ      | 555 94,2% |
| High ( 3975 - 5400)     | 78     | 13,2% | ( ≤ 5400 ) 93,9%   | -3σ < n < 3σ      | 586 99,5% |
| Extreme ( 5400 - 10000) | 36     | 6,1%  | ( ≤ 10000 ) 100,0% | n < -3σ or n > 3σ | 3 0,5%    |
| Out of Range            | 17     |       |                    |                   |           |

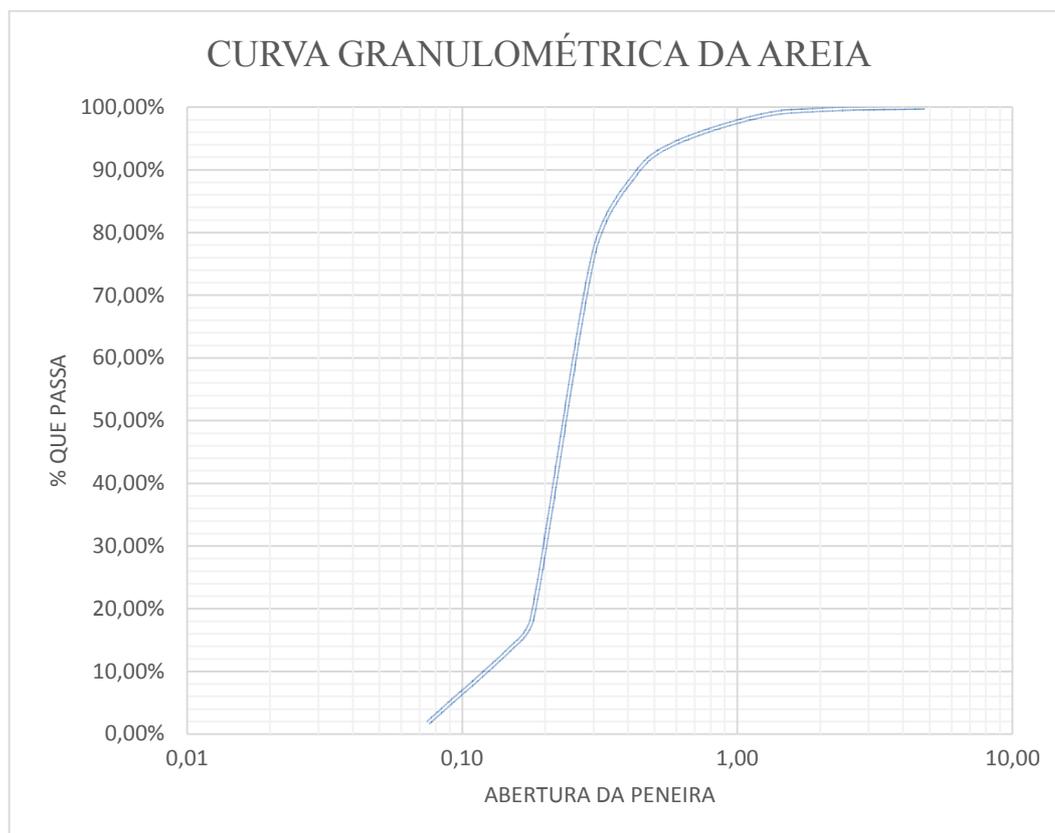


|                    |               |                                   |             |              |
|--------------------|---------------|-----------------------------------|-------------|--------------|
| <b>AIMS Form2D</b> | Project Name: | Minério_Ferro                     | Date:       | 9/27/16      |
|                    | Workbook:     | Residuo_Cobre_AIMS_Stockpile.xlsm | Technician: | Allan_Moreno |
|                    | Description:  |                                   |             |              |

|                    | #    | %                     | Cum. %      | #   | %     |
|--------------------|------|-----------------------|-------------|-----|-------|
| Particles in Range | 587  |                       | ( ≤ 6,5 )   | 392 | 66,8% |
| Average:           | 7,74 | Low ( ≤ 6,5 )         | ( ≤ 8 )     | 564 | 96,1% |
| Std. Deviation     | 2,15 | Moderate ( 6,5 - 8 )  | ( ≤ 10,75 ) | 585 | 99,7% |
| Median             | 7,40 | High( 8 - 10,75 )     | ( ≤ 20 )    | 2   | 0,3%  |
| Mode               | 5,96 | Extreme( 10,75 - 20 ) |             |     |       |
|                    |      | Out of Range          |             |     |       |



| <b>GRANULOMETRIA DA AREIA</b>                   |           |                    |                           |                              |                                 |
|---|-----------|--------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| <b>Procedimento de Ensaio: DNER - ME 083/98</b> |           |                    |                           |                              |                                 |
| <b>Procedencia: Ourém</b>                       |           |                    |                           |                              |                                 |
| <b>Peneira</b>                                  |           | <b>Peso Retido</b> | <b>Porcentagem Retida</b> | <b>Porcentagem que Passa</b> | <b>Porcentagem Retida Acum.</b> |
| <b>Nº</b>                                       | <b>mm</b> |                    |                           |                              |                                 |
| 4   | 4,80      | 0,00               | 0,00%                     | 100,00%                      | 0,00%                           |
| 10  | 2,00      | 4,19               | 0,42%                     | 99,58%                       | 0,42%                           |
| 16  | 1,19      | 10,61              | 1,06%                     | 98,52%                       | 1,48%                           |
| 30  | 0,59      | 43,24              | 4,32%                     | 94,20%                       | 5,80%                           |
| 40  | 0,42      | 52,41              | 5,24%                     | 88,96%                       | 11,04%                          |
| 50  | 0,30      | 124,33             | 12,43%                    | 76,52%                       | 23,48%                          |
| 80  | 0,18      | 578,22             | 57,82%                    | 18,70%                       | 81,30%                          |
| 100   | 0,15      | 49,98              | 5,00%                     | 13,70%                       | 86,30%                          |
| 200   | 0,075     | 119,07             | 11,91%                    | 1,80%                        | 98,20%                          |



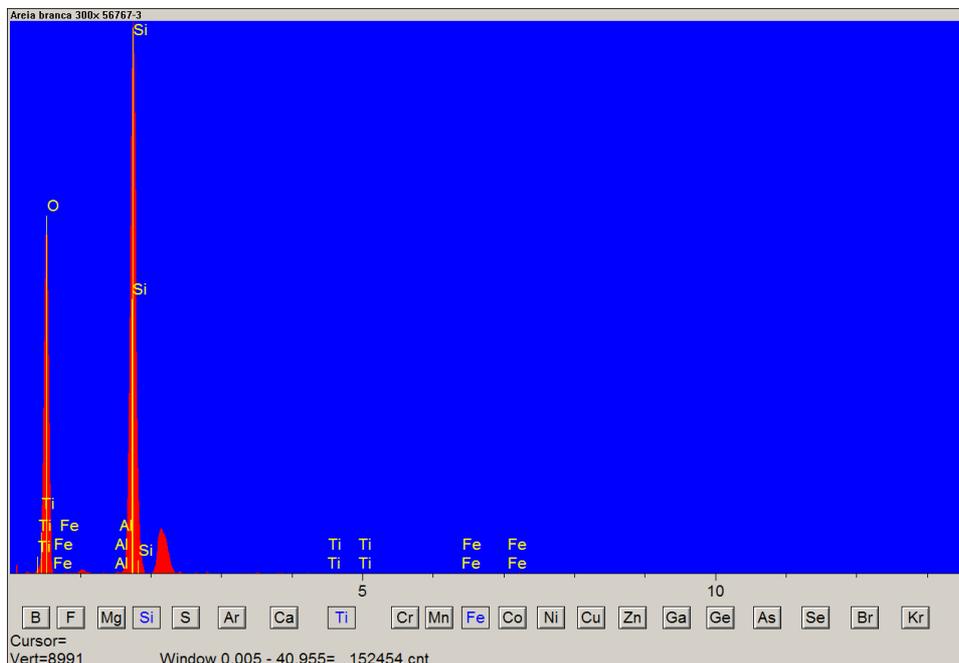
**TEOR DE MATERIAL PULVERULENTO DA AREIA**

**Procedimento de Ensaio: DNER - ME 266/97**

| <b>Procedencia: Ourém</b> |                  |                  |
|---------------------------|------------------|------------------|
| <b>Dados</b>              | <b>Amostra 1</b> | <b>Amostra 2</b> |
| Massa Seca (g)            | 1.000,00         | 1.000,00         |
| Massa Retida # 200        | 988,36           | 981,85           |
| Teor de Pulverulento      | 1,16%            | 1,82%            |
| <b>MÉDIA</b>              | <b>1,49%</b>     |                  |

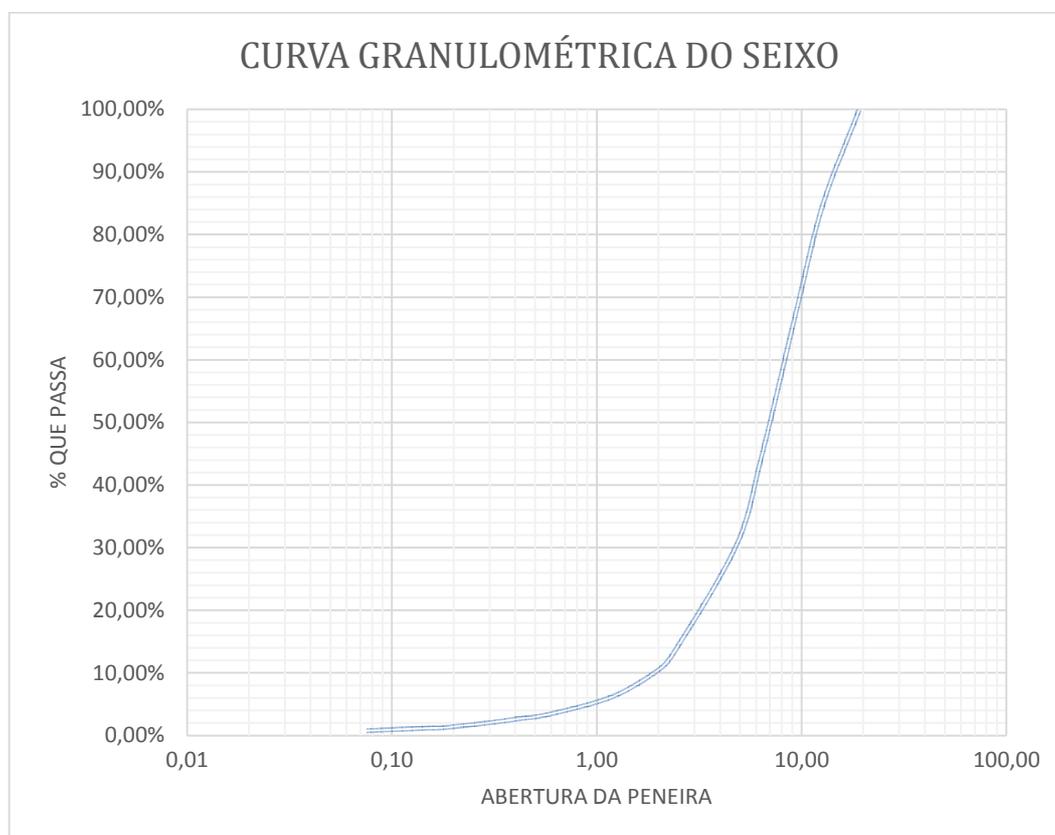
| <b>EQUIVALENTE DE AREIA DA AREIA</b>            |                  |                  |                  |
|---|------------------|------------------|------------------|
| <b>Procedimento de Ensaio: DNER - ME 054/97</b> |                  |                  |                  |
| <b>Procedencia: Ourém</b>                       |                  |                  |                  |
| <b>Dados</b>                                    | <b>Amostra 1</b> | <b>Amostra 2</b> | <b>Amostra 3</b> |
| Altura de Argila (mm)                           | 111,00           | 116,00           | 120,50           |
| Altura de Areia (mm)                            | 111,00           | 111,00           | 116,00           |
| Equivalente de Areia                            | 100,00%          | 95,69%           | 96,27%           |
| <b>MÉDIA</b>                                    | <b>97,32%</b>    |                  |                  |

- EDS da areia



| <b>GRANULOMETRIA DO SEIXO</b>                   |                    |  |  |  |
|---|--------------------|--|--|--|
| <b>Procedimento de Ensaio: DNER - ME 083/98</b> |                    |  |  |  |
| <b>Procedencia:</b>                             |                    |  |  |  |
| <b>Peneira</b>                                  | <b>Peso Retido</b> |  |  |  |
|   |                    |  |  |  |

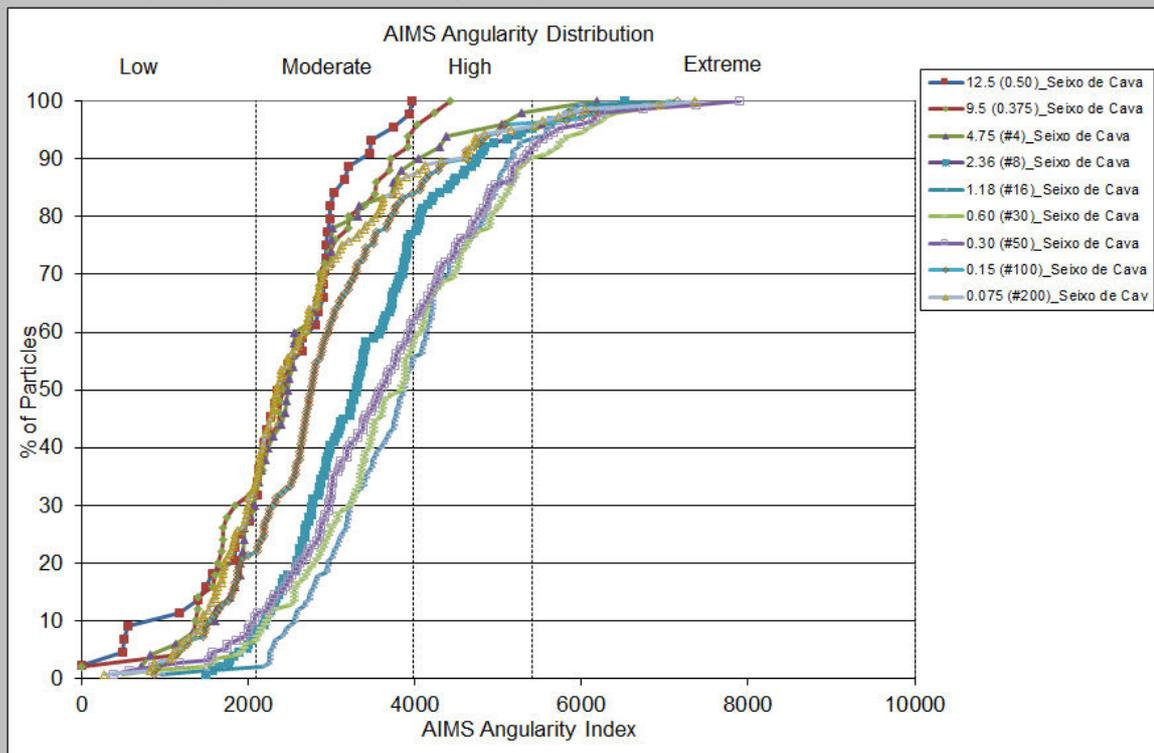
| Nº   | mm    |         | Porcentagem Retida | Porcentagem que Passa | Porcentagem Retida Acum. |
|------|-------|---------|--------------------|-----------------------|--------------------------|
| 3/4" | 19,10 | 4,93    | 0,10%              | 99,90%                | 0,10%                    |
| 1/2" | 12,70 | 756,24  | 15,12%             | 84,78%                | 15,12%                   |
| 3/8" | 9,50  | 827,80  | 16,56%             | 68,22%                | 16,56%                   |
| 1/4" | 6,35  | 1195,07 | 23,90%             | 44,32%                | 23,90%                   |
| 4    | 4,80  | 698,07  | 13,96%             | 30,36%                | 13,96%                   |
| 8    | 2,38  | 855,33  | 17,11%             | 13,25%                | 17,11%                   |
| 10   | 2,00  | 139,30  | 2,79%              | 10,47%                | 16,75%                   |
| 16   | 1,19  | 213,75  | 4,27%              | 6,19%                 | 21,02%                   |
| 30   | 0,59  | 138,63  | 2,77%              | 3,42%                 | 23,79%                   |
| 40   | 0,42  | 36,15   | 0,72%              | 2,70%                 | 24,52%                   |
| 50   | 0,30  | 32,29   | 0,65%              | 2,05%                 | 25,16%                   |
| 80   | 0,18  | 39,21   | 0,78%              | 1,27%                 | 25,95%                   |
| 100  | 0,15  | 4,45    | 0,09%              | 1,18%                 | 26,04%                   |
| 200  | 0,075 | 20,79   | 0,42%              | 0,76%                 | 26,45%                   |



| <b>TEOR DE MATERIAL PULVERULENTO DO SEIXO</b>   |                  |                  |
|---|------------------|------------------|
| <b>Procedimento de Ensaio: DNER - ME 266/97</b> |                  |                  |
| <b>Procedencia: Ourém/PA</b>                    |                  |                  |
| <b>Dados</b>                                    | <b>Amostra 1</b> | <b>Amostra 2</b> |
| Massa Seca (g)                                  | 5.000,00         | 5.000,00         |
| Massa Retida # 200                              | 4958,00          | 4971,80          |
| Teor de Pulverulento                            | 0,84%            | 0,56%            |
| <b>MÉDIA</b>                                    | <b>0,70%</b>     |                  |

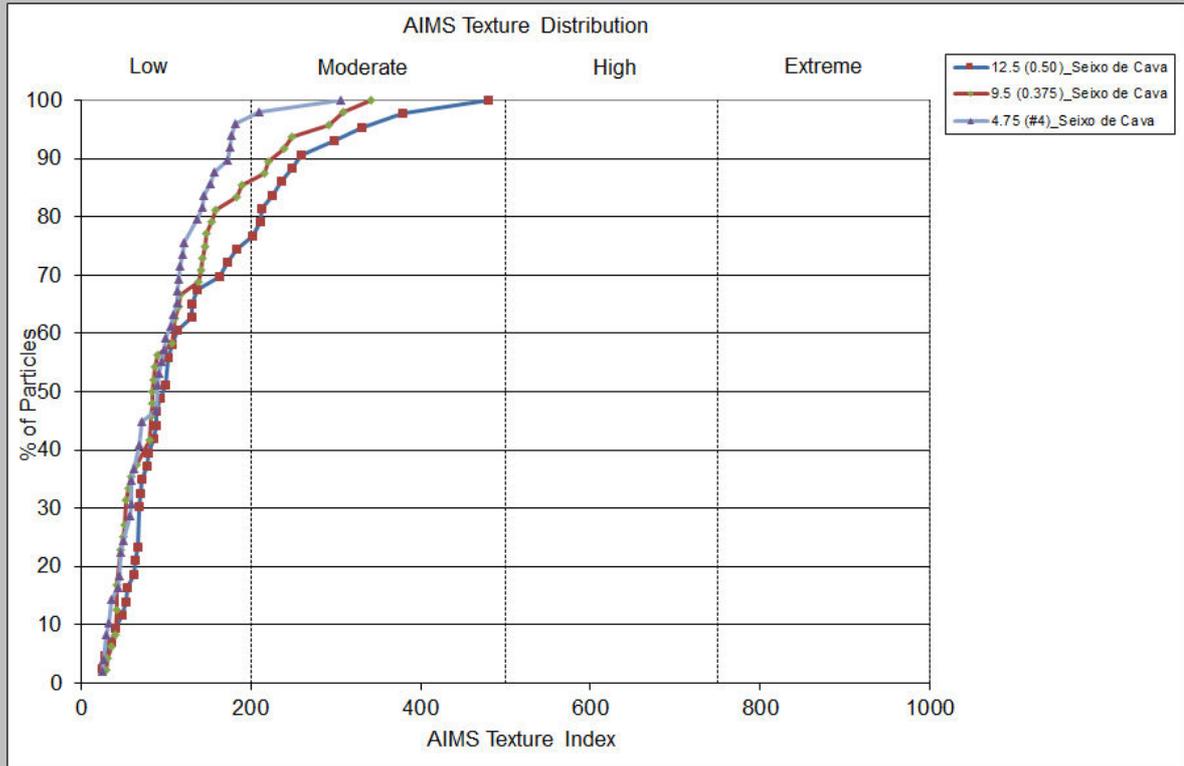
|                        |               |                                  |             |        |
|------------------------|---------------|----------------------------------|-------------|--------|
| <b>AIMS Angularity</b> | Project Name: | Seixo Rolado                     | Date:       | 7/6/15 |
|                        | Workbook:     | Seixo_Rolado_AIMS_Stockpile.xlsm | Technician: | CFSCS  |
|                        | Description:  |                                  |             |        |

|                          | #      | %     | Cum. %             | #                 | %          |
|--------------------------|--------|-------|--------------------|-------------------|------------|
| Particles in Range       | 1043   |       |                    |                   |            |
| Average                  | 3281,4 |       |                    |                   |            |
| Std. Deviation           | 1254,2 |       |                    |                   |            |
| Median                   | 3107,9 |       |                    |                   |            |
| Mode                     | 2205,8 |       |                    |                   |            |
| Low ( ≤ 2100 )           | 166    | 15,9% | ( ≤ 2100 ) 15,9%   | -σ < n < σ        | 719 68,9%  |
| Moderate ( 2100 - 3975 ) | 600    | 57,5% | ( ≤ 3975 ) 73,4%   | -2σ < n < 2σ      | 996 95,5%  |
| High ( 3975 - 5400 )     | 217    | 20,8% | ( ≤ 5400 ) 94,2%   | -3σ < n < 3σ      | 1037 99,4% |
| Extreme ( 5400 - 10000 ) | 60     | 5,8%  | ( ≤ 10000 ) 100,0% | n < -3σ or n > 3σ | 6 0,6%     |
| Out of Range             | 11     |       |                    |                   |            |



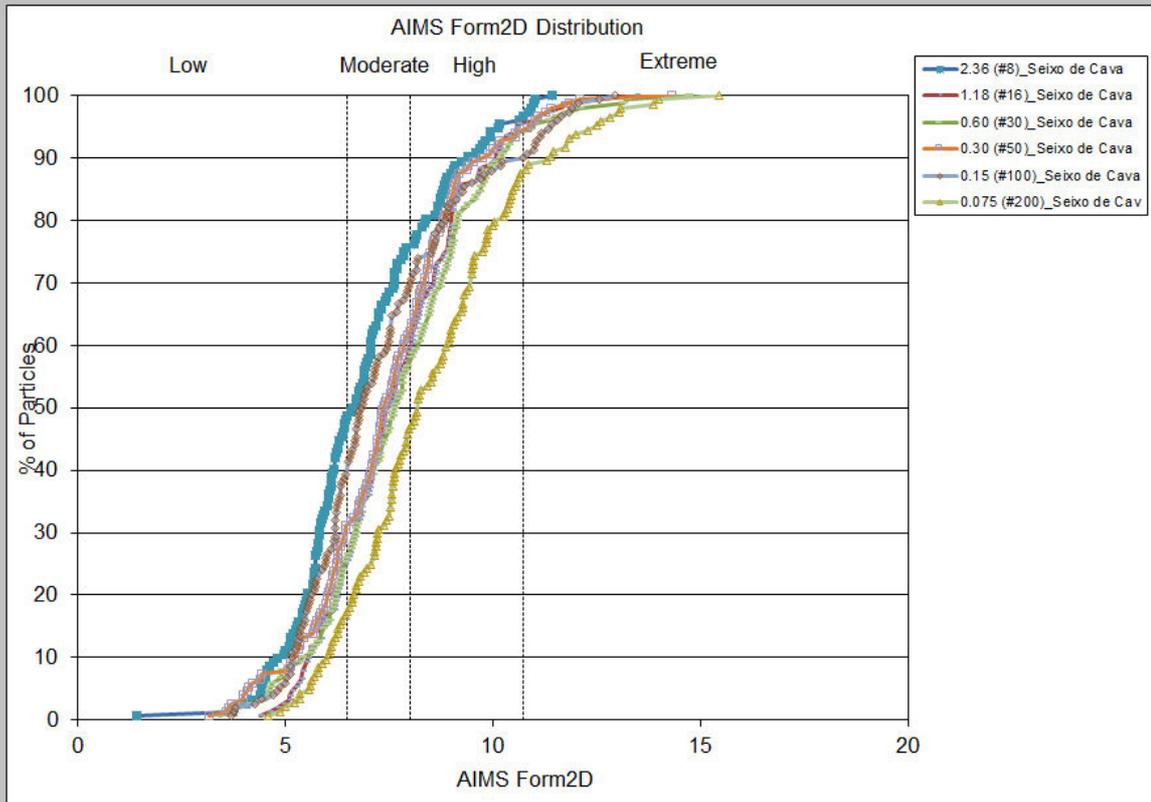
|                     |               |                                  |             |        |
|---------------------|---------------|----------------------------------|-------------|--------|
| <b>AIMS Texture</b> | Project Name: | Seixo Rolado                     | Date:       | 7/6/15 |
|                     | Workbook:     | Seixo_Rolado_AIMS_Stockpile.xlsm | Technician: | CFSCS  |
|                     | Description:  |                                  |             |        |

|                    | #     | % | Cum. % |                                 | #   | %      |
|--------------------|-------|---|--------|---------------------------------|-----|--------|
| Particles in Range | 140   |   |        | Low ( ≤ 200 )                   | 120 | 85,7%  |
| Average            | 114,7 |   |        | Moderate ( 200 - 500 )          | 20  | 14,3%  |
| Std. Deviation     | 80,5  |   |        | High ( 500 - 750 )              | 0   | 0,0%   |
| Median             | 90,9  |   |        | Extreme ( 750 - 1000 )          | 0   | 0,0%   |
| Mode               | 68,8  |   |        | Out of Range                    | 4   |        |
|                    |       |   |        | ( ≤ 200 )                       |     | 85,7%  |
|                    |       |   |        | ( ≤ 500 )                       |     | 100,0% |
|                    |       |   |        | ( ≤ 750 )                       |     | 100,0% |
|                    |       |   |        | ( ≤ 1000 )                      |     | 100,0% |
|                    |       |   |        | $-\sigma < n < \sigma$          | 111 | 79,3%  |
|                    |       |   |        | $-2\sigma < n < 2\sigma$        | 132 | 94,3%  |
|                    |       |   |        | $-3\sigma < n < 3\sigma$        | 138 | 98,6%  |
|                    |       |   |        | $n < -3\sigma$ or $n > 3\sigma$ | 2   | 1,4%   |



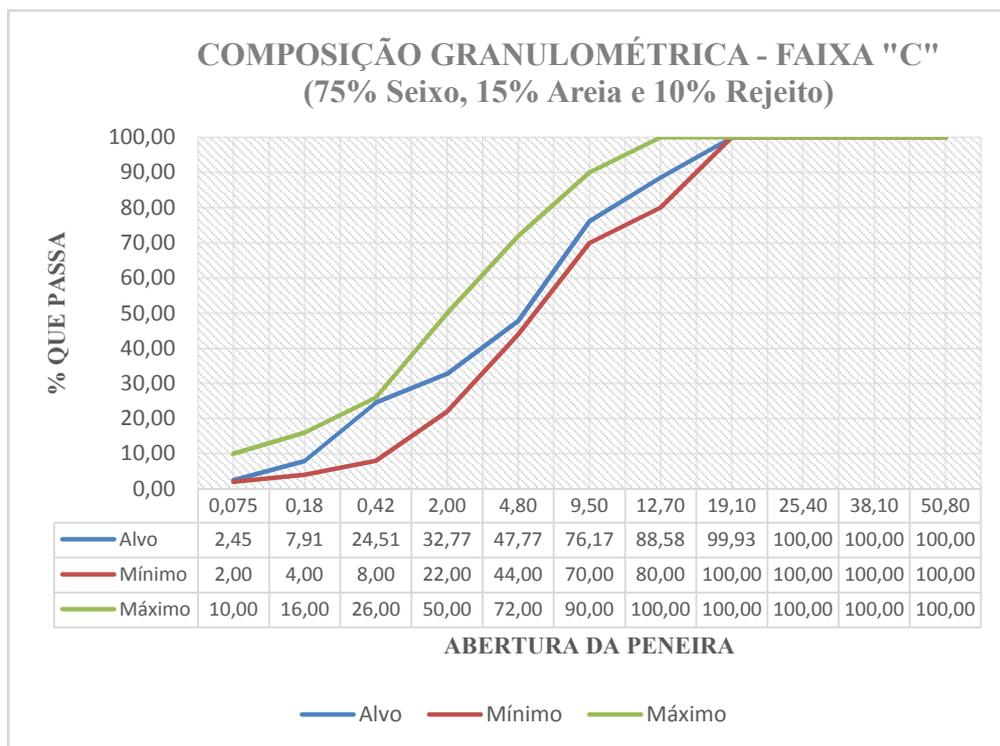
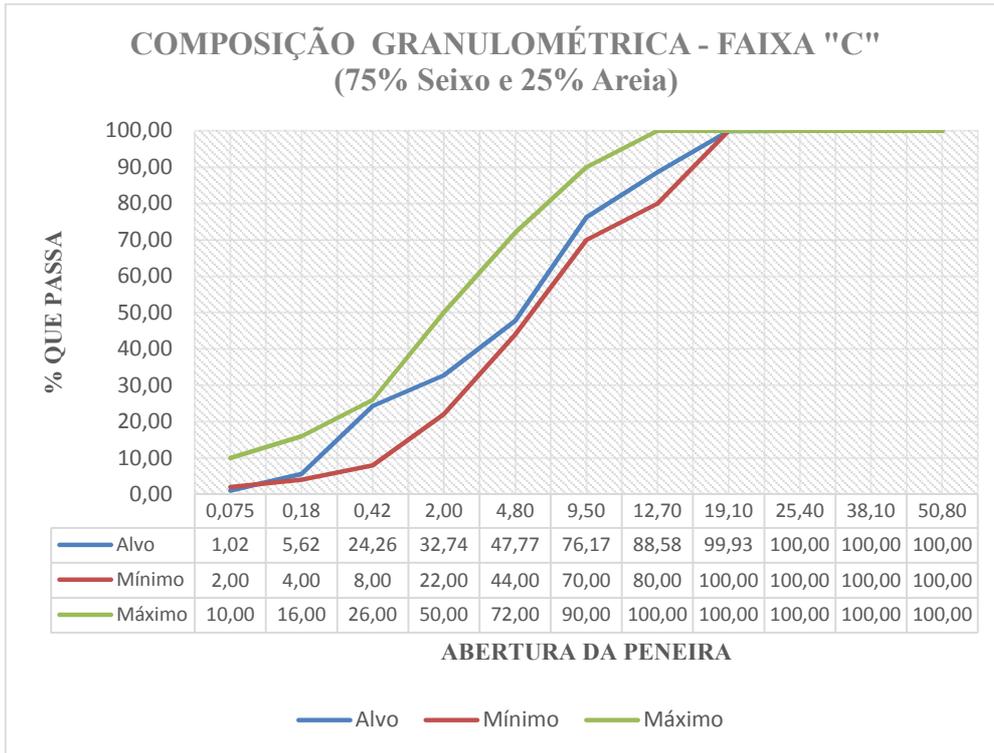
|                    |               |                                  |             |        |
|--------------------|---------------|----------------------------------|-------------|--------|
| <b>AIMS Form2D</b> | Project Name: | Seixo_Rolado                     | Date:       | 7/6/15 |
|                    | Workbook:     | Seixo_Rolado_AIMS_Stockpile.xlsm | Technician: | CFSCS  |
|                    | Description:  |                                  |             |        |

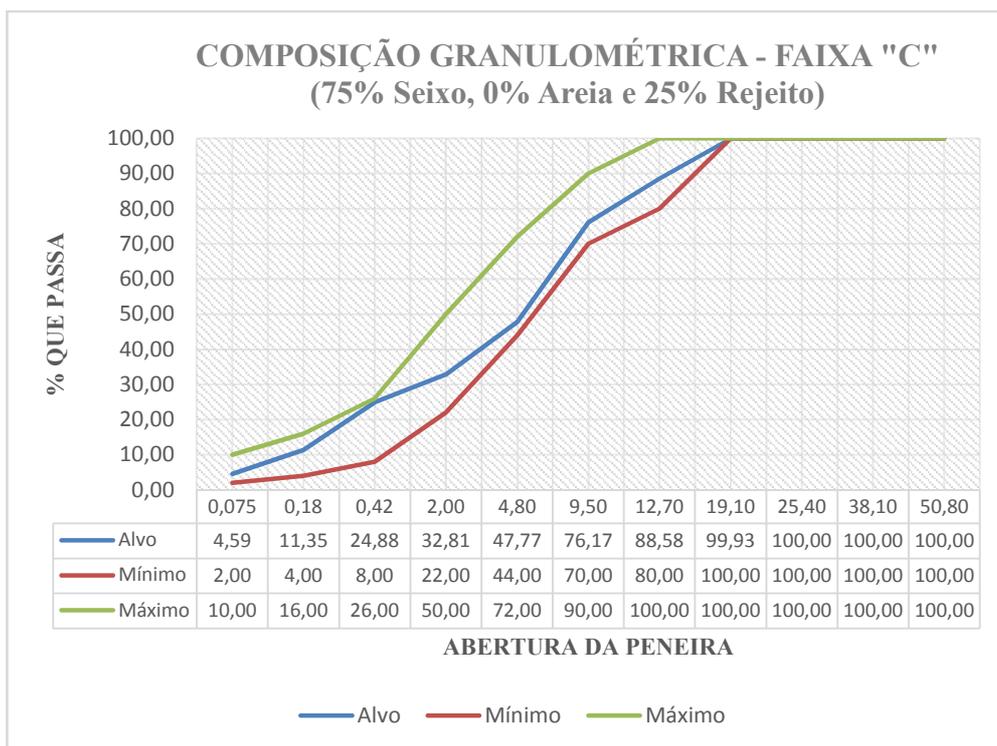
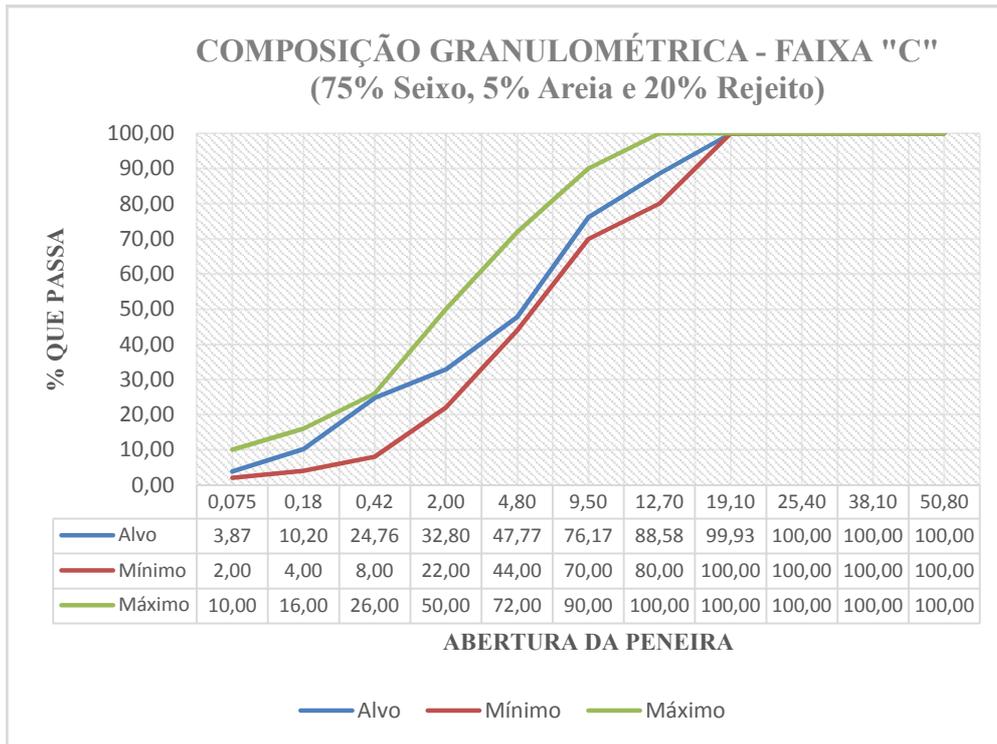
|                    | #    | % | Cum. %      |                                 | #   | %     |
|--------------------|------|---|-------------|---------------------------------|-----|-------|
| Particles in Range | 900  |   |             | Low ( ≤ 6,5 )                   | 283 | 31,4% |
| Average:           | 7,62 |   |             | Moderate ( 6,5 - 8 )            | 272 | 30,2% |
| Std. Deviation     | 1,95 |   |             | High( 8 - 10,75 )               | 282 | 31,3% |
| Median             | 7,40 |   |             | Extreme( 10,75 - 20 )           | 63  | 7,0%  |
| Mode               | 6,20 |   |             | Out of Range                    | 10  |       |
|                    |      |   | ( ≤ 6,5 )   |                                 |     |       |
|                    |      |   | ( ≤ 8 )     |                                 |     |       |
|                    |      |   | ( ≤ 10,75 ) |                                 |     |       |
|                    |      |   | ( ≤ 20 )    |                                 |     |       |
|                    |      |   |             | $-\sigma < n < \sigma$          | 638 | 70,9% |
|                    |      |   |             | $-2\sigma < n < 2\sigma$        | 858 | 95,3% |
|                    |      |   |             | $-3\sigma < n < 3\sigma$        | 893 | 99,2% |
|                    |      |   |             | $n < -3\sigma$ or $n > 3\sigma$ | 7   | 0,8%  |





**ANEXO II**  
**DOSAGEM DAS MISTURAS**







**ANEXO III**  
**PARÂMETROS MARSHALL**

