

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Estudo da resistência e da rigidez de uma mistura de material
fresado asfáltico e pó-de-pedra com a adição de cimento**

Eduardo Pasche

Porto Alegre
2016

EDUARDO PASCHE

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA E DA RIGIDEZ DE UMA
MISTURA DE MATERIAL FRESADO E PÓ-DE-PEDRA COM
A ADIÇÃO DE CIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Porto Alegre
2016

CIP - Catalogação na Publicação

Pasche, Eduardo

Estudo da resistência e da rigidez de uma mistura de material fresado e pó-de-pedra com a adição de cimento / Eduardo Pasche. -- 2016.

173 f.

Orientador: Nilo Cezar Consoli.

Coorientador: Luciano Pivoto Specht.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2016.

1. material fresado. 2. estabilização química. 3. relação vazios/cimento. I. Consoli, Nilo Cezar, orient. II. Pivoto Specht, Luciano, coorient. III. Título.

EDUARDO PASCHE

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA E DA RIGIDEZ DE UMA
MISTURA DE MATERIAL FRESADO E PÓ-DE-PEDRA COM
A ADIÇÃO DE CIMENTO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 05 de Agosto de 2016.

Prof. Nilo Cesar Consoli
Ph.D. Concordia University, Canadá
Orientador

Prof. Luciano Pivoto Specht
Dr. pela UFRGS
Coorientador

Prof. Carlos Torres Formoso
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Fernando Schnaid (UFRGS)
Ph.D. pela University of Oxford, Inglaterra

Prof. Francisco Dalla Rosa (UPF)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Lucas Festugato (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, irmãs, familiares e a
minha namorada, por todo apoio, incentivo e
principalmente amor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer meus pais, pelo incentivo e pela confiança que depositaram em mim, pois sem eles essa conquista não teria se realizado. A minha namorada Eloisa, pelo apoio, carinho, dedicação e até ajuda na moldagem final, Te amo!

Ao Professor Nilo Consoli, pela orientação prestada, pela disponibilidade de tempo, e que sempre esteve pronto para me atender. Ao Professor Luciano P. Specht, que me iniciou nas pesquisas acadêmicas e me tornou apaixonado pela pavimentação, além de ser um ótimo coorientador, que sempre me instigou a buscar sempre mais.

A Marina, Thaís e Guilherme que me mostraram que são muito mais que colegas e sim amigos, que ajudaram para que esse tempo do mestrado fosse mais divertido. Ao colega Mario que me mostrou que a busca pelo amor é importante e ao Luís que me um pouco do Paraguai. Aos amigos Fernando Boeira e Mateus Tansky, que me auxiliaram com os ensaios e poso em Santa Maria, serei eternamente grato.

Aos amigos e colegas de pesquisa Gabriel e Lorenzo, que sem a ajuda deles, não teria conseguido realizar sozinho esse trabalho. Ao laboratorista João pelo auxílio durante a realização dos ensaios e coleta do material. Aos amigos do LEGG, pelos cafés e conversas.

Ao Laboratório LMCC da UFSM, pela realização dos ensaios na pesquisa e ao Grupo GEPPASV da UFSM pelas conversas e amizades. Ao LEC da UNIJUÍ pela realização dos ensaios na pesquisa, em especial ao colega Ricardo Fengler pela ajuda.

Meus sinceros agradecimentos a Capes e ao CNPq pela concessão de bolsas de estudo que possibilitou a minha total dedicação aos meus estudos para alcançar esse objetivo.

Enfim gostaria de agradecer profundamente a todos que de alguma forma contribuíram com este trabalho, principalmente todos os professores da UFRGS seja por orientação técnica, ou por amizade.

Homens com um intelecto mais aberto sabem que não
existe uma distinção clara entre o real e o irreal

H.P. Lovecraft

RESUMO

PASCHE, E. **Estudo da resistência e da rigidez de uma mistura de material fresado e pó-de-pedra com a adição de cimento**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A malha rodoviária brasileira é elemento fundamental para as cadeias produtivas, pois promove a integração de regiões, estados, portos, ferrovias, hidrovias e aeroportos. A qualidade do pavimento é um dos principais determinantes do desempenho dos usuários durante suas viagens. Uma das formas para a correção dos defeitos nos pavimentos é a restauração, sendo bastante empregada atualmente a fresagem do revestimento asfáltico, que consiste na operação de um corte do revestimento asfáltico, esta atividade produz uma grande quantidade de resíduo nas obras de restauração de rodovias, denominado de material fresado asfáltico ou somente fresado, que é constituído por agregados (grãos e miúdos) e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Esta pesquisa objetivou avaliar, através de ensaios laboratoriais, a viabilidade da utilização de uma mistura de material fresado e pó-de-pedra estabilizados quimicamente com cimento Portland em camadas de pavimentos flexíveis, correlacionando o índice porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}) com parâmetros de rigidez e resistência das misturas. O material fresado é oriundo da BR-290. Foi realizada estabilização granulométrica, sendo determinado o teor de 70% de material fresado e 30% de pó-de-pedra e a estabilização química, com os teores de 3%, 5% e 7%. Foram moldados corpos-de-prova de 10 x 20 cm para ensaios de resistência à compressão e resistência à tração. Para o módulo de resiliência, foram moldados corpos-de-prova de 6,5 x 10 cm e para o módulo complexo foram moldados corpos-de-prova de 10 x 15 cm, todos com 28 dias de cura. A análise dos resultados mostrou que ambas as resistências e módulos estudados aumentam linearmente com o aumento da quantidade de cimento e exponencialmente com a redução da porosidade. Os resultados também mostraram que o material apresenta características viscoelásticas oriundas do material fresado. A relação porosidade/teor volumétrico de cimento ajustado por um coeficiente $[\eta/(C_{iv})^{0,41}]$ mostrou-se adequada na previsão das resistências e módulos para todas as misturas estudadas. O desempenho satisfatório colabora com a possibilidade de abranger os estudos destes materiais.

Palavras-chave: material fresado; estabilização química; relação vazios/cimento.

ABSTRACT

PASCHE, E. **Estudo da resistência e da rigidez de uma mistura de material fresado e pó-de-pedra com a adição de cimento.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The Brazilian highways are fundamental to the productive chain once promote the integration of regions, states, ports, railways, waterways and airports. The quality of the surface is a major determinant of the performance of travelers during their travels. One way to correct the defects in the pavements is the restoration currently being used through milling of the asphalt coating and its reuse. In the operation of a drilling asphalt coating, such activity produces a lot of waste in highway restoration works, called Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), which is composed of aggregates (coarse and fine) and asphalt binder. The use of such material is the main objective of present research, targeting the grain size and chemical stabilization, the latter adding Portland cement. This research aims to evaluate, through laboratory testing, the viability of using a mixture of RAP and powdered rock chemically stabilized with Portland cement for layers in flexible pavements, correlating the porosity/cement ratio (η/C_{iv}) with stiffness and resistance parameters of the mixtures. The RAP used in present research comes from restoration of the BR-290. The grain size stabilization was performed; RAP content being determined as 70% and 30% of powdered rock. The chemical stabilization was carried out with early strength Portland cement contents of 3%, 5% e 7%. Specimens' 10x20 cm were manufactured for the unconfined compressive and splitting tensile tests. For the resilient modulus, specimens had 6.5x10cm and for the dynamic modulus specimens had 10x15 cm. All tests were cured for 28 days. The results showed that both, resistance and modulus increase linearly with increasing amount of cement and exponentially with decreasing of the porosity. The results also show that the material has viscoelastic characteristics originating from the RAP. The relationship between the porosity/cement ratio adjusted by a coefficient [$\eta/(C_{iv})^{0.41}$] proved adequate in predicting resistance and modulus for all studied mixtures. Satisfactory performance corroborates the possibility of covering of the studies of this material.

Keywords: RAP; chemical stabilization; porosity/cement ratio.

SUMÁRIO

| | |
|-----------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 21 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA | 21 |
| 1.2 OBJETIVO GERAL..... | 22 |
| 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 22 |
| 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 22 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA | 24 |
| 2.1 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS..... | 24 |
| 2.1.1 Estabilização granulométrica | 26 |
| 2.1.2 Estabilização química | 27 |
| 2.1.2.1 Estabilização química com cimento | 29 |
| 2.1.2.1.1 Relações entre teor de cimento e vazios..... | 31 |
| 2.2 RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS | 34 |
| 2.3 FRESAGEM..... | 35 |
| 2.3.1 Conceitos Básicos..... | 36 |
| 2.3.2 Tipos | 36 |
| 2.3.2.2 Técnicas de fresagem..... | 37 |
| 2.3.3 Equipamentos utilizados..... | 37 |
| 2.3.3.1 Máquina Fresadora | 37 |
| 2.3.3.2 Cilindro Fresador | 40 |
| 2.3.3.3 Dentes de corte (bits)..... | 41 |
| 2.3.3.4 Correia transportadora | 41 |
| 2.3.3.5 Equipamentos, sistemas e serviços adicionais..... | 41 |
| 2.4 MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS..... | 42 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.1 Reciclagem à quente..... | 43 |
| 2.4.2 Reciclagem à quente in situ..... | 46 |
| 2.4.3 Reciclagem à frio..... | 47 |
| 2.4.4 Reciclagem à frio in situ..... | 47 |
| 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL..... | 49 |
| 3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA..... | 49 |
| 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS..... | 50 |
| 3.2.1 Pó-de-pedra..... | 50 |
| 3.2.2 Cimento..... | 51 |
| 3.2.3 Material fresado asfáltico..... | 51 |
| 3.2.4 Água..... | 52 |
| 3.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS E DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS..... | 52 |
| 3.3.1 Caracterização dos materiais..... | 52 |
| 3.3.1.1 Análise granulométrica..... | 52 |
| 3.3.1.2 Teor de ligante..... | 53 |
| 3.3.1.3 Massa específica e absorção de água dos materiais..... | 56 |
| 3.3.1.4 Massa específica – metodologia Rice..... | 59 |
| 3.3.1.5 Caracterização do cimento..... | 61 |
| 3.3.2 Caracterização das misturas..... | 61 |
| 3.3.2.1 Dosagem e mistura..... | 61 |
| 3.3.2.2 Compactação Proctor..... | 63 |
| 3.3.2.3 Resistência à Compressão Simples (RCS)..... | 64 |
| 3.3.2.4 Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)..... | 66 |
| 3.3.2.5 Módulo de Resiliência (MR)..... | 68 |
| 3.3.2.6 Módulo Complexo (E*)..... | 70 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4. RESULTADOS | 76 |
| 4.1 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES (RCS) | 76 |
| 4.1.1 Efeito do teor de cimento..... | 77 |
| 4.1.2 Efeito da porosidade | 78 |
| 4.1.3 Relação Vazios/Cimento | 79 |
| 4.1.4 Modo de Ruptura..... | 81 |
| 4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD)..... | 82 |
| 4.2.1 Efeito do teor de cimento..... | 82 |
| 4.2.2 Efeito da porosidade | 84 |
| 4.2.3 Relação Vazios/Cimento | 85 |
| 4.2.4 Modo de Ruptura..... | 87 |
| 4.3 MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)..... | 88 |
| 4.3.1 Efeito do teor de cimento..... | 88 |
| 4.3.2 Efeito da porosidade | 89 |
| 4.3.3 Relação Vazios/Cimento | 91 |
| 4.3.4 Relação MR/RT..... | 93 |
| 4.4 MÓDULO COMPLEXO (E*) | 94 |
| 4.4.1 Efeito do teor de cimento..... | 132 |
| 4.4.2 Efeito da porosidade | 133 |
| 4.4.3 Relação Vazios/Cimento | 134 |
| 4.5 CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS | 138 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAS | 147 |
| 5.1 CONCLUSÕES | 147 |
| 5.1.1 Resistência à compressão simples e a tração por compressão diametral | 147 |
| 5.1.2 Módulo de resiliência | 148 |

| | |
|-------------------------------------------|-----|
| 5.1.3 Módulo complexo..... | 149 |
| 5.1.4 Relação vazios/cimento | 150 |
| 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 150 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 152 |
| APÊNDICE A | 160 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 - Estados físicos de misturas granulométricas | 26 |
| Figura 2.2 - Relação vazios/cimento pela RCS. Adaptado de Larnach (1960)..... | 32 |
| Figura 2.3 - Resistência de pico para ensaios triaxiais e de compressão não confinada | 34 |
| Figura 2.4 - Realização da fresagem em uma rodovia | 36 |
| Figura 2.5 - Fresadora de pequeno porte | 39 |
| Figura 2.6 - Fresadora de médio porte | 39 |
| Figura 2.7 - Fresadora de grande porte | 40 |
| Figura 2.8 - Representação de um rolo de corte com os bits | 40 |
| Figura 2.9 - Sentido de giro do cilindro | 41 |
| Figura 2.10 - Operação de fresagem de um equipamento de grande porte | 42 |
| Figura 2.11 - Representação esquemática de uma usina de asfalto vertical..... | 44 |
| Figura 2.12 - Representação esquemática de uma usina de asfalto do tipo Drum Mixer | 45 |
| Figura 2.13 - Reciclagem a quente in situ com fresagem à quente | 46 |
| Figura 2.14 - Reciclagem à frio com fresagem à frio..... | 48 |
| Figura 3.1 - Pilha de pó-de-pedra..... | 50 |
| Figura 3.2 - Depósito provisório | 51 |
| Figura 3.3 - Distribuição granulométrica dos agregados | 53 |
| Figura 3.4 - Demonstração do Rotarex | 54 |
| Figura 3.5 - Distribuição granulométrica do MF sem ligante | 55 |
| Figura 3.6 - Volume real, aparente e efetivo do agregado | 56 |
| Figura 3.7 - Amostra de agregado graúdo submerso..... | 57 |
| Figura 3.8 - Ensaio Cesto Metálico | 57 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.9- Ilustração dos volumes considerados na determinação da DMM | 59 |
| Figura 3.10 - Granulometria dos agregados utilizados..... | 62 |
| Figura 3.11 - Curvas de compactação da mistura MF + PDP | 64 |
| Figura 3.12 - Corpo de prova de 10 x 20 cm..... | 65 |
| Figura 3.13 - Prensa automática | 66 |
| Figura 3.14 - Corpo de prova de 10 x 20 cm ensaiado à Tração..... | 67 |
| Figura 3.15 - Corpo de prova 6,5 x 10 cm | 69 |
| Figura 3.16 - Prensa UTM-25 | 69 |
| Figura 3.17 - Corpo de prova 10 x 15 cm | 71 |
| Figura 3.18 - Corpo de prova instrumentado | 72 |
| Figura 3.19 - Curva mestra de módulo dinâmico..... | 74 |
| Figura 4.1 - Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cimento | 77 |
| Figura 4.2 - Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade | 78 |
| Figura 4.3 - Variação da resistência à compressão simples versus à relação vazios/cimento..... | 79 |
| Figura 4.4 - Variação da resistência à compressão simples versus à relação vazios/cimento ajustado | 80 |
| Figura 4.5 - Plano de ruptura..... | 81 |
| Figura 4.6 - Variação da resistência à tração em relação ao teor de cimento | 83 |
| Figura 4.7 - Variação da resistência à tração em relação a porosidade..... | 84 |
| Figura 4.8 - Variação da resistência à tração versus à relação vazios/cimento..... | 85 |
| Figura 4.9 - Variação da resistência à tração versus à relação vazios/cimento ajustado | 86 |
| Figura 4.10 – Plano de ruptura no plano longitudinal..... | 87 |
| Figura 4.11 - Variação do módulo de resiliência em relação ao teor de cimento | 89 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.12 - Variação do módulo de resiliência em relação a porosidade..... | 90 |
| Figura 4.13 - Variação do módulo de resiliência versus à relação vazios/cimento..... | 91 |
| Figura 4.14 - Variação do módulo de resiliência versus à relação vazios/cimento ajustado | 92 |
| Figura 4.15 - Resultados de E* a -10°C | 95 |
| Figura 4.16 - Resultados de E* a 4°C | 96 |
| Figura 4.17 - Resultados de E* a 21°C | 97 |
| Figura 4.18 - Resultados de E* a 37°C | 98 |
| Figura 4.19 - Resultados de E* a 54°C | 99 |
| Figura 4.20 - Resultados de ângulo de fase a -10°C | 101 |
| Figura 4.21 - Resultados de ângulo de fase a 4°C..... | 102 |
| Figura 4.22 - Resultados de ângulo de fase a 21°C..... | 103 |
| Figura 4.23 - Resultados de ângulo de fase a 37°C..... | 104 |
| Figura 4.24 - Resultados de ângulo de fase a 54°C..... | 105 |
| Figura 4.25 - Resultados de módulo dinâmico a 0,01 Hz | 107 |
| Figura 4.26 - Resultados de módulo dinâmico a 0,1 Hz | 108 |
| Figura 4.27 - Resultados de módulo dinâmico a 0,2 Hz | 109 |
| Figura 4.28 - Resultados de módulo dinâmico a 0,5 Hz | 110 |
| Figura 4.29 - Resultados de módulo dinâmico a 1 Hz | 111 |
| Figura 4.30 - Resultados de módulo dinâmico a 2 Hz | 112 |
| Figura 4.31 - Resultados de módulo dinâmico a 5 Hz | 113 |
| Figura 4.32 - Resultados de módulo dinâmico a 10 Hz | 114 |
| Figura 4.33 - Resultados de módulo dinâmico a 20 Hz | 115 |
| Figura 4.34 - Resultados de ângulo de fase a 0,01 Hz | 117 |
| Figura 4.35 - Resultados de ângulo de fase a 0,1 Hz | 118 |
| Figura 4.36 - Resultados de ângulo de fase a 0,2 Hz | 119 |
| Figura 4.37 - Resultados de ângulo de fase a 0,5 Hz | 120 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.38 - Resultados de ângulo de fase a 1 Hz..... | 121 |
| Figura 4.39 - Resultados de ângulo de fase a 2 Hz..... | 122 |
| Figura 4.40 - Resultados de ângulo de fase a 5 Hz..... | 123 |
| Figura 4.41 - Resultados de ângulo de fase a 10 Hz..... | 124 |
| Figura 4.42 - Resultados de ângulo de fase a 20 Hz..... | 125 |
| Figura 4.43 - Espaço Cole Cole | 127 |
| Figura 4.44 - Diagrama Black | 129 |
| Figura 4.45 – Curva mestra do módulo dinâmico | 130 |
| Figura 4.46 – Curva mestra do ângulo de fase | 131 |
| Figura 4.47 - Variação do módulo dinâmico em relação ao teor de cimento..... | 132 |
| Figura 4.48 - Variação do módulo dinâmico em relação da porosidade | 133 |
| Figura 4.49 - Variação do módulo dinâmico versus à relação vazios/cimento | 134 |
| Figura 4.50 - Variação do módulo dinâmico versus à relação vazios/cimento ajustado | 137 |
| Figura 4.51 - Variação da RCS e RT versus à relação vazios/cimento compatibilizada | 139 |
| Figura 4.52 - Variação do módulo de resiliência versus à relação vazios/cimento compatibilizada..... | 141 |
| Figura 4.53 - Variação do módulo dinâmico versus à relação vazios/cimento compatibilizada..... | 142 |
| Figura 4.54 - Variação dos valores de C | 144 |
| Figura 4.55 - Variação dos valores de C ajustados..... | 145 |
| Figura 4.56 - Variação dos valores de A | 146 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 3.1 - Distribuição granulométrica dos agregados | 52 |
| Tabela 3.2 – Teor de betume | 54 |
| Tabela 3.3 - Distribuição granulométrica do MF sem ligante..... | 55 |
| Tabela 3.4 – Densidades através do cesto metálico | 58 |
| Tabela 3.5 – Massas específicas reais | 59 |
| Tabela 3.6 – Densidade máxima medida..... | 60 |
| Tabela 3.7 – Características físicas e mecânicas | 61 |
| Tabela 3.8 – Granulometria dos agregados utilizados | 62 |
| Tabela 4.1 – Valores médios da RCS..... | 76 |
| Tabela 4.2 – Valores médios da RTCD..... | 82 |
| Tabela 4.3 – Resultados médios do Módulo de Resiliência..... | 88 |
| Tabela 4.4 – Resultados dos valores de MR, RT e MR/RT | 93 |
| Tabela 4.5 - Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de C1 e C2 para as misturas | 126 |
| Tabela 4.6 - Variação da potencia para cada temperatura e cada frequência..... | 135 |
| Tabela 4.7 - Variação da potência B para cada temperatura e cada frequência..... | 136 |
| Tabela 4.8 - Potências X de cada ensaio | 138 |
| Tabela 4.9 - Potências B de cada ensaio | 138 |
| Tabela 4.10 - Variação dos valores de C..... | 143 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|-------------------------------------------------------------|-----|
| Quadro A.1 - Dados gerais dos corpos-de-prova de RCS | 161 |
| Quadro A.2 – Dados gerais dos corpos-de-prova de RTCD | 162 |
| Quadro A.3 - Dados gerais dos corpos-de-prova de MR | 163 |
| Quadro A.4 – Dados gerais dos corpos-de-prova de MD | 164 |
| Quadro A.5 – Resultados do módulo dinâmico | 165 |
| Quadro A.6 – Resultados do módulo dinâmico | 166 |
| Quadro A.7 – Resultados do módulo dinâmico | 167 |
| Quadro A.8 – Resultados do módulo dinâmico | 168 |
| Quadro A.9 – Resultados do módulo dinâmico | 169 |
| Quadro A.10 – Resultados do módulo dinâmico | 170 |
| Quadro A.11 – Resultados do módulo dinâmico | 171 |
| Quadro A. 12– Resultados do módulo dinâmico | 172 |
| Quadro A. 13- Resultados do módulo dinâmico | 173 |

LISTA DE SÍMBOLOS

B – Expoente da equação de regressão da potência

C_{iv} – Teor volumétrico de cimento

cm – Centímetro

E^* – Módulo Complexo

E_1 – Módulo de armazenamento

E_2 – Módulo de perda

g – Gramas

Hz – Hertz

kPa – Quilo Pascal

m – Metro

MPa – Mega Pascal

°C – Graus centígrados

q_t – Resistência à tração

q_u – Resistência à compressão simples

R^2 – Coeficiente de determinação

X – Expoente para correlacionara equação

γ_d – Massa específica aparente seca

δ – Ângulo de fase

ε – Deformação específica recuperável

η – Porosidade

ξ – escalar que correlaciona tração com compressão

σ – Tensão de tração aplicada

ω – Teor de umidade

LISTA DE SIGLAS

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

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CP V ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

CP-I – Cimento Portland comum

DMM – Densidade Máxima Medida

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte

ISC – Índice de Suporte Califórnia

LEGG – Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental

LVDT – *Linear Variable Differential Transducer*

MD – Módulo Dinâmico

MF – Material Fresado

MR – Módulo de Resiliência

NBR – Norma Brasileira

PDP – Pó-de-pedra

RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*

RCS – Resistência a Compressão Simples

RTCD – Resistência à Tração por Compressão Diametral

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UTM – *Universal Testing Machine*

1. INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

A malha rodoviária brasileira é elemento fundamental para as cadeias produtivas, pois promove a integração de regiões, estados, portos, ferrovias, hidrovias e aeroportos. Como já é de conhecimento geral, há defeitos nos pavimentos brasileiros, tais como irregularidades na superfície do pavimento, buracos, trincas interligadas, longitudinais e transversais, escorregamentos, ausência de acostamento, entre outros e estes fatores podem elevar o risco de acidentes nas rodovias. Além disso, a qualidade do pavimento é um dos principais determinantes do desempenho dos usuários durante suas viagens e além do acréscimo dos custos rodoviários quando se tem rodovias com funcionalidade precária.

Uma das formas para a correção dos defeitos nos pavimentos é a restauração, sendo bastante empregada atualmente, a fresagem do revestimento asfáltico e recomposição com um novo revestimento asfáltico. A etapa de fresagem consiste na operação de um corte do revestimento asfáltico, entretanto esta produz uma grande quantidade de resíduo nas obras de restauração de rodovias, denominado de material fresado asfáltico ou somente fresado, que é constituído por agregados (grãos e miúdos) e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). O problema surge uma vez que não há especificação no projeto para utilização deste rejeito, o que acaba gerando problemas na sua disposição final, sendo o mesmo usualmente depositado em locais impróprios, como ao longo das rodovias, em aterros sanitários ou erroneamente utilizados como revestimento primário, quando o uso do fresado pode se tornar um passivo ambiental, pois as chuvas acabam carregando este resíduo para o leito dos córregos.

Dentro do tema materiais de pavimentação, este trabalho tem como finalidade avaliar a reutilização deste resíduo juntamente com um agente cimentante em camadas granulares de pavimentos flexíveis, transformando-os em pavimentos semirrígidos. A partir de resultados dos ensaios realizados na presente pesquisa, correlacionou-se o índice porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}) com parâmetros de rigidez e resistência de misturas de material fresado e agente cimentante. A partir da manipulação adequada de tal índice por meio da dosagem, alcançou de forma objetiva e com maior confiabilidade as propriedades

requeridas de resistência e de rigidez a serem utilizadas em uma dada obra geotécnica, como por exemplo, bases de pavimentos.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da pesquisa é avaliar o efeito da adição de cimento Portland e também a influência do índice de vazios/ teor volumétrico de cimento em uma mistura de material fresado asfáltico e pó-de-pedra, avaliando as propriedades de resistência e rigidez da mistura.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar e avaliar, as propriedades físicas e mecânicas do material proveniente da fresagem do revestimento asfáltico e de sua mistura;
- Quantificar a influencia de cada uma das variáveis de interesse (teor de cimento, compactação,..) sob a resistência à compressão simples e diametral da mistura em estudo.
- Correlacionar o índice η/C_{iv} com as propriedades físicas e mecânicas da mistura fresado e pó-de-pedra;
- Avaliar o comportamento da mistura cimentada, sobre os ensaios de módulo resiliênte e dinâmico, sendo nesse ultimo, verificando se o material tem propriedades viscoelásticas.
- Sugerir uma solução para o emprego do resíduo dos serviços de restauração asfáltica, e a avaliação de uma solução de reutilização do material fresado em camadas granulares, como, por exemplo, uma camada de base.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho estará dividido em cinco capítulos, de acordo com as etapas de pesquisa realizadas. O Capítulo 1 é apresentado uma pequena introdução, no Capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura existente, compreendida por tópicos referentes aos principais assuntos abordados

neste estudo. O Capítulo 3 apresenta o detalhamento dos ensaios realizados nesta pesquisa. No Capítulo 4, é exposta a descrição dos resultados e análises desenvolvidos na pesquisa. O Capítulo 5 apresenta as considerações finais deste trabalho. São apresentadas as referências bibliográficas ao final dos capítulos. E no Apêndice é apresentado todos os resultados dos ensaios.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

O solo natural é um material complexo e variável, mas devido sua disponibilidade e seu baixo custo, oferece grandes variedades de utilização como um material de Engenharia. Para que um solo seja adequado para utilização na construção, Ingles e Metcalf (1972) descrevem que decisões fundamentais devem ser tomadas, tais como aceitar o solo local como ele é, e projetar com padrões suficientes para que possa atender as restrições impostas por sua qualidade; remover o solo do local e substituir por um de qualidade superior ou ainda alterar as propriedades do solo existente a fim de criar um material capaz de suportar as exigências para determinada utilização.

Van Impe (1989) comenta sobre a melhoria de solos como sendo a técnica mais antiga e também mais intrigante de todos os métodos de execução comuns em Engenharia Civil. A mais de 3.000 anos atrás, a melhoria dos solos já era utilizada na construção de templos da Babilônia e pelos Chineses. Estes últimos utilizavam bambu, madeira ou palha para reforçar o solo. O ideograma chinês para o termo “Engenharia Civil” significa exatamente “solo e madeira”.

Segundo Ingles e Metcalf (1972), desde os primórdios da construção de estradas, foi reconhecido que para transportar o tráfego, a superfície de uma estrada tem de ser mecanicamente estável, ou seja, ser resistente às cargas que lhe são impostas. A estabilidade de uma estrada depende da resistência do material selecionado, adequadamente compactado e drenado. Os autores citam que a estabilidade mecânica também depende em sua grande maioria dos materiais utilizados, onde qualquer material bem compactado aumenta sua densidade, tornando-o mais resistente.

Para Ingles e Metcalf (1972), a questão sobre a alteração das propriedades do solo para satisfazer as necessidades específicas da engenharia, é conhecida como estabilização de solos. Para Vargas (1977) a estabilização dos solos o processo pelo qual se confere ao solo maior resistência estável às cargas, à erosão ou ao desgaste, por meio de compactação, correção da

sua granulometria e de sua plasticidade ou de adição de substâncias que lhe confirmam uma coesão por cimentação ou aglutinação dos grãos.

Segundo Ingles e Metcalf (1972), as propriedades de um solo podem ser alteradas químicas, térmicas, mecânicas e de outros meios. Também deve ser reconhecido que a estabilização não é necessariamente uma solução totalmente eficiente pela qual cada propriedade do solo é alterada para melhor. O uso correto exige reconhecimento de quais as propriedades do solo devem ser melhoradas, e este é fator importante na decisão de estabilizar ou não. A estabilização em pavimentos é direcionada, além do subleito, para as camadas de bases e sub-bases.

Conforme Bernucci *et al.*(2010) os materiais utilizados nas camadas do pavimento são usualmente constituídos por: agregados, solos e, eventualmente, aditivos como cimento, cal, emulsão asfáltica, entre outros, podendo ser classificados segundo o seu comportamento frente aos esforços em: granulares e solos, estabilizados quimicamente ou cimentados e materiais asfálticos.

Como a camada de base encontra-se perto do revestimento, esta deve possuir elevada resistência de deformação, a fim de resistir às altas pressões que lhe são impostas. Sendo assim estas camadas podem ser executadas com algum tipo de estabilização para melhorar seu desempenho.

Yoder e Witczack (1975) comentam que como em quase todos os projetos de engenharia a economia é a principal questão, se justifica muito determinar os benefícios do processo de estabilização, sendo necessário que tenha em mente a finalidade do processo para que possa selecionar corretamente o tipo de estabilização a utilizar. Os autores ainda explanam em alguns casos onde podem necessitar de um processo de estabilização, como para melhorar subleitos e assim reduzir a espessura desejada do pavimento, também quando há limitações em materiais de base, como exemplo de alta plasticidade, estabilizando com cal ou cimento Portland para redução desses valores e estabilizações com substâncias químicas para controle de umidade, seja esta alta ou baixa.

Conforme Ingles e Metcalf (1972), as principais propriedades de um solo com as quais deve haver preocupações são a estabilidade de volume, resistências, permeabilidade e durabilidade.

A estabilização deve ser considerada não só em termos de melhoria, mas também como uma medida preventiva contra situações adversas que possam ocorrer durante as execuções e durante toda vida da estrutura.

2.1.1 Estabilização granulométrica

Segundo Vargas (1977), muitas vezes não é possível uma simples correção do material a ser utilizado, mesmo que se disponha de solos em que predominam pedregulhos, areias ou siltes e argilas. Então se vê necessário a composição artificial de solo estabilizado, usando a proporção adequada de cada um deles e sua mistura, a fim de obter granulometria final desejada.

Yoder e Witczack (1975) descrevem que a estabilidade granulométrica de misturas depende do tamanho das partículas (distribuição granulométrica), do formato das partículas, da densidade relativa e do atrito interno. Dentre estes fatores, a distribuição granulométrica, ou seja, a proporção de material fino para material grosso é considerado o aspecto mais influente na resistência ao cisalhamento, devido ao atrito gerado entre as partículas.

A Figura 2.1 ilustra os três estados distintos de misturas granulométricas:

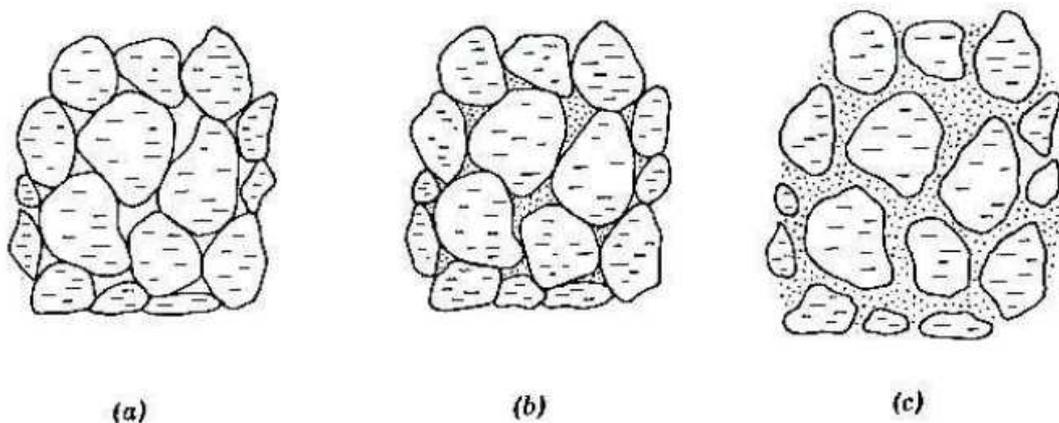


Figura 2.1 - Estados físicos de misturas granulométricas

Fonte: Yoder e Witczack (1975, p. 357)

- a) A mistura de agregados que contém pouco ou nada de material fino, a resistência é movida pelo contato grão-a-grão; baixa densidade, e por não ter finos não é coesiva o que o torna de difícil manuseio para construção;
- b) A mistura de agregados contém material fino suficiente para preencher os vazios entre o material graúdo; alta densidade, menos permeável e mais resistente que a mistura “a”; e o manuseio de moderada dificuldade;
- c) Esta mistura de agregados tem uma grande quantidade de finos, não havendo contato grão-a-grão; densidade e estabilidade menor do que a mistura “b”; manuseio e compactação mais fácil durante a construção.

Com essa explicação de Yoder e Witczack(1975) torna-se evidente que a estabilidade de misturas é dependente da distribuição granulométrica, de forma que a nenhum ou excesso de finos prejudica o desempenho da mistura.

Para bases de pavimentos as misturas onde o contato grão-a-grão seja garantido são as preferenciais, desde que atendam as faixas granulométricas dadas em norma. Uma das características do agregado que influenciam a estabilização é a resistência mecânica do agregado, que deve ser suficiente para reter aproximadamente a mesma distribuição granulométrica durante a compactação e a posterior utilização pelo tráfego, pois o fator determinante no sucesso do emprego da estabilização granulométrica é a correta compactação do material, o que lhe confere grande resistência aos esforços verticais de compressão (BALBO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2008; YODER e WITCZACK, 1975).

Silva (2012) estabilizou granulometricamente misturas de material fresado e agregados virgens para realização de ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia. Pires (2014) estabilizou granulometricamente e quimicamente misturas de material fresado e agregados virgens para realização de ensaios de compactação e mecânicos.

2.1.2 Estabilização química

Segundo Ingles e Metcalf (1972), quando um material ou uma combinação de materiais com estabilidade mecânica adequada não pode ser obtida, ou onde a resistência deve ser

melhorada, pode ser aconselhável considerar a estabilização por meio da adição de estabilizantes químicos.

Yoder e Witzack (1975) citam alguns tipos de aditivos que podem ser utilizados para estabilização, como os agentes de cimentação, modificadores, impermeabilizantes, agentes de retenção de água e produtos químicos diversos. Os comportamentos de cada uma dessas misturas são bem diferentes, cada um tem o seu uso particular, e, inversamente, cada um tem suas próprias limitações.

Os principais materiais de cimentação que podem ser usados incluem o cimento Portland, cal, cinzas volantes e materiais betuminosos (INGLES E METCALF, 1972; YODER E WITZACK, 1975). O cimento Portland é o agente cimentante utilizado em maior escala e com maior sucesso. Ele pode ser utilizado para camadas de base e de sub-bases de todos os tipos. Sua aplicação pode ser em solos granulares, solos siltosos e argilas, mas não pode ser utilizado em materiais orgânicos, pois estes podem prejudicar a hidratação do cimento (YODER E WITZACK, 1975).

Para Van Impe (1989), juntamente com compactações, a melhoria do solo pode ser intensificada por uma mistura de cimento ou cal. Se na estabilização com cimento, a mistura intensiva e a compactação do solo úmido com pó de cimento seco dá bons resultados especialmente em solos de menor coesão, em solos coesos como argila as vantagens podem ser obtidas por adição de cal durante a compactação da superfície. O princípio de melhoramento do solo usando reação química entre as partículas do solo, a água dos poros e os materiais adicionados é quase análoga, no caso destes materiais.

Segundo Dellabianca (2004), a incorporação de aditivos químicos como a cal, o cimento e a emulsão asfáltica, tem sido empregada na reciclagem de pavimentos flexíveis, desde meados da década de 40. Exemplos de revestimento e base reciclados com algum tipo de estabilizante químico podem ser encontrados em vários estados americanos tais como Arkansas, Califórnia, Flórida, Nevada e Pensilvânia, entre outros.

Segundo Ingles e Metcalf (1972), a utilização de aditivos secundários para melhorar o efeito do cimento em diferentes solos, e que além do uso de cal, para auxiliar a pulverização, e do cloreto de cálcio, para neutralizar a matéria orgânica. As cinzas volantes também podem ser

usadas com sucesso, sendo materiais sustentáveis para substituir parte do cimento Portland, agindo como pozolanas.

2.1.2.1 Estabilização química com cimento

Vargas (1977) cita que solo-cimento como o produto de uma mistura compactada de solo com cimento e água, produzindo assim um novo material, com uma alta resistência, baixa deformabilidade, durabilidade a fatores agressores como a água, aos efeitos térmicos, e as baixas temperaturas, sendo assim, muito aplicada em obras de Engenharia Civil.

Conforme Ingles e Metcalf (1972) a estabilização química com cimento já tinha ampla utilização na construção de estradas naquela época. A técnica de utilização do cimento envolve, geralmente, o espalhamento do cimento sobre a superfície do solo, mistura e posterior compactação na devida umidade. Os autores comentam que a adição mesmo em pequenas quantidades, até 2%, modificam as propriedades do solo, enquanto que grandes quantidades, entre 5 e 10%, modificam radicalmente as propriedades, e, dependendo da mistura, alguns consideram um determinado tipo de “concreto magro”.

Para Yoder e Witczak (1975) a estabilização de solo com cimento consiste na adição do cimento Portland com um determinado tipo de solo, permitindo que a mistura endureça pela hidratação do cimento. Os fatores que afetam as propriedades físicas da mistura incluem o tipo de solo, a quantidade de cimento, o grau da mistura, o tempo de cura e a densidade seca da mistura compactada. Os autores salientam a questão do tempo de cura da mistura, sendo essencial a cura na presença de água, antes da abertura do tráfego. Para época, foi citada a ampla utilização da mistura de solo-cimento para restauração de estradas, onde o cascalho era escarificado, estabilizado com cimento, e então compactado. Este tipo de estabilização, sempre foi de grande utilização nos Estados Unidos para bases e sub-bases em estradas secundárias, e ainda citam ser muito difícil encontrar resultados de Resistência à Compressão Simples (RCS) entre 6,5 e 13,5 MPa.

Yoder e Witczak (1975) citam que a quantidade de cimento requerida para estabilizar um material granular depende da quantidade e qualidade dos finos contidos, bem como a densidade final da mistura compactada. Os valores típicos variam entre 2 e 6% em peso do material final compactado.

Segundo Guyer *et al.* (2011), a estabilização com cimento Portland pode ser usada tanto para modificar e melhorar a qualidade do solo, ou para transformar o solo em uma massa cimentada com maior resistência e durabilidade. A quantidade de cimento a ser utilizado dependerá do tipo do solo ou material que será modificado ou estabilizado.

De acordo com o *American Concrete Institute* (1997), desde 1915, quando uma Rua em Sarasota na Flórida foi construída utilizando uma mistura de conchas, areia e cimento Portland misturados com um arado e compactados, o solo-cimento tornou-se uma das formas mais usadas de estabilização de solos para rodovias. Mais de 100.000 quilômetros de pavimento com 7,2 m de largura utilizando solo-cimento haviam sido construídos até 1997.

Silva e Miranda Junior (2000) realizaram no estado de Minas Gerais, obras de recuperação da BR-381 com reciclagem de camada betuminosa estabilizada com cimento como alternativa de sub-base. Na ocasião foi utilizada uma percentagem de 4,2% de cimento incorporado ao material fresado da capa asfáltica. Este valor foi obtido com base em resultados de ensaios de compressão simples, realizados na mistura, para diferentes variações de teor de cimento. Na realização dos ensaios de RCS trabalhou-se com corpos-de-prova cujas dimensões apresentavam altura de 17,8 cm e diâmetro de 15,2 cm. O tempo de cura adotado foi de seis dias, em câmara úmida. Nos resultados encontrados foram verificados ganhos consideráveis de resistência em função da adição do cimento, conforme o aumento do teor.

Tahaet *al.* (2002), realizaram uma avaliação laboratorial de material fresado e agregados virgens estabilizados com cimento. Os experimentos foram feitos para diferentes misturas de fresado/agregado virgem: 100/0; 90/10; 80/20; 70/30 e 0/100%. As amostras preparadas utilizando 0, 3, 5, e 7% de cimento Portland CP-I, curados durante 3, 7 e 28 dias para ensaios RCS e Módulo de Resiliência (MR). Os resultados apresentados mostram que o fresado puro (100%) não é recomendado para utilização como um material de base, a menos que estabilizado com cimento, e as misturas de fresado/agregados virgens estabilizados com cimento se mostram ser uma boa alternativa de utilização na construção de bases rodoviárias.

De acordo com Dellabianca (2004), as propriedades mecânicas das misturas compactadas de solo e cimento devem ser consideradas, pois a importância da compactação está ligada não apenas ao grau de compactação, mas também ao tempo, uma vez que se realizada após a

hidratação do cimento apresenta resultados ineficientes. O tempo de cura influencia positivamente no ganho dessa resistência, o que interfere até mesmo no tipo de cimento utilizado na mistura.

2.1.2.1.1 Relações entre teor de cimento e vazios

Atualmente, o núcleo de pesquisas da UFRGS tem desenvolvido estudos na identificação de uma metodologia para a dosagem de solos cimentados, levando em conta o tipo de material, quantidade de agente cimentante e porosidade presente na mistura desses materiais.

Estudos realizados por Foppa (2005), Lopes Junior (2007,2011), Consoli *et al.* (2007, 2008, 2009a, 2009b, 2010, 2011), Cruz (2008), Dalla Rosa (2009) e Marques (2015), entre outros estudos, demonstraram claramente a existência de uma relação unívoca entre a quantidade de agente cimentante e a porosidade existente em misturas de diferentes tipos de solos.

Estudos iniciais sobre as possíveis relações existentes entre a porosidade e o nível de cimentação foram realizados por Larnach (1960). Segundo o autor, diferentemente de como é relacionado em misturas de concreto tradicionais, a quantidade de vazios (incluindo a porção de água e ar incorporados a mistura) presentes nas misturas de solo-cimento é um fator preponderante na dosagem dessas misturas.

Conforme Larnach (1960), como a compactação em solos ou em solo-cimento não consegue retirar completamente o ar da mistura solo-água-ar ou solo-cimento-água-ar, a resistência não pode ser correlacionada com o fator água/cimento, pois este só se aplica a materiais onde não há a presença de ar e os vazios existentes foram preenchidos por água, como no caso de concretos tradicionais e argamassas. Em seu estudo, o autor utilizou areia fina misturada com uma argila na proporção de 9/10 de areia e 1/10 de argila. As porcentagem de cimento utilizadas, em relação ao peso do solo seco, foram de 3%, 5%, 11,1% e 17,7%. Para cada porcentagem de cimento foi feita uma série de ensaios de resistência a compressão simples e de flexão em vigotas, ambas moldadas a diferentes teores de umidade e massas específicas aparente secas, ambas determinadas a partir das curvas de compactação das misturas de solo e cimento. A relação vazios/cimento utilizada por este autor é definida pela Equação (x).

$$\frac{V_v}{V_{ci}} = \frac{\text{Volume absoluto de vazios (ar + \acute{a}gua)}}{\text{Volume absoluto de cimento}}$$

A Figura 2.2, demonstra os resultados dos ensaios de resist\encia \`a compress\~ao simples das amostras de solo-cimento curadas previamente por 7 dias. Pode se observar um bom ajuste dos dados \`a rela\~ao vazios/cimento.

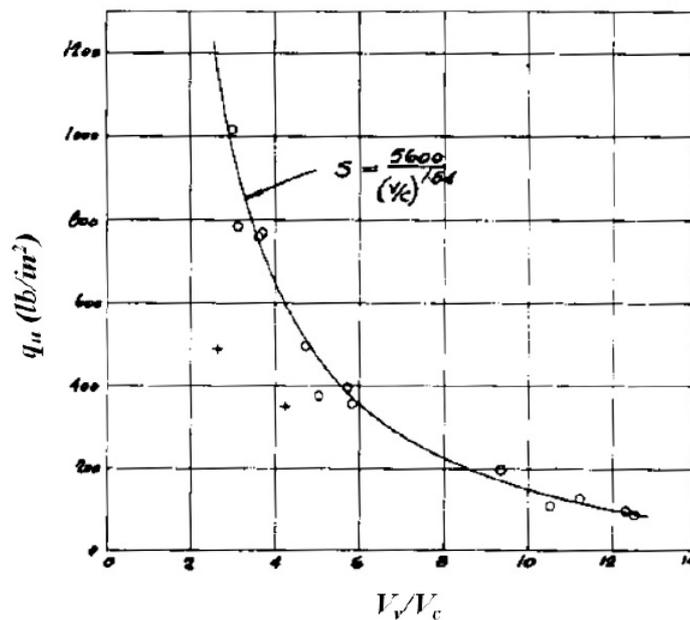


Figura 2.2 - Relação vazios/cimento pela RCS. Adaptado de Larnach (1960)

Fonte: Saminiego (2015)

Segundo Larnach (1960), o uso desse tipo de relação, similarmente ao que ocorre em concreto, pode ser de extrema utilidade para dosagem e controle de execução de misturas de solo-cimento.

Foppa (2005) identificou a mesma tendência obtida por Larnach (1960), utilizando uma areia-siltosa com diversos teores de cimento em relação ao peso se solo seco. Para cada teor de cimento utilizado foi realizada uma série de ensaios de resistência à compressão simples, moldadas com diferentes teores de umidade e massa específica aparente seca, ambos determinados a partir das curvas de compactação das misturas de solo e cimento. Verificou-se que a umidade de mistura de amostra solo-cimento é um fator preponderante também na determinação da RCS. O autor afirma que a relação existente entre a porosidade e o teor de

Estudo da resistência e da rigidez de uma mistura de material fresado e pó-de-pedra com a adição de cimento

cimento pode ser avaliada quando ambas as misturas são preparadas em um mesmo teor de umidade.

Consoli *et al.* (2007) identificaram que pequenos teores de cimento Portland adicionados a um solo residual de arenito foram suficientes para o acréscimo de resistência a compressão não confinada. Porém, a redução da porosidade permitiu uma melhor interação do agente cimentante com a matriz do solo indicando que amostras cimentadas apresentam um desempenho melhor à medida que a porosidade diminui. Dessa maneira, os autores encontraram uma relação entre porosidade e teor de agente cimentante, sendo esta relação uma forma apropriada para prever a resistência não confinada.

Em outro trabalho, Consoli *et al.* (2009a) apresentaram resultados de uma areia artificialmente cimentada para diferentes relações de porosidade e teor de cimentação. Os autores observaram que mesmo em diferentes níveis de confinamento (Figura 2.3), os resultados para amostras com similares relações de porosidade e cimento apresentaram valores de resistência de ruptura muito próximos. A partir desta relação, os autores afirmam que a porosidade, bem como o teor de cimento em conjunto, comandam a resistência de pico em solos artificialmente cimentado.

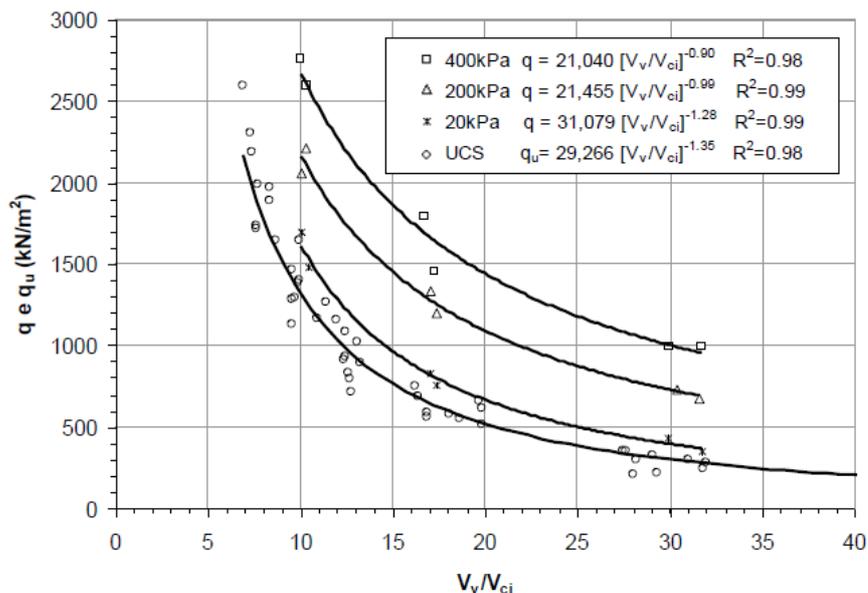


Figura 2.3 – Resistência de pico para ensaios triaxiais e de compressão não confinada

Fonte: Consoli *et al* (2009 a)

Esta relação que existe entre o grau de compactação e o teor de cimento também foi demonstrada utilizando cal em resultados de ensaios de compressão simples, obtidos por Lopes Junior (2007) que estudou a relação vazios/cal tratando uma areia-siltosa com resíduo de britagem e diversos teores de cal em relação ao peso de solo seco. Para cada teor de cal foi realizada uma série de ensaios de RCS, moldadas com diferentes teores de umidade e massas específicas aparente secas, ambas determinadas a partir das curvas de compactação.

Estas diversas pesquisas demonstram variados exemplos de aplicações de como o projetista pode, utilizando o fator vazios/agente cimentante, escolher adequadamente a quantidade de agente cimentante e a energia de compactação para proporcionar uma mistura que ira atender à resistência necessária para o projeto ao menor custo possível.

2.2 RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Segundo Bernucci *et al* (2010) a pavimentação tem como principal objetivo garantir a trafegabilidade e proporcionar ao usuário conforto ao rolamento e segurança. Portanto, para o usuário o estado da superfície do pavimento é o mais importante, pois os defeitos na superfície afetam o conforto ao rolamento e aumentam os custos operacionais. O fato de o pavimento apresentar deterioração funcional e estrutural, acumuladas ao longo da sua vida de projeto, faz com que uma manutenção periódica seja necessária para assegurar as condições mínimas de trafegabilidade, conforto e segurança.

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) a definição das expressões relativas à Manutenção Rodoviária, tais como Restauração do Pavimento e Reabilitação do Pavimento, entre outras, não é uma tarefa simples. Estão ambas associadas à Recuperação dos Atributos Funcionais e Estruturais do Pavimento.

Segundo DNIT (2006) o termo Restauração do Pavimento deve ser entendido como a recuperação de um pavimento deteriorado, porém o grau de deterioração não compromete a sua habilitação. A Reabilitação do Pavimento, por outro lado, se aplica a pavimentos com elevado grau de deterioração, apresentando defeitos irreversíveis e normalmente envolve a reconstrução do pavimento.

Antes da adoção de qualquer alternativa de restauração um bom diagnóstico geral dos defeitos é imprescindível para o estabelecimento da melhor solução. Este diagnóstico é precedido por uma avaliação funcional ou uma avaliação estrutural. Na avaliação funcional é verificada a condição de superfície do pavimento, sendo os principais defeitos considerados: área trincada e severidade do trincamento, deformações e irregularidade longitudinal. Enquanto na avaliação estrutural é avaliada a resposta do pavimento face as cargas solicitantes, considerando-se a deflexão como principal parâmetro (BALBO, 2007; BERNUCCI et al., 2008; DNIT, 2006).

Restauração está associada a uma variedade de correções de defeitos funcionais superficiais, através da aplicação de técnicas como: tratamentos superficiais, recapeamentos, etc., mas independentemente da técnica, a superfície existente precisa ser reparada, caso contrário a solução adotada terá seu desempenho comprometido pela reflexão das trincas (BERNUCCI et al., 2008; PAPAGIANAKIS E MASAD, 2007).

Atualmente a técnica de preparo de superfície empregada e recomendada em pavimentos flexíveis, é a fresagem de parte ou toda a camada de revestimento.

2.3 FRESAGEM

Segundo Bonfim (2011) fresagem é o corte de uma ou mais camadas do pavimento, com espessura pré-determinada, por meio de processo mecânico realizado a quente ou a frio, empregado como intervenção na restauração de pavimentos. Ou seja, é o corte de todo ou parte do revestimento deteriorado por equipamento específico, conforme demonstra a figura 2.4.



Figura 2.4 – Realização da fresagem em uma rodovia

2.3.1 Conceitos Básicos

Conforme Bonfim (2011) com a crise do petróleo, na década de 70 e a escassez de materiais asfálticos, voltou-se para a idéia de reprocessar os materiais de pavimentação de pistas deterioradas, de forma a restaurar as condições das vias a níveis satisfatórios. Inicialmente o material da pista era extraído por escarificação do pavimento. Esta técnica foi considerada inadequada, pois implicava a retirada de toda a camada betuminosa, o que tornava impossível extrair apenas uma espessura pré-determinada. Concebeu-se então, a partir da segunda metade da década de 70, o equipamento de fresagem como ferramenta adequada para possibilitar o corte do pavimento em profundidades pré-determinadas.

A técnica de fresagem teve início tanto na Europa como na América do Norte em meados da década de 70, no Brasil teve início no ano de 1980, nas obras de restauração da via Anchieta em São Paulo, com o emprego de uma fresadora dos Estados Unidos. Desde então serviços de fresagem tornaram-se corriqueiros no Brasil, dada a sua vantagem na manutenção do greide da via evitando assim a ocorrência de problemas da ordem estética, funcional e de segurança (BALBO, 2007; BONFIM, 2011).

2.3.2 Tipos

Pode se classificar a fresagem de acordo com as espessuras de corte, usualmente em três categorias: superficial, rasa e profunda.

A fresagem superficial é destinada apenas à correção de defeitos existentes na superfície do pavimento, podendo ser dispensado o posterior recapeamento da pista, visto que a textura final garante rolamento de forma segura. Já a fresagem rasa atinge as camadas superiores do pavimento, normalmente esse tipo de intervenção tem uma profundidade da ordem de 5 cm. Quando a operação atinge as camadas de ligação, base e até sub-base é denominada de fresagem profunda, esta operação já visa o aspecto estrutural (BONFIM, 2011).

2.3.2.2 Técnicas de fresagem

Bonfim (2011) comenta que a temperatura da fresagem pode ser realizada a frio ou a quente. Na primeira situação, o pavimento é fresado à temperatura ambiente, com isto ocorre a quebra de parte dos agregados, havendo a alteração da curva granulométrica do material existente na pista. Na fresagem a quente, o revestimento é pré-aquecido diminuindo a resistência ao corte do material, preservando a integridade do agregado o que conserva a curva granulométrica original do material.

2.3.3 Equipamentos utilizados

2.3.3.1 Máquina Fresadora

Bonfim (2011) cita que no Brasil, existe uma extensa quantidade de máquinas de fresagem, de vários tamanhos e modelos, capazes de atender a todas as necessidades do mercado. Usualmente a nomenclatura da máquina é referência à largura do cilindro fresador que, dependendo do fabricante, é expresso em milímetros ou em centímetros.

Para Bonfim (2011), apesar da variedade de modelos e tamanhos, estes equipamentos podem ser subdivididos quanto ao seu tamanho como de:

1) Pequeno porte: destinado à fresagem de arremates, principalmente para execução de pequenas intervenções em pontos localizados como remendos, acabamentos ao redor de tampões de ferro (Figura 2.5), entre outros. Possui cilindro com largura de fresagem variando de 300 mm a 600 mm.

2) Médio porte: utilizado tanto para a fresagem de pequenas áreas como de grandes áreas. Geralmente possui uma correia transportadora para o carregamento de material fresado em caminhões (Figura 2.6). O cilindro fresador pode ter larguras entre 1000 mm a 1500 mm.

3) Grande porte: empregado na fresagem de grandes áreas (Figura 2.7), por tratar-se de equipamentos com cilindro fresador de 2000 mm a 2200 mm de largura. São indicados para rodovias, em função do seu tamanho.

Conforme Bonfim (2011) a fresagem pode ser aplicada em inúmeras situações, quer em grandes áreas, quer em locais onde existem muitas interferências, portanto a produtividade destes equipamentos é diretamente influenciada pelo tipo de obra. Fresagens em áreas contínuas (rodovias) resultam em produtividades maiores enquanto fresagem em pavimentos urbanos tem produtividade sempre menor.



Figura 2.5 - Fresadora de pequeno porte



Figura 2.6 - Fresadora de médio porte



Figura 2.7- Fresadora de grande porte

2.3.2.2 Cilindro Fresador

Também chamado de rolo fresador ou tambor fresador é um tambor rígido construído em aço especial, no qual os dentes de corte são fixados, conforme demonstra a Figura 2.8. Conforme Bonfim (2011), o cilindro gira em alta rotação, quando colocado para cortar, iniciando o desgaste do pavimento. Geralmente possuem os dentes de corte dispostos em forma de “V” fazendo com que o material fresado, em função do giro, seja conduzido para o meio do cilindro, facilitando seu lançamento na correia transportadora.



Figura 2.8 – Representação de um rolo de corte com os bits

Fonte: Wirtgen

A atuação do cilindro no pavimento (Figura 2.9) pode ser anti-horária (Situação A) ou horária (Situação B), o que poderá alterar a granulometria do material resultante. A atuação do cilindro no sentido horário, apesar de resultar em material de dimensões menores, é desfavorável para o corte para grandes espessuras de material oxidado.



Figura 2.9 - Sentido de giro do cilindro

Fonte: Bonfim (2011)

2.3.2.3 Dentes de corte (bits)

São as ferramentas de corte fixadas no cilindro fresador que agem diretamente no pavimento. Segundo Bonfim (2011) estas peças são constituídas por corpo forjado em aço com pontas de material mais duro, de carboneto de tungstênio e cobalto. As peças nas quais os dentes são fixados têm posições e ângulos de ataque definidos, para que se possa obter uma superfície de textura rugosa, porém plana e sem desníveis.

2.3.2.4 Correia transportadora

A correia transportadora é a parte do equipamento utilizada para o descarregamento do material em caminhões basculantes. Os equipamentos de pequeno e médio porte possuem este descarregamento pela parte traseira, enquanto os de maior porte possuem descarregamento frontal.

2.3.2.5 Equipamentos, sistemas e serviços adicionais

Complementando os equipamentos já citados, as operações de fresagem necessitam de sistemas para: controle de velocidade, de modo a harmonizar a velocidade de deslocamento e a efetiva de trabalho; controle da espessura de corte, sendo manual ou eletrônico; apoio dos equipamentos: sobre pneus, para equipamentos de pequeno e médio porte, ou sobre esteiras para equipamentos de grande porte, conforme demonstrado a Figura 2.10.

Bonfim (2011) recomenda que durante a operação de fresagem sejam utilizados equipamentos auxiliares como: caminhão-pipa, para espargir água sobre o cilindro fresador atenuando o desgaste dos dentes e minimizando a emissão de poeira; detector de metais, para verificação

Estudo da resistência e da rigidez de uma mistura de material fresado e pó-de-pedra com a adição de cimento

de material metálico sob a camada a ser desbastada e caminhões basculantes, para o transporte do material fresado. Outros serviços como: sinalização da pista, arremates em locais fresados e variação da pista após a fresagem são indispensáveis para uma operação eficaz.



Figura 2.10 - Operação de fresagem de um equipamento de grande porte

Fonte: Wirtgen

2.4 MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

A reciclagem asfáltica não é uma técnica nova. Segundo Kandhal *apud* Lima (2003), o uso das técnicas de reciclagem de pavimentos asfálticos data do início do século passado, mais precisamente por volta de 1915. Contudo, foram às exigências crescentes da economia e da proteção ambiental, que promoveram em um maior destaque as técnicas e procedimentos de reciclagem.

A reciclagem, nada mais é que o processo de reutilização de misturas asfálticas velhas para produção de novas, aproveitando os agregados e o ligante de um pavimento asfáltico deteriorado, com o acréscimo de novos materiais, como Cimento asfáltico de petróleo (CAP) ou emulsão asfáltica de petróleo (EAP). A reciclagem pode ser feita:

- A quente: Utilizando CAP, agregados quentes e/ou agente rejuvenescedor.
- A frio: Utilizando EAP, agregados a temperatura ambiente e agente rejuvenescedor emulsionado.

Pode ser realizada em:

- Usina: à quente ou à frio - o material fresado é levado para a usina;
- In situ: à quente ou à frio - o material fresado é misturado com ligante no próprio local do corte, seja à quente (CAP), seja à frio (EAP) por equipamentos especiais.

É importante destacar a diferença entre reciclagem e fresagem. A reciclagem de pavimento é uma técnica de restauração, enquanto a fresagem do pavimento é uma operação onde o pavimento, ou parte dele, é cortado através de um equipamento com um cortador giratório empregando movimento rotativo. A fresagem pode ser feita a frio ou a quente.

2.4.1 Reciclagem à quente

Segundo Asphalt Institute (1987), a reciclagem à quente é o método no qual o pavimento asfáltico existente é retirado por meio de uma fresadora capaz de remover a camada superficial total ou a uma profundidade estabelecida, sendo o fresado transportado para um local de estocagem para que seja reciclada em usina. São usados dois tipos de usinas para a reciclagem do asfalto, usinas do tipo gravimétricas ou verticais (*Batch Plants*) (Figura 2.11) e usinas horizontais (*Drum Mixer*) (Figura 2.12).

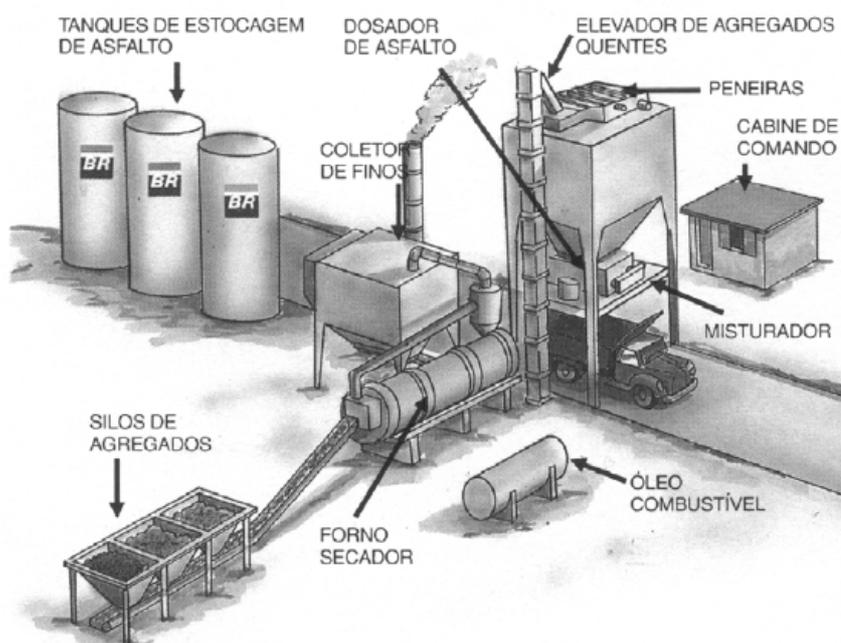


Figura 2.11 – Representação esquemática de uma usina de asfalto vertical

Fonte: Lima (2013)

As usinas gravimétricas consistem basicamente de um depósito para armazenar os agregados, um secador para retirar a umidade dos mesmos, um depósito para o material fresado, um elevador para transportar o material para a parte superior da torre, onde os mesmos serão separados através de peneiras vibratórias.

Segundo a Ciber (2016) os silos de alimentação armazenam e medem as quantidades de agregados que passam por um processo de aquecimento e secagem, utilizando a energia provida por um queimador. O material é inserido no tambor-secador pelo lado oposto ao do queimador, deslocando-se em sentido contrário à chama, no processo de contra-fluxo. Depois de extraída a umidade, um elevador transporta os materiais quentes e secos até a parte superior da torre de dosagem, que possui um conjunto de peneiras vibratórias para classificação granulométrica, onde o material é classificado conforme o tamanho das pedras e armazenado em silos quentes. Conforme a mistura desejada, é feita a dosagem do material seco na balança destes silos, que têm por função garantir a fração de cada material na mistura através da pesagem individual.

Segundo Asphalt Institute (1987), a quantidade de material fresado a ser adicionada à mistura reciclada depende de três fatores: teor de umidade, temperatura desejada para a mistura asfáltica, e temperatura dos agregados novos. Se a temperatura do material fresado for próxima à temperatura ambiente e se o seu teor de umidade baixo, é possível utilizar 50% de material fresado na nova mistura asfáltica reciclada, utilizando-se este tipo de usina.

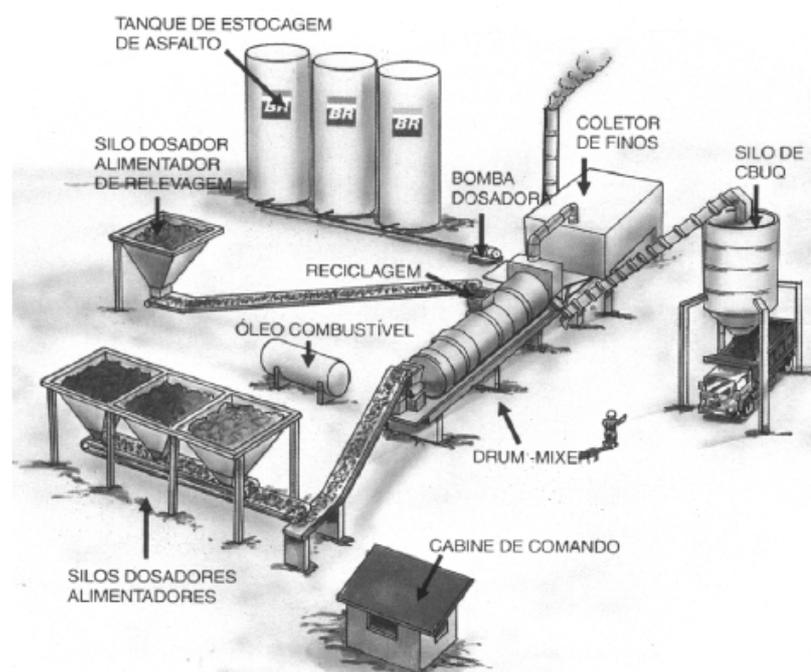


Figura 2.12 – Representação esquemática de uma usina de asfalto do tipo *Drum Mixer*

Fonte: Lima (2013)

Segundo Lima (2013) as usinas *Drum Mixer* possuem cinco componentes principais: depósitos para estocagem dos agregados; tanque de suprimento de asfalto; tambor misturador; silos de armazenagem da mistura pronta e equipamento de controle de emissões poluentes. Os agregados estocados são dosados conforme o projeto de mistura e transportados através de esteiras até o tambor onde se dá o aquecimento necessário. Uma usina convencional do tipo *Drum Mixer* possui um sistema de fluxo paralelo, ou seja, os gases da exaustão e os agregados movem-se dentro do tambor na mesma direção.

Segundo Lima (2013) o material fresado incorpora-se à mistura na porção média do tambor por intermédio de correia transportadora do local onde está estocado até o colar adaptado no

tambor para essa finalidade. A entrada do material fresado na porção média do tambor é para evitar que o mesmo não sofra um super aquecimento, aumentando a emissão de hidrocarbonetos no fenômeno chamado de *Blue Smoke*. Após a mistura do agregado com o fresado no interior do tambor, adiciona-se asfalto novo e agente rejuvenescedor (se for necessário) na parte final do tambor misturador.

2.4.2 Reciclagem à quente *in situ*

Segundo Lima (2013), a reciclagem de misturas asfálticas à quente *in situ* é um processo de correção da superfície do pavimento asfáltico que consiste na remoção mecânica da superfície asfáltica, através de aquecimento e conseqüente amolecimento (fresagem a quente). Esta superfície é então misturada com o ligante asfáltico, agregados virgens, e agentes rejuvenescedores (Figura 2.13). Após este processo, a mistura reciclada é recolocada sobre o pavimento remanescente.

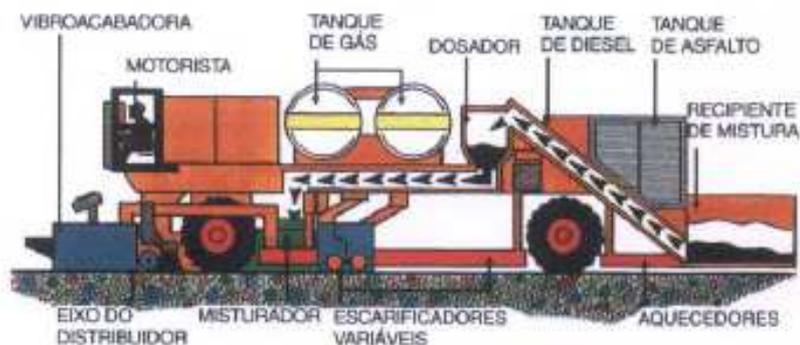


Figura 2.13 – Reciclagem à quente *in situ* com fresagem a quente

Fonte: Lima (2013)

Segundo Terrel *et al.* (1997), a reciclagem à quente *in situ* pode ser feita através de uma operação de uma única passagem do equipamento reciclador, que mistura o pavimento restaurado com materiais virgens, ou com dupla passagem onde o material reciclado é recompactado, seguido da aplicação de uma nova mistura asfáltica.

Segundo Lima (2013), existem três processos de reciclagem a quente *in situ*:

- (i) Escarificação com aquecimento (*Heater-scarification*), no qual o pavimento é aquecido, escarificado, rejuvenescido, nivelado, reperfilado e compactado;
- (ii) (ii) Repavimentação (*Repaving*), onde é utilizado o mesmo procedimento citado acima, com a adição de uma nova camada de mistura asfáltica de pouca espessura sobre a superfície reciclada;
- (iii) (iii) *Remixing*, processo similar aos anteriores, porém com um aquecimento mais efetivo, permitindo um revestimento mais espesso, e uma melhoria no revestimento velho com correções na granulometria do agregado ou ajustes nas propriedades do ligante asfáltico.

2.4.3 Reciclagem à frio

Segundo Asphalt Institute (1987), a reciclagem à frio é a técnica na qual o pavimento asfáltico é removido a uma profundidade desejada e depois restaurado através da composição de uma nova camada superficial. Este método permite a correção do greide da pista, inclinação, ondulações e deformações no revestimento asfáltico. Também pode corrigir problemas de rugosidade superficial, melhorando o atrito entre a superfície de rolamento e os pneus dos veículos. A reciclagem a frio utiliza máquinas autopropelidas para fresar as camadas do pavimento, dotadas de um cortador giratório que corta o pavimento a uma espessura pré-definida.

2.4.4 Reciclagem à frio *in situ*

Conforme Lima (2013), a reciclagem à frio *in situ* é a reabilitação do revestimento existente utilizando-se asfalto emulsionado a temperatura ambiente, para produzir uma nova camada asfáltica com características semelhantes a uma nova mistura pré-misturada a frio (PMF) conforme indica a Figura 2.14. O processo consiste basicamente da execução da fresagem do revestimento asfáltico a uma determinada profundidade adicionando-se emulsão asfáltica,

aditivos, espalhando-a e compactando-a em seguida. A espessura máxima alcançada com este tipo de reciclagem varia normalmente entre 75 a 100 mm.

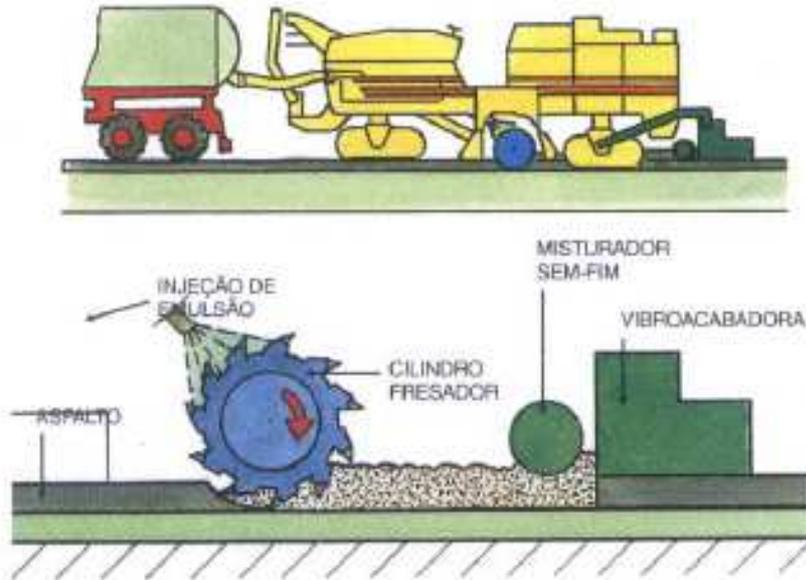


Figura 2.14 – Reciclagem à frio com fresagem a frio

Fonte: Lima (2013)

Segundo Lima (2013), as reciclagens a frio *in situ* têm sido indicadas tanto para vias rurais e como para vias urbanas com baixos e/ou altos volumes de tráfego. Esta técnica também se mostrou mais econômica que outros tipos de reciclagem, principalmente por eliminar a necessidade de aquecimento da mistura, e diminuir bastante o custo com o transporte de material, uma vez que somente o agente rejuvenescedor será transportado. Hoje em dia no Brasil utiliza-se basicamente este tipo de reciclagem, quando se indica reciclagem a frio.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

O planejamento dessa pesquisa se dá pela determinação de uma mistura de material fresado e pó-de-pedra tendo em vista a incorporação de cimento Portland, verificando a influência deste nas propriedades mecânicas das misturas.

As variáveis deste programa podem ser classificadas em três grupos: variáveis independentes, variáveis fixas e variáveis de resposta.

As variáveis independentes são:

- Peso específico da mistura: expressa pela massa específica aparente seca (γ_d);
- Quantidade de cimento: massa de cimento dividida pela massa da mistura, expressa em porcentagem;
- Teor de umidade: massa de água dividida pela massa da mistura, expresso em porcentagem.

As variáveis fixas são:

- Tipo de agregados: Pó-de-pedra de formação basáltica da Formação Serra Geral e Material fresado asfáltico.
- Tipos de agente cimentante: cimento CP V ARI, nos teores de 3%, 5% e 7%.
- Tempo de cura: 28 dias;

As variáveis de resposta são:

- Resistência à Compressão Simples (RCS)
- Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD)
- Módulo de Resiliência (MR)
- Módulo Complexo (E^*)

Primeiramente, este programa experimental foi dividido em duas partes. Na primeira etapa foi realizada a caracterização dos agregados e do cimento utilizados, com o objetivo de classificá-los e obter as informações necessárias para a execução dos ensaios.

A segunda etapa fundamentou-se na realização de uma série de ensaios com o objetivo de avaliar a influência das variáveis estudadas como a resistência à compressão simples, a relação da influência da porosidade/teor de cimento e as demais características estudadas. Para os ensaios foram moldados um total de 97 corpos-de-prova tendo as quantidades divididas para cada ensaio descritas em seus respectivos itens.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1 Pó-de-pedra

De acordo com a nomenclatura comercial, pó-de-pedra (PDP) é o agregado proveniente da britagem que tem agregados de diâmetro máximo igual a 4,8 mm. Este material foi coletado de uma pilha, conforme demonstra a Figura 3.1, em uma unidade de britagem de uma pedreira de rocha sedimentar no Município de Santo Antônio da Patrulha. A coleta seguiu as diretrizes da DNER-PRO 120 (1997).



Figura 3.1 – Pilha de pó-de-pedra

3.2.2 Cimento

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP V- ARI - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial produzido pela Cauê. A utilização do cimento nesta pesquisa foi determinada para que pudesse ser realizada estabilização química das misturas, com o uso de diferentes teores para verificar a influência do parâmetro porosidade/teor de cimento e também devido há pesquisas já realizadas nesse laboratório envolvendo esse parâmetro.

Segundo a NBR 5733 (1991) – Cimento Portland de alta resistência inicial é um aglomerante hidráulico que atende às exigências de alta resistência inicial, obtido através da moagem de clínquer, constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio hidráulicos, ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio.

3.2.3 Material fresado asfáltico

“Agregado reciclado: é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de Engenharia.” (CONAMA, 2002). O Material Fresado (MF) é proveniente da fresagem da BR 290, no depósito provisório localizado na Avenida Neugebauer com a João Moreira no município de Porto Alegre - RS, conforme observado na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Depósito provisório

3.2.4 Água

A água utilizada na pesquisa é oriunda da rede hidráulica do Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geoambiental (LEGG) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e é considerada potável. Salvo determinados ensaios de caracterização onde se fez necessário à utilização de água destilada.

3.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS E DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

3.3.1 Caracterização dos materiais

3.3.1.1 Análise granulométrica

Conforme Bernucci *et al.*(2010), a distribuição granulométrica dos agregados é uma de suas principais características e interfere diretamente no comportamento dos pavimentos asfálticos.

Foi determinada a composição granulométrica, dos agregados minerais e do material fresado, através de uma análise por peneiramento, preconizada pela NBRNM 248 (2003) que prescreve o método para a determinação da composição granulométrica de agregados miúdos e graúdos. Como um dos objetivos deste trabalho foi avaliar a reutilização do material fresado na aplicação de camadas granulares, realizou-se a análise granulométrica para verificar o enquadramento dos materiais nas faixas, propostas pela DNIT-ES 141 (2010), para base estabilizada granulometricamente. A Tabela 3.1 apresenta os valores da granulometria dos materiais, representada na Figura 3.3.

Tabela 3.1- Distribuição granulométrica dos agregados

| Peneiras | Abertura (mm) | Material Fresado | Pó-de-pedra |
|-----------------|----------------------|-------------------------|--------------------|
| #2 | 50,8 | 100,00% | 100,00% |
| #1 | 25,4 | 100,00% | 100,00% |
| #3/8 | 9,5 | 74,13% | 100,00% |
| n 4 | 4,8 | 44,94% | 97,82% |
| n 10 | 2,0 | 17,14% | 65,24% |
| n 40 | 0,42 | 5,00% | 23,55% |
| n 200 | 0,075 | 0,11% | 7,35% |

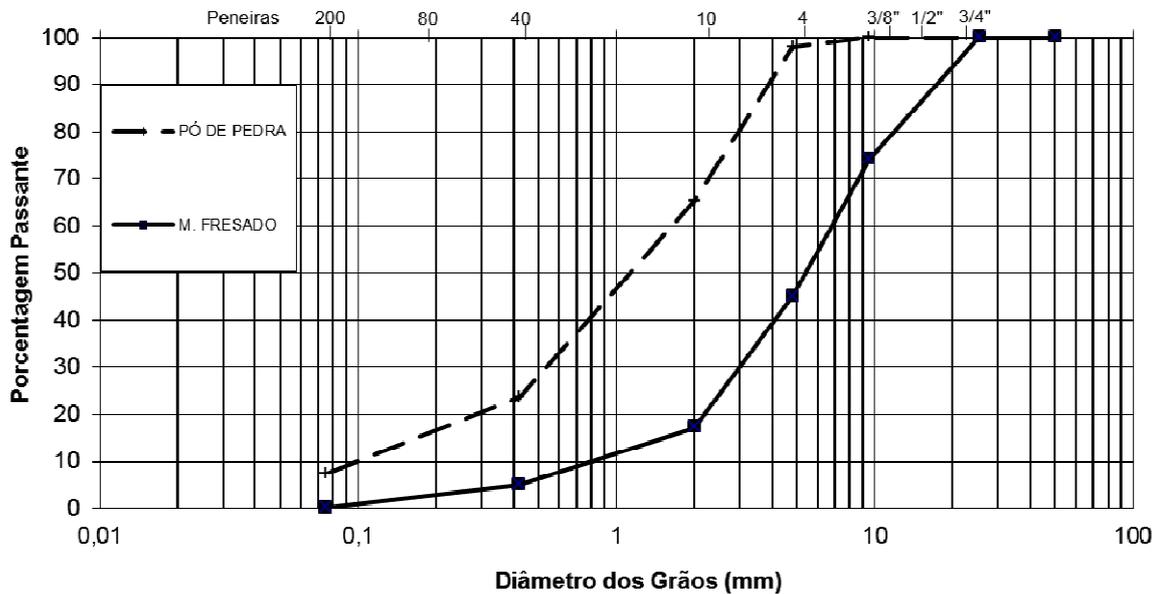


Figura 3.3 - Distribuição granulométrica dos agregados

3.3.1.2 Teor de ligante

A determinação do teor de ligante do material fresado asfáltico se deu através do método de ensaio DNER-ME 053 (1994), que fixa o modo pelo qual se determina a porcentagem de ligante extraído de misturas asfálticas, por meio de um extrator centrífugo. O ensaio consiste em colocar o material asfáltico dentro de um aparelho, denominado Rotarex, mostrado na Figura 3.4, juntamente com um solvente, onde a centrifugação gerada pelo aparelho faz com que o ligante se separe dos agregados. O teor de ligante se dá pela Equação 1:

$$TL = \frac{PA - PD}{PA} * 100 \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

PA é o peso da amostra antes da extração;

PD é o peso da amostra depois da extração.



Figura 3.4 – Demonstração do Rotarex

Para resultados mais precisos, o Rotarex precisa passar por uma curva de calibração. Esta consiste em extrair o ligante de misturas com os ligantes conhecidos, e a diferença dos resultados gera uma curva de correção do valor final. Os resultados obtidos estão demonstrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Teor de ligante

| Amostras | Peso Antes (g) | Peso Depois (g) | Teor de ligante (%) | MEDIA |
|-----------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------|
| 1 | 607,7 | 577,9 | 4,90 | 5,00 |
| 2 | 604,7 | 574,9 | 4,93 | |
| 3 | 603,3 | 572,6 | 5,09 | |
| 4 | 605,5 | 574,8 | 5,07 | |

Após a extração do ligante asfáltico do material fresado foi realizada a análise granulométrica do mesmo, para observar qual a curva original da mistura, sendo os resultados descritos na Tabela 3.3 e demonstrados na Figura 3.5.

Tabela 3.3 - Distribuição granulométrica do MF sem ligante

| Peneiras | Abertura (mm) | MF sem ligante |
|----------|---------------|----------------|
| #1 | 25,40 | 98,60% |
| #3/4 | 19,00 | 97,73% |
| #1/2 | 12,50 | 88,77% |
| #3/8 | 9,50 | 77,42% |
| n 4 | 4,75 | 55,69% |
| n 10 | 2,00 | 35,49% |
| n 40 | 0,42 | 17,96% |
| n 80 | 0,18 | 12,99% |
| n 200 | 0,075 | 8,33% |

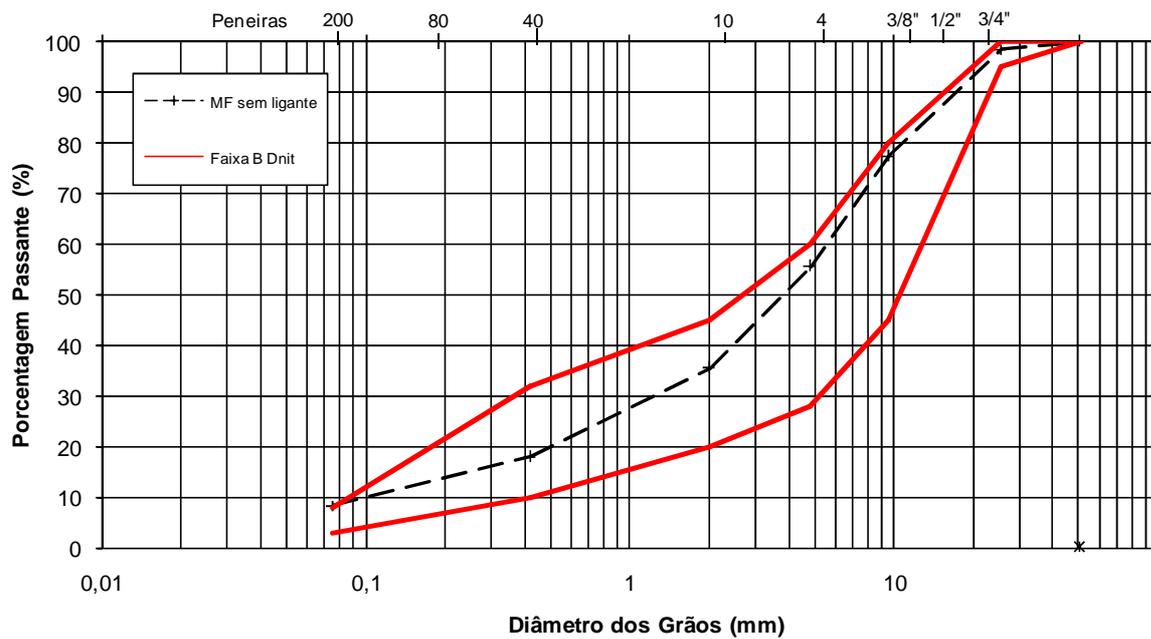


Figura 3.5 - Distribuição granulométrica do MF sem ligante

3.3.1.3 Massa específica e absorção de água dos materiais

Este ensaio foi realizado nos agregados minerais e para o material fresado asfáltico. Existem três tipos de massas específicas, a real (D_r) é a relação entre a massa seca e o volume real. A aparente (D_a) é a relação entre a massa seca e o volume aparente do agregado. E a efetiva (D_{ef}) é a relação entre a massa seca e o volume efetivo, essa massa depende da absorção do material ser maior ou menor que 2%. Absorção (A) é a quantidade de água que o agregado absorve quando imerso. A Figura 3.6 demonstra a esquematização dos volumes dos materiais.

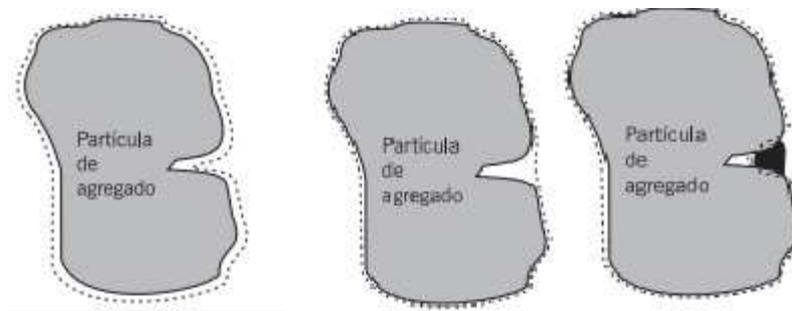


Figura 3.6 – Volume real, aparente e efetivo do agregado

Fonte: Bernucci (2010)

O ensaio para a determinação das massas específicas dos agregados depende do tamanho deles. Se o material for graúdo, ou seja, retido na peneira #4, deve ser feito o cesto metálico, ensaio preconizado pela norma NBR NM 53 (2009). Se for miúdo, deve ser feito o ensaio do picnômetro, regido pela norma NBR NM 52 (2009). Sendo assim, foi realizado o ensaio de cesto metálico com a parcela retida do na peneira #4 do material fresado e realizado o picnômetro com o pó-de-pedra e a parcela passante da peneira #4 do material fresado.

O ensaio do cesto metálico consiste primeiramente em levar duas amostras para a estufa em uma temperatura de 110 °C e secá-las por um período de 24 horas. Após deve-se pesar as amostras para se conseguir a massa seco (P_s), depois deve-se colocar as amostras imersas por 24 horas, como demonstra a Figura 3.7.



Figura 3.7 – Amostra de agregado graúdo submerso

Passado esse tempo, se retira os agregados das bandejas, seca-os com um pano e os pesa, obtendo a massa superficialmente úmida (Ph). Por fim, se coloca as amostras no cesto metálico onde se obtém amassa imersa (Pi). A Figura 3.8 demonstra esse ensaio.

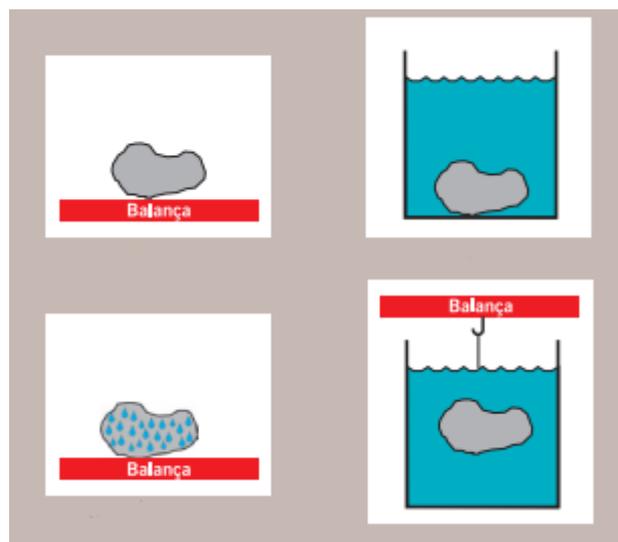


Figura 3.8 – Ensaio Cesto Metálico

Fonte: Bernucci (2010)

As relações das massas demonstradas nas fórmulas abaixo determinam a massa específica real, aparente e a absorção, conforme Equações 2, 3 e 4. Com estes valores se determina a massa específica efetiva, também demonstradas nas Equações 5 e 6. Sendo os resultados obtidos apresentados na Tabela 3.4.

$$Dr = \frac{Ps}{Ps - Pi} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$Da = \frac{Ph}{Ph - Pi} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$A = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100 \quad \text{Eq. (4)}$$

$$Se A < 2\% \quad Def = \frac{Dr + Da}{2} \quad \text{Eq. (5)}$$

$$Se A > 2\% \quad Def = \frac{Dr + 2Da}{3} \quad \text{Eq. (6)}$$

Tabela 3.4 – Densidades através do cesto metálico

| AMOSTRA 1 | | AMOSTRA 2 | |
|-----------|-------------|-----------|-------------|
| | Unidade (g) | | Unidade (g) |
| Ps | 1066,7 | Ps | 1014,33 |
| Ph | 1074,22 | Ph | 1019,97 |
| Pi | 644,87 | Pi | 612,78 |
| Dr | 2,52874 | Dr | 2,52604 |
| Da | 2,50197 | Da | 2,50490 |
| A | 0,70498 | A | 0,55603 |
| Def | 2,51536 | Def | 2,51547 |
| Médias | Dr | 2,52739 | |
| | Da | 2,50343 | |
| | A | 0,63051 | |
| | Def | 2,51541 | |

Para o ensaio do picnômetro se utiliza dois picnômetros para a realização do ensaio. Onde primeiro se pesa o picnômetro vazio (A), após enche-se o picnômetro com o material e pesa (B). Após, completa com água até cobrir o agregado e o leva para a bomba, para retirar o ar da amostra.

Passado 20 minutos na bomba, se completa o picnômetro com água e se pesa (C), esvazia-se o picnômetro, limpa-se e o completa somente com água e o pesa (D). A relação dos pesos, demonstrados na equação abaixo, determina a massa específica real. Na Tabela 3.5, estão descritos os valores das massas específicas reais dos materiais.

$$Dr = \frac{B - A}{(D - A) - (C - B)} \quad \text{Eq. (7)}$$

Tabela 3.5 – Massas específicas reais

| | Pó-de-Pedra | | Material Fresado | |
|-------|-------------|-----------|------------------|-----------|
| | Amostra 1 | Amostra 2 | Amostra 1 | Amostra 2 |
| A | 141,39 | 132,81 | 141,39 | 132,81 |
| B | 356,41 | 344,81 | 271,73 | 298,64 |
| C | 788,19 | 754,25 | 728,81 | 718,17 |
| D | 650,4 | 618,65 | 650,4 | 618,65 |
| Dr | 2,78415 | 2,77487 | 2,50992 | 2,50083 |
| Média | 2,77951 | | 2,50537 | |

3.3.1.4 Massa específica – metodologia Rice

A massa específica máxima medida, denominada densidade máxima medida (DMM), é a razão entre a massa do agregado mais ligante asfáltico e a soma dos volumes dos agregados, vazios impermeáveis, vazios permeáveis não preenchidos com asfalto e total de asfalto, conforme ilustrado na Figura 3.9.

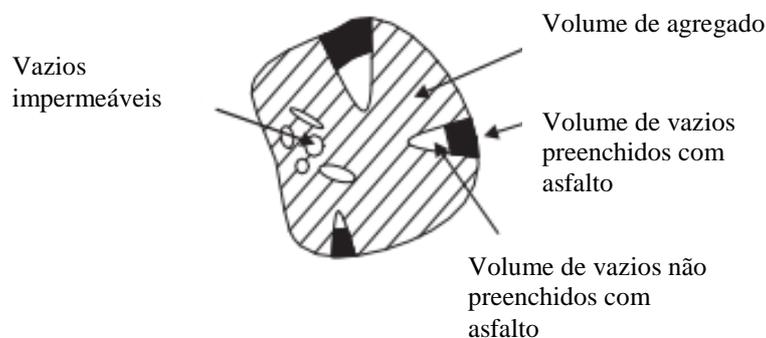


Figura 3.9 - Ilustração dos volumes considerados na determinação da DMM

Fonte: Bernucci *et al.* (2010)

Foi determinada a massa real do material fresado pela metodologia Rice, no laboratório da UFSM, obtendo-se a Densidade Máxima Medida (DMM), conforme a NBR 15619 (2012) – Misturas asfálticas- Determinação da massa específica máxima medida em amostras não compactadas. Para o cálculo do DMM é utilizada a equação a seguir, conforme a NBR 15619 (2012).

$$DMM = \frac{A}{(A + B - C)} \times 0,99707 \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde:

DMM: densidade máxima medida, expressa em gramas por centímetros cúbicos (g/cm³);

A: massa da amostra seca ao ar, expressa em gramas (g);

B: massa do recipiente com volume completo com água, expresso em gramas (g);

C: massa do recipiente contendo a amostra submersa em água, expressa em gramas (g);

Nota: 0,99707 refere-se à densidade da água a 25°C (g/cm³).

A Tabela 3.6 a seguir apresenta os resultados obtidos no ensaio, com valores em cada amostra obedecendo aos limites da norma para um mesmo material.

Tabela 3.6 – Densidade Máxima Medida

| | A (g) | B (g) | C (g) | DMM (g/cm³) | DMM Médio (g/cm³) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Amostra A | 7690,5 | 1502,7 | 8611,7 | 2,577 | 2,579 |
| Amostra B | 7690,5 | 1533,6 | 8631,7 | 2,581 | |

3.3.1.5 Caracterização do cimento

Foram realizados os ensaios de caracterização física e mecânica do cimento no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ), sendo os ensaios executados: finura na peneira #200, início e fim de pega e a resistência da argamassa para 1, 3 e 7 dias de cura úmida. Os resultados estão demonstrados na Tabela 3.7 e os limites descritos na NBR 5733 (1991).

Tabela 3.7 – Características físicas e mecânicas

| Características e propriedades | | Unidade | Resultados | Limites - NBR |
|--------------------------------|--------------------------|--------------------|------------|---------------|
| Finura | Na Peneira n200 | % | 1,2 | ≤ 6 |
| | Área Específica – Blaine | m ² /kg | 533* | ≥ 300 |
| Tempo de Pega | Início | min | 225 | ≥ 60 |
| | Fim | min | 305 | ≤ 600 |
| Resistência à compressão | 1 dia de cura | MPa | 26,4 | ≥ 14 |
| | 3 dias de cura | MPa | 35,2 | ≥ 24 |
| | 7 dias de cura | MPa | 46,4 | ≥ 34 |

* Resultado do fabricante

3.3.2 Caracterização das misturas

3.3.2.1 Dosagem e mistura

De acordo com as informações coletadas na etapa de revisão bibliográfica, sabe-se que o material fresado apresenta na sua constituição granulométrica uma deficiência de finos (o que também está comprovado pela análise granulométrica do mesmo), o que dificulta o seu enquadramento em faixas de estabilização granulométrica utilizadas para camadas de base granular, conforme DNIT-ES 141 (2010). Portanto realizaram-se misturas deste com o pó-de-pedra para enquadrar a mistura na faixa granulométrica.

Foi utilizada a relação de massa de 70% de material fresado para 30% de pó-de-pedra, estas já foram estudada por outros autores (CORREIA E SILVA (2013), PIRES (2014), ...) como sendo a mistura com melhor relação entre o pó-de-pedra e material fresado.

Porém a granulometria atual dos materiais, descritas na Tabela 3.1, quando colocada nessas proporções (70MF/30PDP) a mistura não se enquadra na faixa granulométrica C do DNIT de base granular, sendo assim que para se enquadrar precisaria de um pó-de-pedra mais fino, como o descrito na Tabela 3.8, e demonstrado na Figura 3.10. Então para obter esse material mais fino foi forçado a granulometria do pó-de-pedra original.

Tabela 3.8 – Granulometria dos agregados utilizados

| Peneiras | Abertura (mm) | Material Fresado | Pó-de-pedra | Mistura |
|----------|---------------|------------------|-------------|---------|
| #2 | 50,8 | 100,00% | 100,00% | 100,00% |
| #1 | 25,4 | 100,00% | 100,00% | 100,00% |
| #3/8 | 9,5 | 74,13% | 100,00% | 81,89% |
| n 4 | 4,8 | 44,94% | 100,00% | 61,46% |
| n 10 | 2 | 17,14% | 71,00% | 33,30% |
| n 40 | 0,42 | 5,00% | 46,50% | 17,45% |
| n 200 | 0,075 | 0,11% | 21,00% | 6,37% |

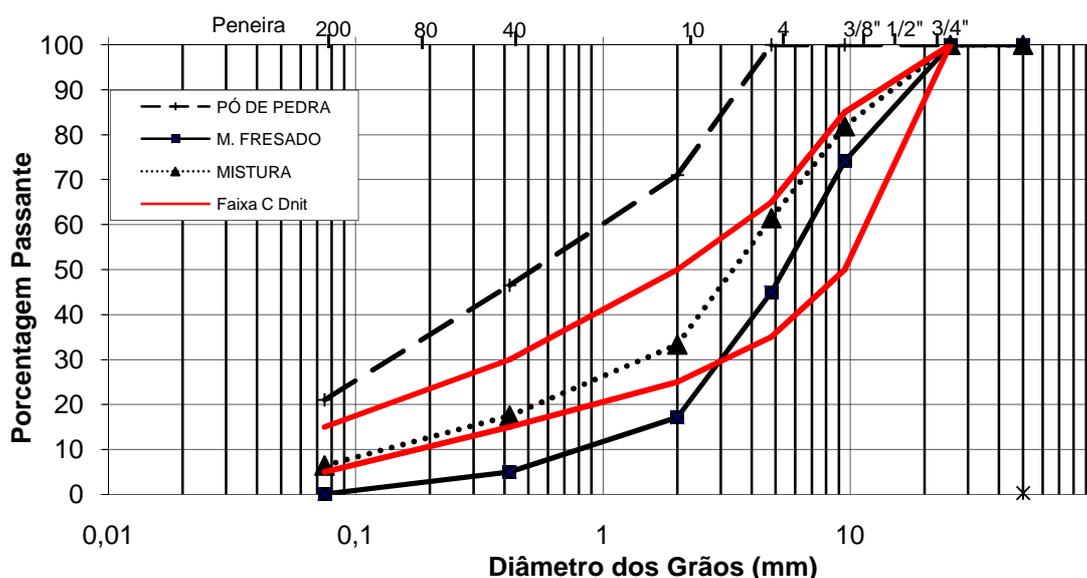


Figura 3.10 – Granulometria dos agregados utilizados

3.3.2.2 Compactação Proctor

Segundo DNIT (2006), a compactação Proctor é um ensaio que se dá pela aplicação de uma energia mecânica (pressão, impacto ou vibração) no solo (e em outros materiais, como misturas betuminosas). O resultado desta compactação gera um aumento de sua massa específica aparente e redução de vazios do material, conseqüentemente gerando um aumento na resistência ao cisalhamento e redução da permeabilidade e compressibilidade do mesmo.

Nesta pesquisa foram utilizadas todas as energias de compactação devido à utilização das massas específicas aparentes máximas de cada energia no cálculo do fator porosidade/teor de cimento. O ensaio segue os preceitos da norma DNER ME 162 (1994) e da NBR 7182 (1986), que consiste em compactar com um soquete de 4,536 kg o material passante na peneira # 3/4, num molde cilíndrico de dimensões padronizadas. A compactação é feita em cinco camadas, aplicando um determinado número de golpes por camada conforme a energia de compactação pretendida: normal (12 golpes); intermediária (26 golpes) ou modificada (55 golpes). Após a compactação pesa-se o cilindro determinando a massa específica úmida do material, obtendo assim a massa específica aparente seca.

A umidade do material é determinada pela NBR 6457 (1986) através da secagem em estufa a 110°C de uma amostra retirada do corpo-de-prova. Entretanto, como essa pesquisa trabalha com material fresado, o processo de secagem teve de ser alterado devido à volatilidade do ligante asfáltico e ao ponto de amolecimento do mesmo sob altas temperaturas, então a temperatura de secagem utilizada foi de 60°C. Os resultados das curvas de compactação para cada energia estão demonstrados na Figura 3.11.

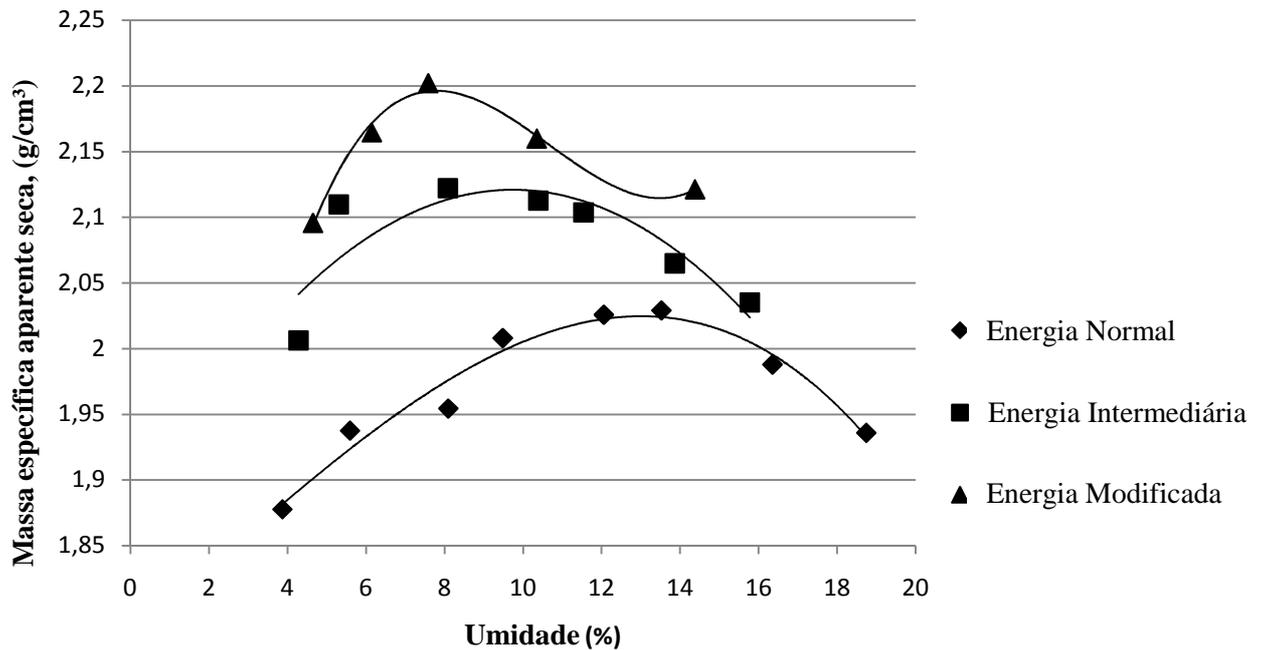


Figura 3.11 – Curvas de compactação da mistura MF + PDP

Como já foi citado anteriormente a umidade de mistura de amostra solo-cimento é um fator preponderante na determinação da resistência à compressão simples e a relação existente entre a porosidade e o teor de cimento é melhor avaliada quando ambas as misturas são preparadas em um mesmo teor de umidade, sendo assim foi escolhida a umidade de 8% e o γ_d de 2,0; 2,1 e 2,2 g/cm³.

3.3.2.3 Resistência à Compressão Simples (RCS)

Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS) ou resistência à compressão não confinada tem sido utilizados na maioria dos programas experimentais relatados na literatura quando se deseja verificar a efetividade da estabilização com cimento ou com aspectos relativos à importância de fatores influentes sobre a resistência de solos cimentados com cimento Portland. Uma das razões para tal é a experiência acumulada é o fato de ser um ensaio de simples e rápida execução, baixo custo, confiável e amplamente difundido no meio técnico.

A realização dos ensaios de compressão simples segue os procedimentos gerais descritos pela NBR 12025 (2012), com o auxílio da NBR 12253 (2012), da DNER-ME 180 (1994) e da ASTM D 2166 (2006). Foram ensaiadas 27 amostras com dimensão de 10 x 20 cm, conforme Figura 3.12, variando nessas amostras o teor de cimento e massa específica das misturas.



Figura 3.12 – Corpo de prova de 10 x 20 cm

Para estes ensaios foi utilizada uma prensa automática com capacidade máxima de 10 toneladas, conforme demonstra a Figura 3.13, além de anéis dinamômetros calibrados, sendo a velocidade de carregamento aplicado a uma taxa de deslocamento de 1,14 mm/min.



Figura 3.13 – Prensa automática

Os corpos-de-prova, após serem curados em temperatura, foram submersos em um recipiente com água por um período de 24 horas, visando aproximar a condição de saturação. Imediatamente antes do ensaio de resistência à compressão simples, os corpos-de-prova foram retirados do tanque e superficialmente secos com auxílio de um tecido absorvente. Após a execução do ensaio e anotou-se a carga máxima atingida pelo corpo-de-prova.

3.3.2.4 Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)

A resistência à tração do solo-cimento é de grande interesse e tem sido investigada por vários pesquisadores. Geralmente a resistência à tração, nas condições de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima, atinge cerca de 10% da resistência à compressão simples nas mesmas condições (INGLES & METCALF, 1972).

O ensaio brasileiro de compressão diametral para determinação indireta da RT foi desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro no Rio de Janeiro para concreto de cimento Portland (Carneiro, 1943). A configuração desse ensaio considera a aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro.

Segundo Bernucci *et al.*(2010) o ensaio se tornou muito popular no mundo todo devido à facilidade e rapidez de execução, além do fato de utilizar o mesmo corpo-de-prova cilíndrico e o mesmo equipamento usado para a obtenção da resistência à compressão simples.

Os ensaios seguiram os preceitos das normas DNIT-ME 126 (2010), ASTM C 496 (2004) e ASTM D 6931 (2012). Para esse ensaio foram moldados 27 corpos-de-prova com dimensão de 10 x 20 cm, variando nesses o teor de cimento e massas específicas das misturas. Foi utilizada essa dimensão para melhor comparativo com a RCS. A Figura 3.14 ilustra um corpo-de-prova sendo ensaiado.



Figura 3.14 – Corpo-de-prova de 10 x 20 cm ensaiado à Tração

Conforme a norma do DNIT (2010), para a realização desse ensaio deve-se medir a altura e o diâmetro do corpo-de-prova. Estabilizá-los na temperatura de 25°C por duas horas, após esse tempo, colocá-lo na prensa entre dois frisos com comprimento igual ou maior ao do corpo-de-prova. Se aplica um deslocamento progressivamente, com uma velocidade de 0,8 mm/s até que se dê a ruptura do corpo-de-prova, anota-se o valor da carga, e utiliza a equação abaixo para obter o resultado de RT.

$$RT = \frac{2 * F}{\pi * D * H} \quad \text{Eq. (9)}$$

Sendo:

RT= Resistência à tração;

F = Carga de ruptura;

D = Diâmetro do corpo-de-prova;

H = Altura do corpo-de-prova;

3.3.2.5 Módulo de Resiliência (MR)

O nome módulo de resiliência (*resilient modulus* em inglês) foi criado para que não fosse confundido com o módulo de Young, determinado estaticamente (Hveem, 1955). Segundo Aranha (2013), a rigidez de dado material é expressa pelo módulo de resiliência quando se trata de um material granular e módulo de elasticidade quando se trata de concreto. Para Huang (1993) o módulo de resiliência é o módulo de elasticidade para ser usado com a teoria da elasticidade. Ele também cita que a maioria dos materiais de pavimentação não possuem características elásticas, mas apresentam alguma deformação permanente depois de cada aplicação de carga. No entanto, se a carga for pequena em comparação com a resistência do material, e for repetida para um grande número de vezes, a deformação sob a carga de cada repetição é quase completamente recuperável e proporcional à carga, podendo ser considerado elástico.

Os procedimentos para o ensaio módulo de resiliência se baseiam na DNIT-ME 125 (2010) e na ASTM D 4123 (1995). Foram moldados um total de 27 corpos-de-prova, com dimensão de 6,50 cm e diâmetro de $10 \pm 0,2$ cm, conforme demonstra a Figura 3.15.



Figura 3.15 – Corpo de prova 6,5 x 10 cm

Os corpos-de-prova foram ensaiados no Laboratório da Universidade Federal de Santa Maria. Conforme Boeira (2013), o equipamento utilizado é uma UTM-25 (Figura 3.16), que é composta por um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante com o auxílio de um dispositivo pneumático, acoplado a um regulador de tempo e frequência.



Figura 3.16 – Prensa UTM-25

O MR é a relação entre a tensão de tração aplicada (σ) repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura asfáltica e a deformação específica recuperável (ϵ) correspondente à tensão aplicada. A aplicação de carga é semi-senoidal por se aproximar da forma de carregamento correspondente à passagem de roda. O tempo de duração de aplicação total de carga é de 0,1 segundo e o repouso de 0,9 segundo. Durante a aplicação de carga, a amostra sofre deformações horizontais, que são medidas através de um LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*), ligado a um computador. Para a execução do ensaio o carregamento utilizado é equivalente a 10% da resistência a tração da mistura e o coeficiente de Poisson fixado em 0,30, conforme recomendação da DNER-ME 135 (2010). A equação 11 utilizada para o cálculo do MR está descrita abaixo.

$$MR = \frac{F}{100 * \Delta * H} * (0,9976 * \mu + 0,2692) \quad \text{Eq. (10)}$$

Sendo:

MR = módulo de resiliência;

F = carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo-de-prova;

Δ = deformação elástica ou resiliente registrada no microcomputador, para aplicações da carga (F);

H = altura do corpo-de-prova;

μ = coeficiente de Poisson.

3.3.2.6 Módulo Complexo (E^*)

O ensaio de módulo complexo pode ser usado para determinar tanto as características elásticas quanto as propriedades viscoelásticas do material (CHRISTENSEN, 1982). O surgimento deste ensaio é anterior a 1960 e foi feito por pesquisadores da Universidade de Ohio, nos EUA. Em 1979 foi adotado pela ASTM como método de ensaio para determinação do módulo dinâmico de misturas asfálticas (ASTM D 3497-79), esse parâmetro é obtido usualmente por meio de um carregamento senoidal aplicado axialmente em corpos-de-prova cilíndricos.

Para isso foram moldados 16 corpos-de-prova, com dimensões 10x15 cm seguindo os as recomendações da norma AASHTO TP 79-12 (2001) , para 28 dias de cura, variando o teor de cimento e a massa específica das misturas, conforme Figura 3.17.



Figura 3.17 – Corpo de prova 10 x 15 cm

O procedimento é repetido para diferentes temperaturas e frequências de carregamento com o intuito de construir uma curva mestra que incorpore os efeitos das duas variáveis citadas, tempo (t) e temperatura (FRANCKEN e PARTL, 1996). Para esse ensaio foram utilizadas 5 temperaturas (-10 ,4 , 21 ,37e 54 C°) e 10 frequências (0,01; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20 e 25 Hz).

As condições do estado de tensões do ensaio para determinação do módulo complexo são aplicadas por uma onda compressiva senoidal uniaxial em uma amostra não confinada a uma dada temperatura e frequência de carga. As deformações dinâmicas verticais são registradas através de LVDT's ou de "Strain Gauges" colados à meia altura das amostras. (FONSECA, 1995), conforme Figura 3.18.



Figura 3.18 – Corpo de prova instrumentado

O módulo dinâmico é definido por Fonseca (1995):

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Eq. (11)}$$

$$\sigma = \sigma_0 * \text{sen}(\omega * t) \quad \text{Eq. (12)}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 * \text{sen}(\omega * t - \delta) \quad \text{Eq. (13)}$$

$$\omega = 2 * \pi * f \quad \text{Eq. (14)}$$

Sendo:

E^* = Módulo Dinâmico;

σ = Tensão;

ε = Deformação;

σ_0 = amplitude da tensão;

ω = velocidade angular;

f = frequência em rad/s;

t = tempo em s;

ε_0 = amplitude de deformação;

δ = ângulo de fase em graus(ângulo relacionado com o atraso da ε_0 em relação à σ_0) ;

O ângulo de fase é um indicador das propriedades viscosas do material. Para um material puramente elástico, $\delta = 0^\circ$, e para materiais puramente viscosos, $\delta = 90^\circ$.

A relação entre as amplitudes de tensão e deformação define o valor absoluto do módulo complexo. Este valor é conhecido como módulo dinâmico e é dado pela seguinte equação. (FERRY, 1980)

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad \text{Eq. (15)}$$

O módulo dinâmico E^* é composto tanto de uma parte real, quanto de uma parte imaginária, sendo:

$$E^* = E' + i * E'' \quad \text{Eq. (16)}$$

Sendo a componente em fase com o carregamento é chamada de módulo de armazenamento (*storage modulus*), e tem relação com a resposta elástica do material:

$$E_1 = \frac{\sigma_0 * \cos(\delta)}{\varepsilon_0} \quad \text{Eq. (17)}$$

A componente defasada define o módulo de perda (*loss modulus*) e tem relação com a resposta viscosa do material:

$$E_2 = \frac{\sigma_0 * \sin(\delta)}{\varepsilon_0} \quad \text{Eq. (18)}$$

A análise dos dados provenientes do ensaio de módulo complexo envolve a geração de curvas mestras. A curva mestra de uma mistura asfáltica permite que comparações sejam feitas sobre uma faixa de frequências e temperaturas, pois é construída utilizando-se o princípio da superposição tempo-temperatura (Ferry, 1980).

Segundo Bernucci *et al.* (2010), este princípio permite que os dados coletados a diferentes temperaturas sejam deslocados horizontalmente relativamente a uma temperatura de referência, como demonstra a Figura 3.19.

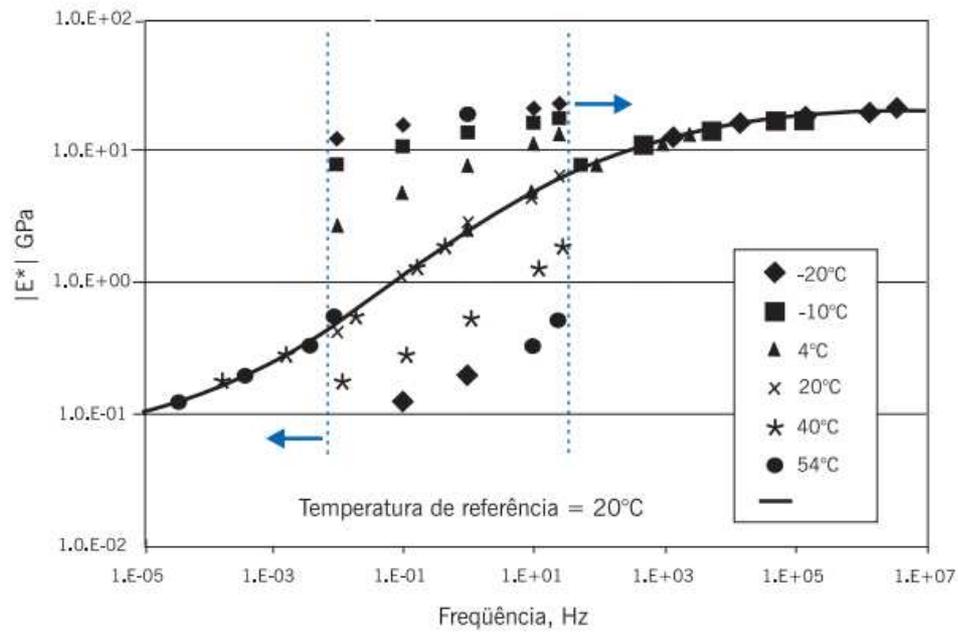


Figura 3.19- Curva mestra de módulo dinâmico

Fonte: Bernucciet al. (2010)

Para a realização da curva mestra foi utilizado o modelo 2S2P1D. O modelo foi desenvolvido para simulação de propriedades viscoelásticas lineares tanto de ligantes quanto de misturas asfálticas.

Di Benedetto et. al. (2004) experimentaram variadas misturas a fim de compreender o comportamento viscoelástico linear das misturas betuminosas. Caracterizaram as misturas através da interpretação dos testes de módulo complexo, em temperaturas e frequências variadas, que forneceram dados para utilização do modelo 2S2P1D desenvolvido pelos autores.

O modelo 2S2P1D possui parâmetros de calibração para representação correta do comportamento viscoelástico do material em termos de módulo, ângulo de fase e coeficiente de Poisson para temperatura e frequência de carregamento variado.

Os valores de ângulo de fase e módulo dinâmico dão origem ao diagrama de Black. Este permite compreender as mudanças no comportamento do material em diferentes temperaturas, relacionando o módulo dinâmico e o ângulo de fase.

São geradas duas curvas mestras, uma de ângulo de fase que proporciona a verificação do comportamento viscoso do material em diferentes temperaturas e frequências. E uma de módulo dinâmico que permite a análise da variação do módulo em variadas temperaturas e frequências.

4. RESULTADOS

4.1 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

Diversos trabalhos comprovam a existência de relação entre porosidade e grau de cimentação, utilizados para solos artificialmente cimentados (Lopes Junior, 2006; Cruz, 2008; Dalla Rosa, 2009; Silvani, 2013; Quiñónez Samaniego, 2015; entre outros). Estes trabalhos mostraram que, mesmo com diferentes tipos de materiais, períodos de cura e temperatura, foi possível encontrar uma relação coerente entre o grau de cimentação e a porosidade, com um preceito que define a resistência à compressão simples de solos artificialmente cimentados.

Para os ensaios de compressão simples realizados nesta dissertação, foram adotados graus de cimentação correspondentes a 3%, 5% e 7% em relação ao peso seco de solo. Nestes níveis de cimentação, foram preparadas amostras com três massas específicas aparentes secas diferentes, correspondentes aos valores 2,0; 2,1 e 2,2 g/cm³.

Na Tabela 4.1 é apresentado um resumo dos valores médios das resistências à compressão simples em função do tipo de dosagem adotado, os demais valores estão descritos no Quadro 1 no Apêndice A. A partir destes dados, foram elaboradas as Figuras 4.1 a 4.4, nas quais estão alguns aspectos relevantes do comportamento da mistura em estudo são evidenciados.

Tabela 4.1 – Valores médios da RCS

| γ_d (g/cm ³) | Teor de cimento (%) | RCS (kPa) |
|---------------------------------|---------------------|-----------|
| 2,0 | 3 | 708,28 |
| | 5 | 1326,64 |
| | 7 | 2199,23 |
| 2,1 | 3 | 1447,68 |
| | 5 | 1991,06 |
| | 7 | 2920,62 |
| 2,2 | 3 | 2346,80 |
| | 5 | 3528,60 |
| | 7 | 4687,73 |

4.1.1 Efeito do teor de cimento

Na Figura 4.1 são apresentadas retas da variação da resistência à compressão simples em função do teor de cimento. Cada reta, isoladamente, possui a mesma massa específica aparente seca e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=8\%$). Cada ponto corresponde à média de resistência de três corpos-de-prova moldados com características idênticas.

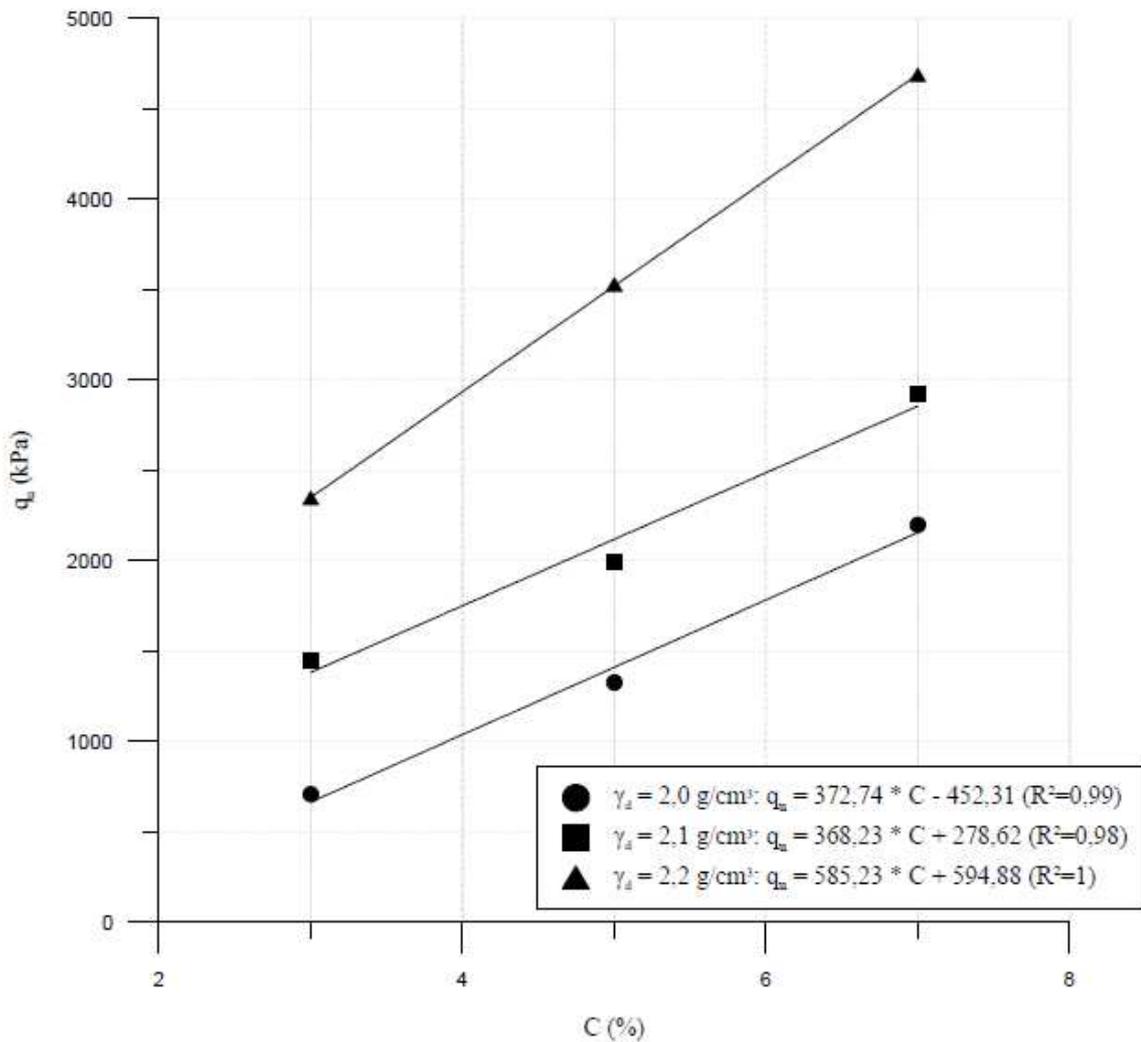


Figura 4.1 - Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cimento

Pode-se observar que a quantidade de cimento tem um grande efeito sobre a resistência à compressão simples do material. Mesmo pequenas adições de cimento são suficientes para gerar enormes ganhos de resistência. Ao se aumentar a quantidade de cimento de 3% para 7%, a Resistência à Compressão Simples, em média, duplicou. Também se observou que, a

Estudo da resistência e da rigidez de uma mistura de material fresado e pó-de-pedra com a adição de cimento

resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento da quantidade de cimento. Além disso, verificou-se que para um mesmo teor de cimento aumentando a energia de compactação aumenta a resistência.

4.1.2 Efeito da porosidade

Na Figura 4.2 são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da porosidade. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cimento e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=8\%$). Cada ponto corresponde à média da porosidade de três corpos-de-prova moldados com características idênticas.

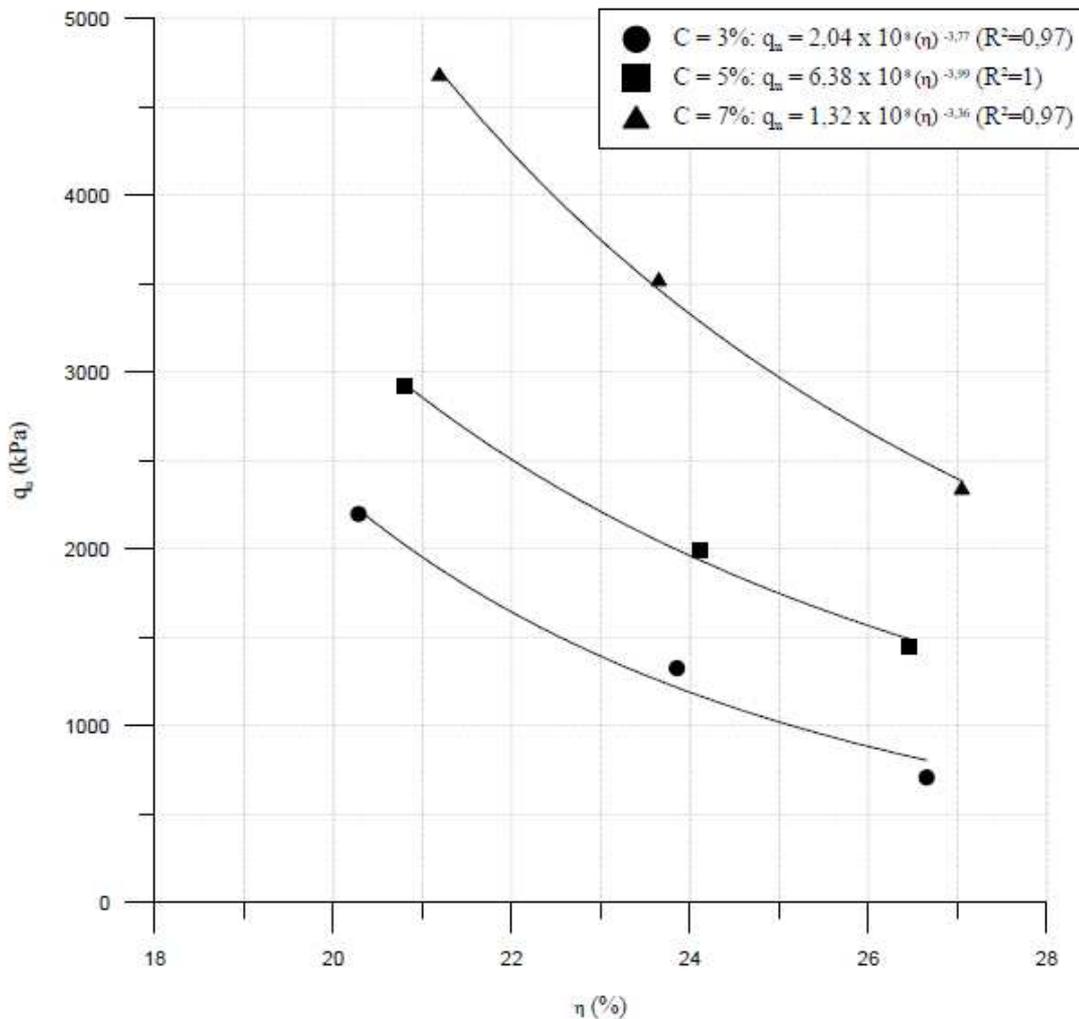


Figura 4.2 - Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade

Observa que, de maneira similar à quantidade de cimento, a porosidade da mistura compactada exerce uma forte influência sobre a resistência à compressão simples da mistura. Independentemente da quantidade de cimento utilizado, a redução na porosidade do material promove ganhos significativos de resistência. A resistência à compressão simples aumentou exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

4.1.3 Relação Vazios/Cimento

Na Figura 4.3 são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da relação vazios/cimento. Cada curva, isoladamente, possui a mesma massa específica aparente seca e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=8\%$).

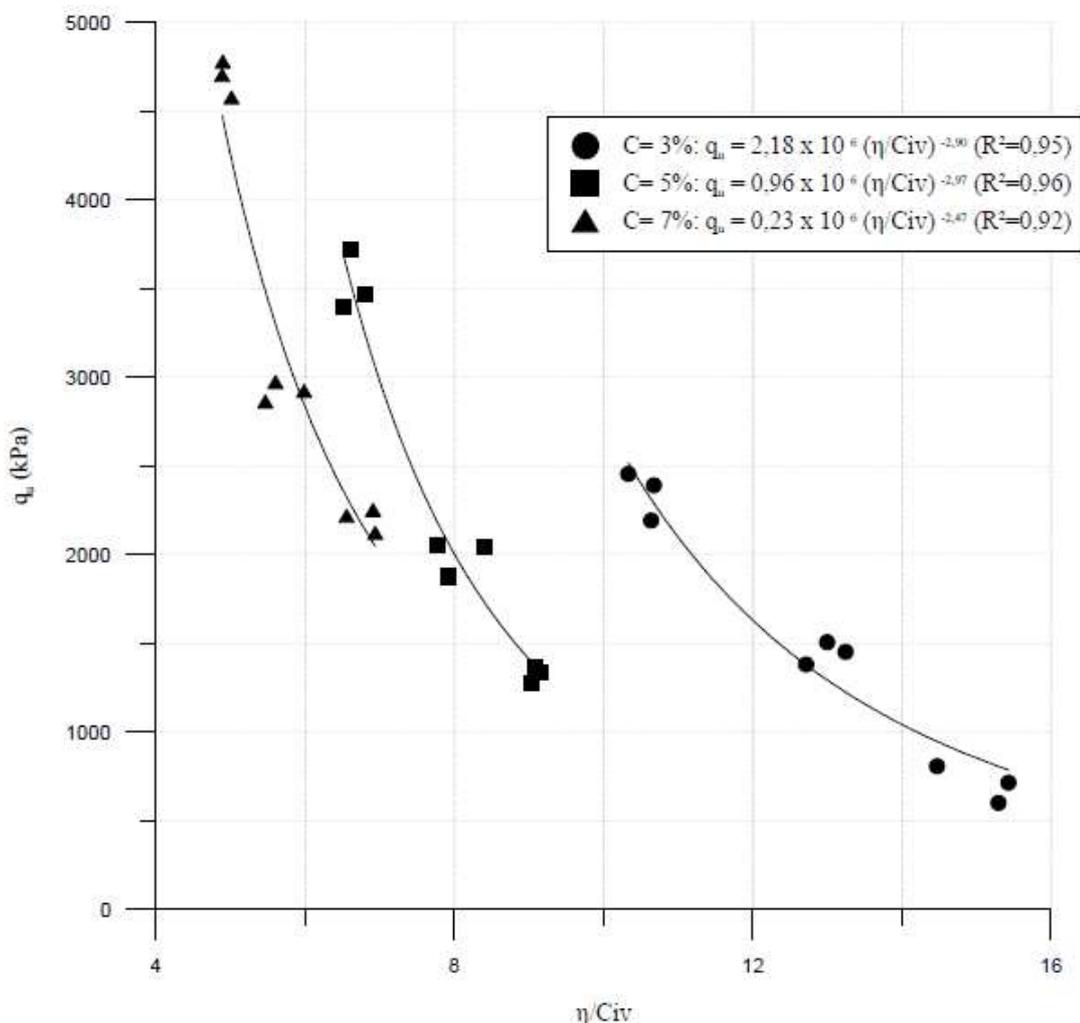


Figura 4.3 - Variação da resistência à compressão simples versus à relação vazios/cimento

Pode-se observar que não aparenta existir uma correlação única entre a resistência à compressão simples e a relação porosidade/teor volumétrico de cimento. Uma maneira de compatibilizar as taxas de variação das grandezas citadas é através da aplicação da potência em uma delas. Com a utilização do solver no Excel, obteve-se a potência igual a 0,34 sobre o parâmetro teor volumétrico de cimento, sendo que com este conseguiu compatibilizar as taxas de variação e resultando num melhor ajuste da curva.

A Figura 4.4 apresenta a curva de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da relação porosidade/teor volumétrico de cimento elevado na potência 0,34. A curva possui diversas massas específicas aparente secas e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=8\%$).

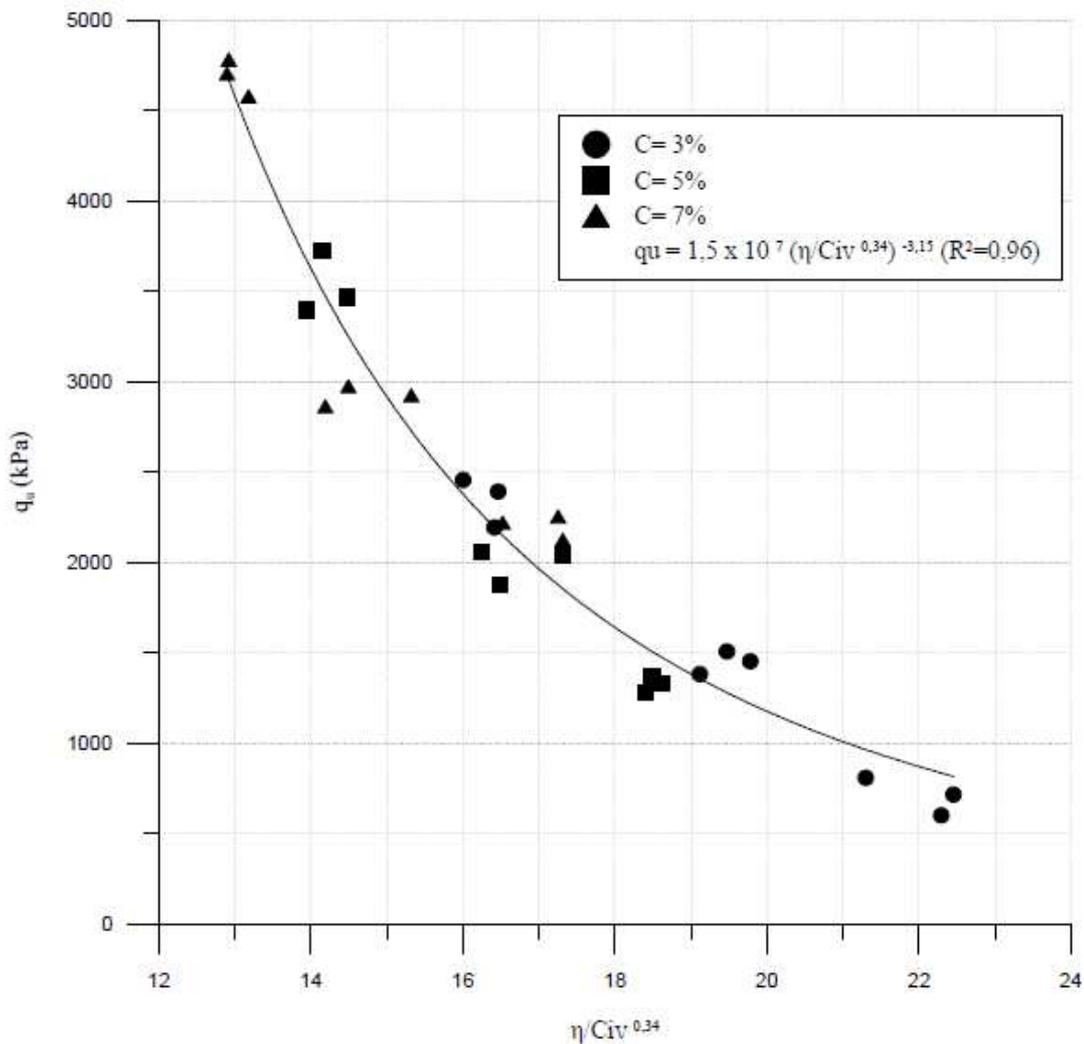


Figura 4.4 - Variação da resistência à compressão simples versus à relação vazios/cimento ajustado

Pode-se observar uma excelente correlação entre a porosidade/teor volumétrico de cimento ajustados e a resistência a compressão simples para a mistura de 70MF+ 30PDP utilizada no estudo. Foi utilizada a curva do tipo potência, pois foi a que apresentou melhores coeficientes de correlação R^2 .

4.1.4 Modo de Ruptura

Conforme Foppa (2005) primeiramente cabe fazer a distinção entre dois modos básicos de ruptura: a ruptura frágil e a ruptura dúctil. A ruptura frágil se caracteriza por uma queda brusca de resistência depois de alcançada a tensão máxima, com a formação de planos de ruptura bem definidos. Esse tipo de ruptura é característica de materiais muito rígidos como, por exemplo, areias densas, argilas fortemente pré-adensadas e solos cimentados (em baixas tensões confinantes). Já a ruptura dúctil não apresenta queda significativa de resistência depois de atingida à máxima tensão desvio, nem apresenta formação de planos de ruptura bem definidos. Esse tipo de ruptura é característica de areias fofas e argilas moles.

A Figura 4.5 mostra um corpo-de-prova submetido à compressão simples. Em todos os ensaios de compressão simples realizados observou-se um modo de ruptura frágil com a formação de um bem definido ou parcialmente definido. Em geral, o ângulo formado entre o plano de ruptura e o plano onde atua a tensão principal maior foi de aproximadamente 60° . Não foram notadas diferenças significativas entre o tipo de ruptura apresentado por corpos-de-prova com mesma relação vazios/cimento.



Figura 4.5 – Plano de ruptura

4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RTCD)

Para os ensaios de resistência a tração realizada nesta dissertação, foram adotados graus de cimentação correspondentes a 3%, 5% e 7% em relação ao peso seco de solo. Nestes níveis de cimentação, foram preparadas amostras com três graus de compactação diferentes, correspondentes aos valores 2,0; 2,1 e 2,2 g/cm³.

Na Tabela 4.2 é apresentado um resumo dos valores médios das resistências à tração em função do tipo de dosagem adotado, os demais valores estão descritos no Quadro 2 no Apêndice A. A partir destes dados, foram elaboradas as Figuras 4.6 a 4.9, nas quais estão alguns aspectos relevantes do comportamento da mistura em estudo são evidenciados.

Tabela 4.2 – Valores médios da RTCD

| γ_d (g/cm ³) | Teor de cimento (%) | RTCD (kPa) |
|---------------------------------|---------------------|------------|
| 2,0 | 3 | 116,81 |
| | 5 | 269,43 |
| | 7 | 328,19 |
| 2,1 | 3 | 275,27 |
| | 5 | 385,83 |
| | 7 | 537,84 |
| 2,2 | 3 | 373,17 |
| | 5 | 510,26 |
| | 7 | 719,12 |

4.2.1 Efeito do teor de cimento

Na Figura 4.6 são apresentadas retas da variação da resistência à tração em função do teor de cimento. Cada reta, isoladamente, possui a mesma massa específica aparente seca e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega = 8\%$). Cada ponto corresponde à média de resistência de três corpos-de-prova moldados com características idênticas.

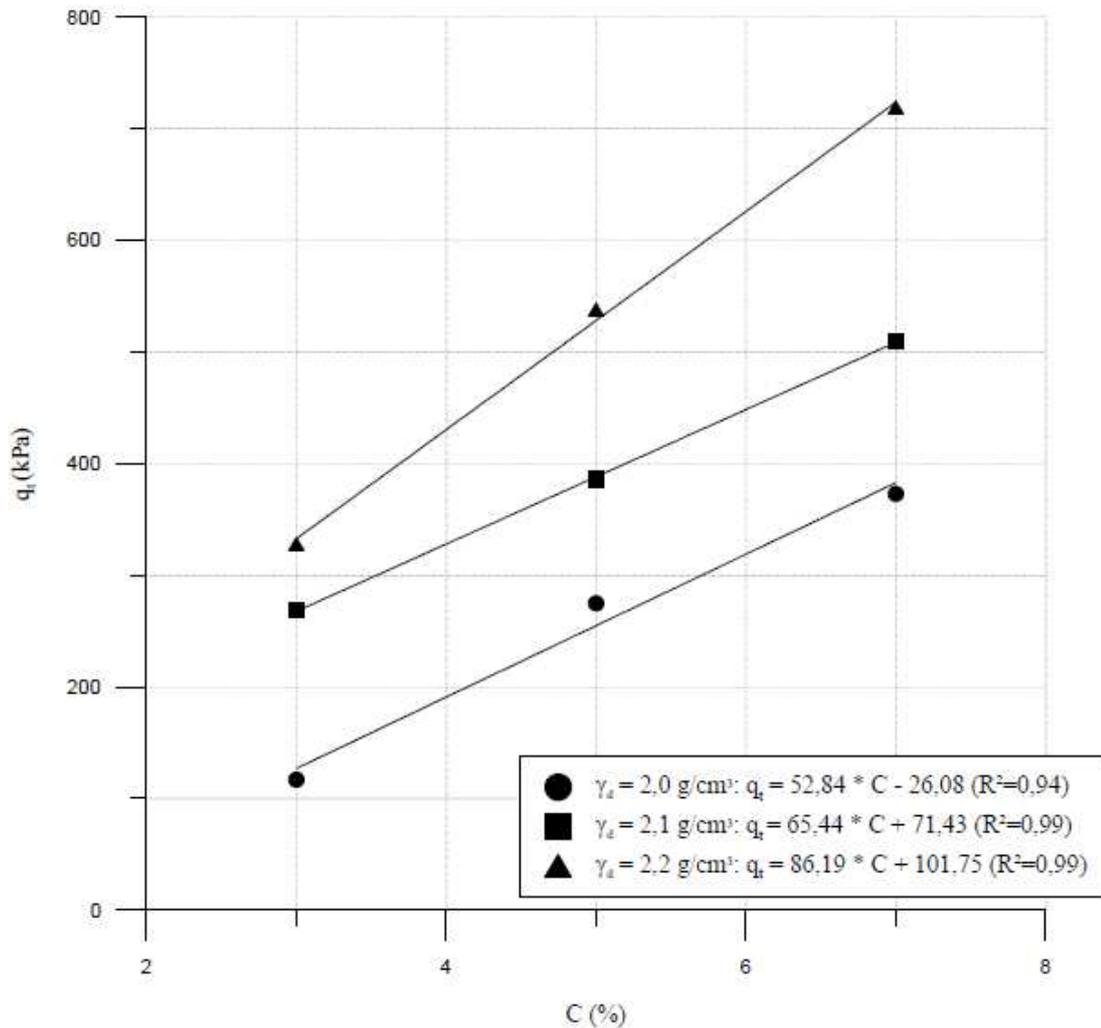


Figura 4.6 - Variação da resistência à tração em relação ao teor de cimento

Pode-se observar que a quantidade de cimento tem um grande efeito sobre a resistência à tração da mistura. Mesmo pequenas adições de cimento são suficientes para gerar enormes ganhos de resistência. Ao se aumentar a quantidade de cimento de 3% para 7%, a Resistência à Compressão Simples, em média, duplicou. Também se observou que, a resistência à tração aumenta linearmente com o aumento da quantidade de cimento. Além disso, também foi verificado que para um mesmo teor de cimento aumentando a energia de compactação aumenta a resistência.

4.2.2 Efeito da porosidade

Na Figura 4.7 são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à tração em função da porosidade. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cimento e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega = 8\%$). Cada ponto corresponde à média da porosidade de três corpos-de-prova moldados com características idênticas.

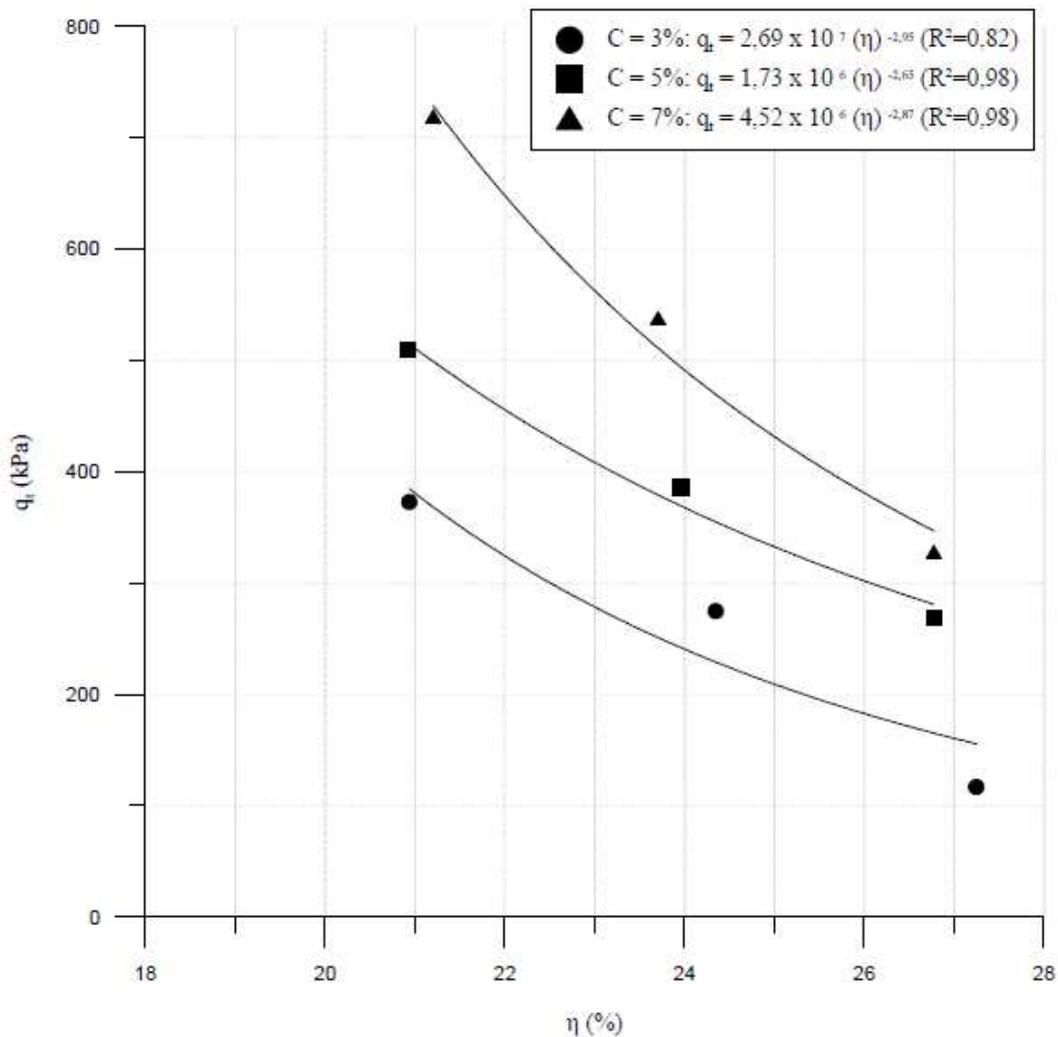


Figura 4.7 - Variação da resistência à tração em relação à porosidade

Observa que, de maneira similar à quantidade de cimento, a porosidade da mistura compactada exerce uma forte influência sobre a resistência à tração da mistura, com um comportamento similar com as curvas de resistência à compressão simples. Os gráficos permitem verificar que a redução na porosidade do material promove ganhos significativos de

resistência. A resistência à tração aumentou exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

4.2.3 Relação Vazios/Cimento

Na Figura 4.8 são apresentadas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função da relação vazios/cimento. Cada curva, isoladamente, possui a mesma massa específica aparente seca e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=8\%$).

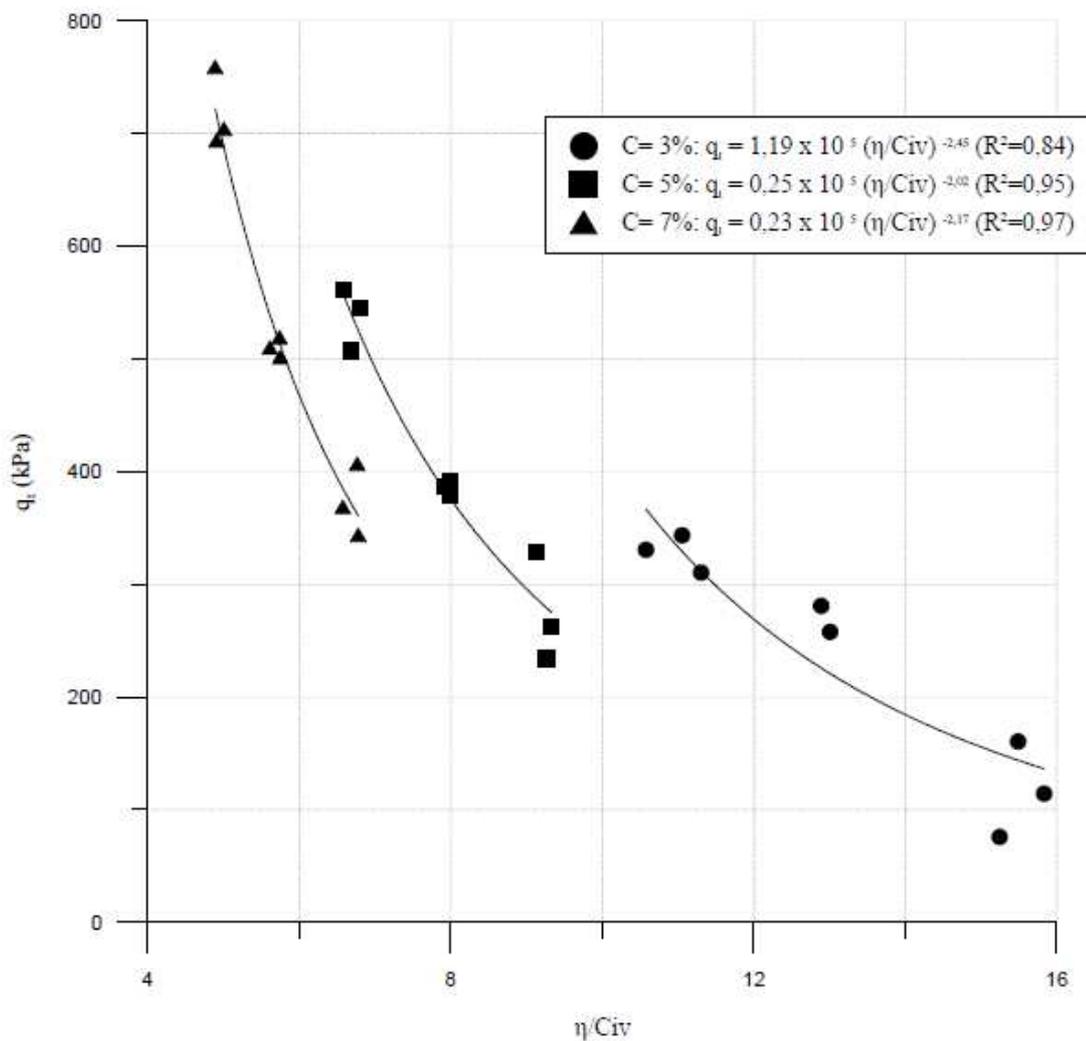


Figura 4.8 - Variação da resistência à tração versus à relação vazios/cimento

Pode-se observar que não aparenta existir uma correlação única entre a resistência à tração e a relação porosidade/teor volumétrico de cimento. Uma maneira de compatibilizar as taxas de variação das grandezas citadas é através da aplicação da potência em uma delas. Obteve-se a potência igual a 0,39 sobre o parâmetro teor volumétrico de cimento, sendo que com este conseguiu compatibilizar as taxas de variação e resultando num melhor ajuste da curva.

A Figura 4.9 apresenta a curva de ajuste da variação da resistência à tração em função da relação porosidade/teor volumétrico de cimento elevado na potencia 0,39. A curva possui diversas massas específicas aparentes secas e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=8\%$). Pode-se observar uma boa correlação entre a porosidade/teor volumétrico de cimento ajustados e a resistência a tração para a mistura de 70MF+ 30PDP utilizada no estudo.

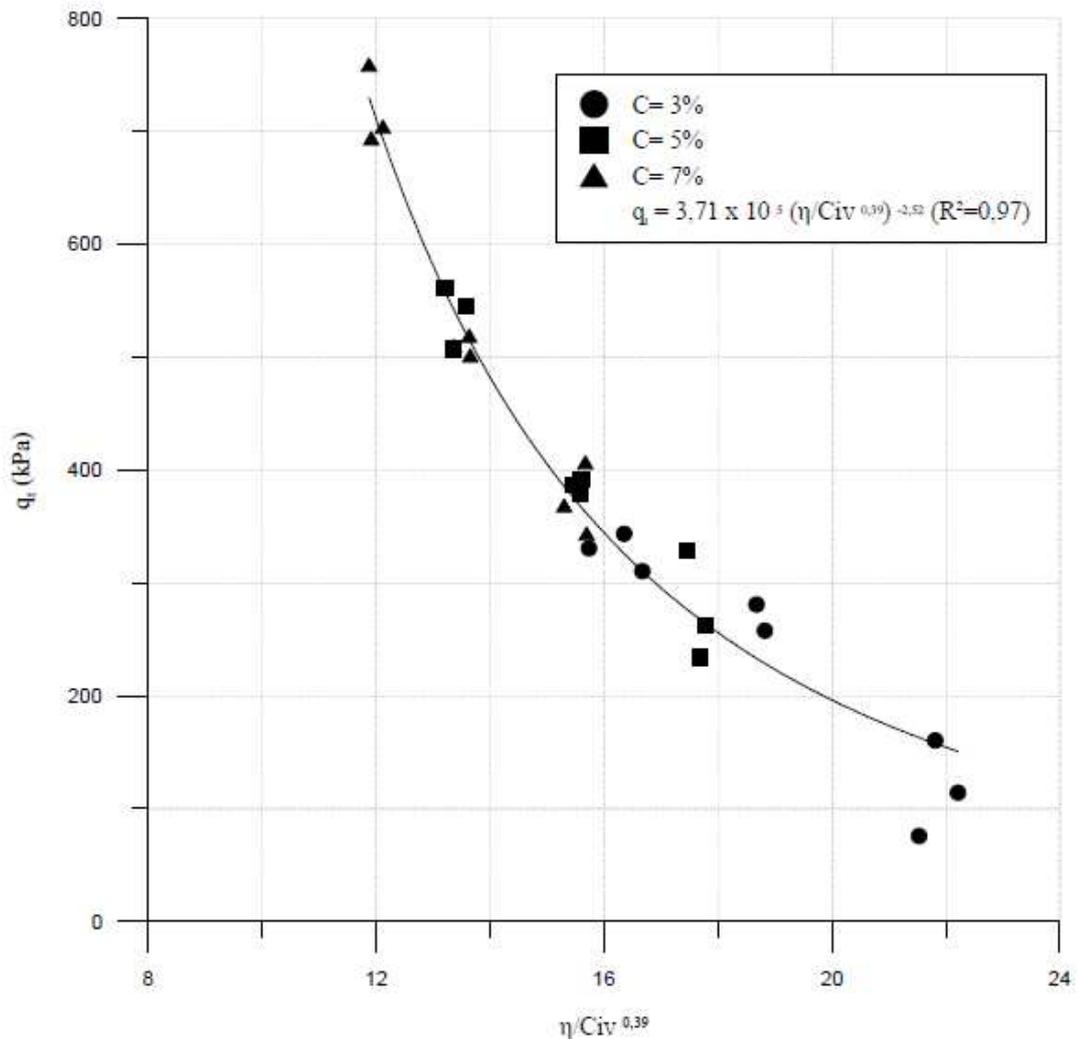


Figura 4.9 - Variação da resistência à tração versus à relação vazios/cimento ajustado

4.2.4 Modo de Ruptura

Na maioria dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral realizados foi observada uma ruptura frágil, com a formação de um plano de ruptura bem definido no sentido longitudinal da amostra, partindo esta ao meio, conforme Figura 4.10. Não foram notadas diferenças significativas entre o tipo de ruptura apresentado por corpos-de-prova de diferentes relações vazios/cimento.



Figura 4.10 – Plano de ruptura no plano longitudinal

4.3 MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)

Na Tabela 4.3 é apresentado um resumo dos valores médios do MR para as misturas estabilizadas com diferentes teores de cimento e massas específicas, os demais valores estão descritos no Quadro A.3 no Apêndice A. A partir destes dados, foram elaboradas as Figuras 4.11 a 4.14, nas quais estão alguns aspectos relevantes do comportamento da mistura em estudo são evidenciados. Os resultados de MR apresentaram valores próximos dos citados por Bernucci *et al.*(2008) para materiais graduados tratados com cimento, variando de 6.000 a 12.000 MPa.

Tabela 4.3 – Resultados médios do Módulo de Resiliência

| γ_d (g/cm ³) | Teor de cimento (%) | MR (MPa) |
|------------------------------------|---------------------------|----------|
| 2,0 | 3 | 5409 |
| | 5 | 7301 |
| | 7 | 8393 |
| 2,1 | 3 | 6704 |
| | 5 | 8508 |
| | 7 | 9704 |
| 2,2 | 3 | 7534 |
| | 5 | 10006 |
| | 7 | 11764 |

4.3.1 Efeito do teor de cimento

Na Figura 4.11 são apresentadas retas da variação do módulo de resiliência em função do teor de cimento. Cada reta, isoladamente, possui a mesma massa específica aparente seca e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega = 8\%$). Cada ponto corresponde à média do módulo de três corpos-de-prova moldados com características idênticas.

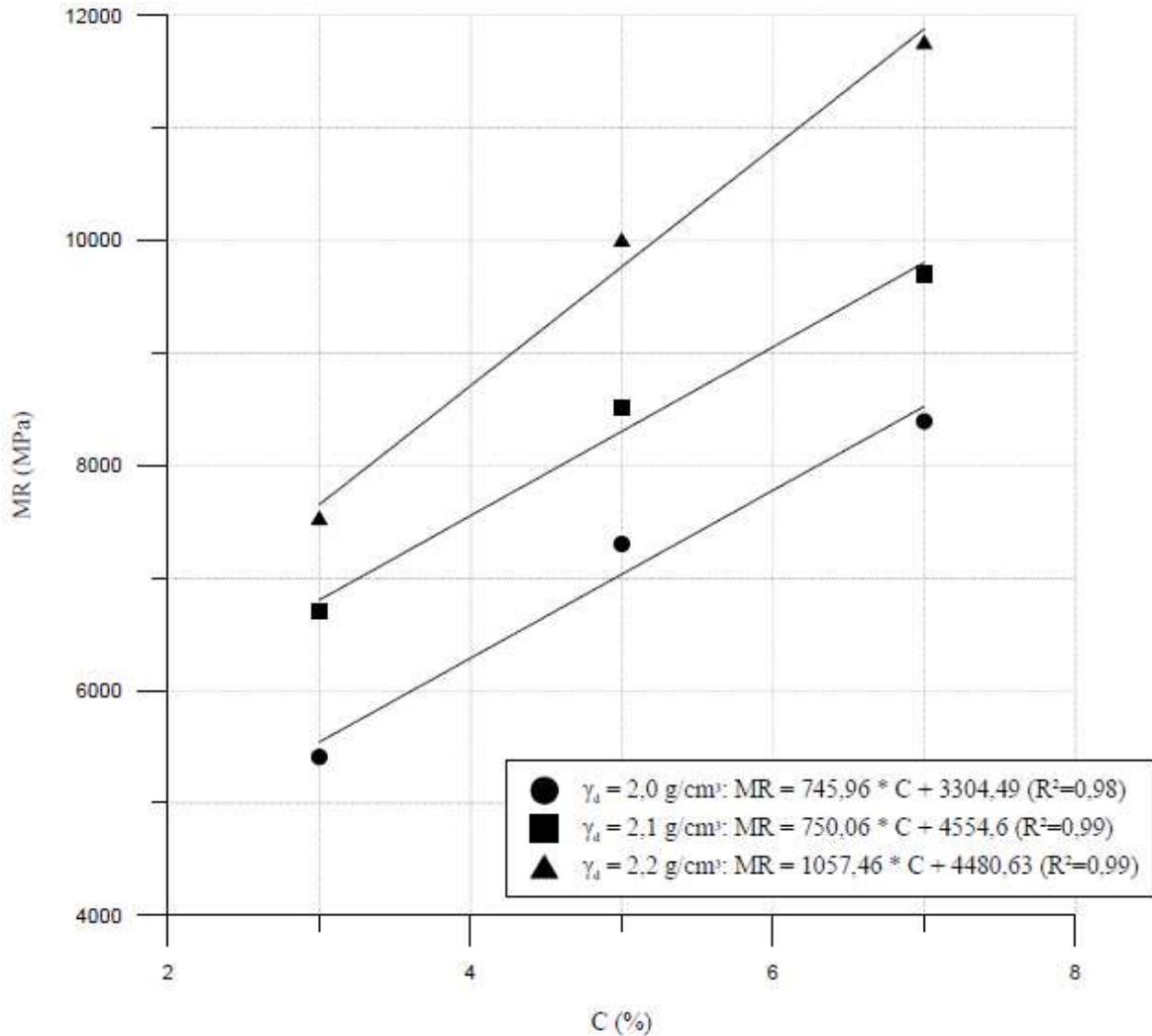


Figura 4.11 - Variação do módulo de resiliência em relação ao teor de cimento

Pode-se observar que a quantidade de cimento tem um grande efeito sobre o módulo de resiliência. Mesmo pequenas adições de cimento são suficientes para gerar enormes ganhos de rigidez. Também se observou que o módulo tem um aumento linear em relação ao aumento da quantidade de cimento. Além disso, também foi verificado que para um mesmo teor de cimento aumentando a energia de compactação aumenta o valor do módulo.

4.3.2 Efeito da porosidade

Na Figura 4.12 são apresentadas as curvas de ajuste da variação do módulo de resiliência em função da porosidade. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cimento e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega = 8\%$). Cada ponto corresponde à média da porosidade de três corpos-de-prova moldados com características idênticas.

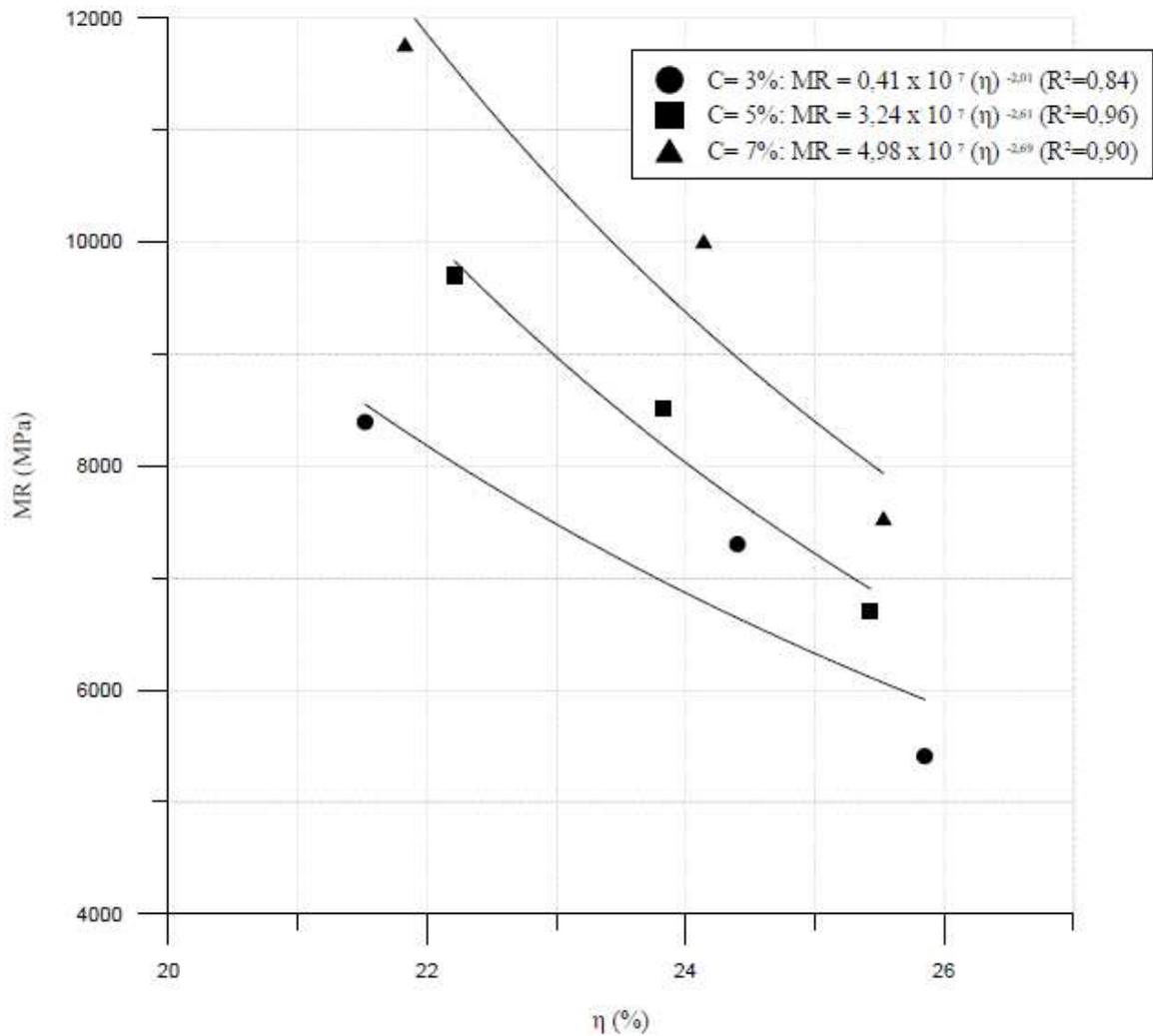


Figura 4.12 - Variação do módulo de resiliência em relação à porosidade

Observa que, de maneira similar à quantidade de cimento, a porosidade da mistura compactada exerce uma forte influência sobre o módulo da mistura, com um comportamento similar com as curvas dos módulos. Os gráficos permitem verificar que a uma pequena redução na porosidade do material promove ganhos significativos de módulo.

4.3.3 Relação Vazios/Cimento

Na Figura 4.13 são apresentadas as curvas de ajuste da variação do módulo de resiliência em função da relação vazios/cimento. Cada curva, isoladamente, possui a mesma massa específica aparente seca e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=8\%$).

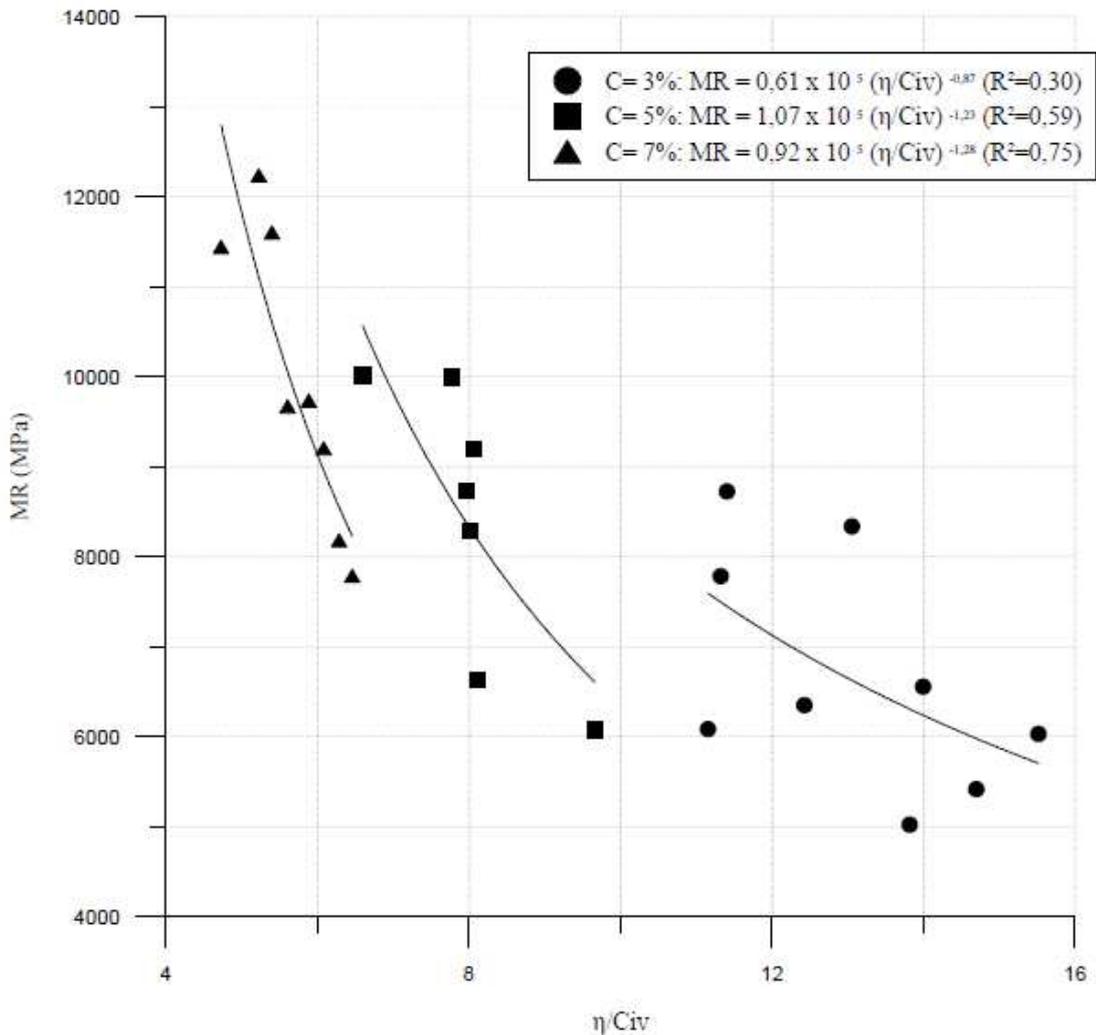


Figura 4.13 - Variação do módulo de resiliência versus à relação vazios/cimento

Pode-se observar que não aparenta existir uma correlação única entre o módulo de resiliência e a relação porosidade/teor volumétrico de cimento, além de que não é uma boa relação. Como já citado anteriormente, uma maneira de compatibilizar as taxas de variação das grandezas citadas é através da aplicação da potência em uma delas. Obteve-se a potência igual a 0,34 sobre o parâmetro teor volumétrico de cimento, sendo que com este conseguiu compatibilizar as taxas de variação e resultando num melhor ajuste da curva.

A Figura 4.14 apresenta a curva de ajuste da variação da resistência à tração em função da relação porosidade/teor volumétrico de cimento elevado na potência 0,34. A curva possui diversas massas específicas aparentes secas e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=8\%$). Pode-se observar uma correlação razoável entre a porosidade/teor volumétrico de cimento ajustados e o módulo de resiliência.

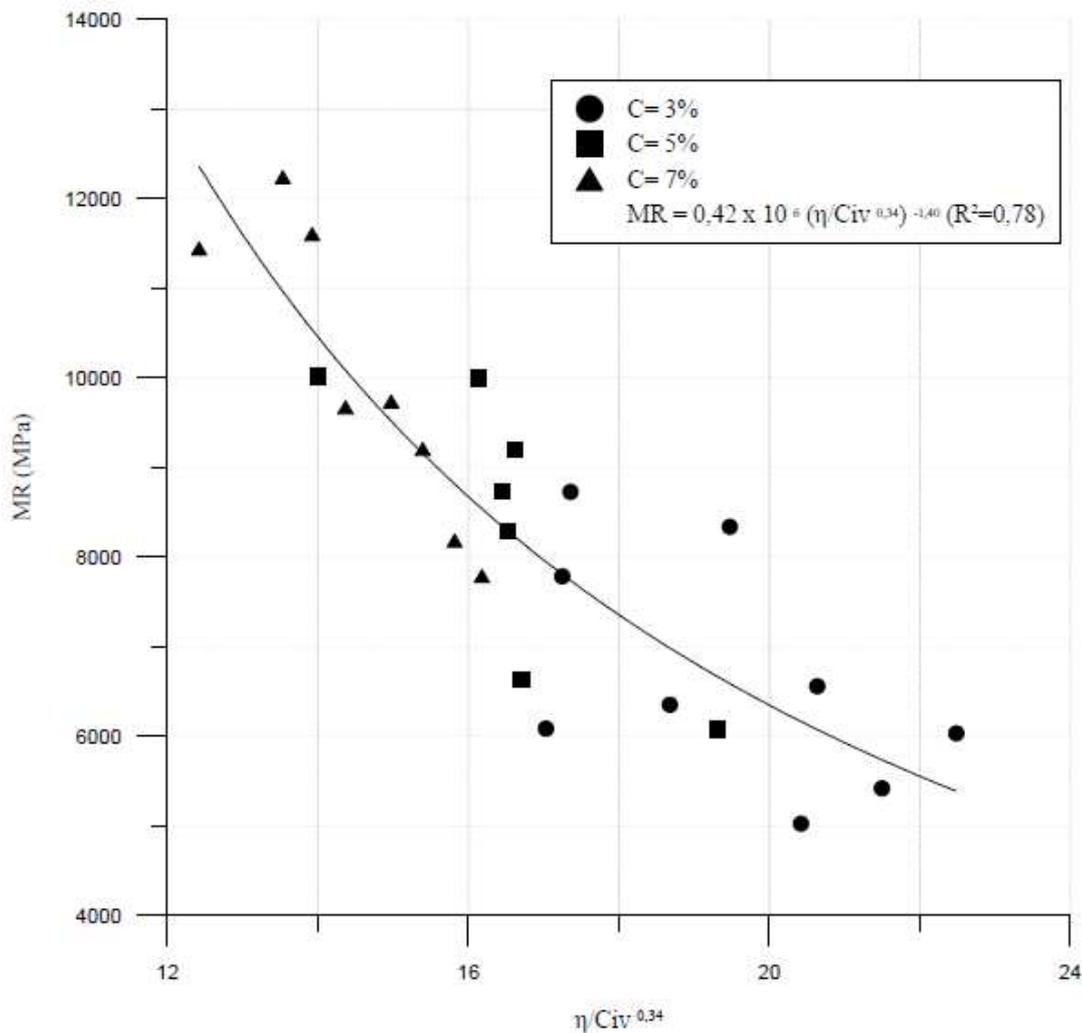


Figura 4.14 - Variação do módulo de resiliência versus à relação vazios/cimento ajustado

4.3.4 Relação MR/RT

Segundo Pires (2014), a análise dos resultados de MR é bastante complexa, uma vez que dependendo da estrutura onde será inserido o material, valores maiores ou menores são tolerados. Desta forma, é necessária uma compatibilização da rigidez entre as camadas que constituem o sistema. A relação MR/RT nos dá idéia da compatibilidade entre rigidez e resistência da mistura. Misturas muito rígidas necessitam de uma alta resistência à tração devido à concentração de esforços em seu interior.

Depois de os corpos-de-prova serem ensaiados, eles foram rompidos a tração, e esse valor que é utilizado para o cálculo dessa relação. Todos os valores estão descritos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultados dos valores de MR , RT e MR/RT

| Teor de cimento (%) | Massa especif. aparente seca | MR (MPa) | RT (MPa) | MR/RT |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------|
| 3 | 2,0 | 5025 | 0,51 | 9853 |
| 3 | | 6558 | Rompeu | |
| 3 | | 6034 | Rompeu | |
| 5 | | 5419 | 0,37 | 14486 |
| 5 | | 6354 | 0,61 | 10337 |
| 5 | | 8338 | 0,57 | 14550 |
| 7 | | 8728 | 0,82 | 10706 |
| 7 | | 7788 | 0,82 | 9538 |
| 7 | | 6087 | 0,77 | 7926 |

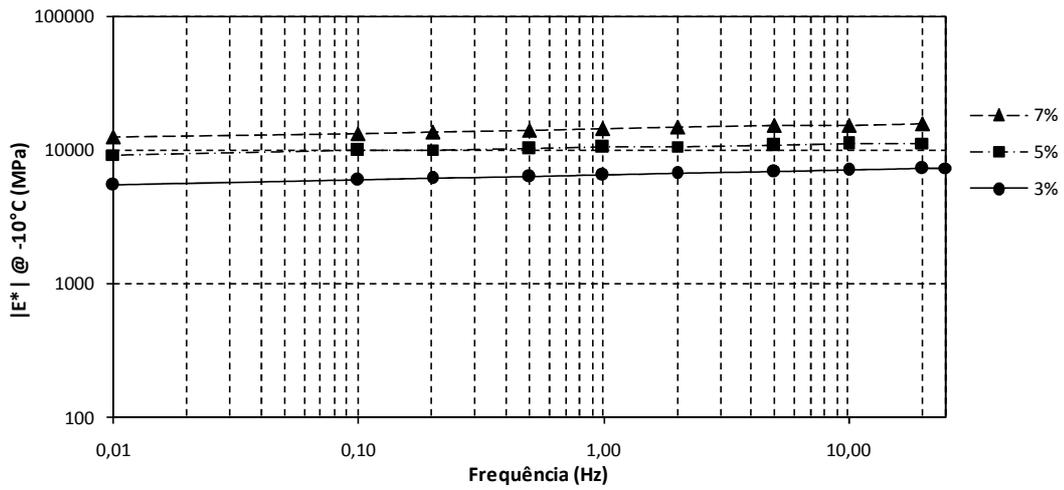
Continuação da Tabela 4.4 – Resultados dos valores de MR, RT e MR/RT

| Teor de cimento (%) | Massa especif. aparente seca | MR (MPa) | RT (MPa) | MR/RT |
|---------------------|------------------------------|----------|----------|-------|
| 3 | 2,1 | 9192 | 0,89 | 10376 |
| 3 | | 6079 | 0,68 | 8910 |
| 3 | | 6632 | 0,9 | 7389 |
| 5 | | Rompeu | | |
| 5 | | 8285 | 1,14 | 7293 |
| 5 | | 8731 | 0,98 | 8942 |
| 7 | | Rompeu | | |
| 7 | | 9997 | 0,98 | 10249 |
| 7 | | 10016 | 1,38 | 7273 |
| 3 | | 2,2 | 7789 | 1,12 |
| 3 | 9207 | | 1,24 | 7418 |
| 3 | 8183 | | 1,12 | 7283 |
| 5 | Rompeu | | | |
| 5 | 9673 | | 1,24 | 7815 |
| 5 | 9735 | | 1,37 | 7131 |
| 7 | 11606 | | 1,4 | 8302 |
| 7 | 12240,5 | | 1,59 | 7690 |
| 7 | 11445 | | 1,58 | 7233 |

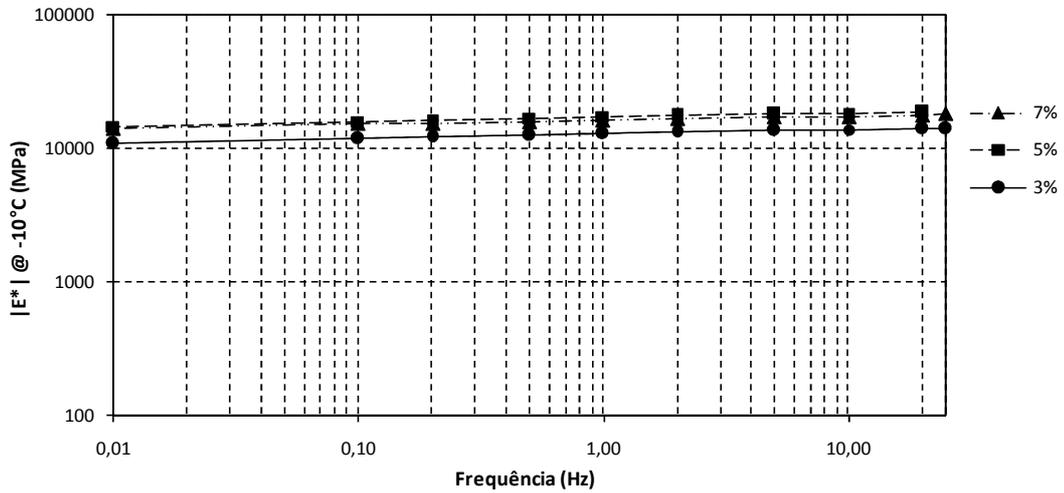
Com o aumento da massa específica, as amostras apresentaram evolução nos valores de RT, fazendo com que a relação MR/RT diminuísse, aumentando a capacidade de absorção das energias de deformação. Foi verificado que mantendo a mesma massa específica e variando o teor de cimento, não houve muita alteração no valor da relação MR/RT.

4.4 MÓDULO COMPLEXO (MC)

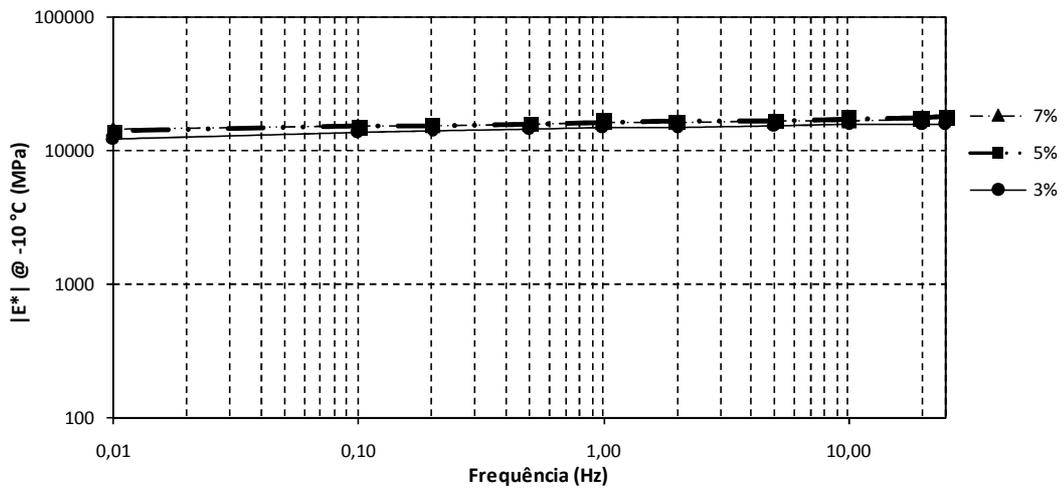
Os resultados do ensaio de módulo complexo são expressos em gráficos no espaço Cole Cole, Diagrama de Black, Curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase, a fim de compreender o comportamento viscoelástico das misturas. Os resultados de módulo dinâmico demonstrados nas Figuras 4.15 a 4.19 são apresentados para cada temperatura em função de cada frequência do ensaio, estes gráficos são denominados isotermas de módulo dinâmico.



(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$

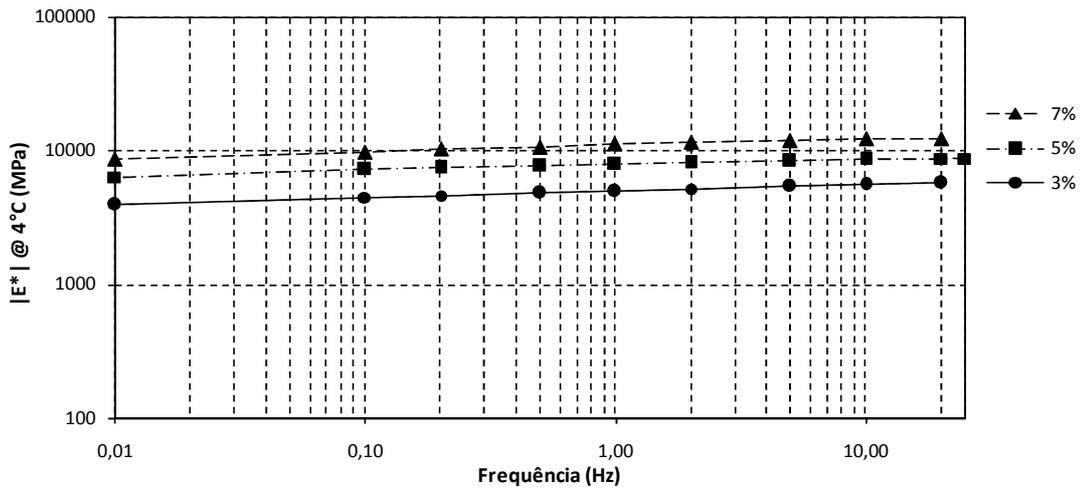


(b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$

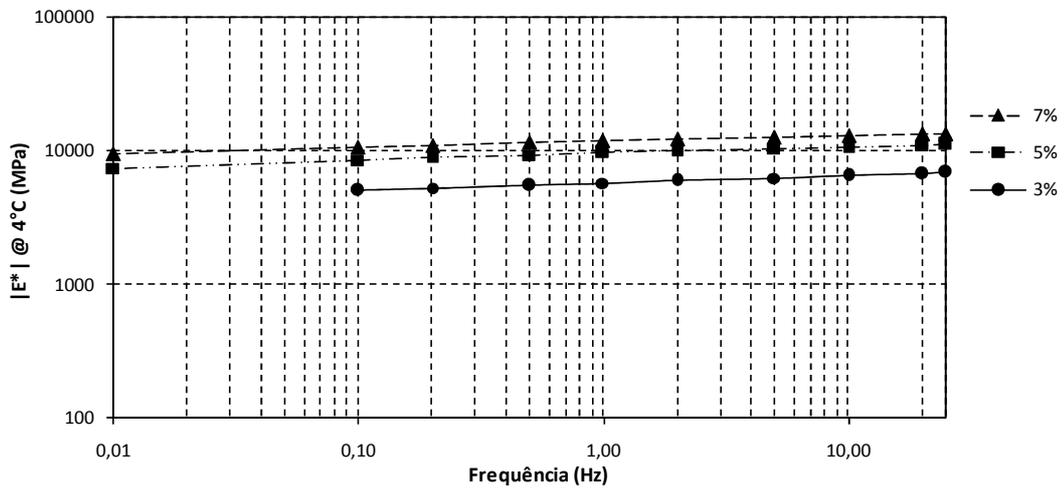


(c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

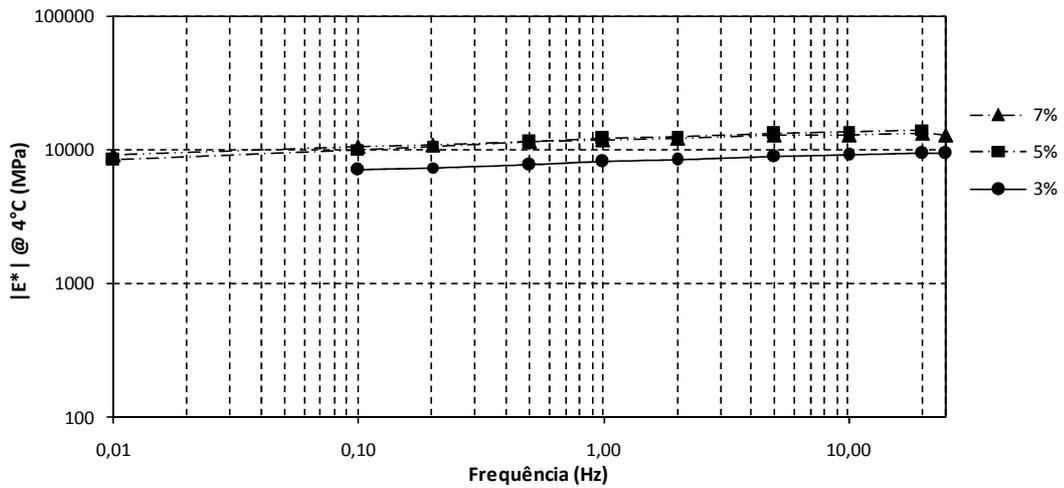
Figura 4.15 - Resultados de E^* a -10°C



(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$

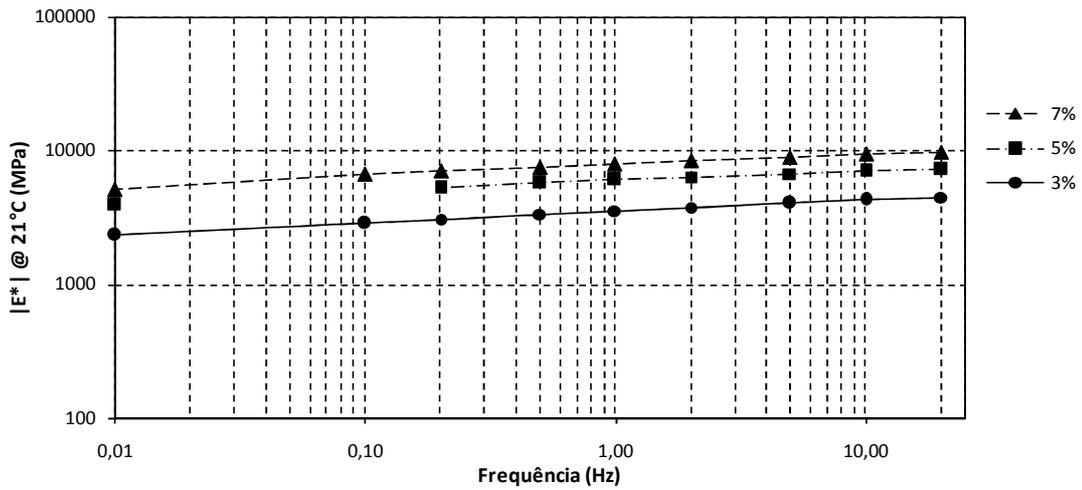


(b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$

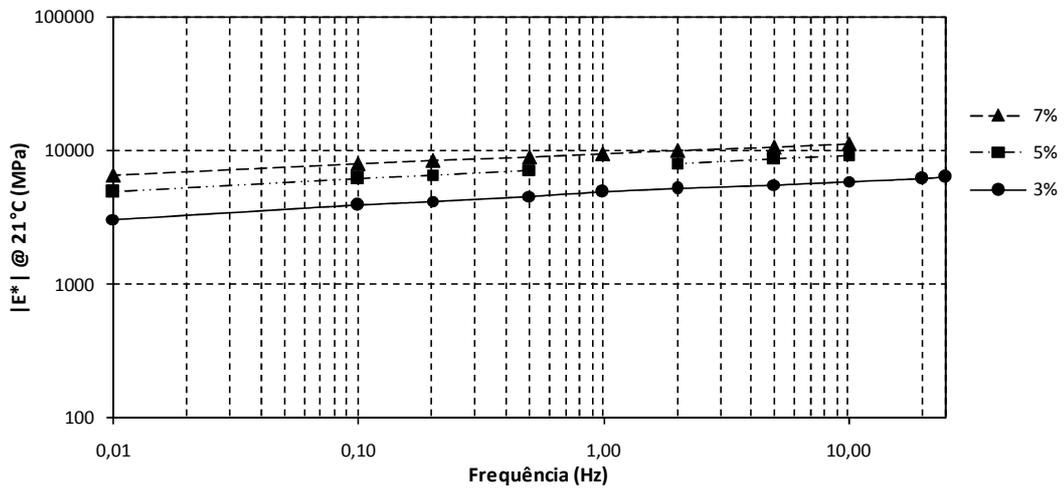


(c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

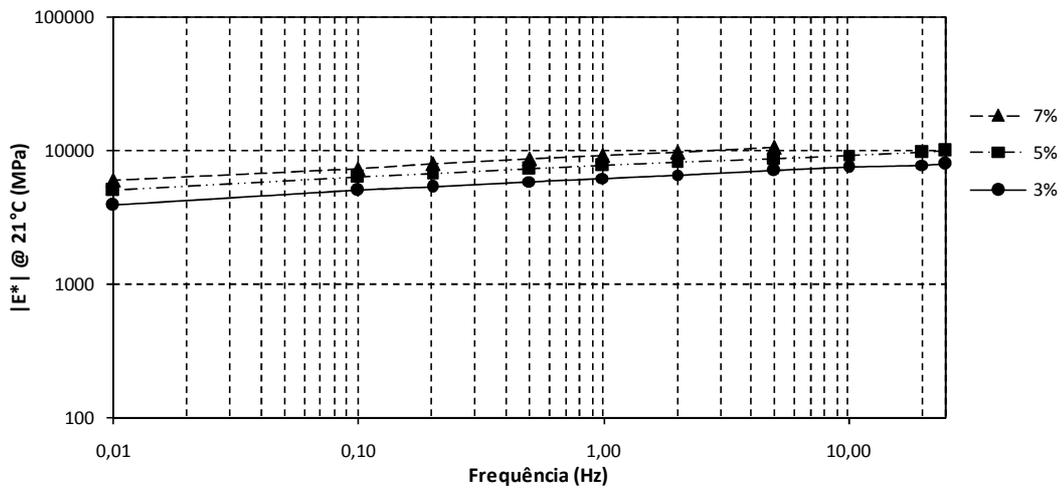
Figura 4.16 - Resultados de E^* a 4°C



(a) γ_d 2,0 g/cm³

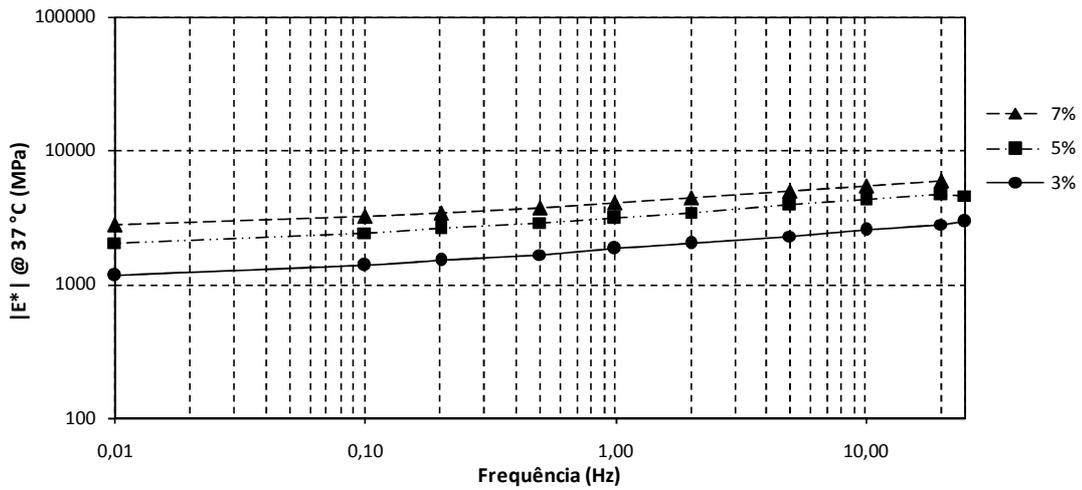


(b) γ_d 2,1 g/cm³

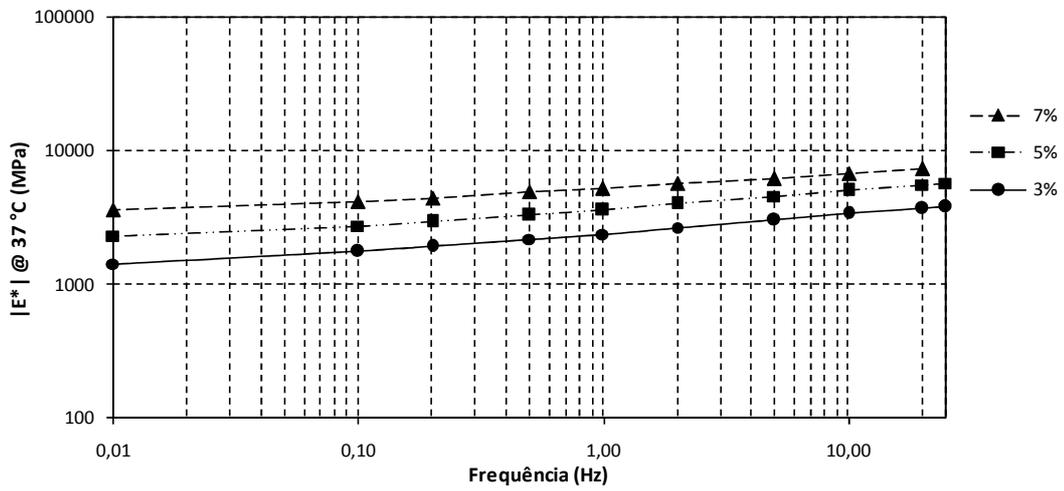


(c) γ_d 2,2 g/cm³

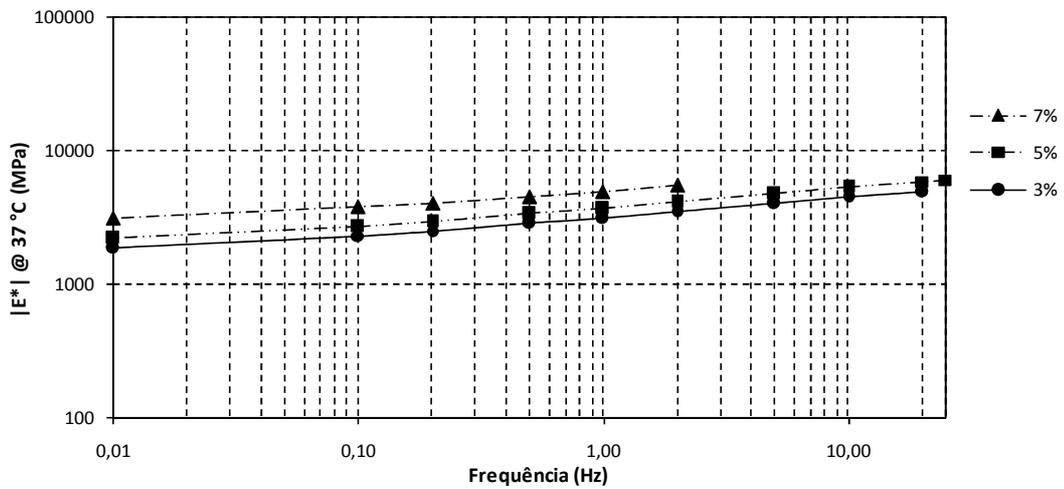
Figura 4.17 - Resultados de E* a 21°C



(a) γ_d 2,0 g/cm³

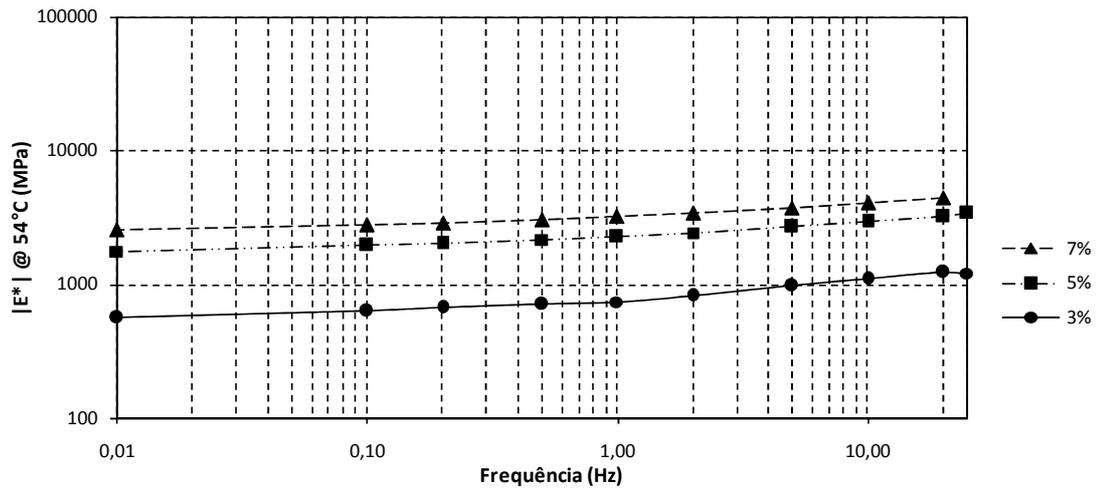
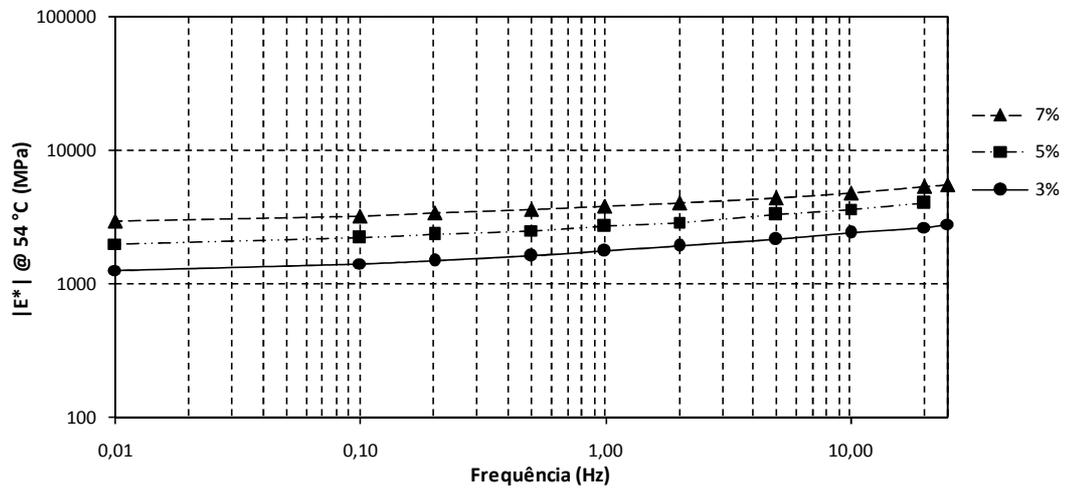
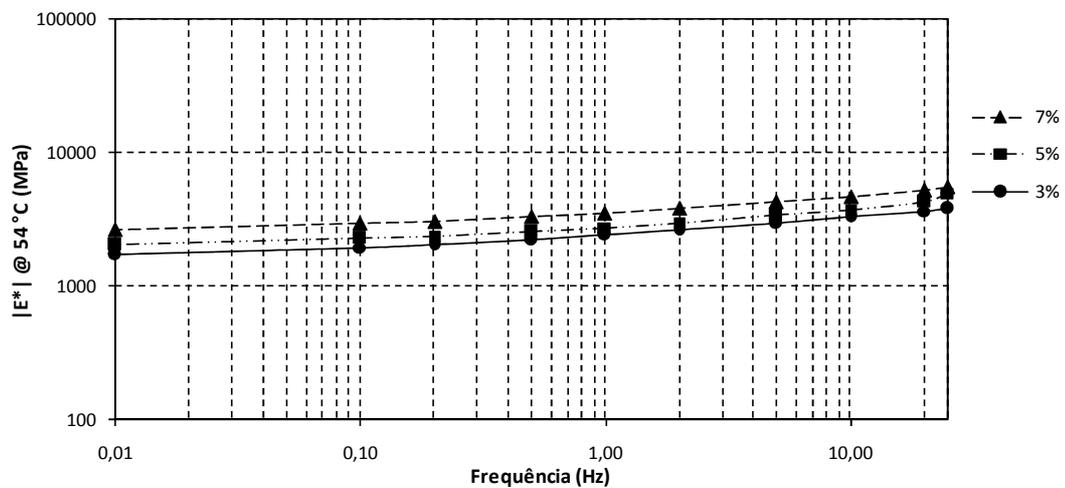


(b) γ_d 2,1 g/cm³



(c) γ_d 2,2 g/cm³

Figura 4.18 - Resultados de E* a 37°C

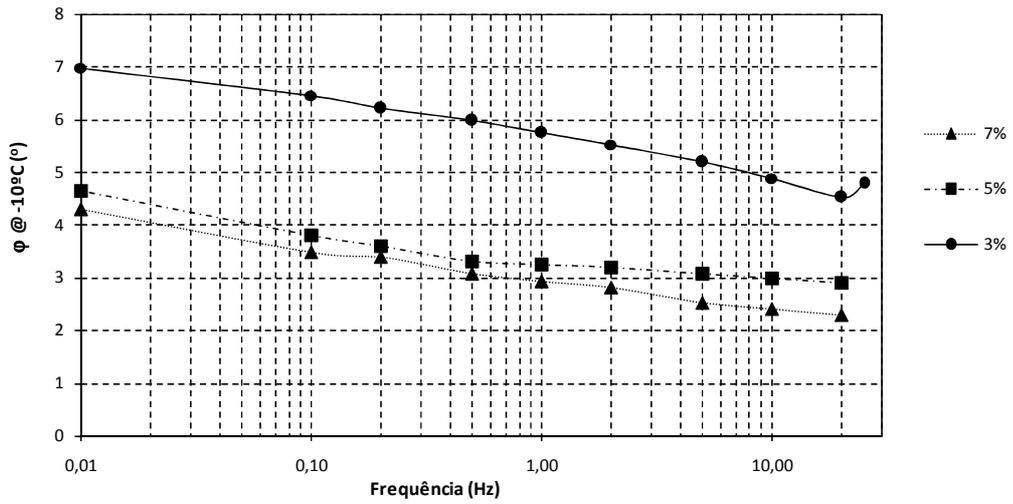
(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$ (b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$ (c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$ Figura 4.19 - Resultados de E^* a 54°C

Segundo estes resultados, é possível verificar que na medida em que se diminui a temperatura de ensaio e se aumenta a frequência, o módulo dinâmico se eleva. Isso significa que essa mistura é sensível à variação de temperatura e à aplicação de carga, ou seja, o material apresenta um comportamento visco-elástico. Isso é função da herança do ligante asfáltico presente no material fresado

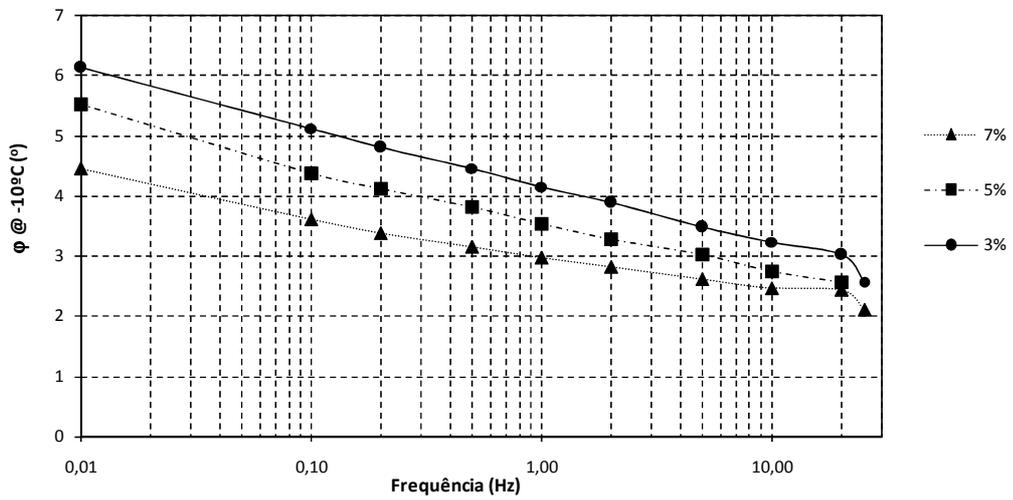
Além disso, nota-se que, a variação do grau de compactação influencia também no valor do módulo, sendo que esta fica mais evidente no 2,0 g/cm³ para o 2,1 g/cm³. Isso se dá devido a maior aproximação dos grãos, fortalecendo assim o esqueleto mineral da mistura.

Pode se notar que alguns pontos foram retirados, para este ensaio foi feito um refinamento estatístico dos valores de cada ponto, sendo que os que ficaram muito fora do comportamento previsto para o ensaio ou valor muito fora do “usual” foram cortados, estes valores estão citados no Apêndice A.

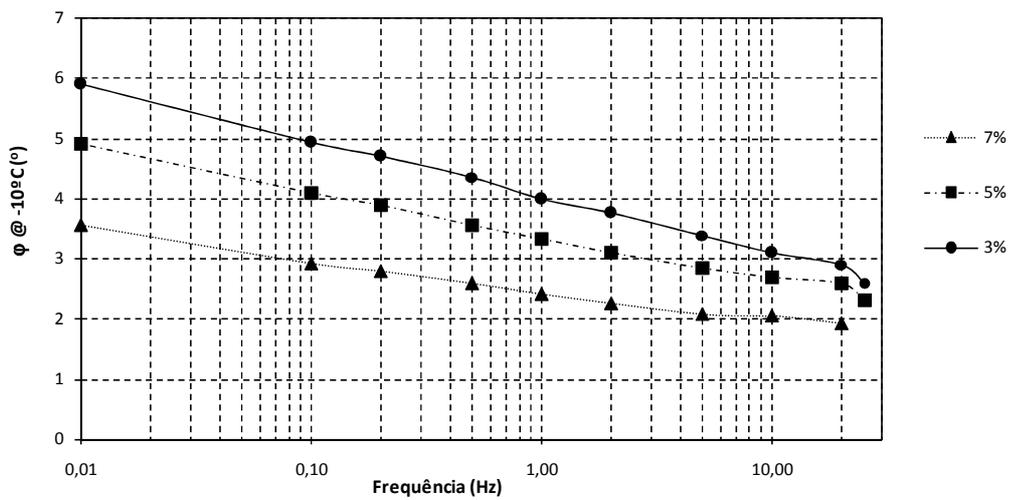
As Figuras 4.20 a 4.24 demonstram os resultados de cada ângulo de fase, obtidos em cada temperatura, pela frequência de ensaio, os quais são denominados de isotermas de ângulo de fase.



(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$

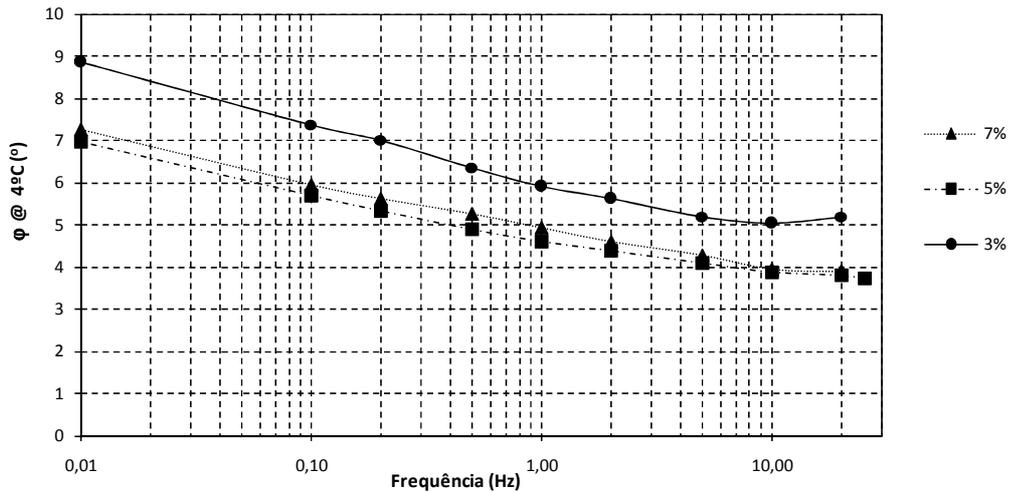
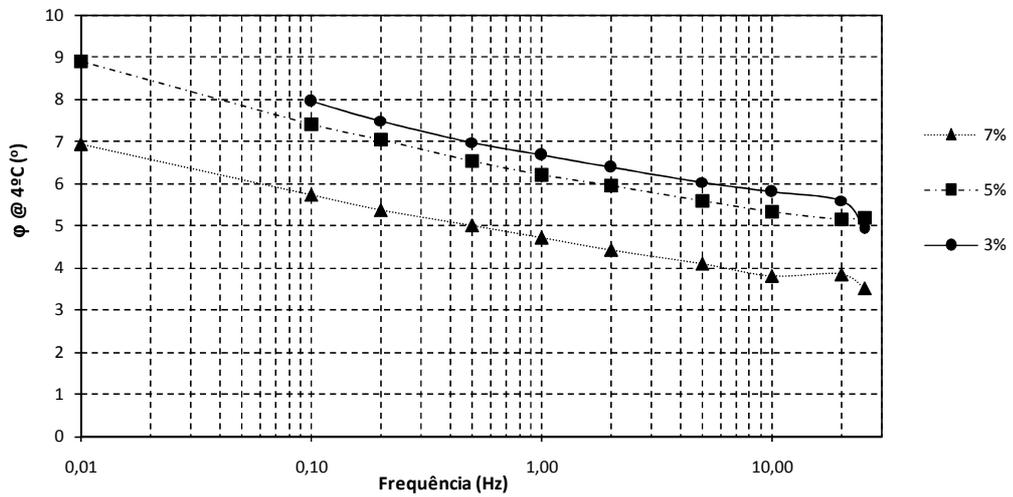
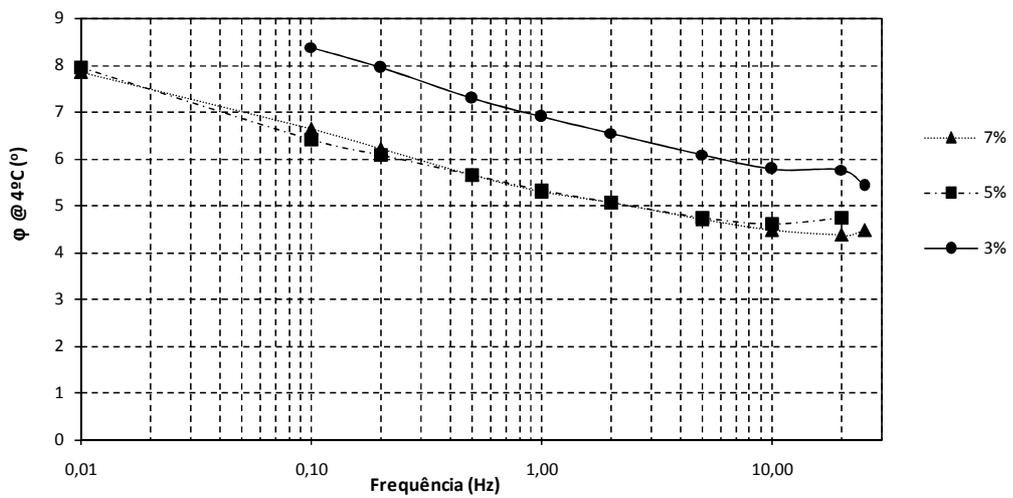


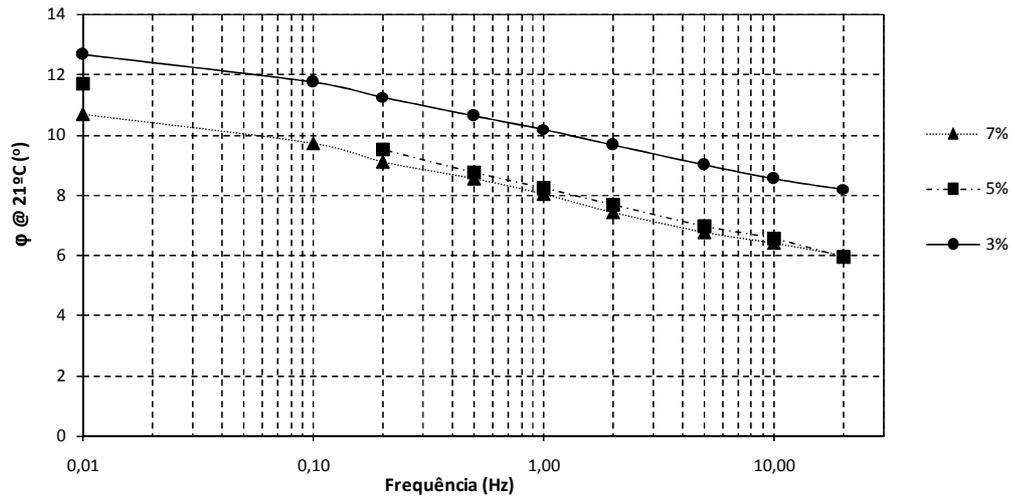
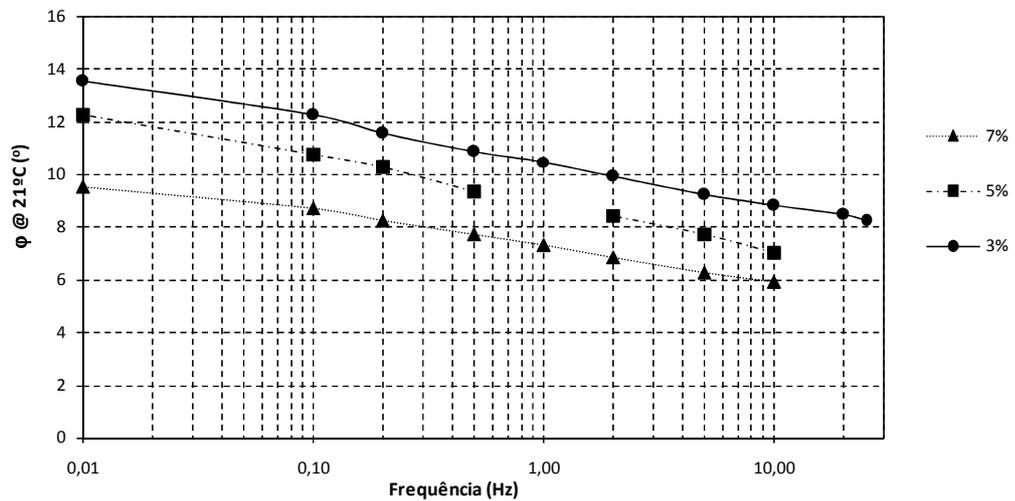
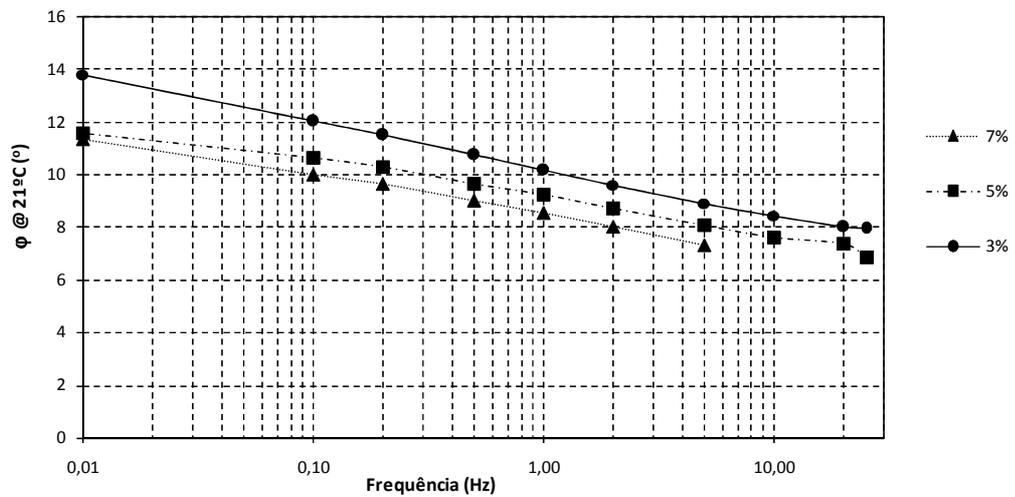
(b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$

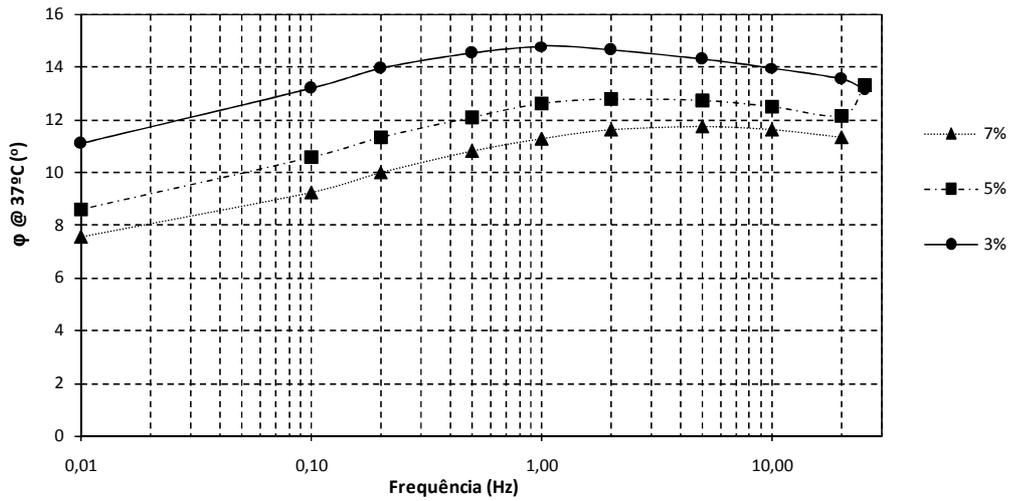


(c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

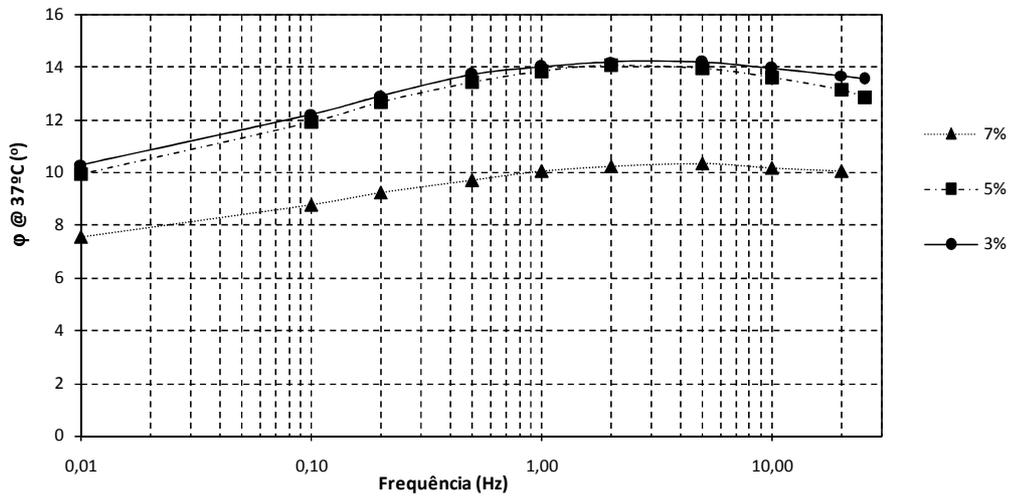
Figura 4.20 - Resultados de ângulo de fase a -10°C

(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$ (b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$ (c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$ Figura 4.21 - Resultados de ângulo de fase a 4°C

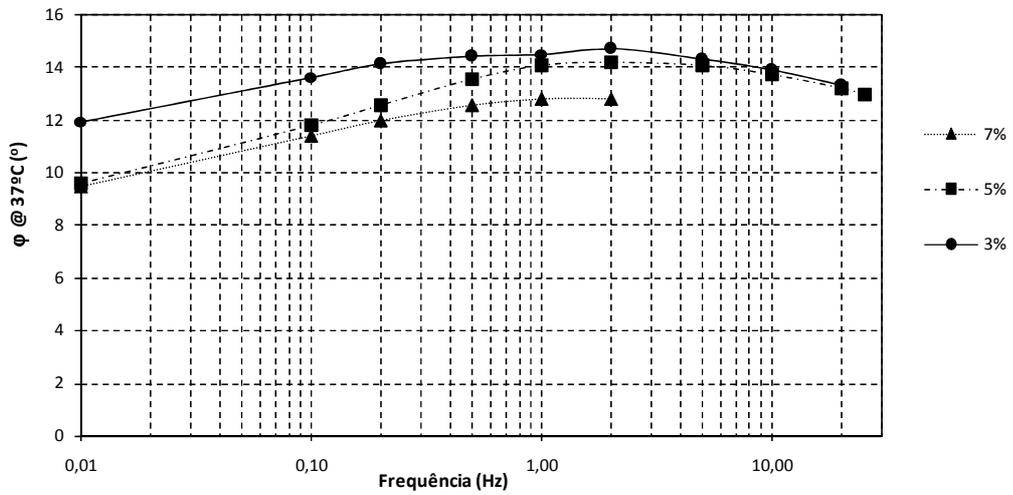
(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$ (b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$ (c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$ Figura 4.22 - Resultados de ângulo de fase a 21°C



(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$



(b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$



(c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

Figura 4.23 - Resultados de ângulo de fase a 37°C

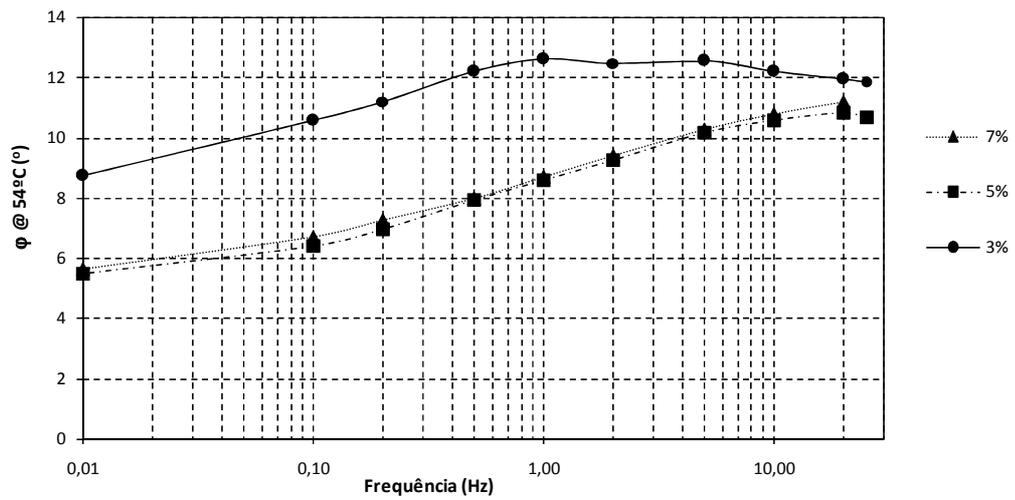
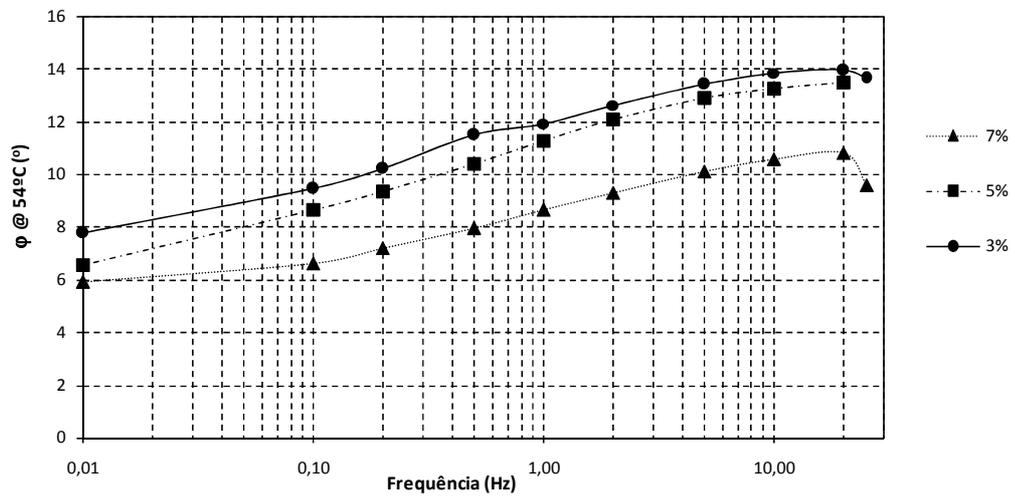
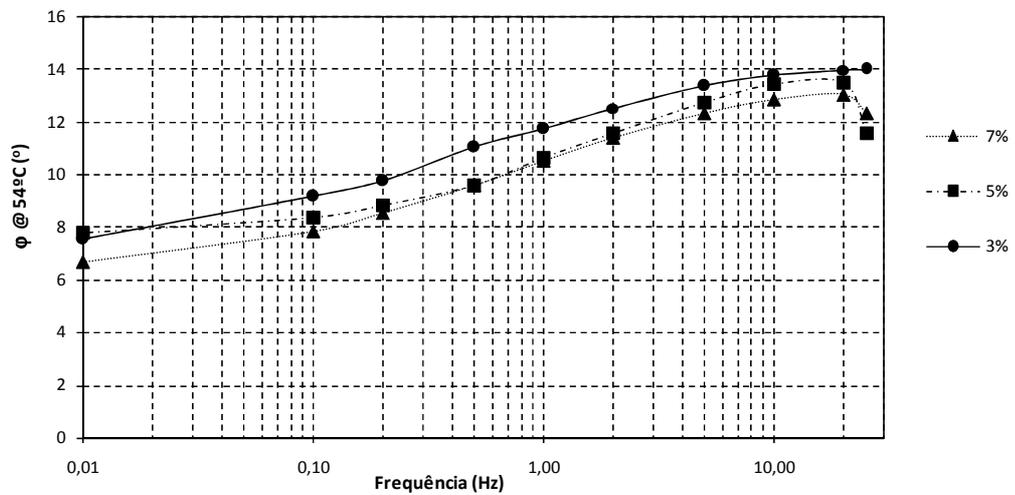
(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$ (b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$ (c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

Figura 4.24 - Resultados de ângulo de fase a 54°C

Através dos resultados, é possível verificar que o ângulo de fase diminui, à medida que se aumenta a frequência de carregamento, para as temperaturas de -10, 4 e 21 °C, já para as temperaturas de 37 ou 54 °C, acontece o contrário, isso devido ao amolecimento do ligante asfáltico. Percebe-se que apesar da variância do ângulo de fase percebe-se o “range” de no mínimo 2 ° e o máximo de 14 °.

As misturas contendo maior teor de cimento, ou seja, mais rígidas, apresentaram os menores valores, já que dissipam menos energia viscosa ao longo dos carregamentos, sendo mais evidente a diferença dos 3% de teor de cimento para os demais.

Para este ensaio foi feito um refinamento estatístico dos valores de cada ponto, sendo que os que ficaram muito fora do comportamento previsto para o ensaio ou valor muito fora do “usual” foram cortados.

Segundo Centofante (2016) a verificação da suscetibilidade cinética das misturas pode ser analisada a partir da inclinação das curvas, chamadas isócronas, as quais apresentam o módulo dinâmico em cada frequência pela respectiva temperatura de ensaio. As Figuras 4.25 a 4.33 apresentam as isócronas de módulo dinâmico.

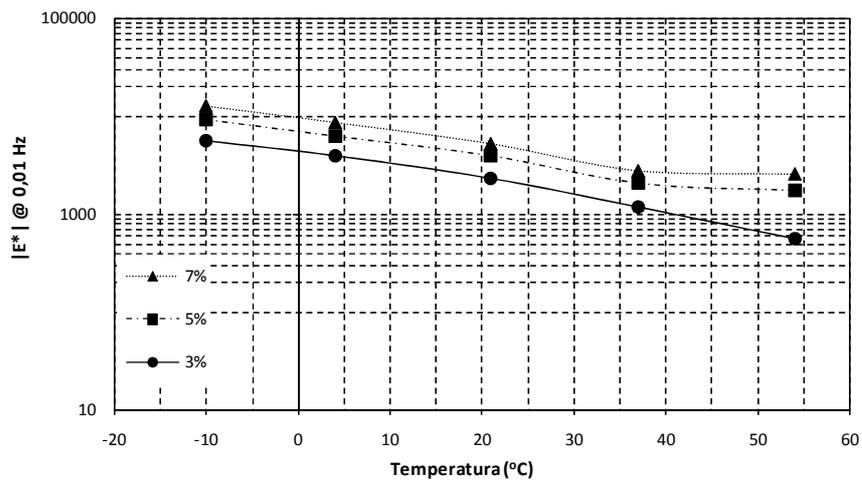
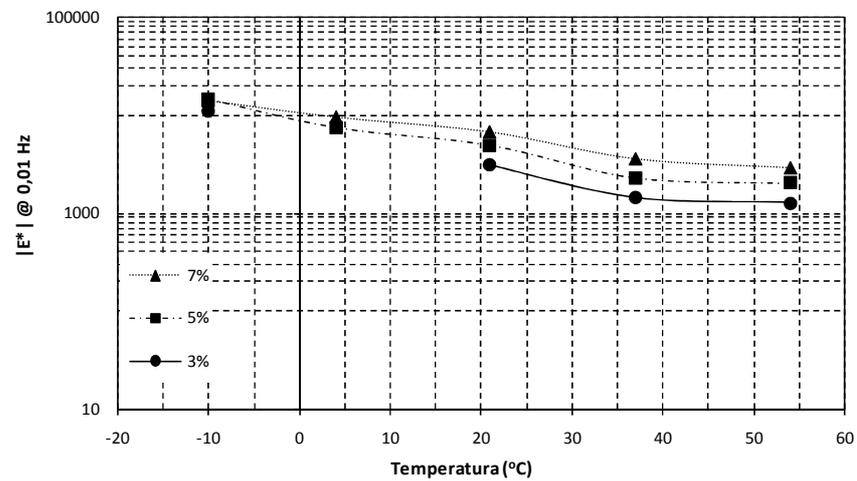
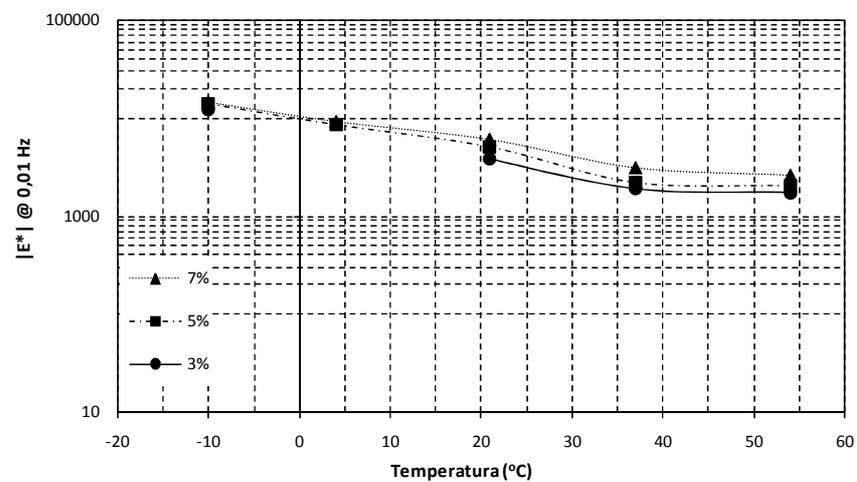
(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$ (b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$ (c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

Figura 4.25 - Resultados de módulo dinâmico a 0,01 Hz

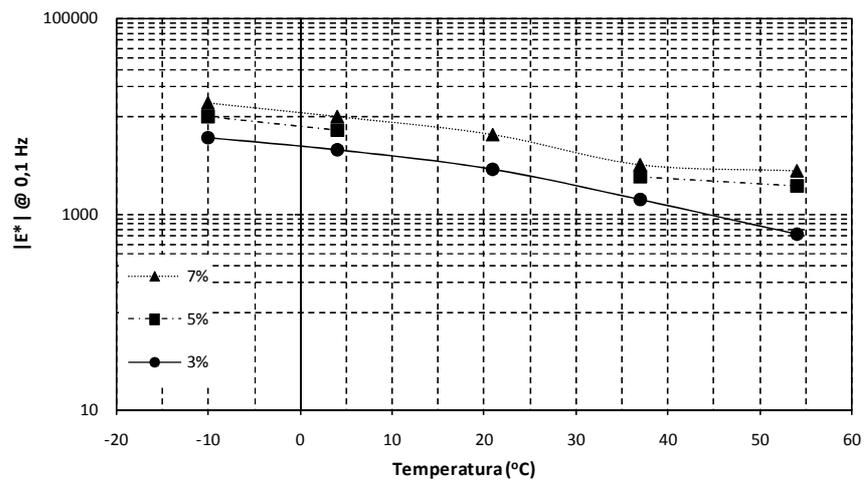
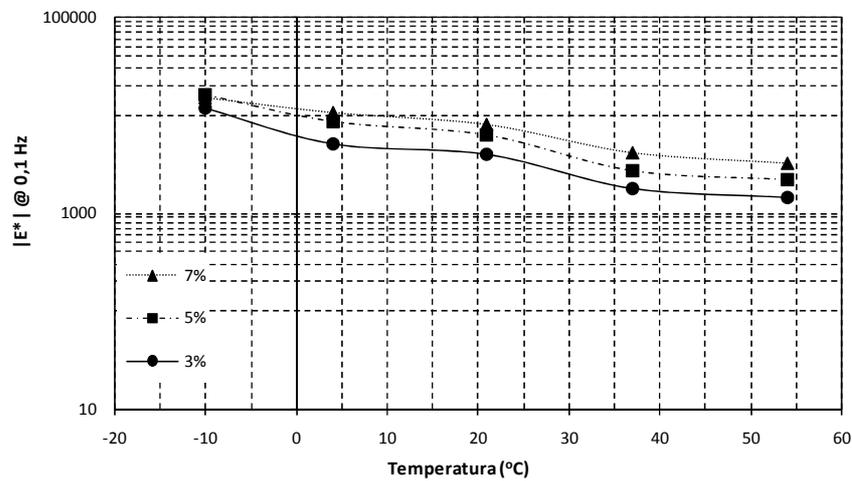
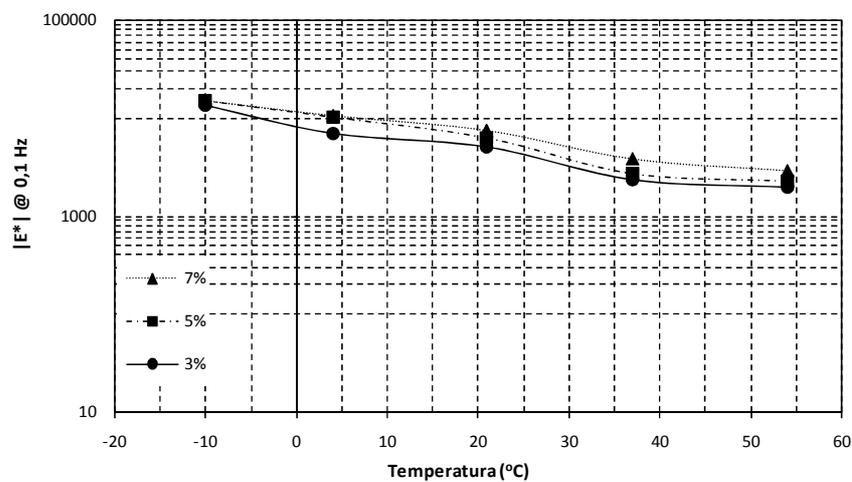
(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$ (b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$ (c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

Figura 4.26 - Resultados de módulo dinâmico a 0,1 Hz

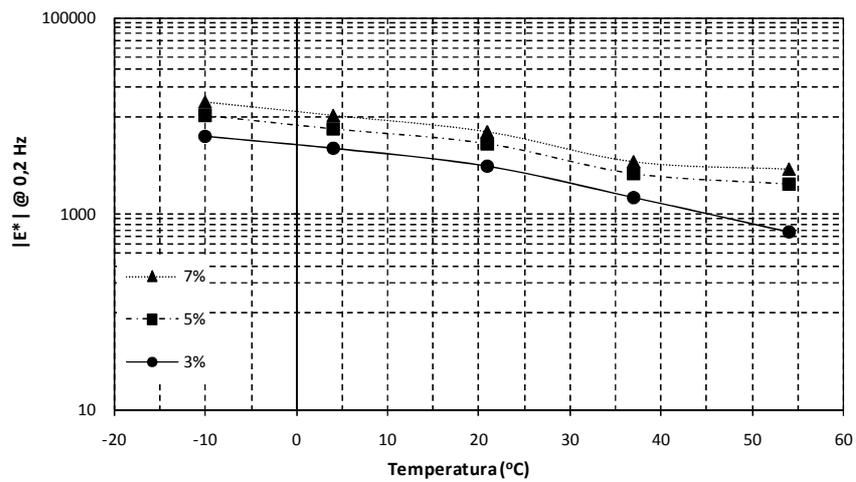
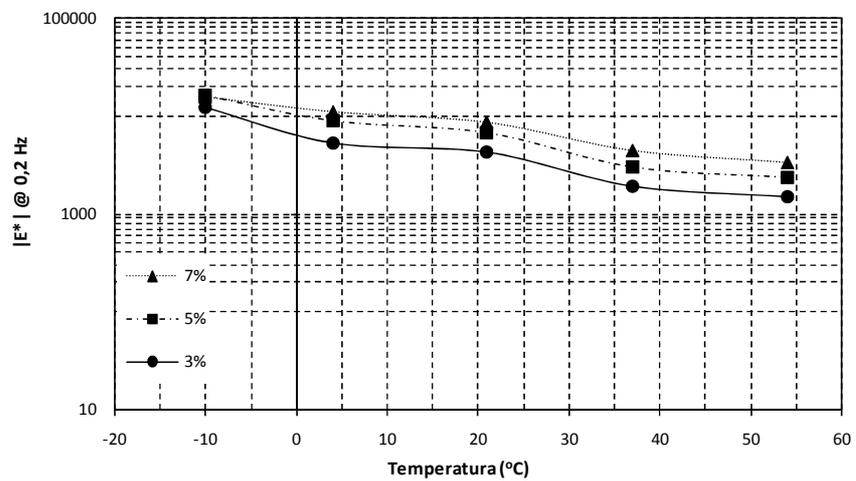
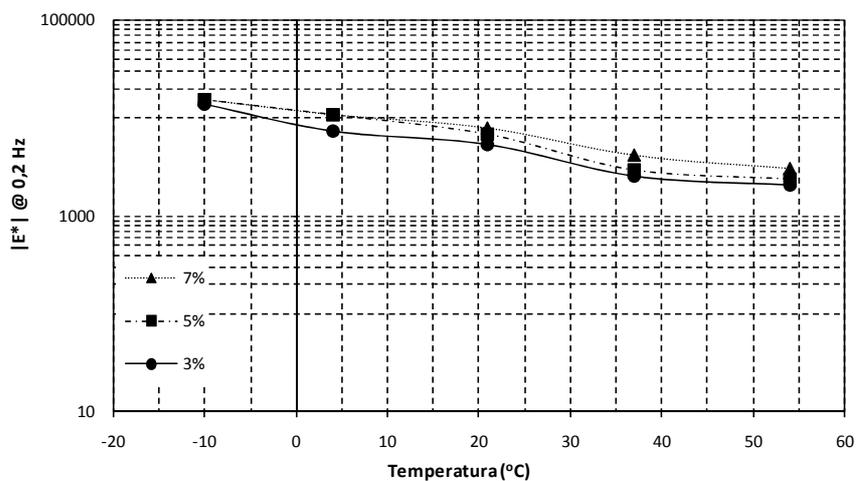
(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$ (b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$ (c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

Figura 4.27 - Resultados de módulo dinâmico a 0,2 Hz

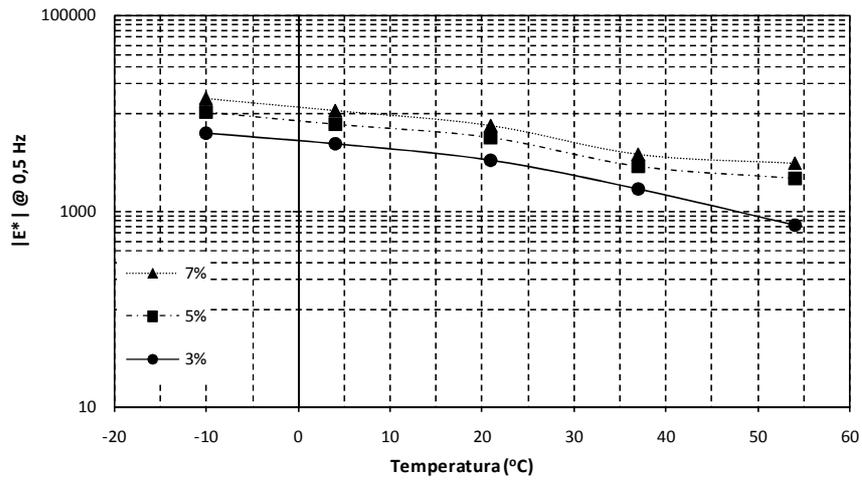
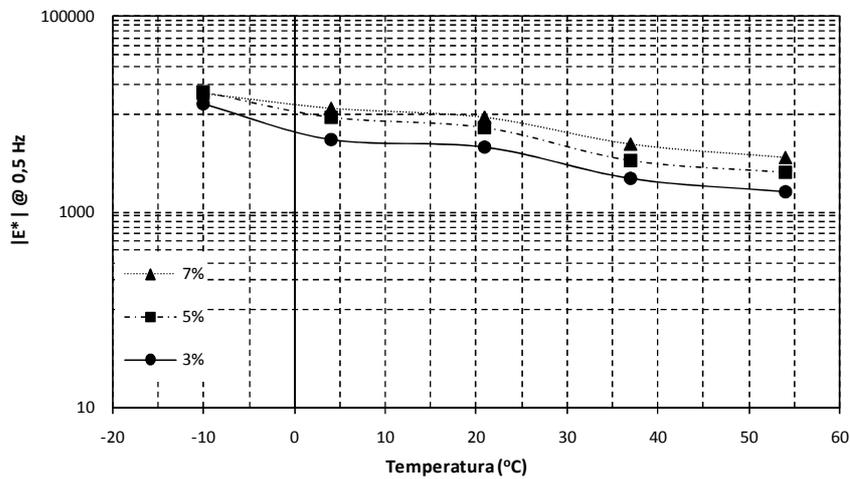
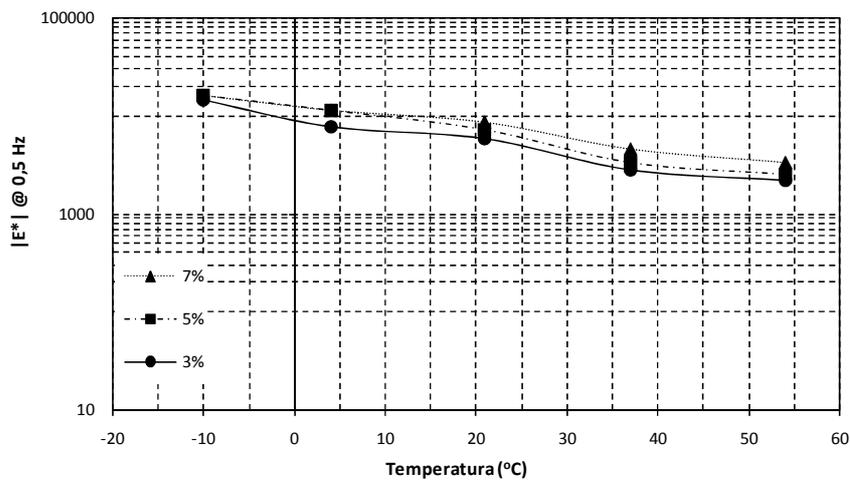
(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$ (b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$ (c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

Figura 4.28 - Resultados de módulo dinâmico a 0,5 Hz

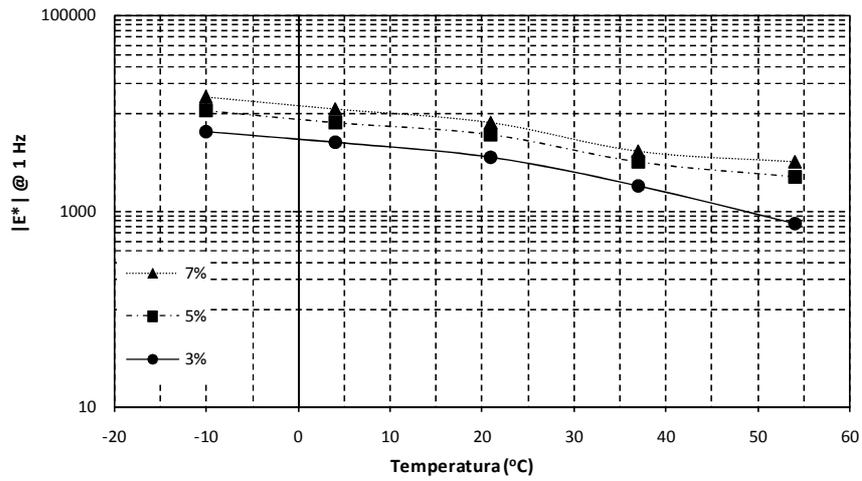
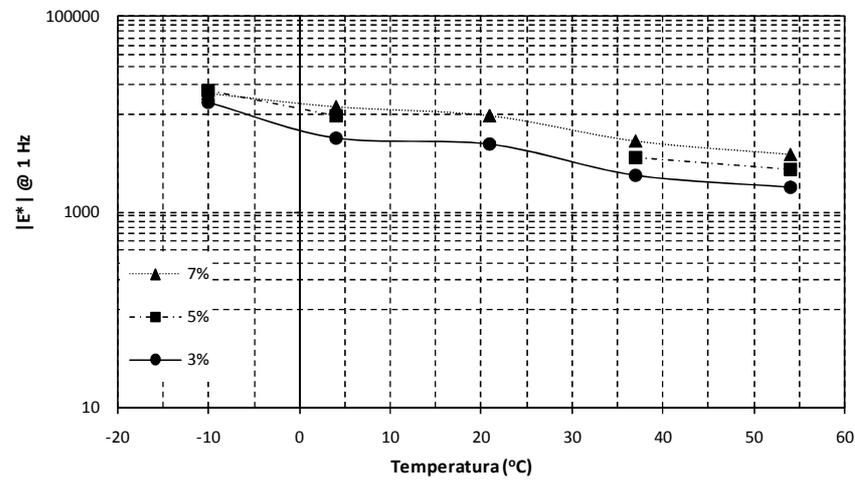
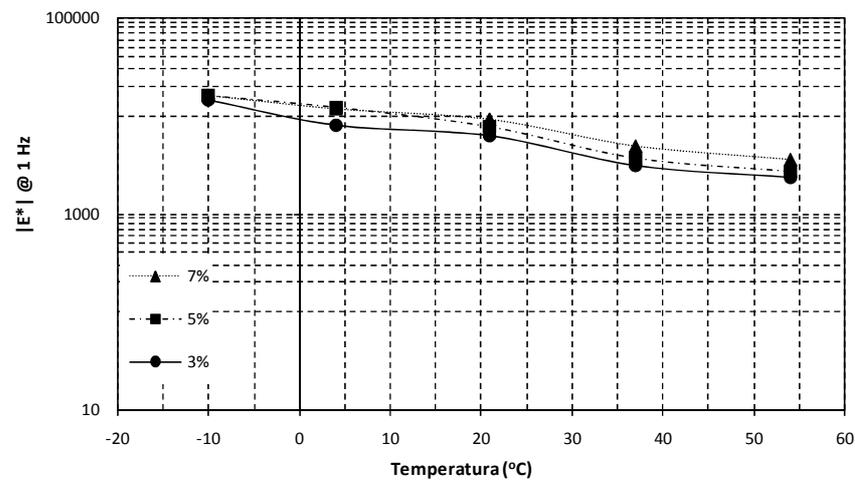
(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$ (b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$ (c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

Figura 4.29 - Resultados de módulo dinâmico a 1 Hz

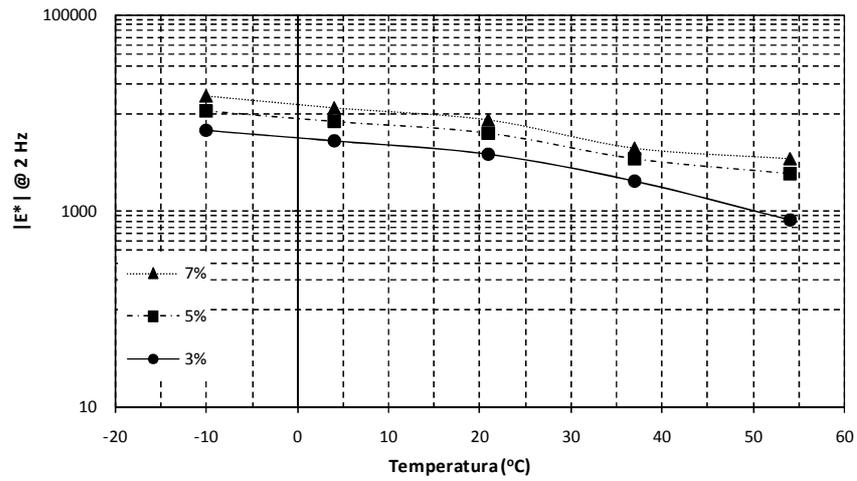
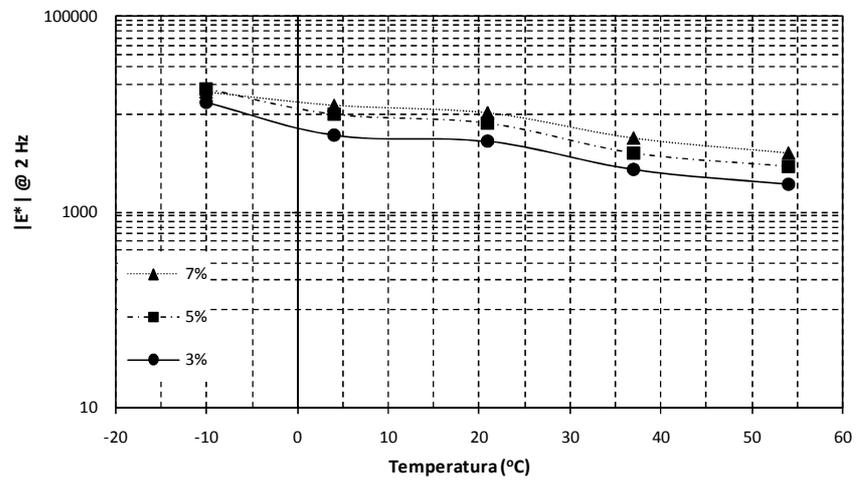
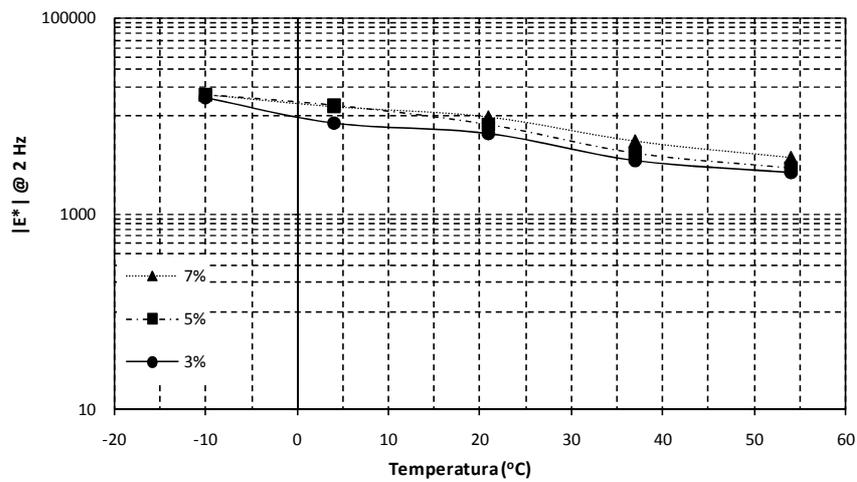
(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$ (b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$ (c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

Figura 4.30 - Resultados de módulo dinâmico a 2 Hz

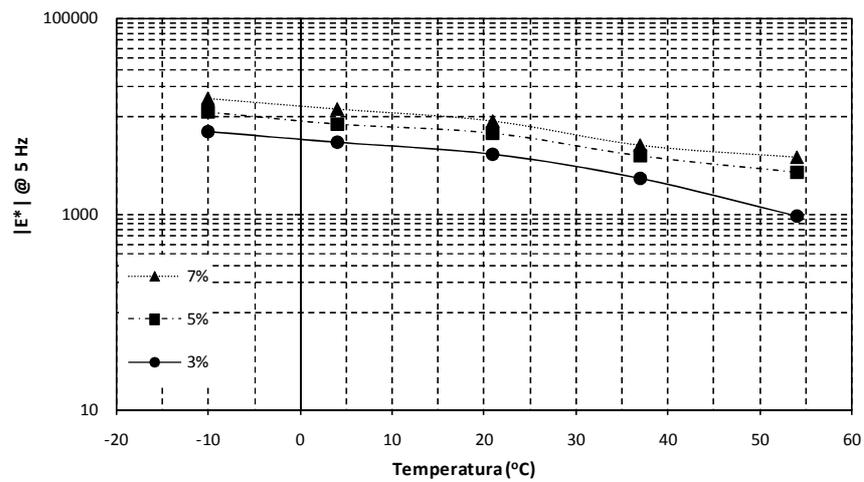
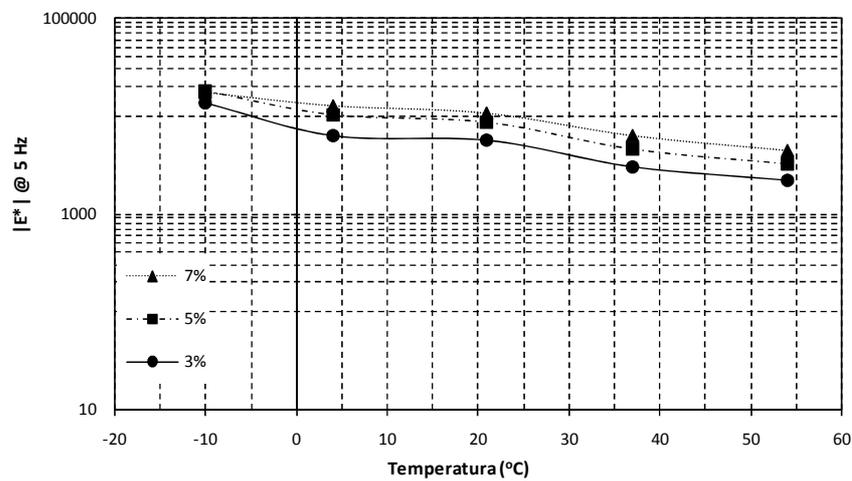
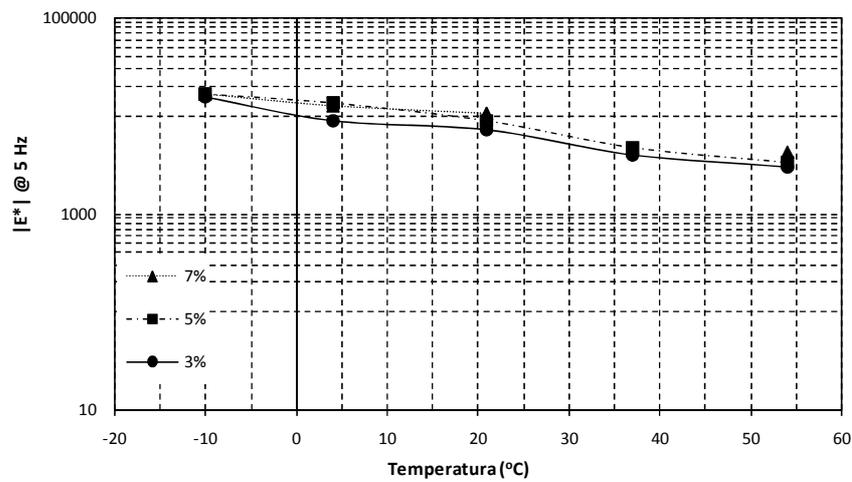
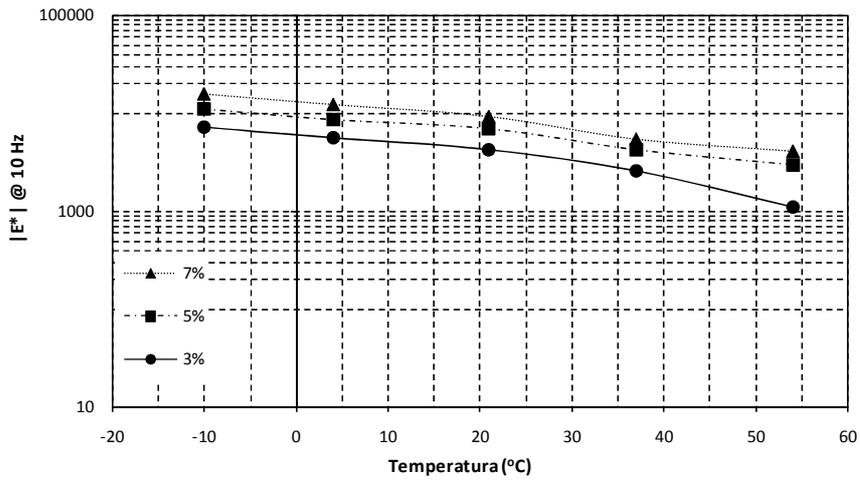
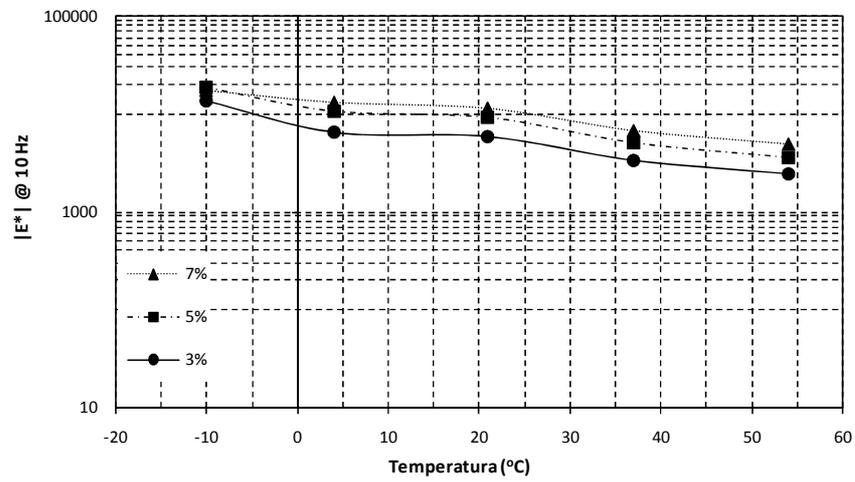
(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$ (b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$ (c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

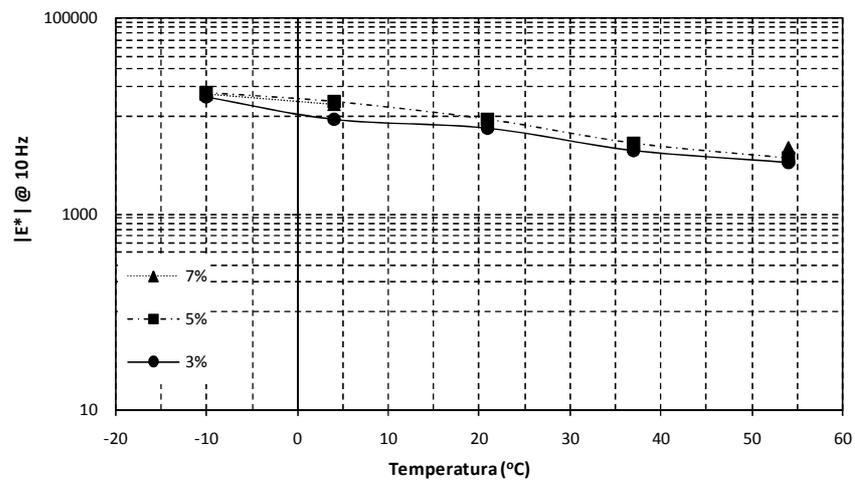
Figura 4.31 - Resultados de módulo dinâmico a 5 Hz



(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$



(b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$



(c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

Figura 4.32 - Resultados de módulo dinâmico a 10 Hz

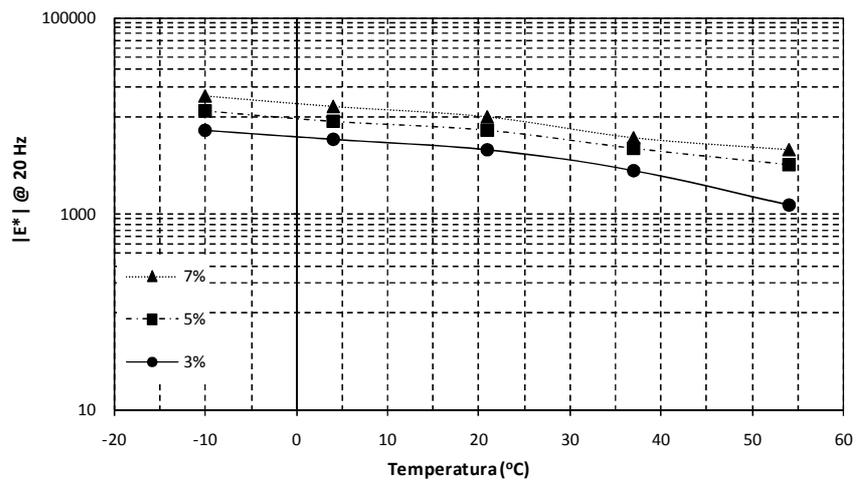
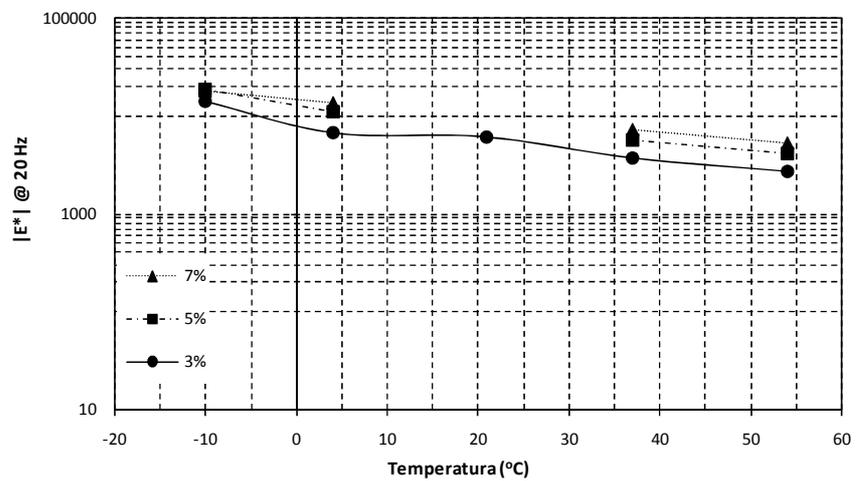
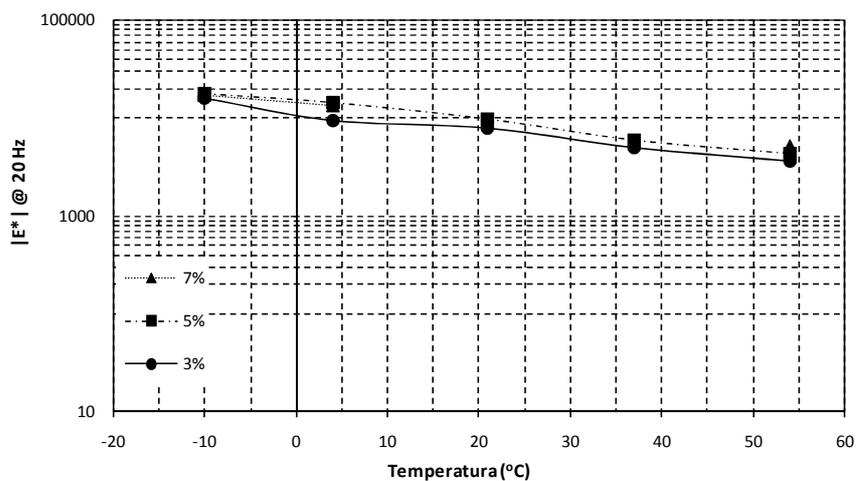
(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$ (b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$ (c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

Figura 4.33 - Resultados de módulo dinâmico a 20 Hz

Através dessas curvas é possível observar que o E^* diminui, independente da frequência, conforme aumenta a temperatura de ensaio. Pode se perceber também, que mesmo variando o grau de compactação, as curvas tem o formato similar, devido a todas terem a mesma quantidade de material fresado. Segundo Centofante (2016) quanto menor a frequência de carregamento, menor será o valor de módulo complexo e que quanto maior a inclinação da curva, maior é a suscetibilidade cinética da mistura, ou seja, maior é o efeito do tempo de carregamento no comportamento reológico do material.

A frequência de 25 Hz não foi graficada devido à variação de valores do módulo que pode se dar a diversos fatores, tais como irregularidades na superfície de alguns corpos-de-prova, assim o fazendo vibrar durante essa frequência.

As Figuras 4.34 a 4.42 a seguir demonstram as isócronas de ângulo de fase. Através destas curvas é possível constatar que, em todos os teores e graus de compactação, há um comportamento semelhante para a frequência de 0,01 Hz e um outro comportamento para as demais. Isso se dá que em carregamentos lentos, os ângulos de fase tendem a serem maiores devido à velocidade do carregamento.

Segundo Centofante (2016) a suscetibilidade cinética deve ser levada em conta, visto que é considerada uma importante propriedade da mistura asfáltica, pois ganhos neste aspecto retratam menor dano à deformação permanente das misturas sob volume de tráfego lento e pesado.

É possível observar que os menores valores de ângulo de fase são encontrados quanto maior o teor de cimento, para todos os graus de compactação, em todas as frequências e na temperatura mais baixa.

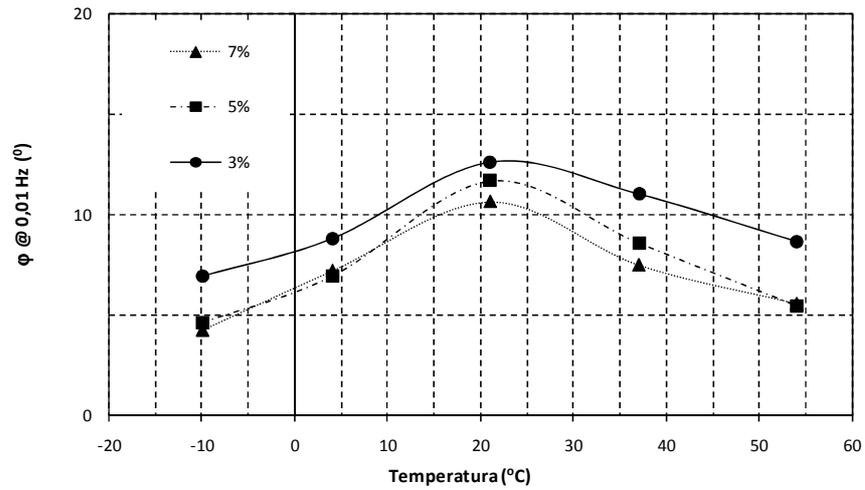
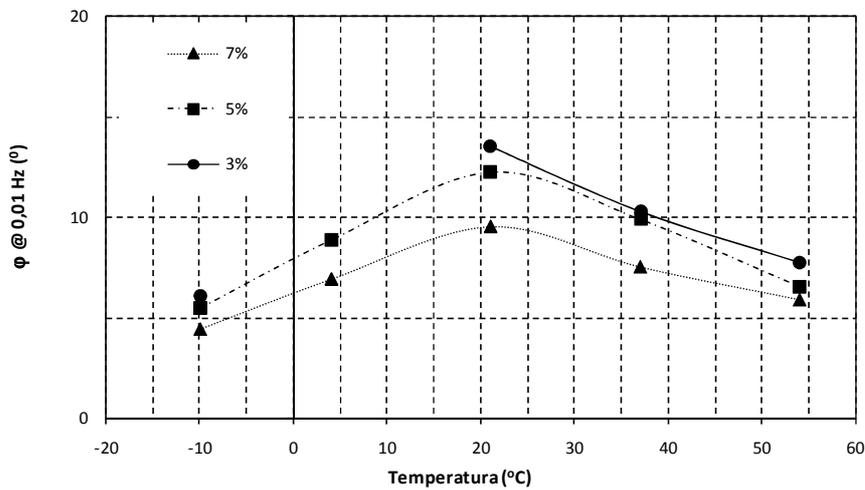
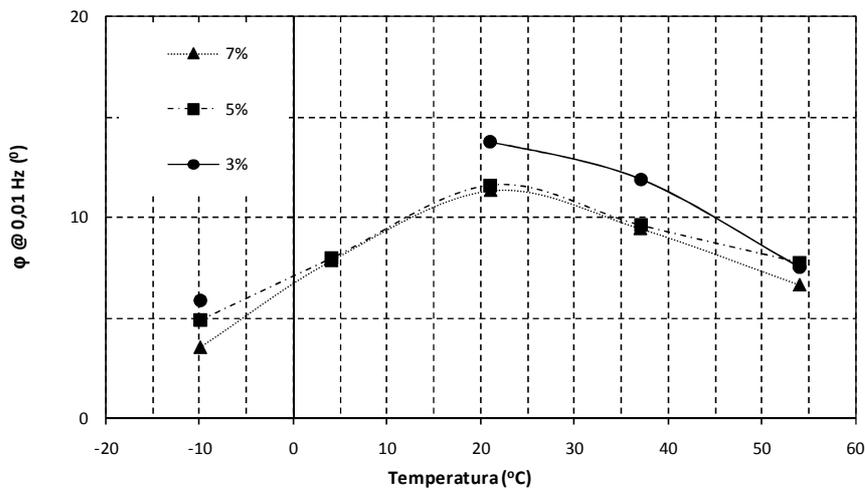
(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$ (b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$ (c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

Figura 4.34 - Resultados de ângulo de fase a 0,01 Hz

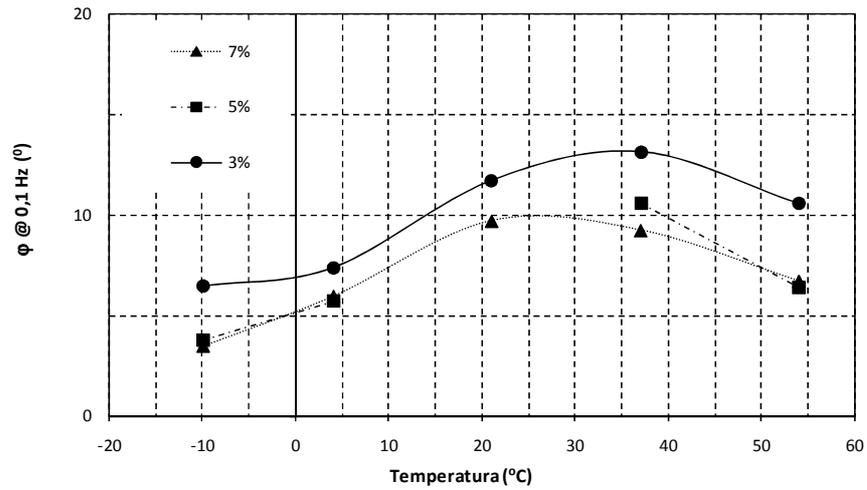
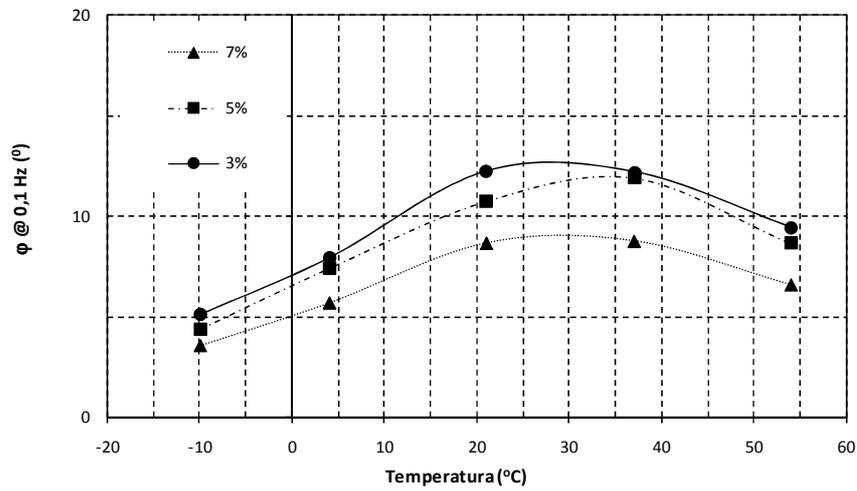
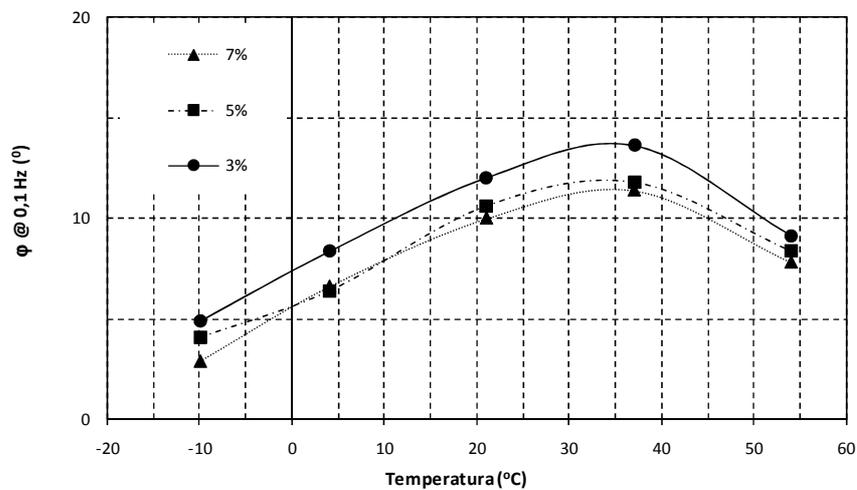
(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$ (b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$ (c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

Figura 4.35 - Resultados de ângulo de fase a 0,1 Hz

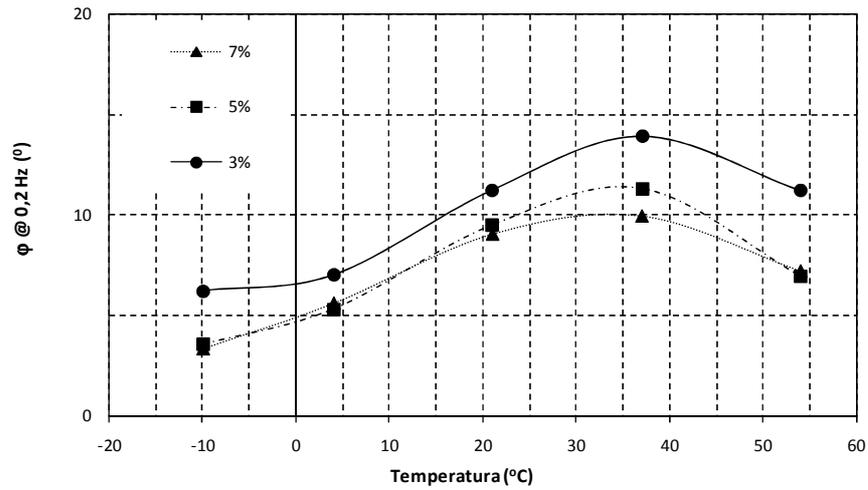
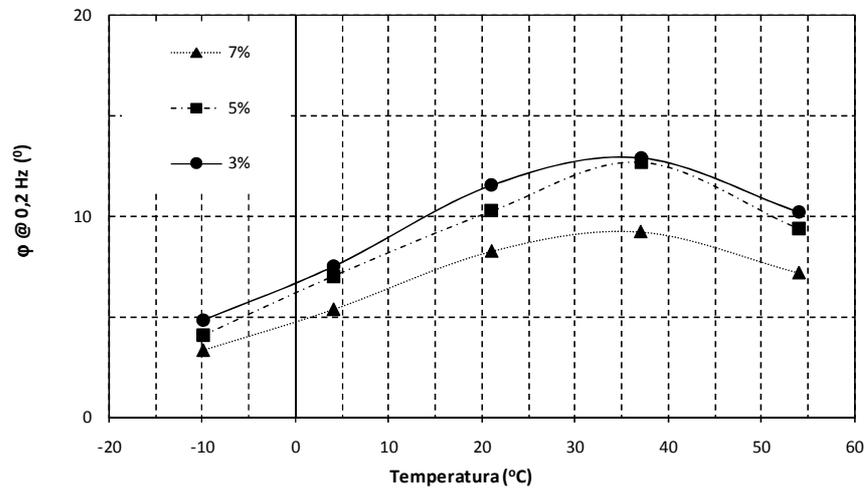
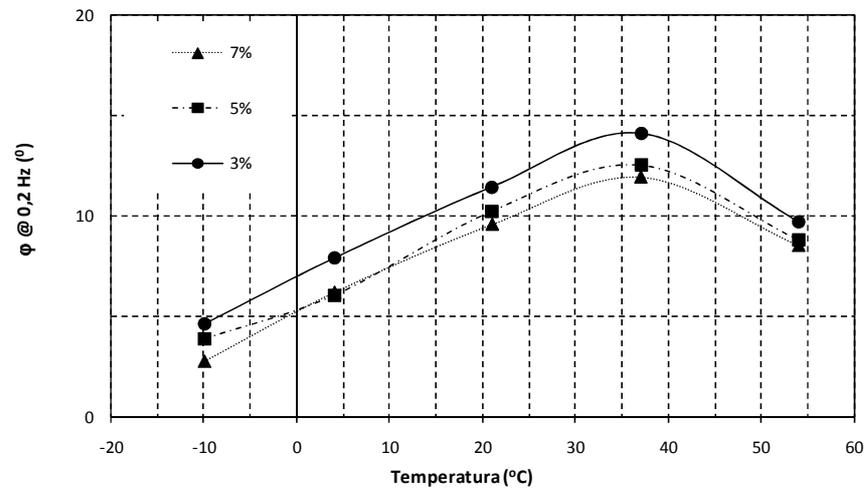
(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$ (b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$ (c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

Figura 4.36 - Resultados de ângulo de fase a 0,2 Hz

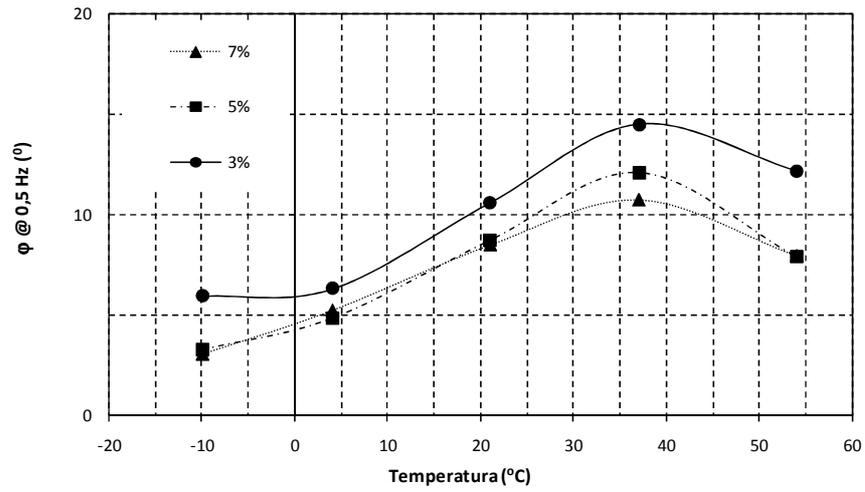
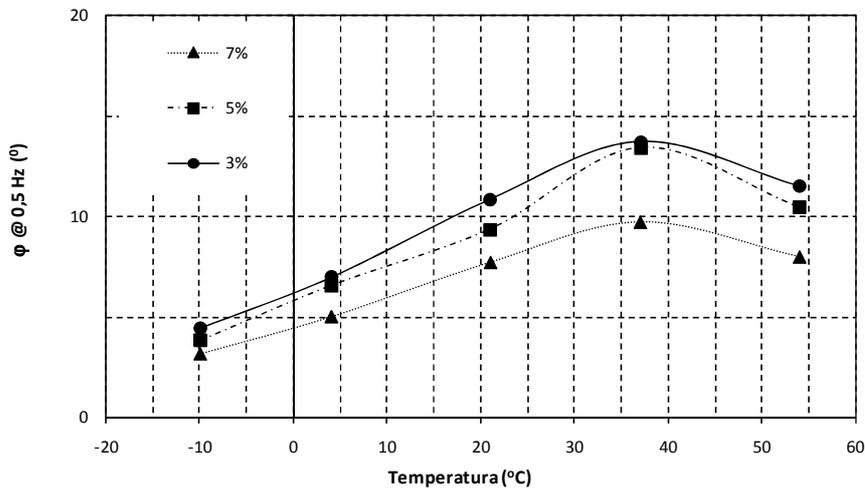
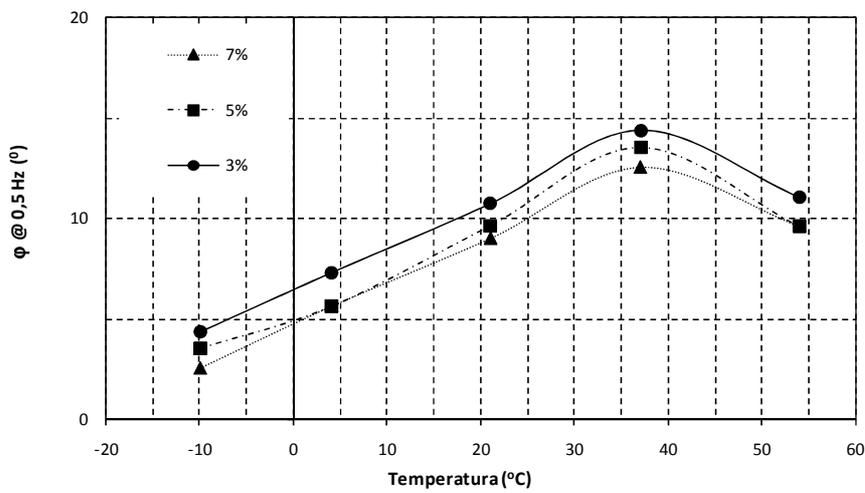
(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$ (b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$ (c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

Figura 4.37 - Resultados de ângulo de fase a 0,5 Hz

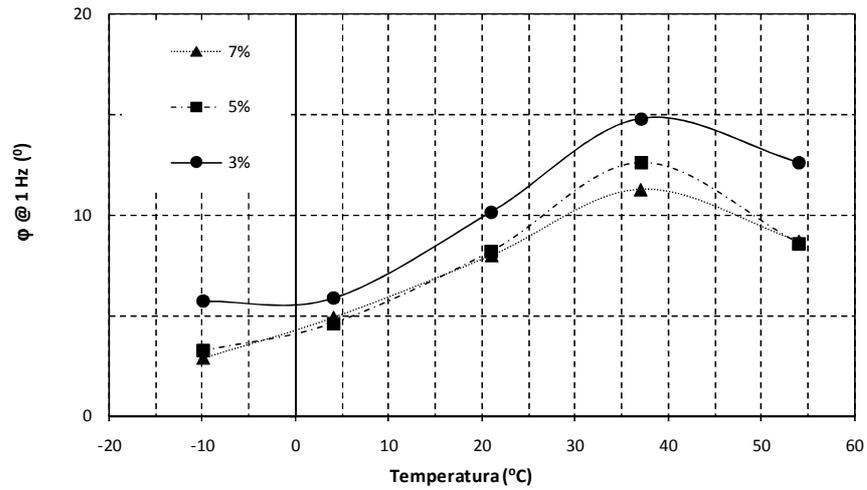
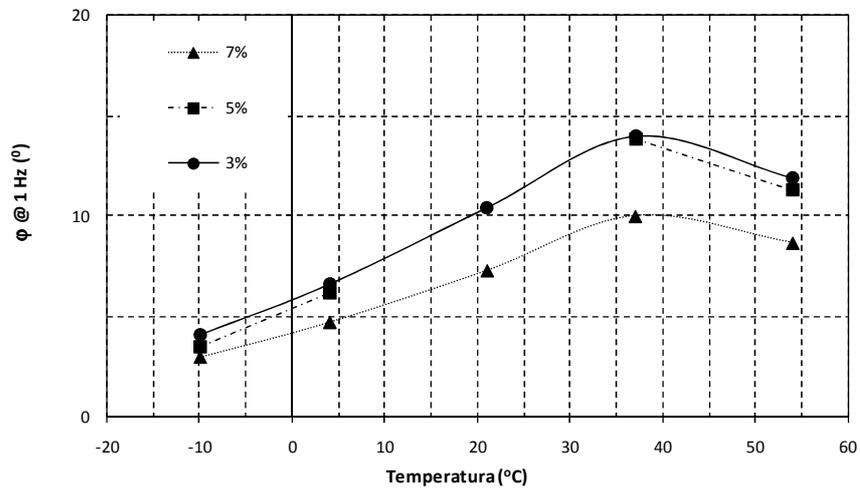
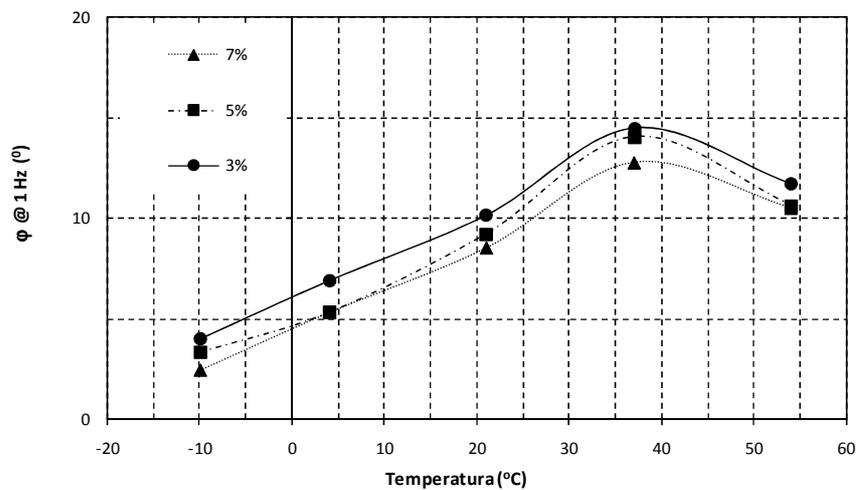
(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$ (b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$ (c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

Figura 4.38 - Resultados de ângulo de fase a 1 Hz

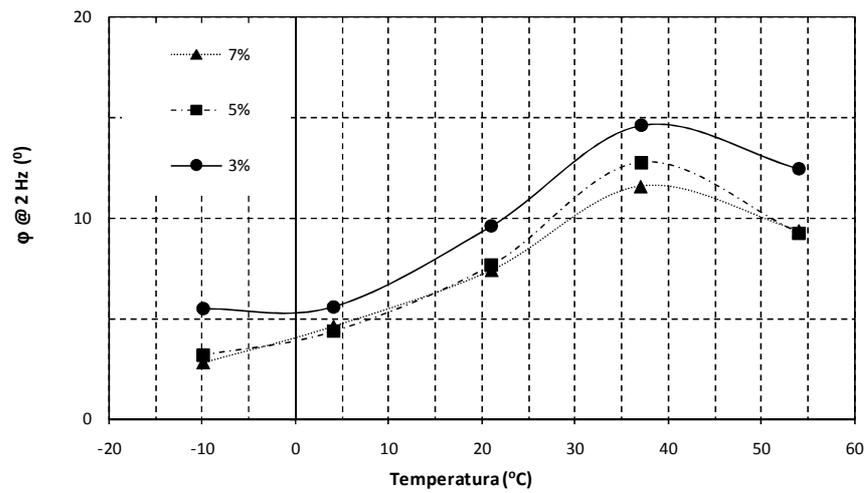
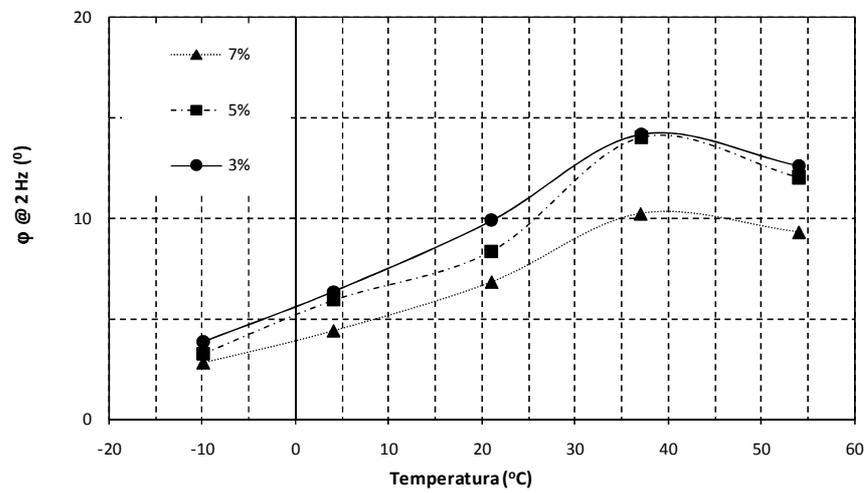
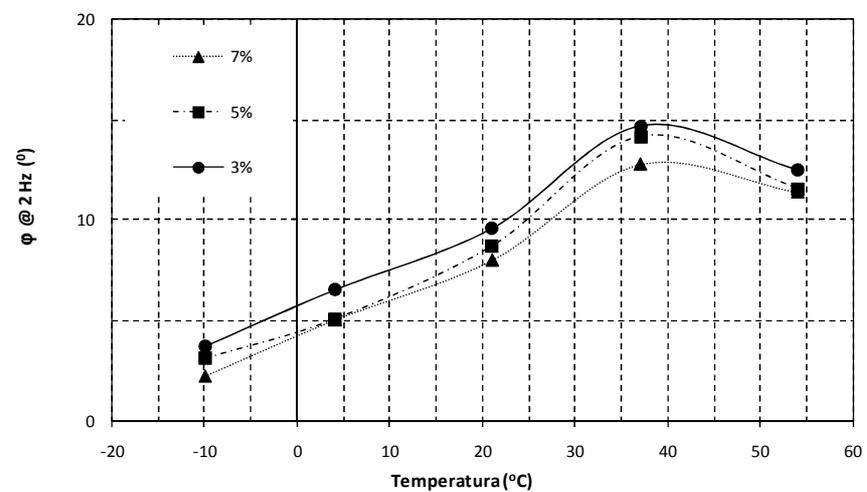
(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$ (b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$ (c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

Figura 4.39 - Resultados de ângulo de fase a 2 Hz

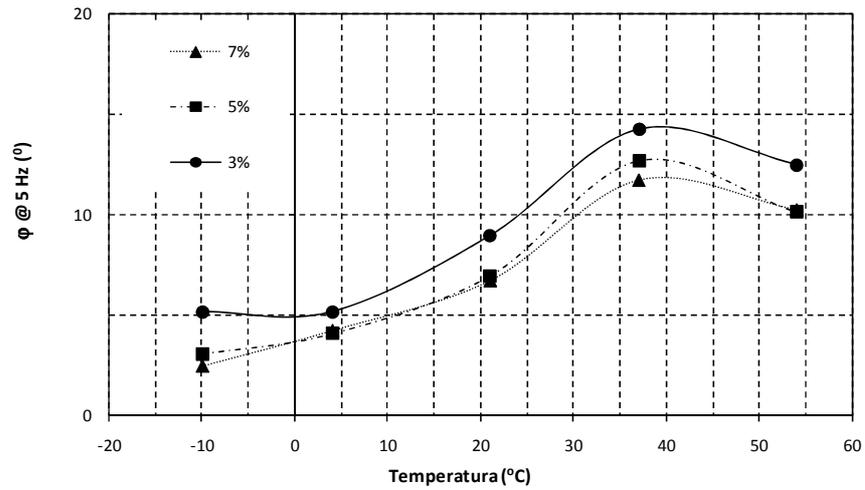
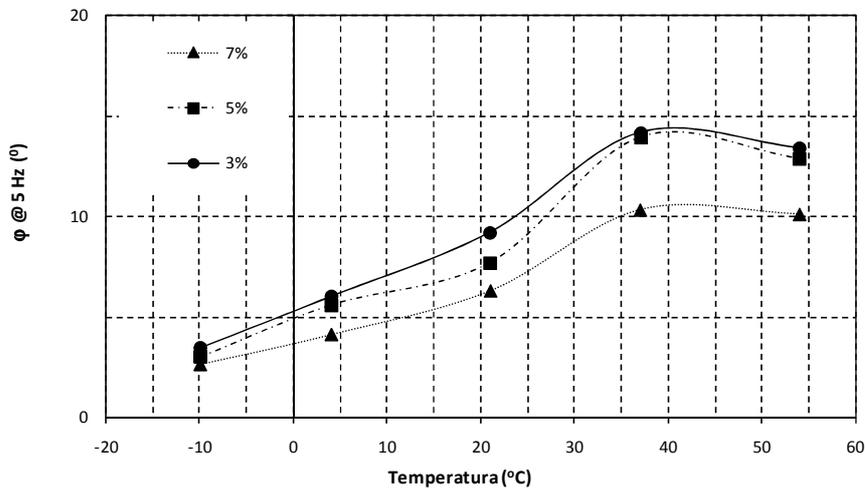
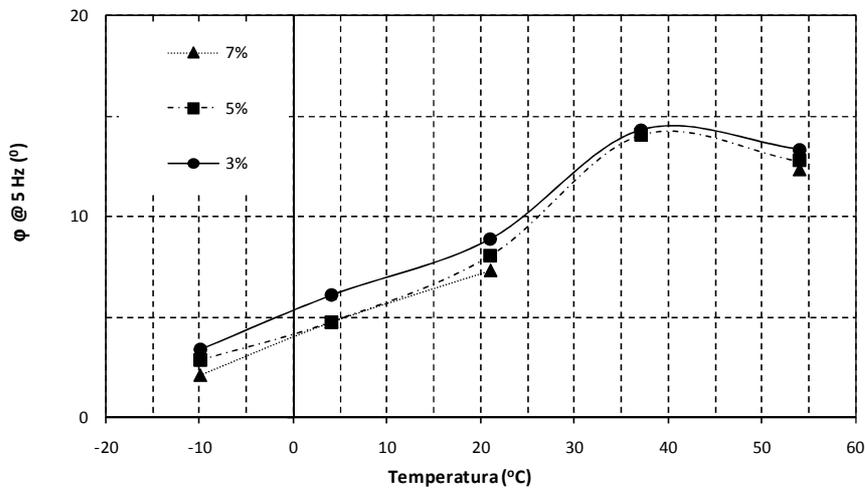
(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$ (b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$ (c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

Figura 4.40 - Resultados de ângulo de fase a 5 Hz

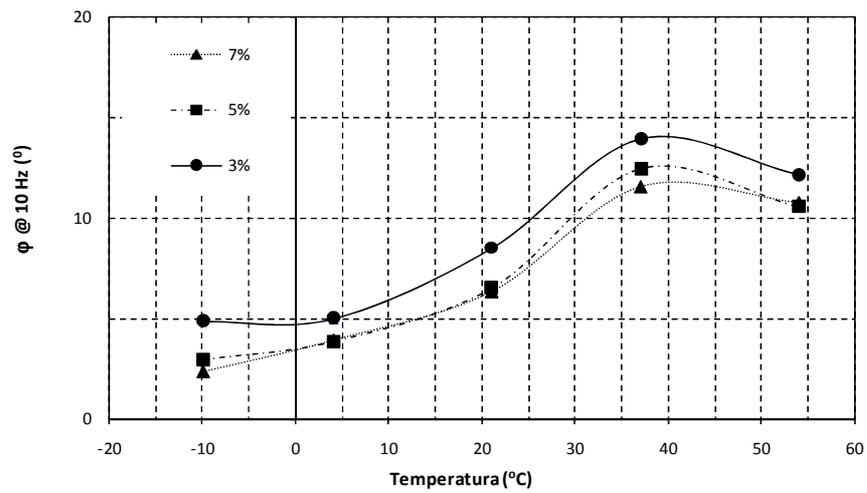
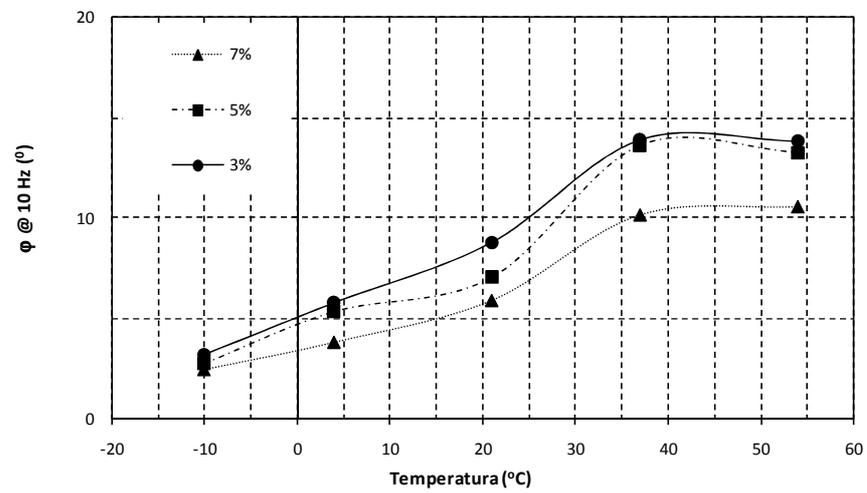
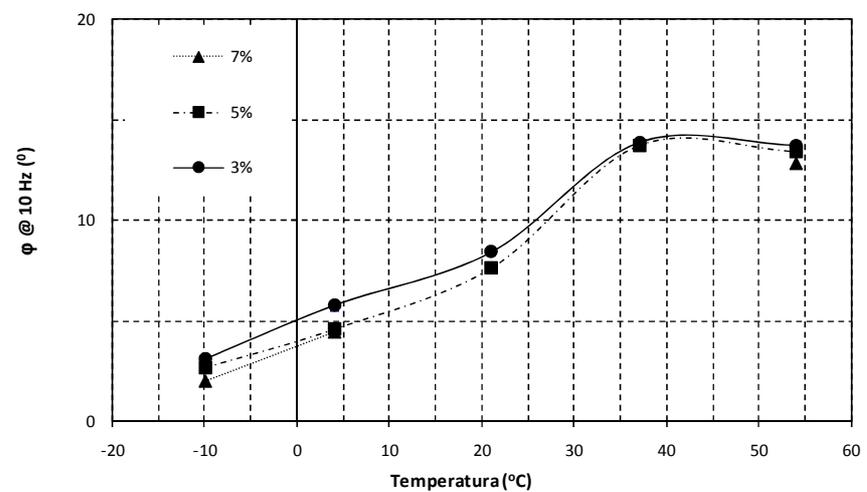
(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$ (b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$ (c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

Figura 4.41 - Resultados de ângulo de fase a 10 Hz

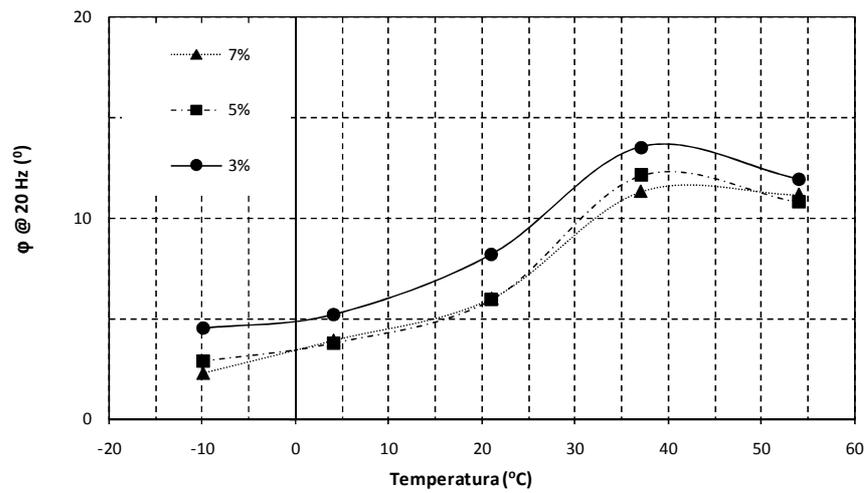
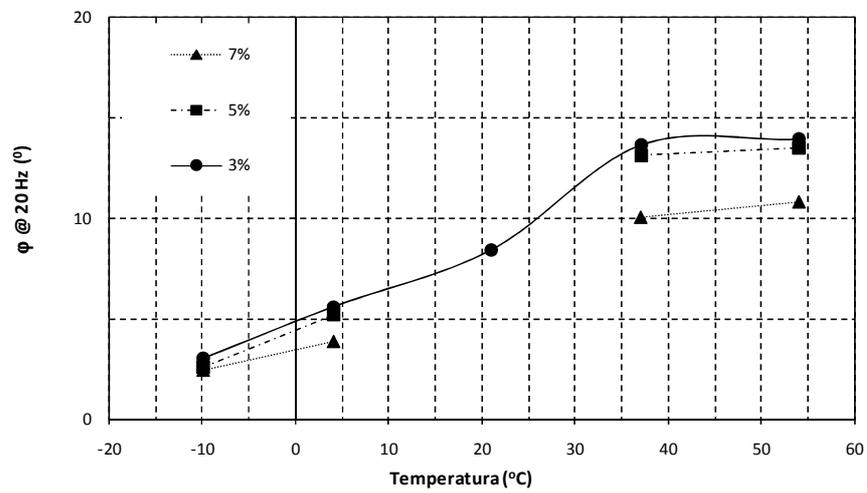
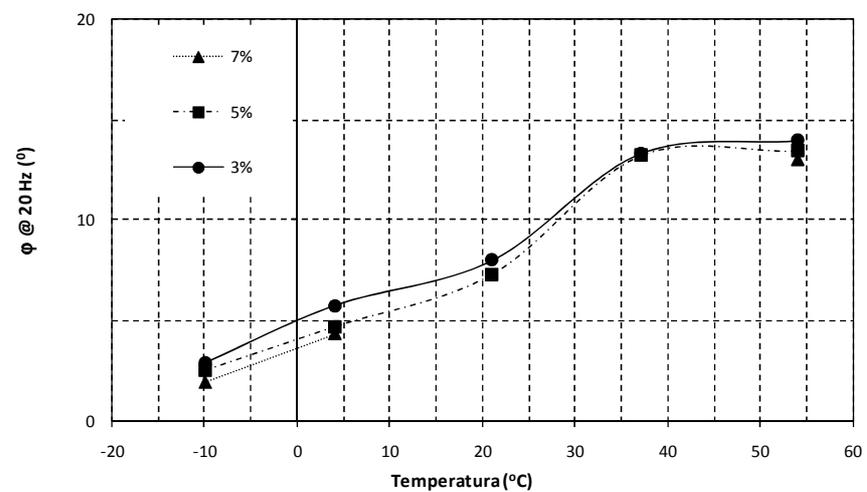
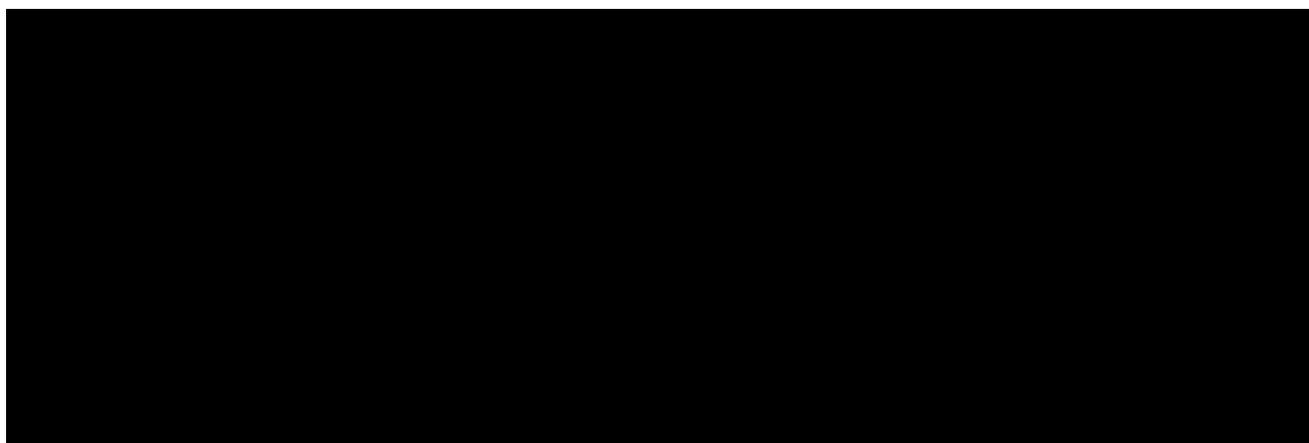
(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$ (b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$ (c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

Figura 4.42 - Resultados de ângulo de fase a 20 Hz

Para este ensaio foi feito um refinamento estatístico dos valores de cada ponto, sendo que os que ficaram muito fora do comportamento previsto para o ensaio ou valor muito fora do “usual” foram cortados.

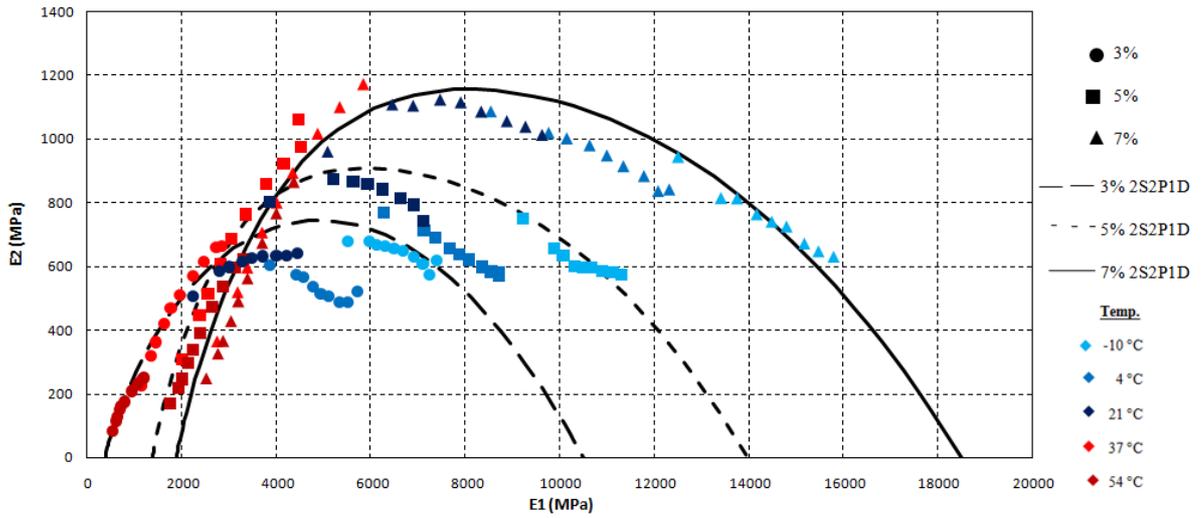
O tratamento dos dados experimentais médios das duas amostras por mistura foi realizado através do modelo 2S2P1D. Os parâmetros de ajuste são apresentados na Tabela , no qual foi obtida a representação do Cole Cole, diagrama de Black, curva mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase das misturas propostas.

Tabela 4.5 – Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de C1 e C2 para as misturas

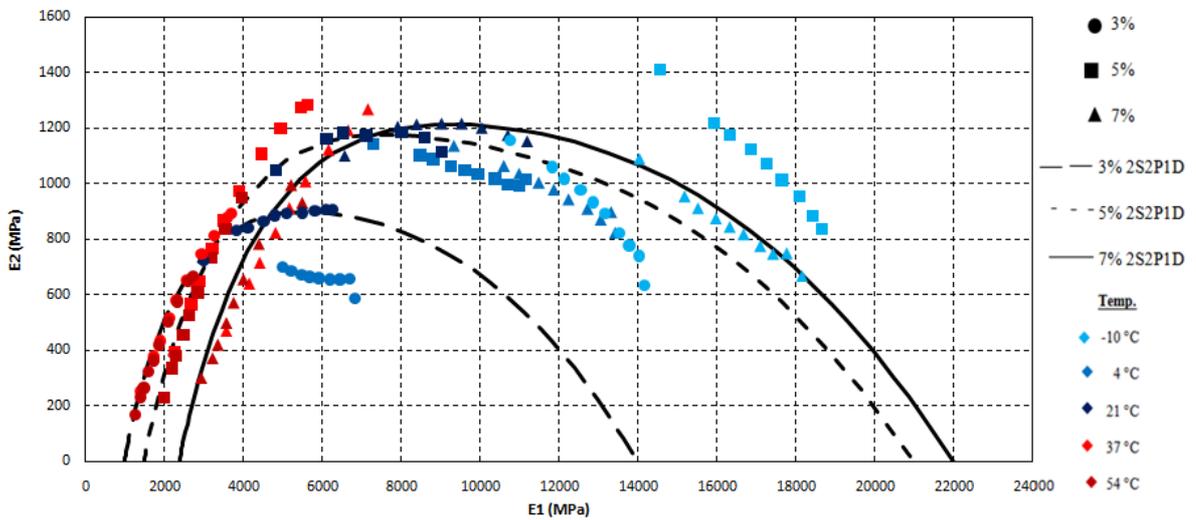


A Figura 4.43 apresenta a representação gráfica dos resultados no espaço Cole Cole, com todas as amostras realizadas para os resultados experimentais e para os resultados obtidos através da modelagem 2S2P1D. A Cole Cole é representada, em escala aritmética, a parte real E1 e a parte imaginária ou de perda E2. Através das figuras pode se observar que os dados tendem a formar curvas de formato semicírculo, o qual era esperado para a Cole Cole, porém nota-se que valores de misturas o E1 tendem a valores mais altos do que normalmente ocorre para misturas asfálticas, isso devido a cimentação das misturas.

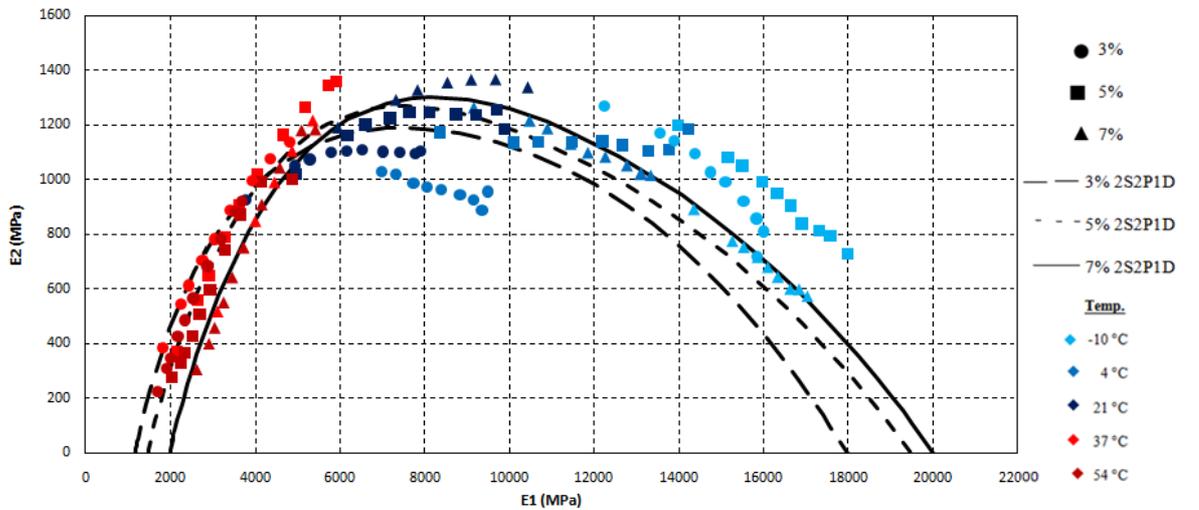
É possível notar também que a mistura de 3% de teor de cimento apresenta os menores valores de E2, no geral, quando comparadas às misturas com maiores teores, o que indica que as misturas com elevado teor apresentam uma maior mobilização do esqueleto mineral, bem como maior dissipação de energia. Além disso, é possível observar que os maiores valores de perda são encontrados em altas temperaturas, devido a queda brusca do E1.



(a) $\gamma_d 2,0 \text{ g/cm}^3$



(b) $\gamma_d 2,1 \text{ g/cm}^3$



(c) $\gamma_d 2,2 \text{ g/cm}^3$

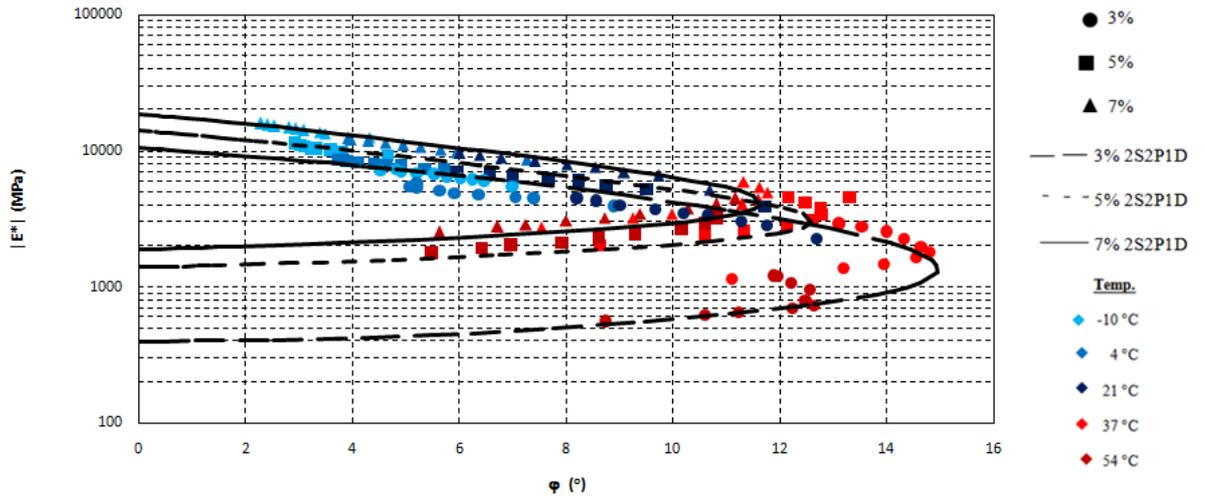
Figura 4.43 - Espaço Cole Cole

Estudo da resistência e da rigidez de uma mistura de material fresado e pó-de-pedra com a adição de cimento

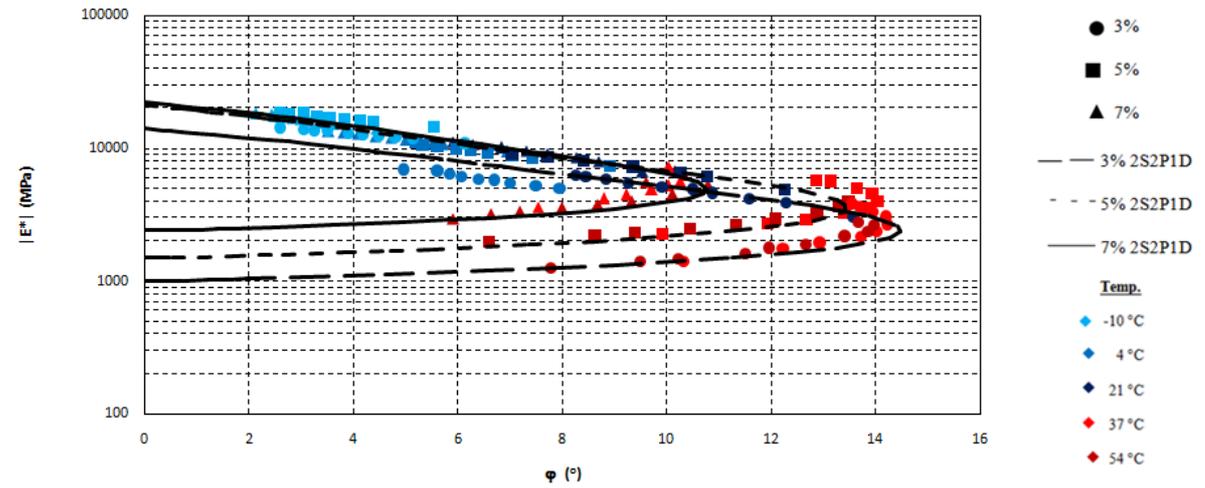
A Figura 4.44 apresenta, para todas as misturas, a representação gráfica dos resultados no Diagrama Black para os resultados experimentais e a representação gráfica para os resultados obtidos através da modelagem 2S2P1D. Através desses dados é possível verificar a relação entre o módulo dinâmico e o ângulo de fase para diferentes temperaturas.

Além disso, nota-se que a região dos módulos onde ocorre o acréscimo do ângulo de fase é identificada para condições de temperatura elevada, a partir de 37°C, e um decréscimo a partir dos 54 °C, isso se dá devido que o ligante presente no material fresado começa a amolecer, perdendo assim sua característica viscoelástica, e havendo assim uma mobilização das tensões no esqueleto mineral.

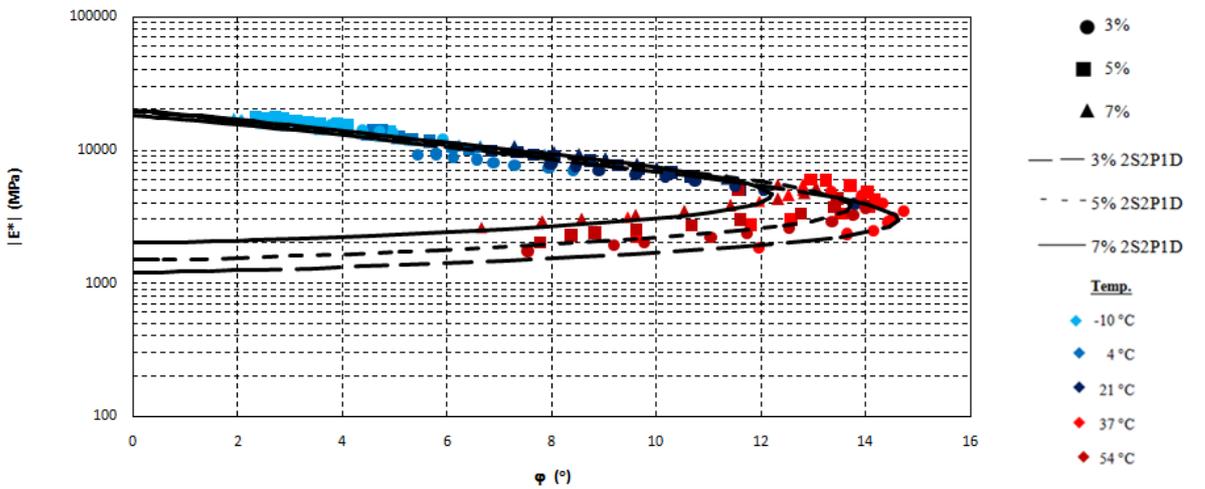
Ainda, observa-se que as misturas com um teor mais baixo de cimento, apresentam os maiores valores de ângulo de fase, ou seja, essas misturas apresentam uma parcela viscosa mais importante, com relação à parcela elástica. A partir disso, é possível inferir que estas misturas apresentariam, em campo, mais deformações plásticas quando comparadas às demais misturas.



(a) γ_d 2,0 g/cm³



(c) γ_d 2,1 g/cm³



(c) γ_d 2,2 g/cm³

Figura 4.44 – Diagrama Black

Para Yusoff *et al.* (2011), as curvas mestras têm sido utilizadas para descrever e representar as características viscoelásticas de misturas asfálticas e ligantes para diversos valores de temperatura e frequência. A construção de curvas mestras pode ser feita usando uma temperatura de referência arbitrariamente selecionada para todos os dados analisados. Para o caso desta pesquisa, a temperatura foi fixada em 20°C, para poder se comparar o resultado com outras pesquisas. A temperatura de referência é o valor igual a um, ou seja, $\log a(T)$ é igual a zero. Em geral, pode ser usado esse tipo de modelagem para a equivalência de tempo-temperatura em relação a ligantes e misturas asfálticas.

Uma das grandes vantagens da curva mestra é que esta possibilita a previsão dos valores de uma determinada propriedade reológica ao longo de uma gama de frequências mais ampla do que a utilizada inicialmente, bem como nas mais variadas temperaturas. A Figura 4.45 traz a comparação de todas as curvas mestras das misturas e de outros autores para poder comparar.

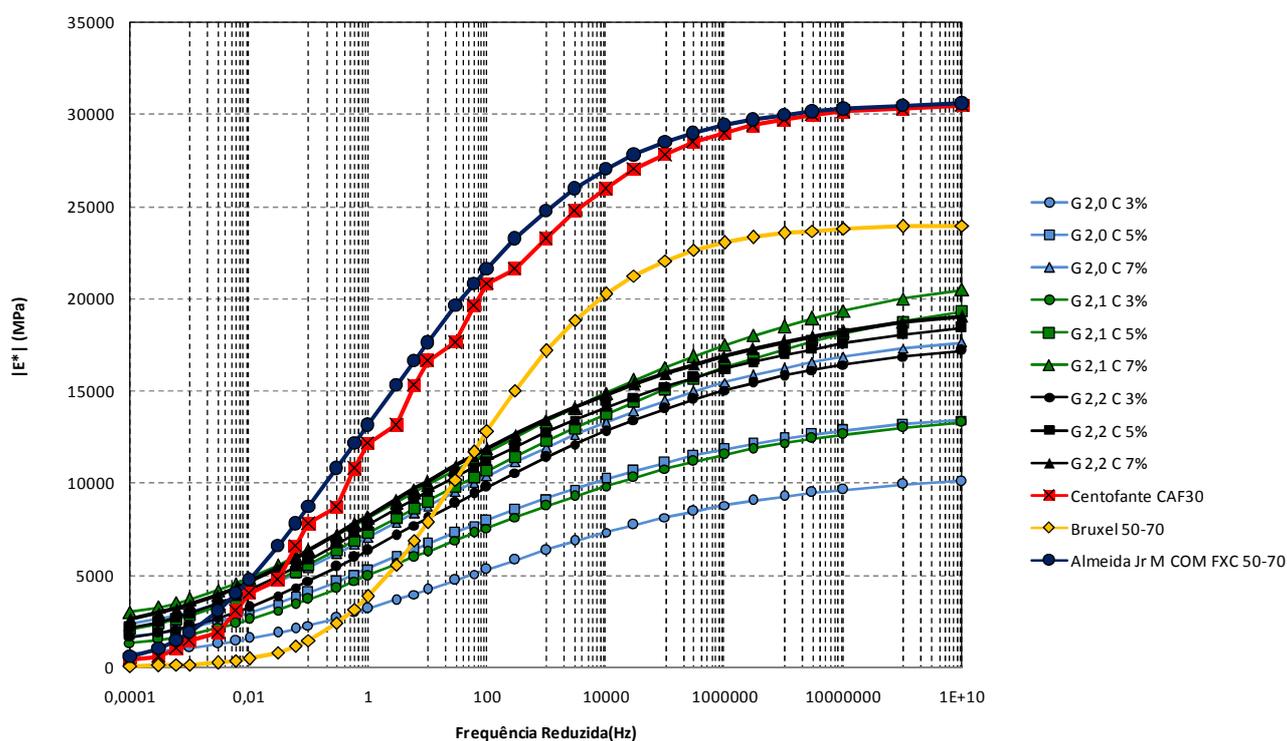


Figura 4.45 – Curva Mestra para os módulos dinâmicos

Através dos dados apresentados, é possível verificar que o módulo dinâmico cresce em função da frequência. O menor valor verificado para o módulo dinâmico é encontrado nas frequências mais baixas, o que explica o formato da curva mestra. Pode se notar que as misturas da pesquisa obtêm um módulo mais elevado do que as misturas asfálticas dos outros autores, devido à cimentação do material. Porém nota-se que não há um pico, pois a mesma não possui ligante novo, e apenas o ligante remanescente do material fresado, ou seja, não torna a mistura tão suscetível termicamente quanto às misturas asfálticas. Mas apesar de não acontecer o pico, percebe-se a variação do valor do módulo, o que se pode afirmar que esta mistura tem propriedades viscoelásticas.

A Figura 4.46 apresenta a curva mestra do ângulo de fase para todas as misturas. Através desses dados, é possível verificar que as misturas asfálticas apresentam os maiores ângulos de fase devido a presença do ligante asfáltico, porém em altas temperaturas tendem a um valor único, pois tanto o ligante asfáltico novo quanto o presente no material fresado amolecem, perdendo assim suas propriedades viscoelásticas.

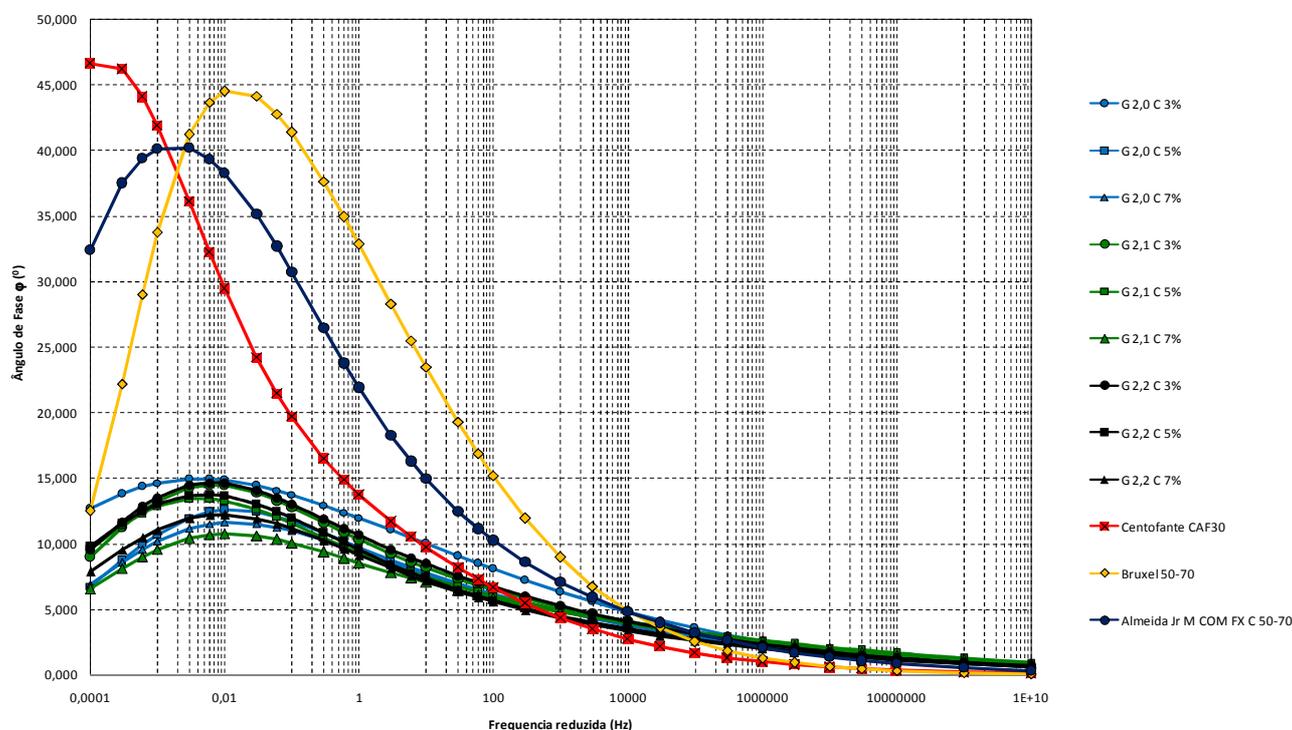


Figura 4.46 – Curva Mestra para os ângulos de fase

4.4.1 Efeito do teor de cimento

Na Figura 4.47 são apresentadas retas da variação do módulo dinâmico em função do teor de cimento, para a temperatura de 37°C para a frequência de 10 Hz. Cada reta, isoladamente, possui a mesma massa específica aparente seca e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega = 8\%$). Cada ponto corresponde à média do módulo de dois corpos-de-prova moldados com características idênticas.

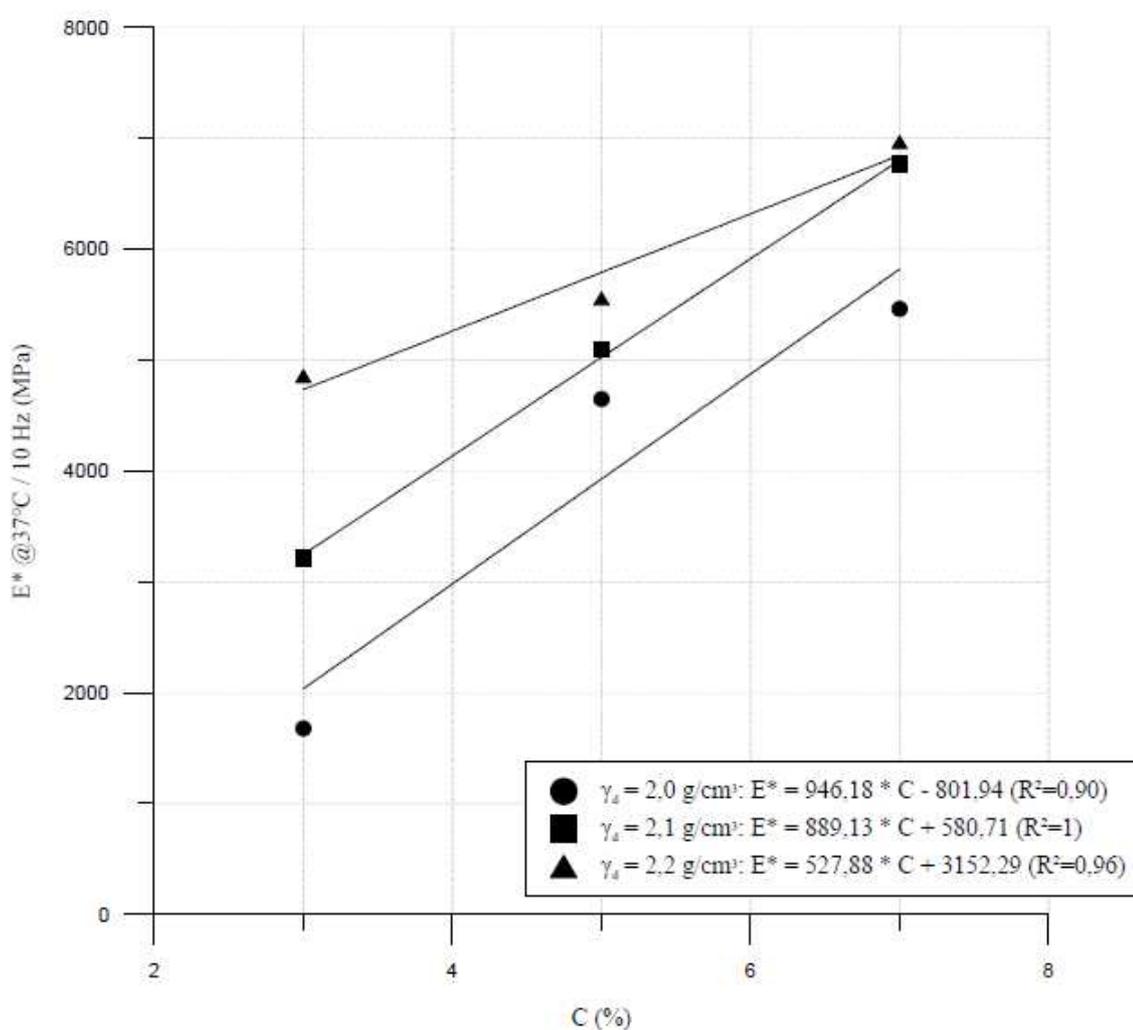


Figura 4.47 - Variação do módulo dinâmico em relação ao teor de cimento

Pode-se observar que a quantidade de cimento tem um grande efeito sobre o módulo dinâmico da mistura. Mesmo pequenas adições de cimento são suficientes para gerar enormes ganhos, se aumentar a quantidade de cimento de 3% para 7% o valor de módulo, em média, duplicou. Também se observou que, o valor aumenta linearmente com o aumento da quantidade de

cimento. Além disso, também foi verificado que para um mesmo teor de cimento aumentando a energia de compactação aumenta o valor de módulo.

4.4.2 Efeito da porosidade

Na Figura 4.48 são apresentadas as curvas de ajuste da variação do módulo dinâmico em função do teor da porosidade, para a temperatura de 37 ° C para a frequência de 10 Hz. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cimento e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega = 8\%$). Cada ponto corresponde à média da porosidade de dois corpos-de-prova moldados com características idênticas.

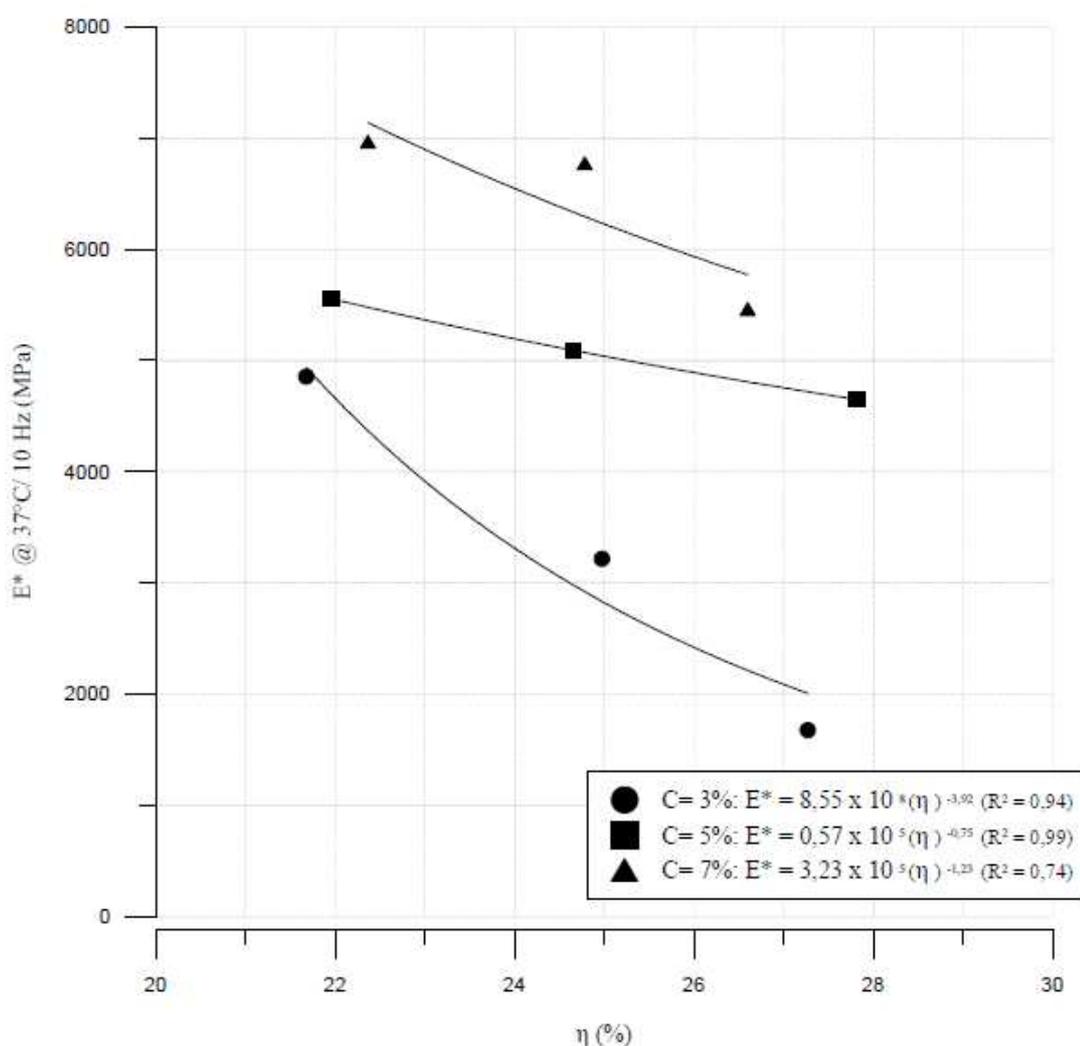


Figura 4.48 - Variação do módulo dinâmico em relação da porosidade

Observa que, de maneira similar à quantidade de cimento, a porosidade da mistura compactada exerce uma forte influência sobre o módulo dinâmico da mistura. Os gráficos permitem verificar que a redução na porosidade do material promove ganhos significativos de resistência. O módulo dinâmico aumentou exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

4.4.3 Relação Vazios/Cimento

Na Figura 4.49 são apresentadas as curvas de ajuste da variação do módulo dinâmico para a temperatura de 37 ° C para a frequência de 10 Hz, na relação vazios/cimento. Cada curva, isoladamente, possui a mesma massa específica aparente seca e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=8\%$).

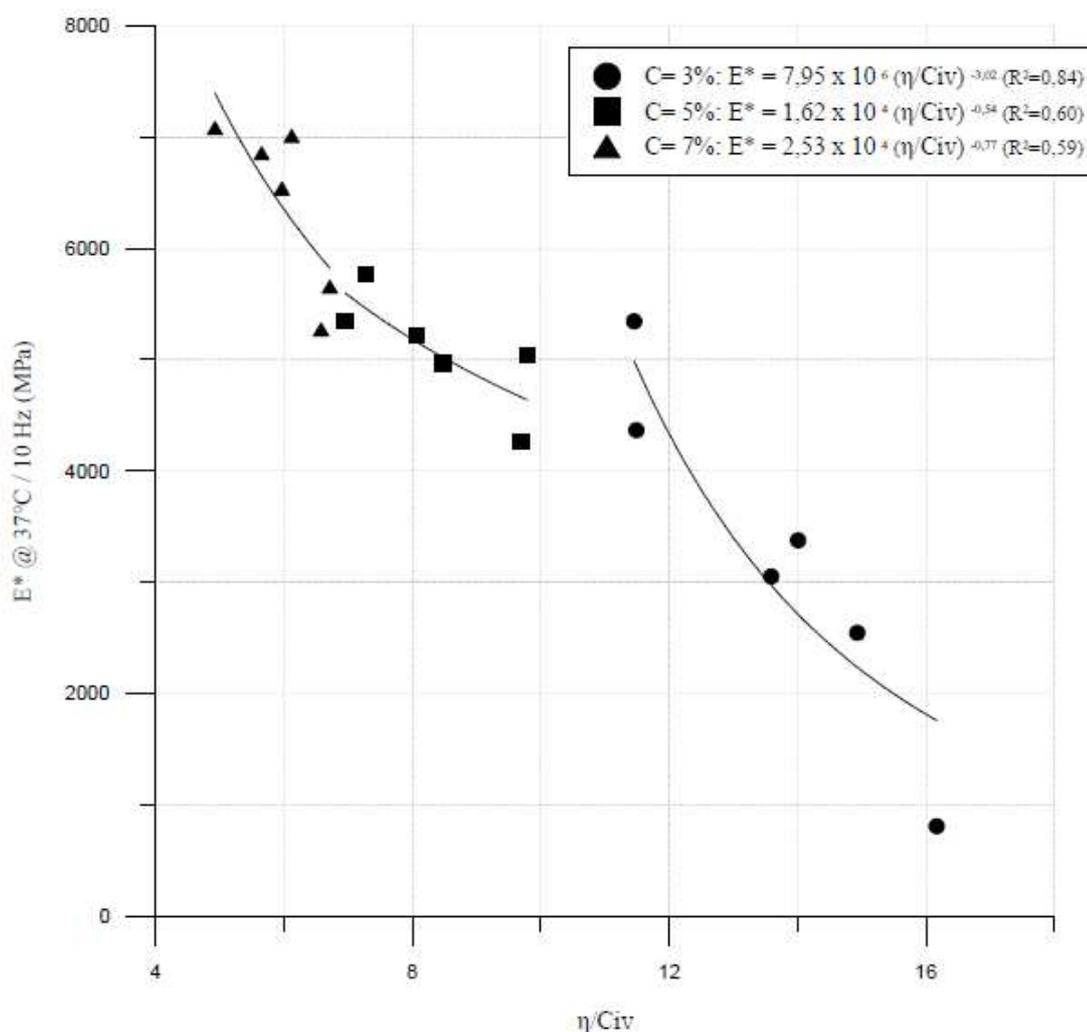


Figura 4.49 - Variação do módulo dinâmico versus à relação vazios/cimento

Pode-se observar que não aparenta existir uma correlação única entre o módulo dinâmico e a relação porosidade/teor volumétrico de cimento. Como já citado, uma maneira de compatibilizar as taxas de variação das grandezas citadas é através da aplicação da potência em uma delas.

Foi obtida a potência para cada temperatura e cada frequência, conforme demonstra a Tabela 4.6, sobre o parâmetro teor volumétrico de cimento. A potência utilizada foi o valor de 0,59, sendo que com este conseguiu compatibilizar as taxas de variação e resultando num melhor ajuste da curva. Os valores em *itálico* foram descartados devido a análises estatísticas e gráficas dos mesmos.

Tabela 4.6 - Variação da potencia para cada temperatura e cada frequência

| Temperatura (C°) | | | | | |
|--------------------------|--------------|----------|--------------|-------------|-----------|
| Frenquencia (Hz) | -10 | 4 | 21 | 37 | 54 |
| 25 | <i>0,234</i> | 0,676 | <i>0,112</i> | 0,416 | 0,565 |
| 20 | <i>0,247</i> | 0,702 | 0,521 | 0,453 | 0,54 |
| 10 | <i>0,242</i> | 0,629 | 0,529 | 0,457 | 0,561 |
| 5 | <i>0,246</i> | 0,631 | 0,529 | 0,466 | 0,584 |
| 2 | <i>0,248</i> | 0,635 | 0,531 | <i>1,02</i> | 0,61 |
| 1 | <i>0,257</i> | 0,642 | 0,536 | 0,511 | 0,631 |
| 0,5 | <i>0,255</i> | 0,647 | 0,546 | 0,53 | 0,664 |
| 0,2 | <i>0,261</i> | 0,662 | 0,556 | 0,556 | 0,694 |
| 0,1 | <i>0,265</i> | 0,674 | 0,561 | 0,631 | 0,708 |
| 0,01 | <i>0,16</i> | 0,714 | 0,607 | 0,753 | 0,741 |
| Media | | 0,661 | 0,546 | 0,530 | 0,630 |

Para cada potência em cada temperatura e cada frequência, se obteve um expoente externo denominado de B, sendo os valores demonstrados a Tabela 4.7. A potência B utilizada foi o valor de -1,34, sendo que com este conseguiu compatibilizar as taxas de variação e resultando num melhor ajuste da curva. Houve valores descartados devido a análises estatísticas e/ou gráficas dos mesmos.

Tabela 4.7 - Variação da potencia B para cada temperatura e cada frequência

| Temperatura (C°) | | | | |
|--------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Frenquencia (Hz) | 4 | 21 | 37 | 54 |
| 25 | -0,824 | | -1,609 | -1,293 |
| 20 | -0,923 | -1,288 | -1,577 | -1,286 |
| 10 | -0,972 | -1,287 | -1,517 | -1,308 |
| 5 | -0,983 | -1,295 | -1,636 | -1,335 |
| 2 | -0,989 | -1,300 | | -1,375 |
| 1 | -0,994 | -1,256 | -1,723 | -1,404 |
| 0,5 | -0,991 | -1,275 | -1,745 | -1,424 |
| 0,2 | -0,985 | -1,281 | -1,826 | -1,445 |
| 0,1 | -0,980 | -1,287 | -1,837 | -1,459 |
| 0,01 | -0,974 | -1,353 | -1,952 | -1,619 |
| Media | -0,961 | -1,291 | -1,714 | -1,395 |

A Figura 4.50 apresenta as curvas de ajuste da variação do módulo dinâmico em função da relação porosidade/teor volumétrico de cimento elevado na potencia 0,59 para a frequência de 10 Hz em diversas temperaturas. A curva possui diversas massas específicas aparentes secas e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=8\%$).

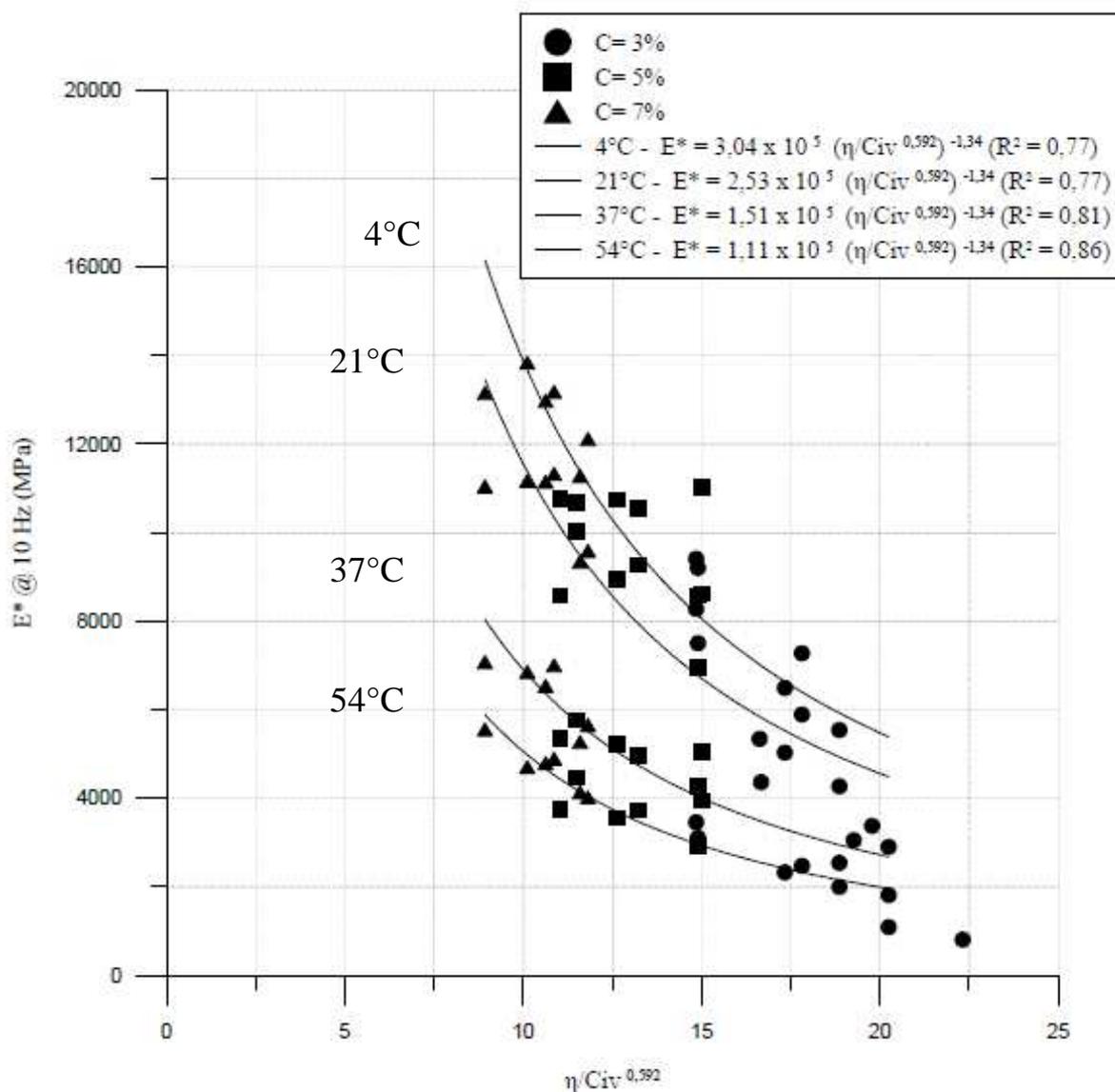


Figura 4.50 - Variação do módulo dinâmico versus à relação vazios/cimento ajustado

Pode-se observar uma satisfatória correlação entre a porosidade/teor volumétrico de cimento ajustados e o módulo dinâmico para a mistura de 70MF+ 30PDP utilizada no estudo. Pode se observar também que há uma variação do módulo em relação à temperatura, ou seja, o material tem propriedades viscoelásticas e essas conseguem se relacionar com a relação porosidade/teor volumétrico de cimento.

4.5 CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS

Como já citado na revisão bibliográfica, uma maneira de compatibilizar as taxas de variação das grandezas citadas é através da aplicação da potência em uma delas. As curvas tem um melhor ajuste de forma de potência, com um formato de RCS ; $RTCD$; MR e $MD = C [\eta/Civ^X]^{-B}$. Para que exista uma razão igual a uma constante entre os ensaios as curvas deve-se ajustar potencialmente a uma única potência X, igual para todas as curvas, para esse valor foi utilizado a media da potência X de todos os ensaios, conforme Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Potências X de cada ensaio

| | |
|--------------|-------------|
| RCS | 0,34 |
| RT | 0,39 |
| MR | 0,34 |
| MD | 0,59 |
| Média | 0,42 |

Com os dados da potência X para cada ensaio, foram calculadas as potências B, sendo os valores dela conforme Tabela 4.9. Estes valores foram encontrados fazendo que o somatório dos mínimos quadrados de todas as curvas, seja mínimo. Percebeu-se um valor muito próximo dos valores das resistências e dos módulos, sendo assim utilizado um valor único de B para as resistências e outro para os módulos. Percebe-se com isso que o expoente X esta ligado ao tipo da mistura e o expoente B ao tipo de ensaio.

Tabela 4.9 - Potências B de cada ensaio

| | | | |
|-----|-------|--------------|-------|
| RCS | -2,74 | Média | -2,59 |
| RT | -2,43 | | |
| MR | -1,40 | Média | -1,49 |
| MD | -1,57 | | |

A Figura 4.51 a 4.54 apresentam curvas de ajuste da variação dos ensaios em função da relação porosidade/teor volumétrico de cimento elevado na potência 0,42. A curva possui diversas massas específicas aparentes secas e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=8\%$).

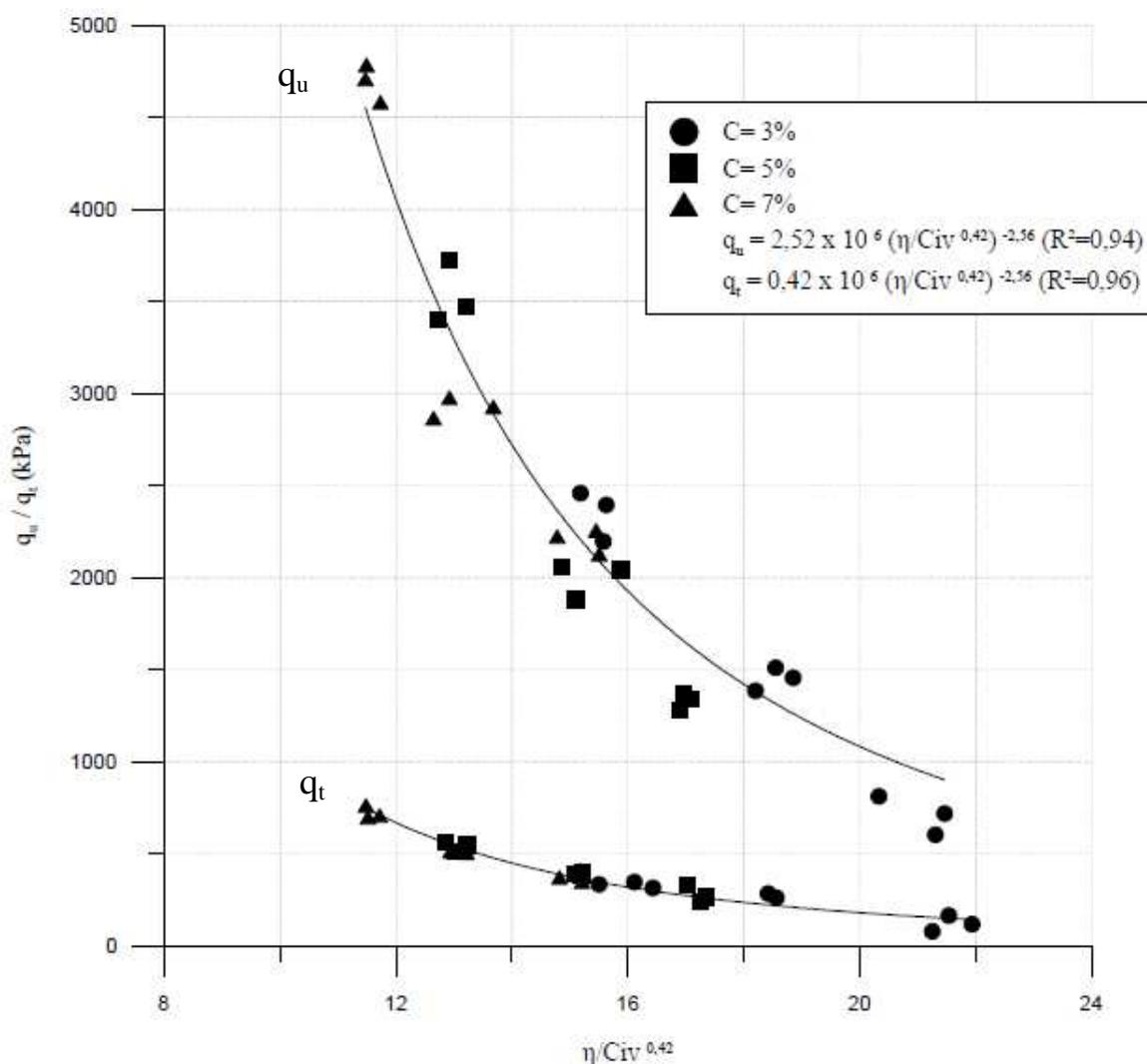


Figura 4.51 - Variação da RCS e RT versus à relação vazios/cimento compatibilizada

Segundo estudos realizados na UFRGS (Johann, 2013; Silvani, 2013; Quiñónez Samaniego, 2015; Marques, 2016; entre outros), têm se demonstrado que a resistência à compressão simples e compressão diametral estão controlados em certa forma pela porosidade e a relação vazios/agente cimentante. Comparando as equações obtidas da resistência à compressão diametral e a compressão simples, pode se perceber uma relação direto com $[\eta/Civ^{0,415}]^{-2,59}$, tendo apenas um escalar diferente. Portanto, uma relação única pode ser conseguida relacionando à resistência a compressão diametral e a compressão simples, resultando da razão de curvas um escalar ($RDCT/RCS = \xi$), conforme equação abaixo.

$$\frac{RDCT}{RCS} = \frac{0,42 \times 10^6 [\eta/Civ^{0,415}]^{-2,59}}{2,52 \times 10^6 [\eta/Civ^{0,415}]^{-2,59}} = \xi = 0,17 \quad (20)$$

A mistura de 70MF+ 30PDP e cimento estudada demonstrou uma relação entre RTCD/RCS (denominada de ξ) única, sendo que esta é independente da relação vazios/cimento. Mais estudos são necessários em outros materiais, misturas e períodos de tempo de cura, a fim de verificar a possibilidade de generalização dos resultados. Também pode-se observar uma ótima correlação entre a porosidade/teor volumétrico de cimento compatibilizados e as resistências para a mistura de 70MF+ 30PDP utilizada no estudo.

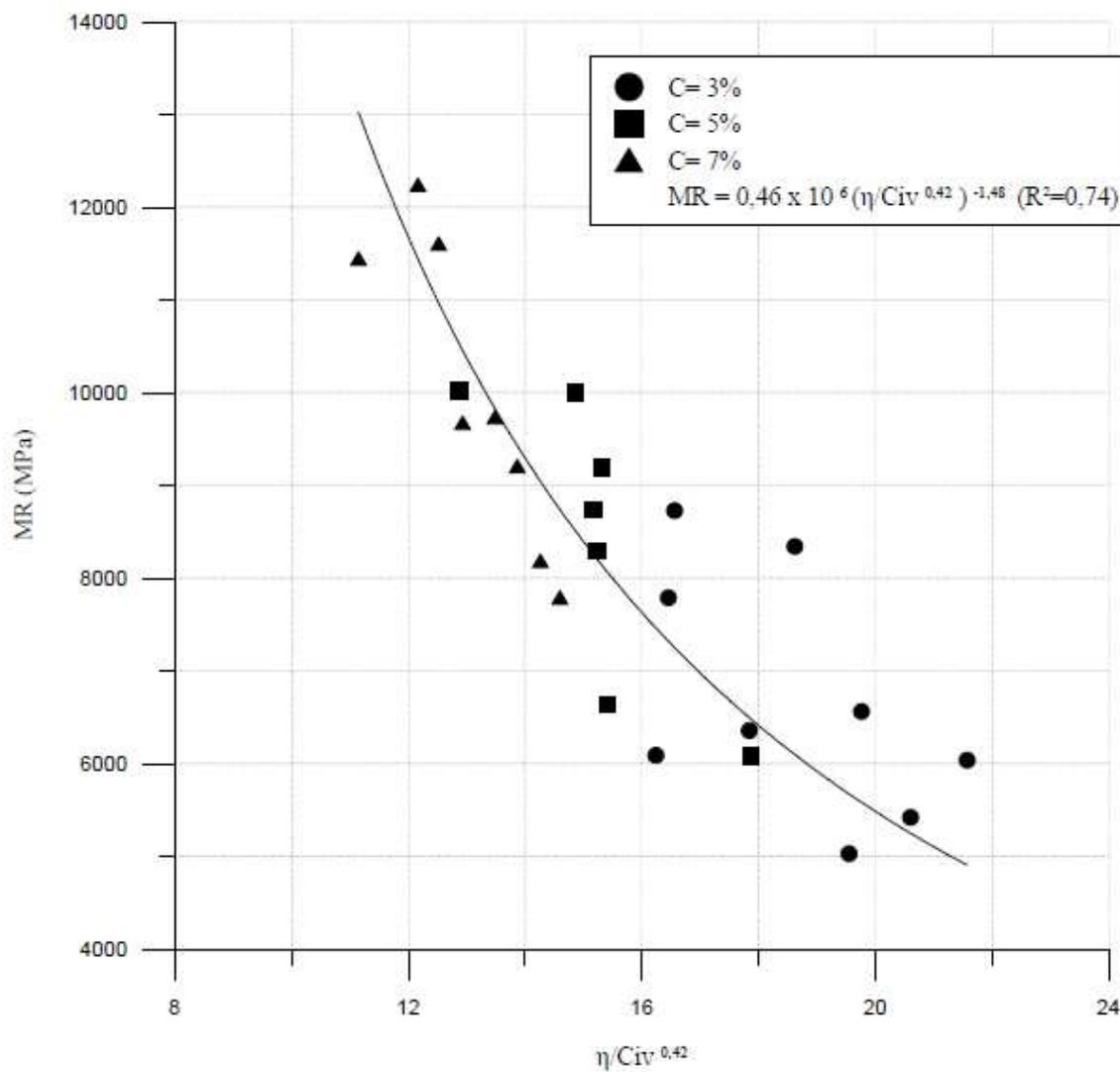


Figura 4.52 - Variação do módulo de resiliência versus à relação vazios/cimento compatibilizada

Pode-se observar uma satisfatória correlação entre a porosidade/teor volumétrico de cimento compatibilizados e o módulo de resiliência para a mistura de 70MF+ 30PDP utilizada no estudo.

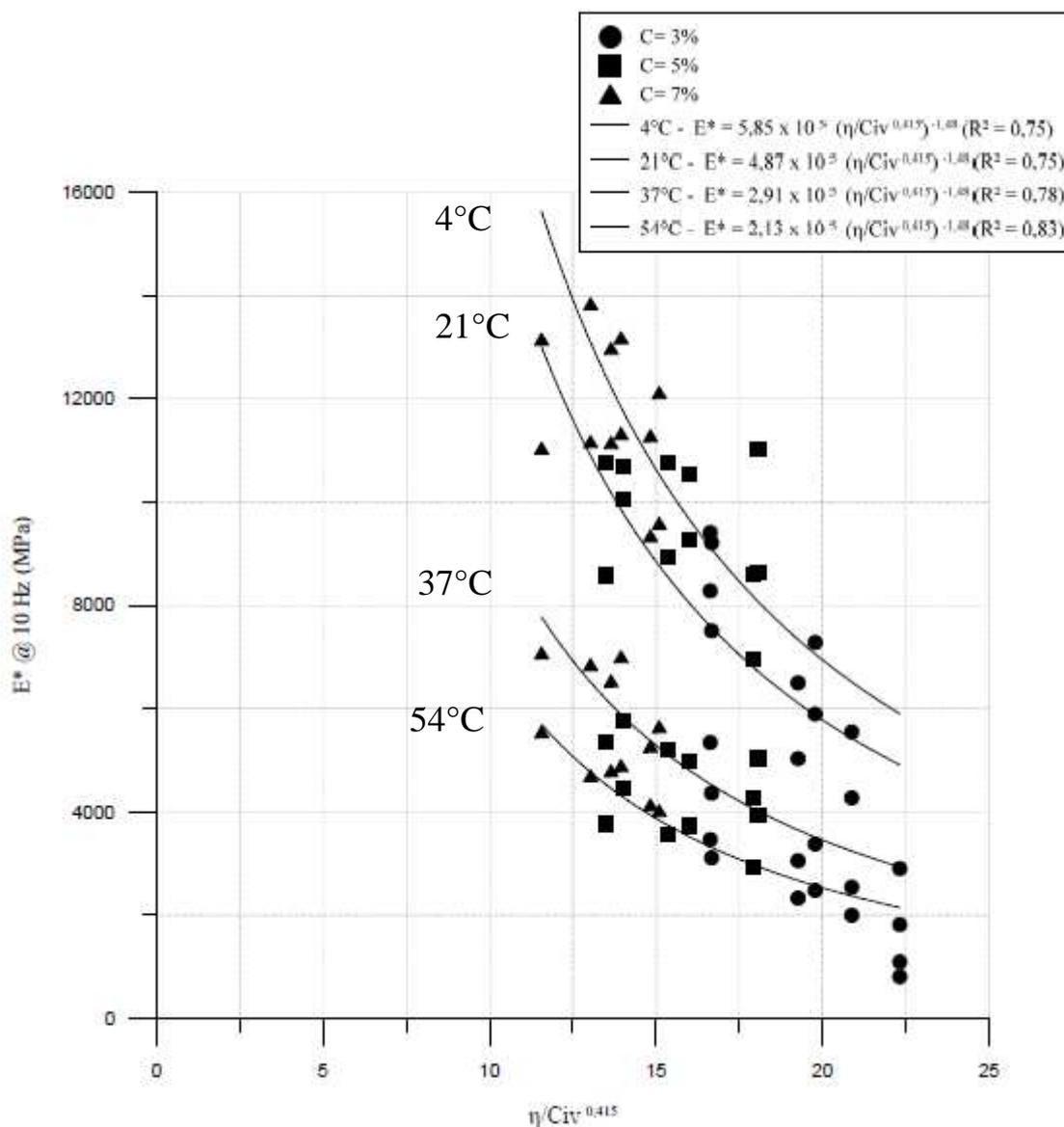


Figura 4.53 - Variação do módulo dinâmico versus à relação vazios/cimento compatibilizada

Pode-se observar uma boa correlação entre a porosidade/teor volumétrico de cimento compatibilizados e os módulos para a mistura de 70MF+ 30PDP utilizada no estudo e pode-se notar também que quanto maior a temperatura melhor o ajuste.

Conforme já dito anteriormente, para o ensaio de módulo dinâmico se variou a quantidade de cimento Portland, utilizando três valores de peso seco distintas (2,0; 2,1 e 2,2 g/cm³), variando no ensaio as temperaturas e carregamentos. Para a análise do melhor comportamento da relação vazios cimento optou-se utiliza apenas quatro temperaturas (4; 21; 37 e 54 °C), pois a outra temperatura os valores ficaram estaticamente ruins.

Após foram compatibilizados as taxas de variação das grandezas citadas através da aplicação da potência, se chegou às curvas têm um melhor ajuste com um formato de $MD = C [\eta/Civ^{0,415}]^{-1,48}$. E foi calculado um valor de C para cada uma das temperaturas e frequências, conforme demonstra Tabela 4.10. Resolveu-se desenhar os valores para ver o comportamento deles, demonstrado na Figura 4.55.

Tabela 4.10 - Variação dos valores de C

| Temperatura (C°) | | | | |
|-------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Frequência (Hz) | 4 | 21 | 37 | 54 |
| 25 | 6,12 | | 3,27 | 2,58 |
| 20 | 6,05 | 5,13 | 3,20 | 2,37 |
| 10 | 5,90 | 4,91 | 2,93 | 2,17 |
| 5 | 5,73 | 4,67 | 2,67 | 1,96 |
| 2 | 5,50 | 4,36 | 2,29 | 1,76 |
| 1 | 5,32 | 4,23 | 2,15 | 1,64 |
| 0,5 | 5,13 | 3,88 | 1,98 | 1,54 |
| 0,2 | 4,94 | 3,57 | 1,77 | 1,44 |
| 0,1 | 4,70 | 3,35 | 1,65 | 1,38 |
| 0,01 | 4,13 | 2,73 | 1,38 | 1,24 |

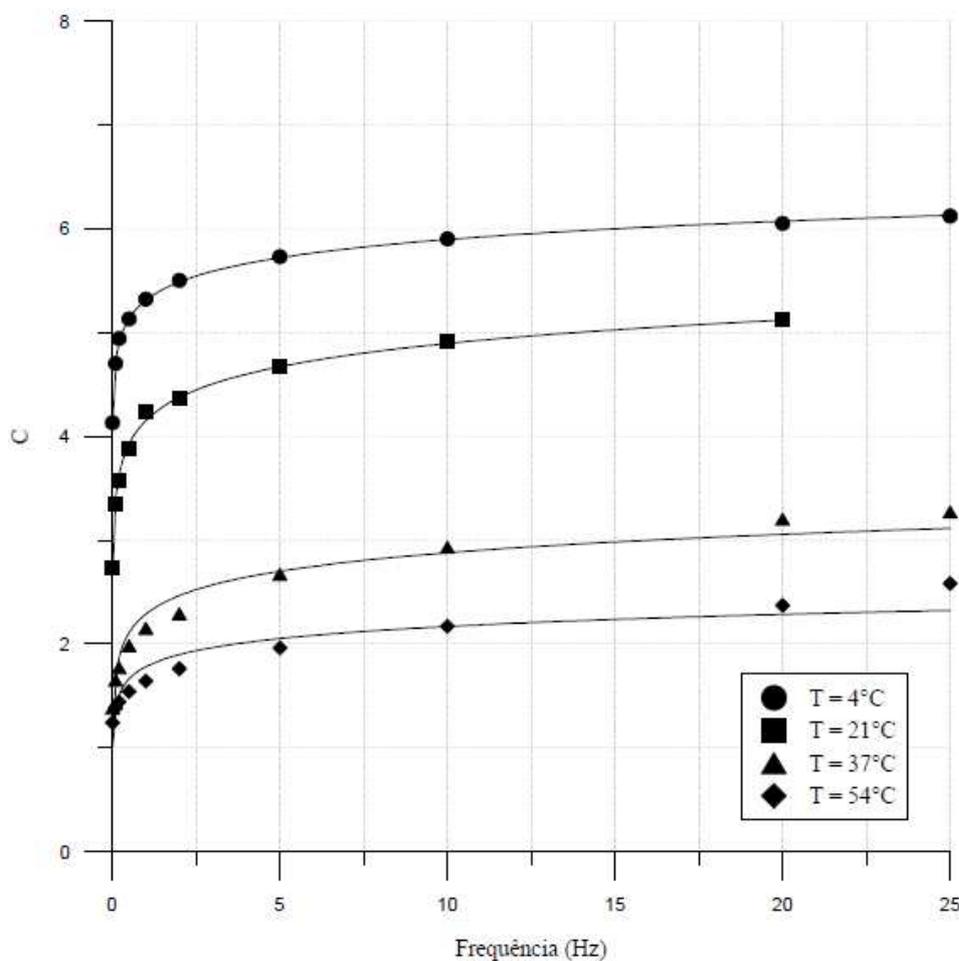


Figura 4.54 - Variação dos valores de C

As equações das curvas podem ser demonstradas para cada uma das quatro temperaturas {4°C [ver Eq. (21) com $R^2 = 1$], 21°C [ver Eq. (22) com $R^2 = 1$], 37°C [ver Eq. (23) com $R^2 = 0,95$] e 54 ° C [ver Eq. (24)] com $R^2 = 0,89$ }, uma vez que uma relação logarítmica é encontrada entre C e as frequências (f).

$$C = 0,25 * \ln (F) + 5,31 \quad \text{Eq. (21)}$$

$$C = 0,32 * \ln (F) + 4,15 \quad \text{Eq. (22)}$$

$$C = 0,26 * \ln (F) + 2,29 \quad \text{Eq. (23)}$$

$$C = 0,17 * \ln (F) + 1,78 \quad \text{Eq. (24)}$$

De acordo com as equações, percebemos que o C tem uma relação direta para todas as temperaturas e frequências e apenas diferem escalares sendo o primeiro em função de F . Se notou que o escalar que tem influencia sobre a frequência uma proximidade maior de valores, e sobre esse então se adotou um valor de 0,25 sendo que seu resultado esta desenhado na figura 4.56, tendo as equações descritas abaixo {4°C [ver Eq. (25) com $R^2 = 1$], 21°C [ver Eq. (26) com $R^2 = 0,94$], 37°C [ver Eq. (27) com $R^2 = 0,95$] e 54 ° C [ver Eq. (28)] com $R^2 = 0,68$].

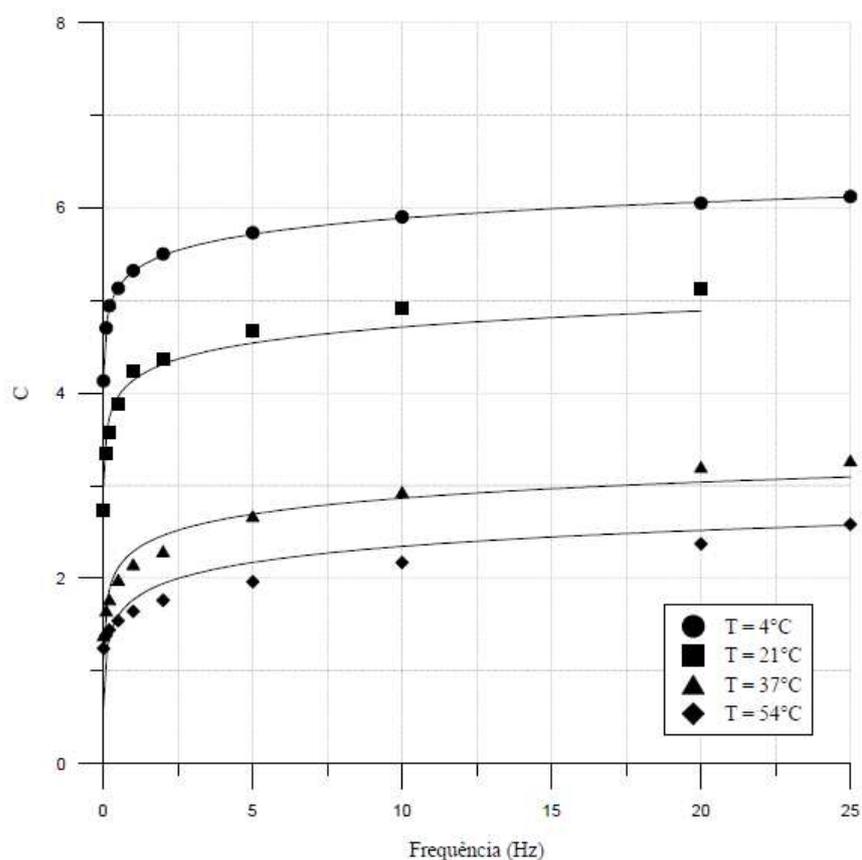


Figura 4.55 - Variação dos valores de C ajustados

$$C = 0,25 * \ln(F) + 5,31 \quad \text{Eq. (26)}$$

$$C = 0,25 * \ln(F) + 4,14 \quad \text{Eq. (27)}$$

$$C = 0,25 * \ln(F) + 2,29 \quad \text{Eq. (28)}$$

$$C = 0,25 * \ln(F) + 1,77 \quad \text{Eq. (29)}$$

Percebeu-se que mesmo alterando o escalar da frequência para 0,25, o outro escalar não apresentou uma grande alteração, o que deve prever que este escalar difere quanto aos efeitos da temperatura, então o mesmo foi desenhado para ver o comportamento, conforme figura 4.57. Deu-se o nome deste escalar de A, e percebeu-se que este tem comportamento linear e que muda conforme se altera a temperatura, conforme demonstra a equação no gráfico.

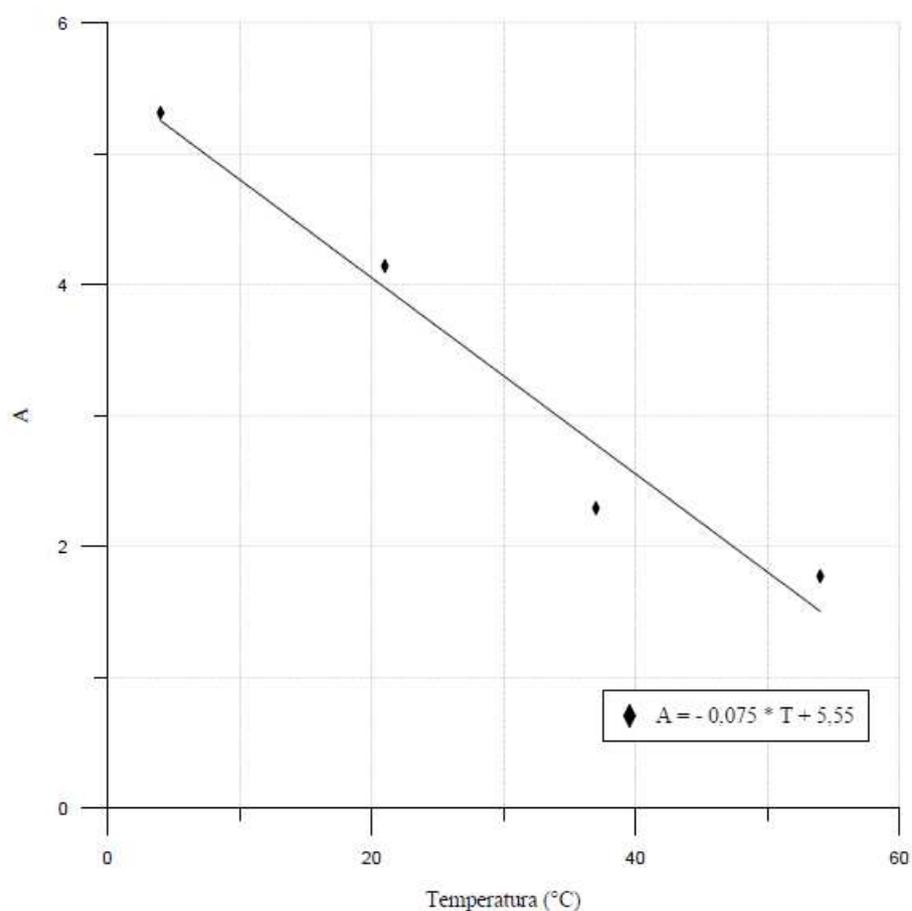


Figura 4.56 - Variação dos valores de A

Através dois escalares pode se perceber que o módulo dinâmico varia mais devido à temperatura do que a frequência. Essa variação ajuda a comprovar que a mistura tem propriedades viscoelásticas, providas da memória do ligante asfáltico presente no material fresado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

A análise e discussão dos resultados dentro das condições de limites específicos deste estudo levaram as seguintes conclusões.

5.1.1 Resistência à compressão simples e a tração por compressão diametral

A) Quanto à influência da quantidade de cimento

A adição de cimento gerou ganhos de resistência nos três pesos específicos aparentes secos (2,0; 2,1 e 2,2 g/cm³) da mistura estudada. Nos três teores estudados (3, 5 e 7%) houve um aumento da resistência à compressão simples e a tração por compressão diametral linearmente ao aumento da quantidade de cimento. A taxa de ganho de resistência, representada pela inclinação das retas, não se altera consideravelmente do peso 2,0 para o 2,1 g/cm³, já para o peso específico 2,2 g/cm³ a uma maior inclinação na reta demonstrando assim que o aumento do peso específico gera um maior resistência devido ao fortalecimento do esqueleto mineral produzida pela aproximação dos grãos, e esse efeito se percebeu em ambas as resistências.

Foi encontrada uma relação única entre a resistência à compressão simples e a tração por compressão diametral e a relação vazios/cimento: $[\eta/C_{iv}^{0,415}]^{-2,59}$. Mesmo variando os ensaios, o expoente de ajuste 0,415 é único, evidenciando que este fator está ligado primeiramente ao tipo do agente cimentante utilizado e em segundo lugar a mistura.

B) Quanto à influência da porosidade

Independente da quantidade de cimento adicionada na mistura, a redução na porosidade do material compactado promoveu ganhos significativos em ambas às resistências. Verificou-se que as resistências à compressão simples e a tração por diametral aumentaram potencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

O mecanismo pelo qual a redução na porosidade influencia a resistência da mistura com cimento parece estar relacionado à existência de índice de vazios e a uma melhor ligação entre o esqueleto mineral da mistura. Por isso, com a redução na porosidade da mistura estudada, é causada uma cimentação mais efetiva.

C) Relação entre a resistência a tração por compressão diametral e a resistência à compressão simples

Verificou-se que a uma razão entre as equações da resistência a tração por compressão diametral e a resistência à compressão simples (RCTD/RCS) é única com valor de 0,17. Este resultado sugere que a tração das amostras da mistura estudadas representam, em média, 17% da sua resistência à compressão simples.

5.1.2 Módulo de resiliência

A) Quanto à influência da quantidade de cimento

A adição de cimento gerou aumento do valor do módulo nos três pesos específicos aparentes secos (2,0; 2,1 e 2,2 g/cm³) da mistura estudada. Nos três teores estudados (3, 5 e 7%) houve um aumento do módulo linearmente ao aumento da quantidade de cimento. A taxa de ganho de resistência, representada pela inclinação das retas, não se altera consideravelmente do peso 2,0 para o 2,1 g/cm³, já para o peso específico 2,2 g/cm³ a uma pequena alteração que torna maior inclinação na reta demonstrando assim que o aumento do peso específico gera uma maior rigidez devido ao fortalecimento do esqueleto mineral produzida pela aproximação dos grãos. O resultados encontrados ao determinar o módulo de resiliência das amostras da mistura, entre 6.000 e 12.000 MPa, ficaram de acordo com o citado por Bernucci *et al.* (2008) para materiais graduados tratados com cimento.

B) Quanto à influência da porosidade

Independente da quantidade de cimento adicionada na mistura, a redução na porosidade do material compactado promoveu ganhos significativos de rigidez a mistura. Verificou-se

que os módulos aumentaram potencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

C) Relação MR/RT

A relação do MR/RT encontrada mostrou evolução positiva nos valores em diferentes pesos específicos, aumentando a tenacidade das misturas. Isso ocorre devido ao crescimento atenuado da resistência à tração das amostras, sendo estes muito superiores ao crescimento do módulo de resiliência com o aumento da compactação.

5.1.3 Módulo complexo

Para os resultados de módulo dinâmico, através das isotermas ficou claro que a rigidez das misturas aumentou com a inserção de cimento e com a variação do peso específico, onde os menores valores foram encontrados na mistura de menor teor de cimento. Além disso, foi possível verificar que o E^* se eleva à medida em que se diminui a temperatura de ensaio e se aumenta a frequência de carregamento. Outro fator analisado foi que, para a maioria das temperaturas, a rigidez das misturas aumentou, no geral, com o aumento da frequência.

Analisando as isotermas de ângulo de fase foi possível verificar que os resultados demonstraram que o ângulo de fase (δ) quase não muda cada frequência específica e temperatura de ensaio. Olhando para o efeito de temperaturas do ensaio o ângulo varia de 2 a 5°, considerando temperatura de -10° C. Varia 3 a 6° a altas frequências e 6 a 9° para baixas frequências, considerando temperatura de 4 ° C. O aumento da temperatura de teste para 21°C provoca um aumento de δ de 5 a 8 ° a altas frequências e 10 a 12 ° para baixas frequências. Para temperatura de ensaio de 37°C, δ varia de 10 a 14° para todas as frequências. Finalmente, para a mais alta temperatura de ensaio de 54 ° C, δ alterações a partir de 10 a 13° a altas frequências e 7 a 10° para baixas frequências.

Sabendo que $\delta = 0^\circ$ para um comportamento completamente elástico e 90° para o comportamento viscoso, pode-se dizer que, em todos os casos analisados as misturas têm alguma parte viscosa, apresentando um ângulo de fase mínimo de 3° em baixa testando temperaturas e altas frequências a um ângulo máximo fase do 14°. Os valores típicos de

ângulos de fase de misturas betuminosas variam de 2° a 50° considerando a mesma variação de temperaturas e de frequências.

Através das curvas isócronas foi possível analisar a suscetibilidade cinética das misturas, onde, quanto menor a frequência, menor o valor de E^* . Ou seja, quanto maior a inclinação da curva, maior a suscetibilidade. As curvas apresentam uma inclinação semelhante pois todas elas tem a mesma quantidade de material fresado, variando apenas o valor de E^* que é menor quanto menor o teor de cimento. Além disso, os menores valores de ângulo de fase são encontrados quanto maior o teor de cimento, para todos os graus de compactação, em todas as frequências e na temperatura mais baixa.

Com a curva mestra das misturas foi possível verificar que o E^* aumenta em função da frequência. O menor valor verificado para o módulo dinâmico é encontrado nas frequências mais baixas, o que explica o formato da curva mestra. Percebe-se também que a variação do valor do módulo, o que se pode afirmar que esta mistura tem propriedades viscoelásticas e esta consegue se relacionar com a relação porosidade/teor volumétrico de cimento.

5.1.4 Relação vazios/cimento

Para a relação vazios/cimento, ajustado por um expoente, é um parametro eficaz na previsão de comportamento mecânico da mistura de material fresado e pó-de-pedra e cimento. Mais estudos devem ser realizados, mas a utilização da relação vazios/cimento ,em termos práticos, pode ser feita para que o projetista possa escolher adequadamente a quantidade de cimento e a energia de compactação para determinado projeto.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De forma a dar prosseguimento ao trabalho realizado nesta dissertação e buscando o aperfeiçoamento da técnica. Em função das análises realizadas no decorrer da pesquisa, sugere-se:

- A relação vazios/cimento nos mesmos ensaios com diferentes tempos de cura (7, 91; 360 dias);
- A relação vazios/cimento nos mesmos ensaios com diferentes temperaturas de cura;
- A verificação da relação vazios/cimento na estimativa de resistência para cargas cíclicas;
- Analisar a estabilização química com outros tipos de cimento, como o CP II, por apresentar menor quantidade de pozolona na sua composição;
- Realizar ensaios triaxiais, a fim de obter resultados de módulo de resiliência da mistura estabilizada e do material fresado puro;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA JUNIOR, P. O. B. **Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFSM – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **State-of-the-Art Report on Soil Cement.** ACI 230.1 R-90, Farmington Hills, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS– ASTM.**C496:** Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004

_____.**D 2166:** Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

_____.**D 3497:**Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures (Withdrawn 2009), ASTM International, West Conshohocken, PA, 1979.

_____.**D 4123:** Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures (Withdrawn 2003), ASTM International, West Conshohocken, PA, 1995

_____. **D6931:**Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

ARANHA, A. L. **Avaliação Laboratorial e de Campo da Tecnologia de Reciclagem de Base com Cimento para a Reabilitação de Pavimentos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – USP – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook** Manual series nº 4. Lexington, KY, USA, 1987. Versão traduzida, 2002

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5733:** Cimento Portland de alta resistência inicial, Rio de Janeiro, RJ, 1991.

_____. **7182:** Solo - Ensaio de compactação, Rio de Janeiro, RJ, 1976.

_____. **12025:** Solo-cimento — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio, Rio de Janeiro, RJ, 2012.

_____. **12253:** Solo-cimento — Dosagem para emprego como camada de pavimento — Procedimento, Rio de Janeiro, RJ, 2012.

_____. **15619:** Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas, Rio de Janeiro, RJ, 2012.

_____. **NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

_____. **NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

_____. **NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica:** materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p., il.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação Asfáltica:** Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010. 504 p.

BOEIRA, F. D. **Estudo do Comportamento de Concretos Asfálticos com Diferentes Tipos de Agregados e Cales.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFSM – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**. 3 Ed., São Paulo, Exceção Editorial, 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução N°307. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Publicada no DOU nº 136, de 17/07/2002, págs. 95-96. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>> Acesso em 18/mar./2016

BRUXEL, D. F. **Estudo do comportamento viscoelástico de concretos asfálticos convencionais e modificados através de ensaios de laboratório e de análise de desempenho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFSM – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

CAUÊ, **cimentos**. Disponível em <<http://resdil.com.br/produtos/cimentos-caue/>>. Acesso em 27/jul/2015.

CENTOFANTE, R. **Estudo laboratorial da utilização de material fresado em misturas de reciclagem a quente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFSM – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

CHRISTENSEN, R. M. **Theory of Viscoelasticity**, Dover Publications, Inc, New York, 1982.

CIBER, **usinas de asfalto**. Disponível em < <http://www.ciber.com.br/pt/tecnologias/usina-de-asfalto-gravimetrica/> > Acesso em 06/out/2016.

CONSOLI, N. C.; LOPES JUNIOR, L. S.; HEINECK, K. S. **Key parameters for the strength control of lime stabilized soils**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 21, p.210-216, 2008.

CONSOLI, N.C.; FONSECA, A. V.; CRUZ, R. C.; HEINECK, K. S.. **Fundamental parameters for the stiffness and strength control of artificially cemented sand.** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* - ASCE, V. 135, N.9, p.1347-1353, 2009a.

CONSOLI, N.C.; LOPES JUNIOR, L.; FOPPA, D.; HEINECK, K. S. **Key parameters dictating strength of lime/cement-treated soils.** Proceedings of ICE/UK - Geotechnical Engineering, V. 162, p.111-118, 2009b.

CONSOLI, N.C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. **Key parameters for Strength control of artificially cemented soils.** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* – ASCE, V.133, n.2, p.197-205, 2007.

CONSOLI, N.C.; DALLA ROSA, A.; SALDANHA, R.. **Variables governing strength of compacted soil-fly ash-lime mixtures.** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* – ASCE, V.23, n.2, p.432-440, 2011.

CONSOLI, N.C.; CRUZ, R. C.; FLOSS, M.; FESTUGATO, L. **Parameter controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand.** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* - ASCE, V. 136, N.9, p.759-763, 2010.

CRUZ, R. **Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatação de uma areia artificialmente cimentada.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2008.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS. Porto Alegre. 2009.

DELLABIANCA, L. M. A. **Estudo do Comportamento de Material Fresado de Revestimento Asfáltico Visando sua Aplicação em Reciclagem de Pavimentos.** Tese (Doutorado em Engenharia), Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.**DNER-ME 053:** Misturas betuminosas – percentagem de betume, 1994, Disponível em <<http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME053-94.pdf>>Acesso em 27/jul/2015.

_____, **DNER-ME 162:** Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas, Rio de Janeiro – RJ, 1994, Disponível em <<http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME162-94.pdf>>Acesso em 27/jul./2015.

_____, **DNER-ME 180:** Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples, Rio de Janeiro – RJ, 1994, Disponível em <<http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME180-94.pdf>>Acesso em 27/jul./2015.

_____, **DNER-PRO120:** Coleta de amostras de agregados, Rio de Janeiro – RJ, 1997, Disponível em <<http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-PRO120-97.pdf>>Acesso em 27/jul./2015

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE - DNIT.**DNIT-ES141:** Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente, Rio de Janeiro – RJ, 2010, Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT141_2010_ES.pdf>Acesso em 27/jul./2015.

_____, **Manual de pavimentação.** Rio de Janeiro – RJ, 2006, Disponível em <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf>Acesso em 27/jul/2015.

_____, **DNIT ME-135:** Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas -Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio, Rio de Janeiro – RJ, 2010, Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT135_2010_ME.pdf>Acesso em 18/mar/2013.

_____, **DNIT ME-136:** Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas –Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio, Rio de Janeiro – RJ, 2010, Disponível em <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT136_2010_ME.pdf>Acesso em 18/mar/2013.

DI BENEDETTO, H. et. al. **Linear Viscoelastic Behavior of Bituminous Materials: from binders to mixes roads**. Road Materials and Pavements Desing. Departement Génie Civil et Bâtiment, Ecole Nationale des TPE (ENTPE), 2004. 41p.

FERRY, J.D. **Viscoelastic properties of polymers**. New York: John Wiley & Sons, 1980

FONSECA, O. A. **Development of a Time-Dependent model for the Dynamic Modulus of Asphalt Mixes**. Tese (PhD em Engenharia), University of Maryland, Maryland, USA, 1995.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2005.

FRANCKEN, L.; PARTL, M.; TECHNICAL COMMITTEE ON BITUMEN AND ASPHALT TESTING. **Complex modulus testing of asphaltic concrete**: RILEM inter laboratory test program. *Transportation Research Record*, n. 1.545, p. 133-42, 1996

GUYER, J.P. **Introduction to soil stabilization in pavements**. Continuing Education and Development, New York. Nova Iorque, Estados Unidos, 2011.

HUANG, H.Y. **Pavement Analysis and Design**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993. 805p.

HVEEM, F.N. **Pavement deflections and fatigue failures**. In: ANNUAL MEETING, 34, 1955. Bulletin, n. 114, p. 43-73, 1955.

INGLES, O G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization – Principles and Practice**. Australia: Butterworth's Pty. Limited, 1972. 366p

JOHANN, A. D. ; **Metodologias para a Previsão do Comportamento Mecânico e para a Análise da Variação da Porosidade de um Solo Siltoso Tratado com Cal em Diferentes Tempos de Cura**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2013.

LARNACH, W. J. **Relationship between dry density/cement ratio and strength of soil-cement mixtures.** Civil Engineering and Public Works Reviews. London: LomaxErskineand Co., vol.55, n.648, p.903-905, 1960.

LIMA, André Theophilo. **Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – UFC – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

LOPES JUNIOR, L. S. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2007.

LOPES JUNIOR, L. S. **Metodologia de Previsão do Comportamento Mecânico de Solos Tratados com Cal.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2011.

MARQUES S. **Estudo do comportamento de uma areia artificialmente cimentada a altas tensões de confinamento.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2016.

PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASAD, E. A. **Pavement design and materials.** New Jersey: J.Wiley, 2008. 542 p., il.

PIRES, G.M. **Estudo da estabilização granulométrica e química de material fresado com adição de cimento Portland e cinza de casca de arroz para aplicação em camadas de pavimentos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFSM – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

SILVA, C. A. R. da; MIRANDA JÚNIOR, C. **Reciclagem de Camada Betuminosa como Sub-Base Estabilizada com Cimento na BR-381: Uma Experiência.** In: 32ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2000, Brasília. Anais... Brasília, Volume II, p. 488-497, 2000.

SILVA, C. F. S. C. **Reutilização do resíduo oriundo dos serviços de restauração asfáltica como material alternativo em camadas de pavimentos flexíveis.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2012.

TAHA, R.; et al. **Cement stabilization of reclaimed asphalt pavements aggregate for road bases and subbases.** *Journal of Materials in Civil Engineering*. Miami, Maio/Junho, p. 239-245, 2002.

TERREL, R. L.; EPPS, J.A; SORENSON, J.B. **Hot-in-Place Recycling State of the Practice.** *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists-AAPT*, Vol. 66, USA, 1997.

VAN IMPE, W. F. **Soil Improvement: Techniques and their Evolution.** Rotterdam: A.A. Balkema Publishers, 1989. 125 p.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos.** 1 Ed. São Paulo: McGraw–Hill do Brasil, São Paulo, 1977.

WIRTGEN. Disponível em <<http://www.wirtgen.de/en/products/>>. Acesso em: 12 de ago. 2015.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos.** 1 Ed. São Paulo: McGraw – Hill do Brasil, São Paulo, 1977.

YODER, E. J.; WITCZACK, M. W. **Principles of Pavement Design.** New York: John Wiley & Sons Inc., ed. 2, 1975. 711p.

YUSOFF, N. I.; CHAILLEUX, E.; AIREY, G. D. **A Comparative Study of the Influence on shift Factor Equations on Master Curve Construction.** *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 4, No. 6, Nov. 2011.

APÊNDICE A

| Teor de cimento (%) | massa especif. aparente seca (g/cm ³) | w% | Altura (cm) | Diamêtro (cm) | Volume (cm ³) | Massa do CP (g) | Massa dos Sólidos (g) | Massa dos grãos (g) | Massa do cimento (g) | Massa de água (g) | Volume dos grãos (cm ³) | Volume de cimento (cm ³) | Volume de água (cm ³) | Vv | e | n (%) | Civ | n/Civ | RCS (kPa) |
|---------------------|---------------------------------------------------|------|-------------|---------------|---------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------|----------------------|-------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-----------|
| 3 | 2,0 | 7,95 | 19,95 | 10,14 | 1610,23 | 3305,40 | 3061,97 | 2972,79 | 89,18 | 243,43 | 1145,12 | 28,31 | 243,43 | 436,80 | 0,37 | 27,13 | 1,76 | 15,43 | 715,74 |
| 3 | | 7,82 | 19,94 | 10,15 | 1612,60 | 3314,10 | 3073,73 | 2984,21 | 89,53 | 240,37 | 1149,52 | 28,42 | 240,37 | 434,66 | 0,37 | 26,95 | 1,76 | 15,29 | 600,57 |
| 3 | | 7,96 | 19,96 | 10,13 | 1607,86 | 3357,40 | 3109,86 | 3019,28 | 90,58 | 247,54 | 1163,03 | 28,76 | 247,54 | 416,08 | 0,35 | 25,88 | 1,79 | 14,47 | 808,52 |
| 5 | | 7,90 | 19,96 | 10,15 | 1614,22 | 3358,50 | 3112,60 | 2964,39 | 148,22 | 245,90 | 1141,88 | 47,05 | 245,90 | 425,28 | 0,36 | 26,35 | 2,91 | 9,04 | 1453,59 |
| 5 | | 8,05 | 19,89 | 10,16 | 1611,73 | 3353,60 | 3103,75 | 2955,95 | 147,80 | 249,85 | 1138,63 | 46,92 | 249,85 | 426,17 | 0,36 | 26,44 | 2,91 | 9,08 | 1507,14 |
| 5 | | 7,84 | 19,97 | 10,13 | 1608,67 | 3333,80 | 3091,43 | 2944,22 | 147,21 | 242,37 | 1134,12 | 46,73 | 242,37 | 427,82 | 0,36 | 26,59 | 2,91 | 9,15 | 1382,32 |
| 7 | | 7,86 | 19,96 | 10,20 | 1630,16 | 3354,10 | 3109,68 | 2906,24 | 203,44 | 244,42 | 1119,49 | 64,58 | 244,42 | 446,09 | 0,38 | 27,36 | 3,96 | 6,91 | 2391,38 |
| 7 | | 7,97 | 19,94 | 10,13 | 1607,31 | 3357,70 | 3109,85 | 2906,40 | 203,45 | 247,85 | 1119,55 | 64,59 | 247,85 | 423,18 | 0,36 | 26,33 | 4,02 | 6,55 | 2455,98 |
| 7 | | 8,03 | 19,97 | 10,20 | 1630,98 | 3357,20 | 3107,66 | 2904,35 | 203,30 | 249,54 | 1118,76 | 64,54 | 249,54 | 447,68 | 0,38 | 27,45 | 3,96 | 6,94 | 2193,04 |
| 3 | | 2,1 | 8,01 | 19,99 | 10,210 | 1635,81 | 3494,10 | 3234,98 | 3140,76 | 94,22 | 259,12 | 1209,82 | 29,91 | 259,12 | 396,08 | 0,32 | 24,21 | 1,83 | 13,24 |
| 3 | 7,94 | | 19,97 | 10,200 | 1630,98 | 3497,10 | 3239,86 | 3145,49 | 94,36 | 257,24 | 1211,65 | 29,96 | 257,24 | 389,37 | 0,31 | 23,87 | 1,84 | 13,00 | 1368,59 |
| 3 | 7,99 | | 19,98 | 10,203 | 1632,86 | 3521,10 | 3260,58 | 3165,61 | 94,97 | 260,52 | 1219,40 | 30,15 | 260,52 | 383,32 | 0,31 | 23,48 | 1,85 | 12,71 | 1333,88 |
| 5 | 8,00 | | 19,98 | 10,227 | 1640,34 | 3481,10 | 3223,24 | 3069,75 | 153,49 | 257,86 | 1182,47 | 48,73 | 257,86 | 409,14 | 0,33 | 24,94 | 2,97 | 8,40 | 2039,98 |
| 5 | 7,95 | | 19,80 | 10,220 | 1623,44 | 3507,90 | 3249,56 | 3094,82 | 154,74 | 258,34 | 1192,13 | 49,12 | 258,34 | 382,19 | 0,31 | 23,54 | 3,03 | 7,78 | 2056,66 |
| 5 | 7,89 | | 19,94 | 10,183 | 1623,21 | 3490,50 | 3235,24 | 3081,18 | 154,06 | 255,26 | 1186,87 | 48,91 | 255,26 | 387,43 | 0,31 | 23,87 | 3,01 | 7,92 | 1876,55 |
| 7 | 7,88 | | 19,96 | 10,147 | 1613,16 | 3521,40 | 3264,18 | 3050,64 | 213,54 | 257,22 | 1175,11 | 67,79 | 257,22 | 370,26 | 0,30 | 22,95 | 4,20 | 5,46 | 3467,84 |
| 7 | 7,96 | | 19,99 | 10,177 | 1625,15 | 3529,70 | 3269,45 | 3055,56 | 213,89 | 260,25 | 1177,01 | 67,90 | 260,25 | 380,24 | 0,31 | 23,40 | 4,18 | 5,60 | 3721,14 |
| 7 | 7,97 | | 20,00 | 10,203 | 1634,50 | 3494,60 | 3236,64 | 3024,90 | 211,74 | 257,96 | 1165,19 | 67,22 | 257,96 | 402,08 | 0,33 | 24,60 | 4,11 | 5,98 | 3396,82 |
| 3 | 2,2 | 7,99 | 20,01 | 10,170 | 1624,65 | 3640,60 | 3371,24 | 3273,05 | 98,19 | 269,36 | 1260,78 | 31,17 | 269,36 | 332,69 | 0,26 | 20,48 | 1,92 | 10,67 | 2253,42 |
| 3 | | 8,05 | 20,05 | 10,130 | 1615,11 | 3645,30 | 3373,72 | 3275,45 | 98,26 | 271,58 | 1261,71 | 31,19 | 271,58 | 322,21 | 0,25 | 19,95 | 1,93 | 10,33 | 2220,39 |
| 3 | | 7,86 | 19,99 | 10,177 | 1625,15 | 3639,90 | 3374,65 | 3276,36 | 98,29 | 265,25 | 1262,06 | 31,20 | 265,25 | 331,89 | 0,26 | 20,42 | 1,92 | 10,64 | 2123,88 |
| 5 | | 7,84 | 19,98 | 10,170 | 1622,21 | 3609,20 | 3346,81 | 3187,44 | 159,37 | 262,39 | 1227,80 | 50,59 | 262,39 | 343,81 | 0,27 | 21,19 | 3,12 | 6,80 | 2863,42 |
| 5 | | 7,98 | 20,03 | 10,180 | 1629,47 | 3650,60 | 3380,81 | 3219,82 | 160,99 | 269,79 | 1240,28 | 51,11 | 269,79 | 338,08 | 0,26 | 20,75 | 3,14 | 6,62 | 2973,87 |
| 5 | | 7,95 | 20,02 | 10,153 | 1620,13 | 3641,70 | 3373,51 | 3212,86 | 160,64 | 268,19 | 1237,60 | 51,00 | 268,19 | 331,54 | 0,26 | 20,46 | 3,15 | 6,50 | 2924,57 |
| 7 | | 7,90 | 20,01 | 10,190 | 1631,04 | 3648,10 | 3381,00 | 3159,81 | 221,19 | 267,10 | 1217,16 | 70,22 | 267,10 | 343,66 | 0,27 | 21,07 | 4,31 | 4,89 | 4780,44 |
| 7 | | 7,94 | 20,01 | 10,220 | 1640,66 | 3652,90 | 3384,19 | 3162,80 | 221,40 | 268,71 | 1218,31 | 70,28 | 268,71 | 352,06 | 0,27 | 21,46 | 4,28 | 5,01 | 4578,50 |
| 7 | | 8,01 | 19,99 | 10,190 | 1629,41 | 3649,80 | 3379,13 | 3158,07 | 221,06 | 270,67 | 1216,49 | 70,18 | 270,67 | 342,74 | 0,27 | 21,03 | 4,31 | 4,88 | 4704,25 |

Quadro A.1 - Dados gerais dos corpos-de-prova de RCS

| Teor de cimento (%) | massa especif. aparente seca (g/cm ³) | w% | Altura (cm) | Diamêtro (cm) | Volume (cm ³) | Massa do CP (g) | Massa dos Sólidos (g) | Massa dos grãos (g) | Massa do cimento (g) | Massa de água (g) | Volume dos grãos (cm ³) | Volume de cimento (cm ³) | Volume de água (cm ³) | Vv | e | n (%) | Civ | n/Civ | RTCD (kPa) |
|---------------------|---------------------------------------------------|------|-------------|---------------|---------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------|----------------------|-------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------|------|-------|------|-------|------------|
| 3 | 2,0 | 7,96 | 19,96 | 10,22 | 1636,56 | 3336,00 | 3090,03 | 3000,03 | 90,00 | 245,97 | 1155,62 | 28,57 | 245,97 | 452,37 | 0,38 | 27,64 | 1,75 | 15,83 | 114,12 |
| 3 | | 7,90 | 19,96 | 10,16 | 1617,40 | 3329,10 | 3085,36 | 2995,49 | 89,86 | 243,74 | 1153,87 | 28,53 | 243,74 | 435,01 | 0,37 | 26,90 | 1,76 | 15,25 | 75,83 |
| 3 | | 8,05 | 19,95 | 10,19 | 1626,15 | 3337,50 | 3088,85 | 2998,88 | 89,97 | 248,65 | 1155,17 | 28,56 | 248,65 | 442,42 | 0,37 | 27,21 | 1,76 | 15,49 | 160,48 |
| 5 | | 7,84 | 19,94 | 10,17 | 1618,96 | 3344,50 | 3101,35 | 2953,67 | 147,68 | 243,15 | 1137,76 | 46,88 | 243,15 | 434,32 | 0,37 | 26,83 | 2,90 | 9,26 | 280,93 |
| 5 | | 8,00 | 20,00 | 10,16 | 1620,64 | 3346,80 | 3098,89 | 2951,32 | 147,57 | 247,91 | 1136,85 | 46,85 | 247,91 | 436,94 | 0,37 | 26,96 | 2,89 | 9,33 | 257,93 |
| 5 | | 7,88 | 19,89 | 10,16 | 1611,73 | 3344,30 | 3100,02 | 2952,40 | 147,62 | 244,28 | 1137,27 | 46,86 | 244,28 | 427,60 | 0,36 | 26,53 | 2,91 | 9,12 | |
| 7 | | 7,96 | 19,97 | 10,16 | 1618,21 | 3350,00 | 3103,00 | 2900,00 | 203,00 | 247,00 | 1117,08 | 64,44 | 247,00 | 436,68 | 0,37 | 26,99 | 3,98 | 6,78 | 310,45 |
| 7 | | 7,97 | 19,96 | 10,16 | 1617,40 | 3350,20 | 3102,90 | 2899,91 | 202,99 | 247,30 | 1117,05 | 64,44 | 247,30 | 435,91 | 0,37 | 26,95 | 3,98 | 6,76 | 330,61 |
| 7 | | 7,99 | 19,94 | 10,14 | 1609,42 | 3359,90 | 3111,31 | 2907,76 | 203,54 | 248,59 | 1120,07 | 64,62 | 248,59 | 424,73 | 0,36 | 26,39 | 4,01 | 6,57 | 343,50 |
| 3 | 2,1 | 8,05 | 19,97 | 10,170 | 1621,40 | 3487,00 | 3227,21 | 3133,21 | 94,00 | 259,79 | 1206,92 | 29,84 | 259,79 | 384,64 | 0,31 | 23,72 | 1,84 | 12,89 | 234,28 |
| 3 | | 7,86 | 19,96 | 10,200 | 1630,16 | 3492,10 | 3237,62 | 3143,32 | 94,30 | 254,48 | 1210,81 | 29,94 | 254,48 | 389,41 | 0,31 | 23,89 | 1,84 | 13,01 | 262,64 |
| 3 | | 7,97 | 19,99 | 10,200 | 1632,61 | 3429,70 | 3176,53 | 3084,01 | 92,52 | 253,17 | 1187,96 | 29,37 | 253,17 | 415,28 | 0,34 | 25,44 | 1,80 | 14,14 | 328,88 |
| 5 | | 8,03 | 20,00 | 10,190 | 1630,23 | 3503,70 | 3243,27 | 3088,82 | 154,44 | 260,43 | 1189,82 | 49,03 | 260,43 | 391,38 | 0,32 | 24,01 | 3,01 | 7,98 | 378,10 |
| 5 | | 8,05 | 20,01 | 10,180 | 1627,84 | 3506,40 | 3245,16 | 3090,63 | 154,53 | 261,24 | 1190,51 | 49,06 | 261,24 | 388,27 | 0,31 | 23,85 | 3,01 | 7,91 | 387,36 |
| 5 | | 7,84 | 20,05 | 10,190 | 1634,30 | 3505,70 | 3250,83 | 3096,03 | 154,80 | 254,87 | 1192,59 | 49,14 | 254,87 | 392,56 | 0,32 | 24,02 | 3,01 | 7,99 | 392,01 |
| 7 | | 7,86 | 19,98 | 10,170 | 1622,21 | 3518,70 | 3262,28 | 3048,86 | 213,42 | 256,42 | 1174,43 | 67,75 | 256,42 | 380,03 | 0,31 | 23,43 | 4,18 | 5,61 | 545,18 |
| 7 | | 7,97 | 20,03 | 10,170 | 1626,27 | 3512,50 | 3253,22 | 3040,39 | 212,83 | 259,28 | 1171,16 | 67,56 | 259,28 | 387,54 | 0,31 | 23,83 | 4,15 | 5,74 | 507,34 |
| 7 | | 8,03 | 20,02 | 10,180 | 1628,66 | 3518,20 | 3256,69 | 3043,63 | 213,05 | 261,51 | 1172,41 | 67,64 | 261,51 | 388,61 | 0,31 | 23,86 | 4,15 | 5,75 | 560,99 |
| 3 | 2,2 | 8,01 | 20,02 | 10,200 | 1635,06 | 3620,90 | 3352,37 | 3254,73 | 97,64 | 268,53 | 1253,73 | 31,00 | 268,53 | 350,34 | 0,27 | 21,43 | 1,90 | 11,30 | 343,91 |
| 3 | | 7,94 | 20,01 | 10,170 | 1624,65 | 3645,70 | 3377,52 | 3279,15 | 98,37 | 268,18 | 1263,13 | 31,23 | 268,18 | 330,28 | 0,26 | 20,33 | 1,92 | 10,58 | 406,95 |
| 3 | | 7,99 | 20,01 | 10,200 | 1634,24 | 3635,70 | 3366,70 | 3268,64 | 98,06 | 269,00 | 1259,08 | 31,13 | 269,00 | 344,03 | 0,27 | 21,05 | 1,90 | 11,05 | 368,66 |
| 5 | | 8,00 | 19,99 | 10,200 | 1632,61 | 3637,00 | 3367,59 | 3207,23 | 160,36 | 269,41 | 1235,43 | 50,91 | 269,41 | 346,27 | 0,27 | 21,21 | 3,12 | 6,80 | 510,06 |
| 5 | | 7,95 | 20,00 | 10,210 | 1636,63 | 3658,90 | 3389,44 | 3228,04 | 161,40 | 269,46 | 1243,44 | 51,24 | 269,46 | 341,95 | 0,26 | 20,89 | 3,13 | 6,67 | 519,25 |
| 5 | | 7,95 | 19,99 | 10,190 | 1629,41 | 3652,50 | 3383,51 | 3222,39 | 161,12 | 268,99 | 1241,27 | 51,15 | 268,99 | 336,99 | 0,26 | 20,68 | 3,14 | 6,59 | 501,48 |
| 7 | | 7,82 | 19,97 | 10,200 | 1630,98 | 3628,00 | 3364,87 | 3144,74 | 220,13 | 263,13 | 1211,36 | 69,88 | 263,13 | 349,74 | 0,27 | 21,44 | 4,28 | 5,00 | 704,11 |
| 7 | | 7,96 | 19,98 | 10,180 | 1625,40 | 3638,40 | 3370,14 | 3149,66 | 220,48 | 268,26 | 1213,25 | 69,99 | 268,26 | 342,16 | 0,27 | 21,05 | 4,31 | 4,89 | 759,23 |
| 7 | | 7,90 | 20,03 | 10,190 | 1632,67 | 3649,80 | 3382,58 | 3161,29 | 221,29 | 267,22 | 1217,73 | 70,25 | 267,22 | 344,69 | 0,27 | 21,11 | 4,30 | 4,91 | 694,02 |

Quadro A.2 - Dados gerais dos corpos-de-prova de RTCD

| Teor de cimento (%) | massa especif. aparente seca (g/cm ³) | w% | Altura (cm) | Diamêtro (cm) | Volume (cm ³) | Massa do CP (g) | Massa dos Solidos (g) | Massa dos grãos (g) | Massa do cimento (g) | Massa de água (g) | Volume dos grãos (cm ³) | Volume de cimento (cm ³) | Volume de água (cm ³) | Vv | e | n (%) | Civ | n/Civ | MR (MPa) |
|---------------------|---------------------------------------------------|------|-------------|---------------|---------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------|----------------------|-------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|----------|
| 3 | 2,0 | 7,96 | 6,62 | 10,19267 | 539,75 | 1140,40 | 1056,32 | 1025,55 | 30,77 | 84,08 | 395,04 | 9,77 | 84,08 | 134,94 | 0,33 | 25,00 | 1,81 | 13,82 | 5025 |
| 3 | | 7,97 | 6,61 | 10,22233 | 541,80 | 1141,20 | 1056,96 | 1026,18 | 30,79 | 84,24 | 395,28 | 9,77 | 84,24 | 136,75 | 0,34 | 25,24 | 1,80 | 13,99 | 6558 |
| 3 | | 7,99 | 6,74 | 10,22867 | 553,54 | 1134,90 | 1050,93 | 1020,32 | 30,61 | 83,97 | 393,03 | 9,72 | 83,97 | 150,79 | 0,37 | 27,24 | 1,76 | 15,52 | 6034 |
| 5 | | 8,05 | 6,42 | 10,23533 | 528,30 | 1133,20 | 1048,77 | 998,83 | 49,94 | 84,43 | 384,75 | 15,85 | 84,43 | 127,69 | 0,32 | 24,17 | 3,00 | 8,05 | 5419 |
| 5 | | 7,86 | 6,78 | 10,28533 | 562,76 | 1149,60 | 1065,83 | 1015,07 | 50,75 | 83,77 | 391,01 | 16,11 | 83,77 | 155,64 | 0,38 | 27,66 | 2,86 | 9,66 | 6354 |
| 5 | | 7,84 | 6,46 | 10,24 | 531,96 | 1137,00 | 1054,34 | 1004,13 | 50,21 | 82,66 | 386,79 | 15,94 | 82,66 | 129,23 | 0,32 | 24,29 | 3,00 | 8,11 | 8338 |
| 7 | | 7,98 | 6,66 | 10,22 | 546,35 | 1145,90 | 1061,22 | 991,79 | 69,43 | 84,68 | 382,04 | 22,04 | 84,68 | 142,28 | 0,35 | 26,04 | 4,03 | 6,46 | 8728 |
| 7 | | 7,86 | 6,63 | 10,13 | 534,57 | 1137,20 | 1054,33 | 985,35 | 68,97 | 82,87 | 379,56 | 21,90 | 82,87 | 133,11 | 0,33 | 24,90 | 4,10 | 6,08 | 7788 |
| 7 | | 7,97 | 6,55 | 10,24 | 539,93 | 1140,30 | 1056,13 | 987,03 | 69,09 | 84,17 | 380,21 | 21,93 | 84,17 | 137,79 | 0,34 | 25,52 | 4,06 | 6,28 | 6087 |
| 3 | | 2,1 | 8,03 | 6,92 | 10,260 | 571,58 | 1189,50 | 1101,08 | 1069,01 | 32,07 | 88,42 | 411,78 | 10,18 | 88,42 | 149,61 | 0,35 | 26,18 | 1,78 | 14,70 |
| 3 | 8,01 | | 6,63 | 10,270 | 548,58 | 1189,50 | 1101,29 | 1069,21 | 32,08 | 88,21 | 411,86 | 10,18 | 88,21 | 126,54 | 0,30 | 23,07 | 1,86 | 12,43 | 6079 |
| 3 | 7,94 | | 6,71 | 10,271 | 555,34 | 1189,50 | 1102,00 | 1069,90 | 32,10 | 87,50 | 412,13 | 10,19 | 87,50 | 133,02 | 0,31 | 23,95 | 1,83 | 13,05 | 6632 |
| 5 | 7,99 | | 6,71 | 10,193 | 547,01 | 1184,40 | 1096,77 | 1044,54 | 52,23 | 87,63 | 402,36 | 16,58 | 87,63 | 128,07 | 0,31 | 23,41 | 3,03 | 7,72 | |
| 5 | 8,00 | | 6,66 | 10,286 | 553,43 | 1188,30 | 1100,28 | 1047,88 | 52,39 | 88,02 | 403,65 | 16,63 | 88,02 | 133,15 | 0,32 | 24,06 | 3,01 | 8,01 | 8285 |
| 5 | 7,95 | | 6,82 | 10,189 | 555,97 | 1194,70 | 1106,72 | 1054,02 | 52,70 | 87,98 | 406,01 | 16,73 | 87,98 | 133,23 | 0,32 | 23,96 | 3,01 | 7,96 | 8731 |
| 7 | 7,97 | | 6,79 | 10,253 | 560,12 | 1195,60 | 1107,34 | 1034,90 | 72,44 | 88,26 | 398,65 | 23,00 | 88,26 | 138,47 | 0,33 | 24,72 | 4,11 | 6,02 | |
| 7 | 7,99 | | 6,65 | 10,243 | 547,59 | 1189,60 | 1101,58 | 1029,52 | 72,07 | 88,02 | 396,57 | 22,88 | 88,02 | 128,14 | 0,31 | 23,40 | 4,18 | 5,60 | 9997 |
| 7 | 8,05 | | 6,74 | 10,253 | 556,25 | 1195,00 | 1105,97 | 1033,62 | 72,35 | 89,03 | 398,15 | 22,97 | 89,03 | 135,13 | 0,32 | 24,29 | 4,13 | 5,88 | 10016 |
| 3 | 2,2 | | 7,86 | 6,76 | 10,277 | 560,07 | 1236,20 | 1146,12 | 1112,73 | 33,38 | 90,08 | 428,63 | 10,60 | 90,08 | 120,85 | 0,28 | 21,58 | 1,89 | 11,40 |
| 3 | | 7,86 | 6,78 | 10,261 | 560,27 | 1238,60 | 1148,34 | 1114,89 | 33,45 | 90,26 | 429,46 | 10,62 | 90,26 | 120,20 | 0,27 | 21,45 | 1,90 | 11,32 | 9207 |
| 3 | | 7,84 | 6,73 | 10,270 | 557,39 | 1235,90 | 1146,05 | 1112,67 | 33,38 | 89,85 | 428,60 | 10,60 | 89,85 | 118,19 | 0,27 | 21,20 | 1,90 | 11,15 | 8183 |
| 5 | | 7,98 | 6,58 | 10,217 | 539,54 | 1185,30 | 1097,70 | 1045,43 | 52,27 | 87,60 | 402,70 | 16,59 | 87,60 | 120,24 | 0,29 | 22,29 | 3,08 | 7,25 | |
| 5 | | 7,95 | 6,70 | 10,216 | 548,53 | 1185,30 | 1098,01 | 1045,72 | 52,29 | 87,29 | 402,81 | 16,60 | 87,29 | 129,11 | 0,31 | 23,54 | 3,03 | 7,78 | 9673 |
| 5 | | 7,90 | 6,59 | 10,270 | 545,57 | 1222,20 | 1132,72 | 1078,78 | 53,94 | 89,48 | 415,55 | 17,12 | 89,48 | 112,90 | 0,26 | 20,69 | 3,14 | 6,59 | 9735 |
| 7 | | 7,94 | 6,91 | 10,270 | 572,02 | 1252,70 | 1160,55 | 1084,63 | 75,92 | 92,15 | 417,80 | 24,10 | 92,15 | 130,12 | 0,29 | 22,75 | 4,21 | 5,40 | 11606 |
| 7 | | 8,01 | 6,84 | 10,254 | 564,71 | 1246,80 | 1154,34 | 1078,82 | 75,52 | 92,46 | 415,56 | 23,97 | 92,46 | 125,17 | 0,28 | 22,17 | 4,25 | 5,22 | 12241 |
| 7 | | 7,94 | 6,74 | 10,227 | 553,29 | 1247,10 | 1155,36 | 1079,78 | 75,58 | 91,74 | 415,93 | 24,00 | 91,74 | 113,37 | 0,26 | 20,49 | 4,34 | 4,72 | 11445 |

Quadro A.3 - Dados gerais dos corpos-de-prova de MR

| Teor de cimento (%) | massa especif. aparente seca (g/cm ³) | w% | Altura (cm) | Diamêtro (cm) | Volume (cm ³) | Massa do CP (g) | Massa dos Sólidos (g) | Massa dos grãos (g) | Massa do cimento (g) | Massa de água (g) | Volume dos grãos (cm ³) | Volume de cimento (cm ³) | Volume de água (cm ³) | Vv | e | n (%) | Civ | n/Civ |
|---------------------|---------------------------------------------------|------|-------------|---------------|---------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------|----------------------|-------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------|------|-------|------|-------|
| 3 | 2,0 | 7,86 | 14,82 | 10,21 | 1212,74 | 2512,60 | 2329,50 | 2261,65 | 67,85 | 183,10 | 871,19 | 21,54 | 183,10 | 320,01 | 0,36 | 26,39 | 1,78 | 14,86 |
| 3 | | 7,86 | 14,89 | 10,24 | 1225,64 | 2484,80 | 2303,73 | 2236,63 | 67,10 | 181,07 | 861,55 | 21,30 | 181,07 | 342,79 | 0,39 | 27,97 | 1,74 | 16,09 |
| 5 | | 7,98 | 14,92 | 10,27 | 1235,32 | 2517,90 | 2331,82 | 2220,78 | 111,04 | 186,08 | 855,45 | 35,25 | 186,08 | 344,62 | 0,39 | 27,90 | 2,85 | 9,78 |
| 5 | | 7,95 | 15,18 | 10,16 | 1230,07 | 2513,60 | 2328,49 | 2217,61 | 110,88 | 185,11 | 854,22 | 35,20 | 185,11 | 340,64 | 0,38 | 27,69 | 2,86 | 9,68 |
| 7 | | 7,94 | 14,81 | 10,19 | 1207,18 | 2506,20 | 2321,85 | 2169,95 | 151,90 | 184,35 | 835,87 | 48,22 | 184,35 | 323,10 | 0,37 | 26,76 | 3,99 | 6,70 |
| 7 | | 8,01 | 14,84 | 10,13 | 1196,21 | 2497,20 | 2312,01 | 2160,76 | 151,25 | 185,19 | 832,32 | 48,02 | 185,19 | 315,87 | 0,36 | 26,41 | 4,01 | 6,58 |
| 3 | 2,1 | 7,95 | 15,22 | 10,160 | 1233,31 | 2597,70 | 2406,39 | 2336,30 | 70,09 | 191,31 | 899,95 | 22,25 | 191,31 | 311,11 | 0,34 | 25,23 | 1,80 | 13,98 |
| 3 | | 7,82 | 15,13 | 10,160 | 1226,02 | 2602,10 | 2413,37 | 2343,08 | 70,29 | 188,73 | 902,56 | 22,32 | 188,73 | 301,14 | 0,33 | 24,56 | 1,82 | 13,50 |
| 5 | | 7,90 | 14,94 | 10,140 | 1205,86 | 2584,50 | 2395,27 | 2281,21 | 114,06 | 189,23 | 878,73 | 36,21 | 189,23 | 290,92 | 0,32 | 24,13 | 3,00 | 8,03 |
| 5 | | 8,05 | 15,08 | 10,190 | 1229,19 | 2602,10 | 2408,24 | 2293,56 | 114,68 | 193,86 | 883,48 | 36,41 | 193,86 | 309,30 | 0,34 | 25,16 | 2,96 | 8,50 |
| 7 | | 7,86 | 15,12 | 10,180 | 1230,03 | 2632,30 | 2440,48 | 2280,82 | 159,66 | 191,82 | 878,57 | 50,68 | 191,82 | 300,77 | 0,32 | 24,45 | 4,12 | 5,93 |
| 7 | | 7,97 | 15,21 | 10,180 | 1237,36 | 2631,50 | 2437,25 | 2277,80 | 159,45 | 194,25 | 877,41 | 50,62 | 194,25 | 309,32 | 0,33 | 25,00 | 4,09 | 6,11 |
| 3 | 2,2 | 8,05 | 15,17 | 10,180 | 1234,10 | 2724,90 | 2521,89 | 2448,43 | 73,45 | 203,01 | 943,14 | 23,32 | 203,01 | 267,64 | 0,28 | 21,69 | 1,89 | 11,48 |
| 3 | | 7,86 | 15,21 | 10,190 | 1239,79 | 2735,50 | 2536,16 | 2462,29 | 73,87 | 199,34 | 948,48 | 23,45 | 199,34 | 267,86 | 0,28 | 21,61 | 1,89 | 11,42 |
| 5 | | 8,03 | 15,23 | 10,210 | 1246,30 | 2736,40 | 2533,00 | 2412,38 | 120,62 | 203,40 | 929,25 | 38,29 | 203,40 | 278,75 | 0,29 | 22,37 | 3,07 | 7,28 |
| 5 | | 8,05 | 15,28 | 10,130 | 1230,87 | 2729,40 | 2526,05 | 2405,76 | 120,29 | 203,35 | 926,70 | 38,19 | 203,35 | 265,98 | 0,28 | 21,61 | 3,10 | 6,97 |
| 7 | | 7,86 | 15,21 | 10,180 | 1237,36 | 2682,70 | 2487,21 | 2324,49 | 162,71 | 195,49 | 895,40 | 51,66 | 195,49 | 290,30 | 0,31 | 23,46 | 4,17 | 5,62 |
| 7 | | 7,97 | 15,23 | 10,150 | 1231,69 | 2753,80 | 2550,52 | 2383,67 | 166,86 | 203,28 | 918,19 | 52,97 | 203,28 | 260,53 | 0,27 | 21,15 | 4,30 | 4,92 |

Quadro A.4 - Dados gerais dos corpos-de-prova de MD

| Mistura | Temp. | Frequencia (Hz) | CP 1 | | | CP 2 | | |
|-------------|-------|-----------------|-----------|--------------|---------------------------|-----------|--------------|---------------------------|
| | | | E* (MPa) | δ (°) | Deformação (ϵ) | E* (MPa) | δ (°) | Deformação (ϵ) |
| G 2,0 - 3 % | -10 | 25 | 17890 | 2,61 | 0 | 7411 | 4,78 | 65 |
| | -10 | 20 | 13333 | 3,79 | 60 | 7268 | 4,52 | 55 |
| | -10 | 10 | 13055 | 4,03 | 61 | 7121 | 4,89 | 57 |
| | -10 | 5 | 12736 | 4,33 | 62 | 6938 | 5,2 | 59 |
| | -10 | 2 | 12319 | 4,68 | 63 | 6702 | 5,53 | 61 |
| | -10 | 1 | 11999 | 4,97 | 63 | 6520 | 5,75 | 61 |
| | -10 | 0,5 | 11665 | 5,23 | 64 | 6335 | 5,99 | 61 |
| | -10 | 0,2 | 11243 | 5,62 | 63 | 6150 | 6,22 | 61 |
| | -10 | 0,1 | 10908 | 5,82 | 64 | 6005 | 6,46 | 61 |
| | -10 | 0,01 | 9909 | 6,59 | 63 | 5555 | 6,99 | 61 |
| | 4 | 25 | 6092 | 3,57 | 39 | 154,5 | 10,91 | 0 |
| | 4 | 20 | 5750 | 5,2 | 59 | 4061 | 8,76 | 0 |
| | 4 | 10 | 5548 | 5,03 | 59 | 2904 | 5,99 | 36 |
| | 4 | 5 | 5367 | 5,2 | 61 | 2695 | 6,19 | 45 |
| | 4 | 2 | 5146 | 5,63 | 62 | 2499 | 6,6 | 55 |
| | 4 | 1 | 4977 | 5,91 | 63 | 2373 | 6,78 | 60 |
| | 4 | 0,5 | 4822 | 6,36 | 62 | 2254 | 6,89 | 65 |
| | 4 | 0,2 | 4618 | 7,02 | 62 | 2163 | 6,88 | 60 |
| | 4 | 0,1 | 4466 | 7,39 | 62 | 2081 | 7,09 | 60 |
| | 4 | 0,01 | 3916 | 8,87 | 62 | 1858 | 8,63 | 60 |
| | 21 | 25 | 5341 | 7,81 | 5 | 1643 | 14,49 | 11 |
| | 21 | 20 | 4487 | 8,2 | 55 | 1939 | 0,4 | 36 |
| | 21 | 10 | 4272 | 8,53 | 57 | 1818 | 0,87 | 45 |
| | 21 | 5 | 4054 | 9 | 59 | 1604 | 19,34 | 53 |
| | 21 | 2 | 3766 | 9,65 | 61 | 1394 | 12,51 | 60 |
| | 21 | 1 | 3542 | 10,18 | 63 | 1314 | 11,96 | 61 |
| | 21 | 0,5 | 3335 | 10,63 | 62 | 1236 | 10,68 | 59 |
| | 21 | 0,2 | 3063 | 11,26 | 62 | 1130 | 10,57 | 59 |
| | 21 | 0,1 | 2872 | 11,74 | 62 | 1059 | 10,01 | 59 |
| | 21 | 0,01 | 2310 | 12,67 | 62 | 915,5 | 8,4 | 59 |
| | 37 | 25 | 2918 | 13,11 | 44 | 1010 | 14,61 | 19 |
| | 37 | 20 | 2808 | 13,54 | 51 | 925,8 | 13,22 | 31 |
| | 37 | 10 | 2545 | 13,97 | 54 | 808,6 | 12,78 | 38 |
| | 37 | 5 | 2303 | 14,3 | 58 | 708,7 | 12,84 | 48 |
| | 37 | 2 | 2016 | 14,64 | 61 | 613,8 | 12,95 | 59 |
| | 37 | 1 | 1827 | 14,79 | 64 | 560 | 12,74 | 63 |
| | 37 | 0,5 | 1673 | 14,53 | 62 | 517,4 | 11,69 | 60 |
| | 37 | 0,2 | 1496 | 13,93 | 62 | 468,8 | 11,6 | 60 |
| | 37 | 0,1 | 1388 | 13,17 | 63 | 441 | 11,15 | 60 |
| | 37 | 0,01 | 1166 | 11,08 | 61 | 372,3 | 9,69 | 61 |
| | 54 | 25 | 2437 | 10,91 | 3 | 1208 | 11,86 | 14 |
| | 54 | 20 | 2210 | 12,09 | 46 | 1219 | 11,93 | 33 |
| | 54 | 10 | 2001 | 11,83 | 50 | 1096 | 12,19 | 40 |
| | 54 | 5 | 1813 | 11,57 | 56 | 965,5 | 12,54 | 50 |
| | 54 | 2 | 1615 | 11,14 | 61 | 814,5 | 12,48 | 59 |
| | 54 | 1 | 1491 | 10,59 | 64 | 740,7 | 12,62 | 62 |
| | 54 | 0,5 | 1407 | 9,92 | 61 | 711 | 12,21 | 58 |
| | 54 | 0,2 | 1306 | 9,2 | 62 | 664,1 | 11,21 | 58 |
| 54 | 0,1 | 1243 | 8,7 | 61 | 632,9 | 10,58 | 58 | |
| 54 | 0,01 | 1108 | 7,81 | 61 | 557,7 | 8,72 | 59 | |

Quadro A.5 – Resultados do módulo dinâmico

| Mistura | Temp. | Frequencia (Hz) | CP 1 | | | CP 2 | | |
|-------------|-------|-----------------|-----------|--------------|---------------------------|-----------|--------------|---------------------------|
| | | | E* (MPa) | δ (°) | Deformação (ϵ) | E* (MPa) | δ (°) | Deformação (ϵ) |
| G 2,0 - 5 % | -10 | 25 | 18148 | 3,00 | 73 | 13096 | 5,37 | 9 |
| | -10 | 20 | 17958 | 2,94 | 61 | 11318 | 2,9 | 57 |
| | -10 | 10 | 17650 | 3,09 | 62 | 11133 | 2,99 | 60 |
| | -10 | 5 | 17370 | 3,27 | 63 | 10920 | 3,07 | 62 |
| | -10 | 2 | 16907 | 3,61 | 63 | 10688 | 3,2 | 62 |
| | -10 | 1 | 16518 | 3,82 | 63 | 10517 | 3,24 | 62 |
| | -10 | 0,5 | 16131 | 4,07 | 63 | 10345 | 3,31 | 63 |
| | -10 | 0,2 | 15606 | 4,43 | 64 | 10101 | 3,59 | 63 |
| | -10 | 0,1 | 15216 | 4,57 | 64 | 9921 | 3,79 | 63 |
| | -10 | 0,01 | 13929 | 5,49 | 63 | 9271 | 4,64 | 62 |
| | 4 | 25 | 12182 | 4 | 26 | 8740 | 3,74 | 50 |
| | 4 | 20 | 11345 | 4,46 | 61 | 8747 | 3,8 | 56 |
| | 4 | 10 | 11031 | 4,53 | 61 | 8585 | 3,89 | 59 |
| | 4 | 5 | 10707 | 4,77 | 62 | 8387 | 4,09 | 60 |
| | 4 | 2 | 10273 | 5,13 | 63 | 8124 | 4,38 | 61 |
| | 4 | 1 | 9942 | 5,39 | 63 | 7918 | 4,62 | 62 |
| | 4 | 0,5 | 9600 | 5,71 | 64 | 7709 | 4,88 | 62 |
| | 4 | 0,2 | 9168 | 6,17 | 64 | 7406 | 5,35 | 62 |
| | 4 | 0,1 | 8856 | 6,51 | 64 | 7171 | 5,7 | 62 |
| | 4 | 0,01 | 7753 | 7,7 | 63 | 6329 | 6,97 | 62 |
| | 21 | 25 | 1414 | 19,21 | 0 | 3490 | 8,48 | 0 |
| | 21 | 20 | 9055 | 3,56 | 28 | 7160 | 5,96 | 52 |
| | 21 | 10 | 8631 | 6,07 | 58 | 6965 | 6,54 | 57 |
| | 21 | 5 | 8176 | 6,39 | 60 | 6689 | 6,98 | 60 |
| | 21 | 2 | 7596 | 7,28 | 61 | 6307 | 7,67 | 61 |
| | 21 | 1 | 7164 | 7,74 | 62 | 6003 | 8,21 | 62 |
| | 21 | 0,5 | 6731 | 8,15 | 63 | 5700 | 8,75 | 62 |
| | 21 | 0,2 | 6183 | 8,58 | 62 | 5283 | 9,51 | 62 |
| | 21 | 0,1 | 5765 | 8,31 | 62 | 4959 | 10,19 | 62 |
| | 21 | 0,01 | 4569 | 4,5 | 61 | 3949 | 11,72 | 62 |
| | 37 | 25 | 5447 | 2,16 | 13 | 4604 | 13,31 | 10 |
| | 37 | 20 | 5561 | 10,85 | 54 | 4627 | 12,14 | 51 |
| | 37 | 10 | 5037 | 10,18 | 56 | 4260 | 12,48 | 55 |
| | 37 | 5 | 4549 | 9,29 | 59 | 3891 | 12,74 | 58 |
| | 37 | 2 | 3987 | 7,24 | 61 | 3449 | 12,77 | 61 |
| | 37 | 1 | 3598 | 4,29 | 62 | 3139 | 12,6 | 63 |
| | 37 | 0,5 | 3299 | 1,69 | 61 | 2894 | 12,11 | 62 |
| | 37 | 0,2 | 2656 | 6,09 | 60 | 2613 | 11,31 | 62 |
| | 37 | 0,1 | 2719 | 20,03 | 59 | 2428 | 10,57 | 62 |
| | 37 | 0,01 | 2144 | 15,39 | 60 | 2048 | 8,62 | 62 |
| | 54 | 25 | 5108 | 9,54 | 6 | 3364 | 10,68 | 11 |
| | 54 | 20 | 4358 | 9,91 | 51 | 3184 | 10,82 | 46 |
| 54 | 10 | 3946 | 9,18 | 55 | 2920 | 10,58 | 51 | |
| 54 | 5 | 3596 | 8,31 | 59 | 2685 | 10,16 | 57 | |
| 54 | 2 | 3229 | 6,92 | 62 | 2432 | 9,27 | 61 | |
| 54 | 1 | 2992 | 5,81 | 63 | 2265 | 8,59 | 64 | |
| 54 | 0,5 | 2810 | 4,92 | 62 | 2157 | 7,92 | 62 | |
| 54 | 0,2 | 2620 | 3,85 | 62 | 2027 | 6,96 | 62 | |
| 54 | 0,1 | 2501 | 3,54 | 61 | 1946 | 6,4 | 61 | |
| 54 | 0,01 | 2268 | 2,28 | 61 | 1766 | 5,48 | 61 | |

Quadro A.6 – Resultados do módulo dinâmico

| Mistura | Temp. | Frequencia (Hz) | CP 1 | | | CP 2 | | |
|-------------|-------|-----------------|-----------|--------------|---------------------------|-----------|--------------|---------------------------|
| | | | E* (MPa) | δ (°) | Deformação (ϵ) | E* (MPa) | δ (°) | Deformação (ϵ) |
| G 2,0 - 7 % | -10 | 25 | 16732 | 1,46 | 28 | 12337 | 13,49 | 0 |
| | -10 | 20 | 16375 | 2,37 | 60 | 15824 | 2,28 | 57 |
| | -10 | 10 | 16041 | 2,60 | 60 | 15503 | 2,39 | 61 |
| | -10 | 5 | 15729 | 2,76 | 62 | 15204 | 2,53 | 62 |
| | -10 | 2 | 15338 | 2,96 | 62 | 14830 | 2,8 | 62 |
| | -10 | 1 | 15309 | 3,18 | 62 | 14518 | 2,92 | 62 |
| | -10 | 0,5 | 14721 | 3,37 | 63 | 14201 | 3,08 | 63 |
| | -10 | 0,2 | 14323 | 3,60 | 63 | 13789 | 3,38 | 63 |
| | -10 | 0,1 | 14006 | 3,84 | 63 | 13447 | 3,47 | 63 |
| | -10 | 0,01 | 13013 | 4,39 | 62 | 12549 | 4,31 | 62 |
| | 4 | 25 | 9253 | 10,71 | 1 | 10984 | 3,44 | 17 |
| | 4 | 20 | 12353 | 3,91 | 58 | 11562 | 3,64 | 57 |
| | 4 | 10 | 12116 | 3,96 | 60 | 11282 | 3,84 | 60 |
| | 4 | 5 | 11820 | 4,29 | 61 | 10971 | 4,04 | 61 |
| | 4 | 2 | 11389 | 4,61 | 62 | 10559 | 4,37 | 61 |
| | 4 | 1 | 11044 | 4,93 | 62 | 10242 | 4,61 | 62 |
| | 4 | 0,5 | 10683 | 5,27 | 63 | 9913 | 4,88 | 62 |
| | 4 | 0,2 | 10204 | 5,64 | 62 | 9483 | 5,32 | 62 |
| | 4 | 0,1 | 9826 | 5,96 | 62 | 9150 | 5,7 | 62 |
| | 4 | 0,01 | 8616 | 7,25 | 62 | 7955 | 7,52 | 62 |
| | 21 | 25 | 2641 | 108,62 | 0 | 8490 | 3,73 | 7 |
| | 21 | 20 | 10048 | 6,53 | 59 | 9690 | 6 | 58 |
| | 21 | 10 | 9591 | 7,2 | 59 | 9343 | 6,38 | 59 |
| | 21 | 5 | 9099 | 7,49 | 61 | 8953 | 6,77 | 60 |
| | 21 | 2 | 8489 | 8,12 | 61 | 8417 | 7,41 | 61 |
| | 21 | 1 | 8009 | 8,57 | 62 | 7994 | 8,01 | 62 |
| | 21 | 0,5 | 7533 | 9,12 | 62 | 7562 | 8,54 | 62 |
| | 21 | 0,2 | 6927 | 9,67 | 62 | 6994 | 9,08 | 62 |
| | 21 | 0,1 | 6451 | 10,17 | 62 | 6560 | 9,72 | 62 |
| | 21 | 0,01 | 5128 | 10,94 | 62 | 5186 | 10,67 | 62 |
| | 37 | 25 | 7439 | 4,7 | 0 | 4667 | 8,39 | 1 |
| | 37 | 20 | 6167 | 11,57 | 56 | 5767 | 11,07 | 53 |
| | 37 | 10 | 5654 | 11,86 | 58 | 5269 | 11,35 | 57 |
| | 37 | 5 | 5174 | 12,08 | 60 | 4796 | 11,43 | 59 |
| | 37 | 2 | 4618 | 11,94 | 62 | 4262 | 11,25 | 61 |
| | 37 | 1 | 4277 | 11,71 | 64 | 3895 | 10,84 | 62 |
| | 37 | 0,5 | 3923 | 11,25 | 63 | 3608 | 10,34 | 62 |
| | 37 | 0,2 | 3576 | 10,49 | 63 | 3296 | 9,46 | 61 |
| | 37 | 0,1 | 3359 | 9,77 | 63 | 3084 | 8,73 | 61 |
| | 37 | 0,01 | 2920 | 8 | 63 | 2616 | 7,07 | 61 |
| | 54 | 25 | 4865 | 10,96 | 25 | 4976 | 8,08 | 6 |
| | 54 | 20 | 4406 | 11,67 | 54 | 4515 | 10,66 | 52 |
| 54 | 10 | 4023 | 11,2 | 56 | 4137 | 10,41 | 56 | |
| 54 | 5 | 3712 | 10,56 | 60 | 3822 | 10 | 59 | |
| 54 | 2 | 3394 | 9,51 | 62 | 3487 | 9,26 | 61 | |
| 54 | 1 | 3200 | 8,73 | 64 | 3270 | 8,69 | 63 | |
| 54 | 0,5 | 3042 | 7,93 | 63 | 3106 | 8,06 | 62 | |
| 54 | 0,2 | 2878 | 7,12 | 63 | 2918 | 7,36 | 62 | |
| 54 | 0,1 | 2774 | 6,55 | 63 | 2797 | 6,88 | 62 | |
| 54 | 0,01 | 2545 | 5,69 | 63 | 2520 | 5,54 | 62 | |

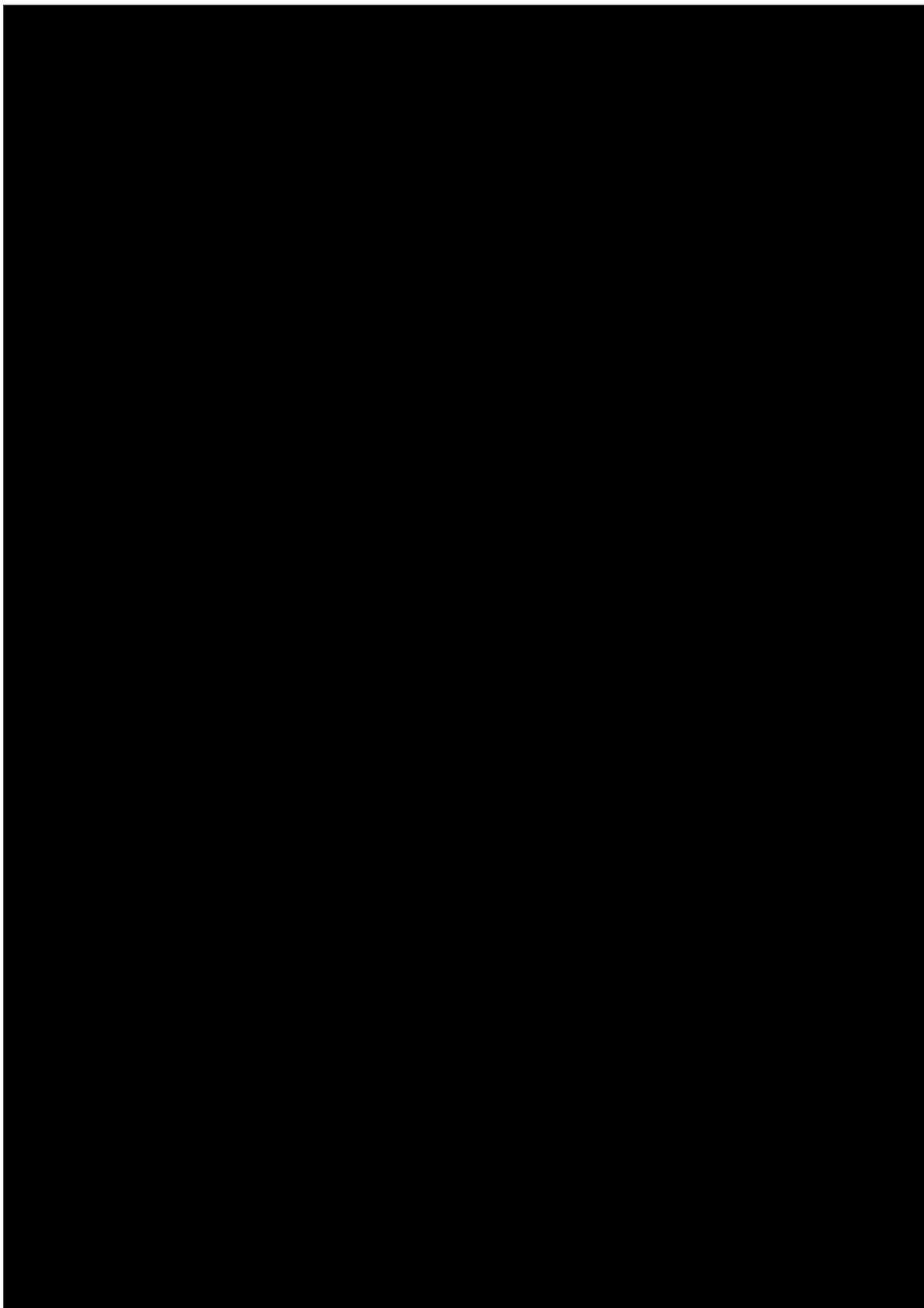
Quadro A.7 – Resultados do módulo dinâmico

| Mistura | Temp. | Frequencia (Hz) | CP 1 | | | CP 2 | | |
|-------------|-------|-----------------|-----------|--------------|---------------------------|-----------|--------------|---------------------------|
| | | | E* (MPa) | δ (°) | Deformação (ϵ) | E* (MPa) | δ (°) | Deformação (ϵ) |
| G 2,1 - 3 % | -10 | 25 | 12562 | 1,41 | 1 | 14174 | 2,57 | 30 |
| | -10 | 20 | 16439 | 3,13 | 58 | 14062 | 3,02 | 58 |
| | -10 | 10 | 16199 | 3,42 | 60 | 13808 | 3,23 | 60 |
| | -10 | 5 | 15862 | 3,74 | 61 | 13555 | 3,48 | 61 |
| | -10 | 2 | 15439 | 4,09 | 62 | 13193 | 3,88 | 62 |
| | -10 | 1 | 15101 | 4,37 | 62 | 12906 | 4,15 | 62 |
| | -10 | 0,5 | 14802 | 4,70 | 63 | 12592 | 4,46 | 63 |
| | -10 | 0,2 | 14332 | 5,15 | 63 | 12190 | 4,8 | 62 |
| | -10 | 0,1 | 13961 | 5,35 | 63 | 11891 | 5,12 | 62 |
| | -10 | 0,01 | 12700 | 6,73 | 63 | 10842 | 6,13 | 62 |
| | 4 | 25 | 7904 | 4,84 | 11 | 6859 | 4,94 | 27 |
| | 4 | 20 | 7510 | 4,51 | 56 | 6748 | 5,6 | 56 |
| | 4 | 10 | 7281 | 4,93 | 58 | 6495 | 5,81 | 58 |
| | 4 | 5 | 7050 | 4,95 | 60 | 6252 | 6,04 | 60 |
| | 4 | 2 | 6734 | 5,21 | 61 | 5962 | 6,38 | 61 |
| | 4 | 1 | 6484 | 5,44 | 62 | 5733 | 6,67 | 62 |
| | 4 | 0,5 | 6246 | 5,65 | 62 | 5537 | 6,98 | 62 |
| | 4 | 0,2 | 5952 | 6,24 | 61 | 5274 | 7,49 | 62 |
| | 4 | 0,1 | 5740 | 6,59 | 62 | 5067 | 7,95 | 62 |
| | 4 | 0,01 | 4936 | 7,91 | 61 | 4379 | 10,19 | 61 |
| | 21 | 25 | 6330 | 8,24 | 47 | 4887 | 5,41 | 17 |
| | 21 | 20 | 6167 | 8,45 | 56 | 5244 | 4,88 | 48 |
| | 21 | 10 | 5894 | 8,82 | 58 | 5033 | 6,9 | 53 |
| | 21 | 5 | 5582 | 9,24 | 60 | 4762 | 7,26 | 57 |
| | 21 | 2 | 5184 | 9,91 | 61 | 4416 | 8,23 | 59 |
| | 21 | 1 | 4881 | 10,47 | 62 | 4159 | 9,13 | 61 |
| | 21 | 0,5 | 4594 | 10,85 | 62 | 3909 | 9,9 | 62 |
| | 21 | 0,2 | 4203 | 11,56 | 62 | 3574 | 11,11 | 61 |
| | 21 | 0,1 | 3923 | 12,27 | 62 | 3328 | 11,27 | 61 |
| | 21 | 0,01 | 3089 | 13,55 | 63 | 2538 | 13,98 | 62 |
| | 37 | 25 | 3813 | 13,52 | 55 | 3495 | 12,83 | 54 |
| | 37 | 20 | 3715 | 13,67 | 51 | 3375 | 13,55 | 50 |
| | 37 | 10 | 3377 | 13,93 | 54 | 3054 | 14,71 | 54 |
| | 37 | 5 | 3049 | 14,18 | 58 | 2733 | 15,61 | 58 |
| | 37 | 2 | 2664 | 14,2 | 61 | 2350 | 18,87 | 60 |
| | 37 | 1 | 2396 | 14,01 | 63 | 1936 | 14,73 | 65 |
| | 37 | 0,5 | 2190 | 13,7 | 62 | 1733 | 12,06 | 63 |
| | 37 | 0,2 | 1941 | 12,93 | 62 | 1506 | 11,96 | 62 |
| | 37 | 0,1 | 1785 | 12,23 | 61 | 1353 | 13,2 | 61 |
| | 37 | 0,01 | 1429 | 10,3 | 61 | 1066 | 11,33 | 61 |
| | 54 | 25 | 2948 | 13,86 | 9 | 2694 | 13,45 | 45 |
| | 54 | 20 | 2775 | 14,52 | 48 | 2587 | 13,4 | 48 |
| 54 | 10 | 2479 | 14,41 | 49 | 2329 | 13,31 | 52 | |
| 54 | 5 | 2249 | 13,81 | 52 | 2101 | 13,01 | 58 | |
| 54 | 2 | 1991 | 12,92 | 51 | 1861 | 12,35 | 61 | |
| 54 | 1 | 1820 | 12,2 | 51 | 1713 | 11,66 | 64 | |
| 54 | 0,5 | 1648 | 12,16 | 62 | 1606 | 10,82 | 61 | |
| 54 | 0,2 | 1520 | 10,44 | 61 | 1485 | 9,97 | 61 | |
| 54 | 0,1 | 1437 | 9,64 | 61 | 1412 | 9,3 | 61 | |
| 54 | 0,01 | 1283 | 7,92 | 60 | 1263 | 7,59 | 61 | |

Quadro A.8 – Resultados do módulo dinâmico

| Mistura | Temp. | Frequencia (Hz) | CP 1 | | | CP 2 | | |
|-------------|-------|-----------------|-----------|--------------|---------------------------|-----------|--------------|---------------------------|
| | | | E* (MPa) | δ (°) | Deformação (ϵ) | E* (MPa) | δ (°) | Deformação (ϵ) |
| G 2,1 - 5 % | -10 | 25 | 9756 | 76,33 | 0 | 18552 | 7,15 | 3 |
| | -10 | 20 | 18553 | 2,56 | 54 | 18823 | 2,57 | 58 |
| | -10 | 10 | 18281 | 2,77 | 61 | 18622 | 2,72 | 61 |
| | -10 | 5 | 17946 | 3,05 | 62 | 18325 | 2,98 | 62 |
| | -10 | 2 | 17499 | 3,31 | 62 | 17879 | 3,25 | 63 |
| | -10 | 1 | 17121 | 3,55 | 63 | 17507 | 3,53 | 63 |
| | -10 | 0,5 | 16725 | 3,79 | 63 | 17108 | 3,82 | 63 |
| | -10 | 0,2 | 16213 | 4,12 | 63 | 16553 | 4,1 | 63 |
| | -10 | 0,1 | 15825 | 4,37 | 63 | 16143 | 4,36 | 63 |
| | -10 | 0,01 | 14366 | 5,70 | 63 | 14910 | 5,34 | 63 |
| | 4 | 25 | 11203 | 5,2 | 79 | 11351 | 5,48 | 8 |
| | 4 | 20 | 11039 | 5,16 | 58 | 10829 | 5,81 | 55 |
| | 4 | 10 | 10748 | 5,33 | 60 | 10551 | 4,78 | 59 |
| | 4 | 5 | 10428 | 5,6 | 61 | 10258 | 4,85 | 61 |
| | 4 | 2 | 10006 | 5,94 | 61 | 9829 | 5,09 | 61 |
| | 4 | 1 | 9670 | 6,22 | 62 | 9477 | 5,38 | 62 |
| | 4 | 0,5 | 9334 | 6,54 | 62 | 9131 | 5,71 | 63 |
| | 4 | 0,2 | 8884 | 7,04 | 62 | 8715 | 6,06 | 62 |
| | 4 | 0,1 | 8557 | 7,41 | 62 | 8392 | 6,54 | 62 |
| | 4 | 0,01 | 7393 | 8,89 | 62 | 7396 | 7,38 | 61 |
| | 21 | 25 | 9459 | 4,21 | 9 | 10042 | 5,26 | 7 |
| | 21 | 20 | 9329 | 6,17 | 54 | 9653 | 5,51 | 57 |
| | 21 | 10 | 8935 | 7,38 | 59 | 9269 | 6,7 | 59 |
| | 21 | 5 | 8531 | 8,18 | 61 | 8827 | 7,26 | 61 |
| | 21 | 2 | 7944 | 8,93 | 62 | 8278 | 7,85 | 62 |
| | 21 | 1 | 9464 | 9,46 | 63 | 7853 | 8,35 | 62 |
| | 21 | 0,5 | 6986 | 9,94 | 64 | 7437 | 8,78 | 63 |
| | 21 | 0,2 | 6379 | 11,07 | 63 | 6894 | 9,45 | 62 |
| | 21 | 0,1 | 5949 | 11,58 | 63 | 6502 | 9,94 | 62 |
| | 21 | 0,01 | 4613 | 12,65 | 63 | 5285 | 11,84 | 62 |
| | 37 | 25 | 5907 | 12,48 | 47 | 5635 | 13,22 | 52 |
| | 37 | 20 | 5751 | 12,88 | 54 | 5467 | 13,37 | 56 |
| | 37 | 10 | 5217 | 13,39 | 56 | 4966 | 13,85 | 58 |
| | 37 | 5 | 4696 | 13,7 | 59 | 4499 | 14,18 | 60 |
| | 37 | 2 | 4081 | 13,8 | 61 | 3953 | 14,28 | 61 |
| | 37 | 1 | 3651 | 13,66 | 62 | 3596 | 14,06 | 63 |
| | 37 | 0,5 | 3319 | 13,21 | 62 | 3305 | 13,61 | 62 |
| | 37 | 0,2 | 2934 | 12,54 | 62 | 2988 | 12,82 | 62 |
| | 37 | 0,1 | 2701 | 11,75 | 61 | 2802 | 12,08 | 62 |
| | 37 | 0,01 | 2192 | 9,98 | 61 | 2431 | 9,83 | 61 |
| | 54 | 25 | 4626 | 7,28 | 5 | 4563 | 12,28 | 18 |
| | 54 | 20 | 3969 | 13,41 | 53 | 4163 | 13,56 | 53 |
| | 54 | 10 | 3557 | 13,12 | 55 | 3733 | 13,43 | 55 |
| | 54 | 5 | 3210 | 12,6 | 59 | 3359 | 13,16 | 59 |
| | 54 | 2 | 2861 | 11,69 | 62 | 2969 | 12,43 | 61 |
| | 54 | 1 | 2649 | 10,91 | 64 | 2725 | 11,69 | 64 |
| | 54 | 0,5 | 2487 | 10,06 | 62 | 2551 | 10,79 | 62 |
| | 54 | 0,2 | 2319 | 9,06 | 62 | 2360 | 9,69 | 62 |
| 54 | 0,1 | 2223 | 8,32 | 62 | 2245 | 8,94 | 62 | |
| 54 | 0,01 | 2022 | 6,12 | 62 | 2014 | 7,03 | 61 | |

Quadro A.9 – Resultados do módulo dinâmico



Quadro A.10 – Resultados do módulo dinâmico

| Mistura | Temp. | Frequencia (Hz) | CP 1 | | | CP 2 | | |
|-------------|-------|-----------------|-----------|--------------|---------------------------|-----------|--------------|---------------------------|
| | | | E* (MPa) | δ (°) | Deformação (ϵ) | E* (MPa) | δ (°) | Deformação (ϵ) |
| G 2,2 - 3 % | -10 | 25 | 16629 | 2,08 | 15 | 15875 | 2,6 | 47 |
| | -10 | 20 | 16697 | 3,16 | 60 | 16032 | 2,9 | 59 |
| | -10 | 10 | 16387 | 3,32 | 61 | 15875 | 3,1 | 60 |
| | -10 | 5 | 16055 | 3,58 | 62 | 15570 | 3,39 | 62 |
| | -10 | 2 | 15604 | 3,93 | 62 | 15149 | 3,75 | 62 |
| | -10 | 1 | 15264 | 4,18 | 62 | 14796 | 3,98 | 63 |
| | -10 | 0,5 | 14895 | 4,48 | 63 | 14438 | 4,35 | 63 |
| | -10 | 0,2 | 14412 | 4,84 | 63 | 13964 | 4,69 | 63 |
| | -10 | 0,1 | 14047 | 5,13 | 63 | 13621 | 4,93 | 63 |
| | -10 | 0,01 | 12841 | 6,26 | 62 | 12328 | 5,9 | 64 |
| | 4 | 25 | 10023 | 1,25 | 31 | 9398 | 5,42 | 16 |
| | 4 | 20 | 9756 | 5,13 | 59 | 9533 | 5,76 | 59 |
| | 4 | 10 | 9410 | 4,91 | 59 | 9207 | 5,77 | 60 |
| | 4 | 5 | 9084 | 4,81 | 60 | 8888 | 6,09 | 62 |
| | 4 | 2 | 8717 | 5,52 | 61 | 8451 | 6,55 | 62 |
| | 4 | 1 | 8394 | 6,09 | 62 | 8124 | 6,89 | 63 |
| | 4 | 0,5 | 8075 | 6,72 | 63 | 7799 | 7,29 | 64 |
| | 4 | 0,2 | 7652 | 7,45 | 62 | 7391 | 7,95 | 63 |
| | 4 | 0,1 | 7349 | 7,85 | 62 | 7074 | 8,38 | 63 |
| | 4 | 0,01 | 6324 | 9,89 | 61 | 6147 | 10,37 | 61 |
| | 21 | 25 | 9083 | 6,69 | 27 | 7993 | 7,94 | 53 |
| | 21 | 20 | 8703 | 7,63 | 59 | 7866 | 8 | 58 |
| | 21 | 10 | 8280 | 8,04 | 60 | 7508 | 8,43 | 60 |
| | 21 | 5 | 7861 | 8,47 | 61 | 7127 | 8,9 | 61 |
| | 21 | 2 | 7319 | 9,18 | 62 | 6641 | 9,61 | 62 |
| | 21 | 1 | 6897 | 9,74 | 62 | 6263 | 10,15 | 63 |
| | 21 | 0,5 | 6485 | 10,25 | 63 | 5897 | 10,74 | 63 |
| | 21 | 0,2 | 5957 | 11,02 | 62 | 5403 | 11,48 | 63 |
| | 21 | 0,1 | 5557 | 11,63 | 63 | 5046 | 12,03 | 63 |
| | 21 | 0,01 | 4266 | 13,41 | 64 | 3895 | 13,79 | 63 |
| | 37 | 25 | 4967 | 10,84 | 15 | 4965 | 12,01 | 14 |
| | 37 | 20 | 4938 | 13,32 | 51 | 4788 | 11,92 | 50 |
| | 37 | 10 | 4483 | 13,9 | 56 | 4366 | 12 | 54 |
| | 37 | 5 | 4036 | 14,31 | 58 | 3943 | 11,48 | 58 |
| | 37 | 2 | 3504 | 14,7 | 61 | 3458 | 9,87 | 60 |
| | 37 | 1 | 3135 | 14,5 | 63 | 3115 | 4,86 | 62 |
| | 37 | 0,5 | 2846 | 14,4 | 62 | 2821 | 9,69 | 60 |
| | 37 | 0,2 | 2523 | 14,12 | 62 | 2342 | 27,29 | 60 |
| | 37 | 0,1 | 2319 | 13,63 | 62 | 2014 | 22,04 | 60 |
| | 37 | 0,01 | 1877 | 11,94 | 61 | 1394 | 15,31 | 64 |
| | 54 | 25 | 4017 | 13,59 | 40 | 3596 | 14,38 | 59 |
| | 54 | 20 | 3852 | 13,67 | 51 | 3458 | 14,29 | 51 |
| 54 | 10 | 3465 | 13,72 | 55 | 3113 | 13,8 | 55 | |
| 54 | 5 | 3112 | 13,55 | 59 | 2808 | 13,17 | 59 | |
| 54 | 2 | 2741 | 12,98 | 61 | 2487 | 12,05 | 62 | |
| 54 | 1 | 2507 | 12,3 | 63 | 2286 | 11,13 | 64 | |
| 54 | 0,5 | 2316 | 11,79 | 62 | 2142 | 10,3 | 62 | |
| 54 | 0,2 | 2127 | 10,29 | 61 | 1977 | 9,19 | 62 | |
| 54 | 0,1 | 2022 | 9,97 | 61 | 1875 | 8,36 | 62 | |
| 54 | 0,01 | 1770 | 8,63 | 60 | 1687 | 6,46 | 62 | |

Quadro A.11 – Resultados do módulo dinâmico

| Mistura | Temp. | Frequencia (Hz) | CP 1 | | | CP 2 | | |
|-------------|-------|-----------------|-----------|--------------|---------------------------|-----------|--------------|---------------------------|
| | | | E* (MPa) | δ (°) | Deformação (ϵ) | E* (MPa) | δ (°) | Deformação (ϵ) |
| G 2,2 - 5 % | -10 | 25 | 18422 | 2,36 | 11 | 17608 | 2,28 | 18 |
| | -10 | 20 | 17606 | 2,53 | 59 | 17608 | 2,64 | 59 |
| | -10 | 10 | 17289 | 2,63 | 61 | 17416 | 2,75 | 60 |
| | -10 | 5 | 16675 | 2,81 | 62 | 17206 | 2,87 | 61 |
| | -10 | 2 | 16531 | 3,06 | 62 | 16842 | 3,16 | 62 |
| | -10 | 1 | 16189 | 3,30 | 63 | 16538 | 3,36 | 62 |
| | -10 | 0,5 | 15831 | 3,53 | 63 | 16199 | 3,57 | 63 |
| | -10 | 0,2 | 15348 | 3,87 | 63 | 15752 | 3,89 | 62 |
| | -10 | 0,1 | 15013 | 4,04 | 63 | 15422 | 4,13 | 62 |
| | -10 | 0,01 | 13866 | 4,79 | 63 | 14243 | 5,01 | 62 |
| | 4 | 25 | 10257 | 2,84 | 13 | 12090 | 5,24 | 6 |
| | 4 | 20 | 10747 | 4,75 | 56 | 10892 | 0,88 | 50 |
| | 4 | 10 | 10689 | 4,6 | 59 | 10758 | 2,04 | 48 |
| | 4 | 5 | 10448 | 4,75 | 61 | 10470 | 6,66 | 54 |
| | 4 | 2 | 10108 | 5,07 | 61 | 10048 | 8,02 | 56 |
| | 4 | 1 | 9863 | 5,33 | 62 | 9725 | 3,77 | 58 |
| | 4 | 0,5 | 9599 | 5,64 | 63 | 9376 | 1,42 | 59 |
| | 4 | 0,2 | 9200 | 6,07 | 62 | 8930 | 3,6 | 59 |
| | 4 | 0,1 | 8894 | 6,4 | 62 | 8558 | 3,83 | 59 |
| | 4 | 0,01 | 7783 | 7,96 | 62 | 7322 | 5,65 | 58 |
| | 21 | 25 | 10602 | 5,85 | 38 | 9318 | 7,8 | 10 |
| | 21 | 20 | 10529 | 6,35 | 56 | 9073 | 8,34 | 57 |
| | 21 | 10 | 10044 | 6,45 | 60 | 8579 | 8,81 | 59 |
| | 21 | 5 | 9604 | 6,73 | 61 | 8071 | 9,37 | 60 |
| | 21 | 2 | 9053 | 7,33 | 62 | 7393 | 10,09 | 61 |
| | 21 | 1 | 8620 | 7,81 | 63 | 6886 | 10,66 | 62 |
| | 21 | 0,5 | 8196 | 8,22 | 63 | 6399 | 11,1 | 62 |
| | 21 | 0,2 | 7652 | 8,89 | 63 | 5789 | 11,69 | 62 |
| | 21 | 0,1 | 7221 | 9,27 | 63 | 5373 | 11,97 | 62 |
| | 21 | 0,01 | 5847 | 10,63 | 64 | 4332 | 12,53 | 59 |
| | 37 | 25 | 6386 | 10,51 | 47 | 6035 | 12,96 | 55 |
| | 37 | 20 | 6238 | 10,49 | 55 | 5892 | 13,22 | 54 |
| | 37 | 10 | 5766 | 10,74 | 57 | 5343 | 13,71 | 57 |
| | 37 | 5 | 5292 | 10,94 | 59 | 4803 | 14,04 | 59 |
| | 37 | 2 | 4726 | 11,1 | 61 | 4168 | 14,16 | 61 |
| | 37 | 1 | 4325 | 11,01 | 62 | 3732 | 14,06 | 63 |
| | 37 | 0,5 | 3986 | 10,75 | 62 | 3376 | 13,54 | 62 |
| | 37 | 0,2 | 3604 | 10,2 | 62 | 2977 | 12,58 | 62 |
| | 37 | 0,1 | 3351 | 6,8 | 62 | 2726 | 11,79 | 62 |
| | 37 | 0,01 | 2786 | 8,13 | 62 | 2218 | 9,6 | 62 |
| | 54 | 25 | 5237 | 9,71 | 20 | 4998 | 11,57 | 5 |
| | 54 | 20 | 4880 | 10,99 | 56 | 4275 | 13,46 | 54 |
| 54 | 10 | 4462 | 10,72 | 55 | 3768 | 13,41 | 56 | |
| 54 | 5 | 4070 | 10,32 | 59 | 3374 | 12,74 | 59 | |
| 54 | 2 | 3663 | 9,59 | 62 | 2980 | 11,58 | 61 | |
| 54 | 1 | 3403 | 9,02 | 63 | 2744 | 10,66 | 64 | |
| 54 | 0,5 | 3199 | 8,43 | 62 | 2570 | 9,6 | 62 | |
| 54 | 0,2 | 2976 | 7,73 | 62 | 2377 | 8,83 | 62 | |
| 54 | 0,1 | 2837 | 7,29 | 62 | 2273 | 8,37 | 62 | |
| 54 | 0,01 | 2516 | 6,85 | 62 | 2055 | 7,75 | 61 | |

Quadro A.12 – Resultados do módulo dinâmico

| Mistura | Temp. | Frequencia (Hz) | CP 1 | | | CP 2 | | |
|-------------|-------|-----------------|-----------|--------------|---------------------------|-----------|--------------|---------------------------|
| | | | E* (MPa) | δ (°) | Deformação (ϵ) | E* (MPa) | δ (°) | Deformação (ϵ) |
| G 2,2 - 7 % | -10 | 25 | 14237 | 2,00 | 29 | 14826 | 39,45 | 0 |
| | -10 | 20 | 14369 | 2,15 | 59 | 17057 | 1,93 | 60 |
| | -10 | 10 | 14237 | 2,27 | 60 | 16862 | 2,04 | 61 |
| | -10 | 5 | 14072 | 2,33 | 61 | 16653 | 2,07 | 62 |
| | -10 | 2 | 13808 | 2,53 | 61 | 16364 | 2,26 | 62 |
| | -10 | 1 | 13598 | 2,68 | 62 | 16130 | 2,42 | 62 |
| | -10 | 0,5 | 13369 | 2,80 | 62 | 15893 | 2,59 | 63 |
| | -10 | 0,2 | 13063 | 3,06 | 62 | 15568 | 2,78 | 63 |
| | -10 | 0,1 | 12829 | 3,22 | 62 | 15301 | 2,91 | 63 |
| | -10 | 0,01 | 12073 | 4,05 | 61 | 14405 | 3,56 | 63 |
| | 4 | 25 | 15882 | 2,57 | 50 | 13136 | 4,46 | 14 |
| | 4 | 20 | 14294 | 1,73 | 56 | 13380 | 4,36 | 58 |
| | 4 | 10 | 13837 | 2,4 | 59 | 13155 | 4,47 | 59 |
| | 4 | 5 | 13345 | 0,47 | 60 | 12824 | 4,71 | 61 |
| | 4 | 2 | 12732 | 0,95 | 61 | 12321 | 5,05 | 61 |
| | 4 | 1 | 12272 | 1,98 | 62 | 11914 | 5,3 | 62 |
| | 4 | 0,5 | 11563 | 15,53 | 62 | 11517 | 5,64 | 63 |
| | 4 | 0,2 | 10759 | 9,72 | 62 | 10976 | 6,22 | 62 |
| | 4 | 0,1 | 10182 | 9,2 | 62 | 10562 | 6,62 | 62 |
| | 4 | 0,01 | 8467 | 10,65 | 62 | 9268 | 7,85 | 61 |
| | 21 | 25 | 11238 | 1,75 | 15 | 11738 | 6,68 | 49 |
| | 21 | 20 | 11789 | 7,57 | 58 | 11512 | 6,83 | 58 |
| | 21 | 10 | 11170 | 6,66 | 60 | 11044 | 6,87 | 60 |
| | 21 | 5 | 10567 | 7,28 | 61 | 10510 | 7,31 | 61 |
| | 21 | 2 | 9773 | 8,15 | 62 | 9796 | 7,91 | 62 |
| | 21 | 1 | 9177 | 8,65 | 62 | 9249 | 8,4 | 62 |
| | 21 | 0,5 | 8591 | 9,12 | 63 | 8714 | 8,9 | 63 |
| | 21 | 0,2 | 7878 | 9,76 | 62 | 8023 | 9,47 | 63 |
| | 21 | 0,1 | 7349 | 9,99 | 62 | 7528 | 10,02 | 63 |
| | 21 | 0,01 | 5923 | 10,9 | 61 | 6206 | 11,75 | 62 |
| | 37 | 25 | 7779 | 11,17 | 51 | 8153 | 9,44 | 27 |
| | 37 | 20 | 7504 | 11,67 | 58 | 7683 | 10,79 | 58 |
| | 37 | 10 | 6852 | 12,16 | 59 | 7080 | 11,19 | 59 |
| | 37 | 5 | 6236 | 12,55 | 61 | 6504 | 11,54 | 61 |
| | 37 | 2 | 5499 | 12,8 | 62 | 5814 | 11,58 | 62 |
| | 37 | 1 | 5000 | 12,79 | 64 | 5353 | 11,39 | 63 |
| | 37 | 0,5 | 4574 | 12,53 | 63 | 4955 | 10,93 | 63 |
| | 37 | 0,2 | 4103 | 11,97 | 63 | 4526 | 10,04 | 63 |
| | 37 | 0,1 | 3813 | 11,4 | 63 | 4263 | 9,23 | 64 |
| | 37 | 0,01 | 3170 | 9,44 | 63 | 3716 | 6,92 | 64 |
| | 54 | 25 | 5558 | 12,31 | 32 | 6614 | 6,65 | 26 |
| | 54 | 20 | 5237 | 13,04 | 54 | 6025 | 9,53 | 56 |
| | 54 | 10 | 4707 | 12,83 | 57 | 5552 | 8,79 | 57 |
| | 54 | 5 | 4262 | 12,33 | 60 | 5135 | 8,01 | 61 |
| | 54 | 2 | 3806 | 11,41 | 62 | 4689 | 6,96 | 63 |
| | 54 | 1 | 3525 | 10,52 | 63 | 4409 | 6,19 | 65 |
| | 54 | 0,5 | 3310 | 9,60 | 63 | 4178 | 5,67 | 65 |
| | 54 | 0,2 | 3087 | 8,56 | 63 | 3938 | 5,26 | 65 |
| 54 | 0,1 | 2946 | 7,82 | 63 | 3789 | 5,06 | 65 | |
| 54 | 0,01 | 2648 | 6,65 | 62 | 3418 | 6,02 | 66 | |

Quadro A.13 – Resultados do módulo dinâmico