

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

Avaliação das propriedades mecânicas de uma mistura de material asfáltico fresado e vidro moído com a adição de cal de carbureto

Aziz Tebechrani Neto

Porto Alegre
2020

AZIZ TEBECHRANI NETO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UMA
MISTURA DE MATERIAL ASFÁLTICO FRESADO E VIDRO
MOÍDO COM A ADIÇÃO DE CAL DE CARBURETO**

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
2020

CIP - Catalogação na Publicação

Tebechrani Neto, Aziz

Avaliação das propriedades mecânicas de uma mistura de material asfáltico fresado e vidro moído com a adição de cal de carbureto / Aziz Tebechrani Neto. -- 2020.

208 f.

Orientador: Nilo Cesar 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, 2020.

1. reciclagem. 2. material asfáltico fresado. 3. vidro moído. 4. cal de carbureto. 5. estabilização química. I. Consoli, Nilo Cesar, orient. II. Specht, Luciano Pivoto, coorient. III. Título.

AZIZ TEBECHRANI NETO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UMA
MISTURA DE MATERIAL ASFÁLTICO FRESADO E VIDRO
MOÍDO COM A ADIÇÃO DE CAL DE CARBURETO**

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 pelos professores orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 16 de março de 2020

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

Prof. Luciano Pivoto Specht
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande
do Sul
Coorientador

Prof. Nilo Cesar Consoli
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Monica Prezzi
Ph.D. pela University of California - USA

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

Prof. Cesar Alberto Ruver
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dr. Rodrigo Beck Saldanha
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais e familiares, por todo o apoio, compreensão, força e motivação encaminhadas não só ao longo do mestrado, mas também ao longo de toda a vida. Esta dissertação também é de vocês!

Agradeço em especial ao professor e orientador Nilo Cesar Consoli, por sempre estar presente, por todo o apoio, pela transmissão de conhecimento e pela confiança depositada desde o primeiro dia de mestrado, possibilitando que esta dissertação acontecesse. Agradeço imensamente também ao professor e coorientador Luciano Pivoto Specht por toda a transmissão de conhecimentos na parte de pavimentação, despertando meu interesse nesta área tão desafiadora, além de toda a ajuda encaminhada para a realização dos ensaios feitos em Santa Maria.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil que transmitiram seus conhecimentos durante as aulas, contribuindo de forma significativa para minha formação.

Aos colegas que se transformaram em grandes amigos que criei ao longo destes dois anos de mestrado. Agradeço imensamente a Brenda Correa, Laís Veríssimo, Helder Chaves, Laís Chaves, Gustavo Miguel, Lukas Wereszko, Lucas Dornelles, Guilherme Piuzzi, Andressa Silva, Cocou Auxence, Ricardo Menezes e Hortência Fontana pelas incontáveis horas de estudos nas disciplinas do mestrado, pelo desenvolvimento de pesquisas, pelo compartilhamento de conhecimento e pelos momentos de descontração, pessoas que foram fundamentais neste período de grandes desafios em Porto Alegre.

Um agradecimento especial ao doutorando Eduardo Pasche, que sempre esteve disposto em ajudar com todo o conhecimento e experiência de cada ensaio, com a obtenção do material e com as análises dos resultados. Agradeço também ao doutorando Hugo, por ajudar na compreensão das análises estatísticas através do Minitab. Também agradeço ao doutorando Eclesielter pela ajuda no ensaio de sedimentação.

Agradeço também aos demais membros e amigos do LEGG, por toda a ajuda, convivência, conversas e risadas. Um agradecimento especial também aos bolsistas Pablo, Thales, Renato e Guilherme, pela ajuda no peneiramento, moagem, secagem de material e moldagem.

Aos colegas Pablo Vestena, Fernando Boeira e Silvio Schuster do Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV) da UFSM, pela colaboração e ajuda nos ensaios de módulo de resiliência e módulo complexo.

Aos colaboradores e pesquisadores ligados ao LACER pela realização dos ensaios solicitados. Ao instituto de geociência da UFRGS pela realização do ensaio de fluorescência de raios-X.

Agradeço ao professor Marcelo Heidemann da UFSC, pelo apoio desde a época de graduação e por despertar meu interesse na geotecnia.

Aos demais amigos e colegas de Santa Catarina, que mesmo distantes continuam fazendo parte da minha vida.

À CAPES pela ajuda financeira, que permitiu a minha dedicação exclusiva aos estudos nesses anos de mestrado.

Por fim, agradeço a todos não citados acima que, de alguma forma, contribuíram com a realização desta pesquisa.

RESUMO

TEBECHRANI NETO, A. **Avaliação das propriedades mecânicas de uma mistura de material asfáltico fresado e vidro moído com a adição de cal de carbureto.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A utilização de resíduos domésticos, industriais e da construção civil vem ganhando bastante espaço nas últimas décadas, tendo em vista a preocupação social e ambiental em preservar e reutilizar os recursos naturais. Na pavimentação, a reciclagem do pavimento rodoviário através da utilização do material asfáltico fresado (RAP) é um método de recuperação estrutural e funcional da rodovia empregada há muitas décadas no país, devido a vantagens técnicas, econômicas e ambientais. Nem sempre apenas o RAP é suficiente para a estabilização da camada do pavimento e, para isso, vêm sendo empregados materiais à base de cálcio, como o cimento Portland e a cal hidratada, porém estas tendem a ser prejudiciais ao meio ambiente e economicamente questionáveis. Dessa forma, a presente dissertação tem a premissa de estudar o aproveitamento da mistura de três resíduos, avaliando a viabilidade da utilização desses como camada de pavimento. O primeiro resíduo é o material asfáltico reciclado advindo da fresagem do revestimento asfáltico de um pavimento. O segundo material utilizado é a cal de carbureto, resíduo vindo da fabricação do gás acetileno, atuando como substituto dos materiais comumente utilizados como a cal hidratada e o cimento Portland. Como a cal, em geral, reage de forma satisfatória com a parte fina dos solos e o RAP por si só tem uma deficiência dessa fração fina, foi utilizado um terceiro resíduo, o vidro moído. Este resíduo foi escolhido não só por questões granulométricas, mas também pelo alto teor de SiO_2 que apresenta na sua composição e, assim, possibilitando que ocorram reações pozolânicas com os íons de cálcio da cal, formando compostos cimentantes, adquirindo propriedades de resistência e rigidez. Para a presente pesquisa, a proporção de RAP e vidro moído foi de 70/30 para todos os casos, com a adição de 3 e 7% de cal de carbureto. Esses foram moldados com peso específico aparente seco de 19 e 20 kN/m^3 e curados por 28 dias. Além disso, para verificar a influência da fração fina do vidro moído nas reações, foram estudados três teores diferentes do vidro moído passante na peneira n. 200 (VM_{200}): 10, 15 e 25% da massa total do corpo de prova. Para atender todas as variáveis citadas, foram realizadas um total de 12 misturas em duplicatas. Ensaio de resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração por compressão diametral (RTCD), durabilidade por molhagem e secagem, módulo de resiliência (MR) e módulo complexo (E^*) foram executados para as devidas análises. Os resultados mostram que o efeito de cada uma das variáveis selecionadas é considerado estatisticamente satisfatório para a obtenção de resultados significativos, mostrando que a combinação destes elementos tem potencial para a utilização como camada de pavimento. É observado também que ao adicionar um teor maior de pó de vidro na mistura, mais este tende a influenciar nos resultados. O índice porosidade/teor volumétrico de agente cimentante $[\eta/B_{iv}^{0,28}]$ mostrou-se adequado para a previsão do comportamento da mistura nos ensaios aqui estudados. Através desse índice, foi possível obter uma relação entre os ensaios de RCS e RTCD, além de se obter uma relação entre a perda de massa acumulada (PMA) com o número de ciclos no ensaio de durabilidade e uma relação entre o módulo dinâmico ($|E^*|$), frequência (F) e temperatura (TT) no ensaio de módulo complexo.

Palavras-chave: *reciclagem; material asfáltico fresado; vidro moído; cal de carbureto; estabilização química.*

ABSTRACT

TEBECHRANI NETO, A. **Evaluation of the mechanical properties of a mixture of reclaimed asphalt pavement and ground glass with the addition of carbide lime.** 2020. Master's Thesis in Civil Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil.

The use of domestic and industrial waste has been gaining much space in recent decades, in view of the social and environmental concern in preserving and reusing natural resources. In paving, recycling the road pavement through the use of reclaimed asphalt pavement (RAP) is a method of structural and functional recovery of the highway used for many decades in Brazil, due to technical, economic and environmental advantages. RAP is not always sufficient to stabilize the pavement layer and, for this, calcium-based materials, such as Portland cement and hydrated lime, have been used, but these tend to be harmful to the environment and economically questionable. Thus, this research has the premise of studying the use of the mixture of three residues, evaluating the feasibility of using these as a pavement layer. The first residue is the recycled asphalt material coming from the milling of the asphalt coating. The second material used is carbide lime, a residue from the manufacture of acetylene gas, acting as a substitute for commonly used materials such as hydrated lime and Portland cement. As lime, in general, reacts satisfactorily with the fine part of the soil and the RAP alone has a deficiency of this fine fraction, a third residue, finely ground waste glass, was used. This residue was chosen not only for granulometric reasons, but also for the high SiO₂ content found in its composition and, thus, allowing pozzolanic reactions to occur with the calcium ions of lime, forming cementing compounds, acquiring resistance and rigidity properties. For the present research, the proportions of RAP and ground glass were 70/30, with the addition of 3 and 7% carbide lime. These were molded with an apparent dry unit weight of 19 and 20 kN/m³ and cured for 28 days. In addition, to verify the influence of the fine fractions of the ground glass on the reactions, three different levels of ground glass passed through the sieve n. 200 (VM₂₀₀): 10, 15 and 25%. To analyze all the variables mentioned, a total of 12 mixtures were performed in duplicates. Tests of unconfined compressive strength (RCS), indirect tensile strength (RTCD), durability, resilient modulus (MR) and complex modulus (E*) were performed for due analysis. The results show that the effect of each variable is considered statistically satisfactory to obtain significant results. It is also observed that when adding a higher content of glass powder to the mixture, the more it tends to influence the results. The porosity/binder index [$\eta/B_{iv}^{0.28}$] proved to be adequate for predicting the behavior of the mixture in the tests studied here. Through this index, it was possible to obtain a relationship between the RCS and RTCD tests, in addition to obtaining a relationship between the accumulated loss of mass (PMA) with the number of cycles in the durability test and a relationship between the dynamic modulus (|E*|), frequency (F) and temperature (TT) in the complex modulus test.

Keywords: *Recycling, reclaimed asphalt pavement, ground glass, carbide lime, chemical stabilization.*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1. RELEVÂNCIA DA PESQUISA	19
1.2. OBJETIVO GERAL.....	21
1.3. OBJETIVO ESPECÍFICO.....	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1. RECICLAGEM.....	22
2.2. MATERIAL ASFÁLTICO FRESADO	24
2.2.1. Classificação dos tipos de fresagem	25
2.2.2. Granulometria da fresagem	28
2.3. VIDRO MOÍDO.....	29
2.3.1. Conceito	29
2.3.2. Estrutura do vidro	31
2.4. CAL DE CARBURETO.....	36
2.5. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	37
2.5.1. Estabilização granulométrica	38
2.5.2. Estabilização química	40
2.5.2.1. Solo-cimento	41
2.5.2.2. Solo-cal.....	44
2.5.3. Estabilização química do Material fresado	48
2.5.4. Estabilização química com vidro moído	50
2.5.5. Relação entre porosidade e teores volumétricos de cimento, cal e ligante	51
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	54
3.1. PLANEJAMENTO DA PESQUISA.....	54
3.2. MATERIAIS.....	55
3.2.1. Material Asfáltico Fresado	55
3.2.2. Vidro	57
3.2.3. Cal de Carbureto	60
3.2.4. Água.....	61
3.3. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS	62
3.3.1. Análise Granulométrica	62
3.3.2. Massa específica dos materiais.....	64

3.3.2.1.	Agregados Miúdos	65
3.3.2.2.	Agregados Graúdos	66
3.4.	MÉTODOS	69
3.4.1.	Preparo das misturas	69
3.4.2.	Dosagem e misturas	70
3.4.3.	Ensaio de Compactação Proctor	73
3.4.4.	Moldagem e cura	74
3.4.5.	Procedimentos dos ensaios	75
3.4.5.1.	Ensaio de Resistência à compressão simples (RCS)	75
3.4.5.2.	Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD)	77
3.4.5.3.	Ensaio de Durabilidade	78
3.4.5.4.	Módulo de Resiliência (MR)	80
3.4.5.5.	Módulo Complexo (E^*)	84
3.5.	PROJETO DE EXPERIMENTOS	90
4.	RESULTADOS	93
4.1.	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA	93
4.1.1.	Resistência à compressão simples (RCS)	93
4.1.2.	Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)	95
4.1.3.	Comparação e relação de η/B_{iv} entre os ensaios de RCS e RTCD	96
4.1.4.	Experimento fatorial 2^k dos ensaios de RCS e RTCD	99
4.2.	ENSAIO DE DURABILIDADE POR MOLHAGEM E SECAGEM	101
4.2.1.	Relação de η/B_{iv} para o ensaio de Durabilidade por molhagem e secagem	105
4.2.2.	Experimento fatorial 2^k do ensaio de Durabilidade	108
4.3.	ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)	110
4.3.1.	Relação de η/B_{iv} para o ensaio de Módulo de Resiliência	113
4.3.2.	Experimento fatorial 2^k do ensaio de Módulo de Resiliência	114
4.4.	ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO (E^*)	115
4.4.1.	Relação de η/B_{iv} para o ensaio de Módulo Complexo	123
4.4.2.	Experimento fatorial 2^k do ensaio de Módulo Complexo	130
5.	CONSIDERAÇÃO FINAIS	136
5.1.	CONCLUSÕES	136
5.1.1.	Resistência à compressão simples	136
5.1.2.	Resistência à tração por compressão diametral	137

5.1.3. Durabilidade por molhagem e secagem	138
5.1.4. Módulo de resiliência.....	139
5.1.5. Módulo complexo	140
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	142
REFERÊNCIAS	143
APÊNDICE A: DADOS GERAIS DE MOLDAGEM.....	153
APÊNDICE B: RESULTADOS DO ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO	159
APÊNDICE C: ISOTERMAS – RESULTADOS DOS MÓDULO COMPLEXO.....	172
APÊNDICE D: ISOTERMAS – RESULTADOS DO ÂNGULO DE FASE.....	177
APÊNDICE E: ISOCRONAS – RESULTADOS DO MÓDULO COMPLEXO	182
APÊNDICE F: ISOCRONAS – RESULTADOS DO ÂNGULO DE FASE	192
APÊNDICE G: ESPAÇO COLE-COLE	202
APÊNDICE H: DIAGRAMA DE BLACK	204
APÊNDICE I: CURVAS MESTRAS.....	206

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Superfície de uma placa fresada (BONFIM, 2007)	25
Figura 2: Comparação de um cilindro de fresagem padrão e um cilindro de fresagem fina (BONFIM, 2007)	27
Figura 3: Cilindro de microfresagem (à esquerda) e uma comparação entre os dentes de fresagem padrão e de microfresagem (à direita) (BONFIM, 2007)	27
Figura 4: Curvas granulométricas do agregado original e do agregado fresado com e sem extração de betume (BONFIM, 1999 modificado por DELLABIANCA, 2004)	28
Figura 5: Arranjo tetraédrico do SiO_4^{4-} (VAN VLACK, 2000)	32
Figura 6: Representação bidimensional dos arranjos da sílica (a) cristalina e (b) não-cristalina (CALLISTER, 2006 adaptado pelo autor)	34
Figura 7: Íons de sódio (Na^+) presente nos interstícios da rede de SiO_2 (SHACKELFORD, 2008)	35
Figura 8: Estados físicos de misturas solo-agregado (YODER; WITCZAK, 1975)	39
Figura 9: Efeito da quantidade de cimento sobre a resistência à compressão simples para vários tipos de solos curados por 7 dias (adaptado de INGLES; METCLAF, 1972)	42
Figura 10: Efeito da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples para vários tipos de solos curados por 7 dias (adaptado de INGLES; METCLAF, 1972)	46
Figura 11: Mecanismos de estabilização solo-cal (adaptado de Ingles e Metcalf, 1972)	48
Figura 12: Determinação da relação vazios/cimento para dosagem da mistura (FOPPA, 2005)	52
Figura 13: Local da retirada do material asfáltico fresado (LUZZI, 2019)	56
Figura 14: Equipamento realizando serviço de fresagem (a) e detalhe do tambor de fresagem (b) (LUZZI, 2019)	56
Figura 15: Granulometrias de RAP utilizadas na pesquisa	57
Figura 16: Distribuição granulométrica do vidro moído de acordo com o tempo de moagem	58
Figura 17: Granulometrias do vidro utilizado na pesquisa com a descrição da origem de cada uma	59
Figura 18: Distribuição granulométrica do material fresado e do vidro moído	63
Figura 19: Ensaios de sedimentação e granulometria a laser para o vidro moído e a cal de carbureto	63
Figura 20: Massa específica real (a), aparente (b) e efetiva (c) (BERNUCCI <i>et al</i> , 2008)	64

Figura 21: Ensaio de Picnômetro.....	65
Figura 22: Procedimento para o ensaio do cesto metálico (BERNUCCI <i>et al.</i> , 2008 adaptado pelo autor).....	67
Figura 23: Esquematização das proporções de RAP e vidro moído na mistura para (a) VM ₂₀₀ = 10%, (b) VM ₂₀₀ = 15% e (c) VM ₂₀₀ = 25%.....	70
Figura 24: Distribuição granulométrica das misturas utilizadas	72
Figura 25: Ensaio de compactação Proctor Modificado para as três misturas estudadas e os dois pontos escolhidos para a realização dos corpos de prova	73
Figura 26: Equipamento para o ensaio de resistência à compressão simples	76
Figura 27: Equipamento para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral	78
Figura 28: Corpos de prova após 28 dias de cura	79
Figura 29: Deformações sob carregamentos repetidos (HUANG, 2004)	81
Figura 30: Execução do ensaio de módulo de resiliência	83
Figura 31: Duração dos tempos de carregamento e repouso (BERNUCCI <i>et al.</i> , 2008).....	83
Figura 32: Comportamento viscoelástico sob carregamento harmônico (BERNUCCI <i>et al.</i> , 2008 adaptado pelo autor)	85
Figura 33: Execução do ensaio de módulo complexo	87
Figura 34: Representação da curva mestra de módulo dinâmico (BERNUCCI <i>et al.</i> , 2008) ..	88
Figura 35: Representação do modelo reológico 2S2P1D (OLARD; DI BENEDETTO, 2003)	89
Figura 36: Representação de um experimento 2 ² (a) e 2 ³ (b) (SCHEUERMANN FILHO, 2019)	91
Figura 37: Resultados de q _u obtidos para as diferentes misturas.....	94
Figura 38: Resultados de q _t obtidos para as diferentes misturas	96
Figura 39: Relação entre q _u e q _t	97
Figura 40: Relação entre $\eta/B_{iv}^{0,28}$ para q _u e q _t	98
Figura 41: Gráfico de Pareto e de efeitos principais de RCS para teores de VM ₂₀₀ de 10% e 15%	100
Figura 42: Gráfico de Pareto e de efeitos principais de RCS para teores de VM ₂₀₀ de 10% e 25%	100
Figura 43: Gráfico de Pareto e de efeitos principais de RTCD para teores de VM ₂₀₀ de 10% e 15%	101
Figura 44: Gráfico de Pareto e de efeitos principais de RTCD para teores de VM ₂₀₀ de 10% e 25%	101

Figura 45: Perda de Massa Individual (PMI) por ciclo para o ensaio de durabilidade.....	102
Figura 46: Perda de Massa Acumulada (PMA) para o ensaio de durabilidade.....	103
Figura 47: Resultado dos 12 corpos de prova após 12 ciclos de molhagem e secagem.....	105
Figura 48: Relação entre $\eta/B_{iv}^{0,28}$ para o ensaio de Durabilidade para diferentes ciclos.....	106
Figura 49: Relação entre a constante A e o número de ciclos.....	107
Figura 50: Gráfico de Pareto e de efeitos principais de Durabilidade para teores de VM ₂₀₀ de 10% e 15%.....	109
Figura 51: Gráfico de Pareto e de efeitos principais de Durabilidade para teores de VM ₂₀₀ de 10% e 25%.....	109
Figura 52: Resultados de MR obtidos para diferentes as diferentes misturas.....	111
Figura 53: Resultados da relação MR/RT para as diferentes misturas.....	113
Figura 54 - Relação entre $\eta/B_{iv}^{0,28}$ para o ensaio de MR.....	114
Figura 55 - Gráfico de Pareto e de efeitos principais de MR para teores de VM ₂₀₀ de 10% e 15%.....	115
Figura 56 - Gráfico de Pareto e de efeitos principais de MR para teores de VM ₂₀₀ de 10% e 25%.....	115
Figura 57: Resultado dos dados experimentais e do modelo reológico 2S2P1D para o espaço Cole-Cole da mistura FV-20-25-7.....	119
Figura 58: Resultado do modelo 2S2P1D do espaço Cole-Cole para as 12 misturas estudadas.....	119
Figura 59: Resultado dos dados experimentais e do modelo reológico 2S2P1D para o diagrama de Black da mistura FV-20-25-7.....	120
Figura 60: Resultado do modelo 2S2P1D do Diagrama de Black para as 12 misturas estudadas.....	121
Figura 61: Resultado do modelo 2S2P1D das curvas mestras de módulo complexo para as 12 misturas estudadas.....	122
Figura 62: Relação entre $ E^* $ e η/B_{iv} para a frequência de 0,1 Hz.....	123
Figura 63: Relação entre $ E^* $ e η/B_{iv} para a frequência de 0,2 Hz.....	124
Figura 64: Relação entre $ E^* $ e η/B_{iv} para a frequência de 0,5 Hz.....	124
Figura 65: Relação entre $ E^* $ e η/B_{iv} para a frequência de 1 Hz.....	125
Figura 66: Relação entre $ E^* $ e η/B_{iv} para a frequência de 2 Hz.....	125
Figura 67: Relação entre $ E^* $ e η/B_{iv} para a frequência de 5 Hz.....	126
Figura 68: Relação entre $ E^* $ e η/B_{iv} para a frequência de 10 Hz.....	126
Figura 69: Relação entre $ E^* $ e η/B_{iv} para a frequência de 20 Hz.....	127

Figura 70: Relação entre $ E^* $ e η/B_{iv} para a frequência de 25 Hz	127
Figura 71: Relação entre a constante A e a frequência (F)	128
Figura 72: Relação entre a constante Z e a temperatura (TT)	129
Figura 73 - Gráfico de Pareto e de efeitos principais de $ E^* $ para teores de VM ₂₀₀ de 10% e 15% nas temperaturas de 4°C, 21°C, 37°C, 54°C e frequência de 1Hz.....	132
Figura 74 - Gráfico de Pareto e de efeitos principais de $ E^* $ para teores de VM ₂₀₀ de 10% e 25% nas temperaturas de 4°C, 21°C, 37°C, 54°C e frequência de 1Hz.....	133
Figura 75 - Gráfico de Pareto e de efeitos principais de $ E^* $ para teores de VM ₂₀₀ de 10% e 15% nas temperaturas de 4°C, 21°C, 37°C, 54°C e frequência de 10Hz.....	134
Figura 76 - Gráfico de Pareto e de efeitos principais de $ E^* $ para teores de VM ₂₀₀ de 10% e 25% nas temperaturas de 4°C, 21°C, 37°C, 54°C e frequência de 10Hz.....	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos principais tipos de vidro	30
Tabela 2: Composição de diversos tipos de vidro (valores apenas típicos)	31
Tabela 3: Composição química dos vidros estudados	60
Tabela 4: Composição química da cal de carbureto	61
Tabela 5: Distribuição Granulométrica do material fresado e do vidro moído	62
Tabela 6: Massa específica dos grãos para o material fresado e o vidro moído	66
Tabela 7: Massas específicas e absorções obtidas com o ensaio do cesto metálico do material fresado	68
Tabela 8: Massas específicas dos grãos (ρ_s) do material fresado e vidro moído utilizados na pesquisa	68
Tabela 9: Distribuição dos corpos de prova (CP's) por ensaio realizado	69
Tabela 10: Nomenclatura adotada para cada mistura	69
Tabela 11: Distribuição granulométrica dos materiais e das misturas utilizadas	72
Tabela 12: Umidade (w) e massa específica aparente seca (γ_d) das três misturas.....	74
Tabela 13: Variáveis controláveis e níveis selecionados para o projeto de experimentos.....	91
Tabela 14: Resultados de RCS para cada mistura	94
Tabela 15: Resultados de RTCD para cada mistura	95
Tabela 16: Relação entre q_l/q_u para cada mistura	97
Tabela 17: Resultados da PMA após 12 ciclos	104
Tabela 18: Resultados de MR para cada mistura.....	110
Tabela 19: Resultados de MR, RT e MR/RT	112
Tabela 20: Resultados dos parâmetros do modelo 2S2P1D	118
Tabela 21: Determinação da constante A.....	128
Tabela 22: Constante Z	129

LISTA DE SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais;

ASTM – American Society for Testing And Materials;

CAH – Aluminato Hidratado de Cálcio;

CC – Cal de carbureto;

CEMPRE – Compromisso Empresarial Para Reciclagem;

CSH – Silicato Hidratado de Cálcio;

CP – Corpo de prova;

CR – Crushed Rock (pó-de-pedra);

CV – Coeficiente de variação (%);

DNER – Departamento Nacional De Estradas De Rodagem;

DNIT – Departamento Nacional De Infraestrutura De Transporte;

DRX – Difração de Raios-X;

FRX – Fluorescência de Raios-X;

FV – Mistura Fresado-Vidro na proporção 70/30;

LACER – Laboratório de Materiais Cerâmicos;

LEGG – Laboratório de Ensaios Geotécnicos e Geoambientais;

LVDT – Linear Variable Differential Transducer;

MF – Material Fresado;

MME – Ministério de Minas e Energia;

MR – Módulo de Resiliência (MPa);

NBR – Norma Brasileira;

PCA – Portland Cement Association;

PMA – Perda de Massa Acumulada (%);

RAP – Reclaimed Asphalt Pavement (material asfáltico fresado);

RCS – Resistência à Compressão Simples;

RT – Resistência à Tração;

RTCD – Resistência À Tração Por Compressão Diametral;

TRB – Transportation Research Board;

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul;

UFSM – Universidade Federal de Santa Maria;

VM – Vidro Moído;

VM₂₀₀ – Vidro Moído passante na peneira n. 200.

LISTA DE SÍMBOLOS

- γ_d - Peso específico aparente seco (kN/m³);
- η - porosidade (%);
- μ - coeficiente de Poisson;
- ρ_s - Massa específica real (g/cm³);
- ρ_{ap} - Massa específica aparente (g/cm³);
- ρ_w - densidade da água (g/cm³);
- ω - Velocidade angular ($\omega=2\pi f$);
- Δ = deformação elástica ou resiliente registrada no microcomputador;
- \mathcal{E} - Deformação harmônica;
- \mathcal{E}_0 - Amplitude de Deformação;
- \mathcal{E}_r - Deformação recuperável;
- σ - Tensão;
- σ_0 - Amplitude de tensão;
- σ_d - Tensão desvio;
- ϕ - Ângulo de fase;
- A - Área do corpo de prova;
- A_a - absorção (%);
- B_{iv} - Teor volumétrico de agente cimentante (pozolana + cal);
- C_{iv} - Teor volumétrico de Cimento;
- D - Diâmetro médio (cm);
- d - Massa específica aparente (g/cm³);
- d_a - massa específica na condição seca (g/cm³);
- d_r - Deslocamento resiliênte;
- E^* - Módulo Complexo;
- $|E^*|$ - Módulo Dinâmico;
- E1 - Módulo de armazenamento;
- E2 - Módulo de perda;
- F - Carga de Ruptura (N);
- f - Frequência;
- G_0 - Módulo cisalhante inicial (MPa);
- Gmm - Massa específica máxima pelo método Rice (g/cm³);

G_s – Massa específica real (g/cm^3);
 G_{sa} – Massa específica aparente (g/cm^3);
 G_{se} – Massa específica efetiva (g/cm^3);
 H – Altura média do corpo de prova (cm);
 H_0 – Altura de referência;
 i – Número imaginário;
 k – Expoente de ajuste;
 L_{iv} – Teor volumétrico de cal;
 M_i – Massa da amostra imersa em água;
 M_s – Massa da amostra seca;
 M_{sat} - Massa da amostra na condição saturada superfície seca;
 M_1 – Massa do agregado seco para o ensaio do picnômetro;
 M_2 – Massa do agregado + picnômetro + água;
 M_3 – Massa do picnômetro + água;
 P – Carga cíclica aplicada;
 PMA – Perda de Massa Acumulada (%);
 q_u – Resistência à Compressão Simples (kPa);
 q_t – Resistência à Tração (kPa);
 T – Temperatura ($^{\circ}\text{C}$);
 t_i – Atraso de tempo entre um ciclo da senóide de tensão e deformação (s);
 t_p – Tempo de um ciclo de tensão (s);
 V_v - Volume de vazios;
 V_c - Volume de cimento;
 V_{tot} - Volume total;
 VM_{200} – Vidro Moído passante na peneira n. 200;
 w – teor de umidade (%);
%1 – Porcentagem da fração 1 na mistura;
%2 – Porcentagem da fração 2 na mistura.

1. INTRODUÇÃO

1.1. RELEVÂNCIA DA PESQUISA

O transporte rodoviário é atualmente o modal mais importante para o Brasil, tendo em vista que a locomoção de cargas e transporte de passageiros se desenrolam principalmente por meio de veículos rodoviários. Medina e Motta (2005) afirmam que as rodovias transportam 60% da carga e 96% dos passageiros no Brasil, o que é um valor bastante expressivo e de grande volume visto as dimensões continentais do país. Dados mais atuais de 2019 (CNT, 2019) mostram que estes valores se mantêm nos dias atuais (61% do transporte de carga e 95% do transporte de passageiros). Evidenciando, assim, a consolidação deste modal ao longo dos anos e mostrando a importância da infraestrutura rodoviária para o desenvolvimento econômico do país.

Em valores quantitativos, a CNT (2019) levantou dados que mostram o Brasil com um total de 1.720.700 km de rodovias (federais, estaduais e municipais), dos quais apenas 12,4% (213.453 km) são pavimentadas. Isso mostra que, apesar da grande quantidade, ainda há muito a se desenvolver neste modal. Com base nisso, a busca por novas soluções e novos materiais surgem como uma necessidade.

Compreender e estudar as características da rodovia, além de pesquisar novas tecnologias e alternativas, se torna de extrema importância econômica e ambiental para o país. Do ponto de vista econômico, para diminuir os custos elevados de manutenção, pesquisadores e gestores vêm buscando encontrar novas opções para o aproveitamento dos materiais, diminuir o consumo de energia, agilizar as intervenções de restauração, entre outros. Enquanto que do ponto de vista ambiental, buscam-se minimizar o consumo de agregados naturais, as movimentações de terras, os combustíveis utilizados, entre outros (PIRES, 2014).

Com este mesmo raciocínio, a busca mundial por uma sociedade mais sustentável faz com que descobertas de novas formas de reciclar e de reutilizar resíduos em diversas aplicações sejam cada vez mais necessárias, se tornando inclusive uma alternativa viável na manutenção e reabilitação de estradas (LINDSEY, 2011; TAHA *et al.*, 2002).

Segundo Mohammadinia *et al.* (2018) utilizar resíduos para elevar a resistência e rigidez de agregados reciclados pode ser uma solução ideal para reduzir a emissão de carbono nas atividades da construção civil e a rápida taxa do esgotamento dos recursos naturais. Esse tipo de resíduo proveniente da construção e demolição, tais como concreto reciclado, tijolo moído ou material asfáltico fresado (RAP), pode ser aplicado de diferentes formas, sendo que nos últimos anos tem tido um interesse crescente em sua utilização em estradas e pavimentos, como camada de base e sub-base, além de aterros (SAS, 2015; ARULRAJAH *et al.*, 2014).

Na pavimentação, a utilização de materiais reciclados vem sendo largamente estudada nos últimos anos por ser uma alternativa técnica politicamente correta e economicamente viável (DISFANY *et al.*, 2012). Isso se estende principalmente ao RAP, pois este aproveita o agregado do pavimento envelhecido para ser reutilizado em novas camadas de pavimento, desde que atenda as especificações e tenha boa capacidade de suporte de acordo com as características da via. Todo ano milhões de toneladas de material asfáltico fresado são gerados e uma boa porcentagem já vem sendo reciclada em novos pavimentos (HOYOS *et al.* 2011).

Como nem sempre é possível aumentar a capacidade de suporte de uma camada de base ou sub-base apenas com o agregado reciclado em si, tem-se utilizado com muita frequência adições de materiais na mistura, garantindo uma adequada estabilização granulométrica ou química.

Para a estabilização química, tem-se empregado materiais com características aglomerantes, como a cal hidratada ou o cimento Portland, sendo largamente utilizados para camadas como solos-cal e solos-cimentos (INGLES; METCALF, 1972). Porém, estas alternativas são danosas ao meio ambiente, pela utilização intensa dos recursos naturais e emissão de gás carbônico (MME, 2009), podendo ser, inclusive, economicamente desfavorável sua utilização.

Uma solução para isso é a utilização de resíduos (também chamado de subprodutos) industriais ou domésticos que apresentem características úteis para o melhoramento da camada. Dentre essas, Scheuermann Filho (2019) destaca as atividades pozolânica e a alta alcalinidade quando em solução. Pode-se citar resíduos como cinza volante, cinza de casca de arroz, escória de alto forno, pó de vidro moído e outras pozolanas artificiais como materiais com atividade pozolânica (MASSAZZA, 2004; CONSOLI *et al.*, 2018b), enquanto a cal de

carbureto, resíduo proveniente da produção de gás acetileno, é um resíduo altamente alcalino devido à grande quantidade de hidróxido de cálcio na sua composição (SALDANHA *et al.*, 2018).

Nesse sentido, o presente trabalho busca obter uma solução viável do ponto de vista de engenharia através do estudo do comportamento mecânico de uma mistura de três resíduos, sendo estes o material asfáltico fresado, o vidro moído e a cal de carbureto, visando proporcionar, assim, economia e sustentabilidade. Para isso, ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, durabilidade, módulo de resiliência e módulo complexo serão executados e estudados, buscando-se verificar o desempenho das proporções de vidro moído e cal de carbureto na composição da mistura.

1.2. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a influência da adição, em diferentes proporções, de vidro moído e cal de carbureto ao material asfáltico fresado, investigando as propriedades de resistência, rigidez e durabilidade da mistura para a sua aplicação como camada de base e sub-base de pavimentos.

1.3. OBJETIVO ESPECÍFICO

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos foram traçados:

- a) Avaliar o comportamento da mistura cimentada para os ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS), Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD), Durabilidade por molhagem e secagem, Módulo de Resiliência (MR) e Módulo Complexo (E^*);
- b) Quantificar estatisticamente a influência das variáveis de interesse (teor de vidro moído, teor de cal de carbureto, peso específico aparente seco) nos ganhos de resistência, rigidez e durabilidade;
- c) Analisar e encontrar relações entre o índice η/B_{iv} e cada um dos ensaios aqui estudados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. RECICLAGEM

Uma sociedade sustentável é aquela que atende às necessidades de uma geração atual sem comprometer às necessidades das gerações futuras (LINDSEY, 2011). Tendo em vista isso, a reciclagem e o reaproveitamento dos materiais descartados surgiram como uma proposta para minimizar os danos causados pelo ser humano e garantir uma sociedade mais sustentável.

A reciclagem é uma das principais estratégias para a minimização de resíduos, gerando benefícios como a redução da demanda por novos recursos, o uso de resíduos que seriam lançados em aterros sanitários e a redução dos custos de transporte e energia (DISFANY *et al.*, 2012).

Os resíduos são considerados qualquer tipo de subproduto de atividade humana e industrial que não tem valor duradouro (YONUS ALI *et al.*, 2011). Isso inclui os materiais empregados na presente pesquisa: material asfáltico fresado, cal de carbureto e vidro plano moído.

Com relação ao material asfáltico fresado e reciclado (RAP, do inglês “*Reclaimed Asphalt Pavement*”), os volumes deste material produzidos são bastante expressivos. Um relatório divulgado pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA em 1993 estimou em 73 milhões de toneladas anuais a quantidade de pavimento asfáltico reciclado, o que equivale a aproximadamente 80% do total de material fresado (HOYOS *et al.*, 2011). Segundo Balbo (2007) só no município de São Paulo se teve uma quantidade estimada de 400 mil toneladas no ano de 2003, o que representa uma economia em agregados novos de, aproximadamente, 12 milhões de reais.

Por conta disso, o agregado do RAP, juntamente com outros materiais de construção e demolição (como agregado de concreto reciclado e tijolo moído), tem bastante potencial e interesse para ser reutilizado na construção civil, visto os benefícios ambientais e econômicos. Porém a incerteza da qualidade dos agregados faz o setor industrial relutar em utilizar esse tipo de material nas atividades de construção (MOHAMMADINIA *et al.*, 2018).

Hoyos *et al.* (2011) colocam que tradicionalmente os agregados naturais são obtidos a partir de uma variedade de rochas geradoras para serem usados como materiais de base rodoviária. Contudo, a extração desses agregados naturais é cada vez mais restringida pela expansão da urbanização, aumento dos custos de extração e maiores preocupações ambientais. Com base nisso, os autores dizem que o uso de RAP na construção de estradas comprovadamente reduz a taxa de esgotamento desses recursos naturais e a quantidade de resíduos de construção eliminados em aterros urbanos. Também foram relatadas economias consideráveis nos custos gerais dos projetos de construção de pavimentos.

O vidro, segundo Basu e Puppala (2015), é considerado o segundo maior material de reciclagem do mundo, perdendo apenas para o papel. Segundo os autores, nos EUA os resíduos de vidro constituem até 7% de todo o lixo sólido urbano gerado. Metwally (2007) diz que o vidro descartável não reciclável constitui um problema para a eliminação de resíduos sólidos em muitos países, uma vez que o vidro não é biodegradável. Por conta disso, existe uma forte necessidade da reutilização dos vidros descartáveis.

Segundo dados da CEMPRE (2019), de todo o resíduo urbano gerado no Brasil, em média 3% são produtos feitos com vidro, dos quais um terço vem de embalagens e garrafas. Cerca de 47% das embalagens de vidro foram recicladas em 2011, o que representa 470 mil toneladas por ano. Segundo Sales (2014), dados levantados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE mostram que a reciclagem de vidro concentra-se amplamente no segmento de embalagens (apenas 20% do vidro utilizado em embalagens foram destinados aos aterros sanitários).

Porém no caso de vidros planos, a CEMPRE (2019) diz que, por terem composição química diferentes, vidros planos vindos da construção civil ou de automóveis não podem ser reciclados para a produção de novas embalagens e garrafas. Incluem-se nessa lista também os vidros com pedaços de cristais, lâmpadas e espelhos. Devido a essa diferença na composição química, esses tipos de vidro causam trincas e defeitos nas novas embalagens. No entanto, algumas indústrias de vidro já incorporam percentuais de vidro plano na produção.

Por fim, o último resíduo desta pesquisa é a cal de carbureto, um subproduto resultante da reação química entre o carbetto de cálcio (CaC_2) e a água para a obtenção do gás acetileno. Thomé (1999) e Thomé *et al.* (1999) dizem que são produzidas 8 toneladas diárias deste resíduo, e o mesmo vem sendo depositado em aterros sanitários. Além disso, possui custo de armazenamento e é um potencial poluidor do meio ambiente devido à sua alta alcalinidade.

Outra vantagem é que este resíduo é um possível substituto da cal hidratada, mesmo contendo menores quantidades de Ca(OH)_2 em sua composição, responsáveis pelas reações cimentantes. Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME, 2009), a indústria da cal está entre as mais poluidoras do meio ambiente, desde a extração do calcário até a fase da cal propriamente dita. A estimativa de emissão de CO_2 de todo o processo de produção é de 1131 kg de CO_2 por tonelada de cal virgem produzida, além da extração de 1750 kg de calcário. Para a obtenção da cal hidratada, ainda é necessária a adição de 240 litros de água por tonelada.

2.2. MATERIAL ASFÁLTICO FRESADO

A pavimentação teve um grande desenvolvimento no Brasil a partir dos anos 50, graças ao intercâmbio entre Brasil e Estados Unidos nesta época, cujo motivo foi da necessidade de uniformizar e normalizar as especificações de serviço e as técnicas de construção (DNIT, 2006).

A ideia de reprocessar os materiais de pavimentação de pistas deterioradas por meio da reciclagem ganhou relevância aproximadamente 20 anos depois, a partir da década de 1970, com a crise do petróleo, onde, além da crise econômica internacional, havia também escassez de materiais asfáltico. Assim, a reciclagem do pavimento se tornou uma opção interessante e necessária internacionalmente (BONFIM, 2007). A partir daí, quando um pavimento asfáltico em uso se torna deteriorado estruturalmente, há a opção de restaurar sua capacidade de carga através da colocação de espessuras adicionais de camadas ou através do corte de parte ou todo revestimento por meio da fresagem, sendo esse material cortado uma opção para o reaproveitamento por reciclagem (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Segundo Bonfim (2007), inicialmente o material era extraído das pistas por meio de escarificação do pavimento e levado para processamento em usinas. Porém esse procedimento era inadequado, pois resultava no aparecimento de pedaços muito grandes que necessitavam ser posteriormente quebrados ou rebitados para serem utilizados na mistura reciclada. Além disso, era impossível extrair apenas uma espessura pré-determinada em projeto, por se tratar de um “arrancamento”. Por conta disso, na segunda metade da década de 1970, foi criado um equipamento de fresagem adequado que garantia o desbaste do pavimento em profundidades pré-definidas, a fresadora. No Brasil a primeira fresadora surgiu em 1980, nas obras de

restauração da Via Anchieta em São Paulo. Segundo Bernucci *et al.* (2008), há diversos tipos distintos de fresadoras atualmente, que utilizam rolos especiais munidos de pontas (bits) diamantadas cortantes, responsáveis pelo desbaste da camada a uma profundidade pré-determinada (BERNUCCI *et al.* 2008).

A fresagem de um pavimento pode ser realizada de duas maneiras quanto à temperatura de ocorrência, sendo elas a frio ou a quente. No caso da fresagem a frio o processo é realizado à temperatura ambiente, nesse tipo de fresagem ocorre a quebra de parte dos agregados na profundidade de corte e, conseqüentemente, na alteração da curva granulométrica. Na fresagem a quente é efetuado um pré-aquecimento no revestimento, oferecendo assim uma diminuição da resistência ao corte da camada e tendo pouca alteração na granulometria do agregado (BONFIM, 2007). A Figura 1 mostra uma superfície fresada a frio, onde se pode observar a ocorrência da quebra de agregados na linha de corte.



Figura 1: Superfície de uma placa fresada (BONFIM, 2007)

2.2.1. Classificação dos tipos de fresagem

Segundo Bonfim (2007), pode-se classificar a fresagem de pavimentos quanto à espessura de corte e à rugosidade resultante na pista.

Com relação à espessura de corte, o autor classifica em:

- a) Fresagem superficial – Destinada apenas à correção de defeitos existentes na superfície do pavimento. Pode-se dispensar o posterior recapeamento da pista (excetuando-se em pontos onde a desagregação do revestimento remanescente acarrete a formação de buracos), uma vez que a textura final permite o

rolamento de forma segura, porém não muito confortável. Defeitos do tipo exsudação e deformações plásticas são tratados com o emprego dessa técnica;

- b) Fresagem rasa – Atinge em geral as camadas superiores do pavimento, podendo chegar, em alguns casos, à camada de ligação. A profundidade média de corte tem em torno de 5 cm. Esse procedimento é utilizado na correção de defeitos funcionais e em remendos superficiais, sendo aplicado também em vias urbanas quando se deseja manter o greide do pavimento com relação aos dispositivos de drenagem superficial. A textura resultante desse tipo de fresagem aumenta a ligação ou a resistência ao cisalhamento entre o antigo pavimento e a nova camada de revestimento;
- c) Fresagem profunda – É aquela em que o corte atinge níveis consideráveis, alcançando as camadas de ligação, de base e até de sub-base do pavimento. Esse procedimento objetiva o aspecto estrutural, seja por recomposição da estrutura do pavimento ou mesmo por reciclagem e incorporação do revestimento à base. Do ponto de vista funcional, também é utilizado para correção do greide original das vias, em serviços de pequenos remendos e para requadramento de buracos.

Com relação à rugosidade resultante, esta depende do tipo de cilindro utilizado na execução e na velocidade de operação. O autor classifica em:

- a) Fresagem padrão – O primeiro a ser utilizado, utiliza-se este tipo de fresagem para o desbaste de camada especificada em projeto para a aplicação de nova camada de revestimento, os demais se tornam inviáveis pelo maior consumo de dentes de corte. A distância lateral entre os dentes de corte é de aproximadamente 15 mm;
- b) Fresagem fina – Muito utilizada na regularização das vias, por possibilitar melhores condições de trafegabilidade aos usuários, sendo que em alguns casos pode-se dispensar o posterior recapeamento da pista. A distância lateral entre os dentes de corte é de aproximadamente 8 mm, por conta disso tem sulcos menores e, por consequência, a pista tem menor rugosidade se comparada com a fresagem padrão;
- c) Microfresagem – Consiste na remoção de uma camada muito delgada do revestimento, visando a adequação do perfil longitudinal ou retirada de faixas

de sinalização horizontal. A distância lateral entre os dentes de corte é de aproximadamente 2 a 3 mm e a posterior aplicação de nova camada de revestimento é totalmente dispensada.

A Figura 2 mostra um comparativo entre os cilindros de fresagem padrão e fresagem fina, enquanto a Figura 3 mostra um cilindro de microfresagem e uma comparação entre os dentes da fresagem padrão da microfresagem.

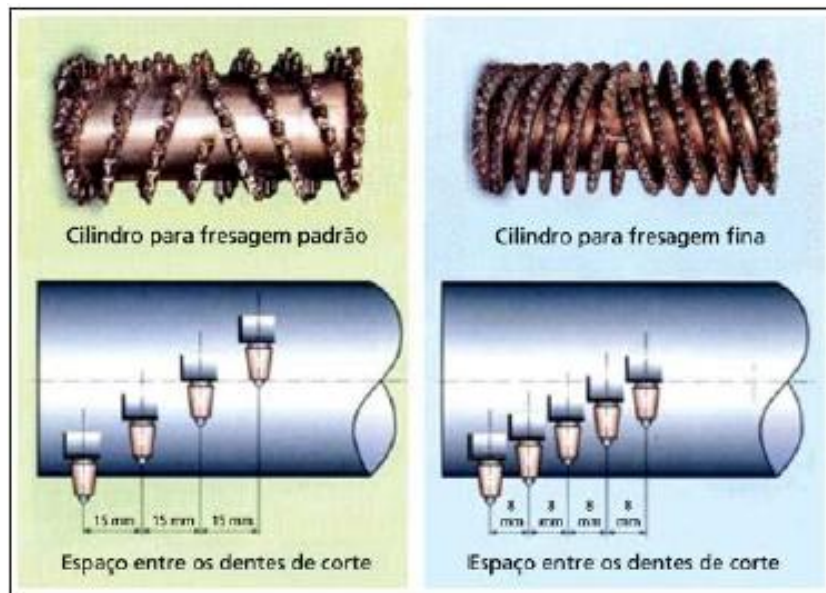


Figura 2: Comparação de um cilindro de fresagem padrão e um cilindro de fresagem fina (BONFIM, 2007)



Figura 3: Cilindro de microfresagem (à esquerda) e uma comparação entre os dentes de fresagem padrão e de microfresagem (à direita) (BONFIM, 2007)

2.2.2. Granulometria da fresagem

Devido à fresagem, o agregado original que compõe a mistura asfáltica sofre modificação granulométrica. Segundo Dellabianca (2004) e Bonfim (2007) isso acontece pelo fato da fresagem quebrar parte dos agregados presentes na altura da linha de corte da máquina. Dessa forma, se for retirado todo o betume do agregado fresado, este apresentará uma porcentagem de finos maior do que o agregado original. Porém, se o betume for mantido no agregado, este apresentará uma granulometria mais grosseira, como mostrado na Figura 4.

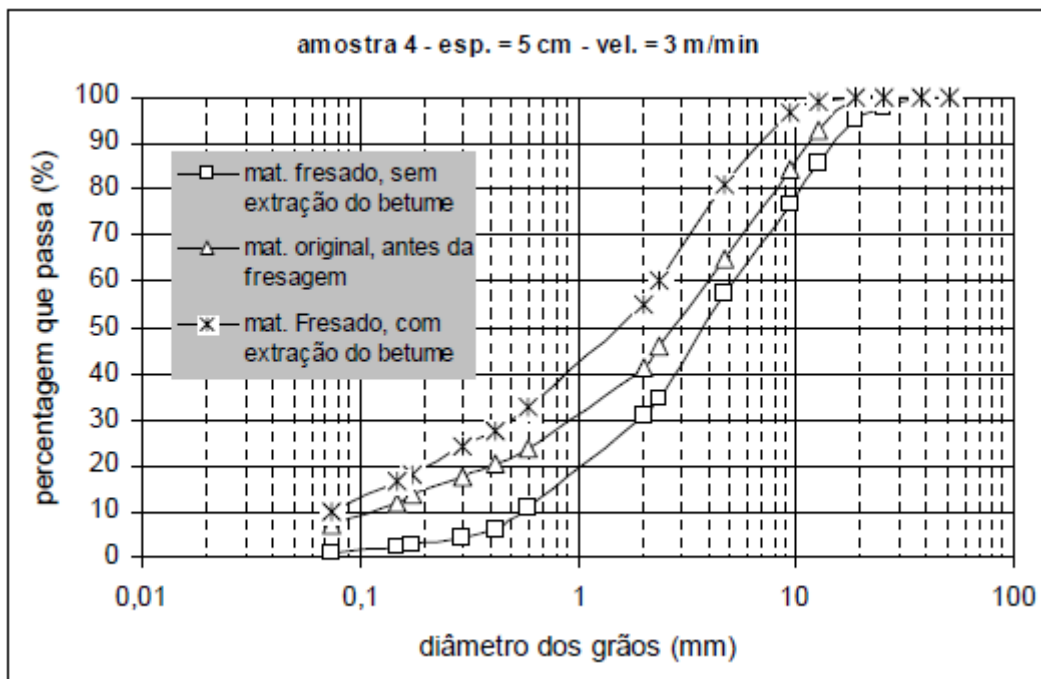


Figura 4: Curvas granulométricas do agregado original e do agregado fresado com e sem extração de betume (BONFIM, 1999 modificado por DELLABIANCA, 2004)

O autor também estuda a profundidade de corte de fresagem (5 e 8 cm) e a velocidade de avanço da fresadora (3 e 10 m/min), obtendo como conclusões que ambas influenciam diretamente na granulometria do material fresado. Quanto menor a velocidade de avanço e quanto menor a profundidade de corte, mais finos a mistura apresenta.

Dellabianca (2004) também inclui como fatores que alteram a granulometria do material fresado a velocidade de rotação do tambor fresador e o sentido de rotação desse tambor (horário ou anti-horário). Bonfim (2007) diz que a atuação do tambor fresador se dá comumente no sentido anti-horário.

2.3. VIDRO MOÍDO

2.3.1. Conceito

Na linguagem comum, a palavra vidro é utilizada para designar um material incolor e frágil. Na linguagem científica, vidro é o sólido não cristalino obtido por resfriamento rápido (SALES, 2014). Segundo Petrucci (1987) o vidro já era fabricado em contas coloridas e opacas pelos egípcios há cerca de 5000 A.C. e tendo grande impulso na época do império romano, onde o vidro era translúcido com um tom esverdeado devido às impurezas de ferro.

No caso dos vidros planos, o processo de fabricação antigamente consistia em verter o conteúdo de um pote sobre uma mesa de ferro e aplainar com um rolo também de ferro. Em 1918 o processo foi melhorado por Bicheroux, que despejava o vidro fundido entre dois rolos, os quais ao girarem, formavam a placa de vidro. A Ford Motors CO., por fim, patenteou um processo contínuo de fabricação (PETRUCCI, 1987).

Atualmente há vários tipos de vidro disponíveis, cada um atendendo uma função diferente, fazendo com que a composição química de cada tipo de vidro seja ligeiramente diferente. Existem vidros com base em outros compostos, como sulfetos, fluoretos e até mesmo ligas metálicas (ASKELEND; WRIGHT, 2014). Scheuermann Filho (2019) apresenta as características dos principais tipos de vidro comercializados (Tabela 1), onde se percebe que há uma grande demanda por vidro sodo-cálcico que, segundo o autor, totaliza mais de 85% do total produzido globalmente. Essa demanda vem do fato desse tipo de material ser empregado em itens de grande consumo como janelas e garrafas. Por consequência, se torna também o de maior descarte.

Tabela 1: Classificação dos principais tipos de vidro

Tipo de Vidro	Características
Soda - Cal	Tipo mais comum de vidro produzido. Utilizado na fabricação de produtos como embalagens, janelas e itens que não necessitam de grande resistência química e/ou ao calor
Chumbo	Dotados de elevado índice de refração, brilho e densidade. São comumente utilizados como proteção para radiação e invólucros de lâmpadas fluorescentes
Boro-Silicatos	Tem baixa expansão térmica, boa resistência ao choque térmico e grande estabilidade química, sendo empregado em situações que requerem alta durabilidade do material vítreo
Ópticos	Possuem alta densidade e grande índice de refração. Majoritariamente usados na fabricação de lentes e afins
Alumino - Silicatos	Tem resistência a altas temperaturas e baixos coeficientes de expansão

FONTE: SCHEUERMANN FILHO (2019)

A Tabela 2 mostra a composição química de alguns tipos de vidro apresentado por diversas literaturas, sendo estes considerados apenas os valores típicos. Percebe-se que para os vidros planos há uma quantidade expressiva de sílica (SiO_2) e quantidades consideráveis de Na_2O e CaO . A quantidade de alumina (Al_2O_3), porém, é pouco significativo.

Com relação à fabricação do vidro soda-cal, Askelend e Wright (2014) dizem que é preciso aquecer a SiO_2 pura em temperaturas muito altas (como o caso da sílica fundida) para resultar em viscosidades que permitam uma fabricação economicamente viável. Para contornar esse problema, a maioria dos vidros comerciais à base de sílica, incorporam modificadores como a soda (Na_2O) com o objetivo de quebrar a estrutura do reticulado e formar uma mistura eutética que, por consequência, diminui a temperatura de fusão e facilita o processo de fabricação. A cal (CaO), por sua vez, é misturada para reduzir a solubilidade do vidro na água.

Segundo Sales (2014), os resíduos de vidro são gerados no processo de produção, utilização e descarte dos mesmos. Esses resíduos apresentam-se na forma de garrafas, embalagens com cores e dimensões variadas, cacos e pós finos.

Tabela 2: Composição de diversos tipos de vidro (valores apenas típicos)

Tipo de Vidro	SiO₂	Na₂O	CaO	Al₂O₃	B₂O₃	Outros
Sílica Fundida	>99,5					
96% de Sílica (Vycor TM)	96				4	
Borossilicato (Pyrex TM)	76-81	3,5-5	1	2-4	13	
Recipientes/garrafas	74-75	15-16	5-10	1-2		4MgO
Vidro plano	73	13	13	1		
Vidro para janelas	72	14	8-10	1		4MgO
Vidro de Chumbo	63	6				
Fibra de vidro	54-55		16-22	15	10	4MgO
Sílex óptico	54	1				37PbO 8K ₂ O
Vidrocerâmica (Pyroceram TM)	43,5	14		30	5,5	6,5TiO ₂ 0,5As ₂ O ₃

Fonte: CALLISTER (2008); ISAIA (2007); ASKELEND; WRIGHT (2014); SHACKELFORD (2008)

O vidro moído reciclado é o principal subproduto da indústria de reciclagem de vidro. Porém, ainda hoje existem barreiras para a aplicação do vidro moído em obras rodoviárias, sendo as principais o conhecimento insuficiente das características geotécnicas do vidro reciclado e também os seus riscos ambientais (DISFANI *et al.*, 2012). Os autores comentam que o vidro moído, seja sozinho ou em misturas com agregados naturais ou reciclados, pode ser usado para uma variedade de aplicações rodoviárias, como camada de sub-base, material de aterros e meios de drenagem em estradas. Basu e Puppala (2015) dizem que o vidro residual pode ser usado como um agregado fino em misturas de pavimentação asfáltica, cuja mistura resultante é denominada pelo termo em inglês “glassphalt”.

2.3.2. Estrutura do vidro

Callister (2008) diz que os vidros são formados principalmente por silicatos não cristalinos que também contém outros óxidos. Um vidro de cal de soda típico, por exemplo, é constituído em aproximadamente 70% de SiO₂, sendo o restante composto principalmente por Na₂O (soda) e CaO (cal), como já mencionado na Seção 2.3.1. O vidro é um material metaestável que foi super-resfriado e se solidificou sem cristalizar e, por isso, assemelha-se a um líquido super-resfriado sob certos aspectos (ASKELEND; WRIGHT, 2014).

Com relação aos silicatos presente no vidro, Callister (2006) os define como materiais compostos principalmente por silício e oxigênio, os dois elementos mais abundantes na crosta terrestre e, por consequência, a maior parte dos solos, rochas, argilas e areias se enquadram na classificação de silicatos. Materiais cerâmicos em geral contém silicatos, como tijolos, telhas, vidrados, assim como aglomerantes como o cimento Portland (VAN VLACK, 2000), sendo assim muito importante seu estudo na engenharia civil.

A estrutura cristalina dos silicatos é formada por vários arranjos de um tetraedro composto por SiO_4^{4-} , onde cada átomo de silício, posicionado no centro do tetraedro, está ligado a quatro átomos de oxigênio, os quais estão localizados nos vértices do tetraedro (Figura 5). Independente da natureza da reação existe uma carga de -4 associada a cada tetraedro, uma vez que cada átomo de oxigênio exige um elétron adicional para atingir uma estrutura atômica estável. Por causa da elevada carga do íon Si^{4+} raramente os tetraedros se unem aresta a aresta e nunca face a face. Várias estruturas de silicatos surgem a partir do SiO_4^{4-} dependendo da combinação dos arranjos. Uma dessas estruturas é a sílica (SiO_2) (VAN VLACK, 2000; CALLISTER, 2006; ISAIA, 2007; SALES, 2014; ASKELEND; WRIGHT, 2014).

A sílica, ou dióxido de silício (SiO_2), presente no vidro, é o material mais simples à base de silicatos e provavelmente o material cerâmico de uso mais amplo. Estruturalmente, a sílica é gerada quando todos os átomos de oxigênio localizados nos vértices de cada tetraedro do silicato são compartilhados por tetraedros adjacentes, formando pontes. Dessa forma, o material é eletricamente neutro e todos os átomos possuem estruturas eletrônicas estáveis. Por isso, embora a rede básica seja um tetraedro, temos a formulação SiO_2 pois a relação entre silício e oxigênio é de 1:2. (CALLISTER, 2006; ISAIA, 2007; ASKELEND; WRIGHT, 2014).

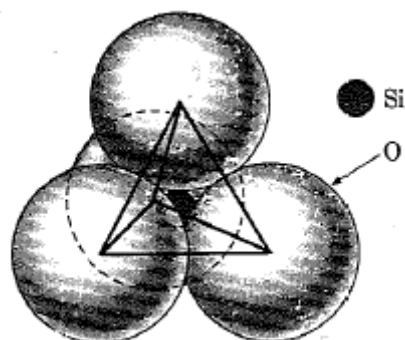


Figura 5: Arranjo tetraédrico do SiO_4^{4-} (VAN VLACK, 2000)

Van Vlack (2000) diz que o vidro é um silicato vítreo. Sendo um material não cristalino, da mesma forma que um líquido, porém, ao contrário dos líquidos mais comuns, o vidro tem uma estrutura tridimensional contendo ligações covalentes, o que o faz ser mais viscoso (rígido) que a maioria dos líquidos. Algumas vezes os sólidos não cristalinos são chamados de amorfos (que significa, literalmente, sem forma) ou de líquidos super-resfriados, visto que sua estrutura atômica lembra a de um líquido apesar de se comportar como um sólido verdadeiramente rígido (CALLISTER, 2006; VAN VLACK, 2000; ASKELEND; WRIGHT, 2014; SHACKELFORD, 2008).

Por outro lado, se esses tetraedros forem arranjados de maneira regular e ordenada, ocorrerá a formação de uma estrutura cristalina (Figura 6a). No caso da sílica, existem três formas cristalinas polimórficas principais: quartzo, cristobalita e tridimita. As suas estruturas são relativamente complexas e abertas, isto é, os átomos não estão densamente compactados. Como consequência, essas sílicas cristalinas possuem densidade relativamente baixas. A força das ligações interatômicas Si-O se reflete em temperatura de fusão relativamente elevada, de 1710°C. A forma não-cristalina da sílica, por sua vez, é o vidro (CALLISTER, 2006). As difrações de raios X (DRX) e de elétrons são normalmente utilizadas para determinar a estrutura de materiais cristalinos (ASKELEND; WRIGHT, 2014).

Os sólidos não-cristalinos, do qual o vidro se inclui, tem ordem apenas a pequenas distâncias atômicas, com arranjo atômico menos regular e menos sistemático, assim, a cristalinidade é perdida no vidro. Em contrapartida, os materiais cristalinos tem uma estrutura repetitiva que se estende a grandes distâncias atômicas. Dessa forma, as fases não-cristalinas permitem maiores diferenças na composição em relação à fase cristalina, contudo, essa flexibilidade reduz o número de fases amorfas que podem coexistir em um material. Algumas das fases não cristalinas mais comuns à temperatura ambiente são água, óleo, mercúrio, baquelite e vidro (VAN VLACK, 2000; CALLISTER, 2006; SHACKELFORD, 2008).

Uma condição amorfa pode ser ilustrada através de uma comparação entre as estruturas cristalina e não-cristalina para a sílica, ou dióxido de silício (SiO_2), que pode existir em ambos os estados (CALLISTER, 2006). Em uma representação bidimensional, observarmos que cada átomo de silício está ligado a um quarto átomo de oxigênio abaixo ou acima do plano do papel, como é exemplificado na Figura 6 (ISAIA, 2007). A Figura 6a representa o arranjo bidimensional de uma sílica cristalina, enquanto a Figura 6b representa um arranjo bidimensional de uma sílica não-cristalina, comumente encontrada nos vidros comuns e que

Shackelford (2008) chama de modelo de Zachariasen, visto que foi Zachariasen (1932) que idealizou a estrutura do vidro não-cristalino, se tornando uma definição padrão.

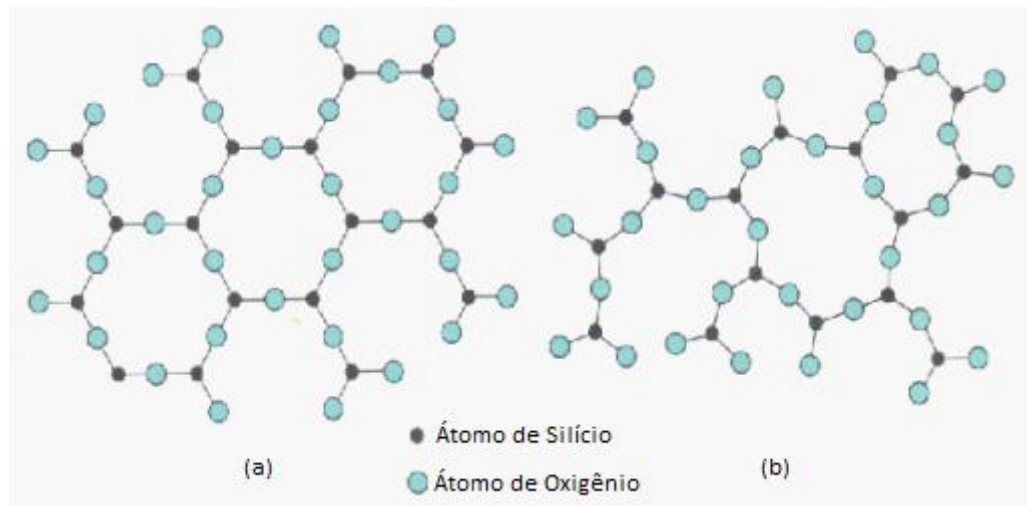


Figura 6: Representação bidimensional dos arranjos da sílica (a) cristalina e (b) não-cristalina (CALLISTER, 2006 adaptado pelo autor)

Segundo Callister (2006), o fato de o sólido que se forma ser cristalino ou amorfo depende da facilidade segundo a qual uma estrutura atômica aleatória no estado líquido pode se transformar em um estado ordenado durante o processo de solidificação. Isso faz a estrutura atômica dos materiais amorfos serem mais complexas, uma vez que há pouco tempo disponível para o processo de ordenação devido ao resfriamento rápido para temperaturas inferiores à temperatura de congelamento. Ao resfriar rapidamente um silicato líquido, ou permitir que um vapor de silicato se condense em um substrato frio, efetivamente será congelado o empilhamento aleatório de blocos de montagem do silicato (tetraedros SiO_4^{4-}). Nessas baixas temperaturas, a mobilidade atômica do material é insuficiente para as estruturas cristalinas teoricamente mais estáveis se formarem (SHACKELFORD, 2008).

A maioria dos materiais, em geral, tende a formar arranjos periódicos, tendo em vista que esta configuração maximiza a estabilidade termodinâmica do material. Os materiais amorfos, por outro lado, tendem a se formar quando a cinética do processo de fabricação não permite a organização dos átomos em arranjos periódicos, não tendo assim uma posição de equilíbrio (ASKELEND; WRIGHT, 2014).

Alguns íons metálicos, como o sódio (Na^+) e o potássio (K^+), quando presentes no vidro, se ligam ionicamente ao oxigênio. Isso provoca uma descontinuidade na rede de SiO_2 devido á quebra de algumas ligações, pois alguns átomos de oxigênio não são mais compartilhados entre dois tetraedros, mas apenas a um átomo de silício, eliminando as pontes existentes entre esses átomos. Dessa forma, esses íons diminuem a viscosidade do vidro e a temperatura de fusão, ao mesmo tempo em que aumentam a reatividade do vidro em ambientes de operação. Esses íons, provenientes de óxidos como o Na_2O e K_2O , não entram na rede, mas permanecem nos interstícios como íons metálicos ligados ionicamente, como demonstrado na Figura 7. Esses compostos são conhecidos como óxidos modificadores (ISAIA, 2007; SALES, 2014).

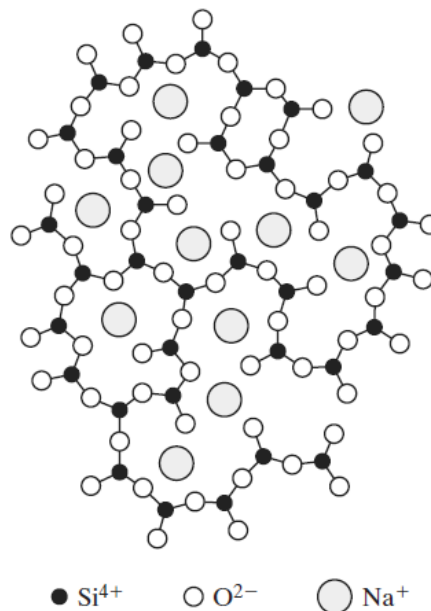


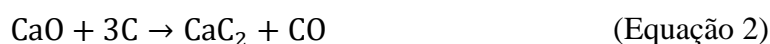
Figura 7: Íons de sódio (Na^+) presente nos interstícios da rede de SiO_2 (SHACKELFORD, 2008)

Segundo Askelend e Wright (2014) os modificadores enfraquecem as ligações da rede de sílica quando há uma elevada razão oxigênio/silício (O-Si). Ao adicionar Na_2O , por exemplo, há a entrada dos íons de sódio nos vazios da rede, permitindo que o íon de oxigênio, presente no Na_2O , também participe da rede. Quando isso acontece não há íons de silício suficientes para combinar com os íons extras de oxigênio e manter a estrutura intacta. Quando a razão O-Si supera 2,5, a formação de vidros de sílica torna-se difícil e, acima de 3,0, o vidro somente é formado se for resfriado com taxas de resfriamento muito elevadas.

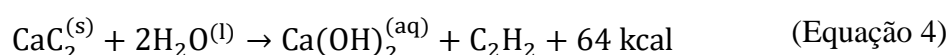
2.4. CAL DE CARBURETO

Segundo Isaia (2007) a cal de carbureto é um resíduo da produção do gás acetileno (C_2H_2), a partir do carbeto de cálcio (CaC_2), popularmente denominado carbureto de cálcio, matéria prima da produção de cálcio que, por sua vez, é insumo da produção de materiais poliméricos. Pode ser usada na construção civil, desde que não esteja contaminada por dioxinas ou metais pesados. Há um grande volume de produção deste material e cresceu quando o processo eletrotérmico tornou-se cada vez mais competitivo com o aumento do preço do petróleo, como ocorre agora e ocorreu pela primeira vez na década de 70.

Segundo Liu (2016) o carbeto de cálcio (CaC_2) é criado ao se aquecer o carbonato de cálcio ($CaCO_3$) para produzir o óxido de cálcio (CaO) e o processo de carbonatação desse óxido. Ambos liberam CO_2 , conforme mostra as Equações 1, 2 e 3.



Segundo Saldanha *et al.* (2018), o gás acetileno (C_2H_2) surge a partir do processo de hidrólise do carbeto de cálcio (CaC_2), conforme a Equação 4:



Nesse processo também é formado o hidróxido de cálcio [$Ca(OH)_2$], principal componente da cal de carbureto. Segundo Horpibulsuk *et al.* (2012), para cada 64g de carbeto de cálcio (CaC_2) é fornecido 26g de gás acetileno (C_2H_2) e 74g de cal de carbureto na forma de $Ca(OH)_2$. Saldanha *et al.* (2018) diz que a cal de carbureto é formada essencialmente de $Ca(OH)_2$ (o mesmo da cal hidratada, porém a cal hidratada tem um teor maior desse elemento em sua composição), com menores quantidades de $CaCO_3$, SiO_2 e outros óxidos metálicos. Essa quantidade expressiva de $Ca(OH)_2$ livre em sua composição faz da cal de carbureto um ótimo ativador alcalino para a estabilização de solos (SALDANHA *et al.*, 2018; SCHEUERMANN FILHO, 2019).

Pela composição, a cal de carbureto é satisfatória como aglomerante, pois é rica em hidróxido de cálcio, não apresenta óxidos não hidratados e teor de gás carbônico que atende à norma (ISAIA, 2007). Pesquisas como as de Consoli *et al.* (2001, 2019) e Horpibulsuk *et al.* (2012) mostram bons ganhos de resistência quando adicionado cal de carbureto e cinza volante ao solo, principalmente para tempos de cura elevados.

Apesar disso, a cal de carbureto tem qualidade inferior à cal cálcica tanto química quanto fisicamente. Entre as desvantagens físicas pode-se citar o maior diâmetro das partículas, o que diminui a sua reatividade e aumenta a velocidade de deposição quando dispersa em meio líquido. Do ponto de vista químico, a principal desvantagem é a menor quantidade de hidróxido de cálcio na mistura (BORGES, 1979).

2.5. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

O termo estabilização de solos tem várias definições. Além de solo estabilizado, Foppa (2005) menciona termos como solo melhorado, solo modificado e solo tratado como comumente utilizados.

O solo é um material complexo e variável, porém devido à sua disponibilidade universal e ao seu baixo custo, ele oferece grandes variedades de utilização como material de engenharia. Ao se utilizar o solo em um projeto de engenharia, Ingles e Metcalf (1972) apontam três alternativas distintas:

- a) Aceitar o material encontrado in situ, projetando a estrutura com padrões suficientes para atender as restrições impostas pela qualidade do solo;
- b) Remover o material local e substituir por um de melhor qualidade;
- c) Alterar as propriedades geotécnicas existentes no solo local, criando um material capaz de atingir as exigências de projeto.

Yoder e Witczak (1975) comentam que, assim como todo projeto de engenharia, o fator econômico aliado ao bom desempenho do material frente às solicitações impostas é o que determina a melhor solução a ser adotada. Nem sempre é viável realizar um projeto que atenda as solicitações de forma econômica com o material in situ, e removê-lo também pode ser inviável do ponto de vista econômico e ambiental. Consoli *et al.* (2007) dizem, por exemplo, que o uso de bases granulares se torna inviável quando o local de empréstimo está

muito distante do canteiro de obras. Dessa forma a estabilização do solo, ou seja, a alteração das propriedades do solo, vem sendo uma alternativa de bastante interesse na engenharia civil.

No caso de Nunez (1991), que utilizou arenito Botucatu em sua pesquisa, a escolha de se utilizar a estabilização físico-química como forma de melhorar as propriedades do solo em sua pesquisa se deve ao fato de que os métodos mecânicos, por si só, se mostraram insuficientes para permitir a utilização deste material como camada de pavimento. Isaia (2007) diz que, pelo fato do solo ser abundante na natureza, é quase sempre possível utilizar o solo do local ou de jazidas próximas, sendo certamente um dos materiais que menos consomem energia na fabricação e na sua aplicação na obra.

Ingles e Metcalf (1972) citam que as propriedades do solo podem ser alteradas por tratamento químico, térmico, mecânico entre outros. Yoder e Witczak (1975) dizem que um subleito com desempenho insatisfatório no seu estado natural pode ser melhorado através de misturas, como a adição de agregados, ou com uma compactação adequada, fazendo-o assim apropriado para construção e também para reduzir a espessura da camada de pavimento. Os autores também citam que além do subleito, a estabilização do solo pode ser feita na base, sub-base e, em raras ocasiões, na superfície de rolamento do pavimento.

Tendo em vista o apresentado até aqui, serão abordados os dois métodos de estabilização comumente encontrados em obras rodoviárias, a estabilização granulométrica e a estabilização química.

2.5.1. Estabilização granulométrica

Segundo o DNIT (2006) bases e sub-bases granulares estabilizadas granulometricamente são as camadas constituídas por solos, britas, escória de alto forno, ou ainda, pela mistura desses materiais. Estas camadas são sempre flexíveis e sua estabilização granulométrica acontece pela compactação da mistura de materiais que apresentam uma granulometria e índices geotécnicos específicos, fixados em especificações.

Para Vizcarra (2010), esse tipo de estabilização procura obter um material bem graduado e de porcentagem limitada de partículas finas de dois ou mais materiais para a posterior compactação. Dessa forma, há a alteração das propriedades do solo através da adição ou retirada de partículas do mesmo, procurando-se obter como produto final um material adequado para aplicação em obras de engenharia.

Segundo Yoder e Witczak (1975), a estabilidade da mistura solo-agregado depende da distribuição granulométrica, forma das partículas, densidade relativa, ângulo de atrito e coesão. Tanto o ângulo de atrito quanto, posteriormente, a resistência ao cisalhamento dependem da densidade, forma das partículas e distribuição granulométrica, sendo que o ângulo de atrito deve ser alto para resistir às deformações impostas pelo carregamento. O mais importante dentre estes fatores, segundo os autores, é a distribuição granulométrica, em particular a relação entre as frações finas e grossas da mistura.

Yoder e Witczak (1975) mostram essa relação através de um exemplo de três estados físicos de misturas solo-agregado, conforme mostrado na Figura 8. Verifica-se que tanto pouca quantidade de finos como quantidade de finos em excesso prejudicam o desempenho da mistura.

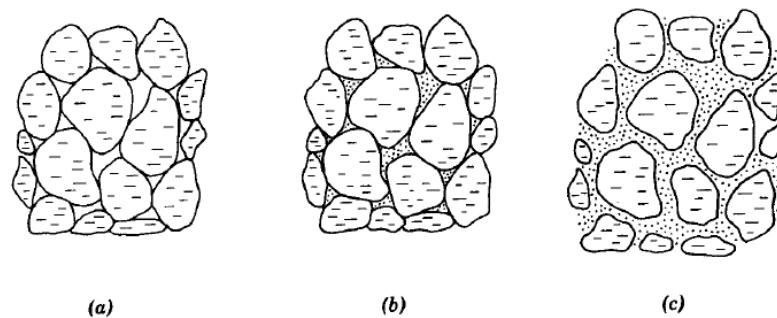


Figura 8: Estados físicos de misturas solo-agregado (YODER; WITCZAK, 1975)

Nesse caso, os autores diferenciam os três estados da Figura 8 da seguinte forma:

- a) Solo-agregado que contém pouca ou nenhuma quantidade de material fino, ganha estabilidade através do contato grão a grão. Possui baixa densidade e alta permeabilidade, porém, devido à falta de finos, não é coesivo e o torna de difícil manuseio para construção;
- b) Solo-agregado que contém material fino suficiente para preencher os vazios da fração grossa. Possui alta densidade e é menos permeável. É de difícil compactação, mas é o ideal do ponto de vista de estabilidade, pois ainda há o contato grão a grão do caso “a” mas também há maior resistência ao cisalhamento e menor deformabilidade;
- c) Uma mistura de agregados que contém uma grande quantidade de finos, não há mais o contato grão a grão do agregado, fazendo este “flutuar” no solo. Sua

densidade e permeabilidade são inferiores ao caso “b”, podendo até mesmo ser impermeável. Sua estabilidade é fortemente afetada pelas variações de umidade, porém seu manuseio é mais fácil durante a construção e se tem maior facilidade para compactar.

Segundo Bernucci *et al.* (2008), as especificações tradicionais preconizam o uso de materiais do tipo “a” e “b” para bases de pavimento, onde o contato grão a grão é garantido. Porém também se procura que a mistura esteja bem graduada, com preenchimento dos vazios. Por conta disso é chamada de estabilização granulométrica.

O importante dessas misturas, principalmente no caso “c”, é a natureza do material fino. Pode-se utilizar com sucesso misturas do tipo “c” com solos lateríticos, por serem coesivos, pouco expansivos e com boa capacidade de suporte. O caso “c” é recomendável como material de base de vias de baixo volume de tráfego, ou mesmo como material de reforço de subleito em vias de tráfego médio ou mesmo pesado. Pode-se apresentar fissuração quando as quantidades de solo forem superiores a 50% em peso (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Segundo Bernucci *et al.* (2008), existe também a mistura solo-brita-cimento, empregado com sucesso como material de base em vias de tráfego médio a pesado, são frequentemente utilizadas as misturas de 80% brita – 20% solo ou no máximo 70% brita – 30% solo com porcentagem de cimento variando em geral de 3 a 6% em peso.

2.5.2. Estabilização química

Mitchell (1981) diz que dentre os vários métodos de melhoria do solo, a adição de vários tipos de materiais é o mais antigo e o mais difundido, sendo utilizada há centenas de anos nas obras de engenharia. Dentre os materiais químicos utilizados para a melhoria das propriedades dos solos, os dois mais bem sucedidos são o cimento Portland e a cal hidratada (MOH, 1965).

As propriedades do solo melhorado quimicamente com cal ou cimento podem resultar uma ampla variedade de fatores, dependendo do tipo de solo, quantidade e tipo de agente cimentante, tempo de cura, compactação e homogeneidade da mistura (MITCHELL, 1981; ISAIA, 2007).

Makusa (2012) relata que ao estabilizar um solo com algum agente cimentante, este melhora suas propriedades geotécnicas, como resistência, permeabilidade, compressibilidade e

durabilidade com relação ao solo natural. Castro (1995) observa que ao adicionar cal ou cimento ao solo há quase que imediatamente uma série de modificações, sendo elas:

- a) Alteração da granulometria do solo;
- b) Melhora sensível na trabalhabilidade do solo;
- c) Alteração drástica da relação solo-água;
- d) Aumento da resistência mecânica do solo (tanto da resistência à compressão simples quanto da resistência ao cisalhamento).

Nunez (1991) observou que a resistência aumenta linearmente com o teor de aditivo independente do agente cimentante. Existem, porém, componentes no solo que podem retardar ou impedir a hidratação da mistura, como a presença de matéria orgânica, sulfatos, ou um pH ácido (VENDRUSCOLO, 1996).

2.5.2.1. Solo-cimento

O solo-cimento é o produto resultante da mistura de solo, cimento Portland e água. Esse produto, após a compactação na umidade ótima, adquire resistência através das reações de hidratação do cimento melhorando as propriedades da mistura. (BAUER, 1994; ISAIA, 2007).

Isaia (2007) cita que o interesse pelo assunto no Brasil teve início em 1936 com a regulamentação e pesquisa da Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, levando, em 1941, à pavimentação do aeroporto de Petrolina, PE. A partir de 1960 o solo-cimento teve grande aceitação, sendo mais difundida na execução de bases de pavimentos.

Com relação aos materiais, o solo tem maior proporção na mistura, enquanto o cimento deve ser quantificado de forma que possibilite a melhor economia de cimento. No caso do cimento Portland, Mitchell (1981) diz que quantidades entre 3% e 10% são adequadas para solos arenosos e pouco plásticos. Yoder e Witczak (1975) citam quantidades entre 5% e 12% para solos arenosos, 15% a 20% para solos argilosos e 2% a 6% para misturas com pedregulhos.

Segundo a ABCP (2004) o solo deve possuir as seguintes características para ser empregado normalmente:

- a) Diâmetro máximo = 75 mm;

- b) Material passante na peneira n°4 (4,8 mm) $\geq 50\%$;
- c) Material passante na peneira n°40 (0,42 mm) de 15% a 100%
- d) Material passante na peneira n°200 (0,075 mm) $\leq 50\%$;
- e) Limite de liquidez $\leq 40\%$;
- f) Índice de plasticidade $\leq 18\%$.

Solos arenosos são considerados os mais adequados para a estabilização com cimento, pois as areias grossas e pedregulhos são inertes, com função apenas de enchimento, favorecendo assim a liberação de maiores quantidades de cimento para aglomerar os grãos menores. Apesar disso, os solos devem ter um teor mínimo de fração fina (superiores a 20% pela experiência), pois a resistência inicial do solo-cimento compactado se deve à fração fina, além de proporcionar uma melhor compactação (ISAIA, 2007). A Figura 9 mostra que, em geral, as resistências à compressão simples para o solo-cimento crescem linearmente, porém, a diferentes taxas para diferentes tipos de solo.

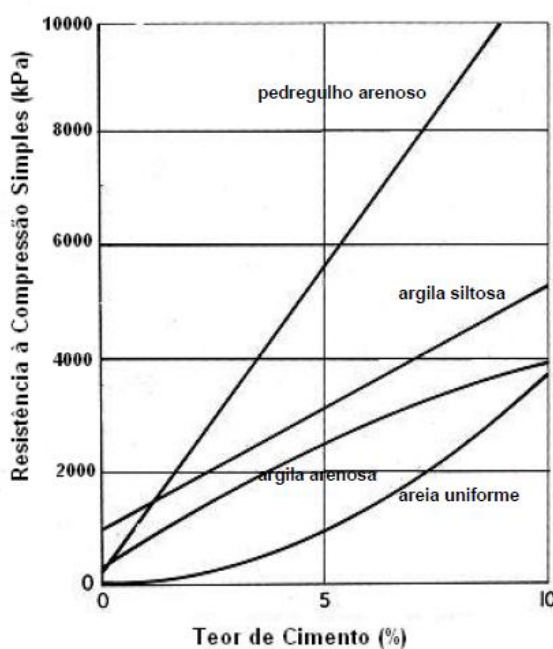
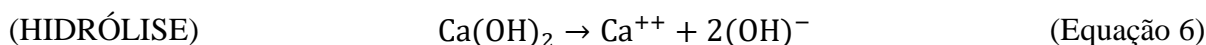
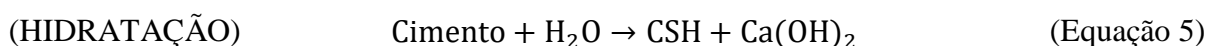


Figura 9: Efeito da quantidade de cimento sobre a resistência à compressão simples para vários tipos de solos curados por 7 dias (adaptado de INGLES; METCLAF, 1972)

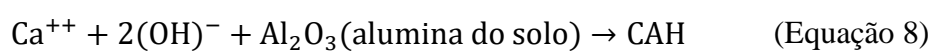
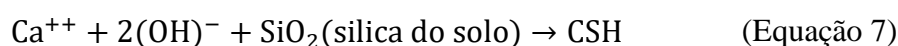
As reações químicas das misturas de solo-cimento são esquematizadas por Moh (1965) através das Equações 5, 6, 7 e 8. As Equações 5 e 6 são chamadas de equações primárias, onde Vendruscolo (1996) e Sales (1998) definem a Equação 5 como a fase de hidratação e a

Equação 6 como a fase de hidrólise. Pode-se observar que na fase de hidratação é produzida a cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e na fase de hidrólise acontece a dissociação dessa cal. As Equações 7 e 8 são chamadas de reações secundárias, onde os elementos dissociados na fase de hidrólise reagem com a sílica e a alumina do solo para formar os compostos CSH e CAH, respectivamente, sobre a superfície das partículas de argila ou em sua vizinhança, causando a floculação dos grãos de argila cimentados nos pontos de contato. Vendruscolo (1996) salienta que as reações primárias são características em solos muito granulares e sem argila, enquanto que as reações secundárias são características em solos predominantemente argilosos.

Reações Primárias:



Reações Secundárias:



Onde SiO_2 e Al_2O_3 representam, respectivamente, as componentes de sílica e alumina presentes no solo enquanto que CSH e CAH, os produtos cimentantes formados, geralmente denominados de Silicato Hidratado de Cálcio e Aluminato Hidratado de Cálcio, respectivamente. As letras empregadas nas siglas CSH e CAH são abreviações dos elementos químicos encontrados nos produtos formados: C= CaO; S = SiO_2 ; A= Al_2O_3 ; e H= H_2O .

No caso da partícula de cimento Portland, esta é uma substância heterogênea contendo fases silicatadas (C_3S , C_2S) e fases aluminosas (C_3A , C_4AF), onde C = CaO, S = SiO_2 , A = Al_2O_3 , H = H_2O e F = Fe_2O_3 (SALES, 1998; MOH, 1965).

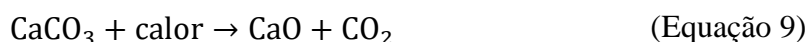
Vendruscolo (1996) aponta similaridades entre o solo-cimento e o concreto. Segundo ele, o mecanismo de combinar solo com cimento é muito similar ao concreto. O que diferencia é o agregado, que no concreto possui uma granulometria grossa e, dessa forma, o cimento envolve o agregado granular, ligando suas partículas e dando considerável resistência ao concreto. Já no solo-cimento, é o solo fino que envolve as partículas de cimento, resultando em ligações menos resistentes. Apesar disso, Consoli *et al.* (2007) comentam que nas misturas de solo-cimento não existem metodologias de dosagem baseadas em critérios racionais como

no caso do concreto, em que a relação água/cimento desempenha um papel fundamental na avaliação da resistência.

2.5.2.2. Solo-cal

A cal é o aglomerante mais antigo utilizado pela humanidade, sendo o único até 1824 com a invenção do cimento Portland (ISAIA, 2007). Apesar de ser popularmente conhecida para o preparo de argamassas, a cal vem sendo utilizada para a estabilização de solos em rodovias desde 1924 em pequenos trechos, ganhando maior popularidade a partir da década de 1930 devido ao crescimento do tráfego e à Segunda Guerra Mundial (BELL, 1996).

Os processos conduzidos para a obtenção da cal são resultantes da calcinação de rochas calcárias. No caso do calcário natural (carbonato de cálcio), o material é submetido à ação do calor à temperatura inicial de 660°C e finalizado a uma temperatura aproximada de 900°C, decompondo-se em óxidos de cálcio e gás carbônico, representado pela Equação 9 (BAUER, 1987; ISAIA, 2007; BEHAK, 2007):



Nessa fase o material é chamado de cal viva, ou cal virgem, não sendo ainda o aglomerante utilizado na construção. O óxido deve ser hidratado, se transformado assim em hidróxido. Essa hidratação é feita em usina, sendo inicialmente feita a moagem do material e então uma quantidade exata de água é adicionada e misturada. Posteriormente, há a separação da cal hidratada da não-hidratada através de peneiramento, por ar, ou por outros processos (BAUER, 1987).

Assim, se obtém a cal hidratada $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, também chamada de “cal extinta” quando a hidratação é realizada em canteiro de obras. A equação que representa esse processo está representada pela Equação 10 (BAUER, 1987).



Essa reação é fortemente exotérmica, com grande liberação de calor, podendo chegar a temperaturas de até 450°C (BAUER, 1987; ISAIA, 2007; BEHAK, 2007). Devido a essa liberação altamente violenta de calor, tem-se visto a ocorrência de incêndios, seja pela falta de cuidados com o transporte ou armazenamento, quando a cal virgem se hidrata em contato com

a água, geralmente da chuva (BAUER, 1987). Sendo este um dos motivos da preferência da utilização da cal hidratada em campo.

Outras vantagens da cal hidratada sobre a cal virgem apontadas por Bauer (1987) estão na facilidade de manuseio, transporte e armazenamento. Além de ser um material pronto para ser utilizado em obra, eliminando a operação de extinção em canteiro e, conseqüentemente, de envelhecimento.

Com relação à composição da cal com o solo, o solo é o material que entra em maior quantidade na composição do solo-cal, assim como no solo-cimento. Sendo de fundamental importância nessa composição o conhecimento das características mineralógicas e granulométrica, assim como o pH, dos materiais envolvidos na mistura (ISAIA, 2007).

Mitchell (1981) diz que é típico utilizar uma quantidade de cal entre 3% a 8% em relação à massa de solo seco para o melhoramento de solos finos plásticos e expansivos. Yoder e Witczak (1975) citam quantidades entre 5% e 10% para solos argilosos, porém não recomenda a estabilização com cal para solos arenosos ou pedregulhos. Segundo Ingles e Metcalf (1972), a cal tem pouco efeito em solos com alto teor de matéria orgânica ou com pouca ou nenhuma quantidade de material argiloso. Os autores dizem, por outro lado, que em pedregulhos argilosos a cal pode ter melhor eficiência que o cimento (Figura 10).

A Figura 10 mostra que a resistência à compressão simples aumenta linearmente com a quantidade de cal até certo ponto, usualmente até 8% para solos argilosos. A partir deste ponto a taxa de acréscimo de resistência diminui com a quantidade de cal, devido às misturas de solo-cal apresentar uma cimentação lenta que dependerá do tipo de solo (INGLES; METCALF, 1972).

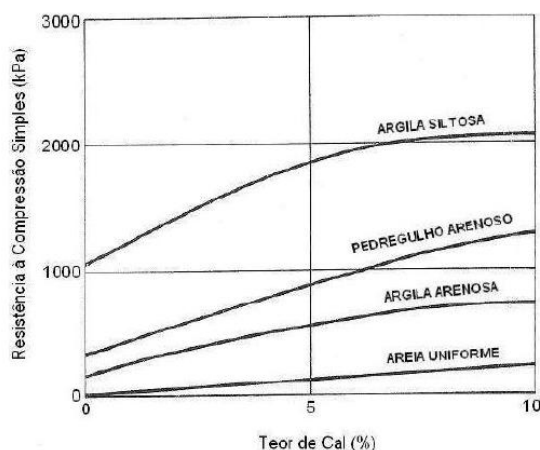


Figura 10: Efeito da quantidade de cal sobre a resistência à compressão simples para vários tipos de solos curados por 7 dias (adaptado de INGLES; METCLAF, 1972)

Segundo Isaia (2007), o processo de estabilização química dos solos com a cal pode ocorrer segundo mecanismos modificadores em sua estrutura, que acontecem em curto e longo prazo. As modificações de curto prazo são responsáveis pelas mudanças na trabalhabilidade do material no estado fresco, enquanto as de longo constituem-se nos processos de cimentação do material.

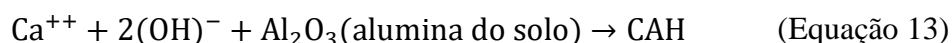
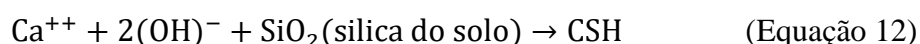
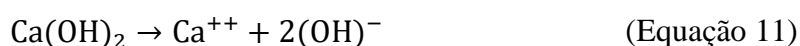
As reações de longo prazo mais importantes são as pozolânicas, que ocorrem entre os elementos minerais solubilizados do solo e a cal. Após a mistura, o pH da solução se eleva a valores próximos de 12,4, fazendo os elementos sílica e alumina (responsáveis pelas reações) estarem mais facilmente disponibilizados para a solução do solo. Essa reação acontece lentamente e conduz normalmente ao aumento da capacidade de resistência mecânica dos solos, podendo ser favorecido pela temperatura e pela difusão iônica da cal no solo. O endurecimento da cal é muito lento, quando comparado ao do cimento Portland e gesso, pois depende da difusão do CO_2 para o interior do produto, assim, conceitos como tempo de pega, fundamentais para o cimento e o gesso, não tem importância para a cal. (ISAIA, 2007).

A cura do solo-cal é influenciada pelas condições de umidade, temperatura ambiente e o tempo de cura (ISAIA, 2007).

Castro (1995) divide a estabilização química com cal em duas etapas baseadas na velocidade com que as transformações sofridas pelo solo ocorrem: uma etapa inicial rápida, que dura de horas a dias, e uma etapa mais lenta, que se estende por meses e anos.

Para um solo argiloso, segundo o autor, na etapa rápida os fenômenos que podem originar as transformações iniciais são a troca catiônica, floculação/coagulação, compressão da dupla camada elétrica, adsorção de cal, reações químicas. Enquanto que na etapa lenta, os fenômenos citados são a cimentação, microflicção via cristalização, densificação e carbonatação.

Para as cales com ausência de magnésio (cal cálcica ou cal de carbureto) as reações químicas típicas que governam a mistura solo-cal são semelhantes às de cimento, apresentadas pela TRB (1987):



Onde as partículas de cal são dissociadas (hidrólise) e tem seus íons separados (Equação 11). Esses íons, em combinação com a sílica e a alumina do solo, formarão os compostos cimentantes CSH e CAH (Equações 12 e 13), assim como explicado na Seção 2.5.2.1. As possíveis fontes da sílica e alumina nos solos, segundo a TRB (1987), incluem minerais de argila, quartzo, feldspato, micas e minerais silicosos ou alumino-silicosos que apresentam estrutura amorfa ou cristalina.

Ingles e Metcalf (1972) afirmam que as reações pozolânicas do solo-cal iniciam com o aumento de pH pela hidroxila $(\text{OH})^-$, que permite o ataque e remoção de sílica dos minerais de argila do solo e a criação de géis de silicatos. Esses géis de silicato resultantes da reação imediatamente cobrem e ligam as partículas de argila, bloqueando os vazios. Os géis são cristalizados lentamente e transformado em silicatos hidratados de cálcio (CSH). Essa reação só acontece na presença de água, que tem a função de carregar os íons de cálcio (Ca^{++}) e de hidroxila $(\text{OH})^-$ para a superfície da argila, como demonstrado na Figura 11.

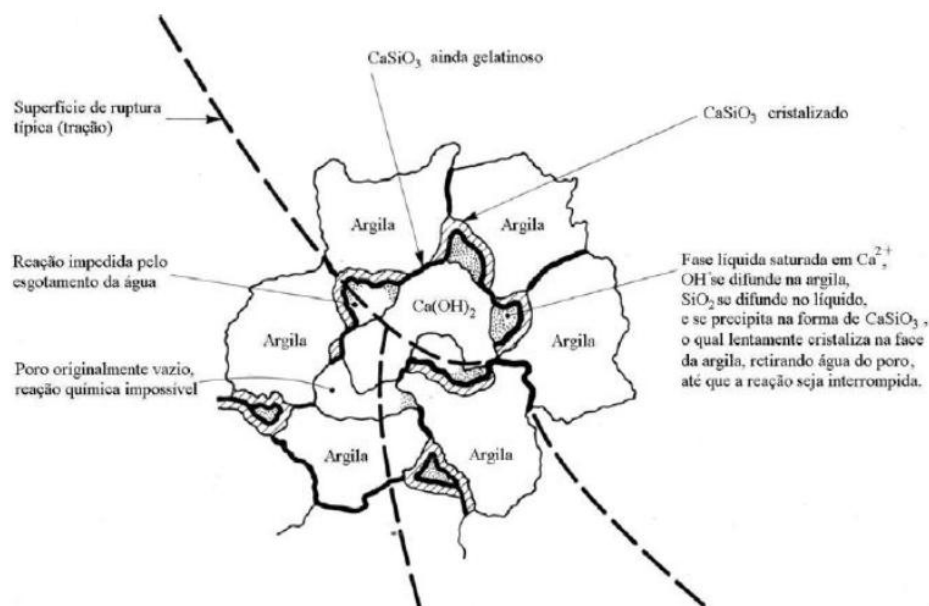


Figura 11: Mecanismos de estabilização solo-cal (adaptado de Ingles e Metcalf, 1972)

Segundo Yoder e Witczak (1975), adicionar cal em um solo geralmente resulta em uma diminuição da densidade, mudanças no índice de plasticidade e um aumento na resistência do solo. Após a mistura, a primeira das reações citadas pelos autores é a alteração no filme de água em volta do mineral de argila. A força de ligação entre dois minerais de argila depende da carga, tamanho e hidratação dos íons atraídos. O íon de cálcio da cal é divalente (sem dois elétrons) e serve para unir as partículas de solo, o que diminui a plasticidade e resulta em uma estrutura mais aberta e granular.

O segundo processo descrito pelos autores é a floculação das partículas, a quantidade de cal usualmente usada na construção civil (5 a 10%) resulta em concentrações de íons de cálcio maiores do que a mistura realmente precisa. O terceiro processo é a reação da cal com os componentes do solo (sendo os dois principais componentes do solo que reagem com a cal a sílica e a alumina), formando novos compostos químicos. Estas reações são de longo prazo, quanto maior o tempo de cura maior a resistência obtida. Essas reações são conhecidas como “reações pozolânicas” (YODER e WITCZAK, 1975).

2.5.3. Estabilização química do Material fresado

Puppala *et al.* (2011) diz que, embora agregados reciclados sejam usados como material de base em aplicações de construção de pavimentos, a variabilidade do produto e as

características inadequadas de resistência e rigidez geralmente limitam sua aplicação em bases rodoviárias. Assim, sua utilização deve ser avaliada com base em suas propriedades de custo, resistência e rigidez.

Sufian *et al.* (2009) estudou a estabilização química em diferentes proporções de material fresado (RAP) e pó de pedra (CR). Para a estabilização, os autores adicionaram 3% de cal hidratada ou 3% de cimento Portland e realizaram ensaios de compressão simples, tração por compressão diametral e módulo de resiliência.

Os autores conseguiram bons resultados, sendo observado que quanto maior a quantidade de pó-de-pedra (mais finos) maiores as resistências aos 28 dias de cura. As amostras com cimento obtiveram, em geral, resistências à compressão simples (RCS) e módulo de resiliência (MR) expressivamente maiores em relação às amostras com cal hidratada. No caso da resistência à tração por compressão diametral (RTCD), a proporção 75% de RAP e 25% de CR foram as que obtiveram melhores resistências. Apesar disso, a quantidade de material passante na peneira n.200 das misturas é relativamente baixa, com valores entre 0,4% quando se tem 100% de RAP e 6,91% quando se tem 100% de CR.

A título de comparação com as proporções de RAP utilizadas no presente trabalho (70% de RAP para 30% de vidro moído) as magnitudes da RCS aos 28 dias obtidas por Sufian *et al.* (2009) para a proporção mais próximas (75% de RAP e 25% de CR) são de 1,4 MPa para cal hidratada e 2,8 MPa para cimento, aproximadamente. Da mesma forma, as RTCD aos 28 dias para a cal e cimento são de 360 kPa e 550 kPa respectivamente. O MR aproximado para a mesma proporção foi de 7800 MPa para a cal e 8300 MPa para o cimento, aproximadamente.

Consoli *et al.* (2018a) estudaram o comportamento de uma mistura com 75% de RAP e 25% de cinza volante (CV), utilizando como agente cimentante a cal de carbureto nos teores em massa de 3%, 5% e 7%, curados por 7 dias. Os autores verificaram baixos valores de RCS (entre 200 kPa e 900 kPa no geral), provavelmente devido ao baixo tempo de cura e ao baixo teor de finos na mistura. Com relação ao ensaio de durabilidade, os resultados da perda de massa acumulada das amostras alcançaram valores entre 1% e 3,5%. Foi observado também que adicionando 1% de NaCl (sal de cozinha) nas misturas, tanto as amostras de RCS quanto as de durabilidade obtiveram resultados mais satisfatórios, mostrando que este elemento químico agiu como um catalisador nas misturas.

2.5.4. Estabilização química com vidro moído

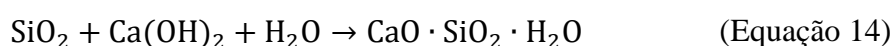
Consoli *et al.* (2018b) estudou uma areia mal graduada com siltes (areia de Osório) utilizando vidro de garrafa moído (nas proporções de 10%, 20% e 30%) e cal de carbureto (3%, 5% e 7%), sendo curados por 7 dias. Os autores observaram reações pozolânicas ocorrendo entre a sílica do vidro moído em seu estado amorfo e os íons de cálcio (Ca^{++}) da cal de carbureto. Quanto maior a quantidade de vidro moído e de cal de carbureto na mistura, maiores os ganhos de RCS e de G_0 (módulo cisalhante inicial) e menores as perdas de massa acumulada pelo ensaio de durabilidade por molhagem e secagem.

Metwally (2007) cita que, em seus resultados, o vidro moído apresentou características pozolânicas para misturas com concreto, onde aumentou as resistências mecânicas em tempos de cura altos, porém diminuiu a trabalhabilidade. O autor cita que um material pozolânico deve atender duas características: deve conter um alto teor de sílica e ter uma grande área superficial.

Segundo Massazza (2004), materiais onde o silício e o alumínio encontram-se em estruturas amorfas ou desordenadas atômicamente têm aptidão de reagir com a cal em condições normais de temperatura e pressão e formar compostos com propriedades aglomerantes. À princípio, quanto maior for o rearranjo estrutural do material, mais intensamente se manifestará a reação pozolânica.

Carraro (1997) está seguro em dizer que materiais com acentuadas características pozolânicas estão entre aqueles mais utilizados para promover melhoria e otimização de desempenho de solos, seja para aplicação em barragens, obras rodoviárias, elemento de fundação ou qualquer outra construção.

As reações pozolânicas entre a sílica (SiO_2) do vidro moído, a cal de carbureto [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] e a água (H_2O) é apresentada por Massazza (2004) e resumida por Consoli *et al.* (2018b) é expressa pela Equação 14:



Sendo $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ também conhecido como silicato de cálcio hidratado (CSH). Como as quantidades de alumina (Al_2O_3) são praticamente desprezíveis para o vidro comum, não há uma formação relevante de aluminato de cálcio hidratado (CAH) após as reações.

2.5.5. Relação entre porosidade e teores volumétricos de cimento, cal e ligante

Foppa (2005) e Consoli *et al.* (2007) introduziram um método racional de dosagem de um solo cimentado artificialmente, cuja base surgiu de um fator proposto inicialmente por Larnach (1960) que correlaciona o volume absoluto de vazios (V_v) e o volume absoluto de cimento (V_c) para estimativa de resistência do solo. Essa relação vazios/cimento proposta pelo autor é definida pela Equação 15:

$$\frac{V_v}{V_c} = \frac{\text{Volume absoluto de vazios (ar + água)}}{\text{Volume absoluto de cimento}} \quad (\text{Equação 15})$$

Partindo dessa relação, Foppa (2005) e Consoli *et al.* (2007) buscaram relações entre o quociente da porosidade (η) e o teor volumétrico de cimento (C_{iv}) (obtidas através da Equação 16, onde V_{tot} corresponde ao volume total da amostra) e a resistência à compressão simples (q_u) de um solo cimentado artificialmente.

$$\frac{V_v}{V_c} = \frac{V_v/V_{tot}}{V_c/V_{tot}} = \frac{\eta}{C_{iv}} \quad (\text{Equação 16})$$

Os autores demonstraram a existência de uma relação do tipo potência entre a resistência à compressão simples do solo artificialmente cimentado e a relação ajustada entre porosidade e teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}^k), conforme mostra a Equação 17 e conforme a Figura 12. Na Equação 17, A é um escalar e B é o expoente de ajuste polinomial. O expoente k é o ajuste feito para compatibilizar os efeitos da porosidade e do teor de cimento sobre a variável resposta. Em resumo, se o efeito da porosidade for maior que o do teor de cimento o valor de $k < 1$, caso contrário, $k > 1$. Caso o efeito entre os dois parâmetros for igual $k = 1$, o efeito da porosidade e do teor volumétrico de cimento são os mesmos.

$$q_u = A \left[\frac{\eta}{(C_{iv})^k} \right]^{-B} \quad (\text{Equação 17})$$

Foppa (2005) e Consoli *et al.* (2007) utilizam um expoente $k=0,28$ para um solo residual de arenito Botucatu. Consoli *et al.* (2011) observaram um valor de $k=0,35$ para um solo siltoso.

Foppa (2005) diz que essa relação vazios/cimento também pode ser útil na execução da camada cimentada. Uma vez constatada uma compactação deficiente, visto que poderão

ocorrer diferenças entre as densidades projetadas e obtidas no local, o projetista poderá recalcular a relação vazios/cimento atingida em campo e estimar com confiabilidade a perda de resistência (haverá uma nova resistência alvo, conforme Figura 12). Dessa forma o projetista poderá tomar medidas corretivas, como reforçar a camada ou reduzir o carregamento transmitido.

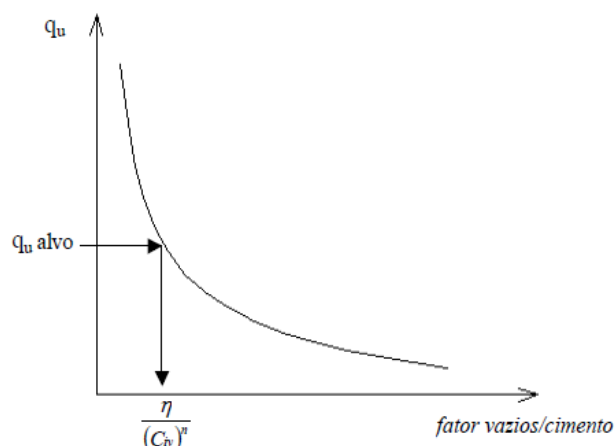


Figura 12: Determinação da relação vazios/cimento para dosagem da mistura (FOPPA, 2005)

Além de descrever com êxito a relação entre $\eta/(C_{iv})^k$ e a resistência, foram também obtidas boas relações para outros parâmetros geotécnicos.

Como citado por Scheuermann Filho (2019), outras pesquisas mostraram que, além da resistência, a relação $\eta/(C_{iv})^k$ demonstrou eficácia para a rigidez inicial (CONSOLI, *et al.* 2017a), a durabilidade em termos de perda de massa acumulada (CONSOLI e TOMASI, 2018) e o parâmetro de estado (LEON, 2018).

O mesmo foi pesquisado e estudado para a cal hidratada (Consoli *et al.*, 2009a, 2009b) aplicados em solos finos, obtendo-se relações entre porosidade (η), teor volumétrico de cal (L_{iv}) e resistência à compressão simples (q_u), conforme Equação 18. Essa equação se comporta de forma análoga ao observado nas aplicações com cimento. Um expoente $k=0,11$ tem sido observado em pesquisas como em Consoli *et al.* (2014, 2017b) e Saldanha (2014). Samaniego (2015) utilizou um expoente $k=0,16$ e Marin (2017) um expoente $k=0,12$ ao estabilizarem um solo dispersivo com cal hidratada.

$$q_u = A \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^k} \right]^{-B} \quad (\text{Equação 18})$$

Porém, para analisar o efeito das pozolanas e da cal nas misturas solo-pozolana-cal, Consoli *et al.* (2018b, 2019) obtiveram um novo parâmetro que relaciona a razão entre porosidade (η) e o teor volumétrico de agente cimentante (B_{iv}), o qual é a soma entre os teores volumétricos de cal e de pozolana. Da mesma forma das relações $\eta/(C_{iv})$ e $\eta/(L_{iv})$, a relação $\eta/(B_{iv})$ também necessitará de um expoente de ajuste, conforme mostra a Equação 19:

$$q_u = A \left[\frac{\eta}{(B_{iv})^k} \right]^{-B} \quad (\text{Equação 19})$$

Consoli *et al.* (2018b) utilizou como pozolana o vidro moído, enquanto Consoli *et al.* (2019) utilizou cinza volante. Ambos utilizaram a cal de carbureto com agente cimentante e obtiveram relações interessantes entre $\eta/(B_{iv})^k$ e resistência à compressão simples. Ambos utilizaram um expoente $k=0,28$ como melhor ajuste. No caso de Consoli *et al.* (2018b), também foram obtidas relações $\eta/(B_{iv})^k$ para o módulo de rigidez inicial e durabilidade (expressa em termos de perda de massa acumulada).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente capítulo tem por objetivo apresentar os materiais e métodos desenvolvidos na pesquisa, sendo dividido em cinco seções. A primeira seção (seção 3.1) descreve o planejamento da pesquisa, no caso, quais as variáveis foram adotadas para a realização das misturas. A segunda seção (3.2) descreverá os materiais utilizados, enquanto a terceira seção (3.3) mostrará a caracterização realizada para cada um deles. Na quarta seção (3.4) será descrito o processo feito para as misturas dos materiais, ou seja, as dosagens utilizadas para os diferentes teores de vidro moído e cal de carbureto e a moldagem realizada para os diferentes tipos de ensaio. Nesta seção também será descrito os procedimentos e explicações de cada um dos ensaios realizados, juntamente com o modelo reológico 2S2P1D adotado para o ensaio de módulo complexo. A quinta seção (3.5), por fim, explicará o projeto de experimento fatorial 2^k utilizado para verificar as variáveis mais influentes de cada ensaio.

3.1. PLANEJAMENTO DA PESQUISA

As variáveis da presente pesquisa podem ser classificadas em três grupos: variáveis controláveis, variáveis fixas e variáveis resposta.

As variáveis controláveis (ou variáveis independentes) são as variáveis que representam uma grandeza que está sendo manipulada na pesquisa. Neste caso elas são:

- a) Peso específico da mistura: expressa pelo peso específico aparente seco (γ_d), cujos valores são 19 e 20 kN/m³;
- b) Teor de cal de carbureto (CC): massa de cal dividida pela massa da mistura, cujas porcentagens adotadas são 3% e 7%;
- c) Teor de vidro moído passante na peneira n. 200 (VM₂₀₀): Tendo em vista que, na teoria, quanto mais fino o grão de vidro moído melhor a reação com a cal, esta pesquisa também abordou a variação desses teores na mistura. É expressa como a massa de vidro moído passante na peneira n. 200 dividida pela massa total da mistura, cujas porcentagens adotadas foram de 10%, 15% e 25% da

massa total do corpo de prova. Por consequência, o teor de vidro moído retido na peneira n. 200 também variou (20%, 15% e 5% da massa total respectivamente).

As variáveis fixas (ou variáveis constantes) são aquelas em que não ocorreu manipulação de sua grandeza, ou seja, aquelas que se mantiveram constante para todas as misturas. São elas:

- a) Tipo e teor de agregado: Material fresado asfáltico com teor em massa de 70%;
- b) Tipo de vidro (retido na peneira n. 200): vidro plano moído durante 3 horas;
- c) Tipo de vidro (passante na peneira n. 200): vidro plano moído pela empresa MINASOLOS;
- d) Tipo de cal: cal de carbureto seca passante na peneira n. 100;
- e) Teor de umidade (w): 8% de acordo com a umidade ótima para a energia modificada;
- f) Tempo e temperatura de cura: 28 dias e $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$.

As variáveis resposta (ou variáveis dependentes) representam uma grandeza que depende de como a variável independente é manipulada. São elas:

- a) Resistência à Compressão Simples (RCS);
- b) Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD);
- c) Durabilidade;
- d) Módulo de Resiliência (MR);
- e) Módulo Dinâmico ($|E^*|$) e ângulo de fase (ϕ).

3.2. MATERIAIS

Este tópico descreverá cada material utilizado na composição da mistura, ou seja, o material asfáltico fresado, o vidro, a cal de carbureto e a água.

3.2.1. Material Asfáltico Fresado

O material asfáltico fresado foi coletado por membros da UFSM a partir dos serviços de conservação e manutenção de pavimentos da rodovia BR-290/RS e BR-116/RS, entre os municípios de Guaíba e Osório/RS (Figura 13). Os serviços estavam sob a responsabilidade da concessionária da rodovia Triunfo/Concepa. Luzzi (2019) utilizou o mesmo material em sua pesquisa.

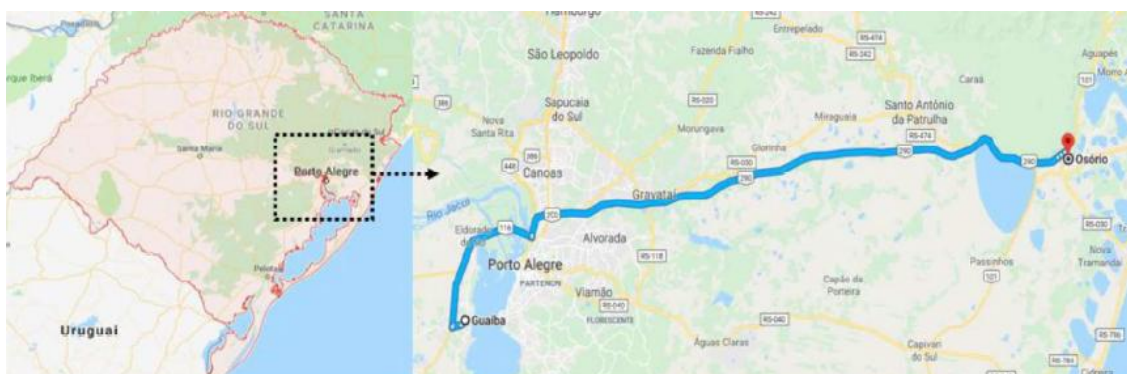


Figura 13: Local da retirada do material asfáltico fresado (LUZZI, 2019)

O equipamento utilizado na fresagem do pavimento foi uma minifresadora (Figura 14), a qual gera um RAP de composição granulométrica fina se comparada a uma fresadora tradicional (LUZZI, 2019).



Figura 14: Equipamento realizando serviço de fresagem (a) e detalhe do tambor de fresagem (b) (LUZZI, 2019)

Luzzi (2019) caracterizou o material fresado com relação ao teor de ligante, conforme DNER 053 (1994) e a umidade presente nos agregados. Com a média de quatro amostras, o autor obteve um teor de ligante de 4,95% e um teor de umidade de 4,39%.

Para a realização dos ensaios da presente pesquisa, o material fresado foi seco em estufa à 60°C por um período médio de dois dias. Então, o material foi peneirado nas diferentes peneiras especificadas pelo DNIT 167 (DNIT, 2013) e acondicionado em diferentes recipientes.

A Figura 15 mostra as seis granulometrias utilizadas: passante na peneira n.1”, n.3/8”, n.4, n.10, n.40, n.200.



Figura 15: Granulometrias de RAP utilizadas na pesquisa (passantes na peneira n.1”, n.3/8”, n.4, n.10, n.40 e n.200)

3.2.2. Vidro

O vidro utilizado para esta pesquisa foi o vidro plano e vem de dois lugares diferentes. O primeiro por meio da empresa MINASOLO, em que foi trazido já moído pela empresa em sacos de 25 kg. Esse material foi peneirado na peneira n. 200 e acondicionado em recipiente até a data de moldagem. Para esta pesquisa, este vidro moído passante na peneira n. 200 será chamado de VM₂₀₀, uma vez que ele será mencionado com frequência nas próximas seções.

Como 85% deste vidro passa na peneira n. 200 foi necessária também a utilização de outro vidro plano, este trazido da Vidraçaria Redenção localizada em Porto Alegre para ser moída nas dependências do LEGG. Esse segundo vidro antes da moagem possui 3 mm de espessura e é comumente utilizado em janelas. A espessura do vidro plano para a construção civil, segundo Petrucci (1987), depende das dimensões da chapa, das pressões de cálculo (considerando vento e peso próprio) e tensões admissíveis. O autor diz que, para a aplicação em janelas, um mínimo de 2 mm deve ser utilizado para vidros recozidos, devendo aumentar para 3 mm caso a pressão de cálculo ultrapassar 100 kgf/cm², sendo esta a mais empregada. Como 3 mm é a espessura de maior demanda, é também a que mais gera resíduo, por este motivo se optou em utilizar apenas essa espessura para ser moída.

Dessa forma, o vidro vindo da vidraçaria passou por uma fase prévia de limpeza para a retirada de qualquer resíduo fixado na superfície do vidro. Depois, o material passou por uma moagem grosseira, para diminuir o tamanho dos cacos a um limite máximo de 25 mm.

Esse material foi então depositado em um moinho metálico, em quantidades fixadas de 1,5 kg de vidro, além de 4,5 kg de bolas metálicas em diferentes tamanhos para permitir a moagem. O tempo de moagem também foi fixado em 3 horas, tendo em vista que este tempo foi o que apresentou o melhor rendimento para este estudo. Essa análise do tempo de moagem é apresentada na Figura 16, em que mostra a moagem das mesmas quantidades de material para diferentes tempos. Vale salientar que o peneiramento do vidro para este estudo se limitou apenas ao que passou na peneira n. 4 (4,8 mm), pois é o que será utilizado para as misturas posteriores. Há também material que ficou retido na peneira n. 4 (não mostrado na Figura 16), porém este não foi considerado e foi guardado para uma nova remoagem.

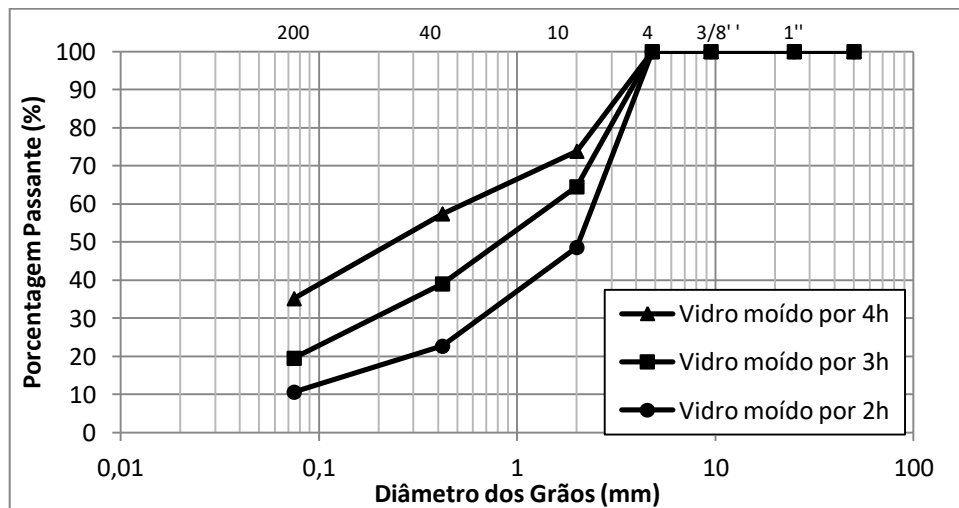


Figura 16: Distribuição granulométrica do vidro moído de acordo com o tempo de moagem

Observa-se que com tempos maiores (4 horas ou mais) tem-se uma maior quantidade de material passante na peneira n. 200, que, para este caso, não era desejado. Enquanto que para tempos menores (2 horas ou menos), apesar da Figura 16 mostrar ser a mais eficiente por gerar uma menor quantidade de vidro passante na n. 200, não se tem uma grande quantidade de vidro moído, visto que boa parte fica retido na peneira n. 4 (não mostrado na Figura 16), necessitando de muito trabalho para remoer este vidro. Com 3 horas, portanto, mostrou ser o tempo ideal, pois, apesar de apresentar uma quantidade um pouco maior de material passante na peneira n. 200 em relação ao moído por 2 horas, ele consegue moer uma quantidade maior de material passante na peneira n. 4, sem necessidade de remoer várias vezes como o anterior.

O tamanho máximo de 4,8 mm (passante na peneira n. 4) foi escolhido por ser o tamanho geralmente aceito. Segundo Shafabakhsh e Sajed (2014) limitar este como o tamanho máximo

leva em consideração benefícios em uma variedade de propriedades de engenharia, incluindo questões de segurança. Lachance-Tremblay *et al.* (2018) também citam este como o tamanho máximo para prevenir problemas relacionados a baixa durabilidade.

Assim, com o vidro moído em moinho, foi possível obter as frações passantes nas peneiras n. 4, n. 10 e n. 40. O que passou na peneira n. 200 não foi utilizado neste estudo, pois para esta fração foi utilizado o vidro já moído pela empresa MINASOLO. A Figura 17 mostra, em ordem, o vidro passante na peneira n. 4, n. 10, n. 40 e n. 200.

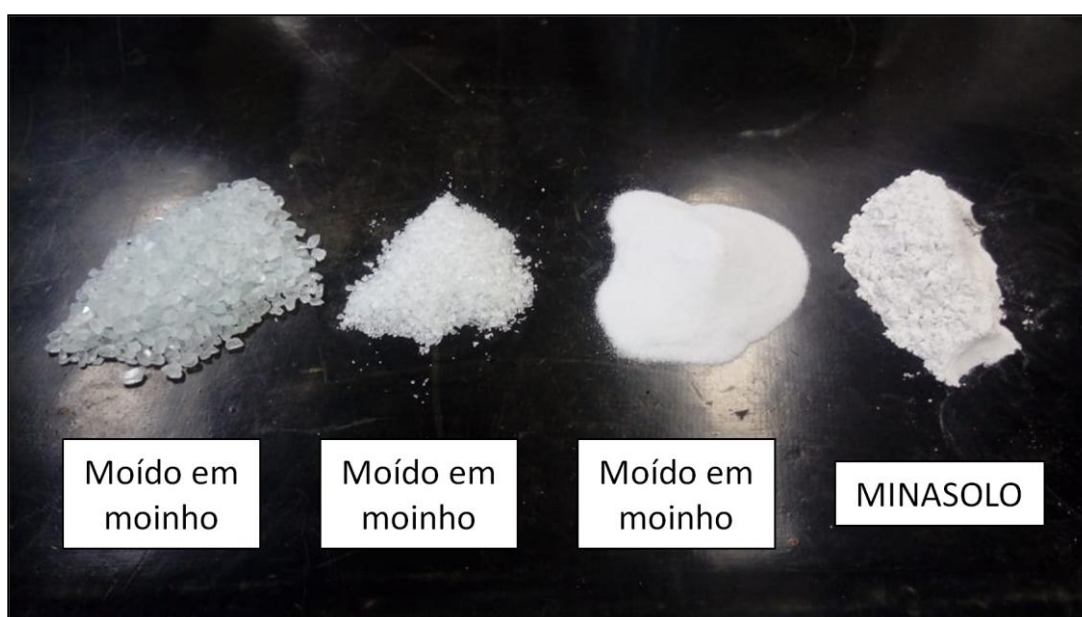


Figura 17: Granulometrias do vidro utilizado na pesquisa com a descrição da origem de cada uma (passante na peneira n. 4, n. 10, n. 40 e n. 200).

A superfície específica foi analisada pelo método de BET no LACER, obtendo um o resultado de $3,28 \text{ m}^2/\text{g}$ para o pó de vidro moído em moinho de bolas, enquanto para o vidro moído pela empresa MINASOLO a superfície específica foi de $2,71 \text{ m}^2/\text{g}$. Essa diferença é comum ao se analisar outras pesquisas, como Scheuerman Filho (2019) que encontrou um valor de superfície específica de $5,45 \text{ m}^2/\text{s}$ para o pó de vidro de cor âmbar, enquanto Sales (2014) encontrou valores de $5,23 \text{ m}^2/\text{g}$ para o pó de vidro incolor e $3,06 \text{ m}^2/\text{g}$ para o pó de vidro de cor âmbar.

A composição química de ambos os vidros está exposta na Tabela 3. Estas foram obtidas através de ensaio de fluorescência de Raios-X (FRX) pelo Instituto de Geociências da UFRGS. Percebe-se, ao se comparar ambos os vidros e também ao vidro plano estudado por

Degirmenci, Yilmaz e Cakir (2011) que os valores de cada componente são muito próximos, fazendo desta uma variável pouco significativa nos resultados. Como era de se esperar, há um alto teor de sílica (SiO_2) nos materiais, seguido pelo óxido de sódio (Na_2O) e óxido de cal (CaO) por ser um vidro soda-cal (como explicado na seção 2.3).

Tabela 3: Composição química dos vidros estudados

Óxido	Vidro MINASOLO	Vidro moinho de bolas	Degirmenci, Yilmaz e Cakir (2011)
SiO_2	69,02	71,09	69,72
Na_2O	10,89	9,00	8,42
CaO	9,72	8,35	8,76
Al_2O_3	4,34	5,02	1,02
MgO	4,20	3,57	3,43
TiO_2	0,05	0,04	ND
Fe_2O_3	0,91	0,66	0,55
MnO	0,01	0,01	ND
K_2O	0,25	0,70	0,13
P_2O_3	ND	0,01	ND
LOI*	0,61	1,56	0,31

LOI* = Loss on Ignition (Perda ao fogo)

3.2.3. Cal de Carbureto

A cal de carbureto é um subproduto trazido úmido da unidade da empresa White Martins Gases Industriais S.A., localizada no município de Sapucaia do Sul no Estado do Rio Grande do Sul. Segundo Saldanha (2018), são gerados, aproximadamente, 2160 toneladas/ano de cal de carbureto (CC) pela empresa citada com umidade entre 48% e 60%. Este material foi trazido ao LEGG, seco em estufa a 60°C por dois dias e então destorroado e peneirado na peneira n. 100.

Com relação à composição química da cal de carbureto, Saldanha *et al.* (2018) utilizou o mesmo material, obtendo a composição mostrada na Tabela 4 através do ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX). Nesta tabela também há uma comparação com outros três autores encontrados na literatura.

Por análise pelo método de BET realizado pelo LACER, foi encontrada uma superfície específica para a cal de carbureto de 17,338 m²/g. Esse valor elevado da superfície específica pode ser um indício da alta reatividade deste material.

Tabela 4: Composição química da cal de carbureto

Óxido	Saldanha <i>et al.</i> (2018) (%)	Horpibulsuk <i>et al.</i> (2012) (%)	Vichan e Rachan (2013) (%)	Jiang <i>et al.</i> (2016) (%)
CaO	74,00	70,78	83,10	68,99
SiO ₂	3,10	6,49	5,71	2,84
Al ₂ O ₃	0,46	2,55	2,61	2,16
Fe ₂ O ₃	0,26	3,25	0,72	0,15
MgO	0,72	0,69	0,80	0,12
SO ₃	0,54	0,66	0,05	0,76
Na ₂ O	ND	ND	0,29	ND
K ₂ O	ND	7,93	ND	ND

FONTE: SALDANHA *et al.* (2018)

Para a determinação dos teores de cal de carbureto necessários para as misturas, foi realizado um método esquematizado por Eades e Grim (1966). Este método consiste em realizar a mistura de 20 gramas de material seco passante na peneira n. 40 (sendo, para este estudo, 70% de material fresado e 30% de vidro moído seguindo as frações da curva $VM_{200} = 10\%$) e 150 ml de água, aos quais são adicionadas quantidades de cal de 2%, 3%, 4%, 5% e 6%. Após uma hora, o pH destas misturas é medido e a quantidade mínima de cal que fornece uma leitura de pH de 12,4 é considerada adequada para a estabilização do solo. Este método é interessante por ser rápido e prático, mostrando a quantidade de cal necessária para reagir quimicamente com o solo. Porém só este teste não é suficiente para a utilização na prática e testes de resistência são necessários como forma de garantia, uma vez que os ganhos de resistência estão relacionados com a formação de silicato de cálcio hidratado (CSH), que varia conforme os componentes mineralógicos do solo.

Dessa forma, a quantidade mínima de cal de carbureto necessária para reagir quimicamente com a mistura $VM_{200} = 10\%$ foi de 3%. Portanto, para a verificação da influência da cal nos ganhos de resistência, foram escolhidos os teores de 3% e 7% com relação à massa seca da mistura.

3.2.4. Água

A água utilizada nesta pesquisa é oriunda da rede hidráulica do LEGG e é considerada potável. Com exceção do ensaio para a determinação do peso específico real dos grãos, em que foi utilizada água destilada.

3.3. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

3.3.1. Análise Granulométrica

A análise granulométrica consiste na determinação das porcentagens, em peso, das diferentes frações constituintes da fase sólida do material (DNIT, 2006).

O ensaio de granulometria seguiu as normas da NBR NM 248 (ABNT, 2003). O material asfáltico fresado foi anteriormente seco em estufa à 60°C por dois dias e então foi feito o peneiramento de duas porções do material. O mesmo foi feito para o vidro moído em moinho. As peneiras utilizadas são as especificadas pelo DNIT-ES 167 (DNIT, 2013).

Como um dos objetivos do trabalho foi avaliar a reutilização do material fresado com a adição de um material cimentante para a aplicação de uma base de pavimento, realizou-se a análise granulométrica para verificar o enquadramento dos materiais nas faixas propostas pelo DNIT-ES 167 (DNIT, 2013), que é especificado para a reciclagem profunda de pavimentos *in situ* com adição de cimento Portland.

Dessa forma, a Tabela 5 e a Figura 18 mostram a distribuição granulométrica da média das duas porções peneiradas, tanto para o material fresado quanto para o vidro moído por 3 horas em moinho.

Tabela 5: Distribuição Granulométrica do material fresado e do vidro moído

Peneira	Abertura (mm)	Material Fresado (%)	Vidro Moído (%)	Faixa II (DNIT 167, 2013)
2"	50	100,00	100,00	100,00
1"	25	100,00	100,00	100,00
3/8"	9,5	90,70	100,00	50 – 85
#4	4,8	67,08	100,00	35 – 65
#10	2	36,55	64,52	25 – 50
#40	0,42	5,20	39,03	15 – 30
#200	0,075	0,45	19,52	5 – 15

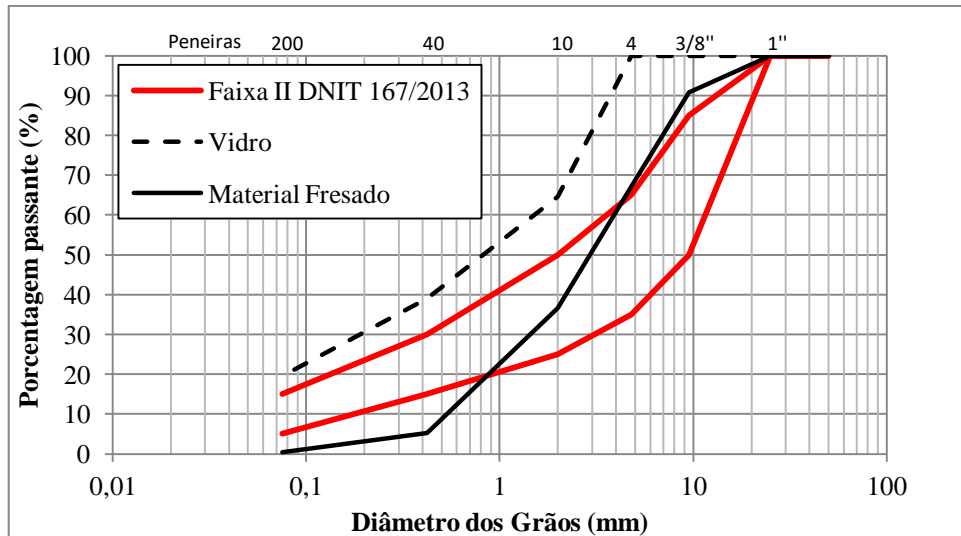


Figura 18: Distribuição granulométrica do material fresado e do vidro moído

Percebe-se que o material retido na peneira 3/8" para ambos os materiais ultrapassam o limite superior da Faixa II do DNIT-ES 167 (2013), evidenciando que a mistura de ambos não se enquadrará nesta faixa. Isso fez com que fosse necessário forçar a granulometria do material fresado nesta peneira para que a mistura fosse enquadrada na faixa proposta (ver seção 3.4.2).

Para avaliar a granulometria da parte fina do material, foi feito ensaio de sedimentação tanto para a cal de carbureto quanto para o vidro moído pela empresa MINASOLO e normalizado pela NBR 7181 (ABNT, 1984). Ensaio de granulometria à laser também foi feito para a cal de carbureto pelo LACER. As três curvas acima citadas são mostradas na Figura 19.

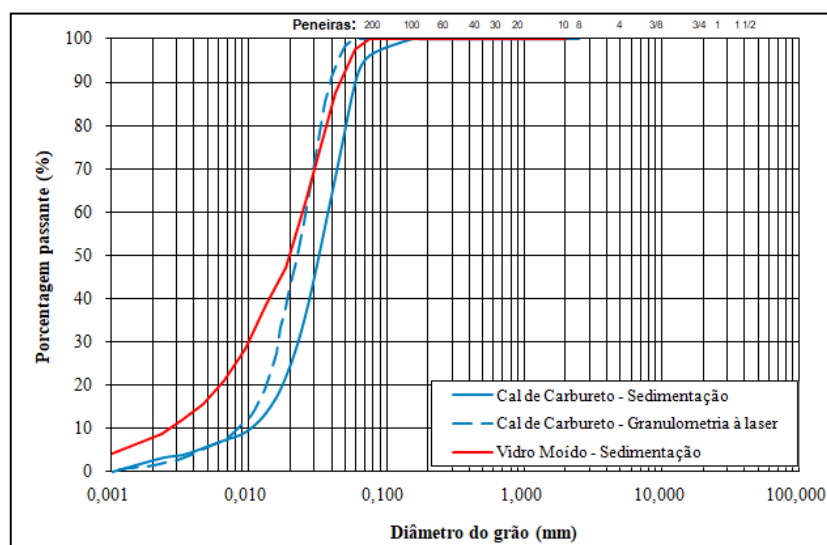


Figura 19: Ensaios de sedimentação e granulometria a laser para o vidro moído e a cal de carbureto

Percebe-se que para o ensaio de granulometria a laser foi utilizada a cal de carbureto passante na peneira n. 200, enquanto que para o ensaio de sedimentação foi utilizado o material passante na peneira n. 100. Havendo assim uma diferença entre os dois.

3.3.2. Massa específica dos materiais

Será mostrado aqui como foram determinadas as massas específicas dos grãos para os agregados miúdos, por meio de picnômetro, e agregados graúdos, por meio de cesto metálico.

De forma resumida, no estudo de agregados são definidas três designações de massa específica: a real (dos grãos), a aparente, e a efetiva, como exemplificado na Figura 20 (BERNUCCI *et al*, 2008).

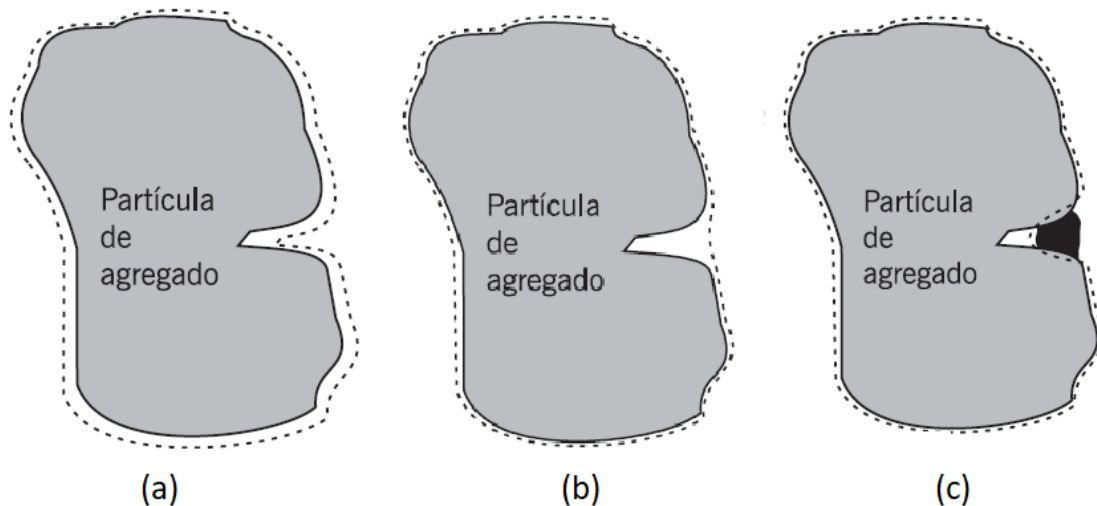


Figura 20: Massa específica real (a), aparente (b) e efetiva (c) (BERNUCCI *et al*, 2008)

A massa específica real (G_s ou ρ_s), também chamada de massa específica dos grãos, é determinada através da relação entre massa seca e volume real, sendo o volume real aquele constituído apenas pelo volume dos sólidos, desconsiderando o volume de quaisquer poros na superfície.

A massa específica aparente (G_{ap} ou ρ_{ap}), ao contrário, não desconta os vazios e considera o material como um todo. É determinada pela relação da massa seca e o volume aparente do agregado, que inclui o volume do agregado sólido e os volumes dos poros superficiais.

A massa específica efetiva (G_{se}) é calculada pela relação da massa seca e o volume efetivo do agregado. O volume efetivo é constituído pelo volume do agregado sólido e o volume dos

poros permeáveis à água que não foram preenchidos pelo asfalto. É determinada quando se conhece o teor de ligante asfáltico na mistura.

No caso desta pesquisa, é interessante saber a massa específica dos grãos para a determinação da porosidade (η) dos corpos de prova, uma vez que esta massa específica mensura apenas o grão em si, sem a influência dos vazios.

3.3.2.1. Agregados Miúdos

A massa específica dos agregados miúdos (aqueles que passam pela peneira n. 4) foi determinada por meio de picnômetro (Figura 21), definido pelo anexo B da ABNT NBR 6458 (2016), onde tanto o vidro moído quanto o material fresado passante na peneira n. 4 foram ensaiados por esse método.



Figura 21: Ensaio de Picnômetro

Inicialmente tomou-se uma amostra do material no estado seco e sua massa (M_1) foi medida em balança com precisão de 0,01g. Essa amostra foi imersa por 24 horas e em seguida transferida para o picnômetro com volume de 500 cm³. Então foi adicionada água destilada até cobrir todo o material e o conjunto foi submetido à vácuo por 20 minutos para a eliminação das bolhas de ar. Após esse período, foi acrescentada água até a marcação padrão do picnômetro, assim sabe-se que o conjunto agregado + água terá um volume de 500 cm³. A massa de todo o conjunto picnômetro + agregado + água é então medida (M_2), assim como a

temperatura (T). Também é necessária a medição da massa do picnômetro + água (M_3) até a marcação padrão, tendo-se assim 500 cm³ de água.

A densidade da água (ρ_w) varia com a temperatura, motivo pelo qual é importante saber a temperatura do conjunto no momento do ensaio. Os valores de ρ_w são tabelados pela norma ABNT NBR 6458 (2016).

Dessa forma, é possível determinar a massa específica dos grãos (ρ_s) através da expressão:

$$\rho_s = \frac{M_1}{M_1 + M_2 - M_3} \cdot \rho_w \quad (\text{Equação 20})$$

Os resultados obtidos para o material fresado e para o vidro moído são mostrados na Tabela 6. Os valores de ρ_s encontrados diferiram em no máximo 0,002 g/cm³ entre as amostras, sendo considerados aceitos pela norma. A média das duas amostras serão as utilizadas ao longo da pesquisa.

Tabela 6: Massa específica dos grãos para o material fresado e o vidro moído

	Material Fresado		Vidro Moído	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
M_1 (g)	375,45	100,00	100,00	100,00
M_2 (g)	868,26	708,56	709,91	709,86
M_3 (g)	649,51	650,30	650,30	650,21
T (°C)	24,00	21,20	21,20	22,00
ρ_w (g/cm ³)	0,9973	0,9980	0,9980	0,9978
ρ_s (g/cm ³)	2,390	2,391	2,471	2,473
Média ρ_s	2,390 g/cm³		2,472 g/cm³	

3.3.2.2. Agregados Graúdos

Para a determinação da massa específica dos agregados graúdos do material fresado (passante na peneira n. 1 e retido na peneira n. 4), é utilizado o ensaio do cesto metálico, definido pela ABNT NBR 6458 (2016) e pela ABNT NBR NM 53 (2003 - errata 2006). Onde é possível obter a massa específica na condição seca dos grãos (ρ_s), a massa específica aparente (ρ_{ap}) e a absorção de água (Aa) das amostras.

O procedimento para o ensaio é apresentado em quatro etapas na Figura 22, onde são feitas três medições de massa.

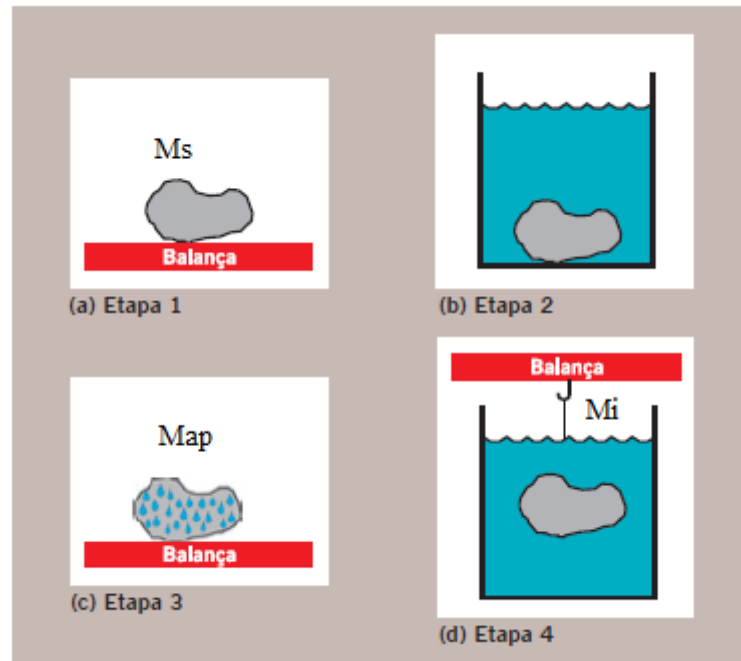


Figura 22: Procedimento para o ensaio do cesto metálico (BERNUCCI *et al*, 2008 adaptado pelo autor)

Na etapa 1 acontece a primeira medição da massa ao ar da amostra seca (M_s). Depois esta amostra é submersa por 24 ± 4 horas à temperatura ambiente (etapa 2) e então, após uma secagem superficial dos agregados com pano absorvente (etapa 3), é imediatamente feita a medição da massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (M_{sat}). Por fim, a amostra é colocada em um cesto metálico e o conjunto é submergido em água a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ (etapa 4), realizando assim a medição da massa da amostra totalmente imersa em água (M_i). Com as três medições feitas, é possível obter, conforme a ABNT NBR 6458 (2016), a massa específica do agregado seco (ρ_s) em g/cm^3 :

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_s - M_i} \cdot \rho_w \quad (\text{Equação 21})$$

Também é obtida a massa específica aparente (ρ_{ap}) em g/cm^3 , definida pela expressão abaixo:

$$\rho_{ap} = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \cdot \rho_w \quad (\text{Equação 22})$$

A absorção é determinada, em porcentagem, com a seguinte expressão:

$$A_a = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (\text{Equação 23})$$

Com isso, chegou-se aos resultados apresentados na Tabela 7, onde foi realizada a média das duas amostras ensaiadas.

Tabela 7: Massas específicas e absorções obtidas com o ensaio do cesto metálico do material fresado

	Amostra 1	Amostra 2	
m	998,8	1012,5	MÉDIAS
m _s	1024,2	1038,1	
m _a	612,8	616,2	
ρ _s	2,588	2,555	2,571 g/cm ³
ρ _{ap}	2,428	2,400	2,414 g/cm ³
A _a	2,543	2,528	2,536%

Como o material fresado tem duas frações de agregados (grãos e miúdos) com duas massas específicas diferentes, é realizado, por fim, a massa específica média através de um valor ponderado das duas frações. A mistura que será apresentada na Seção 3.4 mostra que 53,04% da mistura é constituído de agregados miúdos e 46,96% de agregados grãos para o material fresado. No caso do vidro, 100% do material utilizado na mistura passa na peneira n. 4 e é, portanto, agregado miúdo.

A média ponderada das duas frações (%1 e %2) do material fresado é expressa pela Equação 24 mostrada por Bernucci *et al.* (2008):

$$\rho_s = \frac{1}{\frac{\%1}{\rho_{s1}} + \frac{\%2}{\rho_{s2}}} \quad (\text{Equação 24})$$

Dessa forma, as massas específicas finais utilizadas na pesquisa para o material asfáltico fresado e o vidro moído são mostradas na Tabela 8.

Tabela 8: Massas específicas dos grãos (ρ_s) do material fresado e vidro moído utilizados na pesquisa

Material	Tipo	Ensaio	% em massa das frações	ρ _s (g/cm ³)	ρ _s (g/cm ³)
MF	Agregado Miúdo	Picnômetro	53,04%	2,390	2,482
	Agregado Graúdo	Cesto Metálico	46,96%	2,571	
VM	Agregado Miúdo	Picnômetro	100,00%	2,472	2,472

Luzzi (2019) encontrou com a média de quatro amostras uma massa específica máxima (G_{mm}) de 2,544 g/cm³ pelo método Rice.

3.4. MÉTODOS

3.4.1. Preparo das misturas

Primeiramente foram definidas as quantidades de misturas analisadas. Para atender uma quantidade de variáveis adequadas, foram feitas 12 misturas diferentes para cada ensaio, como mostrado na Tabela 9.

Tabela 9: Distribuição dos corpos de prova (CP's) por ensaio realizado

Ensaio Realizado	Misturas	Quantidade de CP's por mistura	Total de CP's	Dimensão do CP (cm)
RCS	12	2	24	10x20
RT	12	2	24	10x20
Durabilidade	12	1	12	10x12,75
MR	12	2	24	10x6,30
E*	12	2	24	10x15

Com exceção do ensaio de durabilidade, todos os ensaios tiveram duplicatas, totalizando 108 corpos de prova para os cinco ensaios. As 12 misturas e suas nomenclaturas adotadas são citadas individualmente abaixo:

Tabela 10: Nomenclatura adotada para cada mistura

Nomenclatura	Corpo de prova	γ_d	VM ₂₀₀	CC
FV-19-10-3	CP 1	19	10%	3%
FV-19-10-7	CP 2	19	10%	7%
FV-20-10-3	CP 3	20	10%	3%
FV-20-10-7	CP 4	20	10%	7%
FV-19-15-3	CP 5	19	15%	3%
FV-19-15-7	CP 6	19	15%	7%
FV-20-15-3	CP 7	20	15%	3%
FV-20-15-7	CP 8	20	15%	7%
FV-19-25-3	CP 9	19	25%	3%
FV-19-25-7	CP 10	19	25%	7%
FV-20-25-3	CP 11	20	25%	3%
FV-20-25-7	CP 12	20	25%	7%

Como se pode observar, têm-se então três fatores (γ_d , VM_{200} e CC), sendo o γ_d e o CC com dois níveis, enquanto o VM_{200} tem três níveis. Isso porque o foco principal da pesquisa é avaliar o efeito da adição de vidro moído na mistura. Além disso, após testes iniciais de compressão simples, observou-se estatisticamente que, para as variáveis selecionadas, o efeito do VM_{200} na mistura é superior aos efeitos da cal de carbureto e do γ_d , optando-se, assim, em explorar um nível a mais dessa variável. Esse efeito superior do vidro moído é confirmado posteriormente após todo o ensaio de resistência à compressão simples (RCS) e será discutido posteriormente nos resultados dessa dissertação.

3.4.2. Dosagem e misturas

O material asfáltico fresado por si só apresenta na sua constituição granulométrica uma deficiência de finos, como mostrado na Seção 2.2.2 e como é mostrado no material da presente pesquisa (Figura 18). Por conta disso, há certa dificuldade de enquadrar este material em faixas granulométricas para camadas de base estabilizadas quimicamente, conforme DNIT-ES 167 (DNIT, 2013).

O que se tem visto em muitas pesquisas como a de Pires (2014), Pasche (2016), Tanski (2016) e Silva (2018), é a adição de pó de pedra como agregado miúdo para enquadrar a mistura na faixa granulométrica. Os referidos autores utilizaram na mistura a proporção de 70% de material fresado e 30% de pó de pedra. Esta proporção 70/30 também será utilizada para esta pesquisa, ou seja, 70% de material fresado passante na peneira 1" e 30% de vidro moído passante na peneira n. 4 (Figura 23).

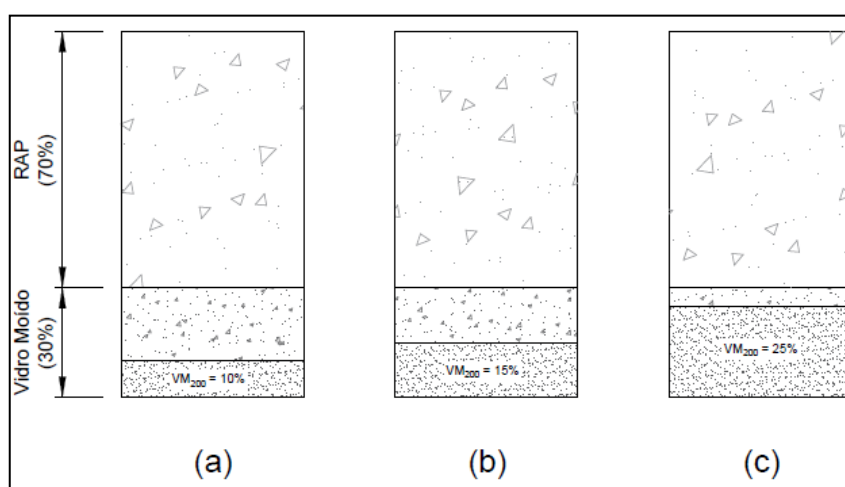


Figura 23: Esquemática das proporções de RAP e vidro moído na mistura para (a) $VM_{200} = 10\%$, (b) $VM_{200} = 15\%$ e (c) $VM_{200} = 25\%$

A presente pesquisa tem o intuito de, ao invés de adicionar um material comumente empregado como o pó-de-pedra, adicionar vidro moído para preencher esta deficiência de material fino proveniente da fresagem. Essa escolha foi feita porque se sabe que há a presença de uma grande quantidade de sílica (SiO_2) na composição do vidro e, assim, se tem a tendência de obter reações satisfatórias com a cal de carbureto e melhorar suas propriedades mecânicas.

Tendo em vista a melhor reação da cal de carbureto com a parte fina dos agregados, foi decidido variar a quantidade de vidro moído passante na peneira n. 200 (VM_{200}) em três teores diferentes (como esquematizado na Figura 23), para assim verificar a influência que a variação do teor de VM_{200} oferece aos resultados dos ensaios. Os três teores escolhidos são:

- Teor de $\text{VM}_{200} = 10\%$ - contemplando o meio dos limites da Faixa II do DNIT 167/2013 para a peneira n.200;
- Teor de $\text{VM}_{200} = 15\%$ - contemplando o limite superior da Faixa II do DNIT 167/2013;
- Teor de $\text{VM}_{200} = 25\%$ - extrapolando o limite superior da Faixa II do DNIT 167/2013.

Essa extrapolação para 25% de VM_{200} foi feita para verificar o que ocorre com uma quantidade maior dessa fração, visto a boa reação que esta faz com a cal de carbureto. De forma resumida, dos 30% de vidro passante na peneira n. 4 presente nas 12 misturas, quatro terão 10% passante na peneira n. 200, quatro terão 15% e quatro terão 25%, como mostrado na Seção 3.4.

A Tabela 11 e a Figura 24 mostram as granulometrias das três misturas acima citadas. Vale ressaltar que tanto o material fresado quanto o vidro moído precisaram ter ajustes nas suas granulometrias com relação aos materiais originais (Tabela 5 e Figura 18) para conseguirem se adequar aos limites da faixa II do DNIT-ES 167 (DNIT, 2013).

Os ajustes foram feitos para que se tivesse o melhor aproveitamento do material fresado. No caso do vidro, como se está trabalhando com três teores diferentes e como se está extrapolando um dos pontos, exigiu-se muito mais material passante na peneira #200, alcançando até 82,30% para VM_{200} de 25%. Isto é algo muito superior aos 19,52% da granulometria obtida moendo o vidro por 3 horas (Tabela 5), sendo este um dos motivos de se utilizar o vidro já moído da empresa MINASOLO para esta fração.

Tabela 11: Distribuição granulométrica dos materiais e das misturas utilizadas

Peneira	Abertura (mm)	Material Fresado (MF)	Vidro Moído (VM)			Mistura (70% MF + 30% VM)		
			VM ₂₀₀ = 10%	VM ₂₀₀ = 15%	VM ₂₀₀ = 25%	VM ₂₀₀ = 10%	VM ₂₀₀ = 15%	VM ₂₀₀ = 25%
2"	50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	9,5	78,00	100,00	100,00	100,00	84,60	84,60	84,60
n. 4	4,8	46,96	100,00	100,00	100,00	62,87	62,87	62,87
n. 10	2	30,00	90,00	90,00	90,00	48,00	48,00	48,00
n. 40	0,42	5,20	87,86	87,86	87,86	30,00	30,00	30,00
n. 200	0,075	0,45	32,30	57,30	82,30	10,00	15,00	25,00

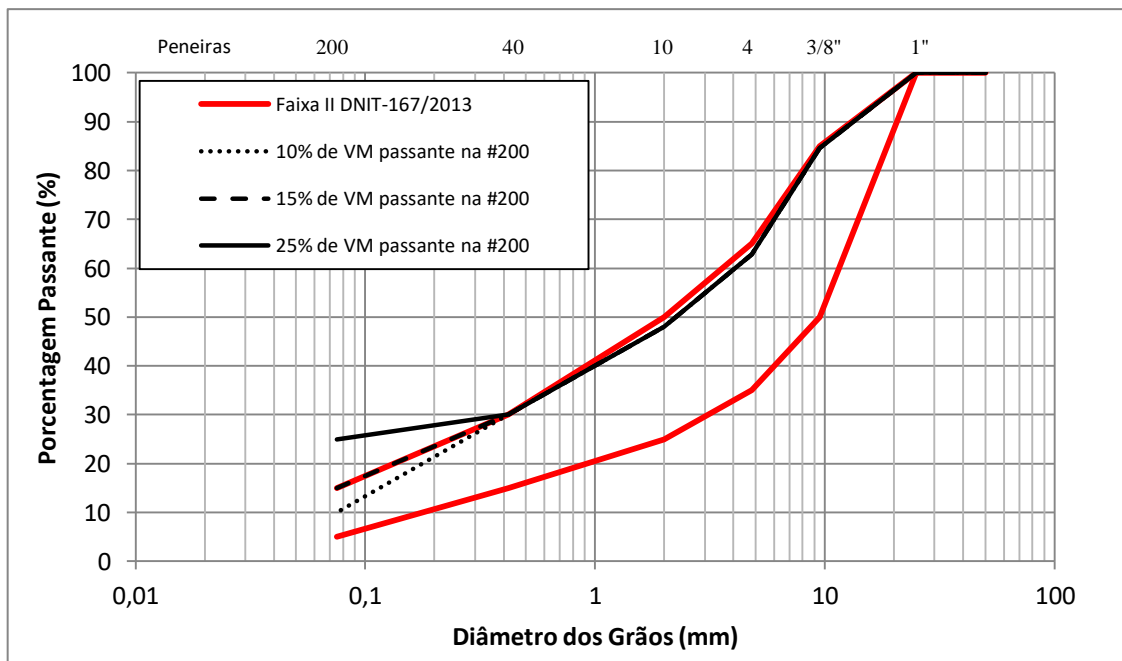


Figura 24: Distribuição granulométrica das misturas utilizadas

É recomendado pelo DNIT-ES 167 (DNIT, 2013) que a fração passante na peneira n. 4 seja de, no mínimo, 50% para a mistura final. Isso é atendido para esta pesquisa, em que as três misturas 70/30 apresentam 62,87% de material passante na peneira n. 4. Vale destacar que as proporções aqui citadas e os teores empregados nas misturas são referentes à massa seca dos materiais.

3.4.3. Ensaio de Compactação Proctor

Foram realizados três ensaios de compactação Proctor modificado, um para cada mistura estudada ($VM_{200} = 10\%$, $VM_{200} = 15\%$, $VM_{200} = 25\%$) e seguiu os procedimentos recomendados pela ASTM D558 (ASTM, 2011).

O ensaio seguiu a proporção de 70% de RAP e 30% de vidro moído e, para poupar material, optou-se por reutilizar o mesmo material nos cinco pontos do ensaio. Foram também adicionados 7% de cal de carbureto em cada mistura.

A umidade do material é determinada pela ABNT NBR 6457 (ABNT, 2016) através da secagem em estufa a 100°C de uma amostra retirada do corpo de prova. Ao final, foram obtidas as três curvas de compactação Proctor modificado, conforme mostra a Figura 25.

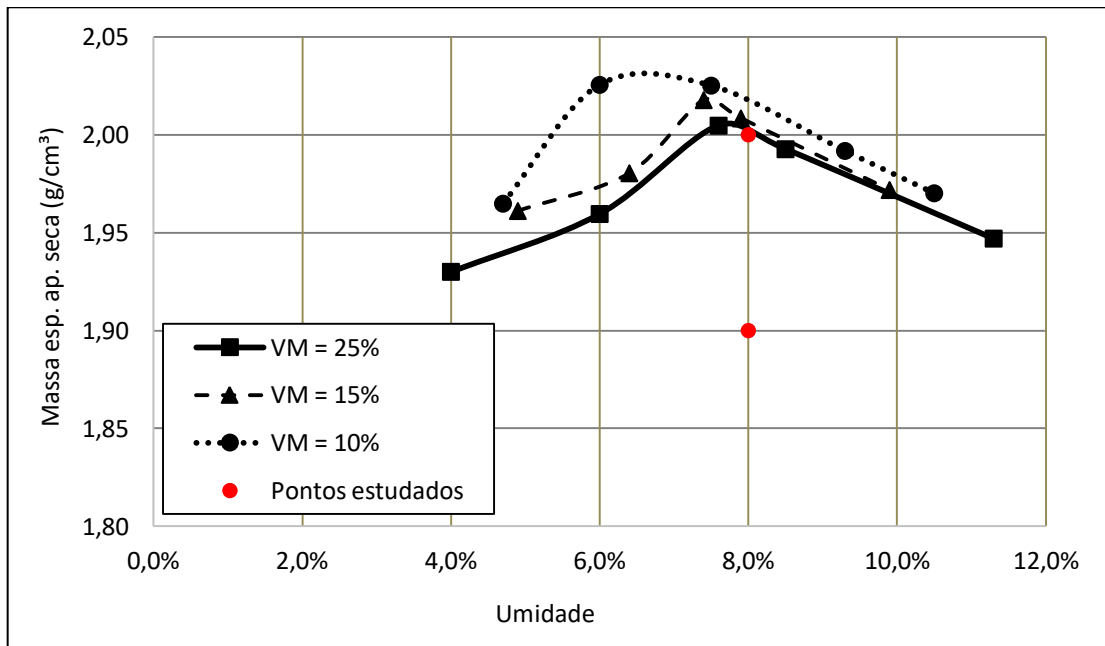


Figura 25: Ensaio de compactação Proctor Modificado para as três misturas estudadas e os dois pontos escolhidos para a realização dos corpos de prova

A Tabela 12 mostra a umidade (w) e massa específica aparente seca (γ_d) das três misturas nos cinco pontos das curvas de compactação. Em negrito são mostrados os valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima de cada mistura. No caso de $VM_{200} = 10\%$ a umidade ótima é o valor intermediário entre os pontos 2 e 3, ou seja, $w = 6,75\%$.

Tabela 12: Umidade (w) e massa específica aparente seca (γ_d) das três misturas

Pontos	VM ₂₀₀ = 10%		VM ₂₀₀ = 15%		VM ₂₀₀ = 25%	
	γ_d	w	γ_d	w	γ_d	w
1	1,96	4,70%	1,96	4,90%	1,93	4,00%
2	2,03	6,00%	1,98	6,40%	1,96	6,00%
3	2,03	7,50%	2,02	7,40%	2,00	7,60%
4	1,99	9,30%	2,01	7,90%	1,99	8,50%
5	1,97	10,50%	1,97	9,90%	1,95	11,30%

Com base nesses resultados, foram escolhidos dois pontos para a realização dos ensaios futuros, conforme mostrado na Figura 25. Optou-se por manter a umidade constante em 8%, procurando mantê-la próxima à umidade ótima das misturas. No caso da massa específica aparente seca (γ_d) foram escolhidos os pontos de 1,9 e 2,0 g/cm³ (19 e 20 kN/m³), por serem os mais próximos da massa específica aparente seca máxima das três misturas. Tentou-se também realizar a moldagem de um corpo de prova com γ_d de 1,8 g/cm³, porém este desmanchou quando foi desmoldado, mostrando ser extremamente frágil. Silva (2012), Pires (2014) e Ely (2014) encontraram resultados de compactação semelhantes para seus respectivos materiais.

3.4.4. Moldagem e cura

Para a moldagem dos corpos de prova foi utilizado um molde de metal cilíndrico tripartido com 10 cm de diâmetro interno e 20 cm de altura. Os ensaios de RCS e RT foram moldados na dimensão do molde (10x20) em cinco camadas, o ensaio de durabilidade tem dimensão 10x12,75 e foi moldado em 3 camadas, o ensaio de módulo complexo as dimensões são 10x15 moldado em 3 camadas e o ensaio de MR tem as dimensões de 10x6,30 e moldado em duas camadas.

Após a definição da quantidade em peso de cada componente (RAP, vidro moído e cal de carbureto) através da dosagem definida na Seção 3.4.2, esses foram aferidos em balança com precisão de 0,01g nos seus devidos teores um dia antes da data de moldagem. Depois foram ensacados individualmente (fresado e vidro moído separado da cal de carbureto para evitar qualquer reação precipitada).

No dia da moldagem, os três materiais foram misturados, então foi adicionado 8% em peso de água e novamente misturado até atingir a homogeneização. Feito isso, a mistura foi dividida em dois, três ou cinco (dependendo do ensaio) partes iguais e armazenadas em recipientes fechados para evitar a perda de umidade durante o processo. Nessa fase também é coletada amostras em cápsulas (três por corpo de prova) para a determinação da umidade em estufa à 100°C.

Cada recipiente representa uma camada, à qual é transferida para o molde metálico tripartido e compactado estaticamente por meio de macaco hidráulico até atingir a altura desejada de cada camada. O topo de cada camada é levemente escarificado para garantir um melhor contato entre elas. O tempo necessário para misturar e compactar foi sempre inferior à uma hora.

Por fim, o corpo de prova foi retirado do molde, suas dimensões e peso foram medidos e então foram armazenadas por um período de cura de 28 dias.

3.4.5. Procedimentos dos ensaios

No caso dos ensaios de RCS e RTCD os corpos de prova foram colocados em imersão por 24 horas um dia antes de atingir o tempo de cura, para evitar que o efeito de sucção influencie nos resultados. Ao finalizar o período de imersão os corpos de prova de RCS e RTCD foram retirados do tanque, secos superficialmente e efetuado as medições de altura e diâmetro com resolução de 0,01mm, bem como a massa foi aferida em balança com precisão de 0,01g.

Nos demais ensaios (Durabilidade, MR e E*) não se teve esse período de imersão. Assim, logo após completar 28 dias de cura os CPs foram medidos e os ensaios foram iniciados. O procedimento de cada ensaio será descrito a seguir.

3.4.5.1. Ensaio de Resistência à compressão simples (RCS)

Mitchell (1981) diz que a resistência à compressão simples (ou resistência à compressão não confinada) é uma propriedade facilmente mensurável que pode frequentemente ser usada como base para estimativas de outras propriedades.

Por ser simples, esse ensaio tem sido largamente difundido em programas experimentais na literatura para solos artificialmente cimentados. Assim, é possível verificar a efetividade da estabilização química através do ganho de resistência.

Neste ensaio, a ruptura ocorre unicamente devido à aplicação da tensão axial no corpo de prova, pois não há tensão confinante. O ensaio seguiu as diretrizes proposto pela NBR 12025 (2012), com o auxílio das normas NBR 12253 (2012) e ASTM D5102 (2004).

Nesta pesquisa, foi utilizado um anel dinamométrico calibrado com capacidade de 100 kN (Figura 26), onde a velocidade de deslocamento foi controlada em 1,14 mm por minuto. Um total de 24 amostras foi ensaiado.



Figura 26: Equipamento para o ensaio de resistência à compressão simples

Para o cálculo da resistência à compressão simples (q_u) utilizou-se a Equação 25.

$$q_u = \frac{F}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (\text{Equação 25})$$

Sendo,

q_u – resistência à compressão simples em MPa;

F – carga de ruptura (N);

D – diâmetro médio do corpo de prova obtido a partir das medições de topo, centro e base (mm).

3.4.5.2. Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD)

A resistência à tração (RT) tem se mostrado um importante parâmetro para a caracterização de materiais como o concreto de cimento Portland e misturas asfálticas (BERNUCCI *et al.*, 2008). Devido à dificuldade de se obter a resistência à tração diretamente, foram desenvolvidos diversos métodos indiretos para determinar essa resistência, dentre elas está o chamado ensaio brasileiro, desenvolvido por Carneiro (1943).

Este ensaio tem sido mundialmente utilizado por ser fácil e rápido de ser executado, além de aproveitar o mesmo molde cilíndrico e o mesmo equipamento do ensaio de RCS. Segundo Bernucci *et al.* (2008) este ensaio consiste na aplicação de um carregamento na direção diametral do corpo de prova, em que considera a aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão no corpo de prova cilíndrico que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro. No caso de misturas asfálticas, a aplicação dessas forças se dá através de frisos metálicos de 12,7mm de largura com curvatura adequada ao corpo de prova cilíndrico.

Quando se fala em resistência à tração, esta atinge em média cerca de 10% da resistência à compressão simples nas condições de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima (INGLES e METCALF, 1972).

Os ensaios seguiram os preceitos das normas DNIT-ME 136 (DNIT, 2010) e ASTM C 496 (ASTM, 2004). Segundo o DNIT-ME 136 (DNIT, 2010) a resistência à tração (q_t) obtida por meio deste ensaio é determinada pela expressão:

$$q_t = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (\text{Equação 26})$$

Onde:

q_t – resistência à tração (MPa);

F – carga de ruptura (N);

D – diâmetro médio do corpo de prova obtido a partir das medições de topo, centro e base (cm);

H – altura média do corpo de prova (cm).

A prensa hidráulica é a mesma que a utilizada no ensaio anterior, como mostra a Figura 27. Por ter resistências menores que o ensaio de RCS, desta vez foi utilizado um anel dinamométrico com capacidade de 10 kN para medir a resistência no plano diametral.



Figura 27: Equipamento para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral

3.4.5.3. Ensaio de Durabilidade

Ingles e Metcalf (1973) definem a durabilidade como uma condição muito desejada para garantir a resistência do material aos processos de intemperismo, erosão e uso de tráfego. Segundo Isaia (2007), no caso da aplicação de solo-cimento em pavimentos, procura-se garantir a permanência da coesão da mistura compactada, quando solicitado pela ação do tráfego ou pelos esforços provenientes de variação de temperatura e de umidade. Com esse objetivo, a *Portland Cement Association* (PCA, 1992) elaborou o ensaio de durabilidade em que os corpos de prova são submetidos a ciclos de molhagem/secagem e congelamento/degelo. O objetivo desses ensaios, no entanto, é a verificação da durabilidade e não da resistência ao desgaste, como tem sido às vezes interpretado.

Os problemas que acontecem nas vias construídas no Chaco Paraguaio é um exemplo da necessidade deste ensaio, onde ao fazer a estabilização química este obtém boas resistências. Porém, devido à característica dispersiva deste material, esta resistência decai em pouco

tempo devido aos processos erosivos causados pela chuva. Samaniego (2015) e Scheuermann Filho (2019) buscaram soluções para contornar este problema.

Nesse sentido, com o intuito de se avaliar o desempenho das misturas estudadas, realizou-se o ensaio de durabilidade por molhagem e secagem de acordo com a norma ASTM D 559 (ASTM, 2015) e NBR 13554 (ABNT, 1996).

Esse ensaio consiste na moldagem de corpos de prova (CPs) de altura igual a 12,75 cm e diâmetro igual a 10,00 cm para cada mistura. Cada CP, após os 28 dias de cura, passa por um processo de 12 ciclos de molhagem e secagem, onde cada ciclo tem 48 horas de duração. A Figura 28 mostram os 12 corpos de prova antes de iniciar os ciclos de molhagem e secagem.

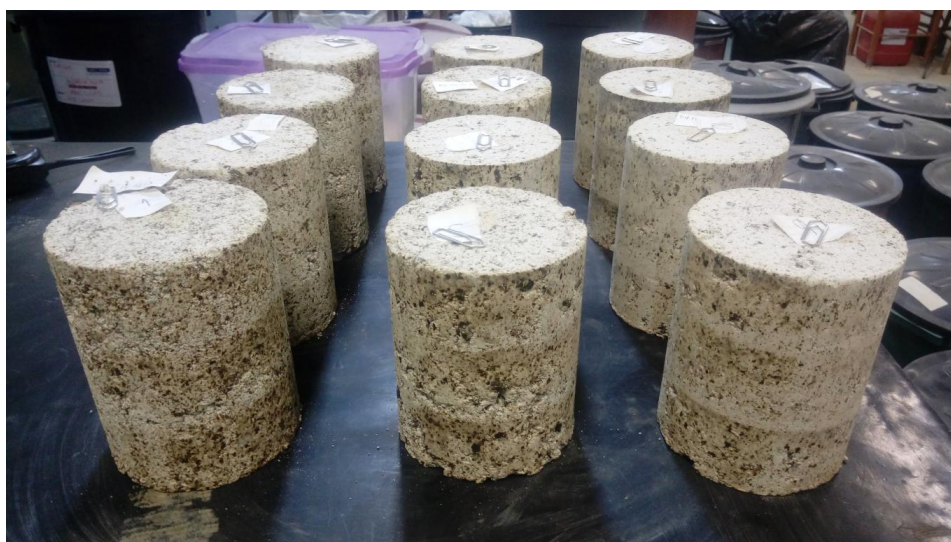


Figura 28: Corpos de prova após 28 dias de cura

Cada ciclo se inicia com o CP sendo submerso em água por 5 horas. Após esse período, colocam-se os CPs na estufa a $71^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 42 horas. Terminado o tempo de secagem, estes eram escovados 18 vezes ao longo da superfície lateral, quatro vezes no topo e quatro vezes na base, com uma força aproximada de 13 N feita manualmente. A perda de massa foi registrada pesando cada CP antes e depois de cada escovação. Repete-se este processo 12 vezes, completando-se assim 12 ciclos.

3.4.5.4. Módulo de Resiliência (MR)

Na pavimentação, a rigidez de uma mistura pode ser determinada através de dois tipos de ensaios: Módulo de Resiliência (MR) e Módulo Complexo (E^*) (ALMEIDA JÚNIOR, 2016). O primeiro ensaio considera o material com comportamento elástico enquanto o segundo considera o material com comportamento viscoelástico (leva em conta o efeito do tempo de carregamento e temperatura).

Segundo Bernucci *et al.* (2008) os estudos do comportamento resiliente iniciaram quando Francis Hveem, na década de 1930, teve a ideia de relacionar as deformações recuperáveis (resiliência) com as fissuras surgidas no revestimento asfáltico. Foi ele também que adotou o termo “resiliência”, definindo como uma “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 291). Sendo o Módulo de Resiliência assim chamado para não ser confundido com o Módulo de Young, que é determinado estaticamente, pois as deformações são muito maiores no pavimento do que em muitos sólidos elásticos, como vidro, concreto, aço, etc. (BERNUCCI *et al.*, 2008; HVEEM, 1955). Medina e Motta (2005) também citam a rigidez como outro termo usado para descrever a capacidade de resistir à deformação, principalmente em misturas betuminosas.

Para Huang (2004), a maioria dos materiais de pavimentação não tem comportamento elástico, mas sofrem alguma deformação permanente após cada aplicação de carga. Contudo, se a carga é pequena em comparação com a resistência do material e é repetida por um grande número de vezes, a deformação sob cada repetição de carga é quase totalmente recuperável e pode ser considerada elástica. O autor, através da Figura 29, mostra as deformações de uma amostra sob um ensaio de carga repetida, onde no estágio inicial há considerável deformação permanente (deformação plástica). À medida que o número de repetições aumenta, essas deformações permanentes diminuem. Essa deformação é praticamente toda recuperável (ϵ_r) depois de 100 a 200 repetições.

Como mostra Bernucci *et al.* (2008), os carregamentos impostos em cada repetição têm um período de tempo e uma magnitude constante. Huang (2004) diz que, por estes carregamentos serem pequenos, este ensaio é considerado não-destrutivo, possibilitando que a mesma amostra possa ser utilizada para outros ensaios.

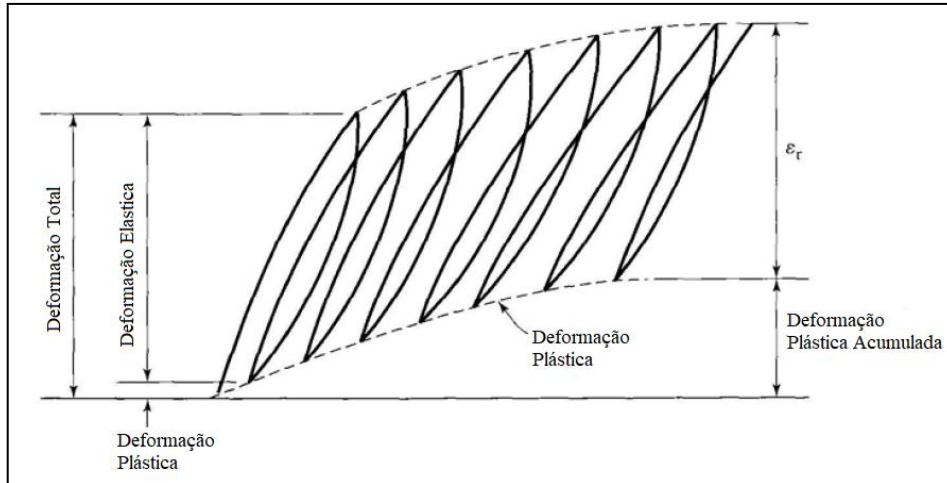


Figura 29: Deformações sob carregamentos repetidos (HUANG, 2004)

Assim, o MR é definido como (HUANG, 2004; YODER; WITCZAK, 1975; DNIT-ME 135, 2018):

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (\text{Equação 27})$$

Onde σ_d é a tensão desvio e ϵ_r a deformação elástica recuperável, ou deformação resiliente (mostrada na Figura 29). A tensão desvio, neste caso, é a tensão axial em um ensaio de compressão não confinada definida como (DNIT-ME 181, 2018):

$$\sigma_d = \frac{P}{A} \quad (\text{Equação 28})$$

Sendo P a carga cíclica aplicada e A a área do CP. Por sua vez, a deformação resiliente (ϵ_r) é definida como a razão entre o deslocamento resiliente (d_r) e a altura de referência (H_0):

$$\epsilon_r = \frac{d_r}{H_0} \quad (\text{Equação 29})$$

Em misturas asfálticas em geral, os procedimentos para o ensaio MR (que serão os mesmos utilizados para a presente pesquisa) se baseiam no DNIT-ME 135 (DNIT, 2018), que utiliza o equipamento de compressão diametral de carga repetida, cujas amostras têm dimensões de 3,50 a 6,50 cm de altura por 10 cm de diâmetro. Como o ensaio é conduzido de forma diametral, a equação utilizada para a obtenção do MR (em MPa) é definida como (DNIT-ME 135, 2018):

$$MR = \frac{F}{100\Delta H} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (\text{Equação 30})$$

Sendo,

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

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

H = altura do corpo de prova (cm);

μ = coeficiente de Poisson.

Segundo Balbo (2007) para materiais cimentados como concreto cimento Portland, concreto compactado a rolo (CCR) e brita graduada tratada com cimento (BGTC) o coeficiente de Poisson varia entre 0,15 e 0,20. Assim, para esta pesquisa foi adotado um valor de $\mu = 0,20$.

Com relação à moldagem e cura, os procedimentos aconteceram de forma semelhante aos ensaios anteriores, com a diferença das dimensões do corpo de prova (10x6,30) e o número de camadas compactadas (duas camadas por CP). Os 24 corpos de prova foram moldados e curados no LEGG e foram transportados, junto aos CPs do ensaio de módulo complexo, até o laboratório de pavimentação asfáltica da UFSM.

O equipamento utilizado para a realização deste ensaio foi uma prensa UTM-25 (Universal Testing Machine), o qual é composto por um pistão hidráulico controlado por circuitos eletrônicos. A amostra sofre deformação horizontal, lidas por dois LVDTs (Linear Variable Differential Transducer) ligados a um microcomputador. A Figura 30 mostra um corpo de prova sendo executado pela prensa UTM-25, onde é possível observar o pistão aplicando carregamento cíclico vertical e os LVDT lendo a deformação horizontal.

Como demonstra Bernucci *et al.* (2008), o ensaio se baseia na aplicação de uma frequência de cargas repetidas na tensão vertical de 1 Hz (60 ciclos por minuto), onde cada ciclo corresponde à duração do pulso de carga de 0,1 segundo e 0,9 segundo de repouso, conforme demonstrado na Figura 31. Para não haver ruptura, a aplicação de carga vertical deve ter uma tensão equivalente de aproximadamente 10% da resistência à tração da mistura.

Medina e Motta (2005) dizem que esse tempo de pulso e repouso tenta reproduzir as condições de campo, em que a amplitude e o tempo de pulso dependem da velocidade do veículo e da profundidade em que se calculam as tensões e deformações produzidas.

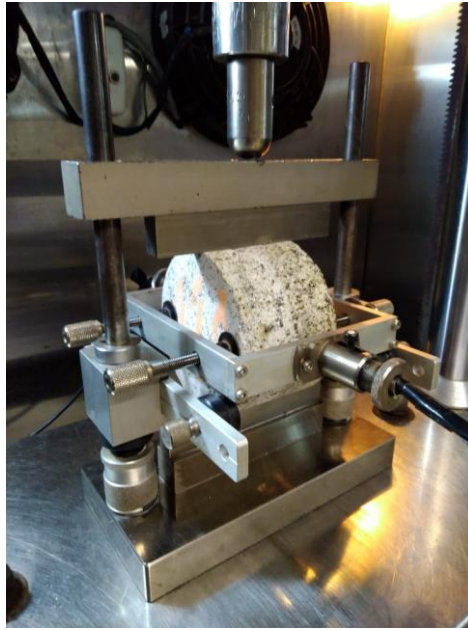


Figura 30: Execução do ensaio de módulo de resiliência

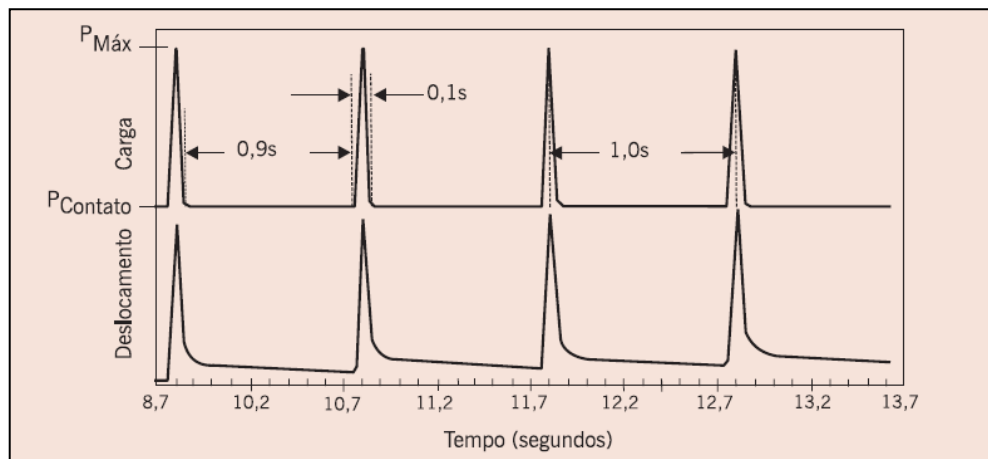


Figura 31: Duração dos tempos de carregamento e repouso (BERNUCCI *et al.*, 2008)

Os corpos de prova ficaram por uma noite em condicionamento a uma temperatura de 25°C. A mesma temperatura foi controlada durante o ensaio, respeitando a recomendação do DNIT-ME 135 (DNIT, 2018). Todas as amostras foram ensaiadas a 0° e 90°, assim, os valores apresentados nos resultados representam a média entre essas duas leituras. Como as amostras são não-destrutivas neste ensaio, após a obtenção dos resultados de MR, estas foram rompidas à tração (RT). Assim, pode-se avaliar também a relação MR/RT.

3.4.5.5. Módulo Complexo (E^*)

O Módulo Complexo (E^*) pode ser usado para determinar tanto a propriedade viscoelástica linear quanto a propriedade elástica dos materiais do pavimento para a determinação da rigidez (YODER; WITCZAK, 1975). Historicamente, o módulo complexo vem sendo pesquisado desde a década de 1960 como uma alternativa ao MR, porém em projetos de rodovias no Brasil apenas o MR é utilizado atualmente, enquanto o E^* se restringe a pesquisas laboratoriais (BERNUCCI *et al.*, 2008; ALMEIDA JÚNIOR, 2016).

Esse módulo é definido como um número complexo que relaciona tensão e deformação para um material viscoelástico linear submetido a uma carga senoidal, da qual a parte real representa a rigidez elástica e a parte imaginária representa o amortecimento interno dos materiais. Seu valor absoluto $|E^*|$ é comumente referido como o Módulo Dinâmico (YODER; WITCZAK, 1975; HUANG, 2004).

Além de considerar a viscoelasticidade das misturas, este ensaio possibilita obter informações em diferentes temperaturas e frequências de carregamento, sendo este carregamento obtido usualmente de forma senoidal aplicado axialmente em corpos-de-prova cilíndricos, mostrado e normalizado pela AASHTO T 342 (AASHTO, 2011). Ao contrário do ensaio de MR, o ensaio de E^* não tem período de descanso durante o carregamento senoidal (HUANG, 2004).

O procedimento é repetido para diferentes temperaturas e frequências de carregamento com o intuito de se construir uma curva mestra que incorpore o efeito do tempo e temperatura. Pasche (2016), por exemplo, utilizou cinco temperaturas e 10 frequências para a construção da curva mestra. O presente estudo, por outro lado, abrangeu quatro temperaturas (4°C, 21°C, 37°C e 54°C) e nove frequências (0,1 Hz, 0,2 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10Hz, 20 Hz e 25 Hz).

O valor do E^* varia em função dos parâmetros de ensaio, temperatura e velocidade de carregamento. Também varia com a natureza e teor do ligante, percentual granular e de finos e a forma de compactação (quanto mais compacto mais rígido).

Bernucci *et al.* (2008) e Yoder e Witczak (1975) mostram com clareza o conceito de viscoelasticidade linear, bem como as equações regidas para a obtenção dos módulos dinâmico, ângulo de fase e respostas reais e viscosas do material. Estas serão mostradas a seguir.

Para o caso de carregamento senoidal unidimensional, a tensão (σ) é representada pela seguinte expressão:

$$\sigma = \sigma_0 \text{sen}(\omega t) \quad (\text{Equação 31})$$

Onde σ_0 é a amplitude de tensão (mostrada na Figura 32) e ω é a velocidade angular, a qual é relacionada com a frequência f na forma: $\omega=2\pi f$. A deformação harmônica (ϵ) resultante pode ser expressa como:

$$\epsilon = \epsilon_0 \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (\text{Equação 32})$$

Onde ϵ_0 é a amplitude de deformação e ϕ o ângulo de fase, ambos mostrados na Figura 32. O ângulo de fase é um indicador das propriedades viscosas do material, em outras palavras, é o atraso da deformação em relação à tensão (Figura 32). Para um material puramente elástico $\phi = 0$ e para materiais puramente viscosos $\phi = 90^\circ$. Ao aumentar a temperatura, há uma diminuição da rigidez e também um aumento da defasagem, que representa um comportamento mais viscoso. O ângulo de fase é representado pela seguinte equação:

$$\phi = \frac{t_i}{t_p} (360^\circ) \quad (\text{Equação 33})$$

Onde t_i representa o atraso de tempo, em segundos, entre um ciclo da senóide de tensão (σ) e deformação (ϵ), enquanto t_p representa o tempo, em segundos, de um ciclo de uma tensão (σ).

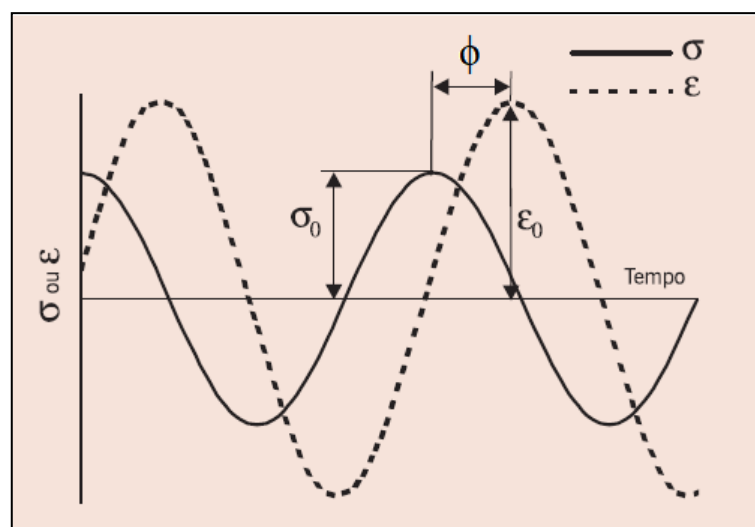


Figura 32: Comportamento viscoelástico sob carregamento harmônico (BERNUCCI *et al.*, 2008 adaptado pelo autor)

O módulo complexo (E^*) é, por definição, representado da seguinte forma:

$$E^* = E_1 + iE_2 \quad (\text{Equação 34})$$

Onde i representa um número imaginário. E_1 é chamado de módulo de armazenamento, representa a porção real do módulo complexo e tem relação com a resposta elástica do material, enquanto E_2 é chamado de módulo de perda, representa a porção imaginária do módulo complexo e tem relação com a resposta viscosa do material. São governadas pelas equações:

$$E_1 = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cos(\phi) \quad (\text{Equação 35})$$

$$E_2 = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \text{sen}(\phi) \quad (\text{Equação 36})$$

Para um material elástico ($\phi = 0$) tem-se o módulo dinâmico, determinado apenas pela razão entre os picos das amplitudes de tensão e deformação:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (\text{Equação 37})$$

A moldagem foi feita na UFRGS e seguiu os mesmos procedimentos dos ensaios anteriores, com a diferença que neste caso os CPs têm dimensões de 10x15 cm e a compactação é realizada em três camadas. Assim como as amostras de MR, estes foram transportados até a UFSM. O ensaio de módulo complexo também foi realizado no equipamento UTM-25 (Figura 33) do Laboratório de Pavimentação Asfáltica da UFSM e seguiu as normas da AASHTO T 342 (AASHTO, 2011) com a utilização de duas amostras por mistura, totalizando 24 corpos de prova.

O ensaio foi realizado em quatro dias, um dia para cada temperatura. Antes do ensaio, as amostras foram condicionadas na temperatura de estudo pelo período de uma noite, respeitando, assim, os tempos mínimos de condicionamento da AASHTO T 342 (AASHTO, 2011).

Durante o ensaio foi aceito uma variação de temperatura de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. A deformação foi controlada limitando-se valores entre 50 e 75 *microstrain*, com o intuito de manter a amostra no regime linear viscoelástico, onde não há deformações plásticas. Três LVDTs são fixados no corpo de prova (Figura 33) e a média das leituras entre os três fornece a amplitude de

deformação (ϵ_0). A célula de carga axial, por sua vez, fornece a amplitude de tensão (σ_0), possibilitando gerar um gráfico semelhante ao mostrado na Figura 32.

Com base neste gráfico. O módulo dinâmico é calculado automaticamente pelo software da UTM-25 (Equação 37), assim como o ângulo de fase (Equação 33).



Figura 33: Execução do ensaio de módulo complexo

Para a construção das curvas mestras, é necessário também realizar a translação das frequências com base no princípio de superposição tempo-temperatura. Esse princípio permite que os dados coletados a diferentes temperaturas sejam deslocados horizontalmente relativamente a uma temperatura de referência (T_{ref}).

No exemplo mostrado por Bernucci *et al.* (2008) (Figura 34) a temperatura de referência (T_{ref}) é de 20°C. Temperaturas superiores são deslocadas para a esquerda e temperaturas inferiores são deslocadas para a direita, formando uma curva única. Para esse deslocamento, é utilizado um fator de deslocamento $a(T)$ que pode ser determinado pela equação de Arrhenius (que tem melhor ajuste quando $T - T_{ref}$ é menor que 20°C) ou pela equação WLF de Williams-Landel-Ferry (que tem melhor ajuste quando $T - T_{ref}$ é maior que 20°C).

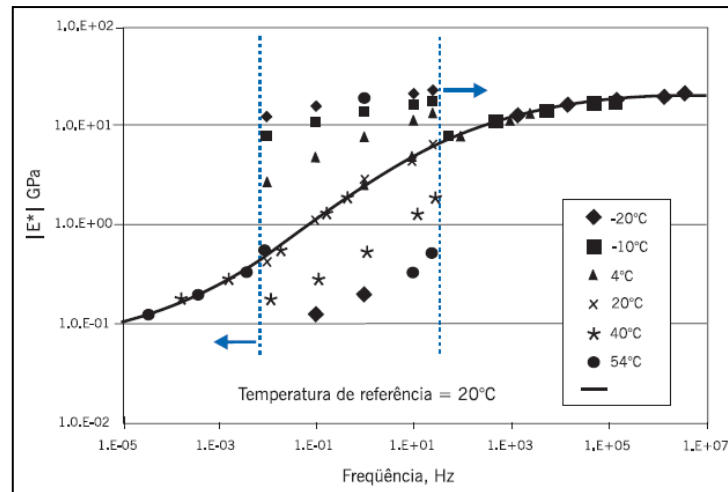


Figura 34: Representação da curva mestra de módulo dinâmico (BERNUCCI *et al.*, 2008)

Para esta pesquisa se adotou a equação de WLF, cujo fator de deslocamento $a(T)$ é representado pela equação abaixo. Que depende, além da temperatura de ensaio (T) e da temperatura de referência (T_{ref}), de duas constantes C_1 e C_2 do WLF (WILLIAMS; LANDEL; FERRY, 1955).

$$\log a(T) = -\frac{C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (\text{Equação 40})$$

Todos os dados obtidos experimentalmente servirão para a utilização do modelo reológico 2S2P1D. Esse modelo físico-matemático foi desenvolvido por Olard e Di Benedetto (2003) para analisar as propriedades viscoelásticas lineares tanto dos ligantes quanto das misturas asfálticas. Além disso, tal modelo será utilizado para se ter uma melhor representatividade sem a necessidade da realização de novos ensaios.

O modelo 2S2P1D é assim chamado por se basear em uma simples combinação de elementos físicos de duas molas (Springs), dois elementos parabólicos (Parabolic) e um amortecedor (Dashpot) como esquematizado na Figura 35.

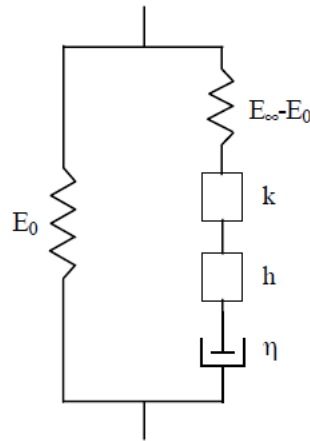


Figura 35: Representação do modelo reológico 2S2P1D (OLARD; DI BENEDETTO, 2003)

Como mostra Olard e Di Benedetto (2003), esse modelo é semelhante ao modelo de Heut-Savegh, porém, não há um amortecedor ligado em série com os dois elementos parabólicos e com uma mola como o modelo 2S2P1D. A falta deste amortecedor faz com que o modelo de Heut-Savegh não se enquadre com os resultados experimentais das misturas betuminosas para frequências muito baixas ou para temperaturas elevadas. Por conta disso, os autores criaram um novo modelo incluindo um amortecedor para uma melhor aproximação dos resultados para as misturas betuminosas.

Di Benedetto *et al.* (2004) demonstram a utilização do modelo 2S2P1D para variadas misturas em variadas temperaturas e frequências, a fim de compreender o comportamento viscoelástico linear das misturas betuminosas. A uma dada temperatura, o modelo tem sete constantes e seu módulo complexo é dado pelas seguintes equações:

$$E^*(\omega) = \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(j\omega\tau)^{-k} + (j\omega\tau)^{-h} + (j\omega\beta\tau)^{-1}} \quad \text{Equação 38}$$

$$\nu^*(\omega) = \nu_{00} + (\nu_0 - \nu_{00}) \frac{E^*(\omega) - E_{00}}{E_0 - E_{00}} \quad \text{Equação 39}$$

Onde:

ω = pulsação, $\omega = 2\pi f$ (sendo f a frequência);

k, h = expoentes, $0 < k < h < 1$;

β = constante;

E_{00} = módulo estático $\omega \rightarrow 0$;

E_0 = módulo em transição vítrea $\omega \rightarrow \infty$;

η = viscosidade newtoniana $\eta = (E_0 - E_{00})\beta\tau$;

τ = tempo característico, o qual varia com a temperatura T , $\tau(T) = a_T(T)\tau_0$ onde $\tau_0 = \tau(T_{ref})$ é determinado na temperatura de referência;

ν_{00} = coeficiente de Poisson estático $\omega \rightarrow 0$;

ν_0 = coeficiente de Poisson em transição vítrea $\omega \rightarrow \infty$;

3.5. PROJETO DE EXPERIMENTOS

Com o intuito de analisar o efeito das variáveis controláveis (γ_d , VM_{200} e CC) selecionados para essa pesquisa sobre as variáveis respostas (RCS, RTCD, PMA, MR, $|E^*|$), foi criado um projeto de experimento fatorial 2^k (onde k é o número de variáveis controláveis) relacionando cada uma das variáveis e também a iteração entre elas. Dessa forma, será possível avaliar as variáveis controláveis mais influentes para a obtenção dos resultados de cada ensaio.

A análise foi feita através de um programa voltado para fins estatístico. Sendo criado um experimento fatorial com três variáveis controláveis ($A = \gamma_d$; $B = VM_{200}$; $C = CC$), dois níveis [Inferior (-1) e Superior (+1)] e duas réplicas (com exceção do ensaio de Durabilidade onde não houve duplicatas). Assim, tem-se um total de $2 \cdot (2^3) = 16$ tratamentos estatísticos [no caso do ensaio de Durabilidade $1 \cdot (2^3) = 8$ tratamentos] a serem analisados pelo programa.

Vale destacar que o experimento fatorial 2^k trata os resultados em apenas dois níveis. E, como já visto, foi escolhido três teores de VM_{200} , fazendo com que essa variável não se enquadre para esse experimento. Para contornar isso, fez-se necessário dividir essa variável em duas partes (Tabela 13). Assim, será analisado primeiramente o efeito de VM_{200} quando se tem um acréscimo em 5% de seu teor (de 10% para 15%) e em seguida quando se tem um acréscimo em 15% de seu teor (de 10% para 25%).

Tabela 13: Variáveis controláveis e níveis selecionados para o projeto de experimentos

Variáveis controláveis		Níveis	
		Inferior	Superior
A	γ_d	20kN/m ³	19kN/m ³
B	VM ₂₀₀	10%	15%
C	CC	3%	7%

Variáveis controláveis		Níveis	
		Inferior	Superior
A	γ_d	19kN/m ³	20kN/m ³
B	VM ₂₀₀	10%	25%
C	CC	3%	7%

Scheuermann Filho (2019) exemplifica o experimento fatorial 2^k com duas (A, B) e três (A, B e C) variáveis controláveis e dois níveis (-1 e +1). Assim, cada vértice tem a média de uma variável resposta e corresponde a um tratamento, no qual os níveis da variável podem ser máximos (+1) ou mínimos (-1). A determinação do efeito de uma variável principal (A, B, C) se dá pela subtração das médias dos tratamentos desta variável em seu nível máximo pelas médias dos tratamentos em seu nível mínimo. A iteração entre dois ou mais fatores (AB, AC, BC, ABC), por sua vez, consiste nas médias entre os tratamentos diagonais correspondentes.

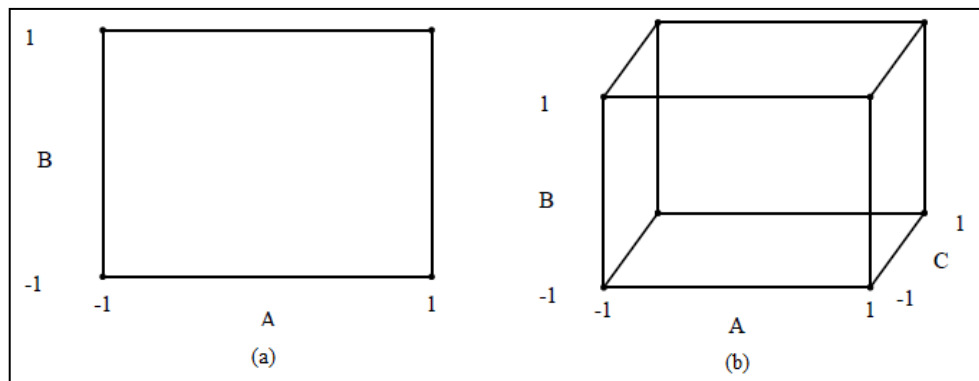


Figura 36: Representação de um experimento 2^2 (a) e 2^3 (b) (SCHEUERMAN FILHO, 2019)

Após estas definições, o software mostra diversos tipos de gráficos estatísticos. Para esta dissertação, será mostrado o gráfico de Pareto e o gráfico de efeitos principais para cada ensaio.

O gráfico de Pareto mostra quais variáveis controláveis tem maior efeito para a obtenção das variáveis respostas. As variáveis que cruzam a linha de referência são consideradas estatisticamente significativas, enquanto as variáveis que não cruzam são, em geral, desprezadas. A linha de referência tem relação com o número de variáveis controladas, número de réplicas, e nível de significância (α) adotado no modelo. Assim, independente do

ensaio, a linha de referência terá o mesmo valor se o projeto de experimentos for planejado com essas mesmas características.

O nível de significância diz respeito ao quão preciso se espera que se tenha um resultado confiável. Em geral se adota um $\alpha = 0,05$ (95% de confiança), mas há casos como na cardiologia, por exemplo, em que se adota $\alpha = 0,01$ (99% de confiança) devido à exigência de precisão. No caso desta pesquisa, será adotado o $\alpha = 0,05$ para todos os ensaios, com exceção do ensaio de durabilidade, em que foi adotado um $\alpha = 0,10$ (90% de confiança) pelo fato de não se ter duplicatas.

O gráfico de Pareto, por outro lado, exhibe apenas o valor absoluto dos efeitos, sendo possível determinar apenas quais efeitos tem maior influência. No entanto, esse gráfico não mostra quais efeitos aumentam ou diminuem a resposta.

Para isso, também será mostrado o gráfico dos efeitos principais, que é o efeito de cada variável controlável independente do efeito das demais variáveis controláveis. Nesse caso é mostrada a média da variável resposta no eixo Y e os níveis máximos e mínimos de cada variável controlada no eixo X. Assim, é possível analisar as magnitudes das variáveis respostas para cada variável controlada, além de ser possível observar o crescimento ou decréscimo da variável resposta do nível mínimo para o nível máximo. Quando a linha entre os níveis for horizontal significa que a variável controlável em questão não teve efeito algum sobre a variável resposta, por exemplo.

4. RESULTADOS

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos dos ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, durabilidade por molhagem e secagem, módulo de resiliência e módulo complexo.

Cada seção principal diz respeito a um ensaio, onde primeiramente serão mostrados os resultados gerais de cada ensaio. Em seguida serão relacionados os resultados do respectivo ensaio com a porosidade (η) e o teor volumétrico de agente cimentante (B_{iv}). Por fim, serão avaliados por análise estatística quais das variáveis tem maior influência sobre os resultados obtidos em cada ensaio com base nos níveis escolhidos de cada variável controlável.

4.1. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos nos dois ensaios de resistência realizados nesta pesquisa (Ensaio de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral). Também será avaliada a relação entre estes dois ensaios.

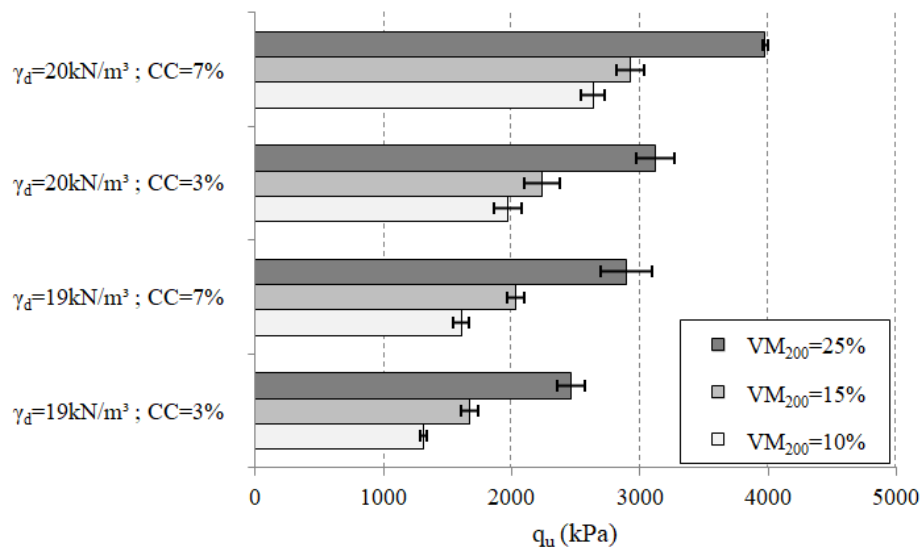
4.1.1. Resistência à compressão simples (RCS)

Os resultados relativos ao ensaio de RCS são apresentados na Tabela 14, os dados completos de moldagem se encontram no Quadro A.1 nos Apêndice A. A Figura 37 apresenta graficamente as resistências obtidas para os três teores de vidro moído passante na peneira n. 200 (VM_{200}). Percebe-se que há um crescimento da resistência à compressão simples (q_u) quando se aumentam os teores de VM_{200} , além de mostrar que, como previsto, quanto maior o peso específico aparente (γ_d) e o teor de cal de carbureto (CC) na mistura, maiores serão os ganhos de resistência.

Tabela 14: Resultados de RCS para cada mistura

Mistura	Ident.	γ_d (kN/m ³)	VM ₂₀₀ (%)	CC (%)	q_u (kPa)	MÉDIA q_u (kPa)	Desvio Padrão	CV (%)
FV-19-10-3	CP 1a CP 1b	19	10%	3%	1275,92 1348,06	1311,99	36,07	2,75%
FV-19-10-7	CP 2a CP 2b	19	10%	7%	1522,75 1696,24	1609,50	86,74	5,39%
FV-20-10-3	CP 3a CP 3b	20	10%	3%	1813,43 2128,66	1971,05	157,62	8,00%
FV-20-10-7	CP 4a CP 4b	20	10%	7%	2507,03 2764,31	2635,67	128,64	4,88%
FV-19-15-3	CP 5a CP 5b	19	15%	3%	1576,35 1767,17	1671,76	95,41	5,71%
FV-19-15-7	CP 6a CP 6b	19	15%	7%	1940,37 2121,45	2030,91	90,54	4,46%
FV-20-15-3	CP 7a CP 7b	20	15%	3%	2036,02 2433,40	2234,71	198,69	8,89%
FV-20-15-7	CP 8a CP 8b	20	15%	7%	2770,13 3076,76	2923,45	153,32	5,24%
FV-19-25-3	CP 9a CP 9b	19	25%	3%	2316,57 2612,82	2464,70	148,12	6,01%
FV-19-25-7	CP 10a CP 10b	19	25%	7%	2708,79 3172,79	2940,79	282,00	9,76%
FV-20-25-3	CP 11a CP 11b	20	25%	3%	2909,76 3335,78	3122,77	213,01	6,82%
FV-20-25-7	CP 12a CP 12b	20	25%	7%	3945,66 4004,13	3974,89	29,24	0,74%

As magnitudes da RCS tiveram um valor mínimo da ordem de 1,31 MPa para γ_d de 19 kN/m³ e CC de 3% e um valor máximo de 3,97 MPa para γ_d de 20 kN/m³ e CC de 7%.

Figura 37: Resultados de q_u obtidos para as diferentes misturas

4.1.2. Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)

De forma análoga ao mostrado na Seção 4.1.1, os resultados dos 24 corpos de prova para a análise da RTCD (q_t) são mostrados na Tabela 15. Os demais dados de moldagem estão presentes no Quadro A.2 no Apêndice A.

Tabela 15: Resultados de RTCD para cada mistura

Mistura	Ident.	γ_d (kN/m ³)	VM ₂₀₀ (%)	CC (%)	q_t (kPa)	MÉDIA q_t (kPa)	Desvio Padrão	CV (%)
FV-19-10-3	CP 1a CP 1b	19	10%	3%	125,94 211,02	168,48	42,54	25,25%
FV-19-10-7	CP 2a CP 2b	19	10%	7%	173,36 224,32	198,84	25,48	12,81%
FV-20-10-3	CP 3a CP 3b	20	10%	3%	190,67 217,69	204,18	13,51	6,62%
FV-20-10-7	CP 4a CP 4b	20	10%	7%	264,10 349,34	306,72	42,62	13,90%
FV-19-15-3	CP 5a CP 5b	19	15%	3%	236,41 320,53	278,47	42,06	15,10%
FV-19-15-7	CP 6a CP 6b	19	15%	7%	313,27 419,31	366,29	53,02	14,47%
FV-20-15-3	CP 7a CP 7b	20	15%	3%	389,93 422,43	406,18	16,25	4,00%
FV-20-15-7	CP 8a CP 8b	20	15%	7%	449,63 513,01	481,32	31,69	6,58%
FV-19-25-3	CP 9a CP 9b	19	25%	3%	366,78 394,85	380,81	14,03	3,69%
FV-19-25-7	CP 10a CP 10b	19	25%	7%	432,20 447,50	439,85	7,64	1,74%
FV-20-25-3	CP 11a CP 11b	20	25%	3%	529,79 457,60	493,70	36,09	7,31%
FV-20-25-7	CP 12a CP 12b	20	25%	7%	603,73 568,74	586,24	17,49	2,98%

A Figura 38 mostra um comportamento semelhante ao encontrado pela Figura 37, onde houve o crescimento de q_t ao aumentar o teor de vidro moído passante na peneira n. 200 (VM₂₀₀). Da mesma forma que o encontrado na RCS, tanto o γ_d quanto o teor de CC também mostraram ter influência no crescimento das resistências. A diferença, no entanto, está na magnitude dessas resistências, como era de se esperar. No caso da RTCD, a menor resistência está na ordem de 0,16 MPa para γ_d de 19 kN/m³ e CC de 3%, enquanto a maior foi de 0,59 MPa para γ_d de 20 kN/m³ e CC de 7%.

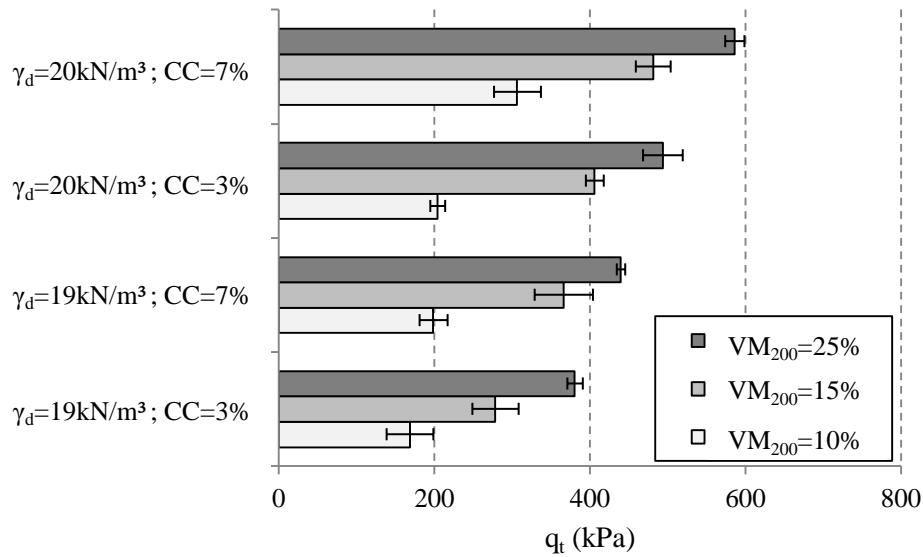


Figura 38: Resultados de q_t obtidos para as diferentes misturas

Os resultados são consideravelmente maiores aos observados por Consoli *et al.* (2018c) que utilizaram RAP com cal de carbureto e cinza volante. Os autores alcançaram um valor máximo de 115 kPa quando adicionado 25% de cinza volante e 5% de cal de carbureto na densidade máxima avaliada. Os autores, porém, utilizaram corpos de prova com 60 mm de altura, que pode ter influenciado nesta diferença.

4.1.3. Comparação e relação de η/B_{iv} entre os ensaios de RCS e RTCD

Com os resultados obtidos de RCS e RTCD mostrados respectivamente nas Seções 4.1.1 e 4.1.2, será analisada nesta seção a relação entre os dois ensaios. Primeiramente com uma relação direta entre cada mistura, através da razão de q_t e q_u , como mostrado na Tabela 16 e Figura 39 e, em seguida, essa análise é estendida também ao se comparar as equações obtidas com as curvas η/B_{iv} mostrados na Figura 40.

É possível analisar pela Tabela 16 que as variações entre as resistências dos dois ensaios variaram entre 10% e 18%. Por essa análise, a média das 12 misturas estudadas é de 14,79%. A Figura 39, por sua vez, aborda essa relação de forma gráfica, onde cada eixo representa um ensaio e a reta de melhor ajuste mostra a relação entre q_u e q_t . No caso, se obteve a equação abaixo:

$$q_t = 0,150q_u \quad (\text{Equação 41})$$

Observa-se que o comportamento é linear e a reta cruza a origem. Assim, se observa que por essa análise q_t tem 15% do valor de q_u . Corroborando com a análise anterior e também com os resultados encontrados na literatura, que mostram que a relação q_t/q_u , em geral, está entre 10% e 20%.

Tabela 16: Relação entre q_t/q_u para cada mistura

Mistura	q_u (kPa)	q_t (kPa)	q_t/q_u
FV-19-10-3	1311,99	168,48	12,84%
FV-19-10-7	1609,50	198,84	12,35%
FV-20-10-3	1971,05	204,18	10,36%
FV-20-10-7	2635,67	306,72	11,64%
FV-19-15-3	1671,76	278,47	16,66%
FV-19-15-7	2030,91	366,29	18,04%
FV-20-15-3	2234,71	406,18	18,18%
FV-20-15-7	2923,45	481,32	16,46%
FV-19-25-3	2464,7	380,81	15,45%
FV-19-25-7	2940,79	439,85	14,96%
FV-20-25-3	3122,77	493,7	15,81%
FV-20-25-7	3974,89	586,24	14,75%
Média			14,79%

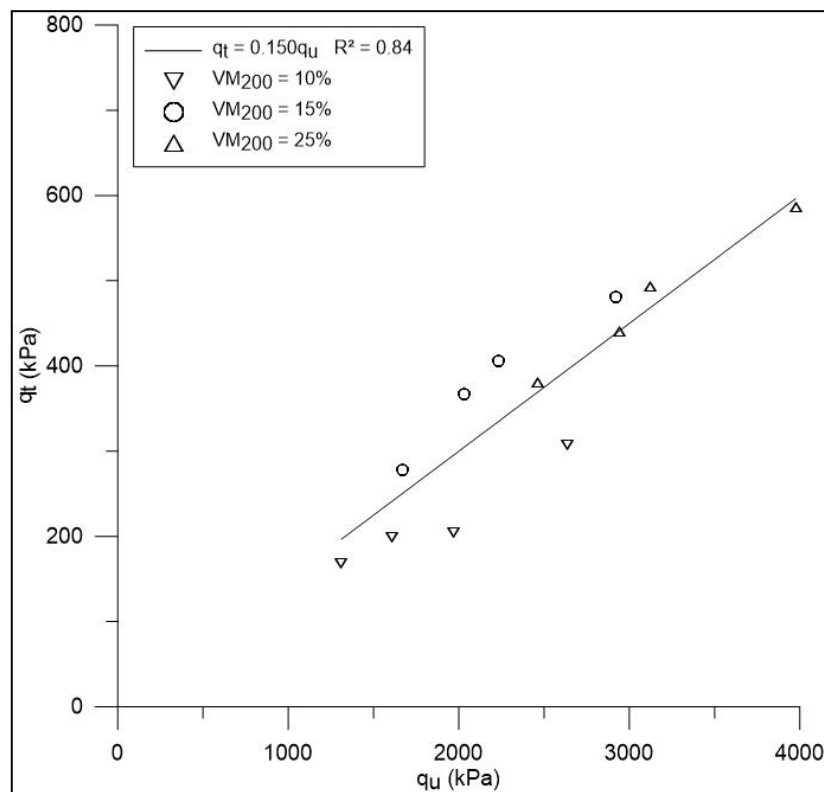


Figura 39: Relação entre q_u e q_t

Outro índice interessante de ser abordado para esta pesquisa é o η/B_{iv} , pois para esta pesquisa a relação entre porosidade e teor volumétrico de agente cimentante pode abranger todos os 24 resultados de cada ensaio em uma única curva, afinal, a porosidade (η) está relacionada com o γ_d , assim como o CC e o VM₂₀₀ estão relacionados com o B_{iv} . Obtendo, assim, os resultados expressos na Figura 40.

Vale ressaltar que a obtenção do expoente interno $k = 0,28$ se deu através da média dos expoentes internos obtidos para todos os ensaios (RCS, RTCD, Durabilidade, MR, e E*). Assim, a curva foi ajustada com um único expoente interno k para todos os ensaios, sendo escolhida a média entre eles para que se tenha o melhor ajuste de todo o conjunto.

Observa-se que para este caso o expoente k presente no B_{iv} é igual a 0,28, mostrando que o efeito da porosidade influencia mais que o efeito do B_{iv} na mistura. O expoente externo de ambos os ensaios ficaram bem próximos, assim, um ajuste foi feito com a média destes dois valores, obtendo um expoente externo de -2,50.

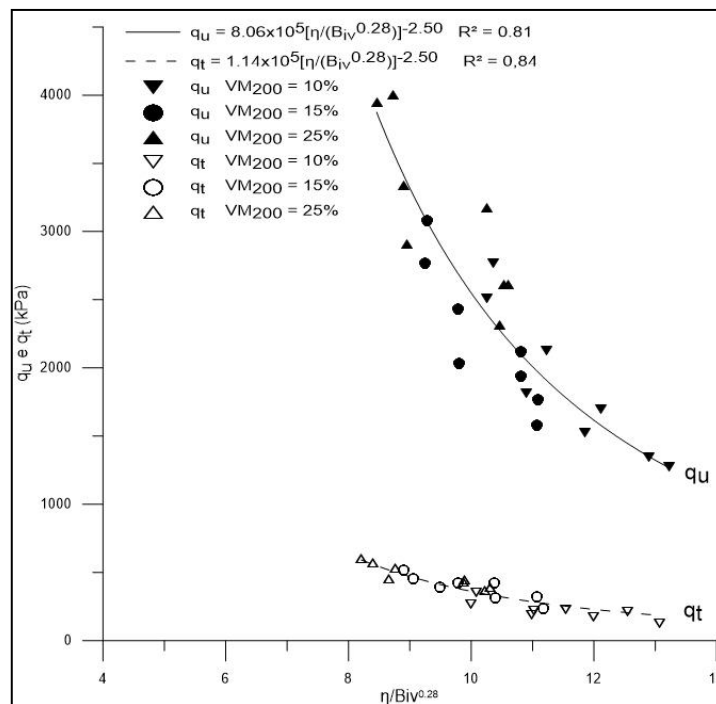


Figura 40: Relação entre $\eta/B_{iv}^{0,28}$ para q_u e q_t

Como ambos os ensaios foram realizados com as mesmas variáveis, a relação $\eta/B_{iv}^{0,28}$ abrange a mesma região para os dois ensaios ($\eta/B_{iv}^{0,28}$ entre 8 e 14). Pelo fato das equações da

Figura 40 se comportar da mesma forma (terem os mesmos expoentes), é possível se obter uma constante entre a razão de q_t e q_u , como se mostra a seguir:

$$\frac{q_t}{q_u} = \frac{1,14 \times 10^5 \left(\eta / B_{iv}^{0,28} \right)^{-2,50}}{8,06 \times 10^5 \left(\eta / B_{iv}^{0,28} \right)^{-2,50}} = 14,14\% \quad (\text{Equação 42})$$

Valor este próximo da média entre as 12 misturas individuais mostradas na Tabela 16 e Figura 39.

4.1.4. Experimento fatorial 2^k dos ensaios de RCS e RTCD

Através do programa *Minitab* foi possível desenvolver um experimento fatorial completo com base nos resultados obtidos de cada ensaio, como já explicado na Seção 3.5. Assim, é possível determinar quais variáveis tem maior efeito para atingir os resultados de RCS e RTCD. Como já dito, gráficos de Pareto e de efeitos principais foram gerados pelo software a partir dos tratamentos selecionados de cada ensaio.

A Figura 41 e Figura 42 mostram os respectivos gráficos acima citados para RCS em teores de vidro passante na peneira de n.200 variando de 10 a 15% e 10 a 25% respectivamente. Percebe-se, pelos gráficos da Figura 41, que a mudança do γ_d (A) de 19 kN/m³ para 20kN/m³ foi o que surtiu maior efeito nos ganhos de resistência à compressão simples. Seguido pela mudança nos teores da cal de carbureto (C) de 3% para 7% e do VM₂₀₀ (B) de 10% para 15%, que também tiveram efeitos consideráveis e estatisticamente significativos para o ganho de resistência. Ao se analisar o acréscimo de VM₂₀₀ de 10% para 25% (Figura 42), porém, é observada que esta variável passa a ser a responsável pelos maiores ganhos de resistência, seguido pelo γ_d e pelo teor de cal de carbureto, que também tiveram efeitos significativos.

Isso mostra que ao adicionar uma maior quantidade da parte fina do vidro na mistura esta surtirá mais efeito. Isso porque quanto mais fina a granulometria da mistura, mais material terá disponível para as reações cimentantes com a cal de carbureto, uma vez que esta reage bem com materiais finos.

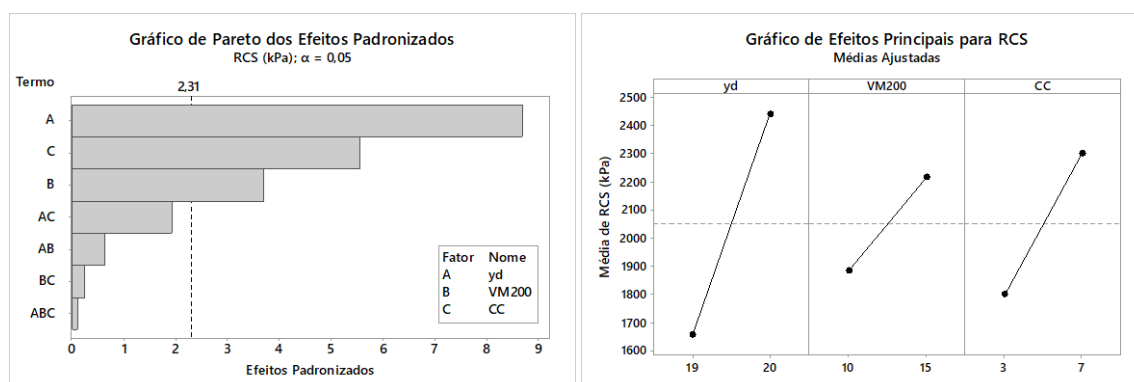


Figura 41: Gráfico de Pareto e de efeitos principais de RCS para teores de VM₂₀₀ de 10% e 15%

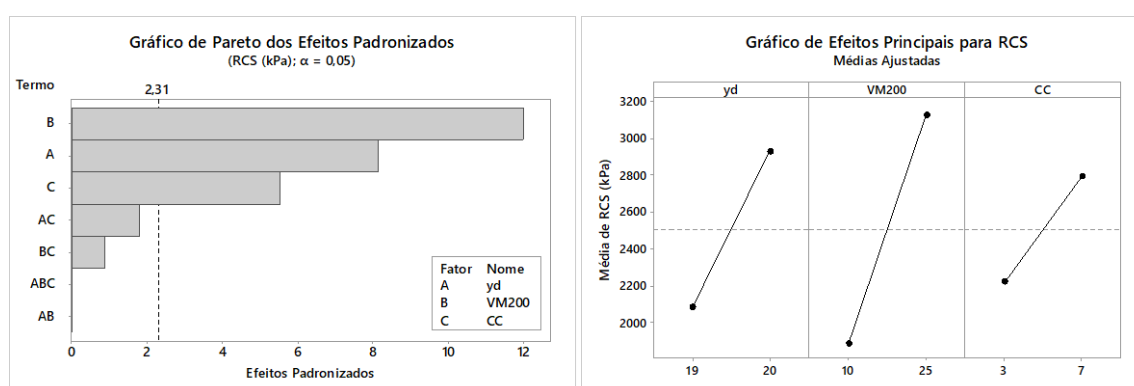


Figura 42: Gráfico de Pareto e de efeitos principais de RCS para teores de VM₂₀₀ de 10% e 25%

No caso da RTCD, por outro lado, percebe-se que tanto as variações de VM₂₀₀ de 10% para 15% e de 10% para 25% são as principais responsáveis pelo ganho de resistência à tração por compressão diametral (Figura 43 e Figura 44, respectivamente). Sendo o efeito dessa variável muito mais significativo no segundo caso se comparado com γ_d e CC, que também tiveram efeitos estatisticamente significativos. Isso mostra que mesmo ao acrescentar uma taxa menor de vidro moído passante na peneira n.200 já se têm efeitos consideráveis nos ganhos de RTCD.

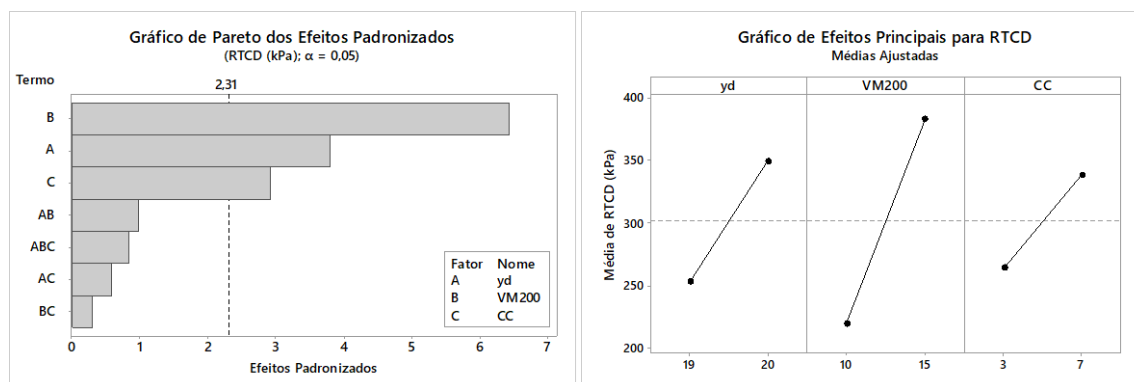


Figura 43: Gráfico de Pareto e de efeitos principais de RTCD para teores de VM₂₀₀ de 10% e 15%

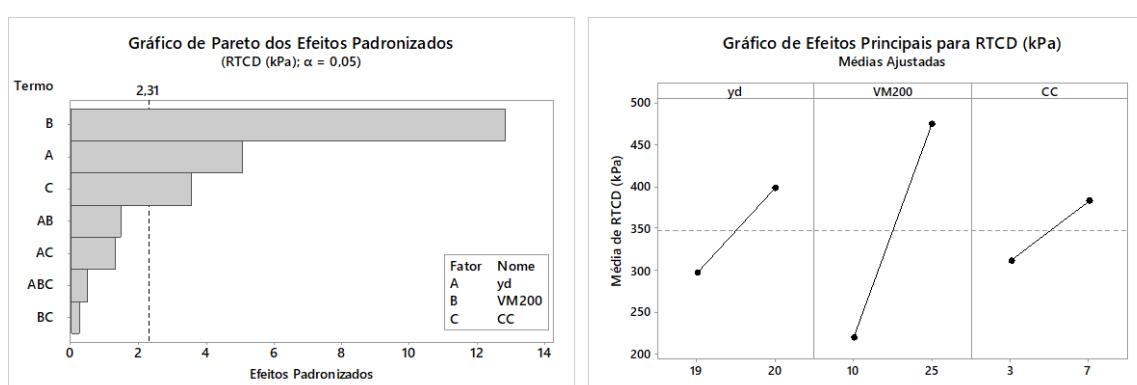


Figura 44: Gráfico de Pareto e de efeitos principais de RTCD para teores de VM₂₀₀ de 10% e 25%

4.2. ENSAIO DE DURABILIDADE POR MOLHAGEM E SECAGEM

A fim de expressar a perda de massa de cada amostra devido às escovações e aos ciclos de molhagem e secagem durante os 12 ciclos, foram feitas as análises com base na Perda de Massa Individual (PMI) de cada ciclo e também na Perda de Massa Acumulada (PMA) ao longo dos ciclos, sendo estes resultados mostrados, respectivamente, na Figura 45 e Figura 46. Os dados de moldagem dos 12 corpos de prova são mostrados no Quadro A.3 presente no Apêndice A.

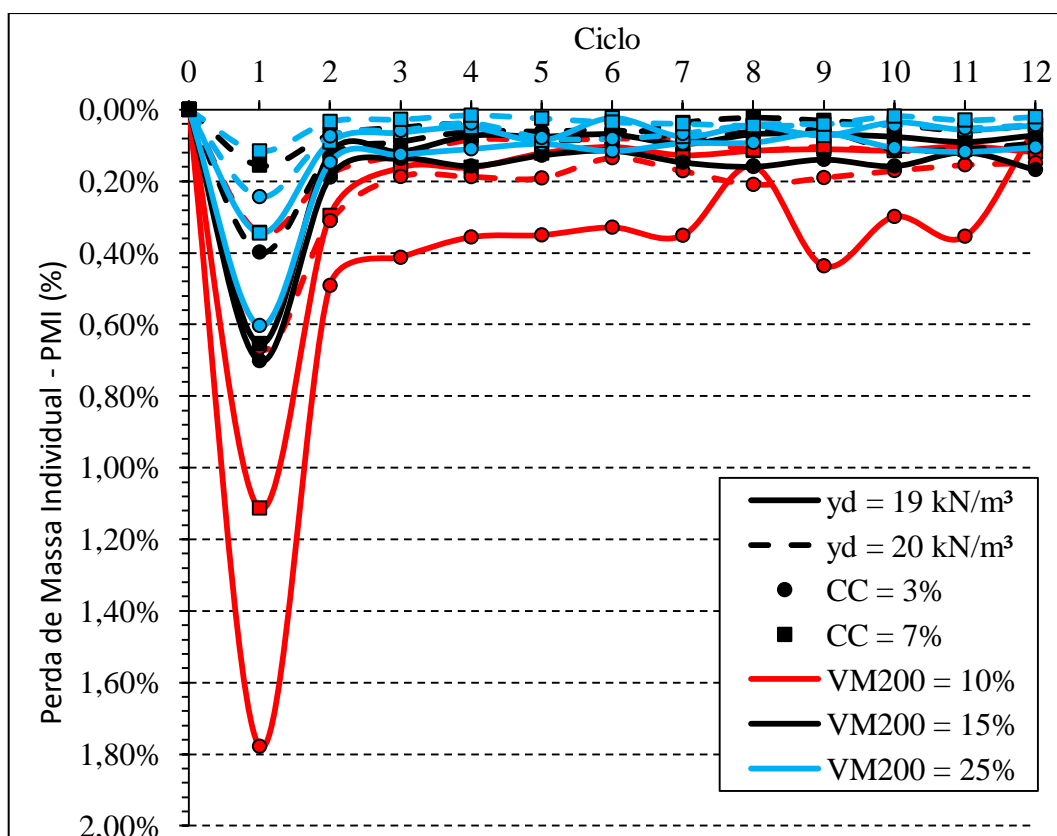


Figura 45: Perda de Massa Individual (PMI) por ciclo para o ensaio de durabilidade

Percebe-se, através da Figura 45, que o ciclo 1 foi o que teve uma taxa de perda de massa maior se comparado aos demais ciclos, pois a primeira escovação retira os grãos superficiais que não foram cimentados por completo durante a cura, justamente por se encontrarem na superfície. Como esta pesquisa lida com um material grosseiro (RAP), esta perda em massa é ainda mais acentuada no primeiro ciclo. O mesmo pode ser notado por Consoli *et al.* (2018c). Os demais ciclos, em geral, tiveram perdas constantes.

O CP1 (FV-19-10-3) foi o que apresentou as maiores perdas de massa e, por conta disso, maior variabilidade de perdas ao longo dos ciclos (por exemplo, nos ciclos 8 e 12). Isso acontece devido às condições de execução do ensaio ao escovar, onde o operador que escova o corpo de prova se torna uma variável do sistema.

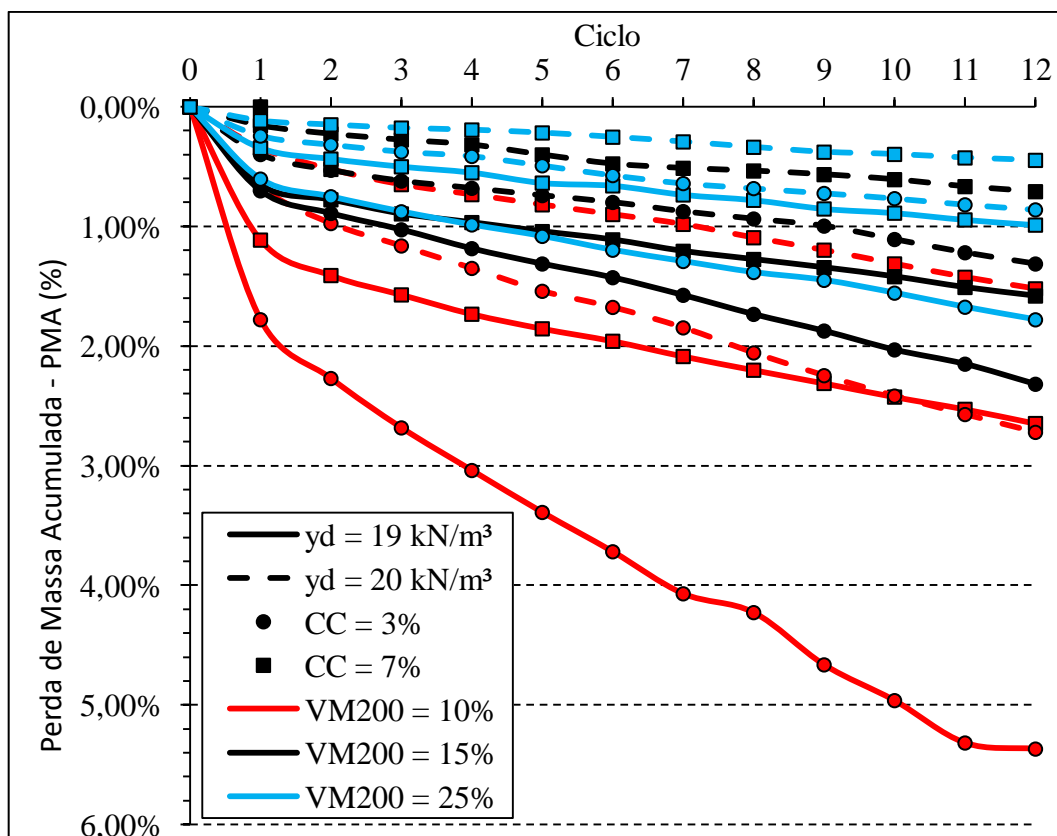


Figura 46: Perda de Massa Acumulada (PMA) para o ensaio de durabilidade

A análise de cada variável é vista com maior clareza na Figura 46, onde ficam evidentes que o acréscimo do γ_d , do teor de cal de carbureto e do teor de vidro moído passante na peneira de n.200 trouxe melhorias do ponto de vista de durabilidade em ciclos de molhagem e secagem nos corpos de prova estudados nessa pesquisa. A verificação do caso de tais variáveis terem efeitos estatisticamente significativos nas melhorias do ponto de vista de durabilidade será discutida na seção 4.2.2.

Os resultados da perda de massa acumulada ao final dos doze ciclos são mostrados na Tabela 17. É observado que as misturas tiveram variações entre 0,45% e 5,37% de PMA ao final dos 12 ciclos, com apenas uma mistura superando os 3,00% de PMA.

Tabela 17: Resultados da PMA após 12 ciclos

Mistura	γ_d (kN/m ³)	VM ₂₀₀ (%)	CC (%)	PMA após 12 ciclos (%)
FV-19-10-3 (CP1)	19	10%	3%	5,37%
FV-19-10-7 (CP2)	19	10%	7%	2,65%
FV-20-10-3 (CP3)	20	10%	3%	2,72%
FV-20-10-7 (CP4)	20	10%	7%	1,52%
FV-19-15-3 (CP5)	19	15%	3%	2,32%
FV-19-15-7 (CP6)	19	15%	7%	1,58%
FV-20-15-3 (CP7)	20	15%	3%	1,31%
FV-20-15-7 (CP8)	20	15%	7%	0,71%
FV-19-25-3 (CP9)	19	25%	3%	1,78%
FV-19-25-7 (CP10)	19	25%	7%	0,99%
FV-20-25-3 (CP11)	20	25%	3%	0,86%
FV-20-25-7 (CP12)	20	25%	7%	0,45%

A Figura 47 mostra como ficaram os 12 corpos de prova após os 12 ciclos de molhagem e secagem. Há uma melhor visualização dos grãos de RAP no CP1 (o de maior PMA) em relação ao CP12 (o de menor PMA). Mostrando que para teores de γ_d , VM₂₀₀ e CC maiores há uma menor perda da parte fina dos grãos devido a uma melhor cimentação entre vidro e cal de carbureto.

A pesquisa desenvolvida por Consoli *et al.* (2018c) mostra que para uma mistura de RAP com 25% de cinza volante e 5% de cal de carbureto a PMA aproximada alcançou resultados entre 1,00% e 2,20% nas diferentes densidades estudadas. Apesar da presente dissertação não estudar o mesmo teor de cal de carbureto e as mesmas densidades (pelo fato da diferença dos materiais alterarem a curva de compactação de cada pesquisa), em termos quantitativos os valores de PMA verificados pelos autores foram semelhantes aos observados nos ensaios com 15% e 25% de VM₂₀₀. Com isso, pode-se perceber que adicionando teores semelhantes de vidro moído se alcançam porcentagens de PMA menores ou semelhantes em relação a cinza volante. Porém, esta afirmação só pode ser de fato confirmada com uma pesquisa que relacione diretamente os dois materiais, visto que as porcentagens de PMA são muito próximas nestas variáveis aqui citadas.

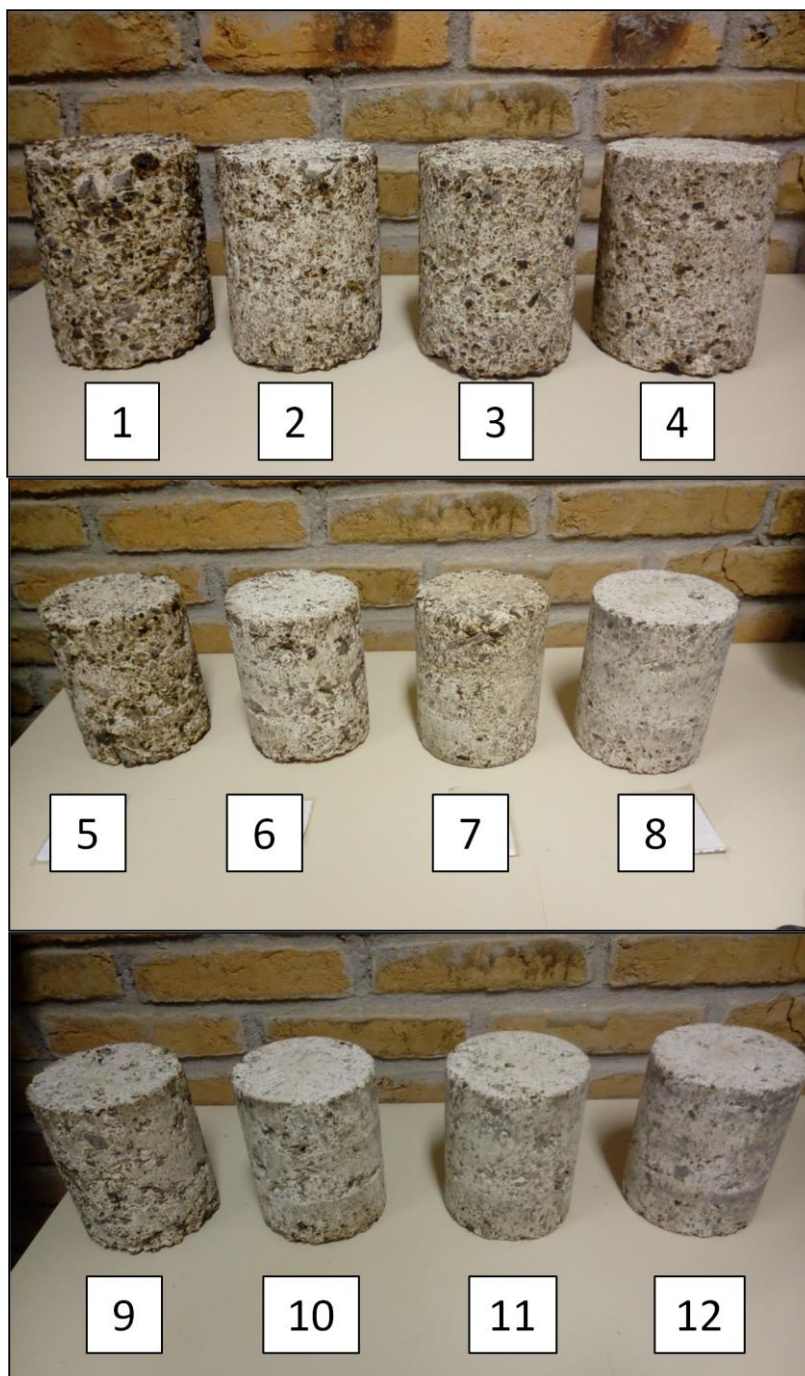


Figura 47: Resultado dos 12 corpos de prova após 12 ciclos de molhagem e secagem

4.2.1. Relação de η/B_{iv} para o ensaio de Durabilidade por molhagem e secagem

Com o objetivo de conseguir uma relação entre o índice porosidade / teor volumétrico de agente cimentante (η/B_{iv}), o número de ciclos e a perda de massa acumulada (PMA), foram selecionados os resultados de PMA obtidos nos ciclos 1, 3, 6, 9 e 12. Assim, se obtém cinco

equações gerais para cada um dos ciclos selecionados (Figura 48). Como tanto η quanto B_{iv} são os mesmos durante os ciclos, os resultados de $\eta/B_{iv}^{0,28}$ são constantes para um mesmo corpo de prova, motivo pelo qual os deslocamentos dos pontos entre os ciclos da Figura 48 são verticais.

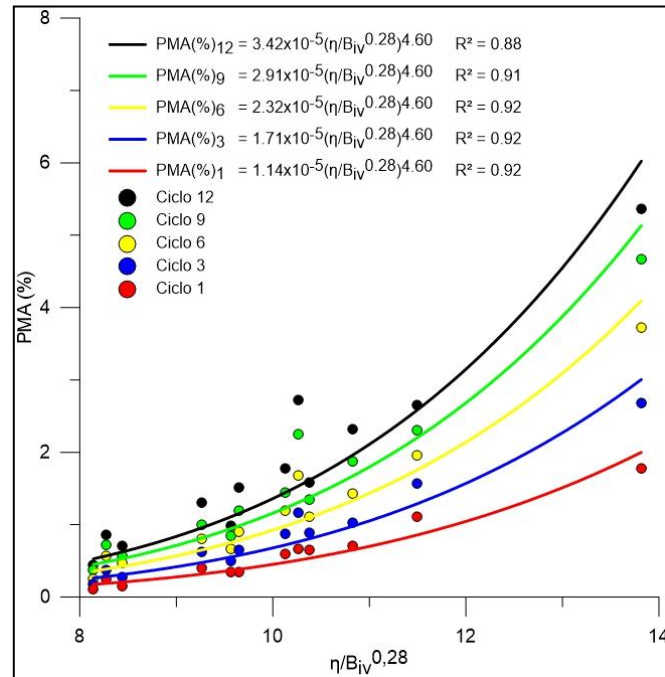


Figura 48: Relação entre $\eta/B_{iv}^{0,28}$ para o ensaio de Durabilidade para diferentes ciclos

Altos coeficientes de determinação (R^2) foram obtidos a partir das equações expostas na Figura 48. As equações para cada um dos ciclos selecionados são mostradas a seguir:

$$PMA(\%)_1 = 1,14 \times 10^{-5} \left(\eta / B_{iv}^{0,28} \right)^{4,60} \quad (\text{Equação 43})$$

$$PMA(\%)_3 = 1,71 \times 10^{-5} \left(\eta / B_{iv}^{0,28} \right)^{4,60} \quad (\text{Equação 44})$$

$$PMA(\%)_6 = 2,32 \times 10^{-5} \left(\eta / B_{iv}^{0,28} \right)^{4,60} \quad (\text{Equação 45})$$

$$PMA(\%)_9 = 2,91 \times 10^{-5} \left(\eta / B_{iv}^{0,28} \right)^{4,60} \quad (\text{Equação 46})$$

$$PMA(\%)_{12} = 3,42 \times 10^{-5} \left(\eta / B_{iv}^{0,28} \right)^{4,60} \quad (\text{Equação 47})$$

Considerando:

$$PMA(\%)_n = A \left(\eta / B_{iv}^{0,28} \right)^B \quad (\text{Equação 48})$$

Percebe-se que ao elevar o número de ciclos há um aumento nos valores da constante A, enquanto o expoente B se mantém constante (4,60). Com base nisso, a seguir será buscada uma equação geral que relacione o número de ciclos com o índice η/B_{iv} e a PMA.

Assim, o número de ciclos foi relacionado com a constante A de cada uma das equações apresentada na Figura 48, obtendo-se uma relação linear para a constante A (Figura 49) com coeficiente de determinação elevado (0,99). A relação linear para a constante A faz sentido, uma vez que em cada ciclo se tem um aumento na PMA, porém por não passar pela origem esta equação não contempla o ciclo 0, visto que no primeiro ciclo a perda de massa para este material é mais acentuada, como mostrado e explicado na Seção 4.2.

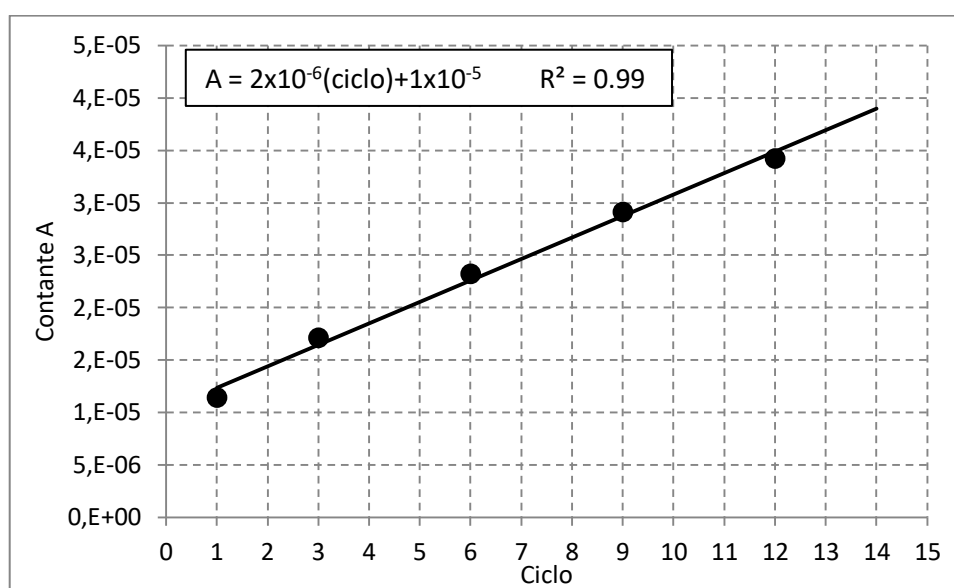


Figura 49: Relação entre a constante A e o número de ciclos

Assim, é encontrada uma equação geral para este ensaio. Com essa equação geral, é possível estimar a PMA de cada corpo de prova para números elevados de ciclos, visto que o índice η/B_{iv} é constante para cada corpo de prova. A equação geral que relaciona o número de ciclos com a PMA é mostrada a seguir:

$$PMA(\%)_{\text{ciclo}} = [2 \times 10^{-6}(\text{ciclo}) + 1 \times 10^{-5}] \left(\eta / B_{iv}^{0,28} \right)^{4,60} \quad \text{para ciclo} \geq 1 \quad (\text{Equação 49})$$

Por ser um ensaio cujo resultado mostra a perda de massa, as misturas que mostraram melhorias do ponto de vista de durabilidade são as que apresentam os menores valores em magnitude de PMA. Assim, o comportamento da curva gerada neste ensaio é diferente das demais (quanto maior o índice $\eta/B_{iv}^{0,28}$ maior a perda de massa), fazendo desta relação a única com um expoente externo positivo. Valores altos do expoente externo foram observados também por Scheuermann Filho (2019), Consoli *et al.* (2017d) e Consoli *et al.* (2018b).

4.2.2. Experimento fatorial 2^k do ensaio de Durabilidade

A avaliação dos efeitos das variáveis controláveis foi avaliada com base na PMA após os 12 ciclos como variável resposta (Tabela 17). No caso deste ensaio em específico a criação do experimento fatorial foi feita de forma diferente, com apenas uma réplica, fazendo este ensaio ter apenas oito tratamentos. Ao tentar utilizar um nível de significância de $\alpha = 0,05$ nenhuma das variáveis controláveis apresentou um efeito estatisticamente significativo.

Por conta disso, optou-se em aumentar o nível de significância para $\alpha = 0,10$ (90% de confiança). Assim, como diz Scheuermann Filho (2019), busca-se com isso a consideração da significância estatística de alguns efeitos importantes que, de aparente, são influentes. Como consequência, as chances de erro deste ensaio são aumentadas do ponto de vista estatístico (uma em cada 10 amostras tenderia a fugir do esperado, ao contrario do comumente aceito de uma amostra para cada 20).

A Figura 50 mostra o gráfico de Pareto e o gráfico de efeitos principais ao se avaliar a variação de VM_{200} de 10 a 15%, enquanto a Figura 51 mostra os mesmos gráficos para uma variação de 10 a 25%. Percebe-se que nos dois casos há a mesma hierarquia com relação as variáveis controláveis, com o VM_{200} tendo maior influência nos dois casos. Para um nível de confiança de 90%, portanto, as três variáveis são estatisticamente significativas.

O baixo nível de confiança apresentado nos gráficos de Pareto se deve ao fato do ensaio ter sido executado sem duplicatas e com poucos tratamentos. Assim, a curva de Gauss (conhecida também como curva de sino no ramo da estatística) é pouco expressiva, sendo necessário um alfa maior para se conseguir alguma significância. Isso mostra a importância de réplicas em um ensaio, afinal, estas confirmam os resultados já apresentados e garantem uma validação maior dos resultados do ponto de vista estatístico. Scheuermann Filho (2019) e Correa (2020),

também precisaram aumentar o nível de significância de suas análises no ensaio de durabilidade, justamente por não terem feito réplicas em seu experimento.

Apesar do gráfico de Pareto não mostrar resultados de confiança devido à falta de réplicas, nos gráficos de efeitos principais da Figura 50 e Figura 51 é observado que as três variáveis tiveram efeitos consideráveis, onde a média de PMA praticamente dobrou ao aumentar os níveis.

Observa-se também que no caso da Figura 51 os efeitos do VM₂₀₀ teve maior influência sobre as outras duas variáveis em relação ao exposto na Figura 50. Isso mostrou que um acréscimo maior de VM₂₀₀ na mistura (nos níveis estudados nesta pesquisa) aumentou a influência desta variável na diminuição da PMA, como mostrado nos gráficos de efeitos principais.

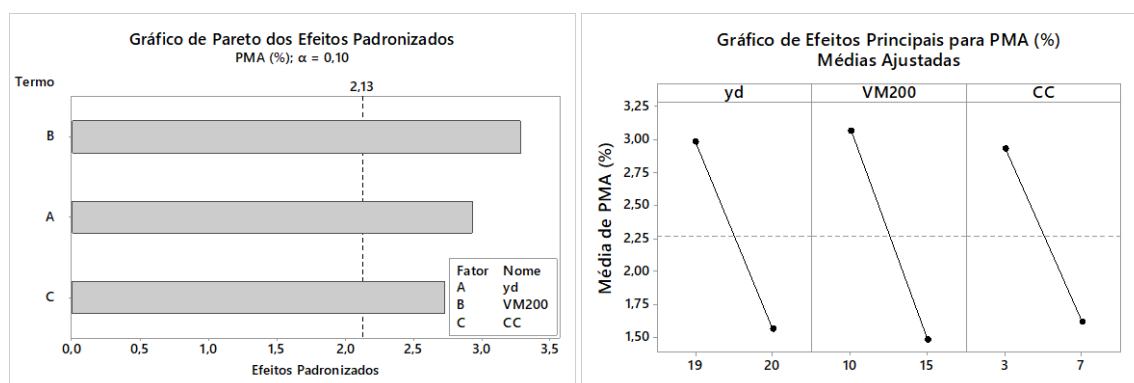


Figura 50: Gráfico de Pareto e de efeitos principais de Durabilidade para teores de VM₂₀₀ de 10% e 15%

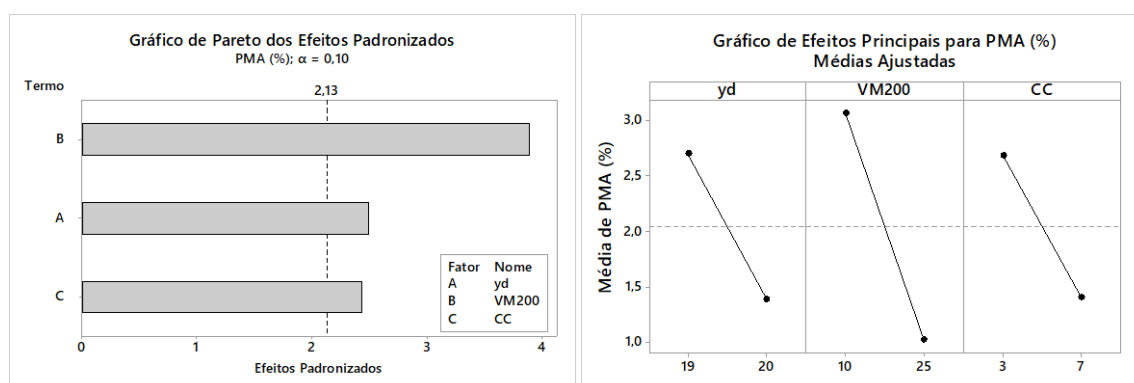


Figura 51: Gráfico de Pareto e de efeitos principais de Durabilidade para teores de VM₂₀₀ de 10% e 25%

4.3. ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)

Após a execução do ensaio de módulo de resiliência (MR) são obtidos os resultados expressos na Tabela 18. O MR mostrado em cada corpo de prova (CP1a, CP1b e etc.) representa a média de duas leituras feitas a 0° e 90°. Os dados completos de moldagem estão presentes no Quadro A.4 do Apêndice A.

Percebe-se que o CP1a não teve uma leitura de MR pois houve uma falha de execução ao iniciar o ensaio, devido a colocação de uma tensão mais elevada do que o corpo de prova poderia suportar. Assim, a mistura FV-19-10-3 não teve duplicata. Em alguns casos (CP3b, CP5a, CP8b, CP11a) ocorreu o mesmo, porém ao realizar a segunda leitura do MR a 90°. Nesses casos apenas a leitura a 0° foi considerada.

Nota-se também que o coeficiente de variação (CV) tiveram valores relativamente baixos, sendo a mistura FV-20-25-3 o que apresentou o maior valor (6,31%).

Tabela 18: Resultados de MR para cada mistura

Mistura	Ident.	y_d (kN/m ³)	VM ₂₀₀ (%)	CC (%)	MR (MPa)	MÉDIA MR (MPa)	Desvio Padrão	CV (%)
FV-19-10-3	CP 1a CP 1b	19	10%	3%	- 5319	5319	-	-
FV-19-10-7	CP 2a CP 2b	19	10%	7%	6272 6130	6203	72,96	1,18%
FV-20-10-3	CP 3a CP 3b	20	10%	3%	7342 6974	7158	184,19	2,57%
FV-20-10-7	CP 4a CP 4b	20	10%	7%	8103 7555	7829	274,18	3,50%
FV-19-15-3	CP 5a CP 5b	19	15%	3%	6812 7003	6907	95,52	1,38%
FV-19-15-7	CP 6a CP 6b	19	15%	7%	6964 7540	7252	288,03	3,97%
FV-20-15-3	CP 7a CP 7b	20	15%	3%	7759 7442	7600	158,33	2,08%
FV-20-15-7	CP 8a CP 8b	20	15%	7%	8197 8225	8211	13,88	0,17%
FV-19-25-3	CP 9a CP 9b	19	25%	3%	6985 7314	7150	164,76	2,30%
FV-19-25-7	CP 10a CP 10b	19	25%	7%	7514 7820	7667	153,36	2,00%
FV-20-25-3	CP 11a CP 11b	20	25%	3%	7535 8550	8042	507,26	6,31%
FV-20-25-7	CP 12a CP 12b	20	25%	7%	8816 8239	8528	288,44	3,38%

Sufian *et al.* (2009), que trabalhou com RAP e pó de pedra em diferentes proporções estabilizado com 3% de cal hidratada, encontrou um resultado próximo aos observados nesta pesquisa. Ele percebeu que uma mistura com 75% de RAP e 25% de pó de pedra alcançou um resultado próximo a 7800 MPa aos 28 dias.

Pires (2014), que utilizou a proporção 70/30 de RAP e agregado natural estabilizado com cimento Portland e cinza de casca de arroz em diferentes proporções obteve resultados de MR entre 3000 e 15000 MPa. Pasche (2016), por sua vez, encontrou valores entre 5000 e 12000 MPa aos 7 dias em misturas RAP e pó de pedra nas proporções 70/30 estabilizado com cimento. Silva (2018), que utilizou os mesmos materiais que Pasche (2016) na mesma proporção 70/30 encontrou valores de MR entre 5000 e 13000 aos 28 dias.

Bernucci *et al.* (2008) diz que valores de MR comuns para britas graduadas tratada com cimento estão da ordem de grandeza entre 6000 e 12000 MPa. Solo-cimento tem valores de MR na faixa de 2000 a 10000 MPa. Assim, se observa que os resultados obtidos se encontram nas faixas comumente observadas na literatura.

A Figura 52 apresenta a relação entre MR e VM_{200} , onde é possível observar que quanto maior o teor de VM_{200} , maiores os resultados de MR, o mesmo vale ao aumentar o γ_d e o teor de cal de carbureto.

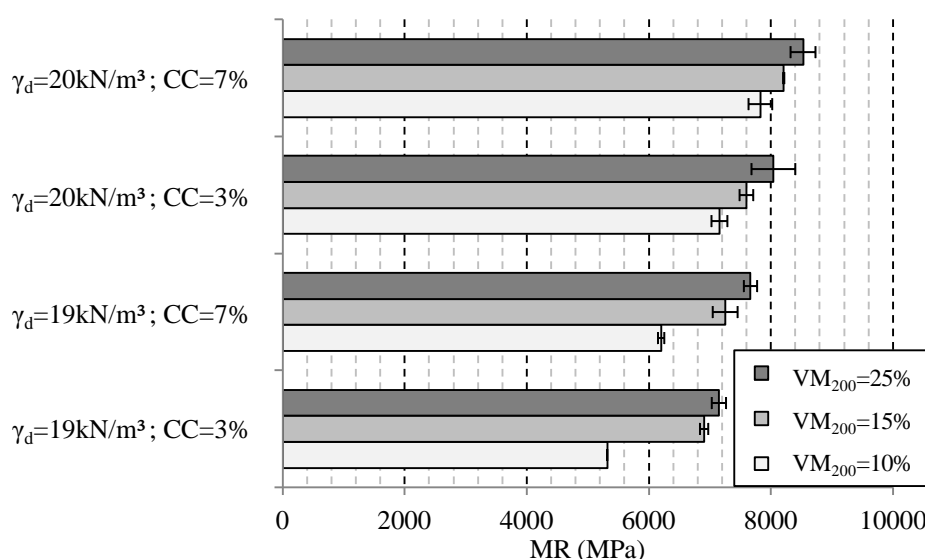


Figura 52: Resultados de MR obtidos para diferentes as diferentes misturas

Após o ensaio de MR os mesmos corpos de prova foram rompidos por tração (RT). Sendo possível assim obter a relação MR/RT. Pires (2016) e Silva (2018) avaliaram essa relação

como um importante meio para examinar a durabilidade de uma camada cimentada. Uma vez que materiais muito rígidos acabam por concentrar elevados esforços em seu interior, necessitando de uma elevada resistência à tração para suportar esses efeitos. Logo, menores relações de MR/RT podem indicar um material com melhores propriedades mecânicas.

Os resultados encontrados de RT e a relação MR/RT são mostrados na Tabela 19. Percebe-se que RT variou entre 0,22 e 0,79 MPa, valores levemente maiores que os observados no ensaio de RTCD (entre 0,17 e 0,59 MPa). Os valores encontrados da relação MR/RT estão entre 10000 e 24000.

Valores nessa faixa foram observados por outros autores. Silva (2018) encontrou valores de RT entre 0,22 e 1,03 MPa e uma relação MR/RT entre 12000 e 22000. Pires (2014), por sua vez, obteve resultados entre 0,12 e 0,89 MPa para RT e 15000 a 45000 para MR/RT. Pasche (2016), obteve valores de RT entre 0,37 e 1,59 MPa e valores de MR/RT entre 7000 e 10000.

Tabela 19: Resultados de MR, RT e MR/RT

Mistura	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT
FV-19-10-3-8	-	-	-
	5319	0,22	23996
FV-19-10-7-8	6276	0,34	18368
	6130	0,32	19175
FV-20-10-3-8	7342	0,34	21357
	6974	-	-
FV-20-10-7-8	8103	0,43	18734
	7555	0,39	19411
FV-19-15-3-8	6812	-	-
	7003	0,32	21892
FV-19-15-7-8	6964	0,39	17759
	7540	0,49	15415
FV-20-15-3-8	7759	0,54	14356
	7442	0,47	15966
FV-20-15-7-8	8197	0,68	12111
	8225	-	-
FV-19-25-3-8	6985	0,47	14798
	7314	0,45	16390
FV-19-25-7-8	7514	0,61	12404
	7820	0,54	14489
FV-20-25-3-8	7535	-	-
	8550	0,69	12409
FV-20-25-7-8	8816	0,79	11111
	8239	0,76	10834

A Figura 53 mostra graficamente os resultados da relação MR/RT com as variáveis estudadas. Nesse caso, ao aumentar qualquer uma das três variáveis tem-se a tendência de diminuir os valores da relação MR/RT, melhorando, assim, as suas propriedades mecânicas.

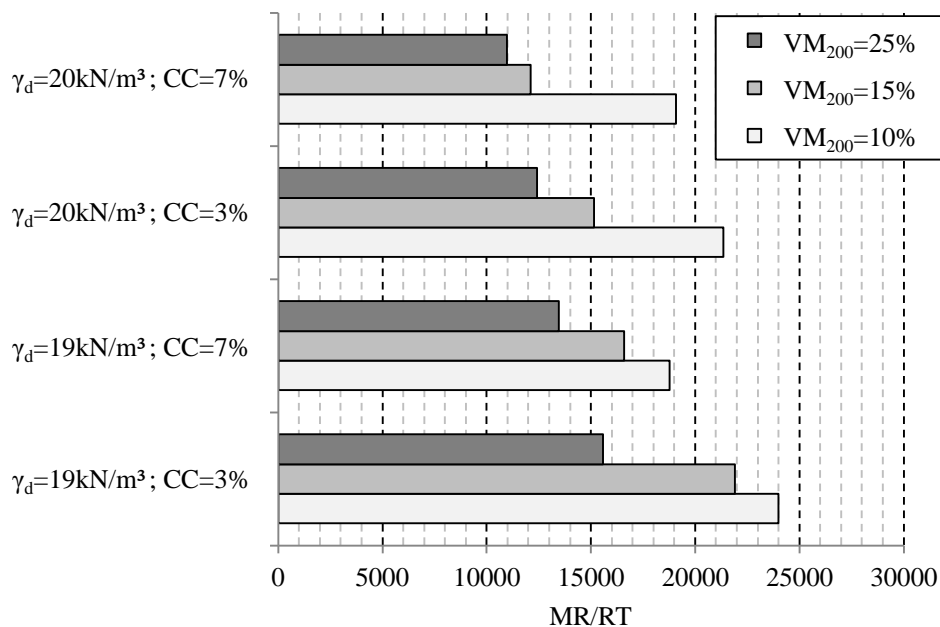


Figura 53: Resultados da relação MR/RT para as diferentes misturas

4.3.1. Relação de η/B_{iv} para o ensaio de Módulo de Resiliência

Ao relacionar $\eta/B_{iv}^{0,28}$ com os resultados de MR se obtém o gráfico mostrado na Figura 54, mostrando um coeficiente de determinação razoável ($R^2 = 0,74$). Pasche (2016) encontrou um coeficiente semelhante ($R^2 = 0,78$) ao relacionar MR com o $\eta/C_{iv}^{0,41}$ de seu estudo.

O expoente externo encontrado nesta relação (-0,93) foi o que apresentou o menor valor (em módulo) dentre os ensaios apresentados nesta dissertação, mostrando que, para o intervalo do índice $\eta/B_{iv}^{0,28}$ estudado nesta pesquisa (valores de $\eta/B_{iv}^{0,28}$ entre 8 e 13), o ensaio de MR foi o que apresentou as menores variações da variável resposta (neste caso o MR) entre as misturas estudadas. Pode-se ver que, pela curva mostrada na Figura 54, esta variação foi de 6200 MPa e 8700 MPa no intervalo estudado, ou seja, um acréscimo no MR de 40% quando se eleva os níveis das três variáveis controláveis.

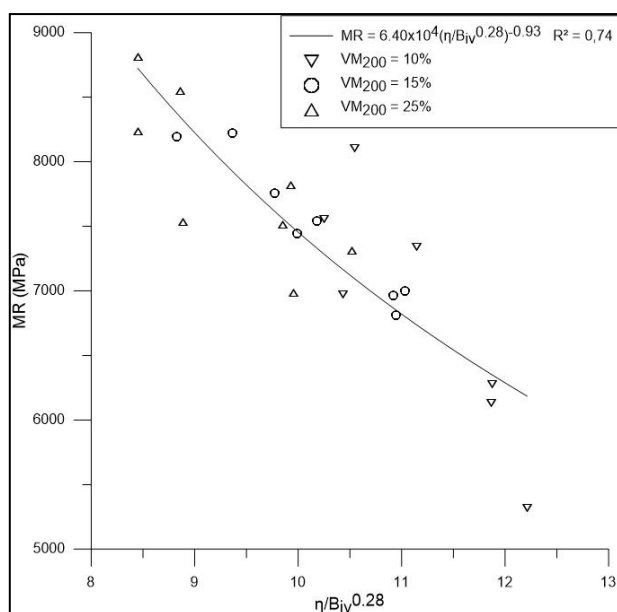


Figura 54 - Relação entre $\eta/B_{iv}^{0,28}$ para o ensaio de MR

A equação que mostra essa relação é apresentada abaixo:

$$MR (MPa) = 6,40 \times 10^4 \left(\eta / B_{iv}^{0,28} \right)^{-0,93} \quad \text{Equação 50}$$

4.3.2. Experimento fatorial 2^k do ensaio de Módulo de Resiliência

A avaliação dos efeitos de cada variável controlável (γ_d , VM₂₀₀ e CC) sobre a variável resposta (MR) é mostrada na Figura 55 quando se avalia a variação de VM₂₀₀ de 10 a 15% e na Figura 56 quando se avalia a variação de VM₂₀₀ de 10 a 25%.

Devido ao fato do CP1a ter rompido antes de se ter uma leitura de MR, a mistura 1 não teve réplica no tratamento realizado neste ensaio. Por conta disso, a linha de referência deste ensaio (2,37) não teve o mesmo resultado que os de RCS, RTCD e |E*| (2,31).

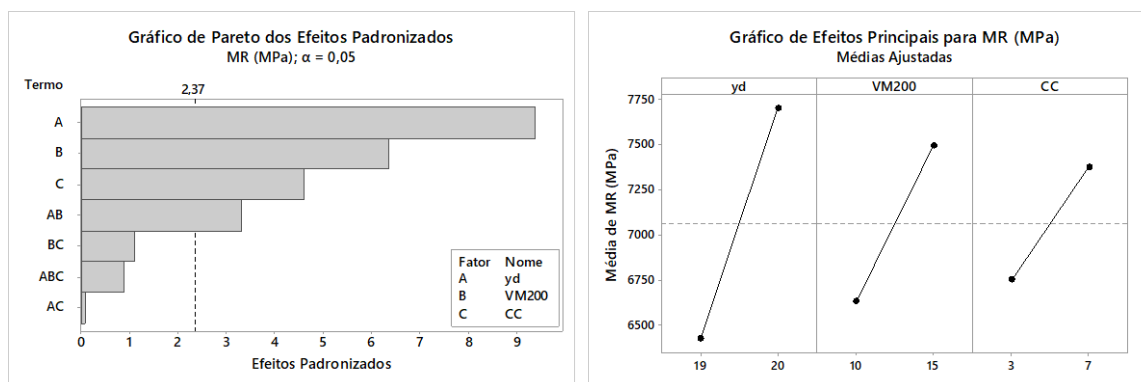


Figura 55 - Gráfico de Pareto e de efeitos principais de MR para teores de VM₂₀₀ de 10% e 15%

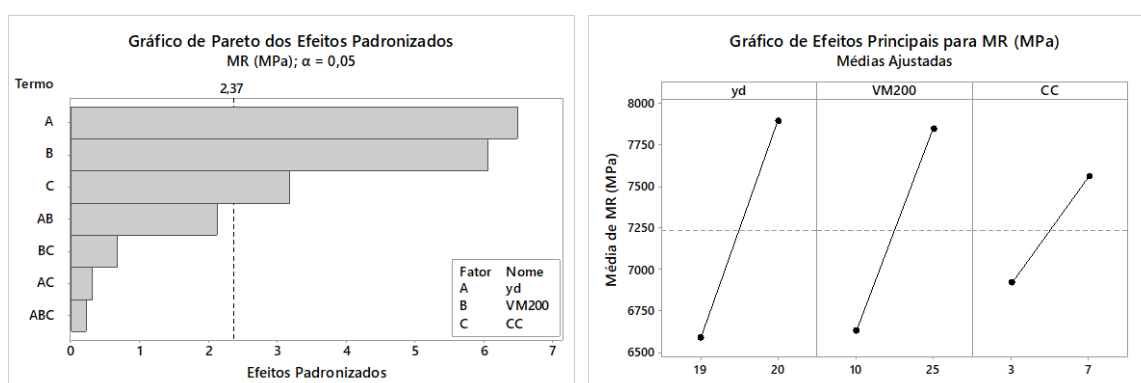


Figura 56 - Gráfico de Pareto e de efeitos principais de MR para teores de VM₂₀₀ de 10% e 25%

É observado em ambos os casos que o γ_d teve maior influência nas misturas, seguido pelo VM₂₀₀ e pelo CC, que também são estatisticamente significativas e mostram ter efeitos consideráveis para os ganhos de MR. Percebe-se também que ao elevar o VM₂₀₀ de 10 a 15% para 10 a 25% os efeitos dessa variável se elevam, sendo próximos dos efeitos causados pelo γ_d .

4.4. ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO (E*)

Depois de realizado o ensaio de módulo complexo nas quatro temperaturas e nove frequências programadas, foi obtido resultados de módulo dinâmico $|E^*|$ e ângulo de fase (ϕ) para cada temperatura e frequência de cada corpo de prova. Todos os resultados são mostrados no Apêndice B (Quadro B.1 a B.12). Dados referentes à moldagem dos corpos de prova se encontra no Quadro A.5 do Apêndice A.

Com os resultados de módulo dinâmico $|E^*|$ e ângulo de fase (ϕ) é possível criar uma série de gráficos, cada qual é possível avaliar propriedades diferentes, a fim de compreender o comportamento viscoelástico das misturas. Para essa dissertação, foram geradas isothermas e isócronas (tanto do módulo dinâmico quanto do ângulo de fase), espaço Cole-Cole, diagrama de Black e curva mestra. Os três últimos apresentando análises tanto com os dados experimentais quanto os dados gerados pelo modelo 2S2P1D.

As isothermas são obtidas para cada temperatura do ensaio, no qual é traçado o módulo dinâmico e o ângulo de fase em função da frequência em escala logarítmica. Com elas, pode ser observada a suscetibilidade cinética pela inclinação da curva em relação a uma temperatura (BOEIRA, 2018). No Apêndice C (Quadros C.1 a C.4) são mostradas as isothermas obtidas para o módulo dinâmico, enquanto o Apêndice D (Quadros D.1 a D.4) mostra as isothermas para o ângulo de fase.

As isócronas, por sua vez, representam o módulo dinâmico e o ângulo de fase para cada frequência de ensaio em função da temperatura. Nesse caso, segundo Boeira (2018), é possível verificar a suscetibilidade térmica das misturas em função da variação do módulo dinâmico ou do ângulo de fase pela variação de temperatura. No Apêndice E (Quadros E.1 a E.9) é mostrada as isócronas obtidas para o módulo dinâmico, enquanto o Apêndice F (Quadros F.1 a F.9) mostra as isócronas para o ângulo de fase.

Cada quadro dos Apêndices C a F mostra o comportamento das 12 misturas estudadas na mesma temperatura (para as isothermas) ou na mesma frequência (para as isócronas), divididas em quatro gráficos por quadro, para facilitar a visualização. Cada gráfico individual mostra a variação de VM_{200} , mantendo fixadas as demais variáveis.

Com as isothermas de módulo dinâmico (Apêndice C), percebe-se que há um crescimento logarítmico do módulo quando se aumenta a frequência para todas as temperaturas e misturas. Percebe-se também que ao aumentar a densidade, o teor de cal de carbureto e o teor de vidro moído passante na peneira de n.200, há um crescimento do módulo dinâmico. Observa-se através destes gráficos que em muitas ocasiões (em especial quando $\gamma_d = 20 \text{ kN/m}^3$) não houveram variações no módulo dinâmico entre 15% e 25% de VM_{200} . Para altas temperaturas, se percebe também que os resultados de VM_{200} de 10% se aproximam das demais, mostrando que esta variável tem menos efeito para altas temperaturas (isso será discutido novamente na seção 4.4.2 ao fazer a análise estatística).

As isotermas de ângulo de fase mostram que para temperaturas menores (4°C e 21°C) o ângulo de fase diminui ao aumentar a frequência, aos 37°C percebe-se um crescimento do ângulo de fase para baixas frequências e uma diminuição para altas frequências e aos 54°C há uma tendência de crescimento do ângulo de fase ao aumentar a frequência. Esse crescimento do ângulo de fase para altas temperaturas se deve ao amolecimento do ligante asfáltico presente no RAP. É notado através destes gráficos que o ângulo de fase variou entre 2° e 12°, semelhante aos encontrados por Pasche (2016) que encontrou valores entre 2° e 14°. Ao avaliar as três variáveis estudadas, se percebe, de uma forma geral, uma leve diminuição do ângulo de fase ao aumentar o teor de cal e uma diminuição mais considerável ao aumentar o γ_d e o VM_{200} . Isso mostra uma tendência do material ser mais elástico ao aumentar o valor de qualquer uma das variáveis.

As isócronas do módulo dinâmico (Apêndice E) mostram os mesmos dados que as isotermas, porém nesse caso é analisada a variação o módulo dinâmico com o aumento da temperatura. Nota-se que, independente da frequência, há uma diminuição do módulo dinâmico ao aumentar a temperatura. As análises entre as variáveis são semelhantes ao das isotermas, porém neste caso se percebe que para altas temperaturas a variação de VM_{200} influi menos no módulo.

As isócronas de ângulo de fase (Apêndice F) mostram, de forma geral, que as temperaturas intermediárias apresentam maiores valores de ângulo de fase para as baixas frequências. Para altas frequências, quanto maior a temperatura maior o ângulo de fase.

O espaço Cole-Cole, o diagrama de Black e as curvas mestras serão analisados tanto através das médias dos dados experimentais quanto do modelo reológico 2S2P1D. Os sete parâmetros de calibração do modelo para representar o comportamento viscoelástico do material, juntamente com as constantes C1 e C2 do WLF (já mencionados na Seção 3.4.5.5) foram obtidos através da ferramenta Solver do Excel, onde o modelo foi ajustado para que se tivesse o menor erro com relação aos dados experimentais. Os parâmetros obtidos são mostrados na Tabela 20. Assim, são geradas as curvas para o espaço Cole-Cole, diagrama de Black e curvas mestras.

Vale salientar que a modelagem foi realizada com base nas médias dos dois corpos de prova de cada mistura.

Tabela 20: Resultados dos parâmetros do modelo 2S2P1D

Mistura	E_{00} (MPa)	E_0 (MPa)	k	h	δ	τ_E (s)	β	C1	C2 (°C)
1	1000	9500	0,129	0,413	2,00	0,28	7000	33,89	414,27
2	1400	10000	0,155	0,396	1,74	0,37	7000	12,18	158,73
3	1200	11000	0,135	0,370	2,00	0,33	7000	12,02	158,82
4	1900	13000	0,140	0,410	2,03	0,40	7000	12,50	158,70
5	1100	10000	0,120	0,350	1,80	0,42	7000	15,07	158,27
6	1500	10500	0,117	0,390	1,43	0,29	7000	12,91	158,64
7	1500	13500	0,125	0,320	1,40	0,68	7000	31,42	350,83
8	1900	14000	0,120	0,325	1,10	0,56	7000	15,28	153,74
9	1300	11000	0,105	0,340	1,40	0,20	7000	23,59	157,09
10	1500	11000	0,120	0,365	1,50	0,60	7000	16,21	158,10
11	2000	14000	0,120	0,370	1,70	0,50	7000	17,93	157,89
12	2300	15000	0,130	0,385	1,75	0,60	7000	11,66	116,07

O espaço Cole-Cole é formado em função da parte real (E_1) pela parte imaginária (E_2). A Figura 57 mostra a curva em semicírculo característico do espaço Cole-Cole do Modelo 2S2P1D em comparação com os dados experimentais da mistura FV-20-25-7. Esta amostra foi escolhida para demonstração do modelo perante os dados experimentais. Os resultados dos demais dados experimentais das demais misturas no espaço Cole-Cole são mostrados no Apêndice G. Como o ângulo de fase das misturas tiveram valores baixos (menores que 12°) os valores de E_1 se assemelharam aos valores de módulo dinâmico (diferenças abaixo de 100 MPa).

A Figura 58 mostra os resultados do modelo 2S2P1D do espaço Cole-Cole para as 12 misturas estudadas. Percebe-se que valores de E_1 variaram entre 1000 e 2300 MPa para baixas frequências (módulo estático - E_{00}) e entre 9500 a 15000 MPa para altas frequências (módulo em transição vítrea - E_0). Como comparação, Pasche (2016) encontrou valores em E_1 entre 400 e 2000 MPa para E_{00} e entre 10500 a 20000 MPa para E_0 . No caso de misturas asfálticas os valores de E_1 para E_{00} chegam próximas à zero, enquanto para E_0 pode-se chegar a 40000 MPa (CENTOFANTE, 2016; BOEIRA, 2018; LACHANCE-TREMBLAY *et al.*, 2018; SPECHT *et al.*, 2017). O fato de E_{00} não estar próximo da origem igual as misturas asfálticas em geral se deve a cimentação da mistura. Quanto maior a cimentação mais distante da origem no eixo horizontal.

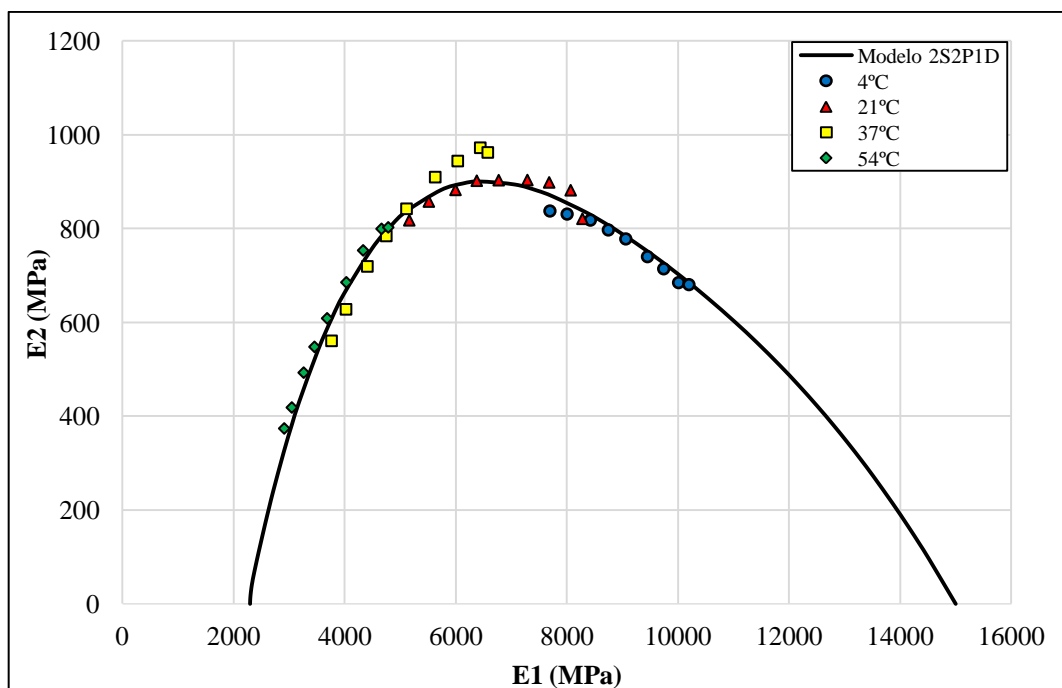


Figura 57: Resultado dos dados experimentais e do modelo reológico 2S2P1D para o espaço Cole-Cole da mistura FV-20-25-7

Com relação ao E_2 , os valores encontrados variaram entre 575 e 925 MPa. Pasche (2016), por sua vez, encontrou valores entre 700 e 1300 MPa. Para misturas asfálticas o valor de E_2 pode chegar a 3500 MPa (SPECHT *et al.*, 2017). Isso mostra que a energia dissipada nas misturas aqui estudadas é menor que nas misturas asfálticas em geral, devido a menor viscosidade do material.

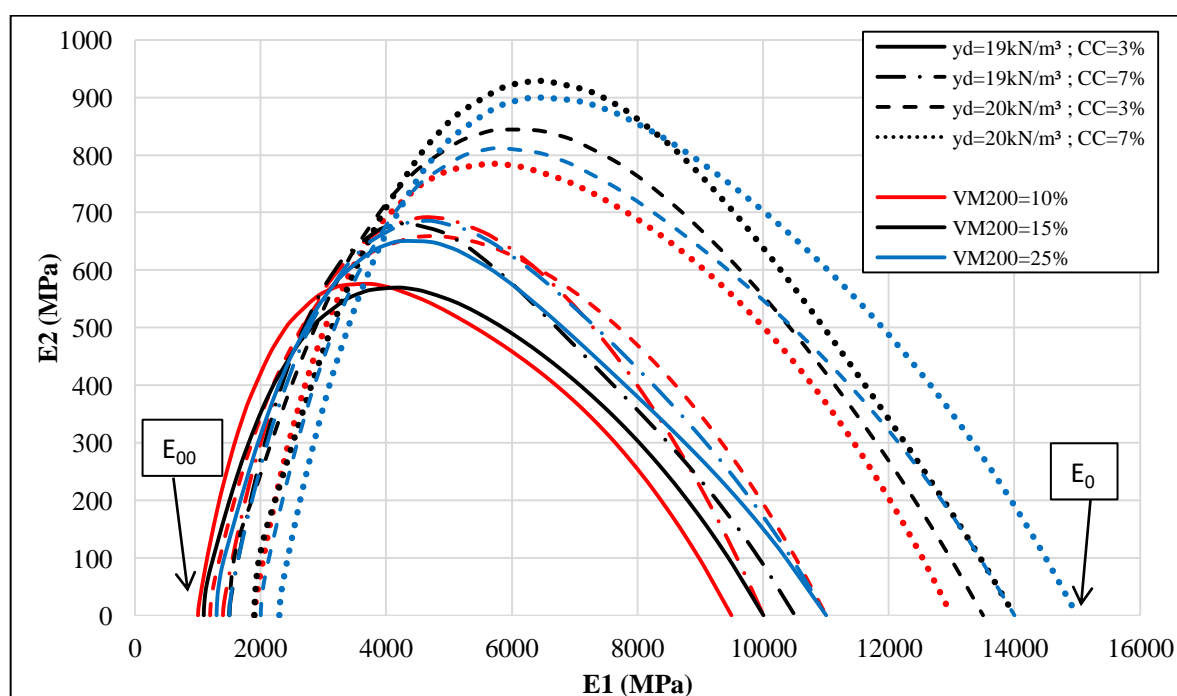


Figura 58: Resultado do modelo 2S2P1D do espaço Cole-Cole para as 12 misturas estudadas

O diagrama de Black é a representação do valor do módulo complexo em função do ângulo de fase para cada temperatura do ensaio. Assim como montado no espaço Cole-Cole, a Figura 59 demonstra os resultados dos dados experimentais e do modelo 2S2P1D para a mistura FV-20-25-7 para o diagrama de Black. Os resultados dos demais dados experimentais das demais misturas no diagrama de Black são mostrados no do Apêndice H.

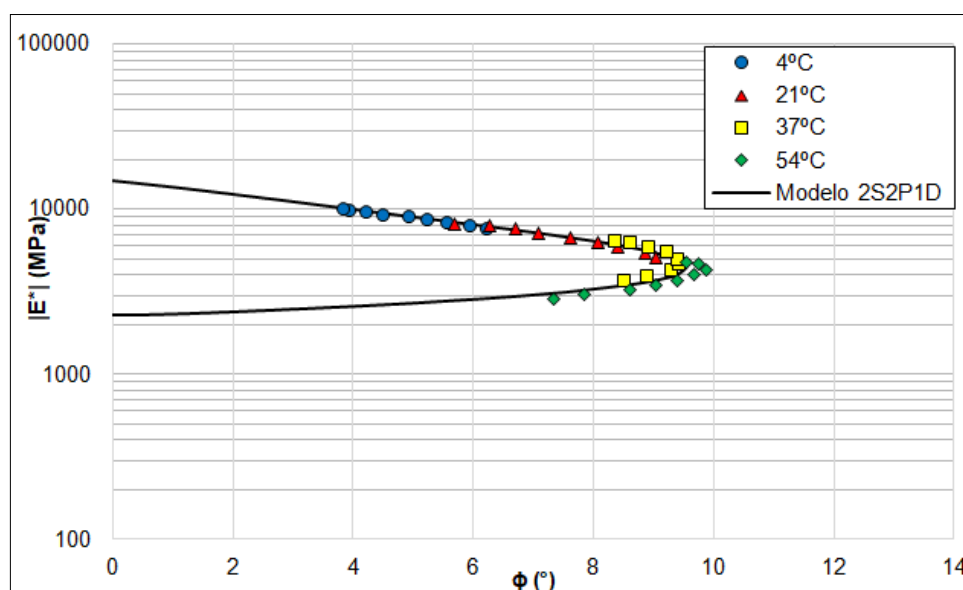


Figura 59: Resultado dos dados experimentais e do modelo reológico 2S2P1D para o diagrama de Black da mistura FV-20-25-7

Este diagrama permite visualizar qual a zona de módulo dinâmico se tem maiores valores de ângulo de fase. Percebe-se que ao elevar a temperatura o módulo dinâmico diminui enquanto o ângulo de fase aumenta até certo ponto. Após atingir certa temperatura (no caso desta pesquisa a partir dos 37°C, semelhante ao observado em misturas asfálticas em geral) há uma redução tanto do ângulo de fase quanto do módulo dinâmico.

Segundo Pasche (2016), o aumento do ângulo de fase acontece devido ao ligante presente no RAP, que começa a amolecer ao ser aquecido, tendo seu comportamento dominado pela parcela viscosa. A redução do ângulo de fase a partir dos 37°C mostra uma recuperação elástica do material que, segundo Otto (2009) acontece devido à presença de granulares na mistura. Segundo o autor, caso a mistura fosse composta apenas por betume, o ângulo de fase aumentaria de forma contínua, porém com a presença de granulares o diagrama de Black tende a formar uma curva assintótica com o aumento da temperatura.

A Figura 60 mostra os resultados do modelo 2S2P1D do diagrama de Black para as 12 misturas estudadas. Se percebe que a mistura 1 (FV-19-10-3) foi a única que alcançou um ângulo de fase máximo de $12,0^\circ$ com módulo dinâmico aproximado de 2200 MPa (mostrando assim ter uma parcela viscosa mais importante com relação as demais misturas). As demais estiveram entre $9,5^\circ$ e $10,7^\circ$, sendo a menor a mistura 12 (FV-20-25-7) com ângulo de fase de $9,5^\circ$ ao atingir um módulo dinâmico de 4500 MPa. Nas misturas de Pasche (2016) foram obtidos valores de ângulo de fase máximos entre 11° e 15° para módulos dinâmicos de 5000 e 1300 respectivamente. No caso de misturas asfálticas, o ângulo de fase máximo pode chegar a 50° com módulo complexo de 800 MPa (CENTOFANTE, 2016), devido ao ligante asfáltico que torna a mistura mais viscosa para altas temperaturas.

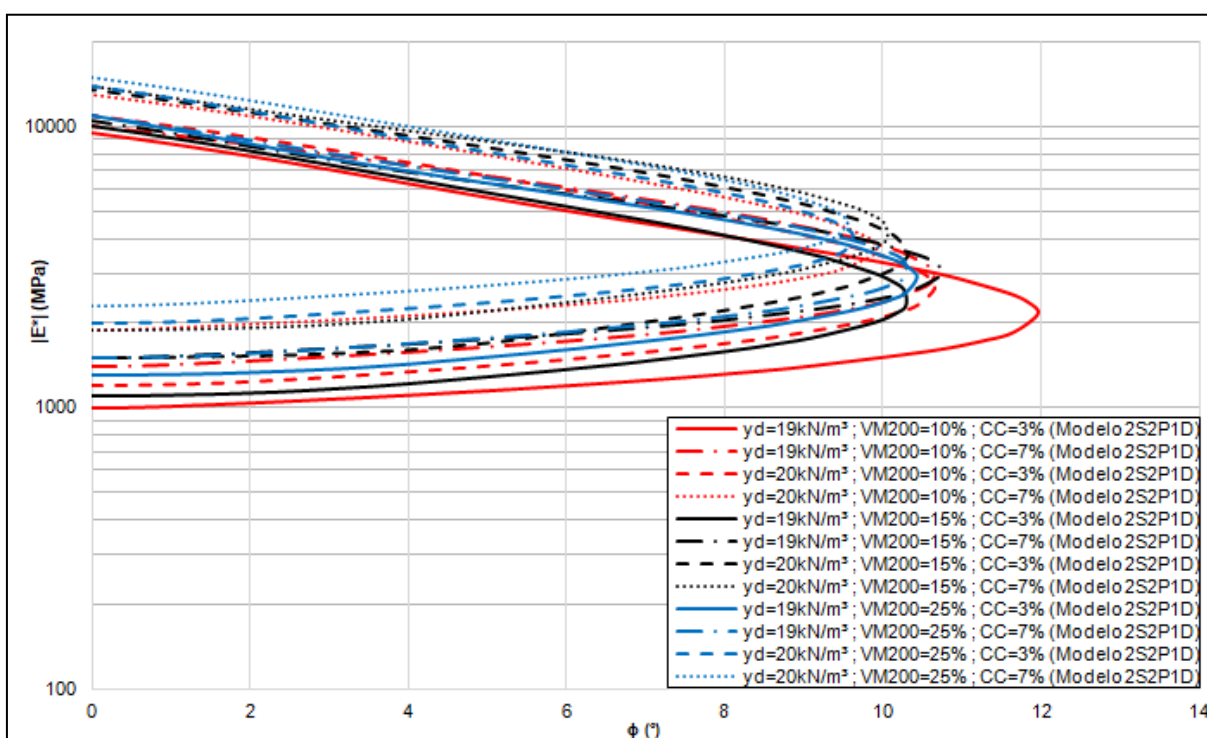


Figura 60: Resultado do modelo 2S2P1D do Diagrama de Black para as 12 misturas estudadas

As curvas mestras mostram a relação entre o módulo dinâmico e a frequência reduzida em escala logarítmica. Através do princípio de superposição tempo-temperatura, a curva mestra permite fazer comparações do módulo dinâmico a qualquer faixa de temperatura e frequência. A frequência reduzida é obtida a partir da multiplicação da frequência pelo fator de deslocamento $a(T)$. No caso da temperatura de referência ($T_{\text{ref}} = 21^\circ\text{C}$), o valor de $a(T) = 1$. Os resultados de $a(T) \times$ frequência para cada mistura são mostrados no Apêndice B.

Segundo Boeira (2018), uma mistura asfáltica responde de forma diferente aos carregamentos estáticos e dinâmicos devido à suscetibilidade das misturas associado ao comportamento viscoelástico vindo do ligante asfáltico. Assim, têm-se respostas mais viscosas para carregamentos lentos, enquanto que para carregamentos rápidos têm-se respostas elásticas. Conseqüentemente, o módulo dinâmico tende a crescer com o aumento da frequência.

A Figura 61 mostra as curvas mestras obtidas das 12 misturas para o modelo 2S2P1D. Mostrando que para altas temperaturas e/ou baixas frequências (E_{00}) o módulo dinâmico se encontra entre 1000 e 2300 MPa, enquanto que para baixas temperaturas e/ou altas frequências (E_0) o módulo dinâmico se encontra entre 9000 e 14000 MPa, como já mostrado no espaço Cole-Cole. A Figura 61 mostra apenas os resultados do modelo 2S2P1D, as comparações deste modelo reológico com os dados experimentais encontrados durante o ensaio são mostradas no Apêndice I (Quadros I.1 e I.2).

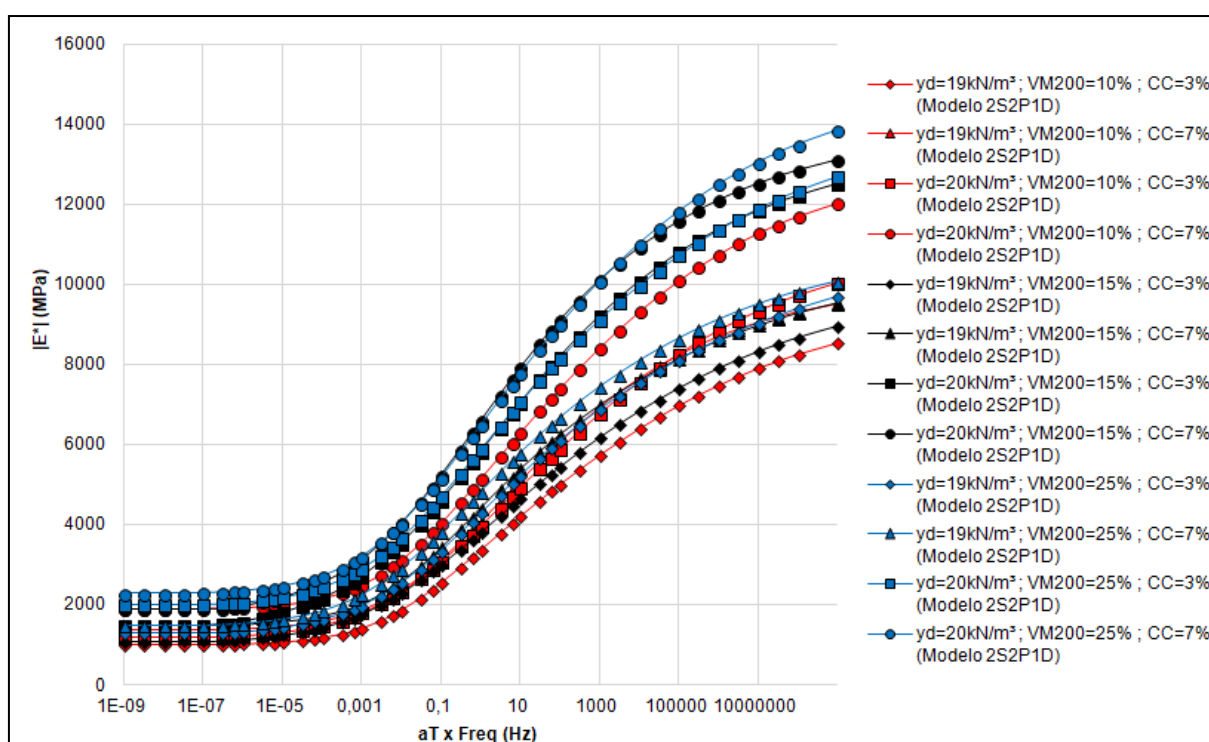


Figura 61: Resultado do modelo 2S2P1D das curvas mestras de módulo complexo para as 12 misturas estudadas

As curvas mestras apresentadas na Figura 61 são menos acentuadas que as curvas encontradas por Pasche (2016) que, por sua vez, são menos acentuadas do que as comumente encontradas em misturas asfálticas (CENTOFANTE, 2016; BOEIRA, 2018; LACHANCE-TREMBLAY

et al., 2018; SPECHT *et al.*, 2017). No caso das misturas asfálticas, estas possuem valores de E_{00} menores e E_0 maiores que os encontrados aqui. Isso acontece pelo fato das misturas asfálticas receberem um ligante novo, enquanto o RAP tem apenas o ligante remanescente em seus agregados, não tornando as misturas desta dissertação e as de Pasche (2016) tão suscetível termicamente quanto às misturas asfálticas. Porém há a variação do módulo dinâmico, garantindo que estas misturas têm propriedades viscoelásticas.

4.4.1. Relação de η/B_{iv} para o ensaio de Módulo Complexo

Como o ensaio de módulo complexo gera uma grande quantidade de resultados de módulo dinâmico para diferentes temperaturas, buscou-se nesta seção obter uma relação entre o módulo dinâmico $|E^*|$, o índice η/B_{iv} , frequência (F) e temperatura (TT). Assim como o obtido por Consoli *et al.* (2017d) para RAP, pó de pedra e cimento Portland.

Primeiramente, foram gerados nove gráficos relacionando o módulo dinâmico e o índice $\eta/B_{iv}^{0,28}$ (Figura 62 a Figura 70), cada um mostrando uma frequência e as quatro temperatura estudadas.

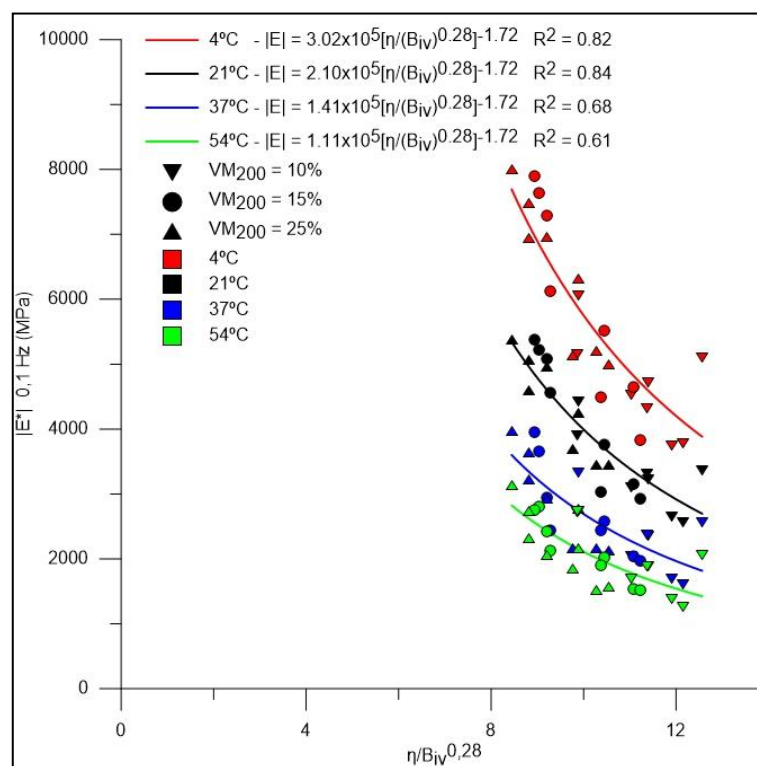


Figura 62: Relação entre $|E^*|$ e η/B_{iv} para a frequência de 0,1 Hz

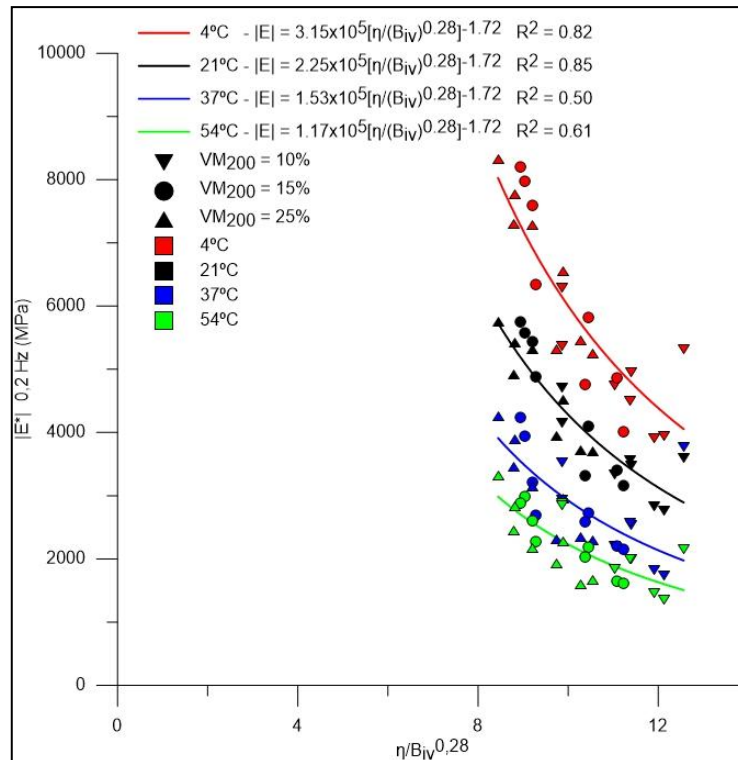


Figura 63: Relação entre $|E^*|$ e η/B_{iv} para a frequência de 0,2 Hz

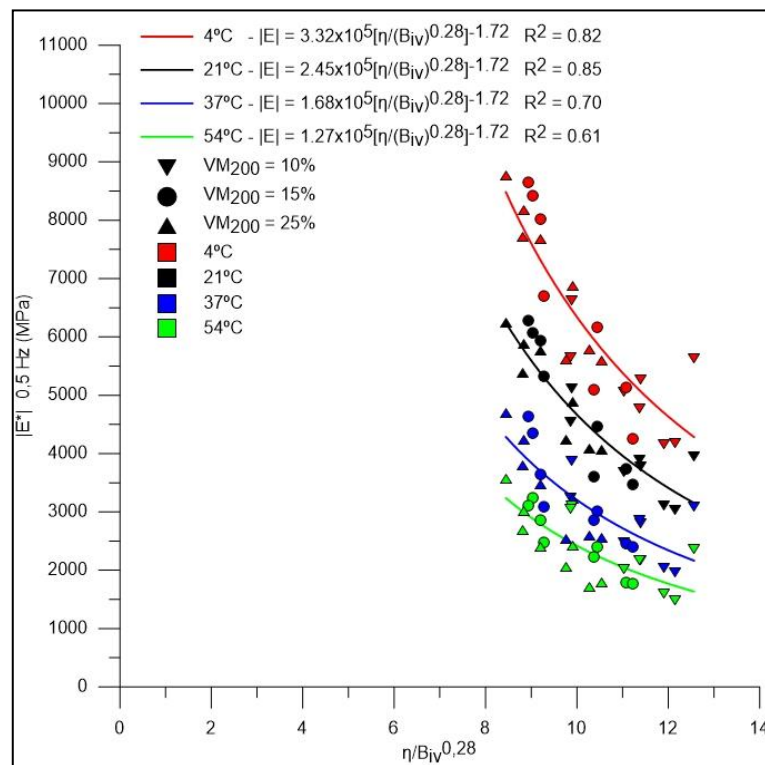


Figura 64: Relação entre $|E^*|$ e η/B_{iv} para a frequência de 0,5 Hz

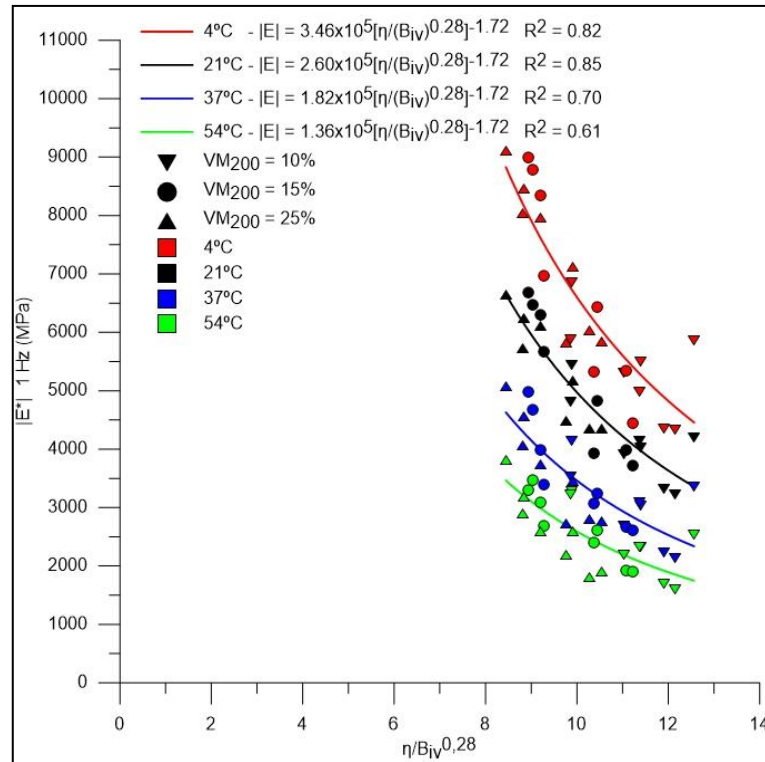


Figura 65: Relação entre $|E^*|$ e η/B_{iv} para a frequência de 1 Hz

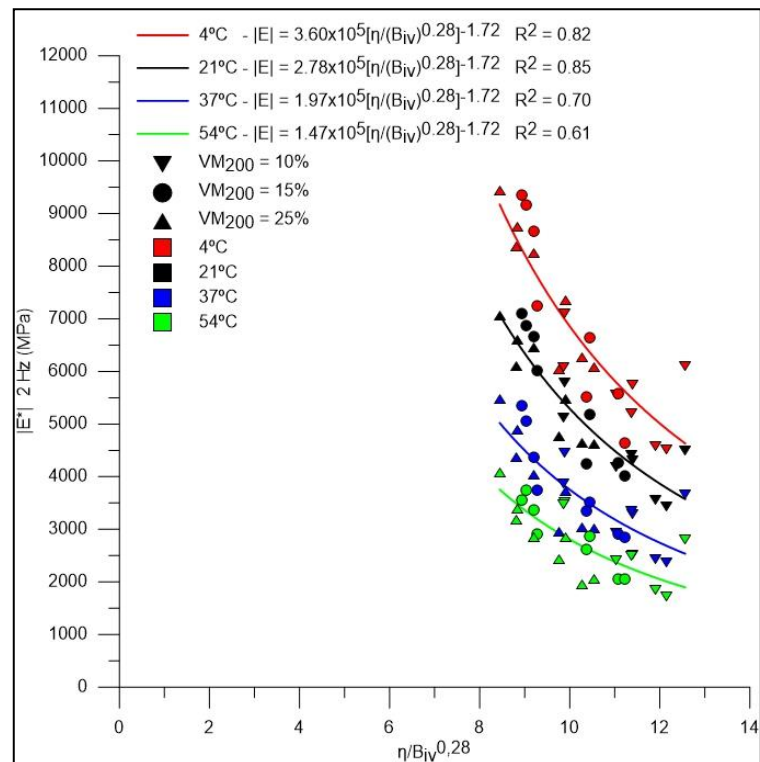


Figura 66: Relação entre $|E^*|$ e η/B_{iv} para a frequência de 2 Hz

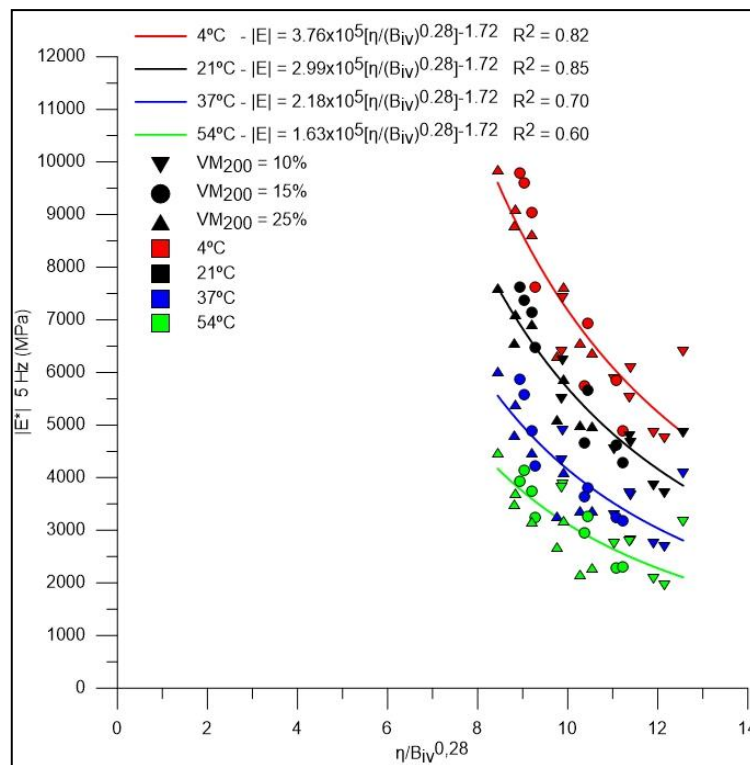


Figura 67: Relação entre $|E^*|$ e η/B_{iv} para a frequência de 5 Hz

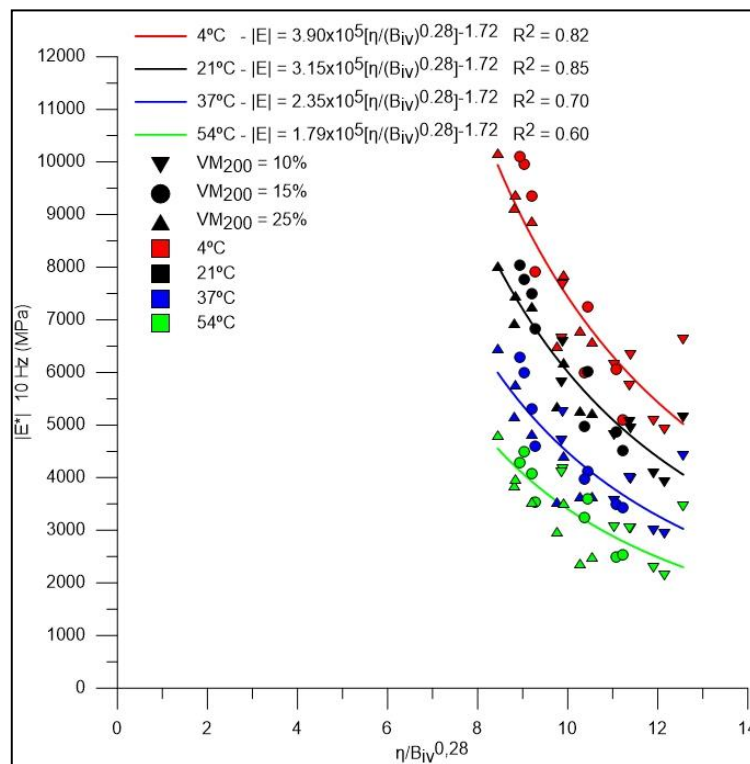


Figura 68: Relação entre $|E^*|$ e η/B_{iv} para a frequência de 10 Hz

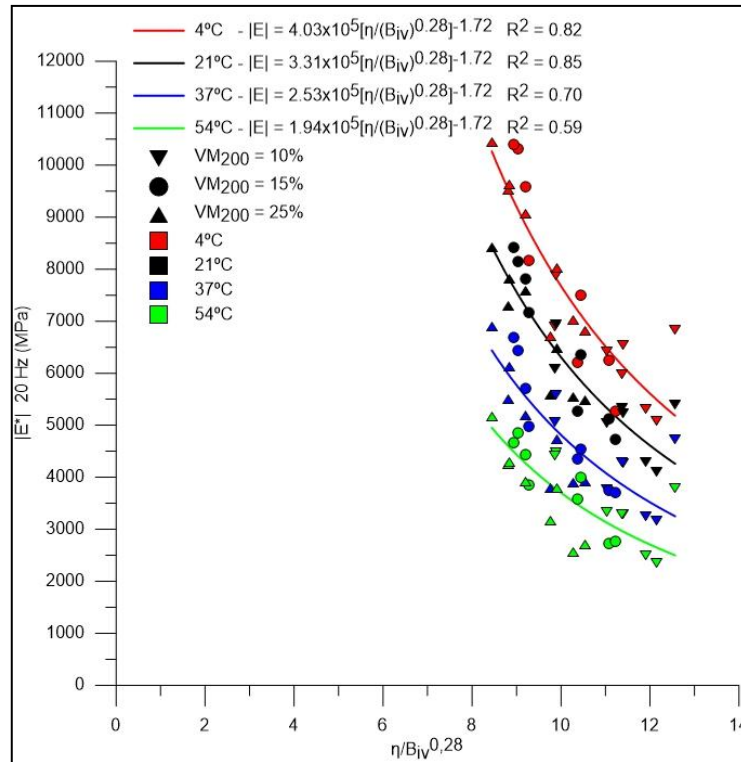


Figura 69: Relação entre $|E^*|$ e η/B_{iv} para a frequência de 20 Hz

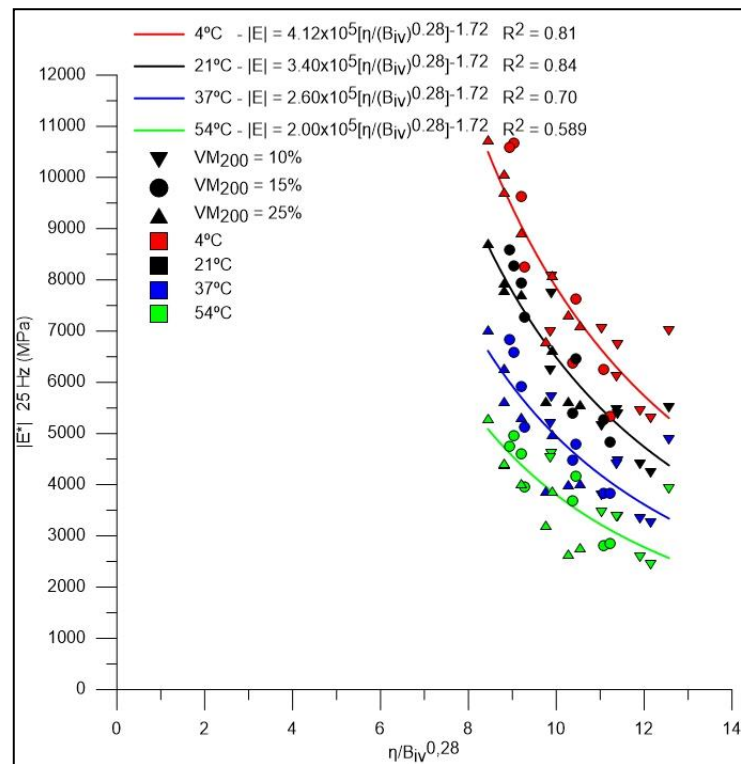


Figura 70: Relação entre $|E^*|$ e η/B_{iv} para a frequência de 25 Hz

Considerando novamente a Equação 48, percebe-se que ao elevar a temperatura há um decréscimo da constante A para todas as frequências. Enquanto a constante B se manteve constante (-1,72). O coeficiente de determinação (R^2) tendeu a diminuir ao se elevar a temperatura, mostrando que altas temperaturas tenderam a mostrar maiores dispersões nos resultados.

Com base nas equações obtidas nas figuras acima, foram separadas as constantes A de cada uma delas (Tabela 21) e, em seguida, foram relacionadas com a frequência em cada uma das temperaturas (Figura 71).

Tabela 21: Determinação da constante A

Expoente externo		-1,72	Expoente interno		0,28
Frequência (Hz)		Temperatura (°C)			
		4	21	37	54
Constante A	0,1	301890,5	209655,2	141290	110830,7
	0,2	315014,6	224739,8	153443,7	117088,5
	0,5	332823,6	244973,4	168192,6	127052,4
	1	346432,4	260959,6	181651,6	135920,9
	2	359913	277714,3	197043,9	147348,3
	5	376889,5	299061,2	218127,2	163680,5
	10	390180,7	315356,8	235266,8	178696,5
	20	402849	331081,6	252664,9	194264,6
	25	411996,2	340245,3	259503,3	199629,1

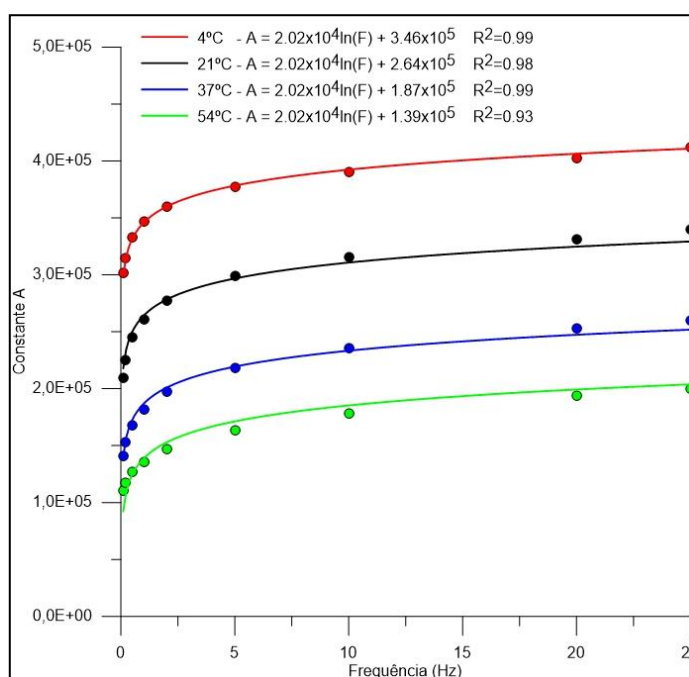


Figura 71: Relação entre a constante A e a frequência (F)

Com a Figura 71 se obtém quatro equações logarítmicas, que substituindo na Equação 48 tem-se as quatro equações abaixo que relacionam o módulo dinâmico, o índice $\eta/B_{iv}^{0,28}$ e a frequência para quatro temperaturas.

$$|E^*|_{4^{\circ}\text{C}} = [2,02 \times 10^4 \ln F + 3,46 \times 10^5] \left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-1,72} \quad \text{Equação 52}$$

$$|E^*|_{21^{\circ}\text{C}} = [2,02 \times 10^4 \ln F + 2,64 \times 10^5] \left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-1,72} \quad \text{Equação 53}$$

$$|E^*|_{37^{\circ}\text{C}} = [2,02 \times 10^4 \ln F + 1,87 \times 10^5] \left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-1,72} \quad \text{Equação 54}$$

$$|E^*|_{54^{\circ}\text{C}} = [2,02 \times 10^4 \ln F + 1,39 \times 10^5] \left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-1,72} \quad \text{Equação 55}$$

Percebe-se novamente que há uma relação entre as quatro equações. Quanto maior a temperatura menor a constante Z (Tabela 22).

Tabela 22: Constante Z

Temp (°C)	Z
4	345830,3
21	264252,3
37	186851,9
54	138777,2

Ao relacionar a constante Z com a temperatura, obtém-se uma equação linear (Figura 72).

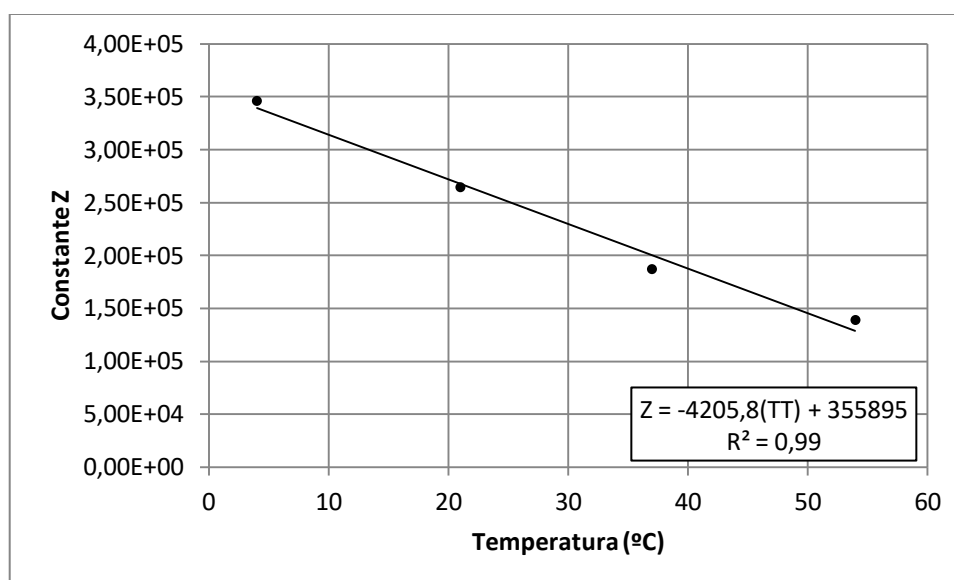


Figura 72: Relação entre a constante Z e a temperatura (TT)

Assim, é obtida uma equação geral que relaciona o módulo dinâmico, frequência e temperatura através do índice η/B_{iv} .

$$|E^*| = [2,02 \times 10^4 \ln F - 4,21 \times 10^3 (TT) + 3,56 \times 10^5] \left(\frac{\eta}{B_{iv}^{0,28}} \right)^{-1,72} \quad (\text{Equação 55})$$

4.4.2. Experimento fatorial 2^k do ensaio de Módulo Complexo

Por fim, gráficos de Pareto e de efeitos principais são gerados para as quatro temperaturas (4°C, 21°C, 37°C e 54°C) e para duas frequências selecionadas (1 Hz e 10 Hz). A criação do experimento seguiu o mesmo procedimento adotado nos ensaios de RCS, RTCD e MR. As análises, da mesma forma que os demais ensaios, foi feita considerando primeiramente os efeitos de VM_{200} variando de 10% para 15% e, em seguida, variando de 10% para 25%.

Assim, a Figura 73 mostra os gráficos de Pareto e de efeitos principais para as quatro temperaturas considerando 1 Hz e VM_{200} variando de 10% para 15%. A Figura 74 mostra os mesmos gráficos para as quatro temperaturas considerando 1 Hz e VM_{200} variando de 10% para 25%. A Figura 75 mostra o mesmo para 10 Hz e VM_{200} variando de 10% para 15%. A Figura 76 mostra o mesmo para 10 Hz e VM_{200} variando de 10% para 25%.

Percebe-se nessas figuras a grande influência que o γ_d proporciona no módulo dinâmico, onde em quase todos os casos este foi o termo de maior influência. Um γ_d elevado proporciona uma maior aproximação dos grãos, que fortalece o esqueleto mineral da mistura. As exceções são nas temperaturas de 4°C e 21°C para as variações de VM_{200} de 10% para 25% (Figura 74), em que o VM_{200} tem grande influência também.

Algo curioso também pode ser observado, ao elevar a temperatura o VM_{200} diminui a sua influência nos resultados de módulo complexo (a ponto de em alguns casos ser estatisticamente não significativo) enquanto o teor de cal de carbureto passa a crescer a sua influência na mistura para altas temperaturas.

Isso pode ser justificado devido à presença do RAP na mistura, em que com altas temperaturas há o amolecimento do ligante presente no agregado e, assim, se comportando

como mais uma variável na mistura. Por conta disso, aumentar ou não o teor de vidro passa a não ser mais importante.

Com relação ao crescimento da influência do teor da cal de carbureto ao aumentar a temperatura, Pasche (2016) obteve algo semelhante ao utilizar o cimento Portland como agente cimentante. Através das isotermas do módulo dinâmico do referido autor percebe-se que o teor de cimento teve pouca influência aos -10°C se comparado com os obtidos aos 54°C .

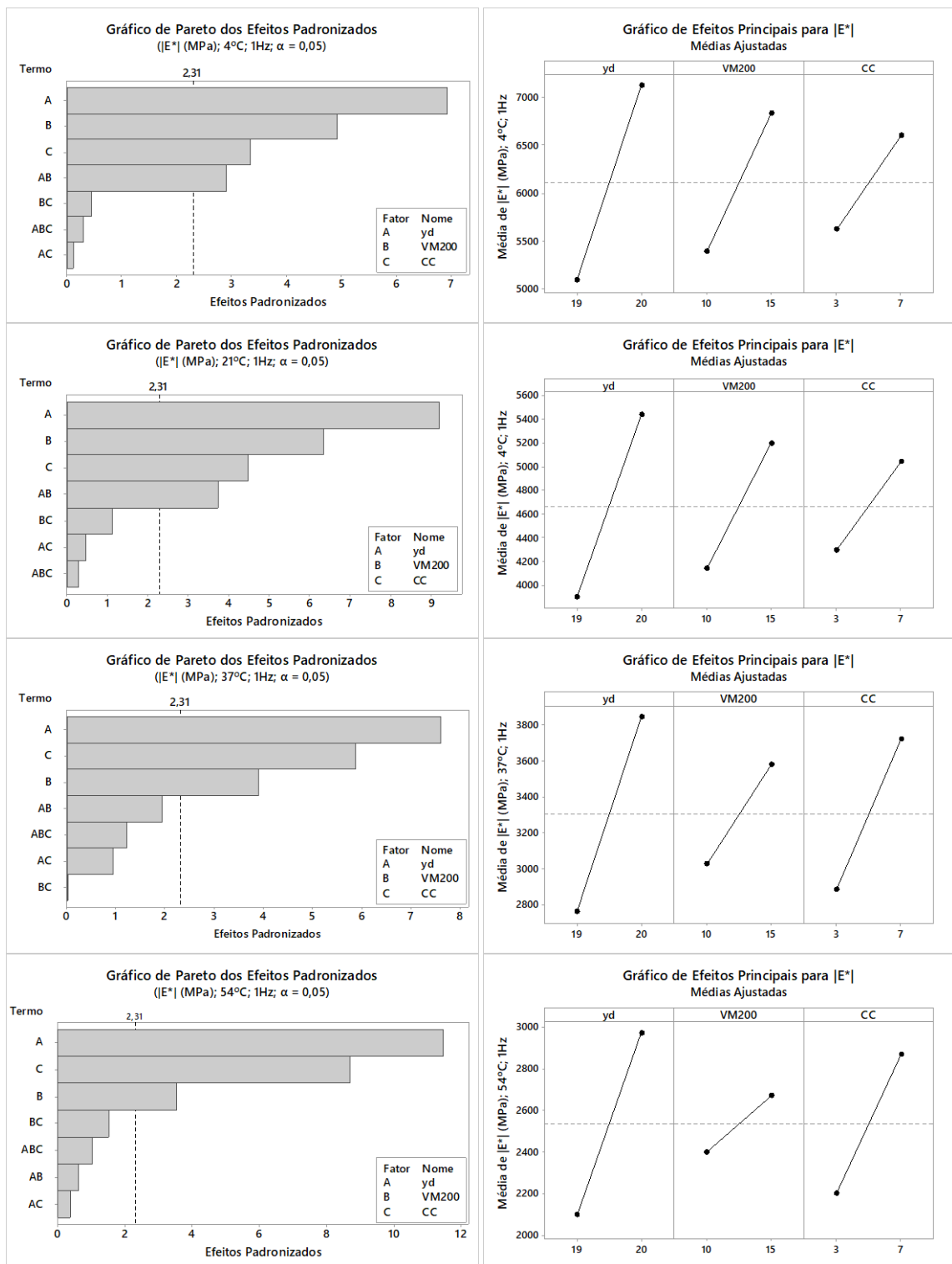


Figura 73 - Gráfico de Pareto e de efeitos principais de |E*| para teores de VM₂₀₀ de 10% e 15% nas temperaturas de 4°C, 21°C, 37°C, 54°C e frequência de 1Hz

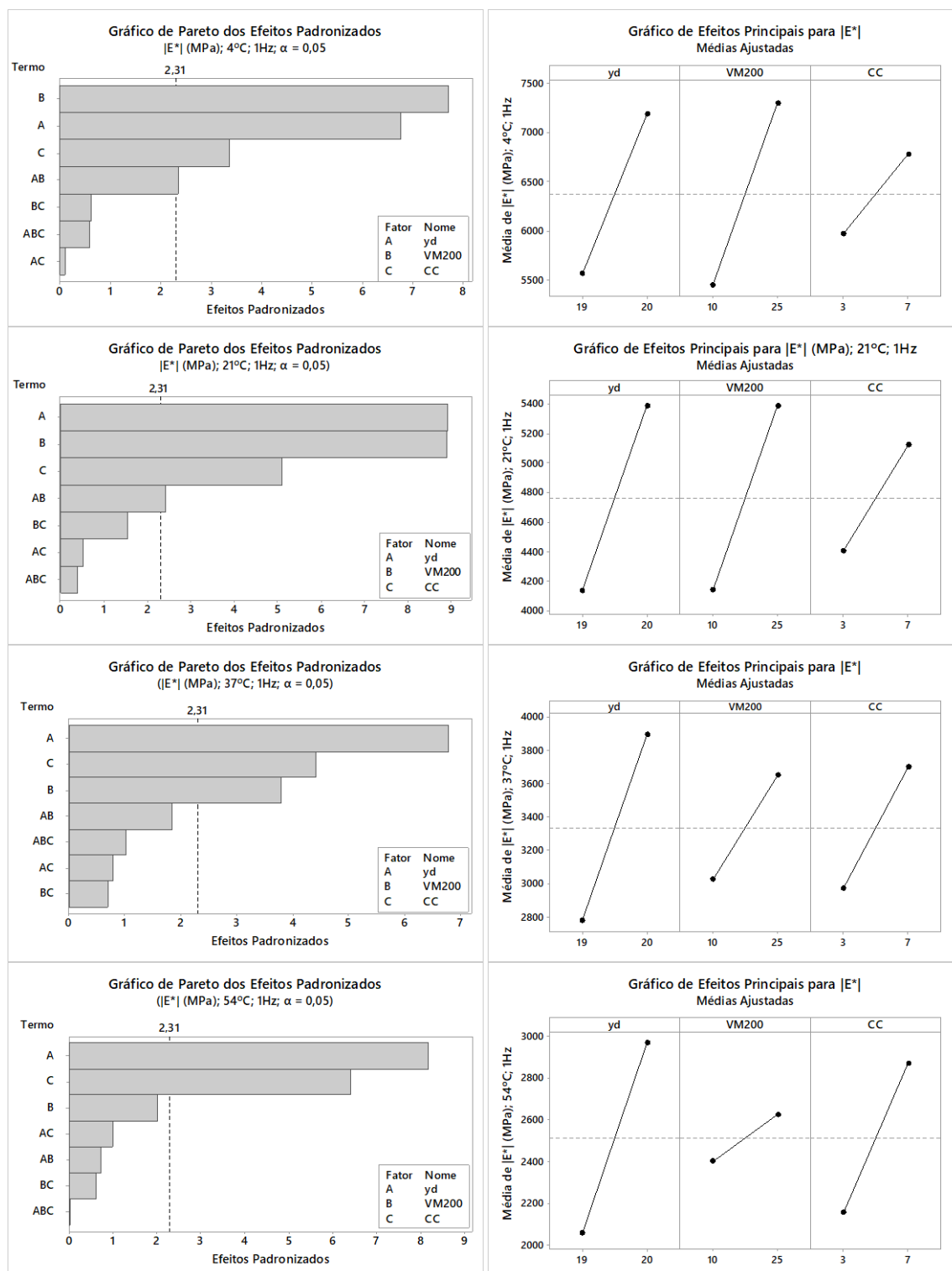


Figura 74 - Gráfico de Pareto e de efeitos principais de $|E^*|$ para teores de VM_{200} de 10% e 25% nas temperaturas de 4°C, 21°C, 37°C, 54°C e frequência de 1Hz

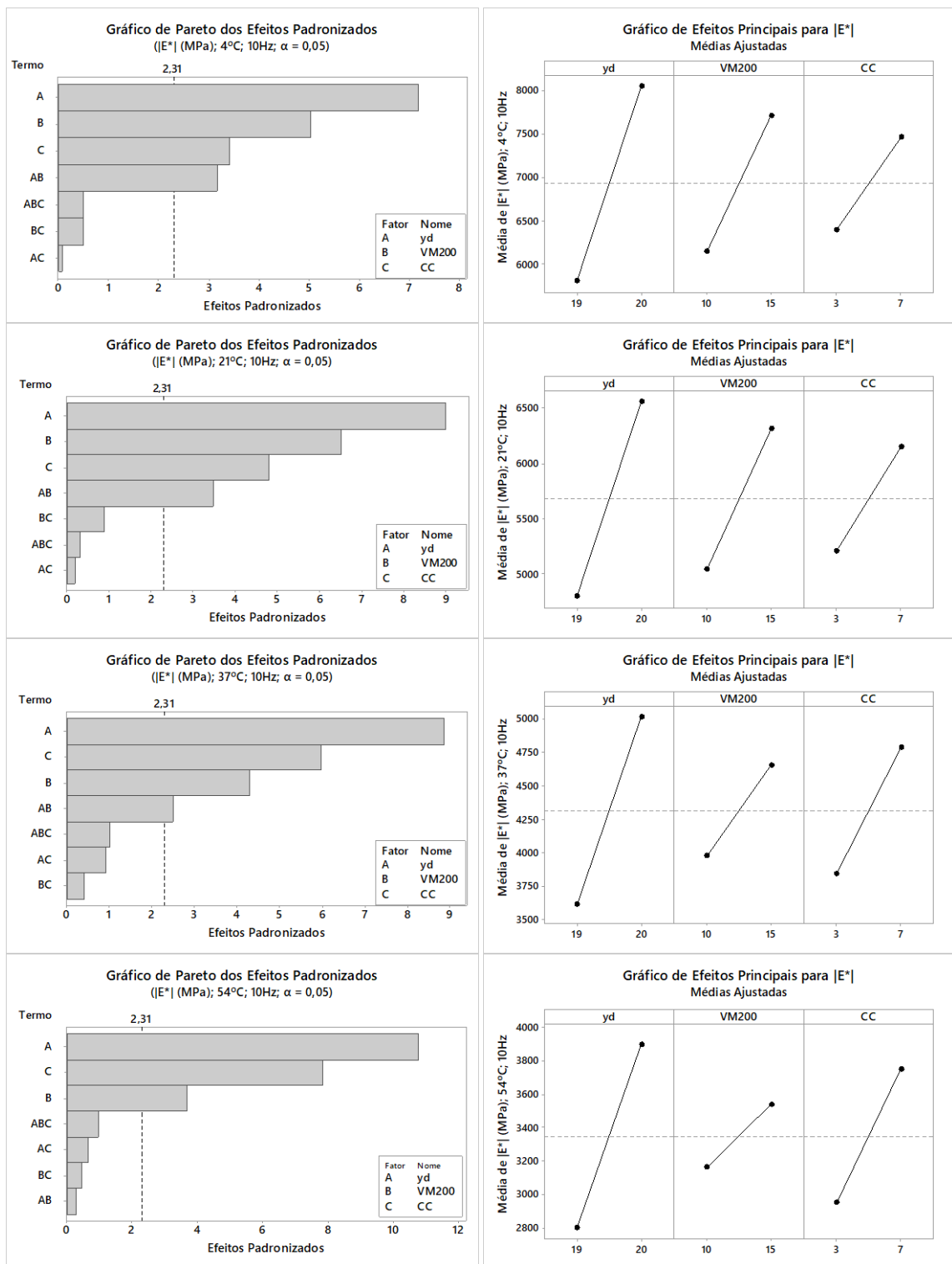


Figura 75 - Gráfico de Pareto e de efeitos principais de $|E^*$ para teores de VM₂₀₀ de 10% e 15% nas temperaturas de 4°C, 21°C, 37°C, 54°C e frequência de 10Hz

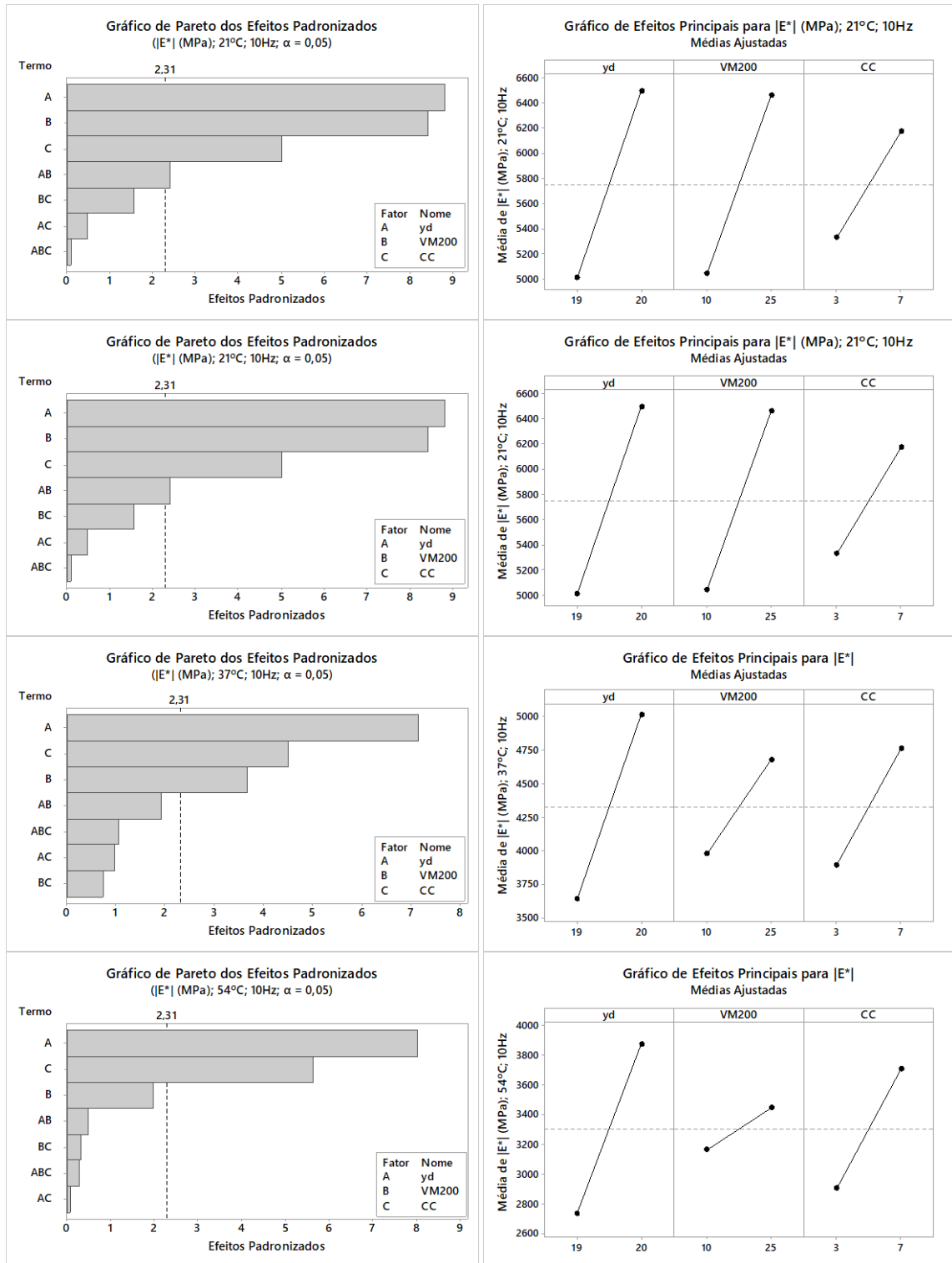


Figura 76 - Gráfico de Pareto e de efeitos principais de |E*| para teores de VM200 de 10% e 25% nas temperaturas de 4°C, 21°C, 37°C, 54°C e frequência de 10Hz

5. CONSIDERAÇÃO FINAIS

Com base no que foi exposto ao longo do presente trabalho, são apresentadas a seguir as conclusões e sugestões para pesquisas futuras, visando uma melhor compreensão do tema aqui estudado.

5.1. CONCLUSÕES

De forma geral, foi possível concluir que o presente estudo exibiu interessantes e significativos resultados de resistência, rigidez e durabilidade, mostrando que este tema é promissor para a aplicação prática como camada de base ou sub-base de pavimentos. Apesar do relevante aspecto econômico e ambiental que envolve o tema a nível mundial, a justificativa principal da incorporação do vidro moído ao RAP está ligada a melhorias das propriedades mecânicas e funcionais da via.

Da análise dos resultados verificados na resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, durabilidade por molhagem e secagem, módulo de resiliência e módulo complexo, estabeleceram-se as seguintes conclusões:

5.1.1. Resistência à compressão simples

- a) Foi constatada uma melhoria expressiva ao se avaliar a RCS das misturas aqui estudadas. Percebe-se que a mistura com as variáveis controláveis em seus menores níveis ($\gamma_d = 19 \text{ kN/m}^3$, $VM_{200} = 10\%$ e $CC = 3\%$) alcançaram resistências de 1,3 MPa, enquanto em seus maiores níveis ($\gamma_d = 20 \text{ kN/m}^3$, $VM_{200} = 25\%$ e $CC = 7\%$) alcançou uma resistência próxima de 4,0 MPa. Ou seja, um aumento de 200%;
- b) As se elevar o VM_{200} de 10% para 15%, percebe-se que a variável o γ_d teve um efeito muito mais significativa para os ganhos de resistência que as outras duas variáveis, que por sua vez, também tiveram influências significativas para um $\alpha = 0,05$, mas em menor intensidade;

- c) Contudo, quando se eleva o teor de VM₂₀₀ de 10% para 25% esta variável passa a ser a principal responsável pelos ganhos de resistência, devido a maior quantidade de material fino disponível para reagir com a cal. As outras duas também tiveram efeitos significativos na resistência do ponto de vista estatístico;
- d) Ao se relacionar o índice η/B_{iv} com a RCS dos 24 corpos de prova, percebe-se uma relação em forma de potência com expoente externo de -2,50 e um coeficiente de determinação (R^2) de 0,81, mostrando que, apesar de terem uma certa variabilidade entre os corpos de prova (devido a variáveis externas, seja durante a moldagem, durante a cura, na ordenação dos grãos no corpo de prova e etc), estas tiveram uma aproximação satisfatória.

5.1.2. Resistência à tração por compressão diametral

- a) No caso da resistência à tração por compressão diametral, esta também mostrou melhorias significativas com as variáveis controláveis aqui estudadas. Esta atingiu uma resistência de 0,16 MPa quando as variáveis controláveis estão em seus menores níveis ($\gamma_d = 19 \text{ kN/m}^3$, VM₂₀₀ = 10% e CC = 3%) e uma resistência próxima a 0,60 MPa quando estão em seus maiores níveis ($\gamma_d = 20 \text{ kN/m}^3$, VM₂₀₀ = 25% e CC = 7%). Ou seja, uma melhoria de 275% entre elas;
- b) Do ponto de vista estatístico, as três variáveis controláveis se mostraram significativas nos níveis estudados nesta pesquisa para um $\alpha = 0,05$, sendo VM₂₀₀ a variável que surtiu maior efeito nos resultados, seguido pelo γ_d e pelo CC. Ao aumentar o teor de VM₂₀₀ de 10% para 25% o efeito desta variável na resposta dos resultados se mostrou muito maior do que aumentando de 10% para 15%, enquanto as demais variáveis se mantiveram com a mesma influência, de forma semelhante ao observado nos resultados da RCS. O que diferenciou os resultados de RCS e RTCD neste sentido é que mesmo com menor aumento no teor de VM₂₀₀ o efeito desta variável já se tornou a variável de maior efeito para RTCD;
- c) Pela relação do índice η/B_{iv} com a RTCD dos 24 corpos de prova, se encontra uma equação com mesmos expoentes interno (0,28) e externo (-2,50) da obtida na RCS, com um $R^2 = 0,84$. Com isso, é possível obter uma relação entre os dois ensaios, mostrando assim que os resultados do ensaio de RTCD tem uma magnitude de 14,14% dos resultados de RCS;

- d) Para complementar, ao fazer a relação direta entre RCS e RTCD, percebe-se a RTCD tem magnitude 15% dos resultados de RCS para um $R^2 = 0,82$. Sendo 1% maior que na relação anterior devido a forma de análise ser diferente pela, pois a anterior considera o η e o B_{iv} na relação. Ambas, porém, estão na margem comumente observadas na literatura que mostram valores entre 10 e 20% para a relação entre RCS e RTCD.

5.1.3. Durabilidade por molhagem e secagem

- a) A perda de massa individual em cada ciclo mostra que os corpos de prova tiveram uma perda maior no primeiro ciclo. O corpo de prova com maior perda de massa também foi o que mostrou maior variabilidade entre as perdas de massa entre ciclos, devido às condições do ensaio;
- b) Após os 12 ciclos, a mistura cujas variáveis controláveis estão em seus menores níveis ($\gamma_d = 19 \text{ kN/m}^3$, $VM_{200} = 10\%$ e $CC = 3\%$) obteve a maior perda de massa acumulada (PMA = 5,37%), enquanto a mistura com os maiores níveis ($\gamma_d = 20 \text{ kN/m}^3$, $VM_{200} = 25\%$ e $CC = 7\%$) obteve a menor perda de massa acumulada (PMA = 0,45%), uma diferença 12 vezes maior entre eles;
- c) Devido à falta de réplicas deste ensaio, os gráficos de Pareto teve alguma variável com efeito significativo apenas para um $\alpha = 0,10$, mostrando a importância de se realizar ao menos duplicatas para confirmar os resultados obtidos e garantir efeitos mais significativos do ponto de vista estatístico;
- d) Apesar disso, a variável de maior efeito foi o VM_{200} mesmo quando a variação desta variável aumenta de 10 para 15%. Ao elevar de 10 para 25%, esta variável se torna mais significativa em relação aos demais, que se mantêm praticamente constantes. Com um $\alpha = 0,10$ as três variáveis se mostraram estatisticamente significativas pelo gráfico de Pareto, enquanto para $\alpha = 0,05$ nenhuma delas se mostrou significativa. Ao se analisar o gráfico de efeitos principais percebe-se que as três variáveis tiveram efeitos nos corpos de prova, onde as médias da PMA chegam a dobrar de valor para baixos níveis;
- e) Através do índice η/B_{iv} é possível avaliar a PMA para vários ciclos diferentes. Ao fazer essa relação para os ciclos 1, 3, 6, 9 e 12 se percebe que o expoente externo se mantém constante (4,60), assim como o expoente interno (0,28) mudando apenas a

constante A, que tem crescimento em forma de potência de acordo com o número de ciclos. Os R^2 variaram entre 0,88 para ciclos altos e 0,92 para ciclos baixos. Assim foi possível obter uma relação que mostra a PMA, η/B_{iv} e o número de ciclos n, sendo uma análise interessante para prever a PMA para ciclos maiores.

5.1.4. Módulo de resiliência

- a) No caso do ensaio de MR, a mistura cujas variáveis controláveis estão em seus menores níveis ($\gamma_d = 19 \text{ kN/m}^3$, $VM_{200} = 10\%$ e $CC = 3\%$) obteve um valor médio de MR de 5319 MPa enquanto a mistura com os maiores níveis ($\gamma_d = 20 \text{ kN/m}^3$, $VM_{200} = 25\%$ e $CC = 7\%$) alcançou um valor médio de MR de 8528 MPa. Aumentando, assim, em 60% o valor de MR quando comparado a mistura com variáveis de menores níveis para a mistura com variáveis de maiores níveis;
- b) Os valores de MR encontrados são semelhantes aos MR encontrados em outros trabalhos que utilizaram RAP estabilizados quimicamente. Mostrando que, assim como nos outros casos, a cimentação aconteceu e tornou a mistura mais rígida após os 28 dias de cura;
- c) A relação MR/RT mostrou valores entre 10000 e 24000, valores estes semelhantes ao observado por outros autores. Nesse caso, ao aumentar o teor de qualquer uma das três variáveis tem-se a tendência de diminuir os valores da relação MR/RT, melhorando, assim, as suas propriedades mecânicas;
- d) Ao relacionar o MR com o índice η/B_{iv} para 23 corpos de prova (um deles foi perdido) se obteve uma equação de potência com expoente interno de 0,28 e expoente externo igual a -0,93. Com um R^2 de 0,74, mostrando a alta variabilidade dos resultados deste ensaio. A mistura 11, por exemplo, teve uma diferença entre as duplicatas de quase 1000 MPa, cujo CV foi de 6,31%;
- e) Ao analisar os efeitos de cada variável controlável, se percebe que as três variáveis têm efeitos estatisticamente significativos para um $\alpha = 0,05$, onde a hierarquia das variáveis de maior efeito (tanto para VM_{200} variando de 10 para 15% e 10 para 25%) foi o γ_d sendo mais, significativo seguido pelo VM_{200} e o CC. No caso de VM_{200} variando de 10 para 25%, o efeito desta variável quase se iguala ao efeito do γ_d no ganho de rigidez da mistura.

5.1.5. Módulo complexo

- a) Com relação aos módulos dinâmicos percebe-se, através das isotermas, que há um crescimento logarítmico quando se aumentam as frequências. Pelas isócronas, percebe-se que há um decréscimo do módulo dinâmico quando as temperaturas aumentam. É percebido também por esses gráficos que ao elevar a temperatura os teores de VM_{200} tendem a influir menos na mistura, o que se confirma com o experimento estatístico;
- b) Com relação aos ângulos de fase se nota, por meio das isotermas, que para as temperaturas de 4°C e 21°C há um decréscimo do ângulo de fase ao aumentar a frequência, para a temperatura de 37°C há um crescimento do ângulo de fase para baixas frequências e uma diminuição para altas frequências e para 54°C se tem um crescimento do ângulo de fase ao aumentar as frequências. As isócronas mostram, de forma geral, que as temperaturas intermediárias apresentam maiores valores de ângulo de fase para as baixas frequências. Para altas frequências, quanto maior a temperatura maior o ângulo de fase;
- c) De forma geral, foi notado uma variação de ângulo de fase entre 2° e 12°, semelhantes aos de Pasche (2016). Mostrando assim que há uma parcela viscosa no comportamento do material frente ao ensaio de módulo complexo. Essa parcela viscosa vem do ligante asfáltico remanescente nos agregados do RAP. Os ângulos de fase encontrados são muito inferiores aos observados em misturas asfálticas, pois no caso das misturas asfálticas se tem uma maior quantidade de ligante asfáltico responsável pela maior viscosidade deste material;
- d) Foi obtida uma boa relação entre os dados experimentais e o modelo reológico 2S2P1D, com os parâmetros do modelo dentro dos intervalos aceitos;
- e) No espaço Cole-Cole percebe-se que os valores de E_1 (parte real) variaram entre 1000 e 2300 MPa para baixas frequências (E_{00}) e entre 9500 a 15000 MPa para altas frequências (E_0). Esses valores de E_0 são maiores do que os comumente observados para misturas asfálticas, devido à cimentação. Com relação ao E_2 (parte imaginária), os valores encontrados variaram entre 575 e 625 MPa, enquanto em misturas asfálticas estes valores podem chegar a 3500 MPa, uma vez que estes materiais tem um comportamento viscoso mais acentuado;

- f) No diagrama de Black, percebe-se que até 37°C os módulos dinâmicos diminuíram enquanto o ângulo de fase aumentou, a partir dos 37°C em diante houve a diminuição tanto do ângulo de fase quanto do módulo dinâmico. Os ângulos de fase máximos variaram entre 9,5° e 12° a partir da temperatura de 37°C para módulos dinâmicos entre 4500 e 2200 MPa, respectivamente;
- g) Pelas curvas mestras, obtidas através do princípio de superposição tempo-temperatura, foi observado curvas menos acentuadas que as observadas por Pasche (2016), que por sua vez são menos acentuadas que as misturas asfálticas em geral. Pois no caso do RAP estabilizado quimicamente há apenas o ligante asfáltico remanescente no agregado. Por haver variação no módulo dinâmico as misturas de fato têm propriedades viscoelásticas;
- h) Ao se relacionar o índice η/B_{iv} com os módulos dinâmicos obtidos para as diferentes temperaturas e frequências, percebe-se que há um expoente externo constante -1,72 para um expoente interno de 0,28. Para cada temperatura, é notado que a constante A cresce de forma logarítmica ao aumentar a frequência, enquanto que para cada frequência, é notada que a constante Z decresce linearmente ao aumentar a temperatura. Assim é possível obter uma equação geral que relaciona o módulo dinâmico, o índice η/B_{iv} , a frequência e a temperatura;
- i) No experimento fatorial, Nota-se que o γ_d foi a variável controlável de maior influência nos efeitos de módulo dinâmico. É notado que as variações de frequência de 1 Hz para 10 Hz influem pouco nos efeitos das variáveis, onde estas tendem a ter as mesmas influências em geral. Ao aumentar a temperatura, porém, percebe-se que os efeitos de VM_{200} tendem a decrescer enquanto o teor de cal de carbureto tende a subir. Isso pode ser explicado pois a altas temperaturas o ligante asfáltico presente na mistura tende a amolecer e fazer parte do sistema, se comportando como uma variável e fazendo a análise do sistema mudar. Nesse caso, o VM_{200} passa a influenciar menos enquanto a cal de carbureto passa a ter maior influência, mostrando que as misturas com uma maior quantidade de cal de carbureto se mantiveram mais rígidas mesmo a altas temperaturas.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de que os conhecimentos obtidos no presente trabalho sejam ampliados e, também, que os resultados aqui relatados sejam verificados e comparados, sugere-se:

- a) Realizar ensaios diferentes com os mesmos materiais, como ensaio de fadiga, triaxial e etc.;
- b) Avaliar variáveis diferentes com os mesmos materiais e para os mesmos ensaios, como diferentes tempos de cura, diferentes temperaturas de cura e etc.;
- c) Realizar os mesmos ensaios com as mesmas variáveis, porém com curvas granulométricas diferentes, a fim de se realizar uma comparação;
- d) Avaliar a influência do vidro em outros tipos de agregados graúdos e em outros tipos de cales. Além de outros tipos de vidros;
- e) Emprego de pozolanas alternativas no lugar do vidro moído;
- f) Adicionar ativadores alcalinos na mistura;
- g) Utilizar diferentes proporções de RAP e vidro na composição granulométrica ao invés da proporção 70/30 utilizada nesta pesquisa, a fim de avaliar seu desempenho e realizar uma comparação;
- h) Análise mais detalhada de ensaios DRX e MEV (microscopia eletrônica de varredura) ao longo do tempo de cura, para identificar as fases cristalinas geradas pelas reações químicas, melhorando assim as análises do comportamento do material do ponto de vista microscópico;
- i) Verificação da mistura destes materiais em aplicação em campo, fazendo uma análise de viabilidade técnica e econômica;
- j) Realizar ensaios de lixiviação para a verificação de possíveis contaminantes presentes na mistura que poderiam alcançar o lençol freático em uma aplicação de campo, uma vez que esta dissertação aborda três diferentes tipos de resíduos.

REFERÊNCIAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Dosagem das misturas de solo-cimento normas de dosagem e métodos de ensaios**. 3. ed. São Paulo, 57 p., 2004.

ALMEIDA JÚNIOR, P.O.B. **Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION. **AASHTO 342-11**: Determining Dynamic Modulus of hot Mix Asphalt (HMA). American Association of State Highway And Transportation Officials, Washinton, D.C., 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **C 496**: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.

_____. **D 558**: Standard test methods for moisture-density (unit weight) relations of soil-cement mixtures, ASTM International. West Conshohocken, 2011.

_____. **D 559**: Standard test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixtures, ASTM International, Philadelphia, 2015.

_____. **D 3497**: Standard test method for dynamic modulus of asphalt mixtures, ASTM International, West Conshohocken, 2003.

_____. **D 4123**: Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures (Withdrawn 2003), ASTM International, West Conshohocken, PA, 1995.

_____. **D 5102**: Standard test method for unconfined compressive strength of compacted soil-lime mixtures, ASTM International, Philadelphia, 2004.

_____. **D 6276**: Standard test method for using ph to estimate the soil-lime proportion requirement for soil stabilization, ASTM International, West Conshohocken, 1999.

ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPAN, J.; DISFANI, M.M. Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate Blends in Pavement Subbases: Laboratory and Field Evaluation. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26(2), p. 349-357, 2014.

ASKELAND, D.R.; WRIGHT, W.J. **Ciência e engenharia de materiais**. 3ª ed. São Paulo: Cengage Learning, 648 p., 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6458:** Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8mm – Determinação da massa específica, massa específica aparente e da absorção de água, Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7181:** Solo – Análise Granulométrica, Rio de Janeiro, 1984.

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

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

_____. **NBR 13554:** Solo-cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem, Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção. Rio de Janeiro, 2003.

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

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

BASU, D.; PUPPALA, A. Principles of sustainability and their applications in geotechnical engineering. **Geotechnical Synergy: Buenos Aires 2015**, editado por SFRISO, A.O.; MANZANAL, D.; ROCCA, R.J, p. 162-183. Clifton, VA: IOS Press, 2015.

BAUER, L.A.F. **Materiais de construção.** 3ª ed., vol. 1. Rio de Janeiro: LTC, 1987.

BAUER, L.A.F. **Materiais de construção.** 5ª ed., vol. 2. Rio de Janeiro: LTC, 1994.

BEHAK, L. **Estabilização de um solo sedimentar arenoso do Uruguai com cinza de casca de arroz e cal.** 2007. 150 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

BELL, F.G. Lime stabilization of Clay minerals and soils. **Engineering Geology**, p. 223-237, 1996.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** Rio de Janeiro. PETROBRAS: ABEDA, 2008. 475 p.

BOEIRA, F.D. **Estudo da rigidez, da deformação permanente e da fadiga de misturas asfálticas com ligantes convencionais e modificados.** 2018. 286 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3ª ed. São Paulo: Exceção Editorial, 123 p., 2007.

BORGES, H.F. **Estabilização de um solo argiloso com cal de carbureto**. 1979. 105 p. Dissertação (Mestrado) – Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1979.

CALLISTER. W.D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CALLISTER, W.D. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 707 p., 2008.

CARNEIRO, F.L. **Um novo método para determinação da resistência à tração dos concretos**. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Tecnologia, 1943.

CARRARO, J.A.H. **Utilização de resíduos industriais na estabilização de um solo residual de arenito**. 1997. 170 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

CASTRO, F.J.C.O. **Contribuição ao conhecimento e à determinação da reatividade de solos sesquioxídicos utilizando o hidróxido de cálcio: aplicação ao processo de geopolimerização (estabilização)**. 1995. 344 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1995.

CEMPRE - COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **Vidro**. Artigos e publicações – Fichas técnicas. Disponível em: <www.cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/6/vidro>. Acesso em: Julho de 2019.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de rodovias 2019**. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2019.

CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M.; CARRARO, J.A.H.; HEINECK, K.S. Behavior of compacted soil-fly ash-carbide lime mixtures. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 127(9), p. 774-782, 2001.

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**, v. 133(2), p. 197-205, 2007.

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(5), p. 210-216, 2009a.

CONSOLI, N.C.; LOPES JUNIOR, L. S.; FOPPA, D.; HEINECK, K. S. Key parameters dictating strength of lime/cement-treated soils. **Geotechnical Engineering**, v. 162 (GE2), p. 111-118, 2009b.

CONSOLI, N.C.; ROSA, D.A.; CRUZ, R.C.; DALLA ROSA, A. Water content, porosity and cement content as parameters controlling strength of artificially cemented silty soil. **Engineering Geology**, v. 122, p. 328-333, 2011.

CONSOLI, N. C.; ROCHA, C. G.; SALDANHA, R. B. Coal fly ash–carbide lime bricks: an environment friendly building product. **Construction and Building Materials**, v. 69, p. 301-309, 2014.

CONSOLI, N.C.; DA SILVA, A.P.; NIERWINSKI, H.P.; SOSNOSKI, J. Durability, strength and stiffness of compacted gold tailings-cement mixes. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 55(10), p. 486-494, 2017a.

CONSOLI, N.C.; DA SILVA, J.K.; SCHEUERMANN FILHO, H.C.; RIVOIRE, A.B. Compacted clay-industrial wastes blends: long term performance under extreme freeze-thaw and wet-dry conditions. **Applied Clay Science**, v. 146, p. 404–410, 2017b.

CONSOLI, N.C.; PASCHE, E.; SPECHT, L.P.; TANSKI, M. Key parameters controlling dynamic 1 modulus of crushed reclaimed asphalt paving - powdered rock - portland cement blends. **Road Materials and Pavement Design**, v. 19(8), p. 1716-1733, 2017c.

CONSOLI, N.C.; SALDANHA, R.B.; NOVAES, J.F.; SCHEUERMANN FILHO, H.C. On the durability and strength of compacted coal fly ash-carbide lime blends. **Soils and Rocks**. V. 40(2), p. 155-161, 2017d.

CONSOLI, N.C.; TOMASI, L.F. The impact of dry unit weight and cement content on the durability of sand–cement blends. **Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Ground Improvement**, v. 171(2), p. 96-102, 2018.

CONSOLI, N.C.; GIESE, D.N.; LEON, H.B.; MOCELIN, D.M.; WETZEL, R.; MARQUES, S.F.V. Sodium chloride as a catalyser for crushed reclaimed asphalt pavement – Fly ash – Carbide lime blends. **Transportation Geotechnics**, v. 15, p. 13-19, 2018a.

CONSOLI, N.C.; WINTER, D. LEON, H.B.; SCHEUERMANN FILHO , H.C. Durability, Strength, and Stiffness of Green Stabilized Sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 144(9), p. 1-10, 2018b.

CONSOLI, N.C.; SCHEUERMANN FILHO, H.C; GODOY, V.B.; ROSEMBACH. C.M.C.; CARRARO, A.H. Durability of reclaimed asphalt pavement–coal fly ash–carbide lime blends under severe environmental conditions. **Road Materials and Pavement Design**. p. 557-569, 2018c.

CONSOLI, N.C.; MARIN, E.J.B.; SAMANIEGO, R.A.Q.; HEINECK, K.S.; DALLA ROSA, A. Use of sustainable binders in soil stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31(2), p. 1-7, 2019.

CORREA, B.R.S. **Análise da resistência, rigidez e durabilidade de misturas de vidro moído e cal de carbureto**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

DEGIRMENCI, N.; YILMAZ, A.; ÇAKIR, O.A. Utilization of waste glass as sand replacement in cement mortar. **Indian Journal of Engineering & Materials Sciences**, v. 18, p. 303-308, 2011.

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 053/94: Misturas Betuminosas Percentagem de betume**. Rio de Janeiro, 1994, 5p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. **Manual de pavimentação**. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006, 274 p.

_____. **DNIT-ES 167: Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos “in situ” com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço**. Rio de Janeiro, 2013, 11 p.

_____. **DNIT ME 135: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas -Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2018, 13 p.

_____. **DNIT-ME 136: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas –Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**, Rio de Janeiro, 2010, 6 p.

_____. **DNIT-ME 181: Pavimentação – Material estabilizado quimicamente – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**, Rio de Janeiro, 2018, 16 p.

DI BENEDETTO, H.; OLARD, F.; SAUZÉAT, C.; DELAPORTE, B. Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: From binders to mixes. **Road Materials and Pavement Design**, v. 5, p. 163-202, 2004.

DISFANI, M.M; ARULRAJAH, A.; BO, M.W.; SIVAKUGAN, N. Environmental risks of using recycled crushed glass in road applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 20, p. 170-179, 2012.

EADES, J.L.; GRIM, R.E. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. **Highway Research Board**, Washington DC, n. 262, p. 61-72. 1966.

ELY, V. **Influência da energia de compactação na resistência e na rigidez de mistura reciclada com cimento e com elevado teor de fresado**. 2014. 59 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

FOPPA, D.. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. 2005. 143 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HORPIBULSUK, S.; PHETCHUAY, C.; CHINKULKIJNIWAT, A. Soil Stabilization by Calcium Carbide Residue and Fly Ash. **Journal of materials in civil engineering**, v. 24(2), p. 184-193, 2012.

HOYOS, L.R.; PUPPALA, A.J.; ORDONEZ, C.A. Characterization of cement-fiber-treated reclaimed asphalt pavement aggregates: preliminary investigation. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23(7), p. 977-989, 2011.

HUANG, Y.H. **Pavement analysis and design**. 2^a ed. Upper Saddle River: Pearson Education, Inc., 775 p., 2004.

HVEEM, F.N. Pavement deflection and fatigue failures. **Bulletim**, 114, p. 43-87, 1955.

INGLES, O.G.; METCALF, J.B. **Soil stabilization: Principles and Practice**. Melbourne: Butterworths, 366 p., 1972.

ISAIA, G.C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. vol. 1 e 2. São Paulo: IBRACON, 1712 p., 2007.

JIANG, N. J.; DU, Y. J.; LIU, S. Y.; WEI, M.; HORPIBULSUK, S.; ARULJARAH, A. Multi-scale laboratory evaluation of the physical, mechanical and microstructural properties of soft highway subgrade soil stabilized with calcium carbide residue. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 53(1), p. 373-383, 2016.

LARNACH, W.J. Relationship between dry density, voids/cement ratio and the strength of soil-cement mixtures. **Civil Engineering and Public Works Reviews**, v. 55, p. 903-905, 1960.

LACHANCE-TREMBLAY, É.; VAILLANCOURT M.; PERRATON, D.; DI BENEDETTO, H. Linear viscoelastic (LVE) properties of asphalt mixtures with different glass aggregates and hydrated lime content. **International Journal of Pavement Engineering**, p. 1-10, 2018.

LEON, H.B. **O índice porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}) com um parâmetro de estado para areias cimentadas**. 2018, 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

LINDSEY, T.C. Sustainable principles: common values for achieving sustainability. **Journal of Cleaner Production**. v. 19(5), p. 561-565, 2011.

LIU, Z. National carbon emissions from the industry process: Production of glass, soda ash, ammonia, calcium carbide and alumina. **Applied Energy**, v. 166, p. 239-244, 2016.

LUZZI, F.C. **Adaptação de usina para reciclagem à quente e avaliação laboratorial das misturas asfálticas produzidas**. 2019. 187 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

MARIN, E. J. M. **Estudo de campo e laboratório do comportamento mecânico de um solo sulfatado estabilizado com cal**. 2017, 189 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) –

Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

MASSAZZA, F. **Pozzolana and pozzolanic cements**. In: HEWLETT, P. C. (Org.). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 4 ed. Amsterdam: Butterworth Heinemann, p. 471-602, 2004.

MAKUSA, G.P. **Soil stabilization methods and materials**. 2012. 38 p. Department of Civil, Environmental and Natural resources engineering, Luleå University of Technology, Luleå, 2012.

METWALLY, I.M. Investigations on the performance of concrete made with blended finely milled waste glass. **Advances In Structural Engineering**, v.10(1), p. 47-53 , 2007.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos pavimentos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 574 p., 2005.

MITCHELL, J. K. Soil Improvement: State-of-the-Art. **10 International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Stockholm, Sweden, v. 4, p. 509-565, 1981.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Perfil da Cal**. Brasília: J Mendo Consultoria. Projeto de Assistência Técnica ao Setor de Energia, 2009.

MOH, Z. Reactions of soil minerals with cement and chemicals. **Highway Research Board**. v. 86, p. 39-61, 1965.

MOHAMMADINIA, A.; ARULRAJAH, A.; D'AMICO, A.; HORPIBULSUK, S. Alkali-activation of fly ash and cement kiln dust mixtures for stabilization of demolition aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 71-78, 2018.

NUNEZ, W.P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação**. 1991. 150 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

OLARD, F.; DI BENEDETTO, H. General “2s2p1d” model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes. **Road Materials and Pavement Design**, v. 4(2), p. 185-224, 2003.

OTTO, G. G. **Misturas Asfálticas Mornas – Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo**. 2009.179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2009.

PASCHE, E. **Estudo da resistência e da rigidez de uma mistura de material fresado asfáltico e pó-de-pedra com a adição de cimento**. 2016. 174 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

PETRUCCI, E.G.R. **Materiais de construção**. 8ª ed. Rio de Janeiro: Globo, 435 p., 1987.

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**. 2014. 164 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION – PCA. **Soil-cement laboratory handbook**. Illinois: Portland Cement association, 59 p., 1992.

PUPPALA, A.J.; HOYOS, L.R.; POTTURI, A.K. Resilient moduli response of moderately cement-treated reclaimed asphalt pavement aggregates. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23(7), p. 990-998, 2011.

SALDANHA, R.B. **Misturas cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples para cura acelerada**. 2014. 170 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SALDANHA, R.B. **Misturas cinza volante, cal de carbureto e cloreto de sódio: comportamento da resistência à compressão simples, durabilidade e lixiviação em coluna**. 2018. 188 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SALDANHA, R.B., SCHEUERMANN FILHO, H.C., MALLMANN, J.E.C., CONSOLI, N.C., REDDY, K.R. Physical–mineralogical–chemical characterization of carbide lime: An environment-friendly chemical additive for soil stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30(6), p. 1-7, 2018.

SAMANIEGO, R. A. Q. **Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal**. 2015. 171 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SALES, F.A. **Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland**. 2014. 161 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SAS, W. Application of recycled concrete aggregate in road engineering. **Acta Scientiarum Polonorum Architectura**, v. 14(4), p. 49-59, 2015.

SCHEUERMANN FILHO, H.C. **Estabilização de um solo dispersivo com pó de vidro moído e cal de carbureto**. 2019. 197 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

SHACKELFORD, J.F. **Ciência dos materiais**. 6ª ed., São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SHAFABAKHSH, G.H.; SAJED, Y. Investigation of dynamic behavior of hot mix asphalt containing waste materials; case study: Glass cullet. **Case Studies in Construction Materials**, v. 1, p. 96-103, 2014.

SILVA, M.R. **Determinação de parâmetros que influenciam nas propriedades mecânicas de material fresado estabilizado granulométrica e quimicamente para emprego em pavimentação**. 2018. 139 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

SPECHT, L.P.; BABADOPULOS, L.F.A.L.; DI BENEDETTO, H.; SAUZÉAT, C.; SOARES, J.B. Application of the theory of viscoelasticity to evaluate the resilient modulus test in asphalt mixes. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 648-658, 2017.

SUFIAN, Z.; AZIZ, N.A.; MATORI, M.Y.; HUSSAIN, M.Z.; AZMI, A. Full depth reclaimed pavements using cement and hydrated lime as stabilizing agents. **13th Conference of road engineering association of asia and australasia – Anais Incheon**, 2009. 10 p.

TAHA, R.; AL-HARTHY, A.; AL-SHAMSI, K.; AL-ZUBEIDI, M. Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 14(3), p. 239-245, 2002.

TANSKI, M.C. **Comportamento mecânico de material reciclado a frio com emulsão e cimento**. 2016. 169 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

THOMÉ, A. **Comportamento de fundações superficiais apoiadas em aterros estabilizados com resíduos industriais**. 1999. 266 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

THOMÉ, A.; CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P. **Influência do tempo de cura sobre as reações pozolânicas em solos estabilizados com resíduos industriais**. In: REGEO'99, 1999, São José dos Campos. 4 Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. REGEO'99. São Paulo: ABMS. v. 01. p. 267-273, 1999

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Lime Stabilization - reactions, properties, design, and construction**. State of the Art Report 5, Washington, D.C., 58p. 1987.

VAN VLACK, L.H. **Princípios de ciência dos materiais**. 13ª reimpressão. São Paulo: Edgard Blücher, 2000. 427 p.

VENDRUSCOLO, M.A. **Análise numérica e experimental do comportamento de fundações superficiais assentes em solo melhorado**. 1996. 163 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

VICHAN, S. RACHAN, R. Chemical stabilization of soft Bangkok clay using blend of calcium carbide residue and biomass ash. **Soils and Foundations**, v. 53(2), p. 272-281, 2013.

VIZCARRA, G.O.C. **Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos**. 2010. 120 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

WILLIAMS, M.L.; LANDEL, R.F.; FERRY, J.D. **The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids**. Journal of the American Chemical Society, v. 77(14), 3701-3707, 1955.

YODER, E.J.; WITCZAK, M.W. **Principles of pavement design**. 2^a ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1975. 711 p.

YOUNUS ALI, M.M., NEWMAN, G., ARULRAJAH, A., DISFANI, M.M. Application of recycled glass-crushed rock blends in road pavements. **Geomechanics** v. 46(1), p. 113-122, 2011.

ZACHARIASEN, W.H. The atomic arrangement in glass. **Journal of the American Chemical Society**, v. 54(10), p. 3841-3851, 1932.

APÊNDICE A: DADOS GERAIS DE MOLDAGEM

Mistura	yd (kN/m ³)	VM200 (%)	CC (%)	w (%)	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Volume (cm ³)	Massa do CP (g)	Massa do fresado (g)	Massa do vidro (g)	Massa de cal (g)	Volume de fresado (cm ³)	Volume de vidro (cm ³)	Volume de vidro passante na #200 (cm ³)	Volume de cal (cm ³)	Volume de sólidos (cm ³)	Volume de vazios (cm ³)	η	B _{iv}	L _{iv}	RCS (kPa)
FV-19-10-3 (CP1)	19	10%	3%	8%	20,15	10,01	1600,15	3209,22	2016,04	864,02	86,40	812,92	349,80	112,99	39,45	1202,18	397,98	24,87%	9,53%	2,47%	1275,92
					20,10	10,01	1589,42	3209,96	2018,30	864,98	86,50	813,83	350,20	113,11	39,50	1203,52	385,89	24,28%	9,60%	2,48%	1348,06
FV-19-10-7 (CP2)	19	10%	7%	8%	20,09	10,04	1589,46	3210,27	1940,72	831,74	194,07	782,55	336,74	108,77	88,62	1207,90	381,56	24,01%	12,42%	5,58%	1522,75
					20,33	10,01	1600,71	3212,07	1941,87	832,23	194,19	783,01	336,94	108,83	88,67	1208,62	392,10	24,50%	12,34%	5,54%	1696,24
FV-20-10-3 (CP3)	20	10%	3%	8%	20,09	10,04	1590,51	3359,75	2113,11	905,62	90,56	852,06	366,65	118,43	41,35	1260,06	330,45	20,78%	10,05%	2,60%	1813,43
					20,30	10,04	1606,87	3356,29	2118,54	907,95	90,79	854,25	367,59	118,73	41,46	1263,30	343,57	21,38%	9,97%	2,58%	2128,66
FV-20-10-7 (CP4)	20	10%	7%	8%	20,19	10,06	1605,87	3366,04	2038,55	873,66	203,85	821,99	353,71	114,25	93,08	1268,79	337,08	20,99%	12,91%	5,80%	2507,03
					20,35	10,05	1614,31	3360,86	2043,98	875,99	204,40	824,19	354,65	114,55	93,33	1272,17	342,14	21,19%	12,88%	5,78%	2764,31
FV-19-15-3 (CP5)	19	15%	3%	8%	20,00	10,01	1576,30	3210,70	2016,30	864,13	86,41	813,02	349,85	200,46	39,46	1202,33	373,97	23,72%	15,22%	2,50%	1576,35
					20,02	10,02	1576,30	3213,53	2015,64	863,85	86,38	812,76	349,74	200,40	39,45	1201,94	374,36	23,75%	15,22%	2,50%	1767,17
FV-19-15-7 (CP6)	19	15%	7%	8%	20,12	10,05	1593,68	3210,61	1941,46	832,06	194,15	782,85	336,86	193,02	88,65	1208,36	385,32	24,18%	17,67%	5,56%	1940,37
					20,11	10,04	1593,68	3211,75	1941,74	832,18	194,17	782,96	336,91	193,05	88,66	1208,54	385,14	24,17%	17,68%	5,56%	2121,45
FV-20-15-3 (CP7)	20	15%	3%	8%	20,17	10,04	1596,05	3369,60	2109,01	903,86	90,39	850,41	365,94	209,68	41,27	1257,62	338,43	21,20%	15,72%	2,59%	2036,02
					20,16	10,04	1596,05	3371,93	2109,73	904,17	90,42	850,70	366,06	209,75	41,29	1258,05	338,00	21,18%	15,73%	2,59%	2433,40
FV-20-15-7 (CP8)	20	15%	7%	8%	20,24	10,07	1610,65	3373,72	2046,30	876,99	204,63	825,12	355,06	203,45	93,44	1273,61	337,03	20,93%	18,43%	5,80%	2770,13
					20,23	10,06	1610,65	3379,26	2044,48	876,21	204,45	824,39	354,74	203,27	93,36	1272,48	338,16	21,00%	18,42%	5,80%	3076,76
FV-19-25-3 (CP9)	19	25%	3%	8%	20,07	10,04	1589,72	3200,90	2014,99	863,57	86,36	812,50	349,62	287,74	39,43	1201,55	388,17	24,42%	20,58%	2,48%	2316,57
					20,21	10,03	1596,56	3209,83	2016,21	864,09	86,41	812,99	349,83	287,91	39,46	1202,28	394,29	24,70%	20,50%	2,47%	2612,82
FV-19-25-7 (CP10)	19	25%	7%	8%	20,39	10,04	1615,60	3210,82	1940,50	831,64	194,05	782,46	336,70	277,10	88,61	1207,77	407,83	25,24%	22,64%	5,48%	2708,79
					20,22	10,04	1601,60	3210,82	1939,87	831,37	193,99	782,20	336,59	277,01	88,58	1207,37	394,23	24,62%	22,83%	5,53%	3172,79
FV-20-25-3 (CP11)	20	25%	3%	8%	20,21	10,06	1605,07	3378,70	2122,55	909,66	90,97	855,87	368,28	303,10	41,54	1265,69	339,38	21,14%	21,47%	2,59%	2909,76
					20,18	10,06	1602,68	3390,18	2123,19	909,94	90,99	856,12	368,40	303,19	41,55	1266,07	336,61	21,00%	21,51%	2,59%	3335,78
FV-20-25-7 (CP12)	20	25%	7%	8%	20,13	10,07	1602,42	3379,06	2044,16	876,07	204,42	824,26	354,68	291,90	93,34	1272,28	330,14	20,60%	24,04%	5,82%	3945,66
					20,25	10,07	1614,11	3379,62	2043,30	875,70	204,33	823,91	354,53	291,78	93,30	1271,74	342,36	21,21%	23,86%	5,78%	4004,13

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

Mistura	yd (kN/m ³)	VM200 (%)	CC (%)	w (%)	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Volume (cm ³)	Massa do CP (g)	Massa do fresado (g)	Massa do vidro (g)	Massa de cal (g)	Volume de fresado (cm ³)	Volume de vidro (cm ³)	Volume de vidro passante na #200 (cm ³)	Volume de cal (cm ³)	Volume de sólidos (cm ³)	Volume de vazios (cm ³)	η	B _{iv}	L _{iv}	RTCD (kPa)
FV-19-10-3 (CP1)	19	10%	3%	8%	20,28	10,01	1597,04	3209,22	2019,47	865,49	86,55	814,30	350,40	113,18	39,52	1204,22	392,82	24,60%	9,56%	2,47%	125,94
					20,07	10,01	1578,66	3209,96	2019,93	865,69	86,57	814,49	350,48	113,20	39,53	1204,50	374,16	23,70%	9,67%	2,50%	211,02
FV-19-10-7 (CP2)	19	10%	7%	8%	20,03	10,08	1598,16	3210,27	1944,61	833,40	194,46	784,12	337,41	108,98	88,79	1210,32	387,84	24,27%	12,38%	5,56%	173,36
					20,06	10,02	1581,03	3212,07	1945,70	833,87	194,57	784,56	337,60	109,04	88,84	1211,00	370,03	23,40%	12,52%	5,62%	224,32
FV-20-10-3 (CP3)	20	10%	3%	8%	20,21	10,02	1594,44	3359,75	2114,19	906,08	90,61	852,50	366,83	118,49	41,37	1260,70	333,74	20,93%	10,03%	2,59%	190,67
					20,13	10,04	1594,47	3356,29	2112,01	905,15	90,51	851,62	366,46	118,37	41,33	1259,41	335,07	21,01%	10,02%	2,59%	217,69
FV-20-10-7 (CP4)	20	10%	7%	8%	20,14	10,05	1596,33	3366,04	2038,97	873,84	203,90	822,16	353,78	114,27	93,10	1269,05	327,28	20,50%	12,99%	5,83%	264,10
					20,12	10,05	1597,12	3360,86	2035,83	872,50	203,58	820,90	353,24	114,10	92,96	1267,10	330,03	20,66%	12,96%	5,82%	349,34
FV-19-15-3 (CP5)	19	15%	3%	8%	20,13	10,01	1583,91	3210,70	2020,40	865,88	86,59	814,68	350,56	200,87	39,54	1204,78	379,13	23,94%	15,18%	2,50%	236,41
					20,10	10,01	1580,76	3213,53	2022,18	866,65	86,66	815,39	350,87	201,05	39,57	1205,84	374,92	23,72%	15,22%	2,50%	320,53
FV-19-15-7 (CP6)	19	15%	7%	8%	20,03	10,02	1578,40	3210,61	1944,81	833,49	194,48	784,20	337,45	193,36	88,80	1210,45	367,95	23,31%	17,88%	5,63%	313,27
					20,03	10,02	1578,40	3211,75	1945,50	833,79	194,55	784,48	337,57	193,43	88,84	1210,88	367,52	23,28%	17,88%	5,63%	419,31
FV-20-15-3 (CP7)	20	15%	3%	8%	20,12	10,04	1591,83	3369,60	2120,39	908,74	90,87	855,00	367,91	210,81	41,49	1264,40	327,43	20,57%	15,85%	2,61%	389,93
					20,16	10,07	1604,81	3371,93	2121,85	909,37	90,94	855,59	368,16	210,96	41,52	1265,27	339,54	21,16%	15,73%	2,59%	422,43
FV-20-15-7 (CP8)	20	15%	7%	8%	20,17	10,05	1599,76	3373,72	2043,62	875,84	204,36	824,04	354,59	203,18	93,32	1271,94	327,82	20,49%	18,53%	5,83%	449,63
					20,14	10,04	1595,79	3379,26	2046,97	877,27	204,70	825,39	355,17	203,51	93,47	1274,03	321,76	20,16%	18,61%	5,86%	513,01
FV-19-25-3 (CP9)	19	25%	3%	8%	20,05	10,01	1578,14	3200,90	2014,23	863,24	86,32	812,19	349,49	287,63	39,42	1201,10	377,04	23,89%	20,72%	2,50%	366,78
					20,10	10,02	1586,03	3209,83	2019,85	865,65	86,56	814,46	350,47	288,43	39,53	1204,45	381,58	24,06%	20,68%	2,49%	394,85
FV-19-25-7 (CP10)	19	25%	7%	8%	20,08	10,03	1587,87	3210,82	1944,94	833,55	194,49	784,25	337,47	277,74	88,81	1210,53	377,35	23,76%	23,08%	5,59%	432,20
					20,14	10,02	1588,92	3210,82	1944,94	833,55	194,49	784,25	337,47	277,74	88,81	1210,53	378,39	23,81%	23,07%	5,59%	447,50
FV-20-25-3 (CP11)	20	25%	3%	8%	20,14	10,05	1598,97	3378,70	2126,11	911,19	91,12	857,30	368,90	303,61	41,61	1267,81	331,16	20,71%	21,59%	2,60%	529,79
					20,17	10,05	1599,76	3390,18	2133,34	914,29	91,43	860,22	370,16	304,64	41,75	1272,12	327,64	20,48%	21,65%	2,61%	457,60
FV-20-25-7 (CP12)	20	25%	7%	8%	20,16	10,03	1593,14	3379,06	2046,85	877,22	204,69	825,34	355,15	292,29	93,46	1273,96	319,18	20,03%	24,21%	5,87%	603,73
					20,18	10,05	1601,62	3379,62	2047,19	877,37	204,72	825,48	355,21	292,34	93,48	1274,17	327,45	20,44%	24,09%	5,84%	568,74

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

Mistura	yd (kN/m ³)	VM200 (%)	CC (%)	w (%)	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Volume (cm ³)	Massa do CP (g)	Massa do fresado (g)	Massa do vidro (g)	Massa de cal (g)	Volume de fresado (cm ³)	Volume de vidro (cm ³)	Volume de vidro passante na #200	Volume de cal (cm ³)	Volume de sólidos (cm ³)	Volume de vazios (cm ³)	η	B _{iv}	L _{iv}	PMA após 12 ciclos (%)
FV-19-10-3 (CP1)	19	10%	3%	8%	13,25	9,99	1039,27	2052,99	1291,89	553,67	55,37	520,92	224,16	72,40	25,28	770,36	268,91	25,87%	9,40%	2,43%	5,37%
FV-19-10-7 (CP2)	19	10%	7%	8%	12,87	10,00	1009,87	2053,97	1244,18	533,22	124,42	501,69	215,88	69,73	56,81	774,38	235,49	23,32%	12,53%	5,63%	2,65%
FV-20-10-3 (CP3)	20	10%	3%	8%	12,75	10,01	1002,72	2146,74	1350,88	578,95	57,89	544,71	234,39	75,71	26,44	805,54	197,18	19,66%	10,19%	2,64%	2,72%
FV-20-10-7 (CP4)	20	10%	7%	8%	12,88	10,00	1011,85	2151,46	1303,24	558,53	130,32	525,50	226,13	73,04	59,51	811,13	200,72	19,84%	13,10%	5,88%	1,52%
FV-19-15-3 (CP5)	19	15%	3%	8%	12,79	10,00	1004,12	2053,72	1292,34	553,86	55,39	521,11	224,24	128,49	25,29	770,63	233,48	23,25%	15,31%	2,52%	2,32%
FV-19-15-7 (CP6)	19	15%	7%	8%	12,83	10,01	1009,01	2053,40	1243,84	533,07	124,38	501,55	215,82	123,66	56,80	774,16	234,85	23,27%	17,88%	5,63%	1,58%
FV-20-15-3 (CP7)	20	15%	3%	8%	12,90	10,01	1014,25	2159,43	1358,86	582,37	58,24	547,93	235,78	135,10	26,59	810,30	203,95	20,11%	15,94%	2,62%	1,31%
FV-20-15-7 (CP8)	20	15%	7%	8%	12,81	10,01	1007,17	2158,48	1307,49	560,35	130,75	527,21	226,86	129,99	59,70	813,78	193,39	19,20%	18,83%	5,93%	0,71%
FV-19-25-3 (CP9)	19	25%	3%	8%	12,85	10,00	1009,65	2053,40	1292,14	553,78	55,38	521,03	224,20	184,52	25,29	770,51	239,13	23,68%	20,78%	2,50%	1,78%
FV-19-25-7 (CP10)	19	25%	7%	8%	12,81	10,00	1006,50	2053,09	1243,65	532,99	124,37	501,47	215,79	177,59	56,79	774,05	232,46	23,10%	23,29%	5,64%	0,99%
FV-20-25-3 (CP11)	20	25%	3%	8%	12,82	10,01	1008,90	2161,20	1359,98	582,85	58,28	548,38	235,97	194,20	26,61	810,96	197,93	19,62%	21,89%	2,64%	0,86%
FV-20-25-7 (CP12)	20	25%	7%	8%	12,89	10,02	1017,11	2161,50	1309,32	561,14	130,93	527,95	227,18	186,97	59,79	814,92	202,19	19,88%	24,26%	5,88%	0,45%

Quadro A.3 - Dados Gerais dos corpos de prova de Durabilidade por molhagem e secagem

Mistura	yd (kN/m ³)	VM200 (%)	CC (%)	w (%)	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Volume (cm ³)	Massa do CP (g)	Massa do fresado (g)	Massa do vidro (g)	Massa de cal (g)	Volume de fresado (cm ³)	Volume de vidro (cm ³)	Volume de vidro passante na #200 (cm ³)	Volume de cal (cm ³)	Volume de sólidos (cm ³)	Volume de vazios (cm ³)	η	B _{iv}	L _{iv}	MR (MPa)
FV-19-10-3 (CP1)	19	10%	3%	8%	6,67	10,02	525,70	1013,96	638,05	273,45	27,35	257,28	110,71	35,76	12,49	380,48	145,22	27,62%	9,18%	2,38%	-
					6,24	10,02	492,05	1008,30	634,49	271,93	27,19	255,84	110,09	35,56	12,42	378,35	113,70	23,11%	9,75%	2,52%	5319
FV-19-10-7 (CP2)	19	10%	7%	8%	6,38	10,02	503,43	1014,37	614,45	263,34	61,45	247,76	106,61	34,44	28,06	382,43	120,99	24,03%	12,41%	5,57%	6276
					6,36	10,04	503,52	1014,65	614,62	263,41	61,46	247,83	106,64	34,45	28,06	382,54	120,98	24,03%	12,41%	5,57%	6130
FV-20-10-3 (CP3)	20	10%	3%	8%	6,37	10,04	504,05	1058,11	665,84	285,36	28,54	268,48	115,53	37,32	13,03	397,04	107,00	21,23%	9,99%	2,59%	7342
					6,28	10,03	496,19	1058,35	665,99	285,42	28,54	268,54	115,56	37,32	13,03	397,13	99,06	19,96%	10,15%	2,63%	6974
FV-20-10-7 (CP4)	20	10%	7%	8%	6,45	10,03	509,36	1060,07	642,13	275,20	64,21	258,92	111,42	35,99	29,32	399,66	109,70	21,54%	12,82%	5,76%	8103
					6,43	10,02	507,63	1064,01	644,52	276,22	64,45	259,89	111,83	36,12	29,43	401,15	106,49	20,98%	12,91%	5,80%	7555
FV-19-15-3 (CP5)	19	15%	3%	8%	6,32	10,01	497,63	1014,77	638,56	273,67	27,37	257,49	110,80	63,49	12,50	380,78	116,85	23,48%	15,27%	2,51%	6812
					6,34	10,01	498,68	1014,55	638,43	273,61	27,36	257,43	110,77	63,47	12,49	380,70	117,98	23,66%	15,23%	2,51%	7003
FV-19-15-7 (CP6)	19	15%	7%	8%	6,42	10,01	505,83	1014,55	614,56	263,38	61,46	247,81	106,63	61,10	28,06	382,50	123,33	24,38%	17,63%	5,55%	6964
					6,30	10,01	495,86	1014,49	614,52	263,37	61,45	247,79	106,63	61,10	28,06	382,48	113,38	22,87%	17,98%	5,66%	7540
FV-20-15-3 (CP7)	20	15%	3%	8%	6,45	10,02	508,01	1067,67	671,85	287,94	28,79	270,91	116,57	66,80	13,15	400,63	107,38	21,14%	15,74%	2,59%	7759
					6,46	10,03	510,68	1067,16	671,53	287,80	28,78	270,78	116,52	66,76	13,14	400,44	110,24	21,59%	15,65%	2,57%	7442
FV-20-15-7 (CP8)	20	15%	7%	8%	6,40	10,01	503,06	1067,25	646,48	277,06	64,65	260,68	112,17	64,27	29,52	402,37	100,69	20,02%	18,64%	5,87%	8197
					6,44	10,05	510,26	1066,94	646,29	276,98	64,63	260,60	112,14	64,26	29,51	402,25	108,01	21,17%	18,38%	5,78%	8225
FV-19-25-3 (CP9)	19	25%	3%	8%	6,32	10,00	496,70	1015,06	638,75	273,75	27,37	257,56	110,83	91,21	12,50	380,89	115,81	23,32%	20,88%	2,52%	6985
					6,39	10,03	504,55	1014,87	638,63	273,70	27,37	257,51	110,81	91,20	12,50	380,82	123,73	24,52%	20,55%	2,48%	7314
FV-19-25-7 (CP10)	19	25%	7%	8%	6,37	10,01	501,56	1014,53	614,55	263,38	61,45	247,80	106,63	87,76	28,06	382,49	119,07	23,74%	23,09%	5,59%	7514
					6,37	10,02	502,64	1014,46	614,51	263,36	61,45	247,78	106,62	87,75	28,06	382,47	120,17	23,91%	23,04%	5,58%	7820
FV-20-25-3 (CP11)	20	25%	3%	8%	6,41	10,03	506,80	1067,18	671,54	287,80	28,78	270,78	116,52	95,90	13,14	400,45	106,36	20,99%	21,51%	2,59%	7535
					6,40	10,04	506,76	1067,97	672,04	288,02	28,80	270,98	116,61	95,97	13,15	400,74	106,01	20,92%	21,53%	2,60%	8550
FV-20-25-7 (CP12)	20	25%	7%	8%	6,43	10,02	506,96	1067,81	646,82	277,21	64,68	260,82	112,23	92,37	29,54	402,58	104,38	20,59%	24,05%	5,83%	8816
					6,43	10,02	506,96	1067,88	646,86	277,23	64,69	260,83	112,24	92,37	29,54	402,61	104,35	20,58%	24,05%	5,83%	8239

Quadro A.4 - Dados Gerais dos corpos de prova de MR

Mistura	yd (kN/m ³)	VM200 (%)	CC (%)	w (%)	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Volume (cm ³)	Massa do CP (g)	Massa do fresado (g)	Massa do vidro (g)	Massa de cal (g)	Volume de fresado (cm ³)	Volume de vidro (cm ³)	Volume de vidro passante na #200 (cm ³)	Volume de cal (cm ³)	Volume de sólidos (cm ³)	Volume de vazios (cm ³)	η	B _{iv}	L _{iv}
FV-19-10-3 (CP1)	19	10%	3%	8%	14,89	10,00	1170,50	2415,62	1520,08	651,46	65,15	612,93	263,75	85,19	29,75	906,43	264,07	22,56%	9,82%	2,54%
					14,95	10,01	1176,78	2415,43	1519,96	651,41	65,14	612,89	263,73	85,18	29,74	906,36	270,42	22,98%	9,77%	2,53%
FV-19-10-7 (CP2)	19	10%	7%	8%	15,04	10,02	1185,18	2416,18	1463,59	627,25	146,36	590,16	253,95	82,03	66,83	910,94	274,24	23,14%	12,56%	5,64%
					15,04	10,01	1183,86	2415,01	1462,88	626,95	146,29	589,87	253,83	81,99	66,80	910,50	273,37	23,09%	12,57%	5,64%
FV-20-10-3 (CP3)	20	10%	3%	8%	15,17	10,02	1195,69	2430,66	1529,54	655,52	65,55	616,75	265,39	85,72	29,93	912,07	283,61	23,72%	9,67%	2,50%
					15,28	10,02	1204,35	2534,42	1594,83	683,50	68,35	643,08	276,72	89,38	31,21	951,01	253,35	21,04%	10,01%	2,59%
FV-20-10-7 (CP4)	20	10%	7%	8%	15,23	10,02	1199,89	2537,57	1537,12	658,77	153,71	619,81	266,71	86,15	70,19	956,70	243,19	20,27%	13,03%	5,85%
					15,27	10,00	1199,84	2538,27	1537,55	658,95	153,75	619,98	266,78	86,17	70,21	956,97	242,87	20,24%	13,03%	5,85%
FV-19-15-3 (CP5)	19	15%	3%	8%	15,13	10,00	1189,10	2416,81	1520,83	651,78	65,18	613,24	263,88	151,20	29,76	906,88	282,22	23,73%	15,22%	2,50%
					15,18	10,00	1193,29	2415,63	1520,08	651,46	65,15	612,94	263,75	151,13	29,75	906,43	286,86	24,04%	15,16%	2,49%
FV-19-15-7 (CP6)	19	15%	7%	8%	15,12	10,01	1189,11	2416,07	1463,52	627,22	146,35	590,13	253,94	145,51	66,83	910,90	278,21	23,40%	17,86%	5,62%
					15,07	10,01	1186,75	2415,89	1463,42	627,18	146,34	590,09	253,92	145,50	66,82	910,83	275,93	23,25%	17,89%	5,63%
FV-20-15-3 (CP7)	20	15%	3%	8%	15,18	10,00	1193,29	2539,74	1598,18	684,94	68,49	644,43	277,30	158,89	31,28	953,01	240,29	20,14%	15,94%	2,62%
					15,16	10,00	1191,72	2540,70	1598,79	685,19	68,52	644,67	277,41	158,95	31,29	953,37	238,35	20,00%	15,96%	2,63%
FV-20-15-7 (CP8)	20	15%	7%	8%	15,30	10,02	1205,41	2542,42	1540,06	660,03	154,01	620,99	267,22	153,12	70,32	958,53	246,87	20,48%	18,54%	5,83%
					15,23	10,02	1201,75	2542,02	1539,82	659,92	153,98	620,89	267,17	153,09	70,31	958,38	243,37	20,25%	18,59%	5,85%
FV-19-25-3 (CP9)	19	25%	3%	8%	15,18	10,00	1193,29	2416,69	1520,75	651,75	65,18	613,21	263,87	217,16	29,76	906,83	286,46	24,01%	20,69%	2,49%
					15,30	10,00	1202,20	2416,20	1520,44	651,62	65,16	613,08	263,81	217,12	29,75	906,65	295,55	24,58%	20,54%	2,47%
FV-19-25-7 (CP10)	19	25%	7%	8%	15,22	10,00	1196,17	2416,59	1463,84	627,36	146,38	590,26	253,99	209,04	66,84	911,09	285,08	23,83%	23,06%	5,59%
					15,15	10,00	1190,41	2415,00	1462,88	626,95	146,29	589,87	253,82	208,90	66,80	910,49	279,92	23,51%	23,16%	5,61%
FV-20-25-3 (CP11)	20	25%	3%	8%	15,23	10,04	1205,21	2543,54	1600,57	685,96	68,60	645,39	277,72	228,56	31,32	954,43	250,78	20,81%	21,56%	2,60%
					15,43	10,03	1218,08	2542,78	1600,10	685,76	68,58	645,20	277,63	228,49	31,31	954,15	263,93	21,67%	21,33%	2,57%
FV-20-25-7 (CP12)	20	25%	7%	8%	15,46	10,02	1220,16	2542,47	1540,09	660,04	154,01	621,00	267,22	219,92	70,32	958,55	261,61	21,44%	23,79%	5,76%
					15,30	10,02	1207,01	2542,89	1540,35	660,15	154,03	621,11	267,27	219,96	70,34	958,71	248,30	20,57%	24,05%	5,83%

Quadro A.5 - Dados Gerais dos corpos de prova de MC

APÊNDICE B: RESULTADOS DETALHADOS DO ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO

Temp. (°C)	f(Hz)	E* (Mpa)					φ (°)					Real (E*)	Imag (E*)	aT*f(Hz)
		E* CP1a	E* CP1b	E* Média	Devio Padrão	CV (%)	φ (°) CP1a	φ (°) CP1b	φ (°) Média	Devio Padrão	CV (%)			
4	0,1	3738	3785	3762	23,50	0,62%	8,64	7,86	8,25	0,39	4,73%	3723	540	2,818383
4	0,2	3903	3947	3925	22,00	0,56%	8,36	7,60	7,98	0,38	4,76%	3887	545	5,636766
4	0,5	4160	4173	4167	6,50	0,16%	7,89	7,16	7,53	0,36	4,85%	4131	546	14,09191
4	1	4357	4335	4346	11,00	0,25%	7,51	6,64	7,08	0,44	6,15%	4313	535	28,18383
4	2	4575	4519	4547	28,00	0,62%	7,1	6,19	6,65	0,46	6,85%	4516	526	56,36766
4	5	4852	4745	4799	53,50	1,11%	6,59	5,50	6,05	0,54	9,02%	4772	505	140,9191
4	10	5079	4914	4997	82,50	1,65%	6,25	5,05	5,65	0,60	10,62%	4972	492	281,8383
4	20	5302	5077	5190	112,50	2,17%	5,89	4,62	5,26	0,63	12,08%	5168	475	563,6766
4	25	5441	5284	5363	78,50	1,46%	5,58	4,44	5,01	0,57	11,38%	5342	468	704,5957
21	0,1	2654	2570	2612	42,00	1,61%	11,9	11,12	11,51	0,39	3,39%	2559	521	0,1
21	0,2	2838	2758	2798	40,00	1,43%	11,43	10,98	11,21	0,23	2,01%	2745	544	0,2
21	0,5	3114	3028	3071	43,00	1,40%	10,96	10,61	10,79	0,18	1,62%	3017	575	0,5
21	1	3324	3229	3277	47,50	1,45%	10,61	10,23	10,42	0,19	1,82%	3222	593	1
21	2	3548	3440	3494	54,00	1,55%	10,16	9,80	9,98	0,18	1,80%	3441	606	2
21	5	3841	3713	3777	64,00	1,69%	9,54	9,22	9,38	0,16	1,71%	3726	616	5
21	10	4068	3917	3993	75,50	1,89%	9,13	8,87	9,00	0,13	1,44%	3943	625	10
21	20	4294	4113	4204	90,50	2,15%	8,79	8,55	8,67	0,12	1,38%	4155	634	20
21	25	4402	4230	4316	86,00	1,99%	8,67	8,49	8,58	0,09	1,05%	4268	644	25
37	0,1	1689	1608	1649	40,50	2,46%	11,78	9,34	10,56	1,22	11,55%	1621	302	0,003162
37	0,2	1824	1742	1783	41,00	2,30%	12,39	10,30	11,35	1,04	9,21%	1748	351	0,006325
37	0,5	2037	1955	1996	41,00	2,05%	12,89	10,85	11,87	1,02	8,59%	1953	411	0,015811
37	1	2220	2137	2179	41,50	1,90%	13,02	10,87	11,95	1,07	9,00%	2131	451	0,031623
37	2	2429	2360	2395	34,50	1,44%	12,91	10,93	11,92	0,99	8,31%	2343	495	0,063246
37	5	2737	2672	2705	32,50	1,20%	12,56	10,76	11,66	0,90	7,72%	2649	547	0,158114
37	10	2989	2925	2957	32,00	1,08%	12,13	10,57	11,35	0,78	6,87%	2899	582	0,316228
37	20	3241	3175	3208	33,00	1,03%	11,7	10,05	10,88	0,82	7,59%	3150	605	0,632456
37	25	3333	3257	3295	38,00	1,15%	11,64	9,90	10,77	0,87	8,08%	3237	616	0,790569
54	0,1	1375	1265	1320	55,00	4,17%	8,65	8,79	8,72	0,07	0,80%	1305	200	0,000316
54	0,2	1460	1348	1404	56,00	3,99%	9,27	9,57	9,42	0,15	1,59%	1385	230	0,000632
54	0,5	1590	1478	1534	56,00	3,65%	10,16	10,42	10,29	0,13	1,26%	1509	274	0,001581
54	1	1704	1591	1648	56,50	3,43%	10,6	10,97	10,79	0,19	1,72%	1618	308	0,003162
54	2	1853	1731	1792	61,00	3,40%	11,06	11,35	11,21	0,14	1,29%	1758	348	0,006325
54	5	2084	1955	2020	64,50	3,19%	11,58	11,61	11,60	0,01	0,13%	1978	406	0,015811
54	10	2287	2149	2218	69,00	3,11%	11,91	11,74	11,83	0,09	0,72%	2171	455	0,031623
54	20	2505	2356	2431	74,50	3,07%	11,89	11,73	11,81	0,08	0,68%	2379	497	0,063246
54	25	2582	2442	2512	70,00	2,79%	11,79	11,73	11,76	0,03	0,26%	2459	512	0,079057

Quadro B.1 - Resultados da Mistura 1 para MC (Mistura 1 = $y_d=19\text{kN/m}^3$; VM200=10% ; CC=3%)

Temp. (°C)	f(Hz)	E* (Mpa)					φ (°)					Real (E*)	Imag (E*)	aT*f(Hz)
		E* CP2a	E* CP2b	E* Média	Devio Padrão	CV (%)	φ (°) CP2a	φ (°) CP2b	φ (°) Média	Devio Padrão	CV (%)			
4	0,1	4727	4314	4521	206,50	4,57%	7,85	7,87	7,86	0,01	0,13%	4478	618	2,238721
4	0,2	4953	4505	4729	224,00	4,74%	7,54	7,49	7,52	0,02	0,33%	4688	618	4,477442
4	0,5	5260	4766	5013	247,00	4,93%	7,12	7,21	7,17	0,04	0,63%	4974	625	11,19361
4	1	5501	4990	5246	255,50	4,87%	6,83	6,90	6,87	0,04	0,51%	5208	627	22,38721
4	2	5749	5210	5480	269,50	4,92%	6,48	6,59	6,54	0,05	0,84%	5444	624	44,77442
4	5	6071	5516	5794	277,50	4,79%	6,12	6,18	6,15	0,03	0,49%	5760	621	111,9361
4	10	6330	5748	6039	291,00	4,82%	6,07	5,89	5,98	0,09	1,51%	6006	629	223,8721
4	20	6540	5983	6262	278,50	4,45%	5,17	5,63	5,40	0,23	4,26%	6234	589	447,7442
4	25	6738	6095	6417	321,50	5,01%	4,88	5,47	5,18	0,30	5,70%	6390	579	559,6803
21	0,1	3231	3305	3268	37,00	1,13%	11,16	9,95	10,56	0,60	5,73%	3213	599	0,1
21	0,2	3467	3557	3512	45,00	1,28%	10,93	9,84	10,39	0,55	5,25%	3454	633	0,2
21	0,5	3777	3885	3831	54,00	1,41%	10,57	9,50	10,04	0,53	5,33%	3772	668	0,5
21	1	4030	4140	4085	55,00	1,35%	10,08	9,19	9,64	0,45	4,62%	4027	684	1
21	2	4299	4421	4360	61,00	1,40%	9,57	8,72	9,15	0,43	4,65%	4305	693	2
21	5	4660	4783	4722	61,50	1,30%	8,73	8,11	8,42	0,31	3,68%	4671	691	5
21	10	4940	5067	5004	63,50	1,27%	8,42	7,74	8,08	0,34	4,21%	4954	703	10
21	20	5220	5341	5281	60,50	1,15%	8,1	7,30	7,70	0,40	5,19%	5233	708	20
21	25	5383	5456	5420	36,50	0,67%	7,44	7,13	7,29	0,16	2,13%	5376	687	25
37	0,1	2362	2379	2371	8,50	0,36%	10,42	11,24	10,83	0,41	3,79%	2328	445	0,007674
37	0,2	2532	2573	2553	20,50	0,80%	10,89	11,57	11,23	0,34	3,03%	2504	497	0,015347
37	0,5	2803	2853	2828	25,00	0,88%	11,22	11,74	11,48	0,26	2,26%	2771	563	0,038368
37	1	3030	3087	3059	28,50	0,93%	11,27	11,68	11,48	0,20	1,79%	2997	608	0,076736
37	2	3294	3346	3320	26,00	0,78%	11,38	11,49	11,44	0,05	0,48%	3254	658	0,153472
37	5	3667	3708	3688	20,50	0,56%	11,19	11,00	11,10	0,09	0,86%	3619	710	0,383681
37	10	3968	3998	3983	15,00	0,38%	11	10,59	10,80	0,20	1,90%	3913	746	0,767361
37	20	4278	4290	4284	6,00	0,14%	10,53	10,05	10,29	0,24	2,33%	4215	765	1,534723
37	25	4449	4395	4422	27,00	0,61%	9,83	9,89	9,86	0,03	0,30%	4357	757	1,918404
54	0,1	1878	1888	1883	5,00	0,27%	7,03	7,99	7,51	0,48	6,39%	1867	246	0,000708
54	0,2	1995	2000	1998	2,50	0,13%	7,89	8,60	8,25	0,36	4,31%	1977	286	0,001416
54	0,5	2174	2169	2172	2,50	0,12%	8,4	9,35	8,88	0,48	5,35%	2146	335	0,00354
54	1	2328	2315	2322	6,50	0,28%	8,85	10,20	9,53	0,67	7,09%	2289	384	0,007079
54	2	2513	2502	2508	5,50	0,22%	9,26	10,42	9,84	0,58	5,89%	2471	429	0,014159
54	5	2796	2786	2791	5,00	0,18%	9,82	10,84	10,33	0,51	4,94%	2746	500	0,035397
54	10	3041	3031	3036	5,00	0,16%	10,41	10,90	10,66	0,24	2,30%	2984	561	0,070795
54	20	3299	3289	3294	5,00	0,15%	10,47	10,97	10,72	0,25	2,33%	3237	613	0,141589
54	25	3385	3374	3380	5,50	0,16%	9,37	10,76	10,07	0,69	6,91%	3327	591	0,176986

Quadro B.2 - Resultados da Mistura 2 para MC (Mistura 2 = $\gamma_d=19\text{kN/m}^3$; VM200=10% ; CC=7%)

Temp. (°C)	f(Hz)	E* (Mpa)					φ (°)					Real (E*)	Imag (E*)	aT*f(Hz)
		E* CP3a	E* CP3b	E* Média	Devio Padrão	CV (%)	φ (°) CP3a	φ (°) CP3b	φ (°) Média	Devio Padrão	CV (%)			
4	0,1	5109	4534	4822	287,50	5,96%	7,78	7,63	7,71	0,08	0,97%	4778	646	3,981072
4	0,2	5314	4742	5028	286,00	5,69%	7,52	7,46	7,49	0,03	0,40%	4985	655	7,962143
4	0,5	5625	5051	5338	287,00	5,38%	7,07	6,97	7,02	0,05	0,71%	5298	652	19,90536
4	1	5859	5296	5578	281,50	5,05%	6,81	6,58	6,70	0,11	1,72%	5539	650	39,81072
4	2	6101	5551	5826	275,00	4,72%	6,46	6,20	6,33	0,13	2,05%	5790	642	79,62143
4	5	6398	5873	6136	262,50	4,28%	6,05	5,73	5,89	0,16	2,72%	6103	630	199,0536
4	10	6620	6136	6378	242,00	3,79%	5,84	5,46	5,65	0,19	3,36%	6347	628	398,1072
4	20	6824	6416	6620	204,00	3,08%	5,65	5,09	5,37	0,28	5,21%	6591	620	796,2143
4	25	7009	7041	7025	16,00	0,23%	5,67	4,22	4,95	0,72	14,66%	6999	606	995,2679
21	0,1	3357	3103	3230	127,00	3,93%	7,92	10,61	9,27	1,35	14,52%	3188	520	0,1
21	0,2	3599	3338	3469	130,50	3,76%	8,28	10,29	9,29	1,01	10,82%	3423	560	0,2
21	0,5	3943	3674	3809	134,50	3,53%	8,36	9,83	9,10	0,74	8,08%	3761	602	0,5
21	1	4201	3920	4061	140,50	3,46%	7,96	9,36	8,66	0,70	8,08%	4014	611	1
21	2	4491	4190	4341	150,50	3,47%	7,58	8,85	8,22	0,63	7,73%	4296	620	2
21	5	4859	4537	4698	161,00	3,43%	6,98	8,15	7,57	0,58	7,73%	4657	618	5
21	10	5138	4803	4971	167,50	3,37%	6,79	7,73	7,26	0,47	6,47%	4931	628	10
21	20	5406	5050	5228	178,00	3,40%	6,25	7,33	6,79	0,54	7,95%	5191	618	20
21	25	5508	5153	5331	177,50	3,33%	5,76	7,25	6,51	0,75	11,45%	5296	604	25
37	0,1	2559	2039	2299	260,00	11,31%	9,45	9,71	9,58	0,13	1,36%	2267	383	0,007943
37	0,2	3772	2202	2987	785,00	26,28%	9,87	10,41	10,14	0,27	2,66%	2940	526	0,015887
37	0,5	3088	2479	2784	304,50	10,94%	10,01	10,66	10,34	0,33	3,14%	2738	499	0,039716
37	1	3360	2692	3026	334,00	11,04%	10,01	10,80	10,41	0,40	3,80%	2976	547	0,079433
37	2	3664	2934	3299	365,00	11,06%	9,72	10,80	10,26	0,54	5,26%	3246	588	0,158866
37	5	4077	3284	3681	396,50	10,77%	9,29	10,72	10,01	0,71	7,15%	3625	639	0,397164
37	10	4403	3559	3981	422,00	10,60%	8,88	10,46	9,67	0,79	8,17%	3924	669	0,794328
37	20	4724	3778	4251	473,00	11,13%	8,46	9,99	9,23	0,76	8,29%	4196	681	1,588656
37	25	4866	3801	4334	532,50	12,29%	8,27	10,14	9,21	0,94	10,16%	4278	693	1,985821
54	0,1	2056	1700	1878	178,00	9,48%	7,435	10,15	8,79	1,36	15,42%	1856	287	0,001585
54	0,2	2160	1834	1997	163,00	8,16%	8,315	11,09	9,70	1,39	14,28%	1968	336	0,00317
54	0,5	2371	2015	2193	178,00	8,12%	9,13	11,85	10,49	1,36	12,96%	2156	399	0,007924
54	1	2540,5	2195,5	2368	172,50	7,28%	9,33	12,35	10,84	1,51	13,93%	2326	445	0,015849
54	2	2799	2413	2606	193,00	7,41%	8,845	12,52	10,68	1,84	17,18%	2561	483	0,031698
54	5	3154,5	2743,5	2949	205,50	6,97%	8,43	12,59	10,51	2,08	19,79%	2900	538	0,079245
54	10	3461	3049	3255	206,00	6,33%	8,795	12,43	10,61	1,82	17,11%	3199	599	0,158489
54	20	3796	3340	3568	228,00	6,39%	8,065	12,26	10,16	2,10	20,62%	3512	629	0,316979
54	25	3927	3451	3689	238,00	6,45%	8,06	12,14	10,10	2,04	20,20%	3632	647	0,396223

Quadro B.3 - Resultados da Mistura 3 para MC (Mistura 3 = $y_d=20\text{kN/m}^3$; $VM200=10\%$; $CC=3\%$)

Temp. (°C)	f(Hz)	E* (Mpa)					φ (°)					Real (E*)	Imag (E*)	aT*f(Hz)
		E* CP4a	E* CP4b	E* Média	Devio Padrão	CV (%)	φ (°) CP4a	φ (°) CP4b	φ (°) Média	Devio Padrão	CV (%)			
4	0,1	6050	5156	5603	447,00	7,98%	6,83	8,66	7,75	0,91	11,81%	5552	755	3,162278
4	0,2	6297	5365	5831	466,00	7,99%	6,57	8,21	7,39	0,82	11,10%	5783	750	6,324555
4	0,5	6622	5659	6141	481,50	7,84%	6,15	7,78	6,97	0,82	11,70%	6095	745	15,81139
4	1	6861	5883	6372	489,00	7,67%	5,89	7,60	6,75	0,86	12,68%	6328	748	31,62278
4	2	7110	6083	6597	513,50	7,78%	5,56	7,45	6,51	0,95	14,53%	6554	747	63,24555
4	5	7420	6401	6911	509,50	7,37%	5,19	7,31	6,25	1,06	16,96%	6869	752	158,1139
4	10	7658	6649	7154	504,50	7,05%	4,92	7,32	6,12	1,20	19,61%	7113	763	316,2278
4	20	7869	6904	7387	482,50	6,53%	4,69	7,28	5,99	1,30	21,64%	7346	770	632,4555
4	25	8055	6990	7523	532,50	7,08%	4,67	7,21	5,94	1,27	21,38%	7482	778	790,5694
21	0,1	4419	3902	4161	258,50	6,21%	8,87	10,54	9,71	0,84	8,60%	4101	701	0,1
21	0,2	4715	4159	4437	278,00	6,27%	8,67	10,27	9,47	0,80	8,45%	4377	730	0,2
21	0,5	5109	4533	4821	288,00	5,97%	8,26	9,85	9,06	0,79	8,78%	4761	759	0,5
21	1	5431	4816	5124	307,50	6,00%	7,81	9,46	8,64	0,83	9,55%	5065	769	1
21	2	5778	5114	5446	332,00	6,10%	7,54	9,09	8,32	0,78	9,32%	5389	788	2
21	5	6222	5500	5861	361,00	6,16%	7,05	8,53	7,79	0,74	9,50%	5807	794	5
21	10	6570	5801	6186	384,50	6,22%	6,75	8,20	7,48	0,73	9,70%	6133	805	10
21	20	6940	6089	6515	425,50	6,53%	6,51	7,87	7,19	0,68	9,46%	6463	815	20
21	25	7728	6221	6975	753,50	10,80%	2,31	7,80	5,06	2,75	54,30%	6947	615	25
37	0,1	3320	2719	3020	300,50	9,95%	9,8	8,03	8,92	0,89	9,93%	2983	468	0,005623
37	0,2	3531	2928	3230	301,50	9,34%	10,13	8,61	9,37	0,76	8,11%	3186	526	0,011247
37	0,5	3872	3248	3560	312,00	8,76%	10,31	8,81	9,56	0,75	7,85%	3511	591	0,028117
37	1	4133	3522	3828	305,50	7,98%	10,35	8,62	9,49	0,87	9,12%	3775	631	0,056234
37	2	4453	3866	4160	293,50	7,06%	10,18	8,98	9,58	0,60	6,26%	4101	692	0,112468
37	5	4886	4333	4610	276,50	6,00%	9,94	9,39	9,67	0,28	2,85%	4544	774	0,281171
37	10	5237	4708	4973	264,50	5,32%	9,62	9,45	9,54	0,09	0,89%	4904	824	0,562341
37	20	5588	5070	5329	259,00	4,86%	9,3	9,23	9,27	0,04	0,38%	5259	858	1,124683
37	25	5713	5183	5448	265,00	4,86%	9,25	9,21	9,23	0,02	0,22%	5377	874	1,405853
54	0,1	2743	2728	2736	7,50	0,27%	7,35	9,79	8,57	1,22	14,24%	2705	408	0,001
54	0,2	2886	2848	2867	19,00	0,66%	7,73	10,73	9,23	1,50	16,25%	2830	460	0,002
54	0,5	3101	3054	3078	23,50	0,76%	8,12	11,63	9,88	1,76	17,77%	3032	528	0,005
54	1	3289	3229	3259	30,00	0,92%	8,26	12,27	10,27	2,01	19,53%	3207	581	0,01
54	2	3524	3466	3495	29,00	0,83%	8,41	12,90	10,66	2,25	21,07%	3435	646	0,02
54	5	3867	3799	3833	34,00	0,89%	8,6	13,40	11,00	2,40	21,82%	3763	731	0,05
54	10	4170	4095	4133	37,50	0,91%	8,66	13,62	11,14	2,48	22,26%	4055	798	0,1
54	20	4489	4416	4453	36,50	0,82%	8,75	13,63	11,19	2,44	21,81%	4368	864	0,2
54	25	4604	4531	4568	36,50	0,80%	8,58	13,50	11,04	2,46	22,28%	4483	875	0,25

Quadro B.4 - Resultados da Mistura 4 para MC (Mistura 4 = $\gamma_d=20\text{kN/m}^3$; VM200=10% ; CC=7%)

Temp. (°C)	f(Hz)	E* (Mpa)					φ (°)					Real (E*)	Imag (E*)	aT*f(Hz)
		E* CP5a	E* CP5b	E* Média	Devio Padrão	CV (%)	φ (°) CP5a	φ (°) CP5b	φ (°) Média	Devio Padrão	CV (%)			
4	0,1	4644	3839	4242	402,50	9,49%	6,78	7,97	7,38	0,60	8,07%	4206	544	1,995262
4	0,2	4857	4007	4432	425,00	9,59%	6,31	7,66	6,99	0,68	9,66%	4399	539	3,990525
4	0,5	5139	4253	4696	443,00	9,43%	5,61	7,01	6,31	0,70	11,09%	4668	516	9,976312
4	1	5354	4437	4896	458,50	9,37%	4,97	6,54	5,76	0,79	13,64%	4871	491	19,95262
4	2	5576	4643	5110	466,50	9,13%	4,59	6,21	5,40	0,81	15,00%	5087	481	39,90525
4	5	5851	4895	5373	478,00	8,90%	4,04	5,79	4,92	0,87	17,80%	5353	460	99,76312
4	10	6060	5092	5576	484,00	8,68%	4,26	5,48	4,87	0,61	12,53%	5556	473	199,5262
4	20	6245	5267	5756	489,00	8,50%	3,64	5,10	4,37	0,73	16,70%	5739	439	399,0525
4	25	6257	5343	5800	457,00	7,88%	3,35	4,79	4,07	0,72	17,69%	5785	412	498,8156
21	0,1	3151	2922	3037	114,50	3,77%	8,41	11,24	9,83	1,42	14,40%	2992	518	0,1
21	0,2	3407	3157	3282	125,00	3,81%	8,29	10,87	9,58	1,29	13,47%	3236	546	0,2
21	0,5	3730	3474	3602	128,00	3,55%	7,93	10,40	9,17	1,24	13,48%	3556	574	0,5
21	1	3981	3715	3848	133,00	3,46%	7,39	9,97	8,68	1,29	14,86%	3804	581	1
21	2	4266	4014	4140	126,00	3,04%	7,18	10,06	8,62	1,44	16,71%	4093	621	2
21	5	4617	4278	4448	169,50	3,81%	6,66	8,74	7,70	1,04	13,51%	4407	596	5
21	10	4879	4515	4697	182,00	3,87%	6,32	8,38	7,35	1,03	14,01%	4658	601	10
21	20	5128	4739	4934	194,50	3,94%	5,99	7,94	6,97	0,98	14,00%	4897	598	20
21	25	5275	4836	5056	219,50	4,34%	6,32	7,89	7,11	0,78	11,05%	5017	625	25
37	0,1	2041	1977	2009	32,00	1,59%	9,26	10,19	9,73	0,46	4,78%	1977	357	0,003162
37	0,2	2212	2146	2179	33,00	1,51%	9,76	10,55	10,16	0,39	3,89%	2141	403	0,006325
37	0,5	2457	2399	2428	29,00	1,19%	10,07	10,80	10,44	0,37	3,50%	2384	461	0,015811
37	1	2665	2606	2636	29,50	1,12%	10,03	10,33	10,18	0,15	1,47%	2590	488	0,031623
37	2	2904	2845	2875	29,50	1,03%	9,97	10,18	10,08	0,11	1,04%	2826	528	0,063246
37	5	3235	3175	3205	30,00	0,94%	9,73	9,81	9,77	0,04	0,41%	3154	571	0,158114
37	10	3497	3438	3468	29,50	0,85%	9,37	9,76	9,57	0,19	2,04%	3414	606	0,316228
37	20	3758	3705	3732	26,50	0,71%	8,95	8,99	8,97	0,02	0,22%	3681	614	0,632456
37	25	3839	3824	3832	7,50	0,20%	8,85	8,39	8,62	0,23	2,67%	3783	607	0,790569
54	0,1	1543	1516	1530	13,50	0,88%	9,05	6,59	7,82	1,23	15,73%	1515	208	0,000251
54	0,2	1650	1614	1632	18,00	1,10%	9,63	6,35	7,99	1,64	20,53%	1616	227	0,000502
54	0,5	1797	1764	1781	16,50	0,93%	10,12	7,20	8,66	1,46	16,86%	1760	268	0,001256
54	1	1915	1896	1906	9,50	0,50%	10,3	6,93	8,62	1,69	19,56%	1884	285	0,002512
54	2	2056	2055	2056	0,50	0,02%	10,19	8,37	9,28	0,91	9,81%	2029	331	0,005024
54	5	2291	2309	2300	9,00	0,39%	9,77	9,16	9,47	0,30	3,22%	2269	378	0,012559
54	10	2498	2529	2514	15,50	0,62%	9,49	9,86	9,68	0,18	1,91%	2478	422	0,025119
54	20	2728	2760	2744	16,00	0,58%	9,46	9,58	9,52	0,06	0,63%	2706	454	0,050238
54	25	2809	2845	2827	18,00	0,64%	9,15	9,29	9,22	0,07	0,76%	2790	453	0,062797

Quadro B.5 - Resultados da Mistura 5 para MC (Mistura 5 = $y_d=19\text{kN/m}^3$; VM200=15% ; CC=3%)

Temp. (°C)	f(Hz)	E* (Mpa)					φ (°)					Real (E*)	Imag (E*)	aT*f(Hz)
		E* CP6a	E* CP6b	E* Média	Devio Padrão	CV (%)	φ (°) CP6a	φ (°) CP6b	φ (°) Média	Devio Padrão	CV (%)			
4	0,1	5518	4497	5008	510,50	10,19%	6,31	6,79	6,55	0,24	3,66%	4975	571	3,548134
4	0,2	5815	4766	5291	524,50	9,91%	6,01	6,43	6,22	0,21	3,38%	5259	573	7,096268
4	0,5	6165	5087	5626	539,00	9,58%	5,52	5,91	5,72	0,19	3,41%	5598	560	17,74067
4	1	6434	5333	5884	550,50	9,36%	5,04	5,55	5,30	0,25	4,82%	5858	543	35,48134
4	2	6651	5508	6080	571,50	9,40%	4,56	5,19	4,88	0,32	6,46%	6058	517	70,96268
4	5	6939	5746	6343	596,50	9,40%	3,94	4,68	4,31	0,37	8,58%	6325	477	177,4067
4	10	7239	5996	6618	621,50	9,39%	3,49	4,38	3,94	0,44	11,31%	6602	454	354,8134
4	20	7495	6208	6852	643,50	9,39%	2,99	4,19	3,59	0,60	16,71%	6838	429	709,6268
4	25	7623	6370	6997	626,50	8,95%	2,79	4,23	3,51	0,72	20,51%	6983	428	887,0335
21	0,1	3763	3030	3397	366,50	10,79%	9,99	10,22	10,11	0,11	1,14%	3344	596	0,1
21	0,2	4103	3311	3707	396,00	10,68%	9,8	9,97	9,89	0,09	0,86%	3652	636	0,2
21	0,5	4474	3613	4044	430,50	10,65%	9,42	9,47	9,45	0,03	0,26%	3989	664	0,5
21	1	4829	3932	4381	448,50	10,24%	9,03	9,10	9,07	0,04	0,39%	4326	690	1
21	2	5187	4253	4720	467,00	9,89%	8,56	8,59	8,58	0,01	0,17%	4667	704	2
21	5	5661	4663	5162	499,00	9,67%	8,04	7,92	7,98	0,06	0,75%	5112	717	5
21	10	6010	4972	5491	519,00	9,45%	7,62	7,51	7,57	0,06	0,73%	5443	723	10
21	20	6351	5275	5813	538,00	9,26%	7,11	6,96	7,04	0,08	1,07%	5769	712	20
21	25	6451	5387	5919	532,00	8,99%	7,13	6,73	6,93	0,20	2,89%	5876	714	25
37	0,1	2573	2433	2503	70,00	2,80%	10,39	7,16	8,78	1,62	18,40%	2474	382	0,005012
37	0,2	2734	2592	2663	71,00	2,67%	10,81	8,38	9,60	1,22	12,66%	2626	444	0,010024
37	0,5	3017	2867	2942	75,00	2,55%	11,21	9,40	10,31	0,90	8,78%	2895	526	0,025059
37	1	3245	3077	3161	84,00	2,66%	11,1	9,65	10,38	0,72	6,99%	3109	569	0,050119
37	2	3511	3349	3430	81,00	2,36%	10,96	9,94	10,45	0,51	4,88%	3373	622	0,100237
37	5	3812	3642	3727	85,00	2,28%	10,47	9,68	10,08	0,40	3,92%	3670	652	0,250594
37	10	4119	3965	4042	77,00	1,90%	10,14	9,53	9,84	0,30	3,10%	3983	690	0,501187
37	20	4536	4358	4447	89,00	2,00%	9,38	9,18	9,28	0,10	1,08%	4389	717	1,002374
37	25	4798	4486	4642	156,00	3,36%	8,93	8,58	8,76	0,18	2,00%	4588	707	1,252968
54	0,1	2032	1901	1967	65,50	3,33%	8,82	7,76	8,29	0,53	6,39%	1946	284	0,000794
54	0,2	2180	2028	2104	76,00	3,61%	9,48	8,22	8,85	0,63	7,12%	2079	324	0,001589
54	0,5	2406	2227	2317	89,50	3,86%	10,27	8,75	9,51	0,76	7,99%	2285	383	0,003972
54	1	2613	2403	2508	105,00	4,19%	10,73	9,01	9,87	0,86	8,71%	2471	430	0,007943
54	2	2875	2626	2751	124,50	4,53%	11,15	9,38	10,27	0,89	8,62%	2706	490	0,015887
54	5	3262	2959	3111	151,50	4,87%	11,5	9,79	10,65	0,85	8,03%	3057	575	0,039716
54	10	3609	3253	3431	178,00	5,19%	11,57	10,01	10,79	0,78	7,23%	3370	642	0,079433
54	20	3990	3576	3783	207,00	5,47%	11,44	10,11	10,78	0,67	6,17%	3716	707	0,158866
54	25	4166	3682	3924	242,00	6,17%	11,21	10,03	10,62	0,59	5,56%	3857	723	0,198582

Quadro B.6 - Resultados da Mistura 6 para MC (Mistura 6 = $\gamma_d=19\text{kN/m}^3$; VM200=15% ; CC=7%)

Temp. (°C)	f(Hz)	E* (Mpa)					φ (°)					Real (E*)	Imag (E*)	aT*f(Hz)
		E* CP7a	E* CP7b	E* Média	Devio Padrão	CV (%)	φ (°) CP7a	φ (°) CP7b	φ (°) Média	Devio Padrão	CV (%)			
4	0,1	6118	7288	6703	585,00	8,73%	7,16	6,84	7,00	0,16	2,29%	6653	817	3,981072
4	0,2	6348	7589	6969	620,50	8,90%	6,85	6,52	6,69	0,17	2,47%	6921	811	7,962143
4	0,5	6701	8017	7359	658,00	8,94%	6,34	6,05	6,20	0,15	2,34%	7316	794	19,90536
4	1	6966	8336	7651	685,00	8,95%	5,88	5,68	5,78	0,10	1,73%	7612	771	39,81072
4	2	7246	8661	7954	707,50	8,90%	5,47	5,37	5,42	0,05	0,92%	7918	751	79,62143
4	5	7618	9038	8328	710,00	8,53%	4,86	4,87	4,87	0,00	0,10%	8298	706	199,0536
4	10	7905	9349	8627	722,00	8,37%	4,6	4,56	4,58	0,02	0,44%	8599	689	398,1072
4	20	8175	9585	8880	705,00	7,94%	4,34	4,35	4,35	0,00	0,12%	8854	673	796,2143
4	25	8246	9633	8940	693,50	7,76%	4,38	4,22	4,30	0,08	1,86%	8914	670	995,2679
21	0,1	4555	5075	4815	260,00	5,40%	10,26	9,63	9,95	0,32	3,17%	4743	832	0,1
21	0,2	4883	5440	5162	278,50	5,40%	10,08	9,39	9,74	0,35	3,54%	5087	873	0,2
21	0,5	5327	5928	5628	300,50	5,34%	9,57	8,93	9,25	0,32	3,46%	5554	905	0,5
21	1	5672	6293	5983	310,50	5,19%	9,09	8,46	8,78	0,32	3,59%	5912	913	1
21	2	6024	6664	6344	320,00	5,04%	8,65	8,03	8,34	0,31	3,72%	6277	920	2
21	5	6484	7134	6809	325,00	4,77%	8,03	7,42	7,73	0,30	3,95%	6747	915	5
21	10	6830	7487	7159	328,50	4,59%	7,59	6,97	7,28	0,31	4,26%	7101	907	10
21	20	7171	7803	7487	316,00	4,22%	7,14	6,48	6,81	0,33	4,85%	7434	888	20
21	25	7281	7948	7615	333,50	4,38%	7,06	6,49	6,78	0,28	4,21%	7561	898	25
37	0,1	2441	2939	2690	249,00	9,26%	7,185	13,08	10,13	2,95	29,07%	2648	473	0,001259
37	0,2	2700	3216	2958	258,00	8,72%	7,85	13,09	10,47	2,62	25,02%	2909	538	0,002518
37	0,5	3083	3647	3365	282,00	8,38%	8,845	12,46	10,65	1,81	16,95%	3307	622	0,006295
37	1	3389	3987	3688	299,00	8,11%	8,915	12,31	10,61	1,70	15,98%	3625	679	0,012589
37	2	3744	4376	4060	316,00	7,78%	9,2	11,60	10,40	1,20	11,54%	3993	733	0,025179
37	5	4223	4899	4561	338,00	7,41%	9	11,14	10,07	1,07	10,63%	4491	797	0,062946
37	10	4603	5311	4957	354,00	7,14%	8,775	10,63	9,70	0,92	9,54%	4886	835	0,125893
37	20	4987	5707	5347	360,00	6,73%	8,365	10,26	9,31	0,95	10,15%	5277	865	0,251785
37	25	5119	5907	5513	394,00	7,15%	7,88	10,22	9,05	1,17	12,93%	5444	867	0,314731
54	0,1	2122	2428	2275	153,00	6,73%	8,04	7,82	7,93	0,11	1,39%	2253	314	0,000158
54	0,2	2268	2604	2436	168,00	6,90%	8,61	8,18	8,40	0,21	2,56%	2410	356	0,000317
54	0,5	2483	2861	2672	189,00	7,07%	9,12	8,64	8,88	0,24	2,70%	2640	412	0,000792
54	1	2678	3089	2884	205,50	7,13%	9,5	8,86	9,18	0,32	3,49%	2847	460	0,001585
54	2	2909	3360	3135	225,50	7,19%	9,75	8,86	9,31	0,45	4,78%	3093	507	0,00317
54	5	3244	3745	3495	250,50	7,17%	9,99	9,04	9,52	0,47	4,99%	3446	578	0,007924
54	10	3535	4082	3809	273,50	7,18%	10,1	9,43	9,77	0,33	3,43%	3753	646	0,015849
54	20	3845	4446	4146	300,50	7,25%	10,15	9,33	9,74	0,41	4,21%	4086	701	0,031698
54	25	3954	4609	4282	327,50	7,65%	10,19	8,77	9,48	0,71	7,49%	4223	705	0,039622

Quadro B.7 - Resultados da Mistura 7 para MC (Mistura 7 = $y_d=20\text{kN/m}^3$; VM200=15% ; CC=3%)

Temp. (°C)	f(Hz)	E* (Mpa)					φ (°)					Real (E*)	Imag (E*)	aT*f(Hz)
		E* CP8a	E* CP8b	E* Média	Devio Padrão	CV (%)	φ (°) CP8a	φ (°) CP8b	φ (°) Média	Devio Padrão	CV (%)			
4	0,1	7643	7897	7770	127,00	1,63%	6,04	5,86	5,95	0,09	1,51%	7728	805	7,943282
4	0,2	7977	8212	8095	117,50	1,45%	5,71	5,60	5,66	0,06	0,97%	8055	798	15,88656
4	0,5	8430	8644	8537	107,00	1,25%	4,94	4,95	4,95	0,00	0,10%	8505	736	39,71641
4	1	8790	8994	8892	102,00	1,15%	4,49	4,63	4,56	0,07	1,54%	8864	707	79,43282
4	2	9159	9343	9251	92,00	0,99%	3,87	4,19	4,03	0,16	3,97%	9228	650	158,8656
4	5	9607	9782	9695	87,50	0,90%	3,26	3,82	3,54	0,28	7,91%	9676	599	397,1641
4	10	9947	10098	10023	75,50	0,75%	3,16	3,53	3,35	0,19	5,53%	10005	585	794,3282
4	20	10311	10409	10360	49,00	0,47%	3,21	3,33	3,27	0,06	1,83%	10343	591	1588,656
4	25	10668	10586	10627	41,00	0,39%	1,51	7,41	4,46	2,95	66,14%	10595	826	1985,821
21	0,1	5221	5371	5296	75,00	1,42%	9,08	9,87	9,48	0,40	4,17%	5224	872	0,1
21	0,2	5580	5748	5664	84,00	1,48%	8,9	9,54	9,22	0,32	3,47%	5591	908	0,2
21	0,5	6073	6277	6175	102,00	1,65%	8,46	9,08	8,77	0,31	3,53%	6103	941	0,5
21	1	6464	6683	6574	109,50	1,67%	8,09	8,68	8,39	0,30	3,52%	6503	959	1
21	2	6866	7092	6979	113,00	1,62%	7,66	8,25	7,96	0,29	3,71%	6912	966	2
21	5	7380	7627	7504	123,50	1,65%	7,09	7,60	7,35	0,25	3,47%	7442	959	5
21	10	7778	8030	7904	126,00	1,59%	6,71	7,18	6,95	0,23	3,38%	7846	956	10
21	20	8138	8416	8277	139,00	1,68%	6,22	6,70	6,46	0,24	3,72%	8224	931	20
21	25	8268	8579	8424	155,50	1,85%	6,02	6,57	6,30	0,28	4,37%	8373	924	25
37	0,1	3651	3957	3804	153,00	4,02%	9,77	9,00	9,39	0,39	4,10%	3753	620	0,005012
37	0,2	3936	4247	4092	155,50	3,80%	10,11	9,35	9,73	0,38	3,91%	4033	691	0,010024
37	0,5	4345	4645	4495	150,00	3,34%	10,35	9,41	9,88	0,47	4,76%	4428	771	0,025059
37	1	4684	4977	4831	146,50	3,03%	10,27	9,36	9,82	0,46	4,64%	4760	823	0,050119
37	2	5061	5349	5205	144,00	2,77%	10,17	9,23	9,70	0,47	4,85%	5131	877	0,100237
37	5	5585	5867	5726	141,00	2,46%	9,78	9,04	9,41	0,37	3,93%	5649	936	0,250594
37	10	6004	6277	6141	136,50	2,22%	9,5	8,77	9,14	0,36	4,00%	6063	975	0,501187
37	20	6432	6695	6564	131,50	2,00%	9,11	8,47	8,79	0,32	3,64%	6486	1003	1,002374
37	25	6592	6843	6718	125,50	1,87%	8,72	8,24	8,48	0,24	2,83%	6644	991	1,252968
54	0,1	2808	2759	2784	24,50	0,88%	7,95	7,68	7,82	0,14	1,73%	2758	378	0,0002
54	0,2	2985	2884	2935	50,50	1,72%	8,37	8,24	8,31	0,06	0,78%	2904	424	0,000399
54	0,5	3245	3109	3177	68,00	2,14%	9,01	8,88	8,95	0,06	0,73%	3138	494	0,000998
54	1	3464	3300	3382	82,00	2,42%	9,28	9,46	9,37	0,09	0,96%	3337	551	0,001995
54	2	3739	3555	3647	92,00	2,52%	9,45	9,99	9,72	0,27	2,78%	3595	616	0,003991
54	5	4150	3941	4046	104,50	2,58%	9,57	10,45	10,01	0,44	4,40%	3984	703	0,009976
54	10	4498	4287	4393	105,50	2,40%	9,49	10,70	10,10	0,61	5,99%	4324	770	0,019953
54	20	4862	4664	4763	99,00	2,08%	9,32	10,72	10,02	0,70	6,99%	4690	829	0,039905
54	25	4967	4748	4858	109,50	2,25%	8,96	10,66	9,81	0,85	8,66%	4786	828	0,049882

Quadro B.8 - Resultados da Mistura 8 para MC (Mistura 8 = $\gamma_d=20\text{kN/m}^3$; VM200=15% ; CC=7%)

Temp. (°C)	f(Hz)	E* (Mpa)					φ (°)					Real (E*)	Imag (E*)	aT*f(Hz)
		E* CP9a	E* CP9b	E* Média	Devio Padrão	CV (%)	φ (°) CP9a	φ (°) CP9b	φ (°) Média	Devio Padrão	CV (%)			
4	0,1	5206	5004	5105	101,00	1,98%	6,73	6,51	6,62	0,11	1,66%	4852	563	7,943282
4	0,2	5459	5255	5357	102,00	1,90%	6,36	6,12	6,24	0,12	1,92%	5081	555	15,88656
4	0,5	5791	5591	5691	100,00	1,76%	5,72	5,48	5,60	0,12	2,14%	5404	529	39,71641
4	1	6037	5831	5934	103,00	1,74%	5,07	4,81	4,94	0,13	2,63%	5627	486	79,43282
4	2	6270	6070	6170	100,00	1,62%	4,51	4,27	4,39	0,12	2,73%	5864	450	158,8656
4	5	6563	6361	6462	101,00	1,56%	3,70	3,46	3,58	0,12	3,36%	6142	384	397,1641
4	10	6779	6579	6679	100,00	1,50%	3,35	3,13	3,24	0,11	3,40%	6347	359	794,3282
4	20	7013	6813	6913	100,00	1,45%	2,95	2,71	2,83	0,12	4,24%	6550	324	1588,656
4	25	7310	7108	7209	101,00	1,40%	2,95	2,73	2,84	0,11	3,88%	6728	333	1985,821
21	0,1	3451	3442	3447	4,50	0,13%	9,97	10,39	10,18	0,21	2,06%	3392	609	0,1
21	0,2	3716	3704	3710	6,00	0,16%	9,75	10,12	9,94	0,19	1,86%	3654	640	0,2
21	0,5	4075	4071	4073	2,00	0,05%	9,23	9,53	9,38	0,15	1,60%	4019	664	0,5
21	1	4353	4343	4348	5,00	0,11%	8,75	9,09	8,92	0,17	1,91%	4295	674	1
21	2	4636	4623	4630	6,50	0,14%	8,15	8,48	8,32	0,16	1,98%	4581	669	2
21	5	5004	4974	4989	15,00	0,30%	7,46	7,76	7,61	0,15	1,97%	4945	661	5
21	10	5273	5235	5254	19,00	0,36%	6,93	7,27	7,10	0,17	2,39%	5214	649	10
21	20	5532	5484	5508	24,00	0,44%	6,48	6,82	6,65	0,17	2,56%	5471	638	20
21	25	5637	5572	5605	32,50	0,58%	6,29	6,64	6,47	0,18	2,71%	5569	631	25
37	0,1	2171	2125	2148	23,00	1,07%	9,67	10,85	10,26	0,59	5,75%	2114	383	0,001585
37	0,2	2338	2300	2319	19,00	0,82%	10,18	10,84	10,51	0,33	3,14%	2280	423	0,00317
37	0,5	2587	2550	2569	18,50	0,72%	10,59	11,21	10,90	0,31	2,84%	2522	486	0,007924
37	1	2798	2765	2782	16,50	0,59%	10,7	11,15	10,93	0,22	2,06%	2731	527	0,015849
37	2	3039	3017	3028	11,00	0,36%	10,61	11,08	10,85	0,24	2,17%	2974	570	0,031698
37	5	3371	3362	3367	4,50	0,13%	10,36	10,77	10,57	0,21	1,94%	3309	617	0,079245
37	10	3636	3642	3639	3,00	0,08%	10,03	10,33	10,18	0,15	1,47%	3582	643	0,158489
37	20	3901	3923	3912	11,00	0,28%	9,67	10,05	9,86	0,19	1,93%	3854	670	0,316979
37	25	4000	4017	4009	8,50	0,21%	9,48	9,92	9,70	0,22	2,27%	3951	675	0,396223
54	0,1	1524	1572	1548	24,00	1,55%	8,36	6,79	7,58	0,79	10,36%	1534	204	5,01E-05
54	0,2	1602	1668	1635	33,00	2,02%	8,45	7,72	8,09	0,36	4,51%	1619	230	0,0001
54	0,5	1712	1799	1756	43,50	2,48%	8,46	8,62	8,54	0,08	0,94%	1736	261	0,000251
54	1	1816	1912	1864	48,00	2,58%	7,79	8,78	8,29	0,49	5,97%	1845	269	0,000501
54	2	1957	2063	2010	53,00	2,64%	7,02	9,14	8,08	1,06	13,12%	1990	283	0,001002
54	5	2169	2293	2231	62,00	2,78%	7,39	10,42	8,91	1,52	17,01%	2204	345	0,002506
54	10	2368	2500	2434	66,00	2,71%	8,4	10,42	9,41	1,01	10,73%	2401	398	0,005012
54	20	2571	2710	2641	69,50	2,63%	9,2	10,49	9,85	0,65	6,55%	2602	451	0,010024
54	25	2639	2776	2708	68,50	2,53%	9,23	10,81	10,02	0,79	7,88%	2666	471	0,01253

Quadro B.9 - Resultados da Mistura 9 para MC (Mistura 9 = $y_d=19\text{kN/m}^3$; VM200=25% ; CC=3%)

Temp. (°C)	f(Hz)	E* (Mpa)					φ (°)					Real (E*)	Imag (E*)	aT*f(Hz)
		E* CP10a	E* CP10b	E* Média	Devio Padrão	CV (%)	φ (°) CP10a	φ (°) CP10b	φ (°) Média	Devio Padrão	CV (%)			
4	0,1	6310	5135	5723	587,50	10,27%	5,19	7,19	6,19	1,00	16,16%	5689	617	8,912509
4	0,2	6548	5321	5935	613,50	10,34%	5,17	6,76	5,97	0,79	13,33%	5902	617	17,82502
4	0,5	6879	5608	6244	635,50	10,18%	4,96	6,11	5,54	0,57	10,39%	6214	602	44,56255
4	1	7120	5822	6471	649,00	10,03%	4,75	5,63	5,19	0,44	8,49%	6445	585	89,12509
4	2	7351	6036	6694	657,50	9,82%	4,52	5,14	4,83	0,31	6,42%	6670	564	178,2502
4	5	7628	6303	6966	662,50	9,51%	4,10	4,67	4,38	0,29	6,51%	6945	532	445,6255
4	10	7843	6503	7173	670,00	9,34%	3,87	4,38	4,13	0,25	6,18%	7154	516	891,2509
4	20	8029	6703	7366	663,00	9,00%	3,58	4,11	3,84	0,26	6,90%	7349	493	1782,502
4	25	8085	6783	7434	651,00	8,76%	2,49	5,13	3,81	1,32	34,65%	7418	494	2228,127
21	0,1	4248	3688	3968	280,00	7,06%	6,82	8,82	7,82	1,00	12,79%	3931	540	0,1
21	0,2	4510	3935	4223	287,50	6,81%	7,11	8,70	7,91	0,80	10,06%	4182	581	0,2
21	0,5	4886	4242	4564	322,00	7,06%	7,16	8,31	7,74	0,58	7,43%	4522	614	0,5
21	1	5175	4486	4831	344,50	7,13%	7,02	7,90	7,46	0,44	5,90%	4790	627	1
21	2	5485	4764	5125	360,50	7,03%	6,86	7,48	7,17	0,31	4,32%	5084	640	2
21	5	5877	5108	5493	384,50	7,00%	6,37	6,94	6,66	0,28	4,28%	5455	637	5
21	10	6177	5358	5768	409,50	7,10%	6,09	6,60	6,35	0,26	4,02%	5732	637	10
21	20	6472	5585	6029	443,50	7,36%	5,6	6,13	5,87	0,26	4,52%	5997	616	20
21	25	6636	5631	6134	502,50	8,19%	3,41	6,05	4,73	1,32	27,91%	6113	506	25
37	0,1	2774	2156	2465	309,00	12,54%	9,47	9,44	9,46	0,02	0,16%	2432	405	0,001259
37	0,2	2948	2307	2628	320,50	12,20%	9,99	9,79	9,89	0,10	1,01%	2588	451	0,002518
37	0,5	3223	2535	2879	344,00	11,95%	10,47	10,13	10,30	0,17	1,65%	2833	515	0,006295
37	1	3457	2733	3095	362,00	11,70%	10,53	10,24	10,39	0,14	1,40%	3044	558	0,012589
37	2	3721	2954	3338	383,50	11,49%	10,44	10,18	10,31	0,13	1,26%	3284	597	0,025179
37	5	4100	3268	3684	416,00	11,29%	10,04	9,89	9,97	0,07	0,75%	3628	638	0,062946
37	10	4412	3526	3969	443,00	11,16%	9,71	9,60	9,66	0,06	0,57%	3913	666	0,125893
37	20	4723	3783	4253	470,00	11,05%	9,32	9,36	9,34	0,02	0,21%	4197	690	0,251785
37	25	4972	3880	4426	546,00	12,34%	7,62	9,17	8,40	0,78	9,23%	4379	646	0,314731
54	0,1	2166	1857	2012	154,50	7,68%	6,85	7,59	7,22	0,37	5,12%	1996	253	0,000158
54	0,2	2267	1925	2096	171,00	8,16%	7,55	8,20	7,88	0,32	4,13%	2076	287	0,000317
54	0,5	2415	2049	2232	183,00	8,20%	8,46	9,06	8,76	0,30	3,42%	2206	340	0,000792
54	1	2590	2195	2393	197,50	8,25%	9,13	9,65	9,39	0,26	2,77%	2360	390	0,001585
54	2	2849	2422	2636	213,50	8,10%	9,7	10,14	9,92	0,22	2,22%	2596	454	0,00317
54	5	3173	2686	2930	243,50	8,31%	10,44	10,53	10,49	0,04	0,43%	2881	533	0,007924
54	10	3515	2967	3241	274,00	8,45%	10,82	10,65	10,74	0,09	0,79%	3184	604	0,015849
54	20	3783	3160	3472	311,50	8,97%	11,13	10,72	10,93	0,21	1,88%	3409	658	0,031698
54	25	3884	3211	3548	336,50	9,49%	11,22	10,34	10,78	0,44	4,08%	3485	664	0,039622

Quadro B.10 - Resultados da Mistura 10 para MC (Mistura 10 = $y_d=19\text{kN/m}^3$; $VM200=25\%$; $CC=7\%$)

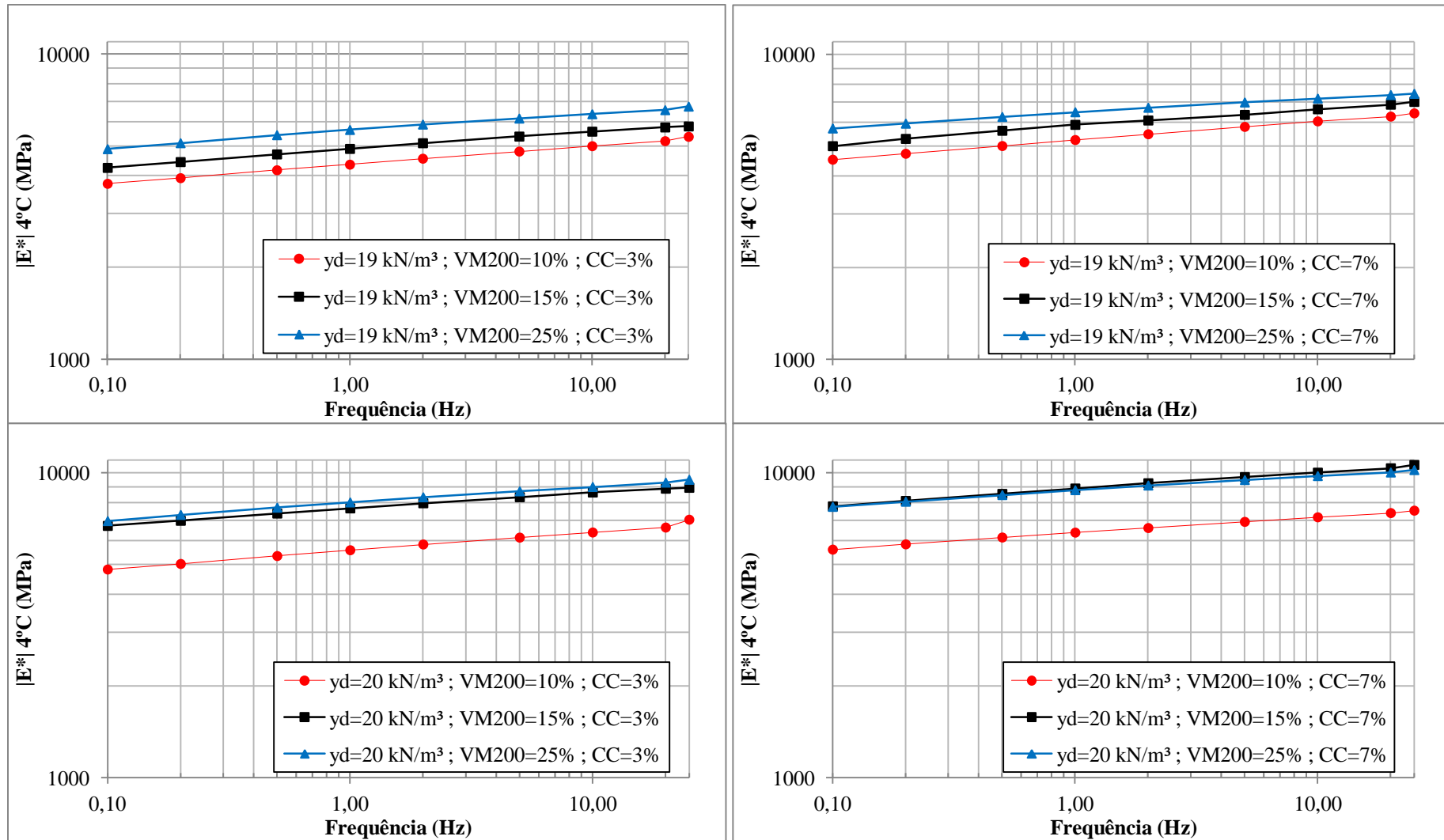
Temp. (°C)	f(Hz)	E* (Mpa)					φ (°)					Real (E*)	Imag (E*)	aT*f(Hz)
		E* CP11a	E* CP11b	E* Média	Devio Padrão	CV (%)	φ (°) CP11a	φ (°) CP11b	φ (°) Média	Devio Padrão	CV (%)			
4	0,1	6945	6960	6953	7,50	0,11%	5,88	6,25	6,07	0,19	3,05%	6914	735	10
4	0,2	7292	7274	7283	9,00	0,12%	5,67	5,89	5,78	0,11	1,90%	7246	733	20
4	0,5	7717	7668	7693	24,50	0,32%	5,23	5,42	5,33	0,10	1,78%	7659	714	50
4	1	8037	7971	8004	33,00	0,41%	4,74	4,95	4,85	0,10	2,17%	7975	676	100
4	2	8382	8257	8320	62,50	0,75%	4,38	4,56	4,47	0,09	2,01%	8294	648	200
4	5	8793	8614	8704	89,50	1,03%	3,90	4,05	3,98	0,08	1,89%	8683	603	500
4	10	9125	8865	8995	130,00	1,45%	3,74	4,00	3,87	0,13	3,36%	8974	607	1000
4	20	9523	9071	9297	226,00	2,43%	3,34	3,32	3,33	0,01	0,30%	9281	540	2000
4	25	10065	8927	9496	569,00	5,99%	2,97	1,33	2,15	0,82	38,14%	9489	356	2500
21	0,1	4594	4969	4782	187,50	3,92%	9,48	9,23	9,36	0,13	1,34%	4718	777	0,1
21	0,2	4922	5311	5117	194,50	3,80%	9,1	8,92	9,01	0,09	1,00%	5053	801	0,2
21	0,5	5376	5769	5573	196,50	3,53%	8,5	8,48	8,49	0,01	0,12%	5511	823	0,5
21	1	5734	6112	5923	189,00	3,19%	8,06	8,01	8,04	0,03	0,31%	5865	828	1
21	2	6101	6459	6280	179,00	2,85%	7,57	7,52	7,55	0,03	0,33%	6226	825	2
21	5	6564	6907	6736	171,50	2,55%	6,85	6,85	6,85	0,00	0,00%	6687	803	5
21	10	6925	7253	7089	164,00	2,31%	6,43	6,42	6,43	0,00	0,08%	7044	793	10
21	20	7284	7582	7433	149,00	2,00%	5,94	6,11	6,03	0,08	1,41%	7392	780	20
21	25	7793	7716	7755	38,50	0,50%	4,91	5,92	5,42	0,51	9,33%	7720	732	25
37	0,1	3229	2935	3082	147,00	4,77%	9,1	9,11	9,11	0,00	0,05%	3043	488	0,001585
37	0,2	3455	3146	3301	154,50	4,68%	9,41	9,58	9,50	0,09	0,90%	3255	544	0,00317
37	0,5	3792	3470	3631	161,00	4,43%	9,75	10,03	9,89	0,14	1,42%	3577	624	0,007924
37	1	4067	3738	3903	164,50	4,22%	9,76	10,15	9,96	0,20	1,96%	3844	675	0,015849
37	2	4379	4046	4213	166,50	3,95%	9,63	10,09	9,86	0,23	2,33%	4150	721	0,031698
37	5	4809	4482	4646	163,50	3,52%	9,34	9,89	9,62	0,28	2,86%	4580	776	0,079245
37	10	5154	4831	4993	161,50	3,23%	9,07	9,55	9,31	0,24	2,58%	4927	808	0,158489
37	20	5498	5184	5341	157,00	2,94%	8,75	9,18	8,97	0,22	2,40%	5276	832	0,316979
37	25	5625	5312	5469	156,50	2,86%	8,53	8,96	8,75	0,21	2,46%	5405	831	0,396223
54	0,1	2321	2053	2187	134,00	6,13%	7,12	7,17	7,15	0,03	0,35%	2170	272	7,94E-05
54	0,2	2445	2161	2303	142,00	6,17%	6,89	7,73	7,31	0,42	5,75%	2284	293	0,000159
54	0,5	2692	2393	2543	149,50	5,88%	7,04	8,26	7,65	0,61	7,97%	2520	338	0,000397
54	1	2893	2583	2738	155,00	5,66%	7,04	8,44	7,74	0,70	9,04%	2713	369	0,000794
54	2	3172	2846	3009	163,00	5,42%	7,475	8,73	8,10	0,62	7,72%	2979	424	0,001589
54	5	3494	3170	3332	162,00	4,86%	8,265	9,26	8,76	0,49	5,65%	3293	507	0,003972
54	10	3859	3532	3696	163,50	4,42%	8,995	9,21	9,10	0,11	1,15%	3649	584	0,007943
54	20	4253	3918	4086	167,50	4,10%	9,015	9,19	9,10	0,09	0,93%	4034	646	0,015887
54	25	4388	4018	4203	185,00	4,40%	9,02	8,68	8,85	0,17	1,92%	4153	647	0,019858

Quadro B.11 - Resultados da Mistura 11 para MC (Mistura 11 = $y_d=20\text{kN/m}^3$; $VM200=25\%$; $CC=3\%$)

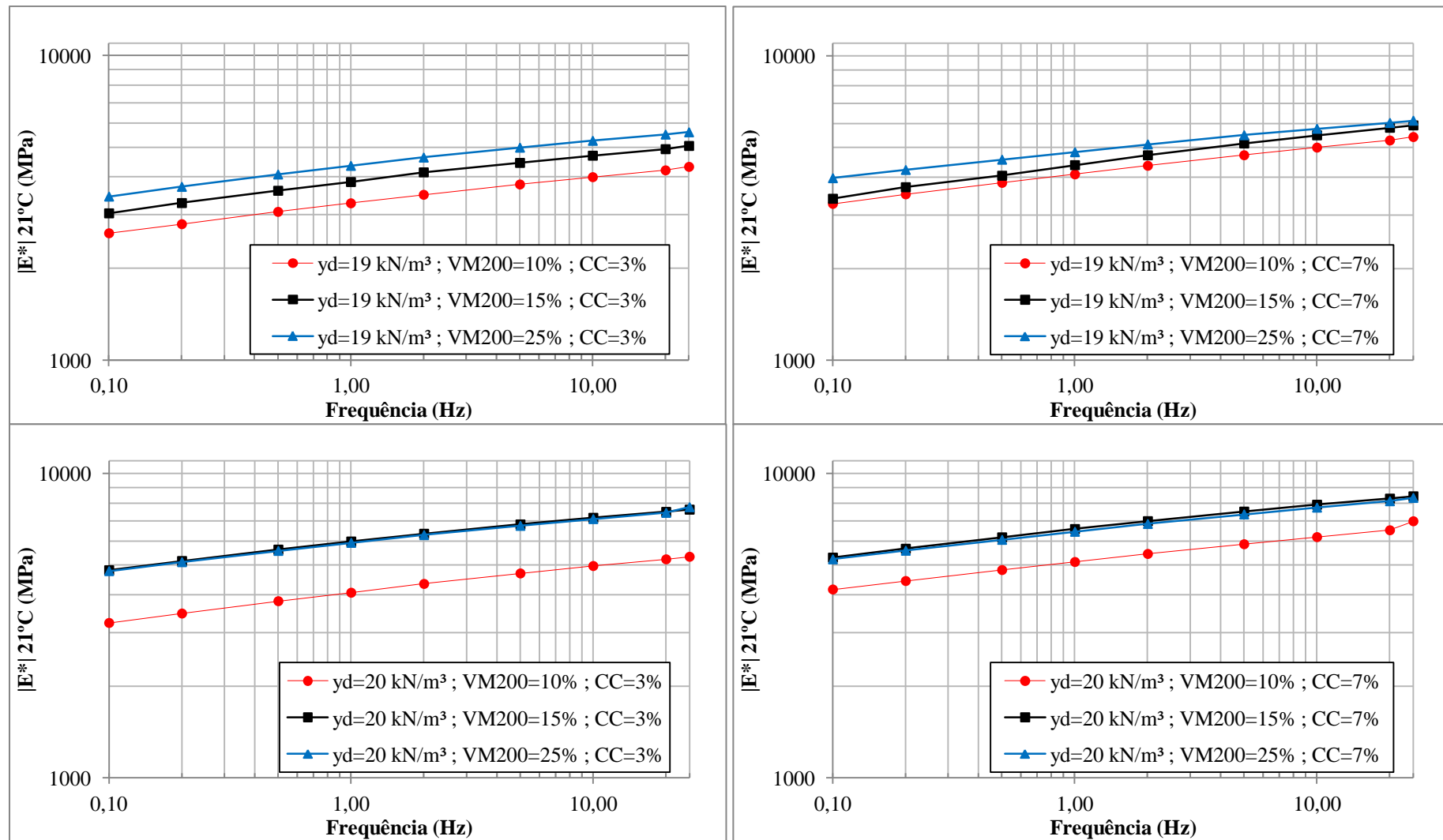
Temp. (°C)	f(Hz)	E* (Mpa)					φ (°)					Real (E*)	Imag (E*)	aT*f(Hz)
		E* CP12a	E* CP12b	E* Média	Devio Padrão	CV (%)	φ (°) CP12a	φ (°) CP12b	φ (°) Média	Devio Padrão	CV (%)			
4	0,1	7478	8001	7740	261,50	3,38%	6,14	6,29	6,22	0,08	1,21%	7694	838	10
4	0,2	7767	8326	8047	279,50	3,47%	5,90	5,96	5,93	0,03	0,51%	8003	831	20
4	0,5	8165	8759	8462	297,00	3,51%	5,47	5,63	5,55	0,08	1,44%	8422	818	50
4	1	8463	9101	8782	319,00	3,63%	5,16	5,26	5,21	0,05	0,96%	8746	797	100
4	2	8749	9437	9093	344,00	3,78%	4,84	4,98	4,91	0,07	1,43%	9060	778	200
4	5	9110	9849	9480	369,50	3,90%	4,46	4,50	4,48	0,02	0,45%	9451	740	500
4	10	9377	10160	9769	391,50	4,01%	4,20	4,19	4,20	0,00	0,12%	9742	715	1000
4	20	9622	10446	10034	412,00	4,11%	3,91	3,92	3,92	0,00	0,13%	10011	685	2000
4	25	9713	10726	10220	506,50	4,96%	3,82	3,82	3,82	0,00	0,00%	10197	681	2500
21	0,1	5074	5379	5227	152,50	2,92%	9,47	8,54	9,01	0,47	5,16%	5162	818	0,1
21	0,2	5413	5748	5581	167,50	3,00%	9,28	8,41	8,85	0,44	4,92%	5514	858	0,2
21	0,5	5874	6243	6059	184,50	3,05%	8,82	7,94	8,38	0,44	5,25%	5994	883	0,5
21	1	6238	6643	6441	202,50	3,14%	8,47	7,64	8,06	0,42	5,15%	6377	902	1
21	2	6606	7058	6832	226,00	3,31%	8	7,20	7,60	0,40	5,26%	6772	904	2
21	5	7091	7597	7344	253,00	3,44%	7,41	6,73	7,07	0,34	4,81%	7288	904	5
21	10	7455	8011	7733	278,00	3,59%	6,94	6,41	6,68	0,26	3,97%	7681	899	10
21	20	7810	8422	8116	306,00	3,77%	6,53	5,95	6,24	0,29	4,65%	8068	882	20
21	25	7935	8705	8320	385,00	4,63%	6,35	4,98	5,67	0,69	12,09%	8279	821	25
37	0,1	3645	3963	3804	159,00	4,18%	9,23	7,73	8,48	0,75	8,84%	3762	561	0,005012
37	0,2	3885	4258	4072	186,50	4,58%	9,61	8,14	8,88	0,73	8,28%	4023	628	0,010024
37	0,5	4236	4695	4466	229,50	5,14%	9,99	8,56	9,28	0,71	7,71%	4407	720	0,025059
37	1	4555	5069	4812	257,00	5,34%	10,07	8,70	9,39	0,69	7,30%	4748	785	0,050119
37	2	4892	5470	5181	289,00	5,58%	10,02	8,70	9,36	0,66	7,05%	5112	843	0,100237
37	5	5385	6019	5702	317,00	5,56%	9,68	8,69	9,19	0,50	5,39%	5629	910	0,250594
37	10	5761	6455	6108	347,00	5,68%	9,28	8,51	8,90	0,39	4,33%	6035	944	0,501187
37	20	6131	6895	6513	382,00	5,87%	8,9	8,28	8,59	0,31	3,61%	6440	973	1,002374
37	25	6269	7022	6646	376,50	5,67%	8,73	7,93	8,33	0,40	4,80%	6575	963	1,252968
54	0,1	2729	3139	2934	205,00	6,99%	6,99	7,66	7,33	0,34	4,57%	2910	374	0,000251
54	0,2	2837	3314	3076	238,50	7,75%	7,33	8,32	7,83	0,49	6,33%	3047	419	0,000502
54	0,5	3022	3573	3298	275,50	8,35%	8,08	9,12	8,60	0,52	6,05%	3260	493	0,001256
54	1	3184	3812	3498	314,00	8,98%	8,43	9,60	9,02	0,58	6,49%	3455	548	0,002512
54	2	3388	4077	3733	344,50	9,23%	8,85	9,93	9,39	0,54	5,75%	3682	609	0,005024
54	5	3701	4473	4087	386,00	9,44%	9,21	10,11	9,66	0,45	4,66%	4029	686	0,012559
54	10	3985	4807	4396	411,00	9,35%	9,68	10,07	9,88	0,20	1,97%	4331	754	0,025119
54	20	4294	5167	4731	436,50	9,23%	9,6	9,87	9,74	0,14	1,39%	4662	800	0,050238
54	25	4412	5288	4850	438,00	9,03%	9,41	9,65	9,53	0,12	1,26%	4783	803	0,062797

Quadro B.12 - Resultados da Mistura 12 para MC (Mistura 12 = $y_d=20\text{kN/m}^3$; $VM200=25\%$; $CC=7\%$)

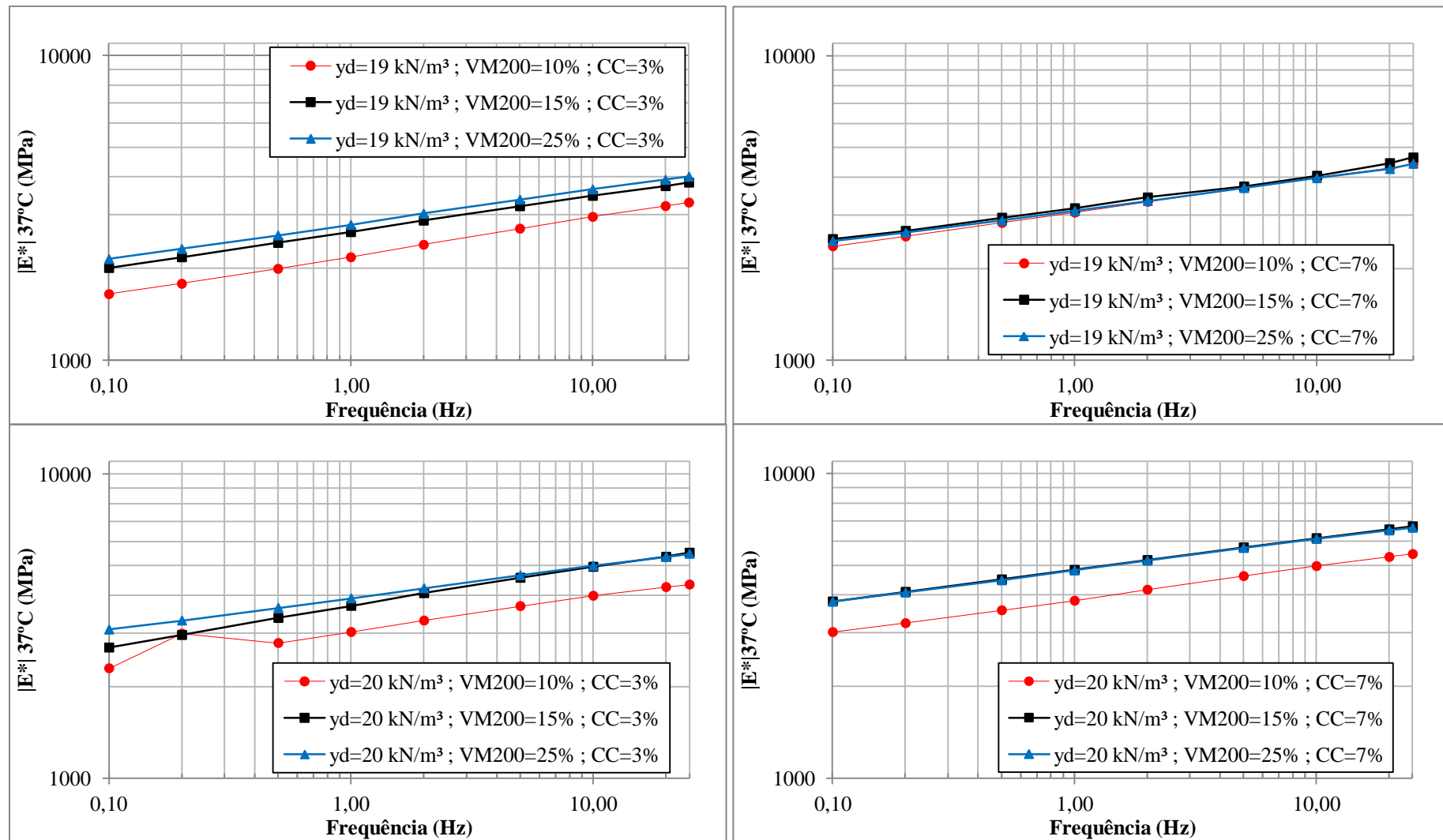
APÊNDICE C: ISOTERMAS – RESULTADOS DOS MÓDULO COMPLEXO



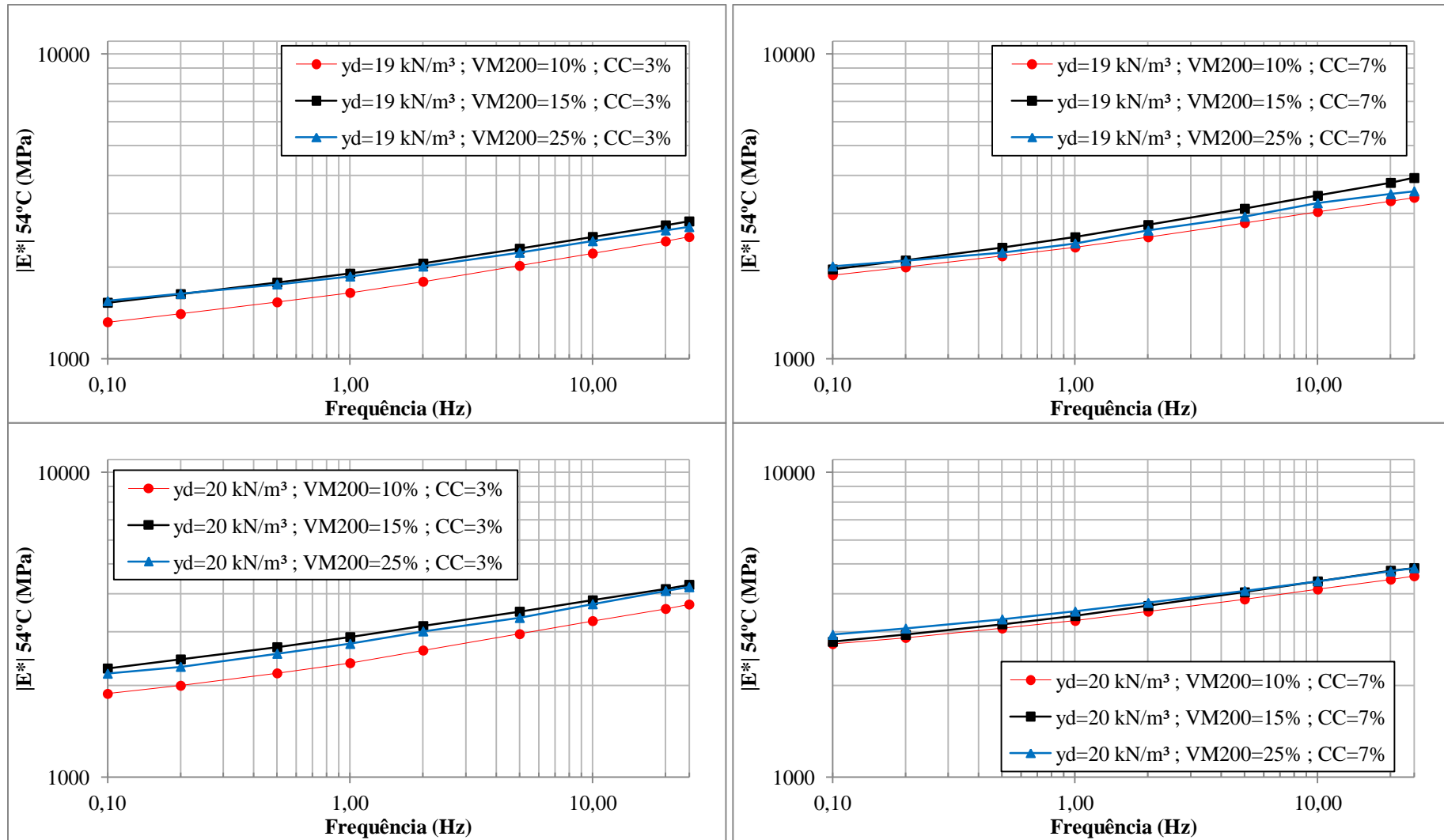
Quadro C.1 – Isotermas – Resultados dos módulo complexo para 4°C



Quadro C.2 – Isotermas – Resultados dos módulo complexo para 21°C

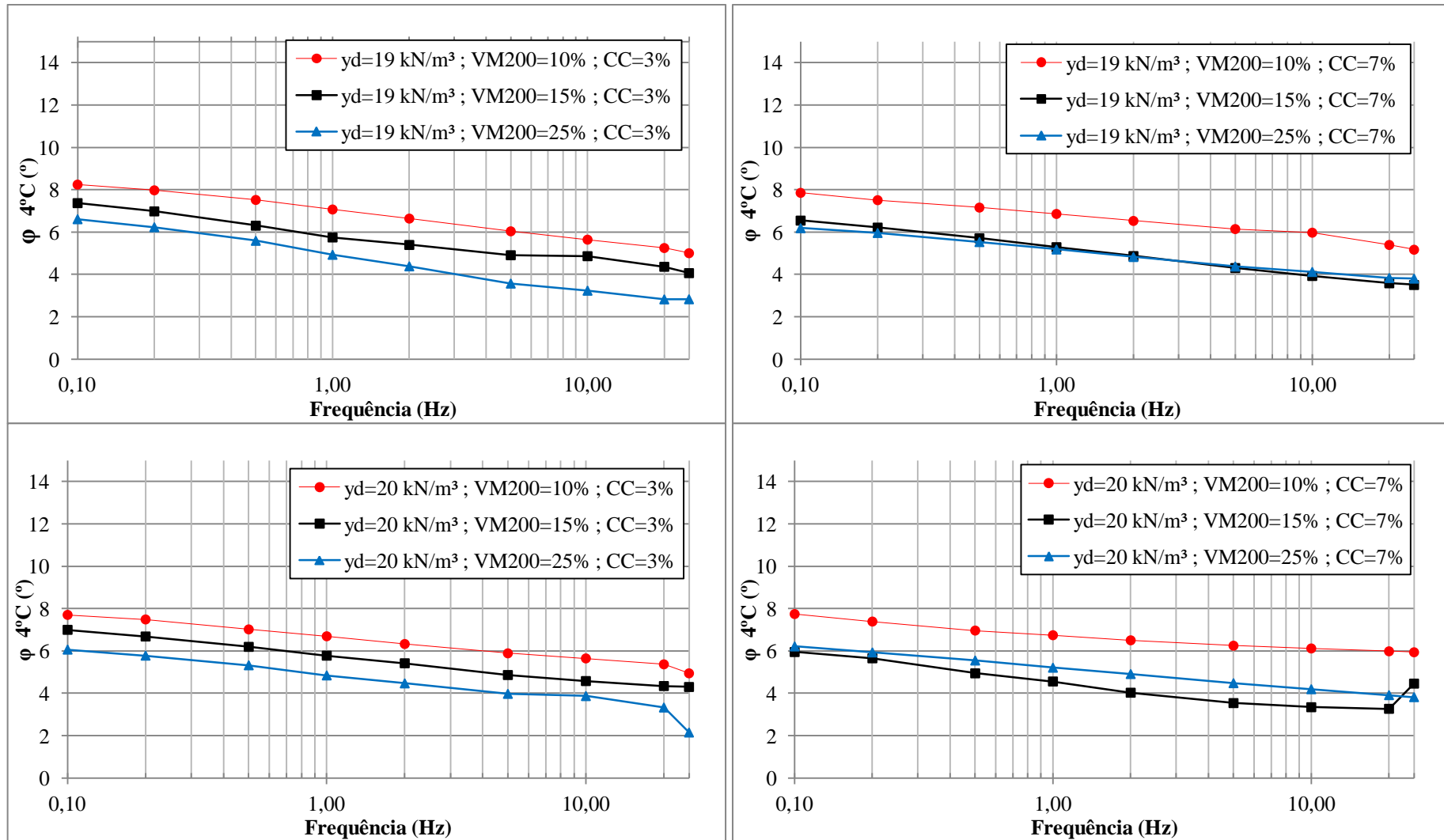


Quadro C.3 – Isotermas – Resultados dos módulo complexo para 37°C

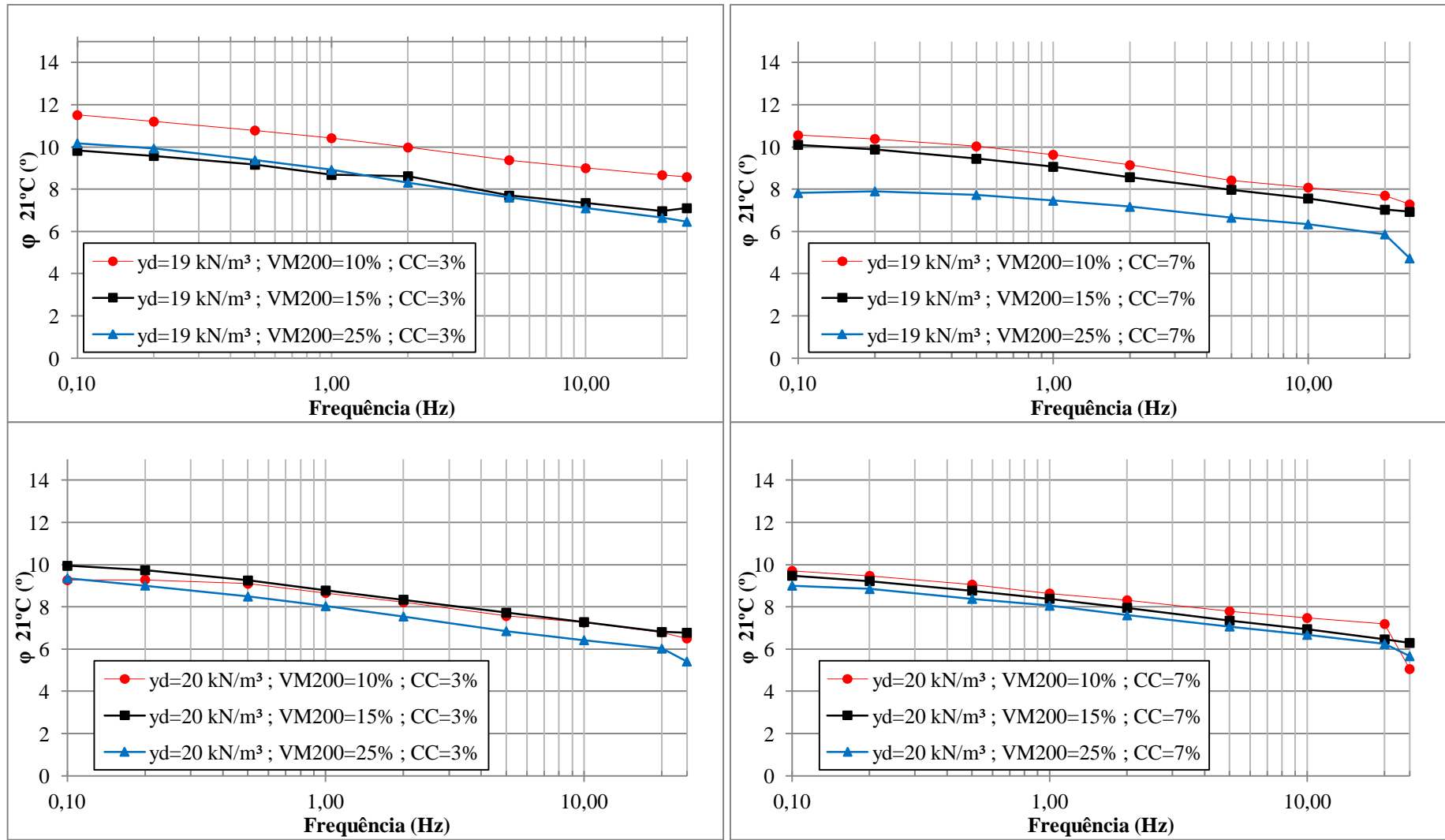


Quadro C.4 – Isotermas – Resultados dos módulo complexo para 54°C

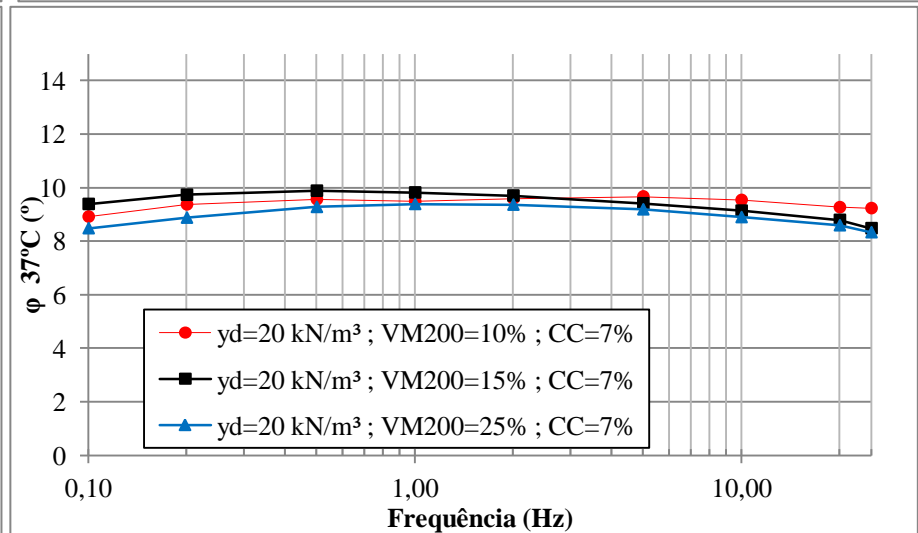
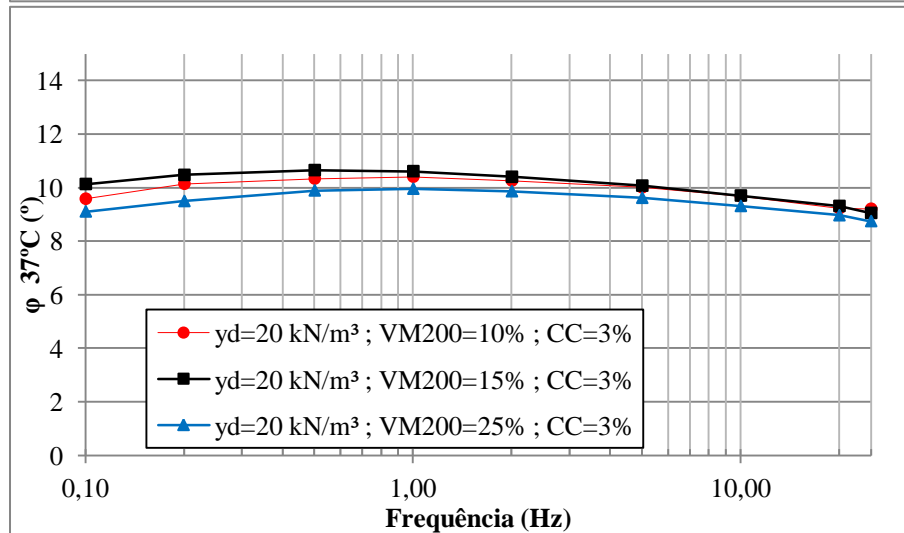
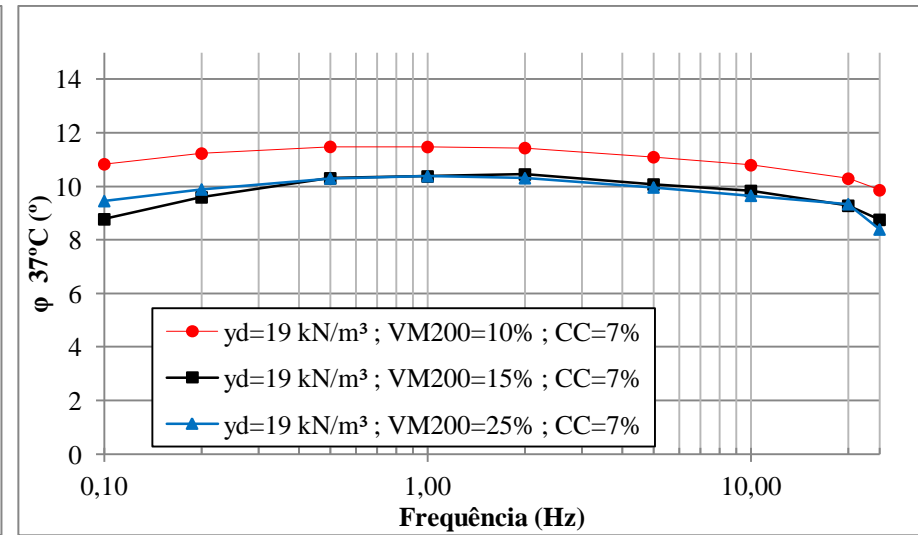
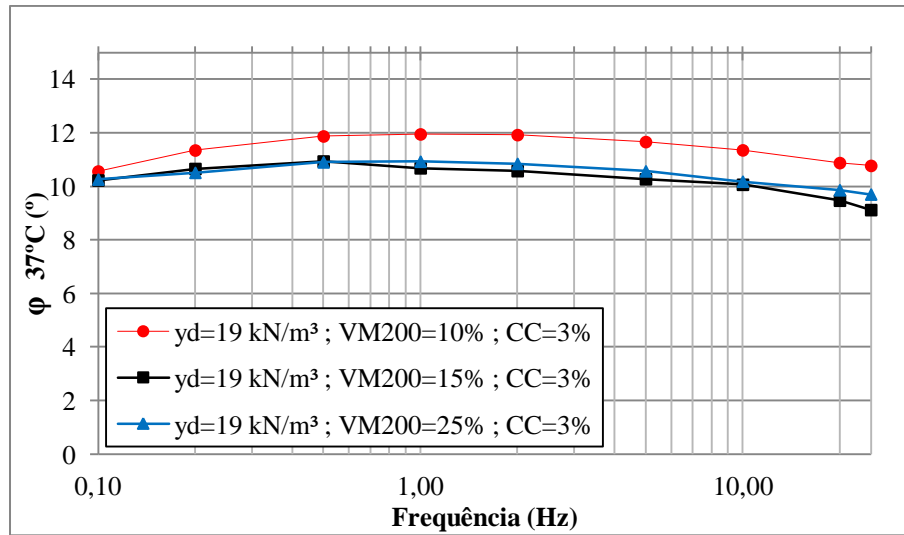
APÊNDICE D: ISOTERMAS – RESULTADOS DO ÂNGULO DE FASE



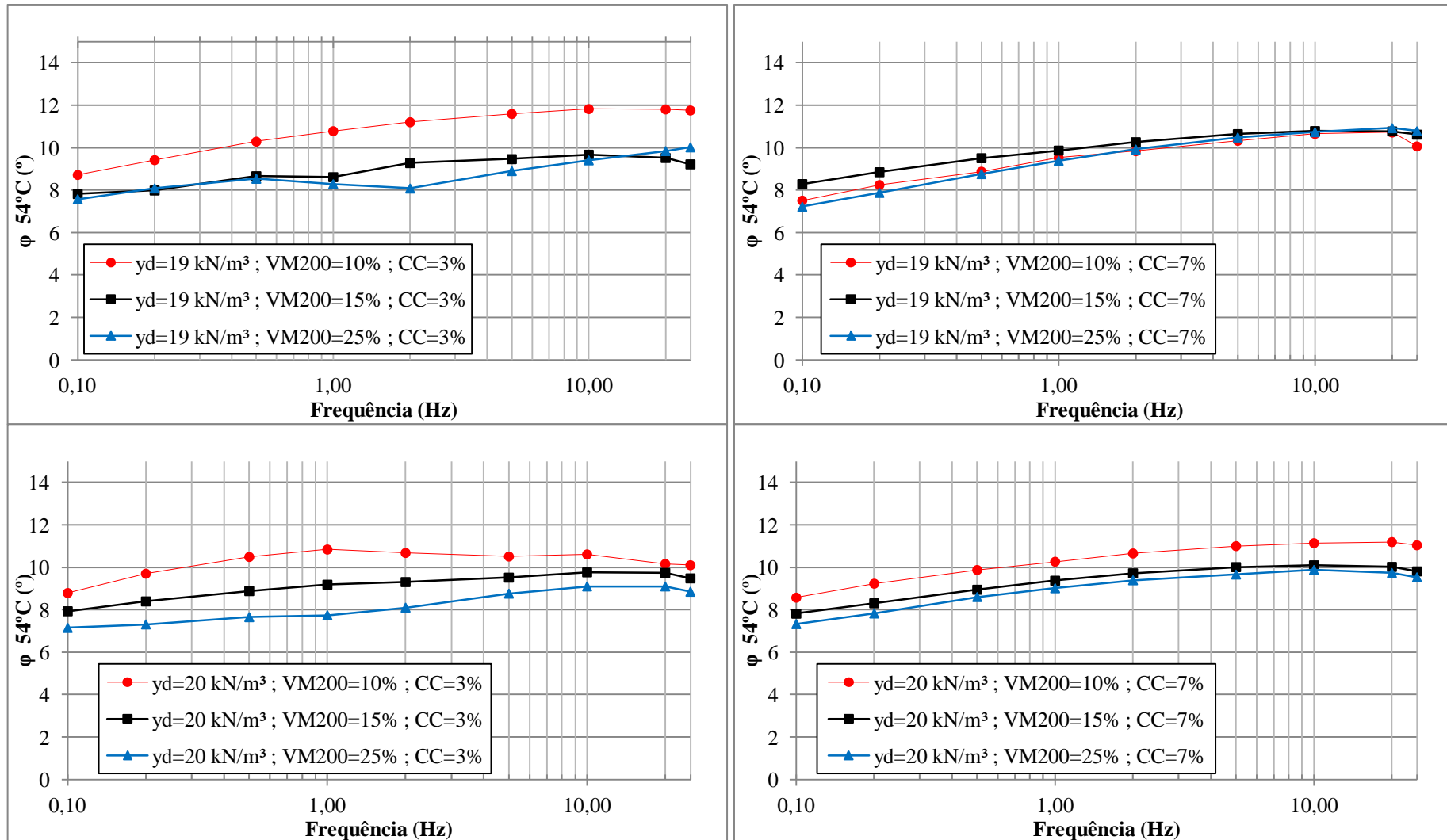
Quadro D.1 – Isotermas – Resultados do ângulo de fase para 4°C



Quadro D.2 – Isotermas – Resultados do ângulo de fase para 21°C

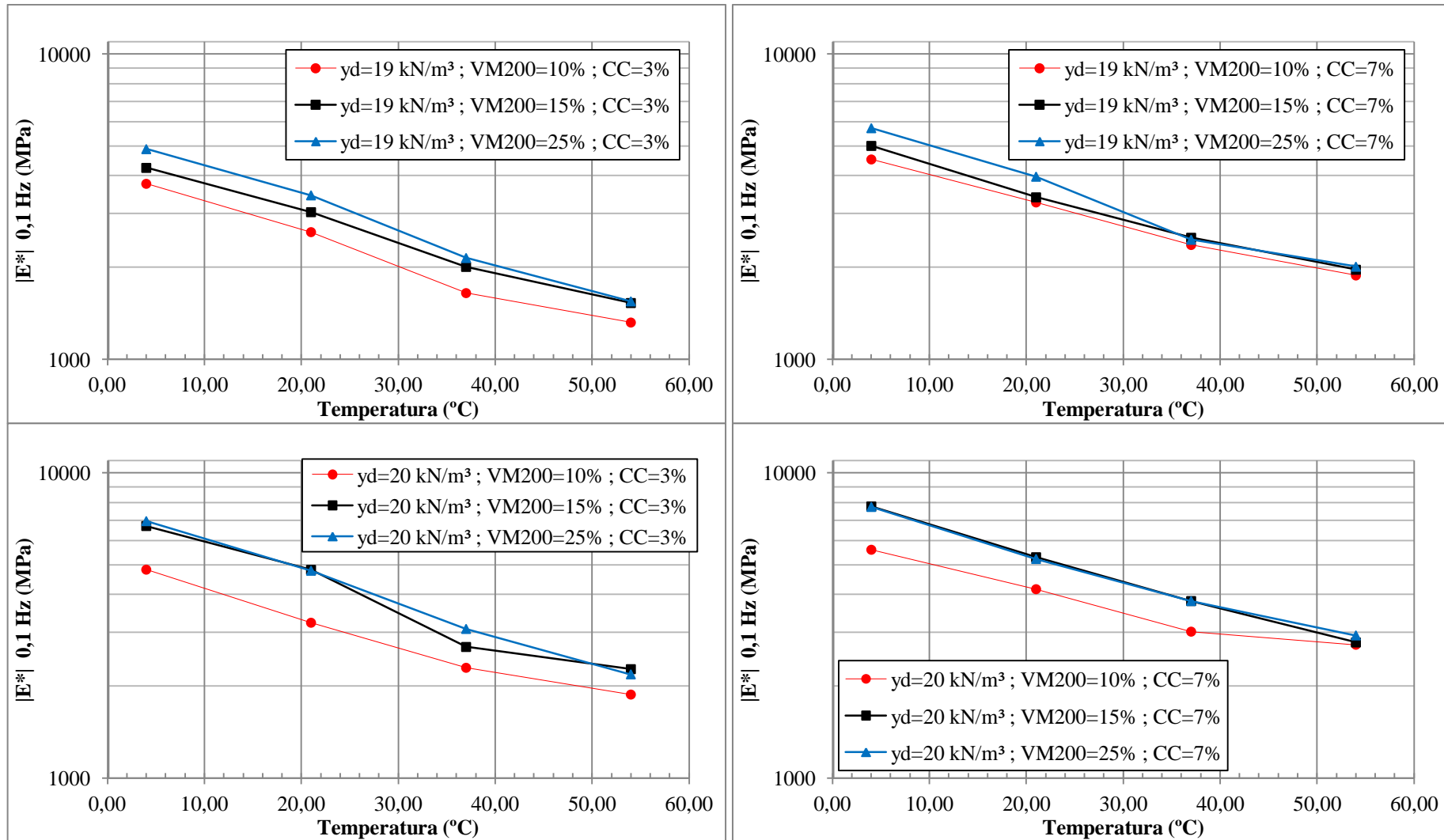


Quadro D.3 – Isotermas – Resultados do ângulo de fase para 37°C

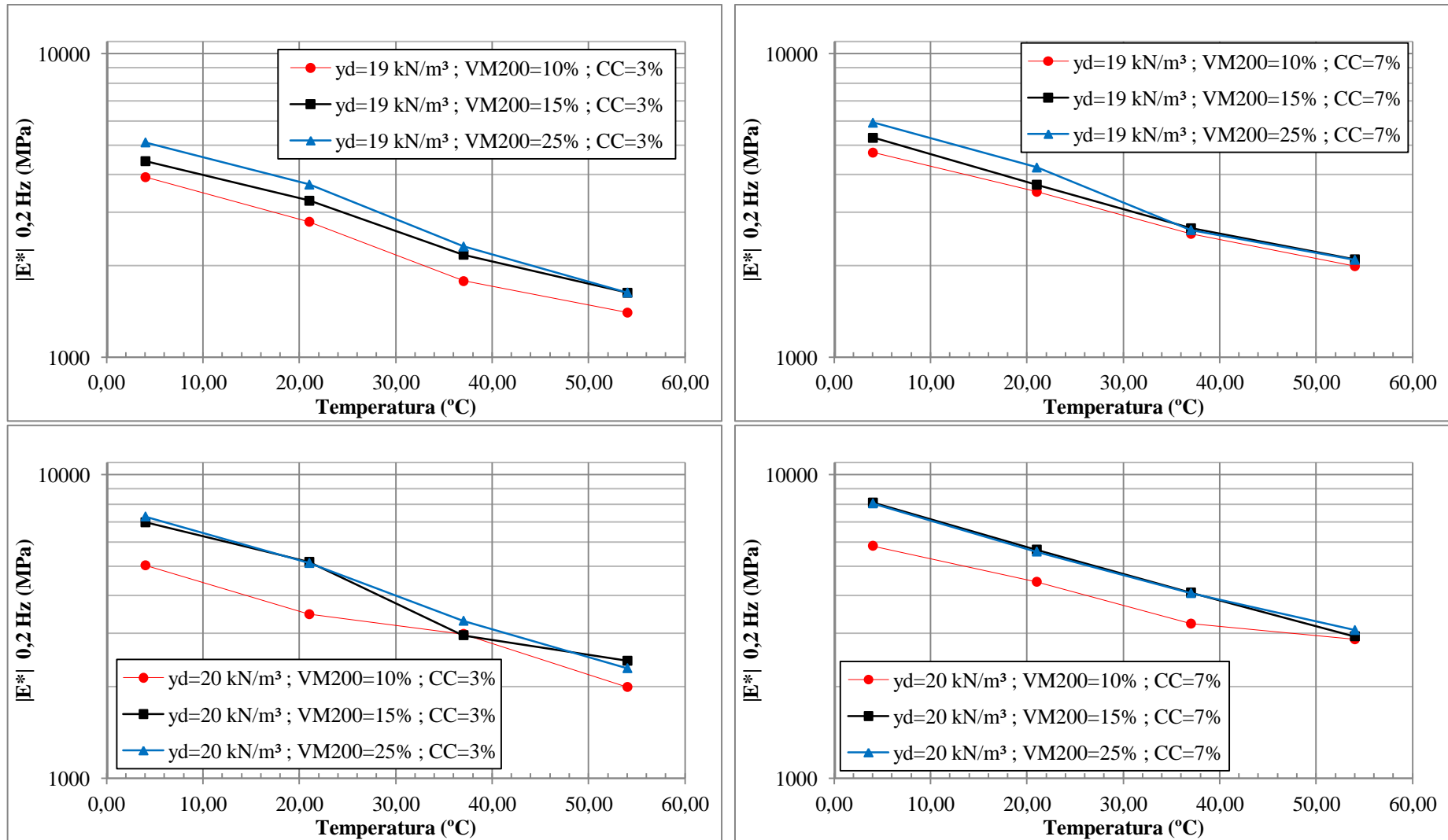


Quadro D.4 – Isotermas – Resultados do ângulo de fase para 54°C

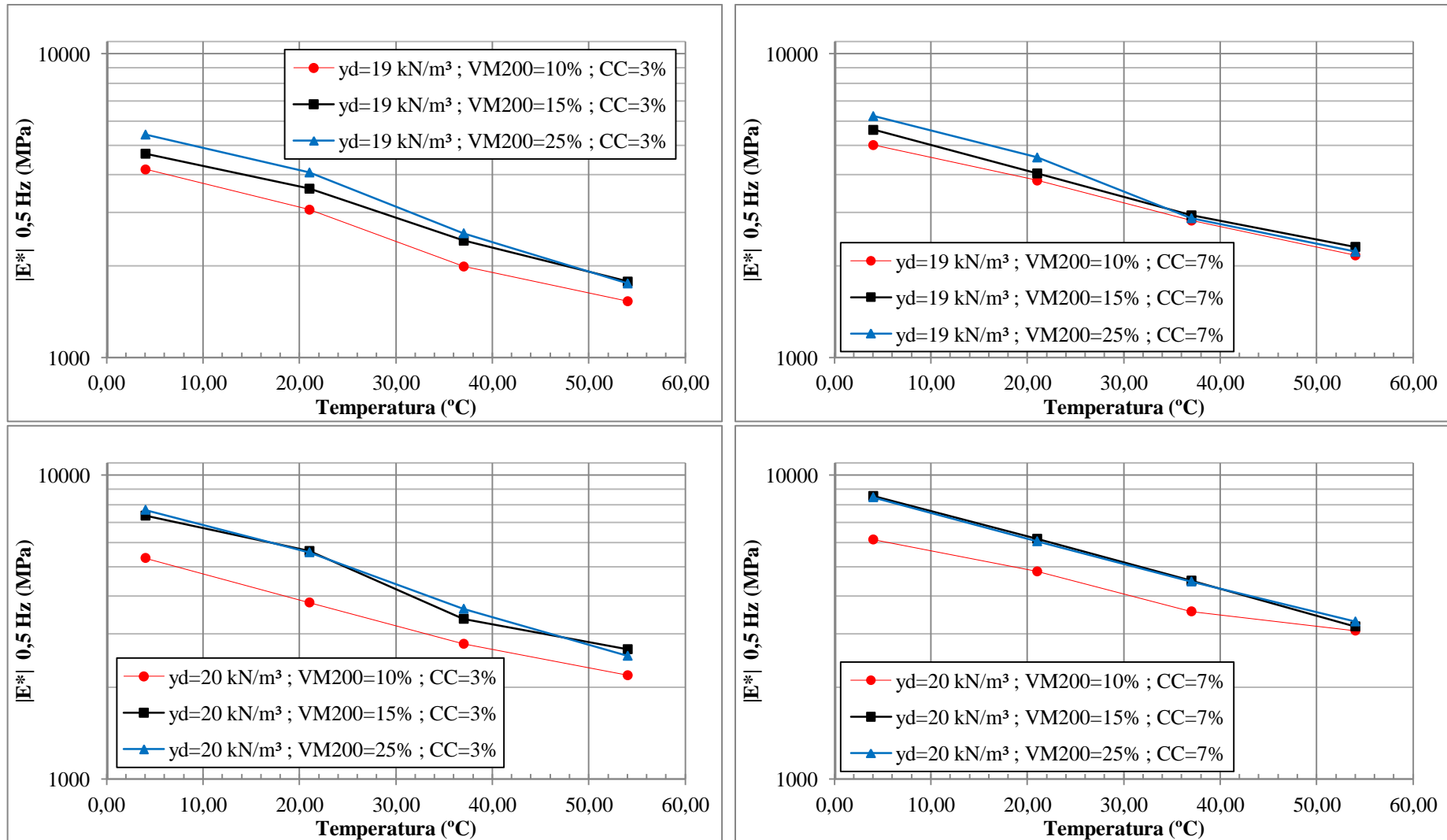
APÊNDICE E: ISOCRONAS – RESULTADOS DO MÓDULO COMPLEXO



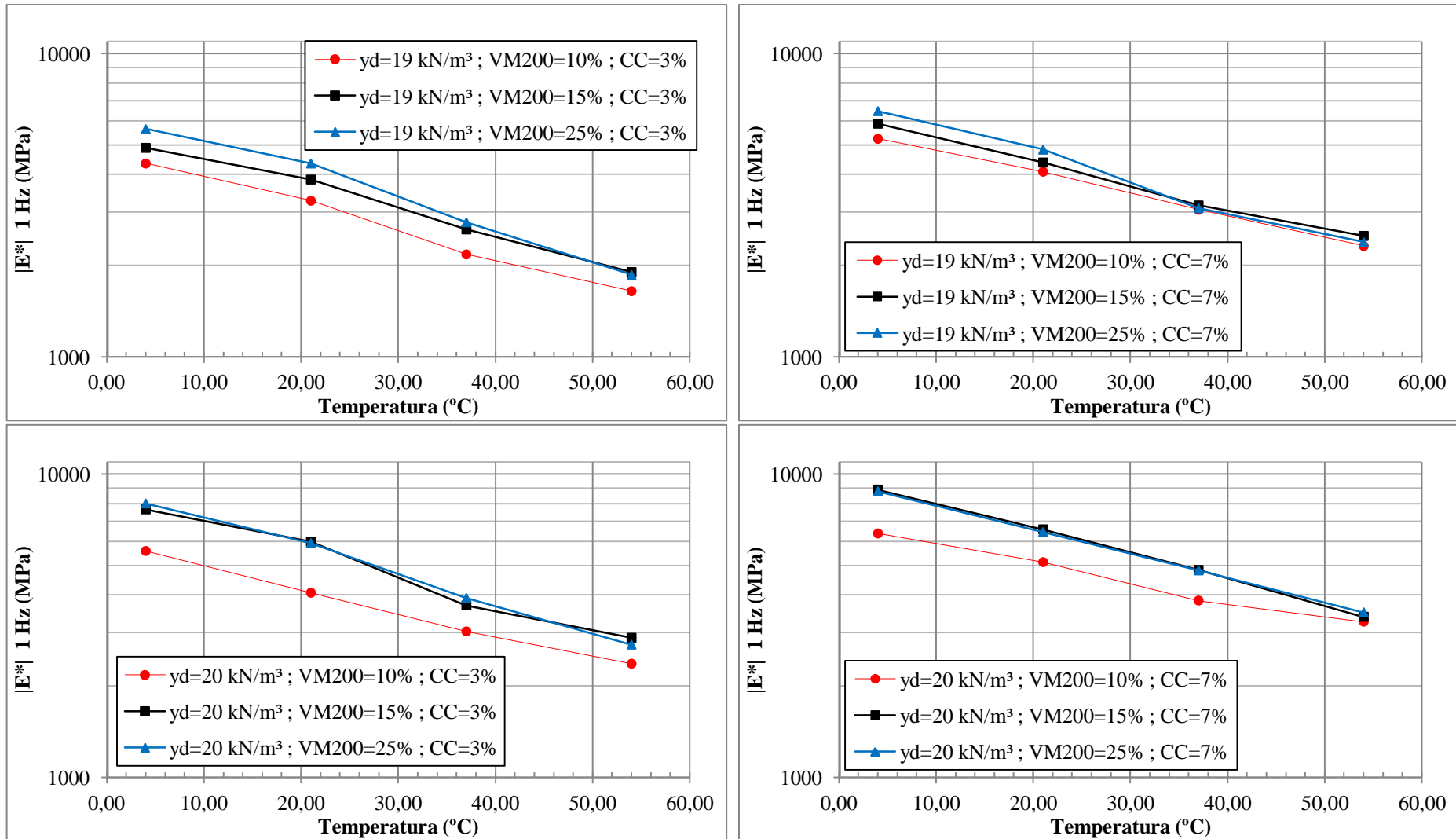
Quadro E.1 – Isocronas – Resultados do módulo complexo para a frequência de 0,1 Hz



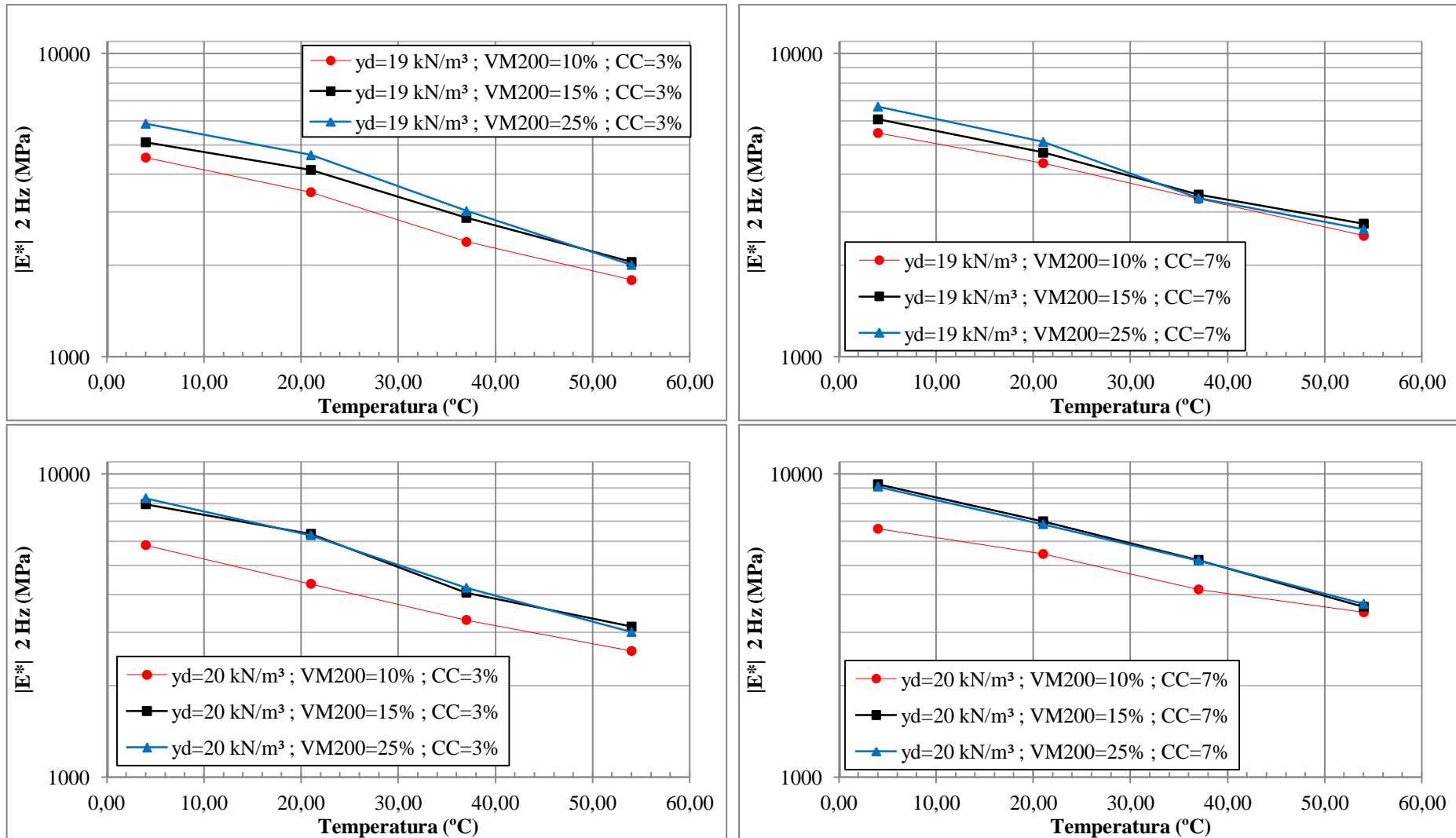
Quadro E.2 – Isocronas – Resultados do módulo complexo para a frequência de 0,2 Hz



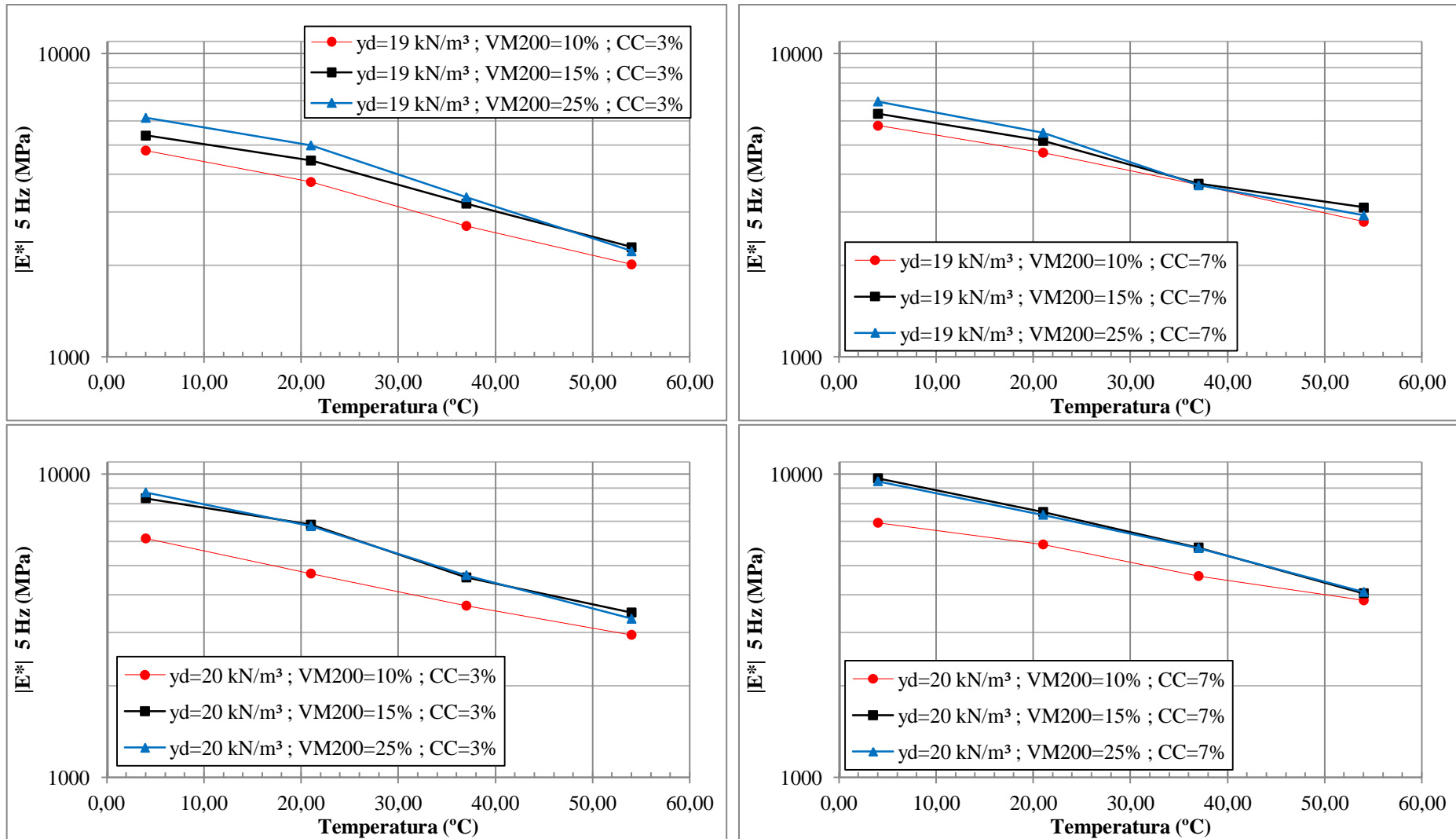
Quadro E.3 – Isocronas – Resultados do módulo complexo para a frequência de 0,5 Hz



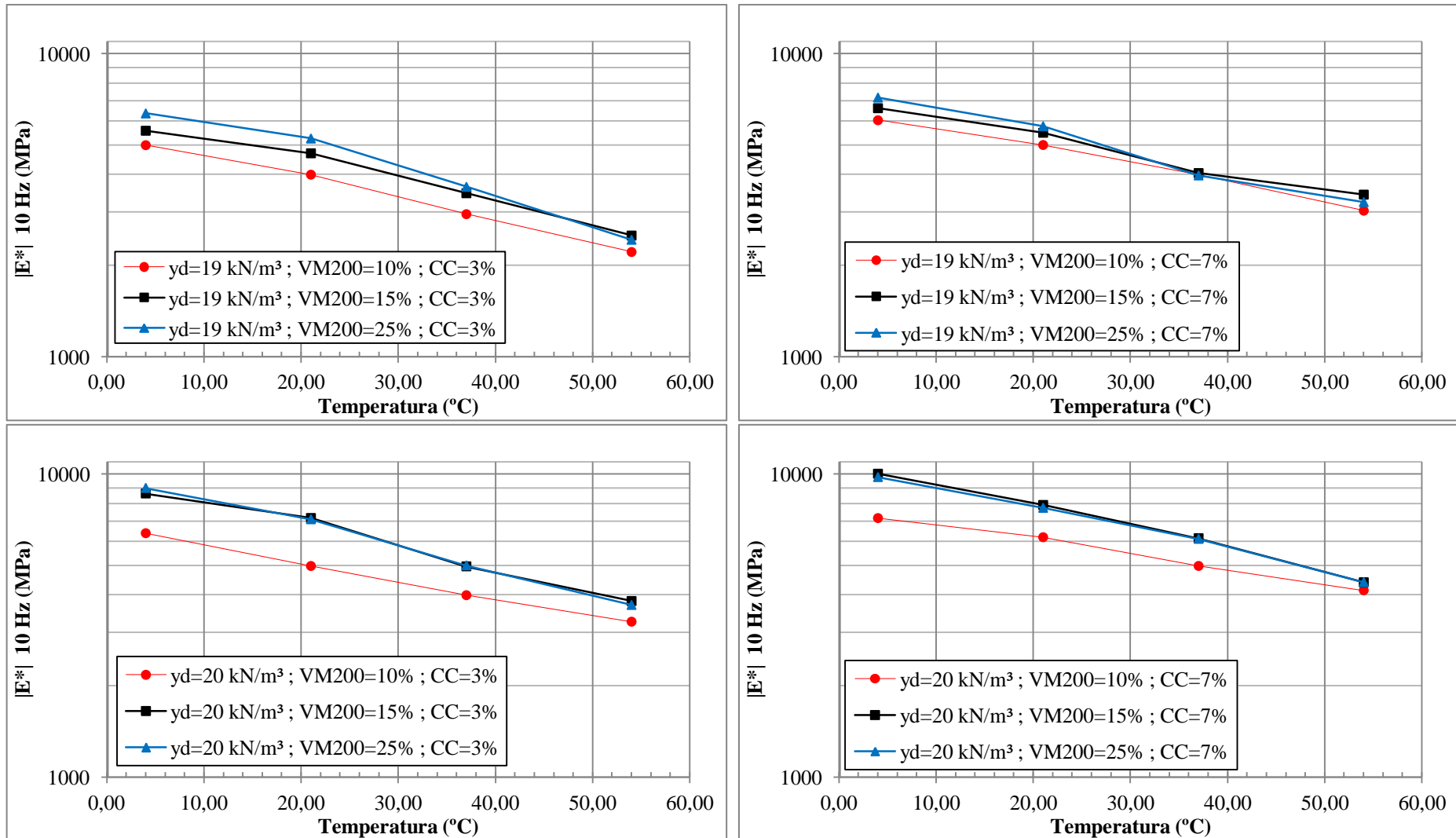
Quadro E.4 – Isocronas – Resultados do módulo complexo para a frequência 1 Hz



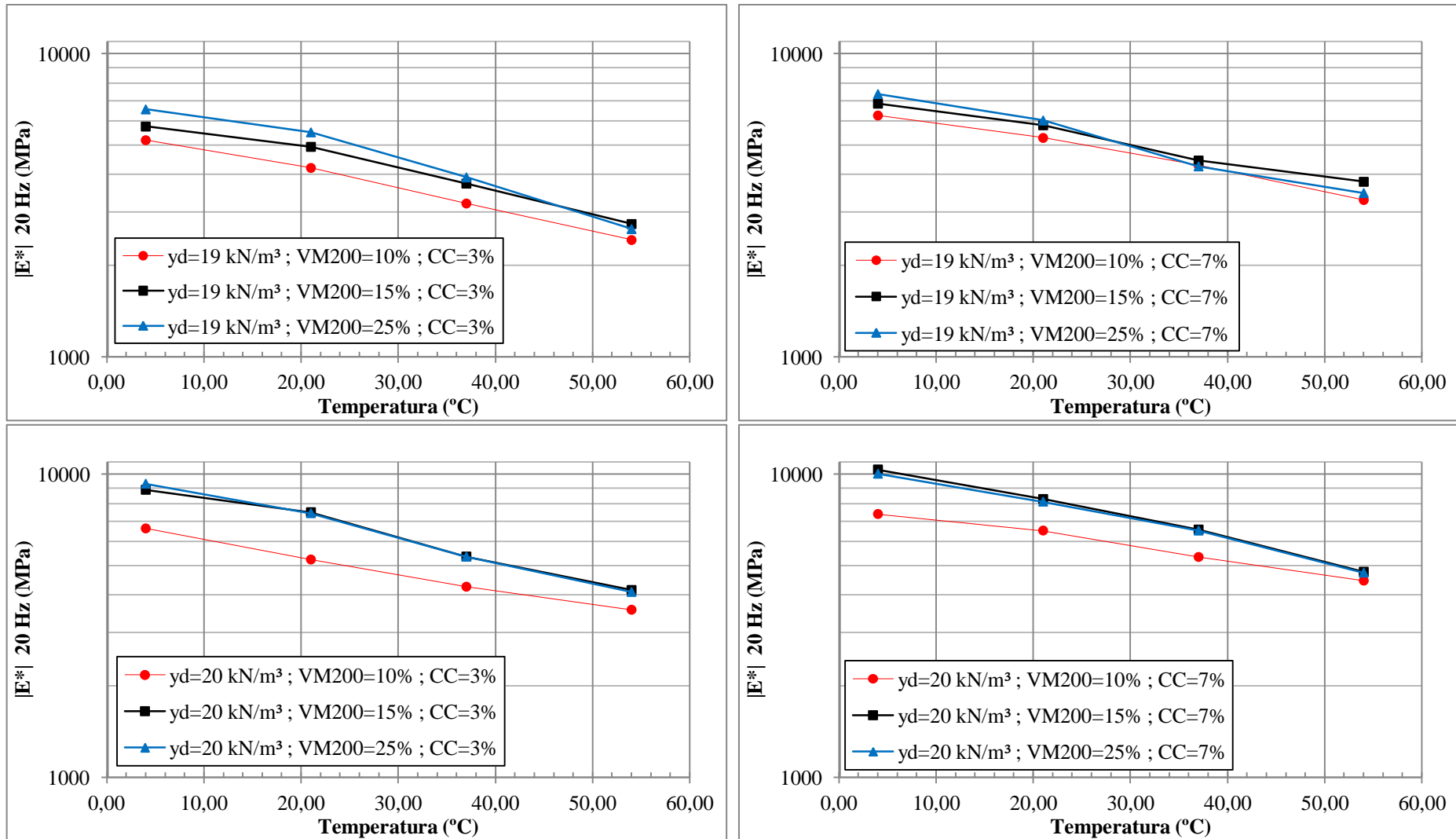
Quadro E.5 – Isocronas – Resultados do módulo complexo para a frequência 2 Hz



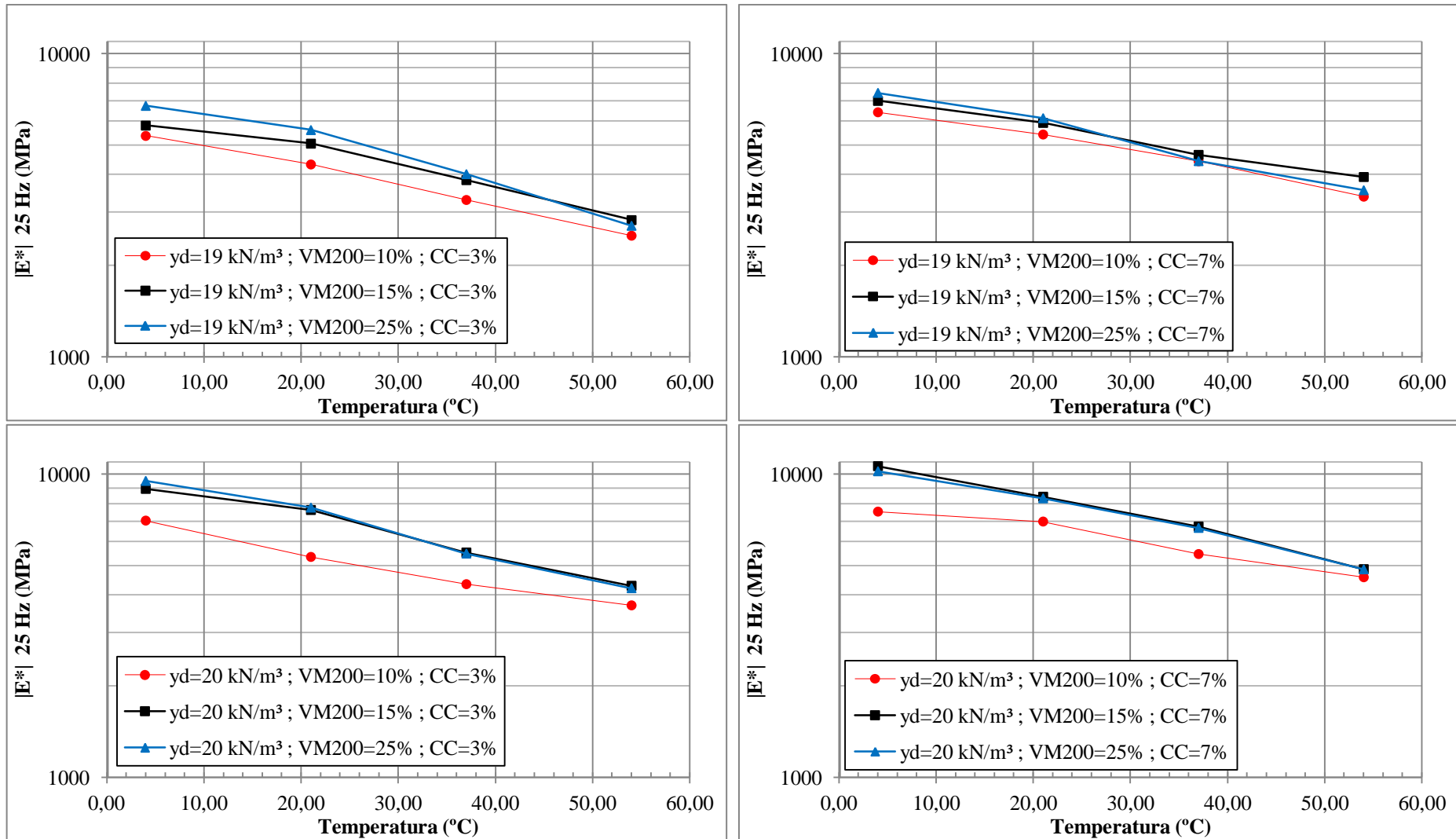
Quadro E.6 – Isocronas – Resultados do módulo complexo para a frequência 5 Hz



Quadro E.7 – Isocronas – Resultados do módulo complexo para a frequência 10 Hz

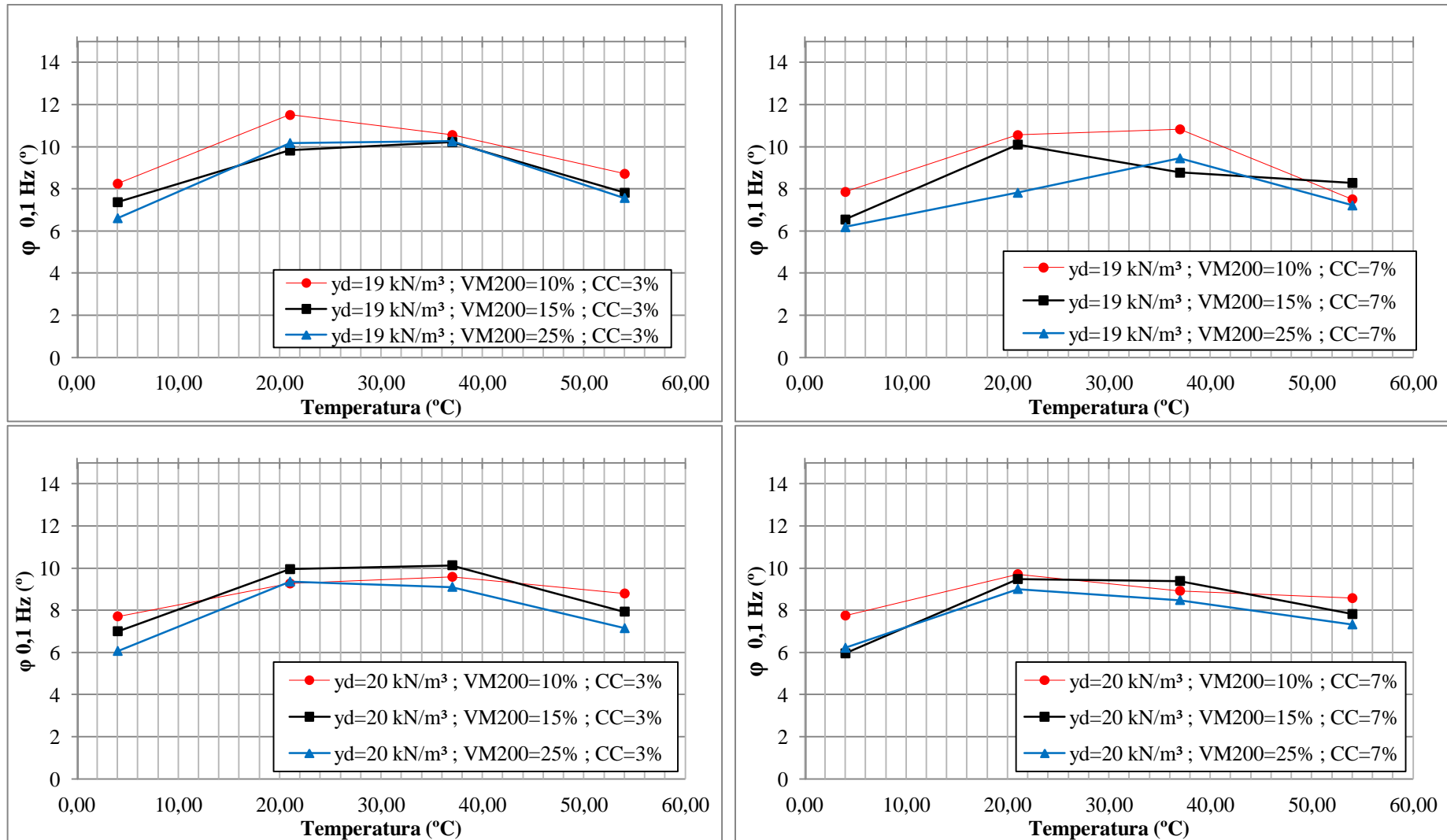


Quadro E.8 – Isocronas – Resultados do módulo complexo para a frequência 20 Hz

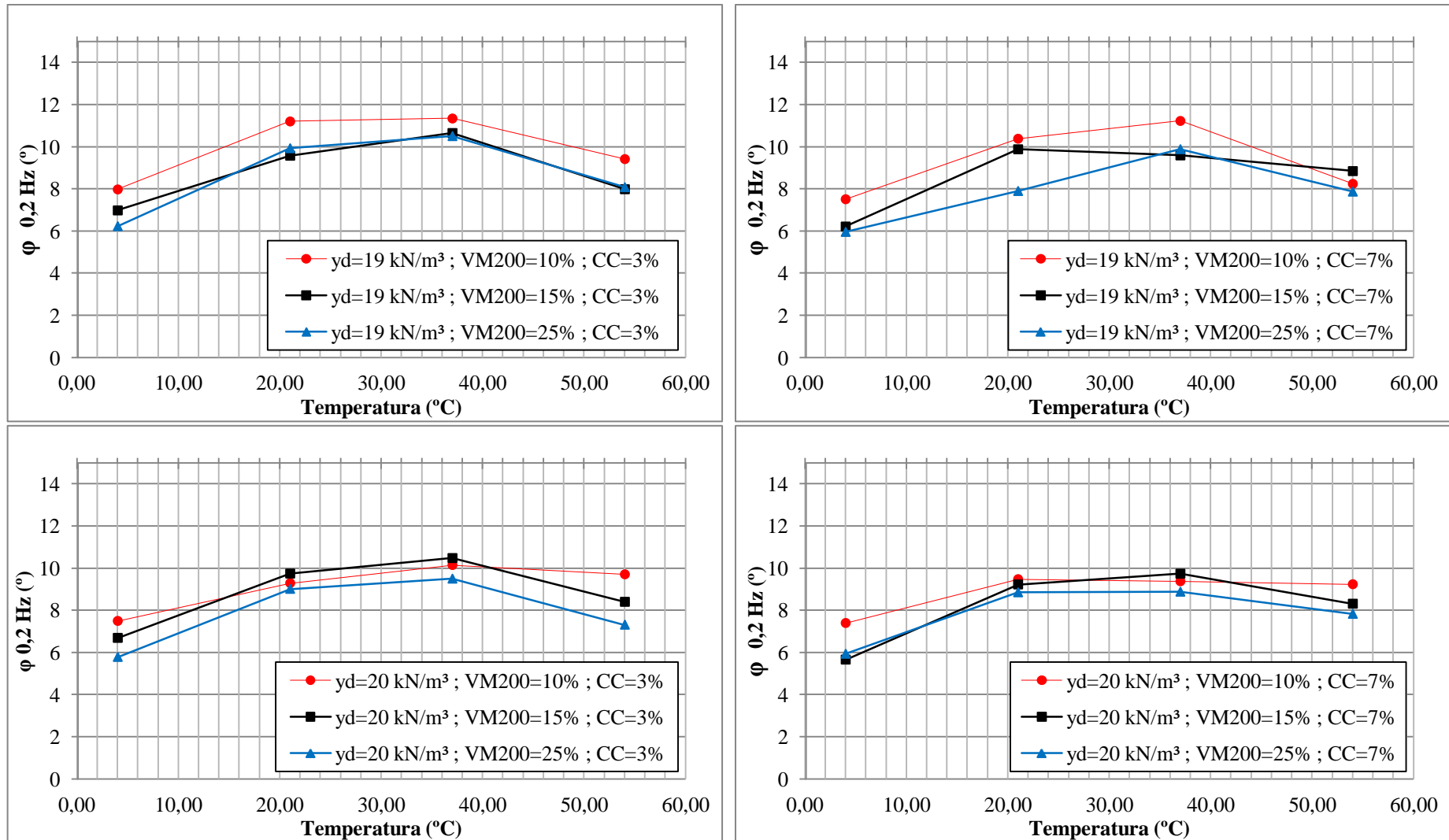


Quadro E.9 – Isocronas – Resultados do módulo complexo para a frequência 25 Hz

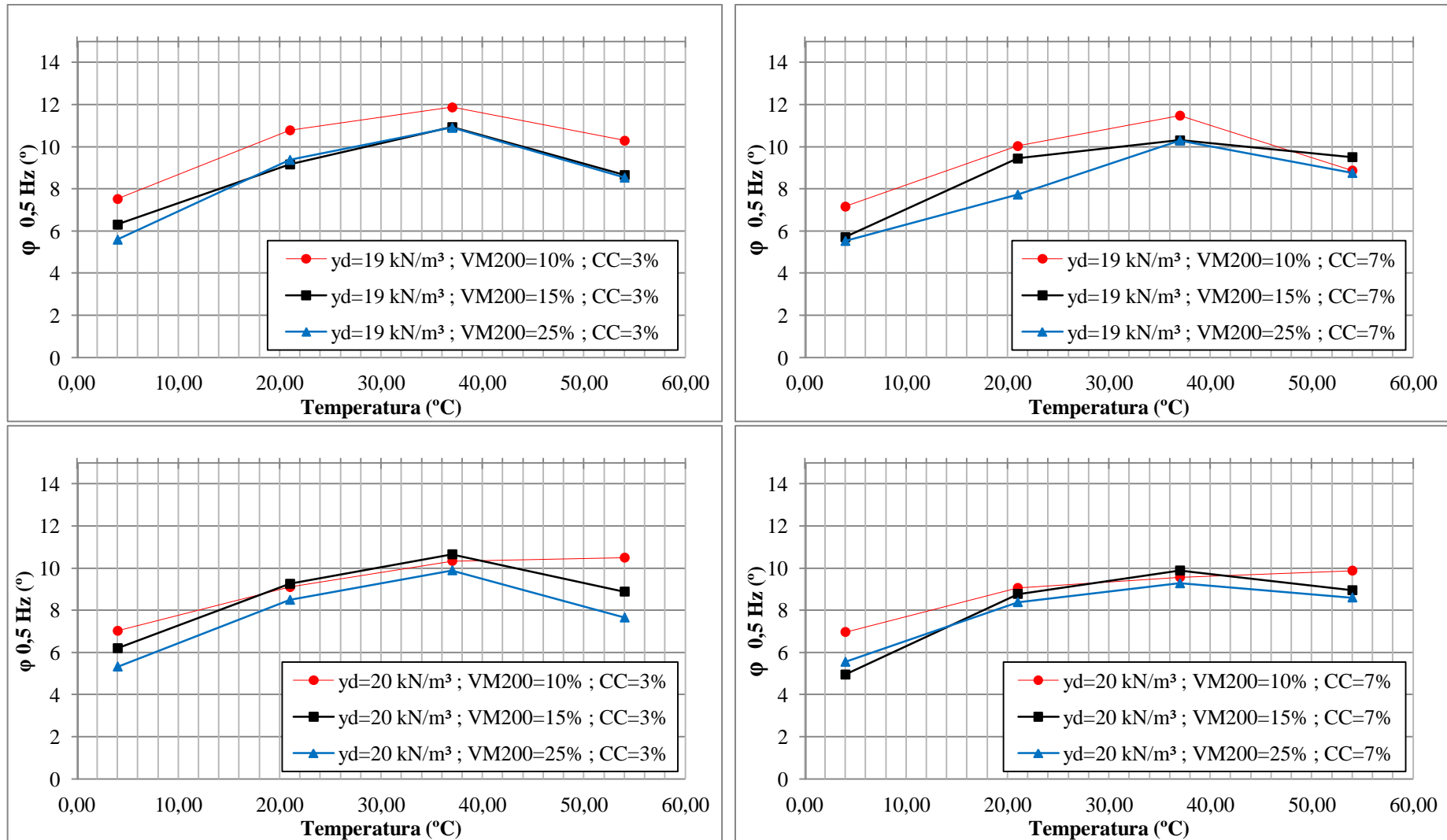
APÊNDICE F: ISOCRONAS – RESULTADOS DO ÂNGULO DE FASE



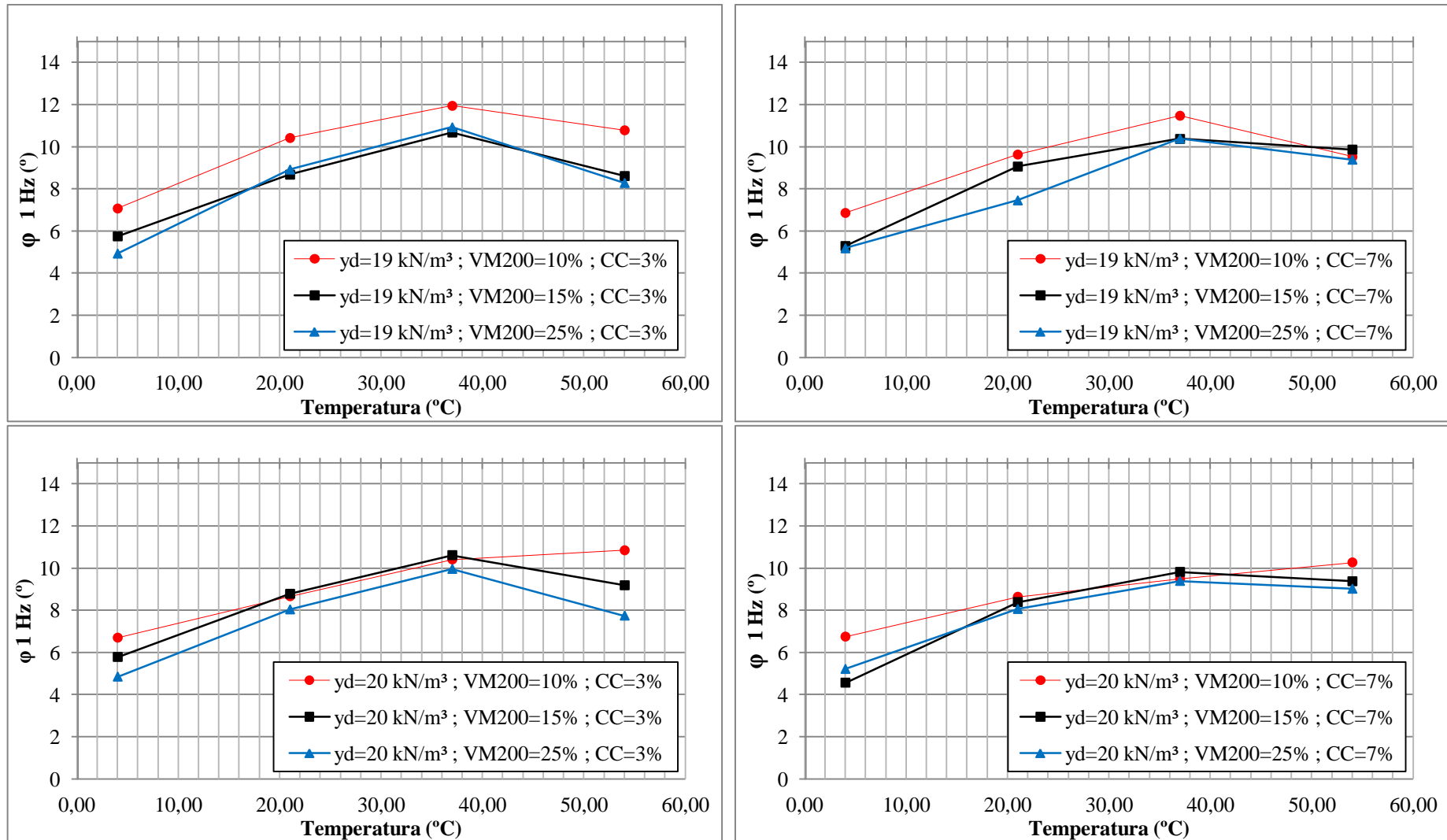
Quadro F.1 – Isocronas – Resultados do ângulo de fase para a frequência de 0,1 Hz



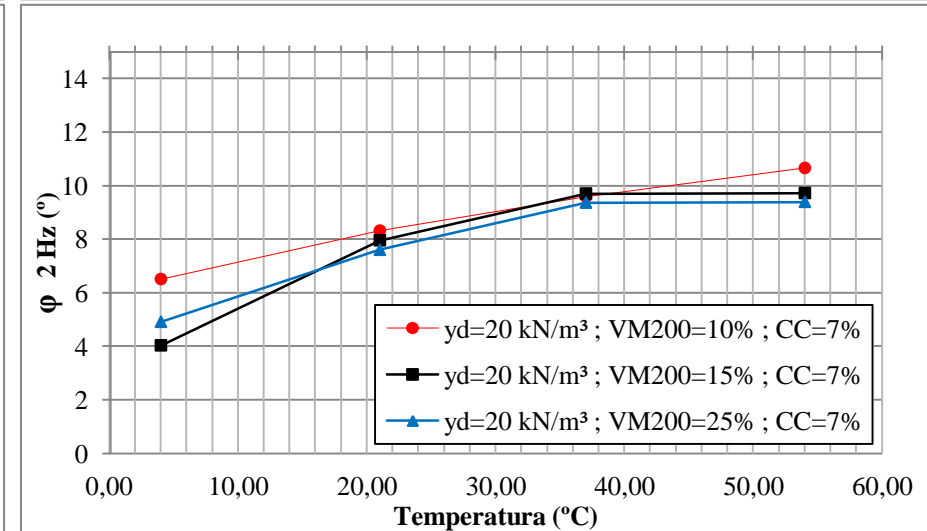
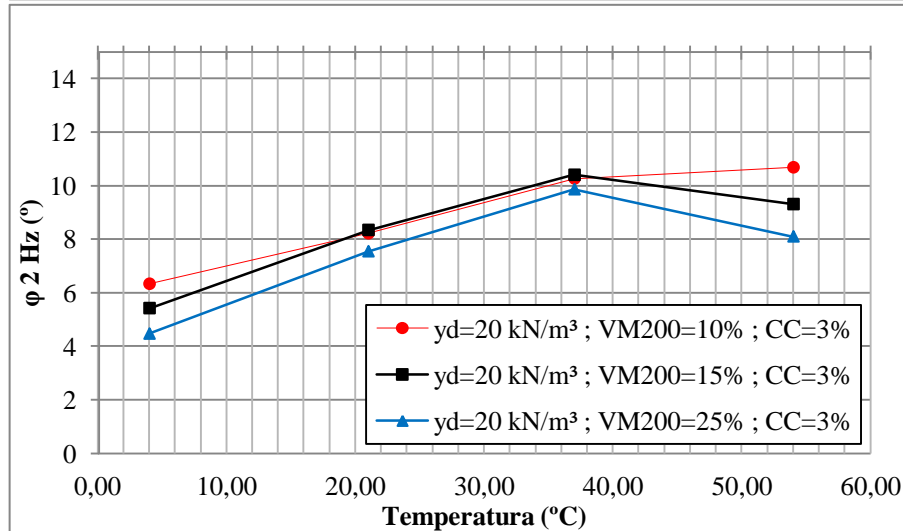
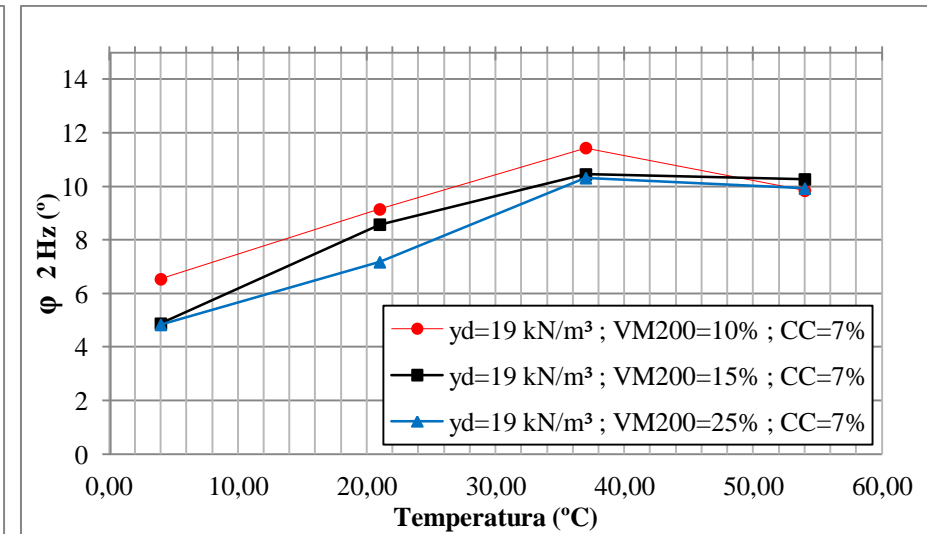
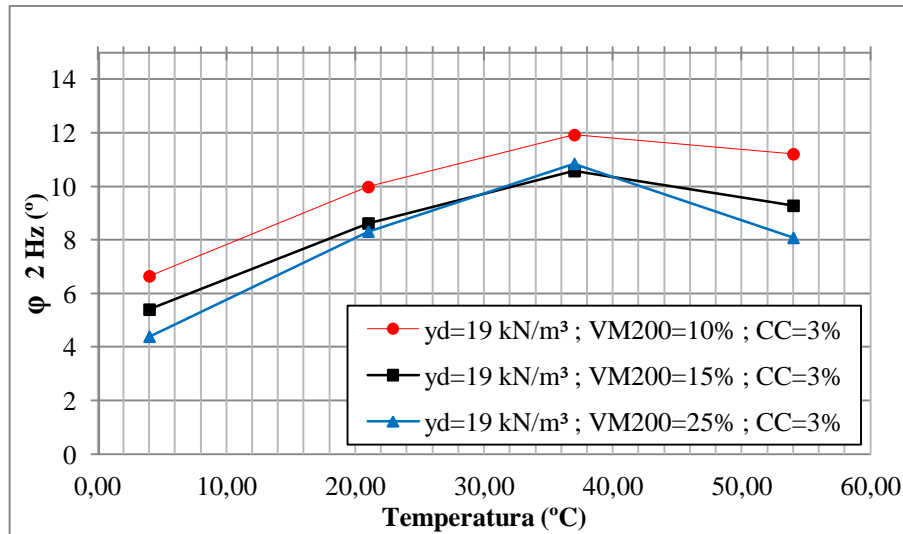
Quadro F.2 – Isocronas – Resultados do ângulo de fase para a frequência de 0,2 Hz



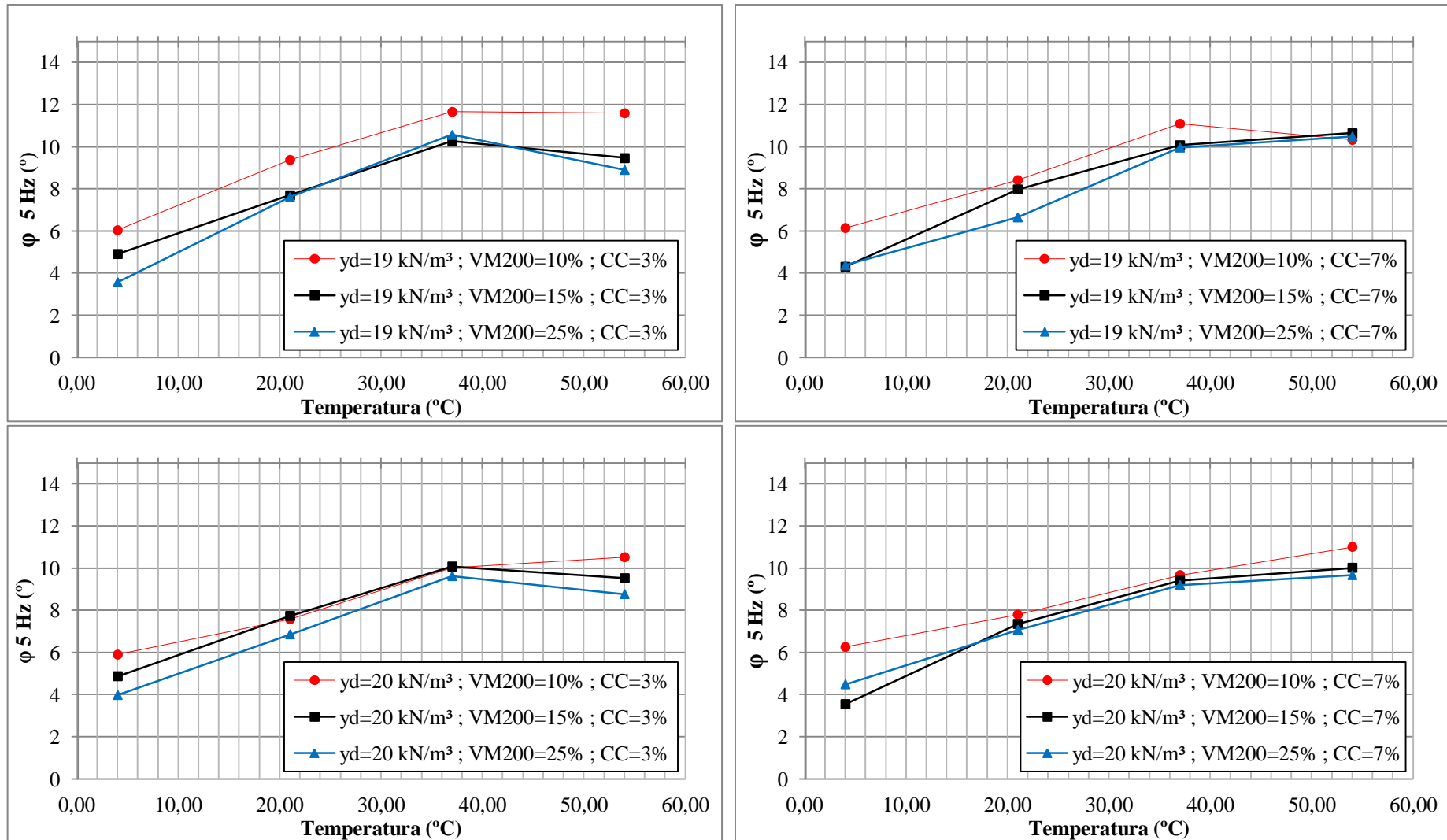
Quadro F.3 – Isocronas – Resultados do ângulo de fase para a frequência de 0,5 Hz



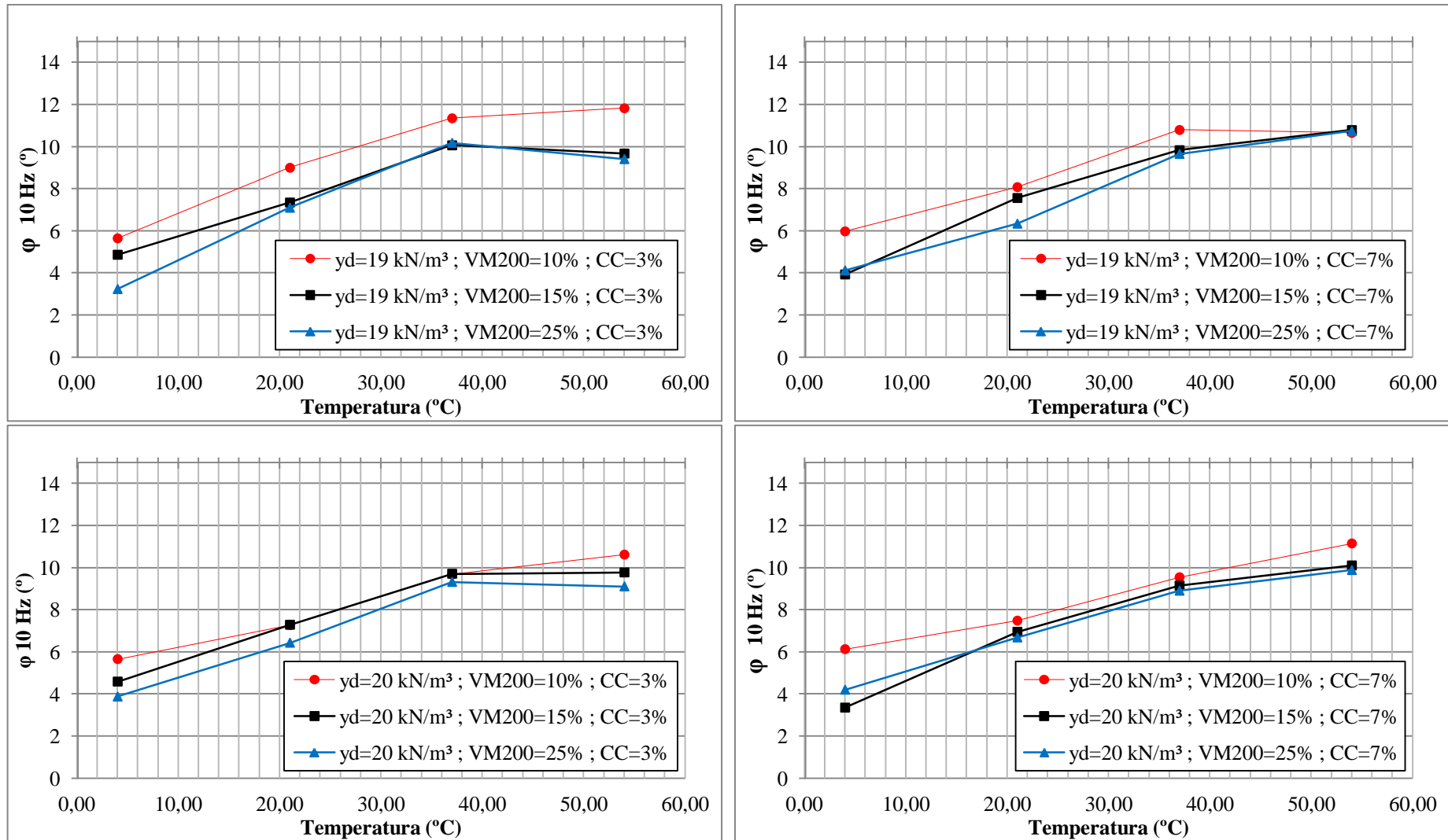
Quadro F.4 – Isocronas – Resultados do ângulo de fase para a frequência de 1 Hz



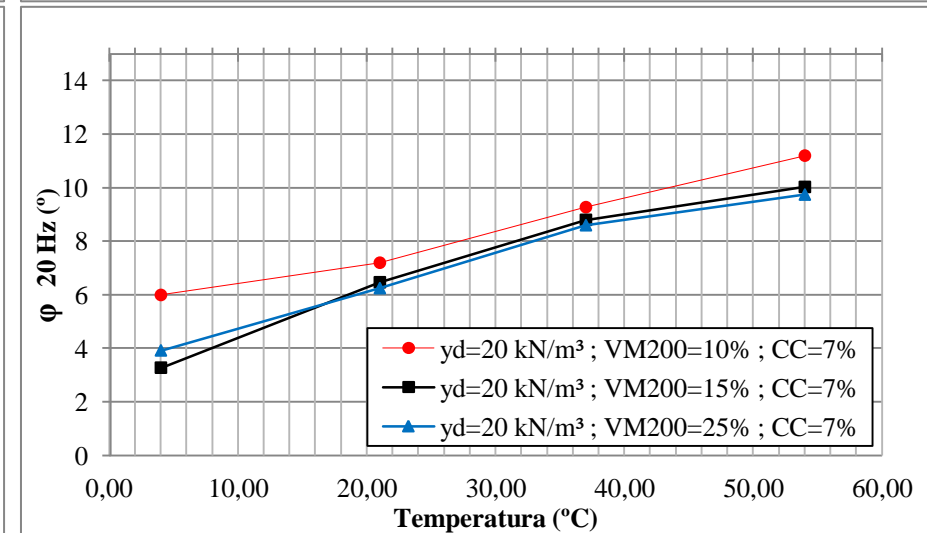
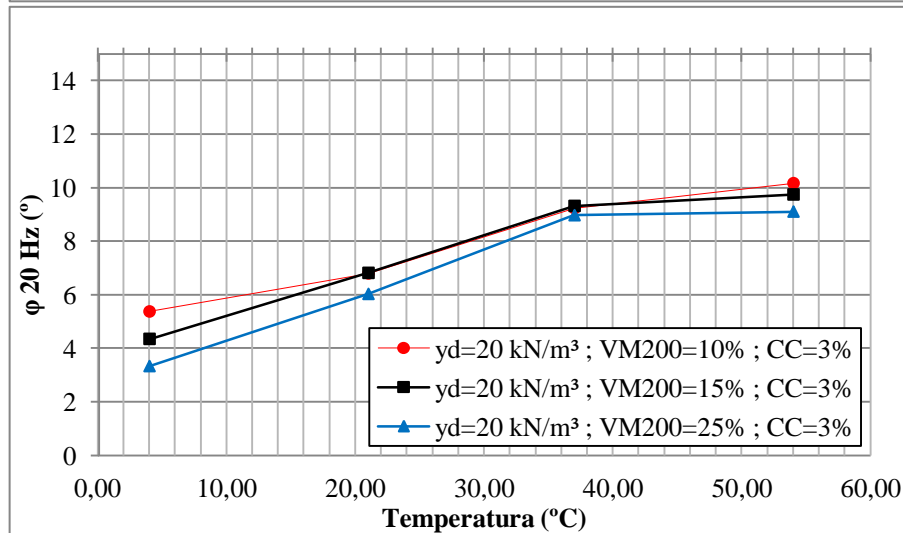
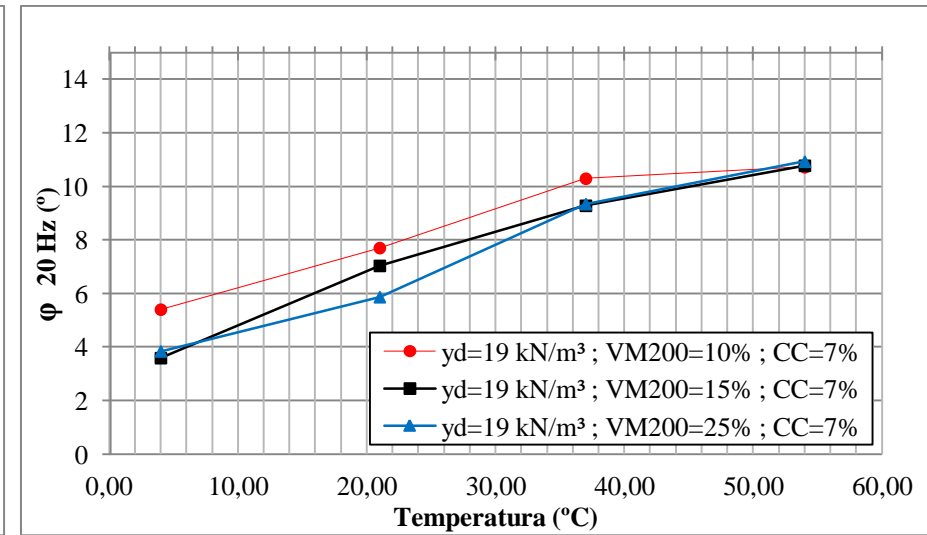
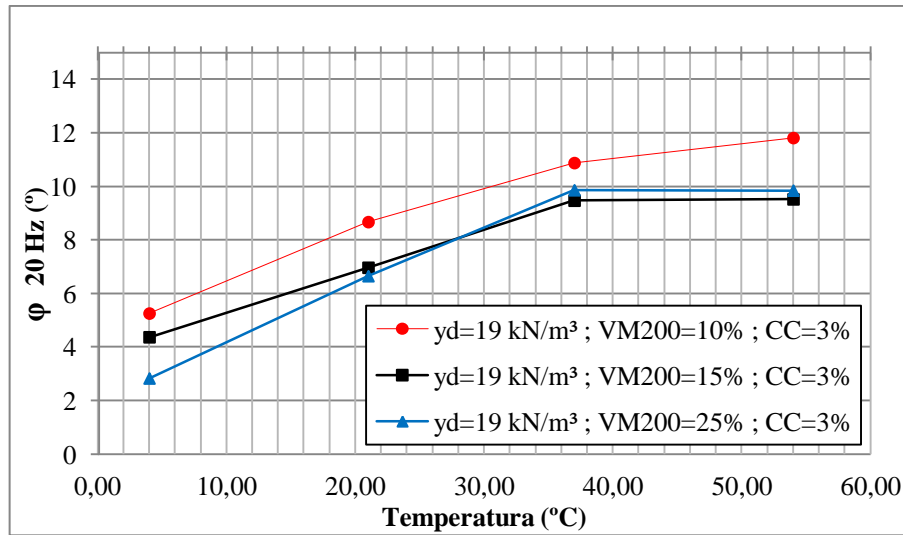
Quadro F.5 – Isocronas – Resultados do ângulo de fase para a frequência de 2 Hz



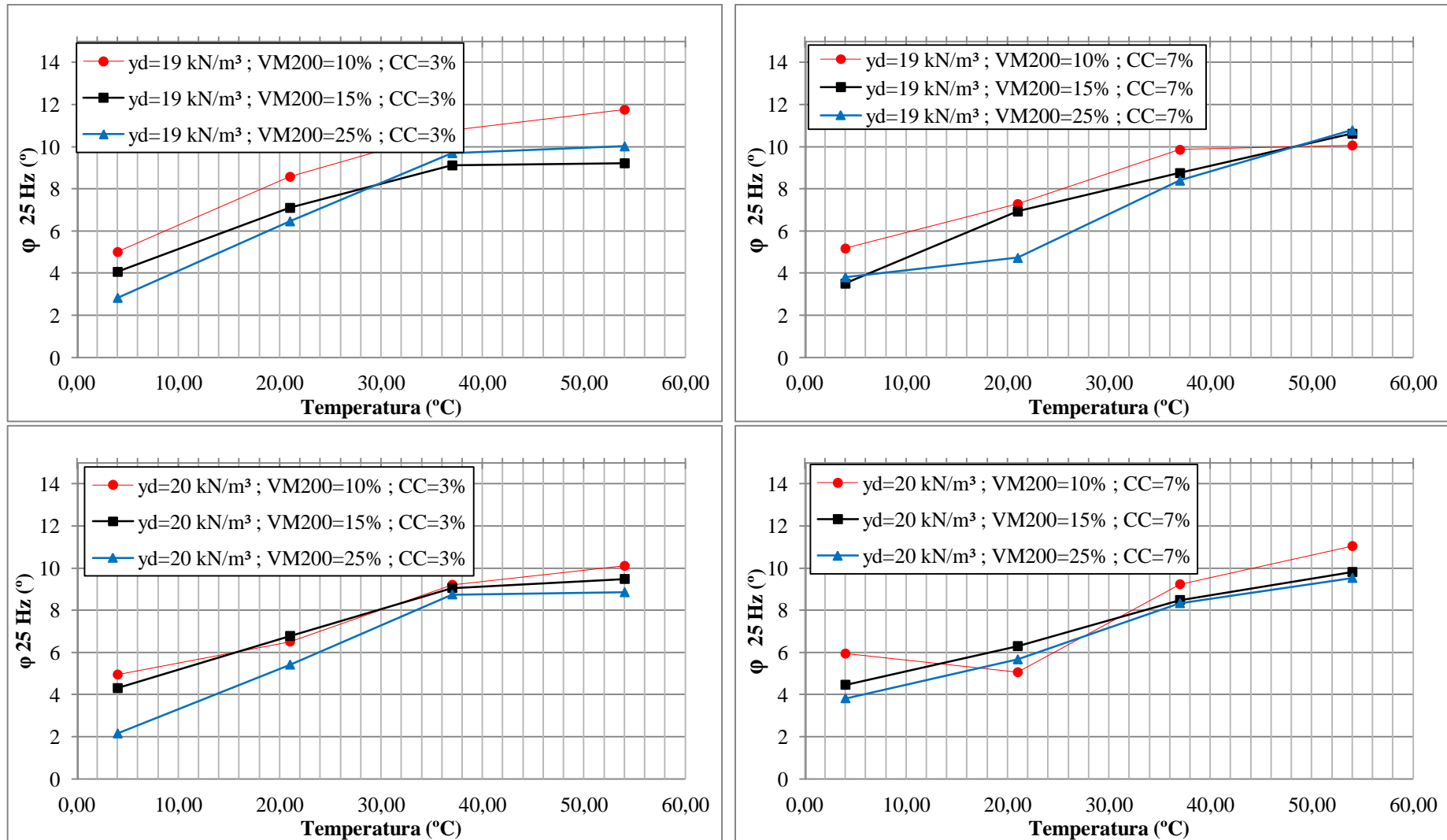
Quadro F.6 – Isocronas – Resultados do ângulo de fase para a frequência de 5 Hz



Quadro F.7 – Isocronas – Resultados do ângulo de fase para a frequência de 10 Hz

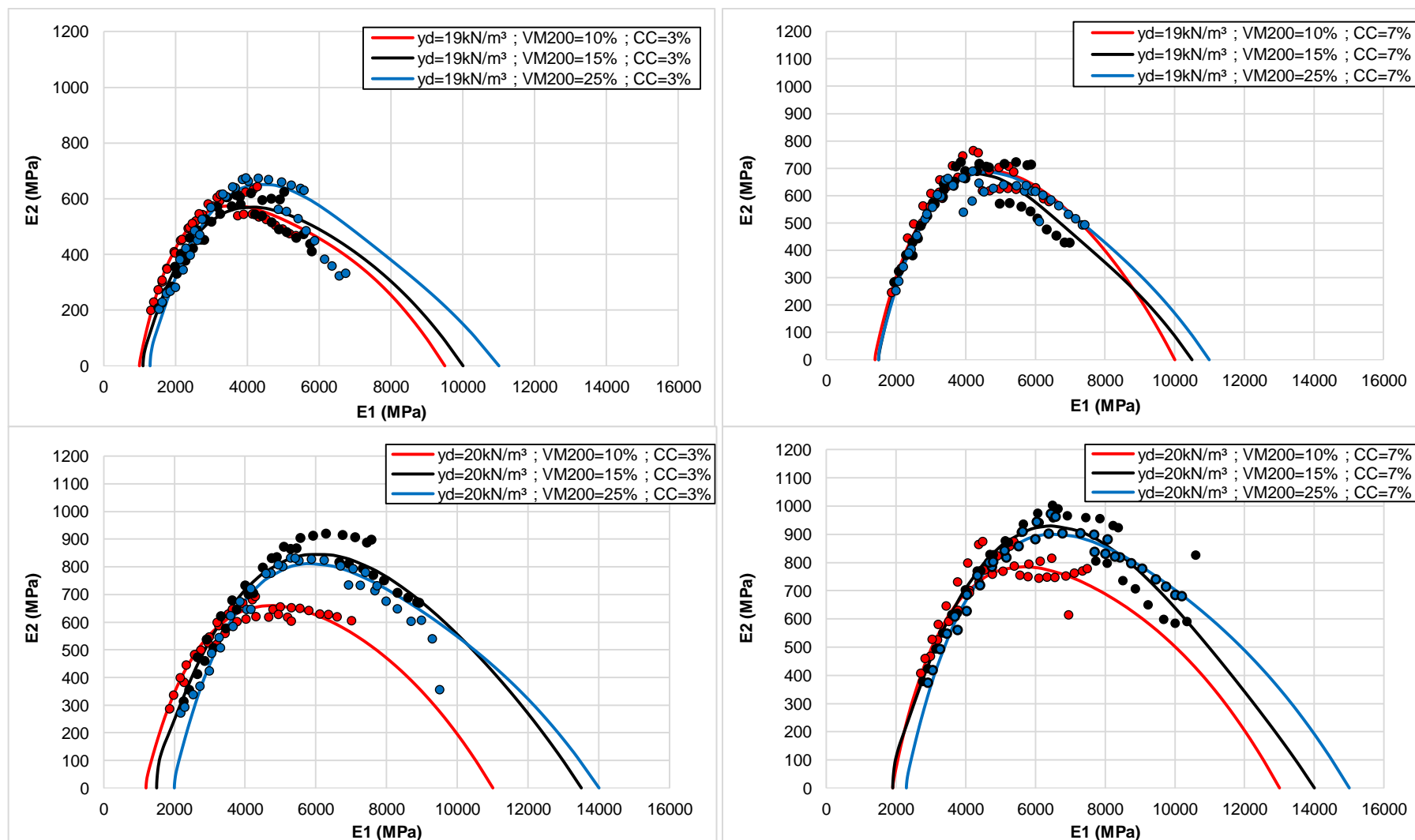


Quadro F.8 – Isocronas – Resultados do ângulo de fase para a frequência de 20 Hz



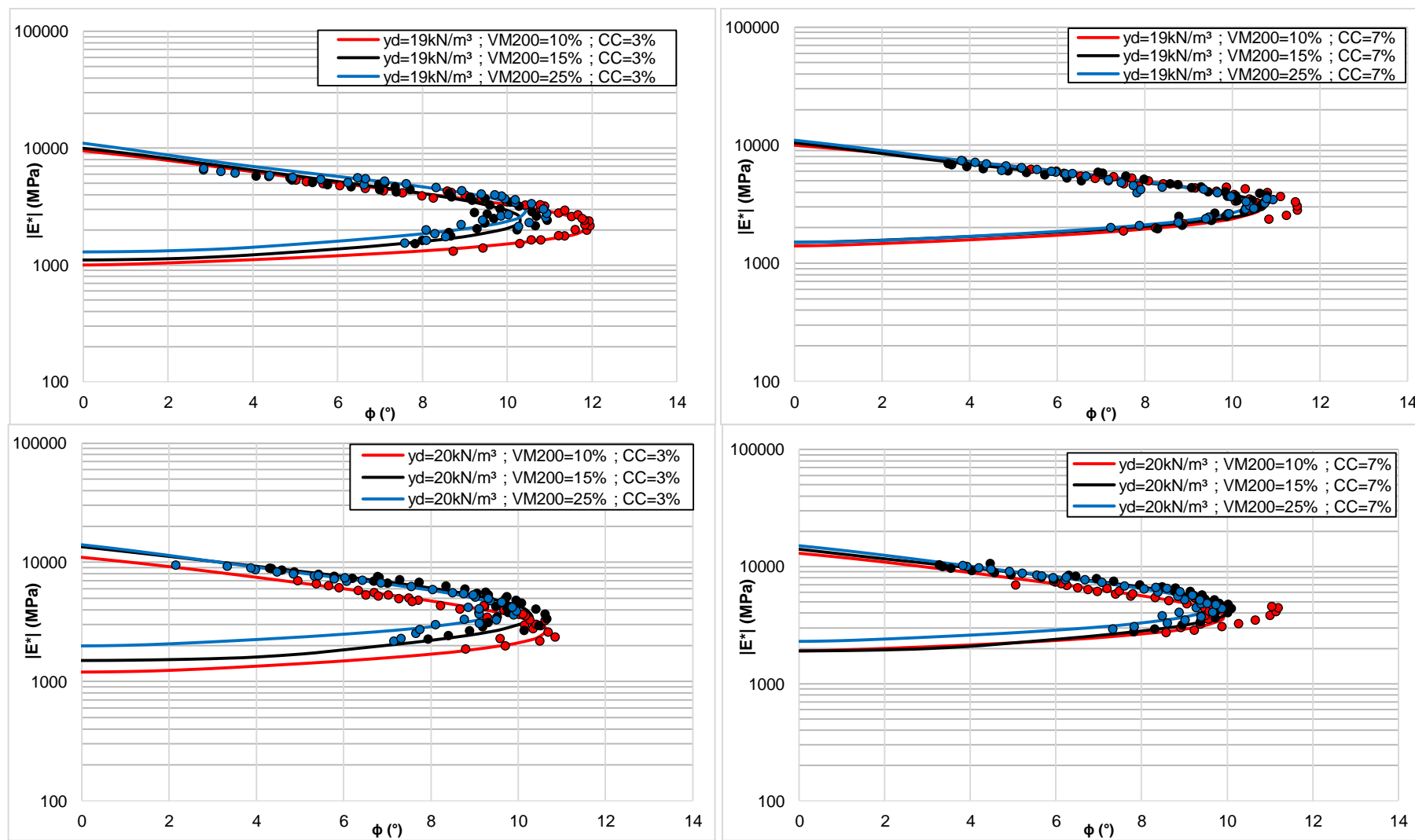
Quadro F.9 – Isocronas – Resultados do ângulo de fase para a frequência de 25 Hz

APÊNDICE G: ESPAÇO COLE-COLE



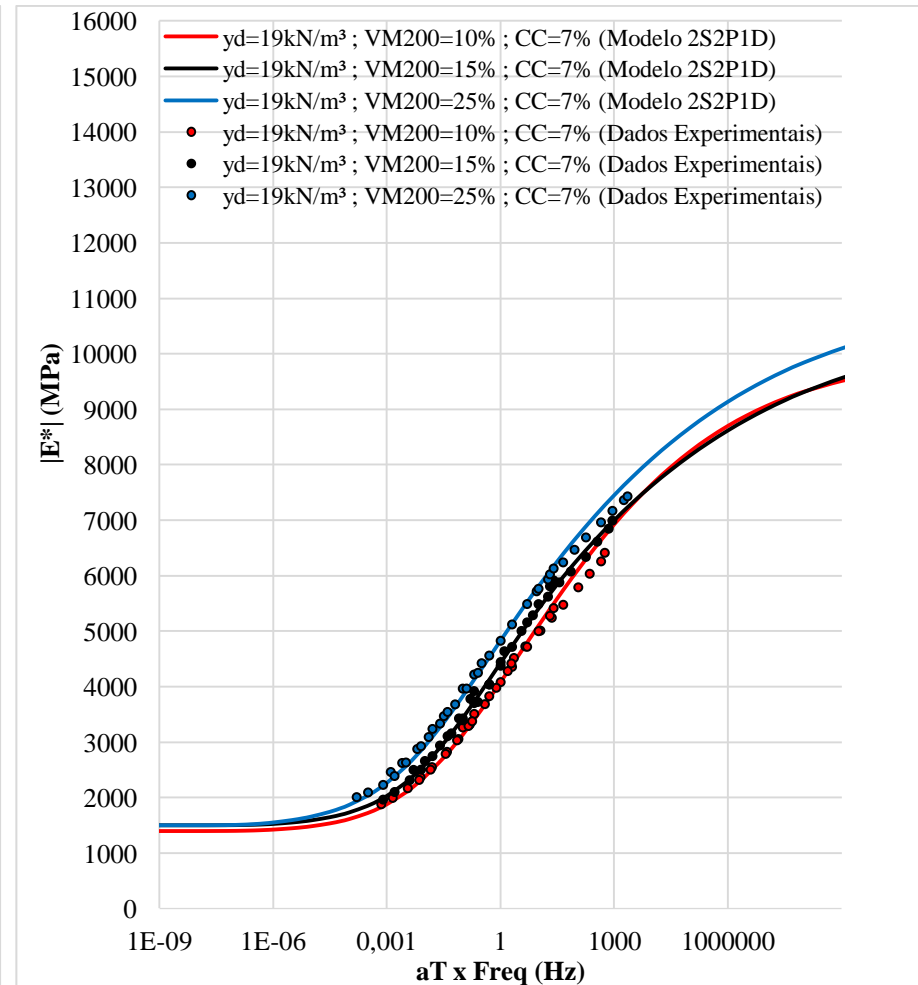
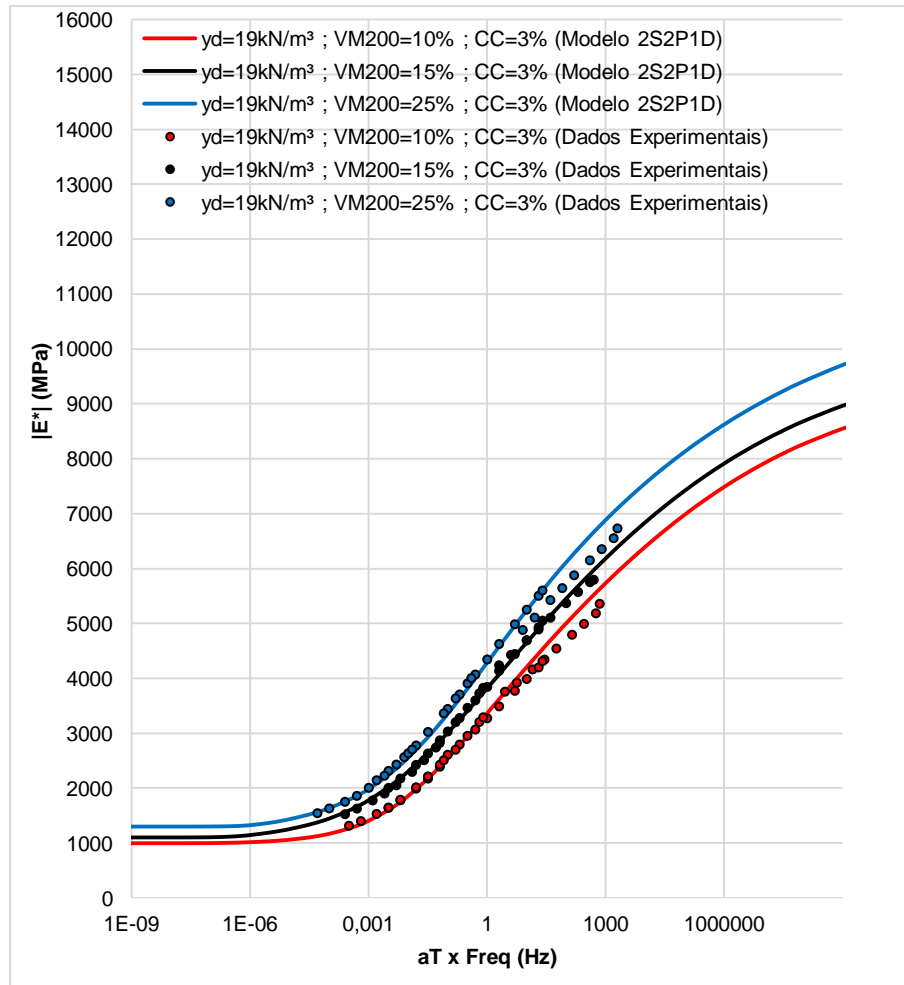
Quadro G – Dados experimentais e modelo 2S2P1D das 12 misturas para o Espaço Cole-Cole

APÊNDICE H: DIAGRAMA DE BLACK

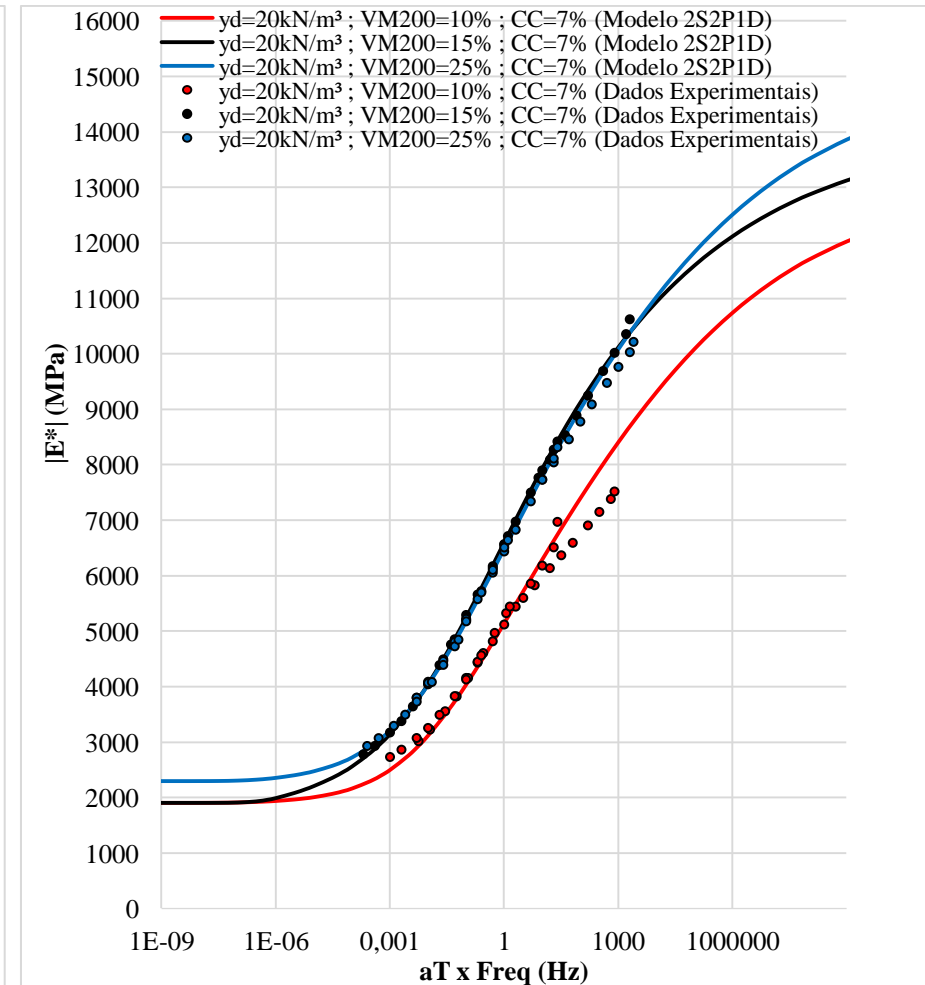
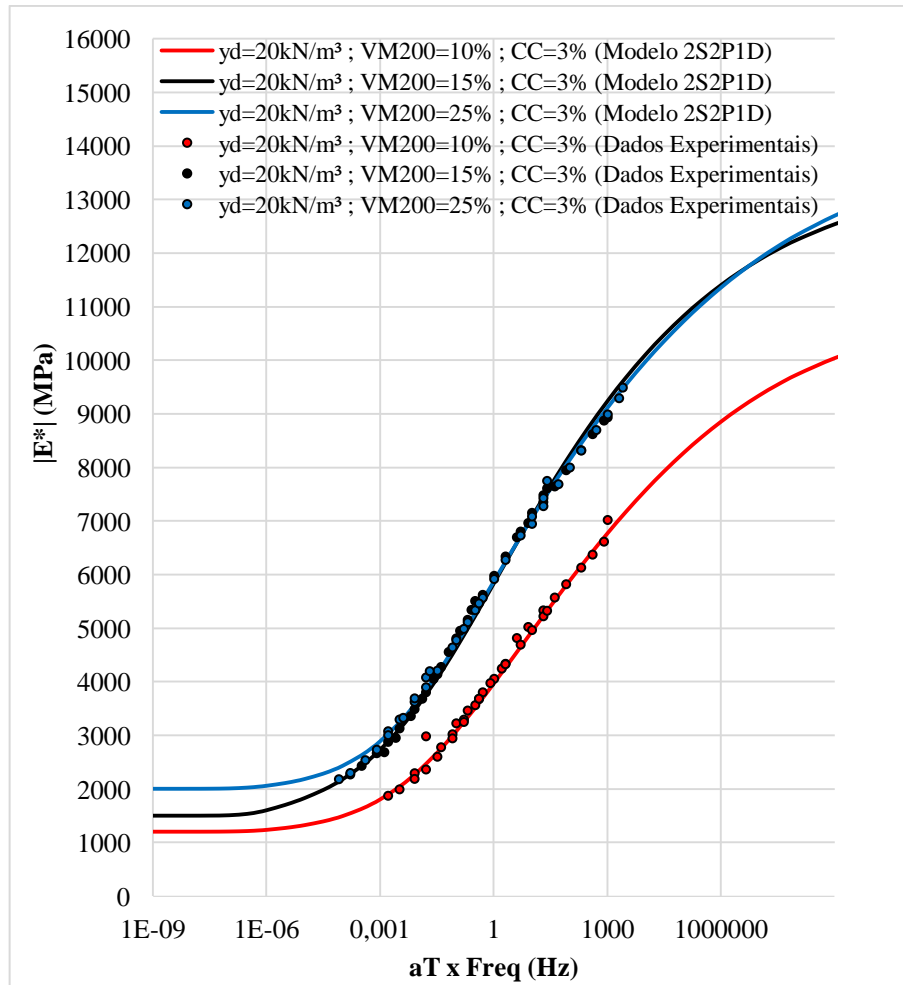


Quadro H – Dados experimentais e modelo 2S2P1D das 12 misturas para o Diagrama de Black

APÊNDICE I: CURVAS MESTRAS



Quadro I.1 - Dados experimentais e modelo 2S2P1D das curvas mestras do módulo dinâmico das misturas com $\gamma_d = 19 \text{ kN/m}^3$



Quadro I.2 - Dados experimentais e modelo 2S2P1D das curvas mestras do módulo dinâmico das misturas com $\gamma_d = 20 \text{ kN/m}^3$