



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

INFLUÊNCIA DO CIMENTO RICO EM POZOLANA E DA EMULSÃO ASFÁLTICA NA
POROSIDADE E PROPRIEDADES MECÂNICAS DA BGTC

Verônica Janaína Melo Barreto Nunes

São Cristóvão
(2022)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

INFLUÊNCIA DO CIMENTO RICO EM POZOLANA E DA EMULSÃO ASFÁLTICA NA
POROSIDADE E PROPRIEDADES MECÂNICAS DA BGTC

Verônica Janaína Melo Barreto Nunes

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil como
requisito à obtenção do título de MESTRE
EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Silva Albuquerque

São Cristóvão
(2022)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

VERÔNICA JANAÍNA MELO BARRETO NUNES

APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE EM 29 DE DEZEMBRO DE 2022.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Fernando Silva Albuquerque
Orientador (PROEC/UFS)

Prof.^a Dra. Gisélia Cardoso
Examinador interno (PROEC/UFS)

Prof. Dr. Glicério Trichês
Examinador externo (UNESC)

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, fé e sabedoria.

À Universidade Federal de Sergipe (UFS) e ao Programa de pós-graduação em engenharia civil (PROEC) pela oportunidade de aperfeiçoamento profissional e por toda infraestrutura oferecida para desenvolvimento da pesquisa.

Ao meu orientador professor Dr. Fernando Silva Albuquerque pela condução do trabalho, além de todo companheirismo, compreensão, disponibilidade, confiança.

Ao professor Dr. Guilherme Bravo de Oliveira Almeida pela disponibilidade e colaboração na pesquisa.

Aos professores do PROEC/UFS por todo conhecimento compartilhado.

Ao técnico Bruno Kevin pelo auxílio, dedicação e parceria na execução dos ensaios no Laboratório de Topografia e Transportes (LTT), ao técnico Mateus Carvalho pelo suporte no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas (LAMCE) e à técnica Luiza do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (GEOPAV).

Ao apoio técnico do Dr. Cochiran Pereira dos Santos na utilização dos equipamentos do Centro Multiusuário de Nanotecnologia da UFS (CMNano-UFS), um Centro Nacional Multiusuário de pesquisa apoiado pela FINEP, durante os experimentos da proposta 063/2022.

Aos bolsistas Paloma e Enzo pela disponibilidade na etapa inicial da pesquisa, à Taís Luz e aos demais colegas do mestrado em engenharia civil da UFS pelo companheirismo nessa jornada.

À pedreira Rio das Pedras e às empresas CAMEL e AGC Construções e Empreendimentos pelos materiais fornecidos.

Aos meus pais Rose e Ubirajara, minhas irmãs Victória e Luciana, minha sobrinha Ana Luísa, meu amigo e cunhado Júlio César e ao meu esposo Victor, meus maiores incentivadores nessa jornada, minha eterna gratidão e desejo de ter correspondido à altura toda expectativa em mim depositada.

RESUMO

Em vias com altas solicitações de cargas de tráfego, as bases e sub-bases de brita graduada tratada com cimento (BGTC) são alternativas para aumentar a capacidade de carga da estrutura e diminuir as deformações no pavimento. Entretanto, essas misturas apresentam matriz heterogênea e elevada porcentagem de vazios em seu arranjo estrutural, mesmo considerando a energia modificada de compactação e o arranjo granulométrico no sentido de se projetar mistura com o conceito de máxima densificação. Desse modo, sabendo-se dos efeitos negativos da elevada porcentagem de vazios na BGTC, o presente estudo teve por objetivo analisar a influência do uso da emulsão asfáltica como aditivo à mistura e do tipo de cimento Portland na redução da porosidade da BGTC e na melhoria das suas propriedades mecânicas. Para tal, foi elaborado um plano experimental constituído de ensaios de caracterização física, ensaios mecânicos e avaliação da porosidade. Adotando-se como misturas de referências em seus respectivos teores de cimento as misturas com 3,0% e 5,0% de CP II-F 32, analisou-se as propriedades mecânicas de misturas de BGTC com 3,0% e 5,0% de CP IV 32 RS e misturas com 3,0% de CP II-F 32 com uso de emulsão asfáltica como aditivo. Os resultados obtidos para as misturas estudadas indicaram que dos parâmetros avaliados (teor de cimento, tipo de cimento, tempo de cura e uso de emulsão asfáltica), como esperado, o teor de cimento nas misturas apresenta maior significância no incremento de rigidez, resistência e redução da porosidade da BGTC. Constatou-se que, para o mesmo teor de cimento, a substituição do cimento tipo CP II-F 32 pelo cimento CP IV 32 RS nas misturas cimentas é responsável pelo aumento da resistência e rigidez, e pela redução da porosidade. No que diz respeito a utilização de emulsão asfáltica catiônica como aditivo à BGTC, a de ruptura lenta resultou na redução da RCS e RTCD aos 7 dias de cura, em todos os teores investigados. Por outro lado, o uso 0,5% de emulsão asfáltica de ruptura rápida foi responsável pelo aumento da resistência à tração e à compressão aos 28 dias e pela redução da porosidade da BGTC. Constatou-se, ainda, a relação entre a redução da porosidade e o melhor desempenho mecânico (resistência e rigidez) nas misturas estudadas. As imagens da macroestrutura (imagens de alta resolução) e microestrutura (por MEV) corroboraram com os resultados obtidos no laboratório, sendo possível observar uma estrutura mais compacta e densa nas misturas que obtiveram menores índices de vazio e absorção.

Palavras-chave: BGTC, porosidade, resistência, emulsão asfáltica, cimento Portland pozolânico.

ABSTRACT

On roads with high traffic loads, cement-treated crushed stones (CTCS) bases and sub-bases are alternatives to increase the load capacity of the structure and reduce pavement deformations. However, these mixtures present a heterogeneous matrix and a high percentage of voids in their structural arrangement, even considering the modified compaction energy and the granulometric arrangement in the sense of designing the mixture with the concept of maximum densification. Thus, knowing the negative effects of the high percentage of voids in the CTCS, the present study aimed to analyze the influence of the use of asphaltic emulsion as an additive to the mixture and the type of Portland cement in the reduction of the porosity of the CTCS and in the improvement of its mechanical properties. For this, an experimental plan consisting of physical characterization tests, mechanical tests and porosity evaluation was elaborated. Adopting the mixtures with 3.0% and 5.0% of CP II-F 32 as reference mixtures in their respective cement contents, the mechanical properties of mixtures of BGTC with 3.0% and 5.0% of CP IV 32 RS were analyzed as well as the properties of mixtures with 3.0% CP II-F 32 using asphaltic emulsion as additive. The results obtained for the mixtures studied indicated that, of the evaluated parameters (cement content, type of cement, curing time and use of asphalt emulsion), as expected, the cement content in the mixtures presents greater significance in the increase of stiffness, resistance and CTCS porosity reduction. It was found that, for the same cement content, the replacement of CP II-F 32 cement by CP IV 32 RS cement in the cement mixtures is responsible for the increase in strength and stiffness, and for the reduction of porosity. With regard to the use of cationic asphaltic emulsion as an additive to CTCS, the slow rupture resulted in the reduction of RCS and RTCD after 7 days of curing, in all investigated contents. On the other hand, the use of 0.5% fast breaking asphalt emulsion was responsible for the increase in the tensile and compressive strength at 28 days and for the reduction in the porosity of the CTCS. It was verified, still, the relation between the porosity reduction and the better mechanical performance (resistance and rigidity) in the mixtures studied. The images of the macrostructure (high resolution images) and microstructure (by SEM) corroborate the results obtained in the laboratory, being possible to observe a more compact and dense structure in the mixtures that obtained lower void and absorption indices.

Keywords: CTCS, porosity, strength, asphalt emulsion, Portland pozzolanic cement.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa	15
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivo geral	16
1.2.2 Objetivos específicos	16
1.3 Estrutura do Trabalho	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1 Tipos de Pavimentos com Camadas Cimentadas	18
2.2 Histórico do Emprego da BGTC	20
2.3 Porosidade	22
2.3.1 Agregados	25
2.3.2 Teor de cimento e umidade da mistura	30
2.3.3 Tipo de cimento	37
2.3.4 Cura do cimento	43
2.3.5 Compactação	45
2.3.6 Emulsões asfálticas	50
2.3.7 Aditivos e adições	56
3 MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1 Caracterização dos materiais	62
3.1.1 Agregados	63
3.1.2 Cimento Portland e água	68
3.1.3 Emulsão asfáltica	69
3.2 Definição da Curva Granulométrica	70
3.3 Ensaio de compactação	73
3.4 Ensaio Mecânicos	77
3.5 Avaliação da Porosidade	88
3.6 Análise dos Resultados	93
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	96
4.1 Primeira Etapa: Seleção das Misturas Estudadas	96
4.2 Seleção das Misturas	105
4.3 Segunda Etapa: Estudo das Misturas de Melhor Desempenho	106
4.3.1 Avaliação da porosidade	106
4.3.2 Avaliação mecânica das misturas	115

4.3.3 Relações constitutivas da porosidade com a mecânica	131
4.3.4 Viabilidade técnica e econômica	135
5 CONCLUSÕES	140
5.1 Sugestão de Novos Estudos	142
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144
APÊNDICE A - IMAGENS DE MEV	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas granulométricas brasileiras de BGTC	26
Tabela 2 – Faixa granulométrica AC 150/5370-10H	27
Tabela 3 – Faixa granulométrica SAPEM (2014)	27
Tabela 4 – Pesos específico aparente seco máximo das amostras de BGTC estudadas.....	29
Tabela 5 - Principais Compostos do cimento Portland.....	31
Tabela 6 – Percentual das fases em pastas com relação água/cimento distintas	33
Tabela 7 – Densidade, umidade ótima e razão água/cimento para diferentes teores de cimento em misturas de BTGC aos 28 dias de cura.....	36
Tabela 8 – Resultados de ensaios mecânicos para amostras de BGTC aos 28 dias de cura	37
Tabela 9 – Designação normativa dos cimentos no Brasil.....	38
Tabela 10 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagem em massa).....	38
Tabela 11 – Resultados de resistência à compressão dos cimentos brasileiros, em função da idade	41
Tabela 12 – Quantidade dos componentes da mistura de CCR (Kg/m ³).....	52
Tabela 13 – Índice de energia de trabalhabilidade (RWEI) e índice de densificação de compactação (RCDI) de CCR com diferentes teores de emulsão asfáltica.....	55
Tabela 14 – Plano experimental A (2 ²).....	61
Tabela 15 – Plano experimental B (2 ² x 4).....	61
Tabela 16 – Planejamento fatorial completo A	61
Tabela 17 – Planejamento fatorial completo B	61
Tabela 18 – Caracterização dos agregados.....	65
Tabela 19 – Composição granulométrica dos agregados	66
Tabela 20 – Caracterização do agregado graúdo.....	67
Tabela 21 – Avaliação da durabilidade da fração compreendida entre 25 e 19mm da brita 25	67
Tabela 22 – Ensaio de caracterização dos cimentos Portland.....	68
Tabela 23 – Resistência à compressão simples dos cimentos Portland.....	68
Tabela 24 – Carta de especificações para emulsões asfálticas	69
Tabela 25 – Controle de qualidade para emulsão asfáltica RL-1C, conforme NBR 14376 (ABNT, 2019b) e NBR 14393 (ABNT, 2012c)	70
Tabela 26 - Composição granulométrica da BGTC	70
Tabela 27 – Composição granulométrica da BGTC – segunda etapa	72
Tabela 28 – Parâmetros para dimensionamento	94
Tabela 29 – Descrição dos critérios de avaliação.....	95

Tabela 30 – Peso atribuído a cada critério.....	95
Tabela 31 – RCS de amostras de BGTC aos 7 dias de cura.....	96
Tabela 32 - Resultado da regressão fatorial – Planejamento Fatorial A	97
Tabela 33 - RTCD de amostras de BGTC aos 7 dias de cura	101
Tabela 34 – Tratamentos selecionados para Terceira Etapa.....	106
Tabela 35 – Absorção de BGTC aos 7 e 28 dias	106
Tabela 36 – Índice de vazios de BGTC aos 7 e 28 dias	107
Tabela 37 – Tratamentos investigados por meio do MEV	110
Tabela 38 – Resistência à compressão simples de BGTC aos 7 e 28 dias de cura.....	116
Tabela 39 – Resistência à tração por compressão diametral de BGTC aos 7 e 28 dias de cura	116
Tabela 40 – Resistência à tração na flexão de BGTC aos 7 e 28 dias.....	117
Tabela 41 – Módulo Flexural de BGTC aos 7 e 28 dias	121
Tabela 42 – Módulo de elasticidade da BGTC aos 7 e 28 dias	123
Tabela 43 – Módulo de dinâmico longitudinal de BGTC aos 7 e 28 dias.....	123
Tabela 44 – Módulo dinâmico transversal de BGTC aos 7 e 28 dias	124
Tabela 45 – Módulo dinâmico torcional de BGTC aos 7 e 28 dias	124
Tabela 46 – Módulo de resiliência de BGTC aos 28 dias de cura.....	128
Tabela 47 – Módulo de resiliência de BGTC para tensão desvio de 200 kPa.....	129
Tabela 48 – Coeficiente de correlações lineares entre os parâmetros mecânicos e parâmetros associados a porosidade (28 dias).....	131
Tabela 49 – Fator associado à absorção	132
Tabela 50 – Valores médios dos parâmetros mecânicos e parâmetros associados à porosidade da BGTC aos 28 dias.....	133
Tabela 51 – Coeficientes da regressão	133
Tabela 52 – Capacidade estimada das camadas	135
Tabela 53 – Descrição dos custos associados a cada alternativa com 3% de cimento.....	136
Tabela 54 – Parâmetros de comparação para análise benefício-custo (%)......	137

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração de tensões em estruturas de pavimentos.....	19
Figura 2 – a) Brita graduada tratada com cimento; b) brita graduada tratada com cimento como sub-base de pavimento.....	22
Figura 3 – Esquema representativo de poros com diferentes tamanhos e formas: (a) e (b) poros fechados; (c) poro aberto; (d) e (e) poros abertos interconectados; (f) rugosidade da superfície	23
Figura 4 – Fase granular e matriz cimentada.....	24
Figura 5 – Representação livre da estrutura interna das ligações pasta-agregado na BGTC ...	25
Figura 6 – Comparação entre faixas granulométricas	28
Figura 7 – Influência do tipo de agregado e teor de finos de BGTC na RCS aos 7 dias.....	30
Figura 8 – Imagem retrodifundida com zoom de 100µm de uma seção típica de clínquer de cimento não hidratado	31
Figura 9 – Vazios presentes na matriz de cimento quando no estado endurecido	34
Figura 10 – Imagens de microscópio de misturas de BGTC	35
Figura 11 – Resistência à compressão <i>versus</i> teor de cimento em amostras de BGTC aos 28 dias de cura.....	36
Figura 12 – Resistência à tração na flexão <i>versus</i> teor de cimento em amostras de BGTC aos 28 dias de cura	36
Figura 13 – Resistência à compressão simples em areias estabilizadas com cimento	42
Figura 14 – Previsão da evolução da RCS de Misturas de BGTC a) com agregado de concreto reciclado; b) com calcário britado	44
Figura 15 – Resistência à tração por compressão diametral <i>versus</i> teor de cimento em amostras de BGTC.....	45
Figura 16 – RCS média de BGTC para energias de compactação distintas a) com agregado granítico b) basálticos.....	46
Figura 17 – Resultados de RCS a) aos 7 dias de cura b) aos 28 dias de cura.....	47
Figura 18 – Resultados de RCS de agregados tratado com cimento a) aos 28 dias; b) com 4% de cimento	48
Figura 19 – Resultados de RTF de agregados tratado com cimento a) aos 28 dias; b) com 4% de cimento	48
Figura 20 – Resultados de MR de agregados tratado com cimento a) aos 28 dias; b) com 4% de cimento	49

Figura 21 – Razão da absorção de água de misturas com diferentes teores de emulsão asfáltica	53
Figura 22 – Razão da penetração de água de misturas com diferentes teores de emulsão asfáltica	53
Figura 23 – Razão de resistividade elétrica de misturas com diferentes teores de emulsão asfáltica	54
Figura 24 – Resultados de RCS e RTF de misturas de CCR com adição de emulsão em diferentes teores	55
Figura 25 – Resultados de RCS de concreto com adições de sílica e cinza	57
Figura 26 – Resultados de porosidade de concreto com adições de sílica e cinza	57
Figura 27 – Fluxograma de atividades da pesquisa	60
Figura 28 – Agregados utilizados na pesquisa	63
Figura 29 – Mapa de localização da Pedreira: Povoado Cajaíba, Itabaiana/SE	63
Figura 30 – Imagens da pedreira: Povoado Cajaíba, Itabaiana/SE	64
Figura 31 - Esboço tectono-estratigráfico do Estado de Sergipe	65
Figura 32 – Curvas granulométricas dos agregados	67
Figura 33- Curva granulométrica da BGTC	71
Figura 34 – Curva granulométrica da BGTC – segunda etapa	72
Figura 35 – Molde de compactação com amostra compactada	73
Figura 36 – Curva de compactação para mistura com 3% de CP II-F 32	74
Figura 37 – Curva de compactação para mistura com 5% de CP II-F 32	74
Figura 38 – Mistura de agregados para moldagem dos corpos de prova	76
Figura 39 – Corpos de prova em câmara úmida: a) Conjunto corpo de prova e molde envoltos em filme de PVC. b) corpo de prova envolto em filme de PVC	76
Figura 40 – Molde e cilindro utilizando no ensaio de RCS	77
Figura 41 – Ensaio de RCS em misturas de BGTC: a) corpo de prova antes de ensaio; b) ensaio; c) corpo de prova após o ensaio	78
Figura 42 – Molde e cilindro utilizado no ensaio de RTCD	79
Figura 43 – Ensaio de RTCD em misturas de BGTC: a) corpo de prova antes de ensaio; b) ensaio; c) corpo de prova após o ensaio	79
Figura 44 – Molde e cilindro utilizado no ensaio de RTF	81
Figura 45 – Ensaio de RTF em misturas de BGTC: a) corpo de prova antes de ensaio; b) ensaio; c) corpo de prova após o ensaio	81
Figura 46 – Configuração do ensaio de módulo flexural	83

Figura 47 – Leitura da deflexão vertical com Programa Metrolog	83
Figura 48 – Non-Destructive Evaluation – NDE 360	84
Figura 49 – Configurações para o ensaio dinâmico: a) longitudinal, b) transversal e c) torção	85
Figura 50 – Instrumentação para ensaio de módulo de elasticidade	86
Figura 51 - Configuração do ensaio de módulo de resiliência	88
Figura 52 – Corpo de prova levado ao fogo para etapa de ebulição	89
Figura 53 - Amostras metalizados e amostras preparadas para o processo de metalização	90
Figura 54 – Amostras no equipamento para metalizar com ouro.....	90
Figura 55 – Obtenção de imagens por microscopia eletrônica de Varredura.....	91
Figura 56 - Corpos de prova imersos na solução aquosa de azul de metileno	91
Figura 57 – Corpos de prova em processo de secagem.....	92
Figura 58 – Corte no corpo de prova.....	92
Figura 59 – Corpos de prova após corte a 5mm da superfície	93
Figura 60 – Gráfico Normal dos Efeitos Padronizados para RCS – Planejamento Fatorial A	98
Figura 61 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para RCS – Planejamento Fatorial A	98
Figura 62 - Gráfico de efeitos principais para RCS para Planejamento Fatorial A.....	99
Figura 63 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para RCS – Planejamento Fatorial B	100
Figura 64 – Gráfico de efeitos principais para RCS – Planejamento Fatorial B.....	100
Figura 65 - Gráfico de interação entre fatores para RCS – Planejamento fatorial B	101
Figura 66 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para RTCD – Planejamento A	103
Figura 67 - Gráfico de efeitos principais para RTCD – Planejamento A.....	103
Figura 68 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para RTCD - Planejamento B	104
Figura 69 - Gráfico de efeitos principais para RTCD - Planejamento B.....	104
Figura 70- Gráfico de interação para RTCD - Planejamento B	105
Figura 71 – Absorção de BGTC aos 7 e 28 dias de cura.....	108
Figura 72 – Índice de vazios de BGTC aos 7 e 28 dias de cura	109
Figura 73 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura	111
Figura 74 – Imagens MEV – 30x	113
Figura 75 – Fotografias dos corpos de prova pigmentados	114
Figura 76 – Resistência à compressão simples de BGTC aos 7 e 28 dias de cura	118

Figura 77 – Resistência à tração por compressão diametral de BGTC aos 7 e 28 dias de cura	118
Figura 78 – Resistência à tração na flexão de BGTC aos 7 e 28 dias de cura.....	119
Figura 79 – Módulo flexural de BGTC aos 7 e 28 dias de cura	122
Figura 80 – Comparação de módulos dinâmicos de BGTC	126
Figura 81 – Comparação de módulos dinâmicos de BGTC	126
Figura 82 – Comparação de módulos dinâmicos de BGTC (efeito emulsão)	127
Figura 83 – Gráfico tensão x MR de BGTC aos 28 dias de cura	130
Figura 84 – Gráficos previsto x valor real	134
Figura 85 - Resultado do cálculo da estrutura de referência	136
Figura 86 – Interface do software PROMETHEE	137
Figura 87 – PROMETHEE – Ranking completo	138
Figura 88 – PROMETHEE Rainbow	139

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de que pavimentos novos atendam ao volume mais intenso do tráfego nas rodovias brasileiras, com a circulação de veículos cada vez mais pesados, e ao mesmo tempo proporcionem conforto, segurança e economicidade aos usuários, têm motivado pesquisadores a avançarem nas investigações na busca de novos materiais para a pavimentação, a fim de fazerem frente a estas demandas.

Para Albuquerque e Mendonça (2017), em locais com grandes volumes de tráfego, as bases ou sub-bases estabilizadas quimicamente com cimento Portland podem ser adotadas como uma solução estrutural para os pavimentos, a fim de melhorar seu desempenho e reduzir os investimentos financeiros a longo prazo, desde que o comportamento mecânico desses materiais seja conhecido e contemplado no dimensionamento racional deste tipo de estrutura de pavimento.

Nesse contexto, destaca-se a utilização da brita graduada tratada com cimento (BGTC), camada de base ou sub-base composta por mistura, em usina, de produtos de britagem, cimento e água, adequadamente compactada e submetida a processo eficiente de cura (DER/PR, 2018).

A BGTC tem suas origens na utilização de cimento para estabilização de solos, com estudos na década de 1910 a 1920 (KLINSKY e FARIA, 2015). Segundo Bernucci *et al.* (2006), no Brasil, o uso da BGTC começou a ser difundido no final da década de 1970, usada com intuito de conferir maior resistência e menores deformações à estrutura.

Entretanto, apesar das vantagens para utilização desse material, Balbo (2006) adverte sobre o problema da heterogeneidade da mistura devido aos baixos teores de cimento, da elevada porosidade e do processo de fissuração da BGTC, de origem na retração hidráulica e no processo de fadiga. Por meio de análises de imagens obtidas através de microscopia sobre lâminas finas e investigações de laboratório, o autor constatou a heterogeneidade da matriz da brita graduada tratada com cimento, bem como identificou zonas onde a propagação de fissuras é elevada durante carregamento, em decorrência do excesso de concentração de tensões em torno da área vazia (poros no material).

Diante dessa problemática, a presente pesquisa procurou responder o seguinte questionamento: O uso de emulsão asfáltica como aditivo à BGTC e a utilização de cimento com alto teor de pozolana podem diminuir a porosidade da brita graduada tratada com cimento, com ganhos em termos de desempenho da mistura?

1.1 Justificativa

A brita graduada tratada com cimento é uma alternativa para compor camadas de bases e sub-bases de pavimentos submetidos a altas solicitações de tráfego (BERNUCCI *et al.*, 2006, ANDRADE *et al.*, 2015, ALBUQUERQUE e MENDONÇA, 2017). Todavia, Balbo (2006) chama atenção para heterogeneidade e processo de fissuração do material.

Conforme explicam Andrade *et al.* (2015), a água adicionada à BGTC tem a função de auxiliar na compactação e hidratar o cimento que se mistura à fração granular fina. Assim, é formada uma pasta que se liga pontualmente ao agregado graúdo, mas não o envolve totalmente, em decorrência da baixa quantidade de cimento. Essa configuração confere à brita graduada tratada com cimento uma matriz heterogênea, com certa quantidade de poros. Os poros, áreas vazias, tornam-se zonas de fragilidade, que favorecem o surgimento de fissuras e trincas na camada cimentada.

A BGTC, enquanto camada de base, após fissurar, funciona como um conjunto de blocos que fornece incontáveis entalhes para a abertura de fissuras e sua posterior propagação ascensional na camada de revestimento asfáltico, apenas pelo contato (BALBO, 2006).

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), a interação física e química de materiais pozolânicos com o cimento Portland modifica a reologia de concretos, argamassas e pastas no estado fresco e conferem propriedades especiais relacionadas à durabilidade e ao desempenho mecânico no estado endurecido. Esses materiais reagem com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) da hidratação do cimento, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional. Quando comparados a cimentos sem uso de materiais pozolânicos ou com menor proporção do material, os cimentos Portland pozolânicos proporcionam às misturas cimentadas uma redução da porosidade e permeabilidade, além do aumento da resistência à compressão e à flexão, em idades avançadas, apesar de uma diminuição nas primeiras idades.

Boltryk e Malaszkiewicz (2013) avaliaram a influência da adição de emulsão asfáltica aniônica em concretos e constataram uma diminuição na absorção de água e capilaridade, embora tenha sido observada uma redução da resistência à compressão para os teores de emulsão utilizados (2% e 4% da massa de cimento). Dareyni *et al.* (2018) e Dareyni e Moghaddam (2019) estudaram a influência da emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida em misturas de concreto compactado com rolo (CCR) e confirmaram a redução dos poros capilares com a adição da emulsão asfáltica nas misturas cimentadas, sendo também identificada uma redução na resistência à compressão simples e na resistência à tração na flexão com o acréscimo do teor de emulsão asfáltica.

Desse modo, acredita-se que a utilização do cimento Portland pozolânico (CP IV 32 RS) resultará em uma matriz de BGTC menos heterogênea e, conseqüentemente, mais resistente quando comparada a uma mistura com cimento Portland composto com material carbonático (CP II-F 32). Como também, espera-se que a adição de emulsão asfáltica, em proporção adequada, possa reduzir a porosidade da BGTC, com ganhos em termos de desempenho do material enquanto camada do pavimento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito da utilização de emulsão asfáltica como aditivo à mistura e uso de cimento com alta concentração de pozolana na porosidade e características mecânicas da brita graduada tratada com cimento (BGTC) com agregados gnáissicos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Comparar a porosidade e desempenho mecânico entre misturas de BGTC com cimento Portland composto com material carbonático (CP II-F 32) e BGTC com cimento Portland pozolânico (CP IV 32 RS);
- Comparar a porosidade e desempenho mecânico de BGTC com e sem utilização de emulsão asfáltica como aditivo, em misturas utilizando o cimento padrão (CP II-F 32);
- Avaliar o benefício-custo dos tipos de cimento e aditivos utilizados na pesquisa.

1.3 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 1 é apresentada uma introdução do tema, com a justificativa para a proposição da pesquisa e a indicação dos objetivos pretendidos.

O Capítulo 2 segue com uma revisão da literatura, contextualizando o assunto e discutindo os principais conceitos relacionados aos fatores que influenciam na porosidade e comportamento mecânico da BGTC: Agregados, Relação água/cimento, Tipo de cimento, Tempo de Cura, Compactação, Emulsões asfálticas e Aditivos e adições. Na construção desse capítulo foi realizada uma análise da produção científica acerca porosidade da BGTC e como

esse parâmetro interfere no desempenho do material. Assim, foram consultados livros, teses e dissertações encontrados em repositórios institucionais de universidade e artigos selecionados em publicações da revista Transportes (periódico técnico-científico nacional que publica artigos em todos os campos da Engenharia de Transportes e ciências afins) e em bases de dados disponíveis no Portal de periódicos da CAPES, como ScienceDirect e Scopus.

Nas bases de dados foram utilizadas as strings: *cement-treated base AND porosity*; *cement-treated base AND permeability*; *cement-treated base AND absorption*; *cement-treated aggregate AND porosity*, *cement-treated aggregate AND permeability*, *cement-treated aggregate AND absorption*, resultando em 96 artigos, dos quais 11 foram efetivamente utilizados por estarem inseridos na área de interesse. Utilizou-se, ainda, as strings *cement-treated base AND mechanical properties*, *cement-treated base AND mix design*, *cement-treated aggregate AND mechanical properties*, *cement-treated aggregate AND mix design* para identificar as pesquisas acerca das propriedades mecânicas da brita graduada tratada com cimento. Em decorrência da escassez de material sobre porosidade do material de interesse, foram consultados trabalhos desenvolvidos com concreto e concreto compactado a rolo, devido à similaridade dos materiais da mistura.

A metodologia da pesquisa é indicada no Capítulo 3, no qual é descrito todo planejamento experimental, que envolve a caracterização dos materiais, ensaio de compactação, determinação dos parâmetros mecânicos das misturas (resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, módulo flexural, módulo dinâmico, módulo de elasticidade e módulo de resiliência), avaliação da porosidade (determinação do índice de vazios e absorção de água) e obtenção de imagens da macro e micro estrutura.

O Capítulo 4 expõe os resultados obtidos com a execução da metodologia indicada, com as discussões e análises estatísticas. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões com o trabalho desenvolvido e as sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Tipos de Pavimentos com Camadas Cimentadas

Bernucci *et al.* (2006) definem o pavimento como uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, que se destina técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, além de propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. Os autores apresentam uma classificação das estruturas de pavimentos quanto ao tipo de revestimento: pavimentos de concreto de cimento Portland (ou simplesmente concreto-cimento) e pavimentos asfálticos.

Os pavimentos de concreto-cimento são aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland, armada ou não com barras de aço. Nesses pavimentos a espessura da placa é dimensionada em função de fatores como: a resistência à tração na flexão do concreto, a presença ou não de acostamentos de concreto, a presença ou não de barras de transferência, o coeficiente de reação resultante da interação sub-base e subleito, a magnitude e o número de repetição das cargas previstas no período de projeto, e as resistências das camadas subjacentes. A camada na qual o revestimento é apoiado é usualmente designada sub-base.

Por outro lado, os pavimentos asfálticos são os que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. De modo geral, essas estruturas são formadas por três ou mais camadas denominadas de revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito, quando necessário.

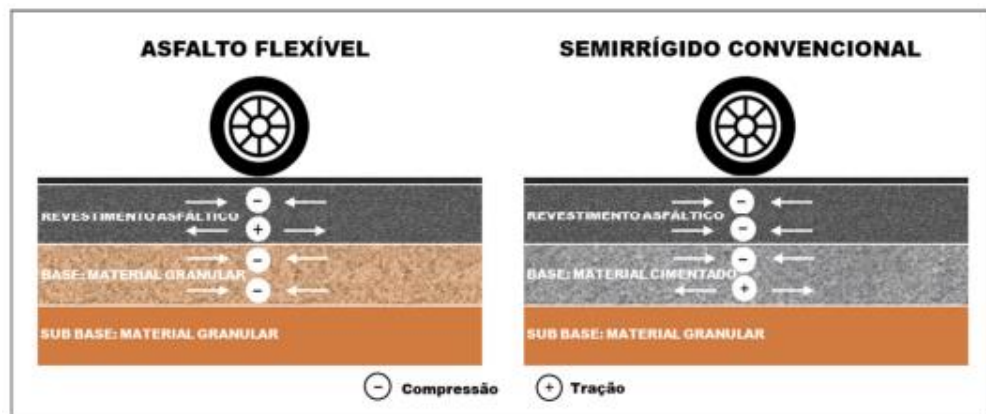
Classificação semelhante para estruturas de pavimento é apresentada no Capítulo 2 do Manual de Engenharia de Pavimentos da África do Sul (SAPEM, 2014), que diferencia as estruturas com base nos materiais usados para construir as camadas superiores, em particular o revestimento. Assim, faz-se a distinção de pavimentos em: sem superfície, aqueles cuja superfície é constituída por pedregulhos, cascalhos ou materiais afins; e pavimentos com superfície, que podem ser denominados flexíveis, com revestimento asfáltico, semirrígidos ou compostos, com revestimento constituído por blocos; e pavimentos rígidos, que correspondem aos pavimentos com revestimento de concreto.

O Manual de Pavimentação do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (BRASIL, 2006) essas estruturas são divididas em: pavimentos flexíveis, semirrígidos e rígidos. Os pavimentos flexíveis são aqueles em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre

as camadas, a exemplo de uma estrutura constituída por uma base de brita, revestida por uma camada asfáltica. Os denominados semirrígidos são os que possuem uma camada cimentada por algum aglutinante hidráulico com propriedades cimentícias, por exemplo, uma base de solo-cimento revestida por uma camada asfáltica. Por fim, os rígidos são aqueles que o revestimento tem elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado, como o caso do pavimento constituído por lajes de concreto de cimento Portland.

Nos pavimentos semirrígidos, a base cimentada confere maior rigidez ao conjunto de camadas, fazendo com que a camada de revestimento atue predominantemente à compressão, o que leva a redução da sua espessura. Em contrapartida, a camada de base atua à tração e por isso trinca por fadiga. Assim, em rodovias com grandes volumes e cargas de tráfego, cuja estrutura de pavimento flexível exigiria grandes espessuras da camada de revestimento asfáltica, encarecendo o custo de implantação, a utilização de bases cimentadas se mostra como uma solução para aumentar a capacidade estrutural do pavimento e diminuir as deformações resilientes. A Figura 1 ilustra a diferença de tensões de um pavimento flexível e um pavimento semirrígido.

Figura 1 – Ilustração de tensões em estruturas de pavimentos



Fonte: Balbo (2007).

Dentro dessa classificação, existe ainda o pavimento semirrígido invertido ou estrutura sanduíche, correspondendo à estrutura composta por uma camada de revestimento asfáltico, assente em uma base granular bem compactada, que se apoia em uma camada estabilizada com cimento.

A adição dos ligantes hidráulicos para modificar as propriedades mecânicas pode ser realizada em diversos materiais, cada um com características próprias. A escolha adequada do

material por parte do projetista leva em consideração tanto fatores de ordem técnica e econômica, como a compatibilidade entre as propriedades dos materiais escolhidos, desempenho esperado para a estrutura, fatores ambientais e disponibilidade de material na região.

Dentre os materiais cimentados utilizados em camadas de pavimento, destacam-se o solo-cimento, o concreto compactado com rolo e a brita graduada tratada com cimento, objeto de estudo da presente pesquisa. A BGTC é o produto resultante da mistura, em usina, de pedra britada, cimento Portland, água e, eventualmente, aditivos, em proporções determinadas experimentalmente (DER/SP, 2005).

Assim, tendo em vista os objetivos propostos, após uma breve exposição de marcos históricos relativos ao tema, a revisão da literatura aqui apresentada abordará os principais aspectos referentes à porosidade da BGTC, bem como a relação desse parâmetro com o comportamento mecânico do material. Serão discutidos fatores que influenciam a porosidade e as propriedades mecânicas da mistura cimentada, tais como granulometria e porosidade do agregado, teor de cimento e umidade, tipo de cimento, tempo de cura, grau e energia de compactação, além da ação de aditivos e adições no seu desempenho.

2.2 Histórico do Emprego da BGTC

Segundo Klinsky e Faria (2015), pode-se afirmar que a BGTC tem suas origens na estabilização de solos com adição de cimento, com estudos na década de 1910 a 1920. Na Inglaterra, no ano de 1917, Brooke Bradley empregou com sucesso uma mistura de cimento com solos argilosos na construção de estradas daquele país, porém a técnica não foi utilizada por muito tempo.

Nos Estados Unidos, o emprego de solo cimento foi aprimorado a partir da patente de uma mistura de solo com cimento chamada *Soilamies*, atribuída a Joseph Hay Amies em 1917. O esforço conjunto da *Portland Cement Association* (PCA), do *Bureau of Public Roads* e do *Highway Department of Transportation of South Carolina* contribuiu com desenvolvimento tecnológico da estabilização de solos com cimento, por meio da construção de diversos trechos experimentais de estradas nas décadas de 1930 e 1940. (KLINSKY e FARIA, 2015).

Nessa conjuntura, dá-se ênfase à estabilização dos materiais da camada de base do pavimento, tipicamente composta por solo granular. A estabilização da camada de base com cimento é amplamente utilizada nos Estados Unidos, República da África do Sul e China (CHO *et al.*, 2006).

Balbo (2002) explica que a primeira especificação sobre a técnica de estabilizar material pétreo com cimento Portland foi publicada em 1944 no Reino Unido, sendo muito difundida na Europa, principalmente na Holanda e Bélgica, na década de 1950, e no Leste Europeu, na década de 1960. Dessa forma, a técnica teve seu uso consagrado, apesar das dificuldades observadas em sua aplicação, que foram se tornando objeto de estudo, tendo em vista o aperfeiçoamento da técnica e minimização dos problemas verificados.

Nos estados do leste da Austrália, em 1950, o cimento se tornou o principal agente estabilizador de materiais granulares, sendo as primeiras estabilizações realizadas “*in situ*” em estruturas de pavimentos datadas da década de 1960. Atualmente, as diretrizes australianas para misturas estabilizadas como material de pavimentação são fornecidas pela Austroads, que discutem sobre seleção do tipo de aglutinante e fornecem abordagens para avaliar as propriedades estruturais da mistura (YEO *et al.*, 2011).

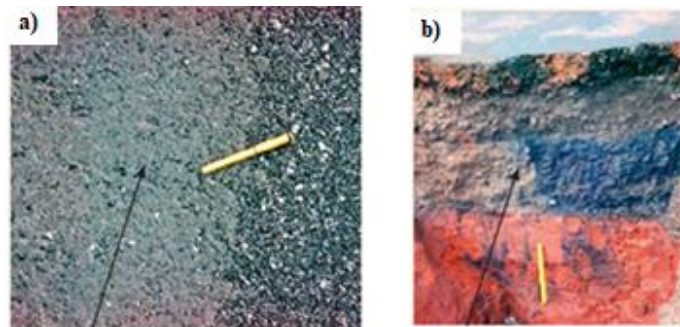
Bernucci *et al.* (2006) indicam que no Brasil o uso da brita graduada tratada com cimento começou a ser difundido no final da década de 1970, sendo empregada com maior frequência como base de pavimentos com revestimento betuminoso, ou ainda utilizada como base de pavimentos intertravados ou sub-base de pavimentos de concreto. Nas décadas de 1970 e 1980, a Dersa, no estado de São Paulo, usou o material como base de pavimentos semirrígidos.

Em Sergipe, têm-se na BR-101 um exemplo de pavimento semirrígido, com base de BGTC. A estrutura foi colocada em operação em fevereiro de 2012, sendo constituída por revestimento betuminoso, sub-base de material granular e subleito de material areno-argiloso. O segmento possui um trecho monitorado pela Universidade Federal de Sergipe (UFS) desde a sua operação, com extensão de 280 metros, situado na porção sul da rodovia, entre as estacas 650 (coordenada UTM: 8787930 N; 691045 E, SAD 69, 24L) e 664 (coordenada UTM: 8787840 N; 690780 E, SAD 69, 24L), localizado no município de São Cristóvão (NASCIMENTO, 2017).

Apesar das vantagens para utilização de materiais cimentados em estruturas de pavimentos, Balbo (2006) adverte sobre o problema da heterogeneidade e do processo de fissuração em camadas cimentadas, em decorrência do processo de retração durante a cura do material ou por fadiga. Após fissurar, a base da mistura cimentada funciona como um conjunto de blocos, , cujas juntas de contato funcionam como uma ponta de trinca que concentra tensões e força a propagação do reticulado para a superfície do revestimento. Na medida que não faz a selagem das trincas, a perda de suporte faz com que se tenha o trincamento dos blocos maiores e a camada tenderá para o comportamento de material granular. Este fato foi observado na Rodovia dos Bandeirantes e Rodovia Ayrton Senna da rede Dersa-SP.

Diante dessa problemática, alternativamente, é possível empregar a BGTC nas estruturas conhecidas como pavimentos semirrígidos invertidos, a fim de evitar a reflexão das trincas para o revestimento (SUZUKI, 1992, *apud* BERNUCCI *et al.* 2006), como no caso da Rodovia Carvalho Pinto-SP, construída no Vale do Paraíba. A Figura 2 (a) ilustra a mistura de BGTC e na Figura 2 (b) é possível observar uma camada da brita graduada tratada com cimento atuando como sub-base da estrutura.

Figura 2 – a) Brita graduada tratada com cimento; b) brita graduada tratada com cimento como sub-base de pavimento



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

Assim, considerando a relevância da elevada porcentagem de vazios no desempenho da BGTC, em decorrência do baixo teor de cimento utilizado, a seguir são discutidos os principais fatores que se relacionam a essa característica da mistura.

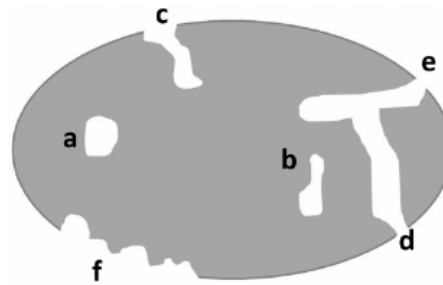
2.3 Porosidade

A porosidade é o quociente entre o volume de vazios e o volume total de um sólido (FORNASIER, 1995). É uma característica física empregada para mensurar a quantidade de espaços vazios e se relaciona com a permeabilidade do material.

A permeabilidade é estabelecida como a capacidade com que o fluido pode escoar através de um sólido, e seu grau é determinado pelo tamanho e pela continuidade dos poros na estrutura do sólido (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Santos *et al.* (2015) explicam que os materiais podem apresentar poros de diferentes tamanhos e formas, além de distintas configurações: poros abertos, fechados e interconectados, como ilustra a Figura 3. Em um concreto de cimento Portland existem poros dentro dos próprios agregados, na interface pasta/agregado e na pasta de cimento (CASTRO E PANDOLFELLI, 2009).

Figura 3 – Esquema representativo de poros com diferentes tamanhos e formas: (a) e (b) poros fechados; (c) poro aberto; (d) e (e) poros abertos interconectados; (f) rugosidade da superfície



Fonte: Santos *et al.* (2015).

A avaliação da porosidade de misturas cimentadas pode ser realizada utilizando diferentes metodologias. A NBR 9778 (ABNT, 2005) indica os procedimentos para determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica de argamassas e concretos endurecidos, baseados na massa da amostra seca em estufa e na massa da amostra saturada em água, após imersão e fervura. Na NBR 9779 (ABNT, 2012a) a porosidade de argamassas e concretos endurecidos é avaliada por meio da absorção de água por capilaridade de elementos parcialmente imersos em água. É possível, ainda, avaliar a porosidade por meio da porosimetria de mercúrio (intrusão de mercúrio), imagens de microscopia eletrônica de transmissão e microscopia eletrônica de varredura (MEV), além de outras técnicas descritas na literatura.

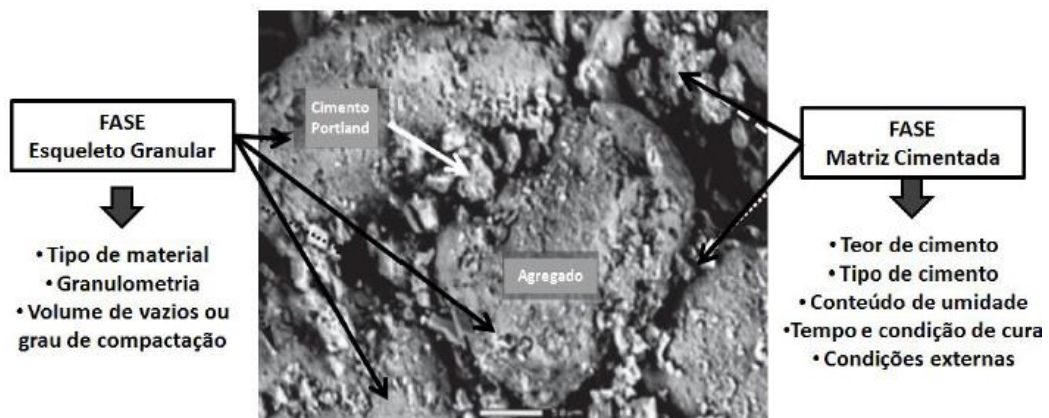
O estudo da porosidade dos materiais cimentados é essencial na previsão da durabilidade e resistência. Segundo Vieira (2008), quando um elemento de concreto é submetido a esforços de compressão, o dano se inicia em um ponto de maior concentração de energia nesse elemento, que pode estar localizado em uma região que contenha vazios, decorrentes da perda de água por evaporação ou devido à composição porosa do concreto. A partir desse ponto, o dano se desenvolve através da formação de microfissuras no interior do concreto. Logo, percebe-se que a baixa porosidade proporciona um aumento na resistência mecânica do material, uma vez que a matriz e a ligação agregado-matriz se apresentam mais homogêneas, menos sujeitas a situações de concentração de tensões.

Algumas pesquisas foram conduzidas na tentativa de identificar parâmetros de influência na porosidade do concreto. Campiteli (1987) e Fornasier (1995), por exemplo, apontam a quantidade de água na mistura, a porosidade dos agregados, a fissuração e as deficiências na produção dos concretos, como fatores de influência na porosidade do material. Para Helene (1993), a quantidade, forma e distribuição dos poros presentes no concreto são decorrentes da relação água/cimento, da idade e da cura, ou seja, do grau de hidratação dos

grãos de cimento. Silva *et al.* (2018) também indicam que a porosidade e a permeabilidade aumentam ao passo que o fator água/aglomerante cresce. A influência do tipo de cimento na porosidade do concreto é discutida por Castro *et al.* (2011). Adicionados a esses parâmetros, Castro e Pandolfelli (2009) apresentam a técnica de compactação como variável de influência na disposição dos agregados na mistura e, por consequência, na porosidade do material.

No que diz respeito à brita graduada tratada com cimento, a análise da estrutura apresentada por Xuan *et al.* (2012) e Klinsky e Faria (2015) apontam a porosidade como variável de influência nas propriedades mecânicas da mistura. O comportamento mecânico da BGTC é resultado da contribuição de duas fases: a fase do esqueleto granular compactado e a fase da matriz cimentada. Enquanto a fase do esqueleto granular determina a estabilidade mecânica da mistura sob a ação das cargas, a fase da matriz cimentada controla a resistência de ligação entre as partículas. A Figura 4 ilustra as duas fases descritas, na qual se observa que a fase do esqueleto granular é influenciada pelo tipo de agregado, granulometria e volume de vazios (porosidade) ou grau de compactação, ao passo que a fase de matriz cimentada é governada pelo teor e tipo de cimento, teor de umidade, tempo e condição de cura, condições ambientais, teor de finos, dentre outros fatores.

Figura 4 – Fase granular e matriz cimentada

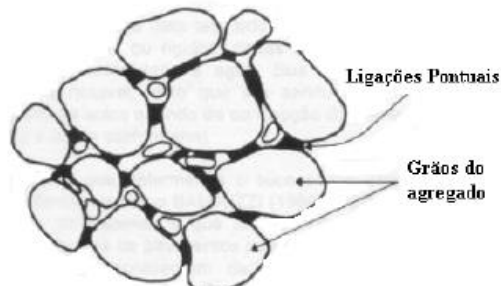


Fonte: Xuan *et al.* (2012).

Conforme descrito por Balbo (2006), a BGTC apresenta matriz heterogênea, constituída por agregados, ligações pontuais promovidas pela pasta de cimento, além dos poros presentes na mistura (Figura 5). Essa quantidade de poros, assim como discutido em pesquisas sobre concreto, pode ser decorrente de fatores como distribuição dos agregados, teor e tipo de cimento, umidade, mecanismos e grau de compactação, condições de cura, aditivos e adições

que podem ser inseridos às misturas, ou mesmo da interação entre os fatores mencionados. Os tópicos seguintes abordam de maneira mais detalhada esses aspectos.

Figura 5 – Representação livre da estrutura interna das ligações pasta-agregado na BGTC



Fonte: Balbo (2006).

2.3.1 Agregados

O agregado é um material granular, sem forma e volume definidos (PETRUCCI, 1998), geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para uso em engenharia (FORNASIER, 1995). Entretanto, em uma abordagem mais recente, Neville (2016) afirma que os agregados não são verdadeiramente inertes, já que suas propriedades físicas, térmicas e, algumas vezes, químicas influenciam o desempenho de misturas cimentadas. Assim, conhecer as características dos agregados é fundamental para uma dosagem apropriada dessas misturas.

Um aspecto significativo sobre a influência dos agregados na porosidade de misturas cimentadas, diz respeito à distribuição granulométrica desses materiais. De acordo com Prado (2018), uma composição granulométrica bem graduada resulta em uma mistura com menor índice de vazios, conferindo maior disponibilidade de argamassa na matriz da brita graduada tratada com cimento e melhor interação entre os agregados na mistura. Uma mistura é dita bem graduada quando as frações menores existem em quantidade suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores, propiciando o menor volume de vazios possíveis (FARIAS E PALMEIRA, 2010).

Nesse contexto, cabe destacar o conceito de empacotamento, ou interação entre os agregados. O empacotamento corresponde à correta seleção da proporção e tamanho dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente (OLIVEIRA *et al.*, 2000). Castro e Pandolfelli (2009) explicam que o conceito de alta densidade de empacotamento pode ser visto como um parâmetro chave para a obtenção de materiais cimentícios de alto desempenho e citam a distribuição granulométrica, morfologia

das partículas, técnica de compactação e porosidade como fatores que influenciam no empacotamento dos agregados.

No Brasil, existem algumas especificações de faixa granulométrica de BGTC para uso em camadas do pavimento. No Estado de São Paulo, onde se iniciou o uso do material no país, o Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP), através da especificação técnica ET-DE-P00/009, estabelece a faixa granulometria para sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento. O Departamento de Estradas e Rodagem do Estado do Paraná também apresenta especificação sobre o assunto. Por meio da especificação de serviços rodoviários ES-P 16/18 (DER/PR, 2018) são indicadas três faixas granulométrica da BGTC para uso em pavimentação. Segundo essas especificações, além de atender aos limites da faixa granulométrica, a porcentagem do material que passa na peneira N° 200 não deve ultrapassar 2/3 da porcentagem que passa na peneira N° 40.

É possível, ainda, encontrar normatização sobre o assunto em publicações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A NBR 11803 (ABNT, 2013a) apresenta duas faixas granulométricas as quais a BGTC deve se enquadrar. A referida norma estabelece que a granulometria deve ser contínua e a diferença entre as porcentagens passante nas peneiras com abertura de malha de 4,75 mm e 0,420 mm deve estar compreendida entre 20% e 30%. A Tabela 1 reúne as faixas granulométricas indicadas pelo DER/SP, DER/PR e ABNT.

Tabela 1 – Faixas granulométricas brasileiras de BGTC

Peneira de malha quadrada		DER/SP	DER/PR			ABNT	
		% em massa passando					
ASTM	mm	DER/SP	Faixa I	Faixa II	Faixa III	Graduação A	Graduação B
2"	50,8		100	-	-	100	-
1 1/2"	37,5	100	90 – 100	100	-	90 - 100	-
1"	25	90 - 100	-	-	100	-	100
3/4"	19	75 - 95	50 – 85	60 - 95	88 - 100	50 - 85	90 – 100
3/8"	9,50	45 - 64	35 – 65	40 -75	55 - 75	34 - 60	80 – 100
Nº 4	4,8	30 - 45	25 – 45	25 - 60	41 - 56	25 - 45	35 – 55
Nº 10	2	18 - 33	18 – 35	15 - 45	30 - 44		
Nº 40	0,42	7 - 17	8 – 22	8 - 25	15 - 25	8 - 22	8 – 25
Nº 80	0,18	1 - 11					
Nº 200	0,075	0 - 8	3 – 9	2 - 10	2 - 7	2 - 9	2 – 9

Fonte: DER/SP (2005), DER/PR (2018), ABNT (2013a).

A circular consultiva AC 150/5370-10H, publicada em 2018 nos Estados Unidos, recomenda materiais e métodos usados para construção em aeroportos. Nessa circular é apresentado o conceito *Cement-Treated base* (CTB), definido como material composto por

agregado mineral e cimento, uniformemente misturados com água. O documento estabelece que a composição granulométrica deve satisfazer o exposto na Tabela 2 e a mistura final do agregado deve ser bem graduada, não devendo variar do limite inferior em uma peneira ao limite superior em peneiras adjacentes, ou vice-versa. Uma composição granulométrica bem graduada proporciona um melhor arranjo estrutural, diminuindo os vazios na mistura e, por consequência, reduz as regiões de altas concentrações de tensões.

Tabela 2 – Faixa granulométrica AC 150/5370-10H

abertura mm	% em massa passando
50	100
25	90 - 100
4,75	45 - 95
2	37 - 80
0,425	15 - 50
0,075	0 - 15

Fonte: *U.S. Department of Transportation* (2018).

A Agência Nacional de Estradas da África do Sul, país com notáveis avanços na engenharia de pavimentos, publicou o *South African Pavement Engineering Manual* (SAPEM, 2014), o qual indica as faixas granulométricas apresentada na Tabela 3 para materiais estabilizados com cimento.

Tabela 3 – Faixa granulométrica SAPEM (2014)

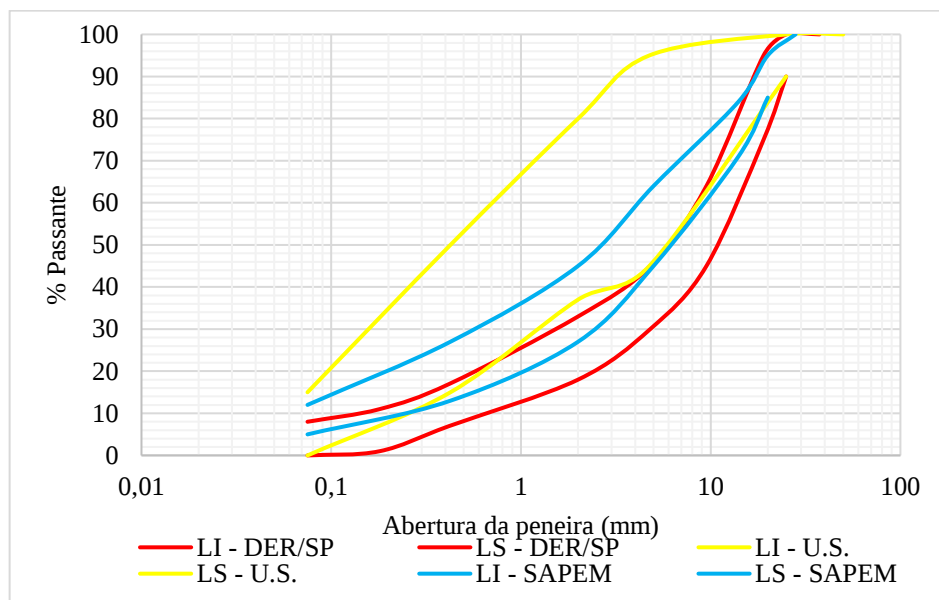
abertura mm	Tamanho nominal máximo do agregado (% passante)	
	38 mm	28 mm
38	100	
28	90 - 100	100
20	75 - 95	85 - 95
14	65 - 85	71 - 84
5	48 - 62	45 - 64
2	41 - 53	27 - 45
0,425	30 - 47	13 - 27
0,075	5 - 12	5 - 12

Fonte: SAPEM (2014).

Na Figura 6 é possível comparar as faixas granulométricas indicadas pelo DER/SP (2005), *U.S. Department of Transportation* (2018) e SAPEM (2014) com tamanho nominal máximo do agregado igual a 28 mm. Percebe-se que a composição granulométrica apresentada

pelos Estados Unidos (2018) resulta em uma mistura com maior quantidade de agregado miúdo, enquanto a do DER/SP (2005) é constituída por maior percentual de agregado graúdo, quando comparadas às demais. A curva granulométrica indicada no SAPEM (2014) se apresenta como uma intermediária entre as duas anteriores, com mais finos quando comparada à curva do DER/SP, porém com maior percentual de agregado graúdo em relação à composição fornecida pela circular consultiva dos Estados Unidos. Agregado graúdo é o material retido na peneira N° 10 (2,0 mm), enquanto agregado miúdo corresponde ao material que passa na peneira N° 10 (2,00 mm) e fica retido na peneira N° 200 (0,075 mm) (BRASIL, 2006).

Figura 6 – Comparação entre faixas granulométricas



Fonte: Própria autora (2022).

Prado (2018) e Prado *et al.* (2020) avaliaram as propriedades mecânicas da BGTC a partir da variação de alguns fatores, entre eles a faixa granulométrica. Na pesquisa, foram utilizadas duas faixas granulométricas, uma com a especificação técnica ET-DE-P00/009 (DER/SP, 2005) e outra com base no Manual de Engenharia de Pavimentos da África do Sul (SAPEM, 2014), denominadas faixas A e B, respectivamente. O estudo concluiu que para as mesmas condições de cura, tipo de cimento, teor de cimento e energia de compactação, a faixa B, com maior teor de fração areia, confere melhores respostas aos esforços a que estarão submetidos no pavimento. Maiores valores de resistência à tração são preferíveis às britas graduadas tratadas com cimento do ponto de vista mecânico, por ser uma variável diretamente relacionada à fadiga, que é o seu principal mecanismo de dano.

Nessa pesquisa, verificou-se que a resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração por compressão diametral (RTCD), o módulo de elasticidade (E) e módulo dinâmico (E*) se apresentam condicionados à relação agregado graúdo/miúdo presente na mistura, sendo esta relação a responsável por um maior ganho de peso específico aparente seco máximo. Sobre esse aspecto, constatou-se que os resultados de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima podem ser afetados tanto pela distribuição granulométrica, quanto pela forma, dimensão e massa específica dos agregados (Tabela 4).

Tabela 4 – Pesos específico aparente seco máximo das amostras de BGTC estudadas.

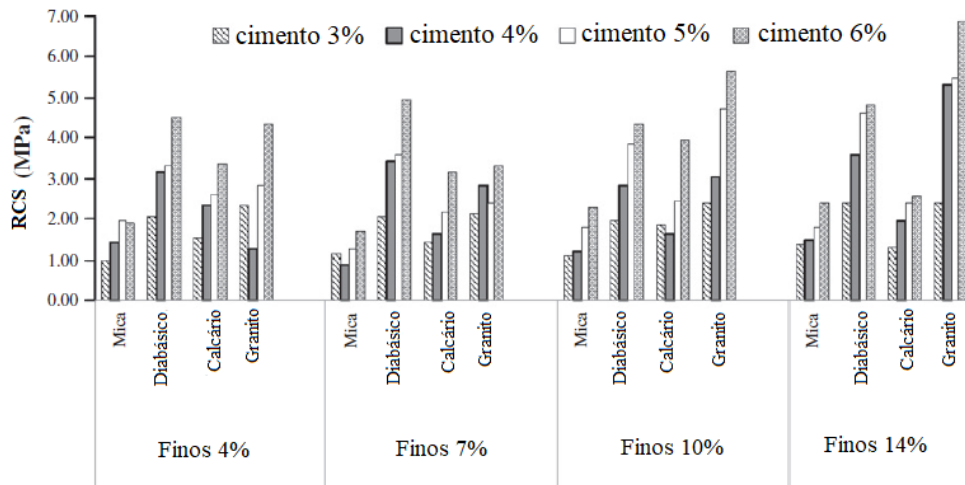
Amostras	A			B		
Teor de cimento (%)	3	4	5	3	4	5
Umidade ótima (%)	9,0	9,2	9,7	8,2	8,8	9,8
Peso específico aparente seco máximo (KN/m ³)	22,46	22,47	22,61	22,72	22,60	22,36

Fonte: Prado (2018).

Percebeu-se, ainda, que os resultados de módulo de resiliência (MR) obtidos por Prado (2018) e Prado *et al.* (2020) são dependentes da granulometria. O módulo resiliente da mistura aumenta com a maior interação entre os grãos dos agregados, aumento da área de contato, com a redução dos vazios, sendo a granulometria B a que melhor atendeu a esse requisito.

Davis *et al.* (2007) investigaram a influência de alguns fatores no desempenho da BGTC, dentre eles a mineralogia do agregado e teor de finos (considerados nesse estudo como partículas menores que 0,075 mm) em misturas de agregado tratado com cimento. Quanto à mineralogia do agregado, foram avaliados agregados com quatro mineralogias distintas, predominantemente: mica, calcário, diabásio e granito. Os resultados permitiram verificar o efeito da mineralogia do agregado na resistência à compressão simples (RCS), obtendo-se maiores resistências para os agregados constituídos por diabásio ou granito e menores para os agregados com predominância de micas. Em se tratando do teor de finos, os autores constaram que para as condições de ensaios de congelamento/descongelamento, com e sem abrasão física, além do teor de finos impactar na resistência à compressão, sendo maior quanto maior o teor de finos, o aumento dessas partículas influenciou na linearidade da relação entre RCS e teor de cimento. A Figura 7 ilustra essas conclusões.

Figura 7 – Influência do tipo de agregado e teor de finos de BGTC na RCS aos 7 dias



Fonte: Xuan *et al.* (2012).

Os estudos e discussões apresentados demonstram o efeito da distribuição granulométrica na porosidade e comportamento mecânico das misturas, em decorrência do melhor arranjo das partículas, ou seja, maior grau de empacotamento, consequentemente maior densidade. As pesquisas de Prado (2018), Prado *et al.* (2020) e Davis *et al.* (2007) corroboram com a hipótese de que existe uma relação entre a porosidade e comportamento mecânico da BGTC, obtendo-se melhor desempenho quanto menor for a quantidade de vazios na mistura. Porém, as características e distribuição dos agregados não são as únicas variáveis significativas no estudo da porosidade de materiais cimentados, sendo necessário avaliar outros parâmetros, a exemplo do teor de cimento e umidade da mistura.

2.3.2 Teor de cimento e umidade da mistura

Na mistura de BGTC, o cimento Portland e a água formam uma pasta, que se mistura ao agregado miúdo, promovendo ligações pontuais nos agregados graúdos, mas sem envolvê-los totalmente como ocorre no concreto de cimento Portland. Com o tempo, a mistura endurece pela ação irreversível das reações de hidratação do cimento, adquirindo resistência mecânica capaz de tornar possível seu uso como camada de pavimento.

Conforme explicam Andrade *et al.* (2015), o fato da pasta de cimento não envolver totalmente os agregados favorece um arranjo estrutural com certa quantidade de vazios, conforme representação livre apresentada na Figura 5. Todavia, além da porosidade decorrente da quantidade de cada componente na mistura, com percentual de cimento usualmente entre 3% e 5%, parte da porosidade da BGTC se deve à porosidade da pasta de cimento Portland.

O cimento Portland é um ligante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland em conjunto com uma ou mais formas de sulfato de cálcio, em proporções que variam de 3% a 5% em massa, e eventuais adições ativas facultativas (BATTAGIN e BATTAGIN, 2010). O clínquer consiste em uma mistura heterogênea de vários compostos produzidos por reações a alta temperatura, entre óxido de cálcio e sílica, alumina e óxido de ferro (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Os quatro principais compostos do clínquer são o C_3S (alita), C_2S (belita), C_3A (celita) e C_4AF (ferrita). A Tabela 5 mostra as notações abreviadas utilizadas pela química do cimento, com seus respectivos nomes e composições em óxidos.

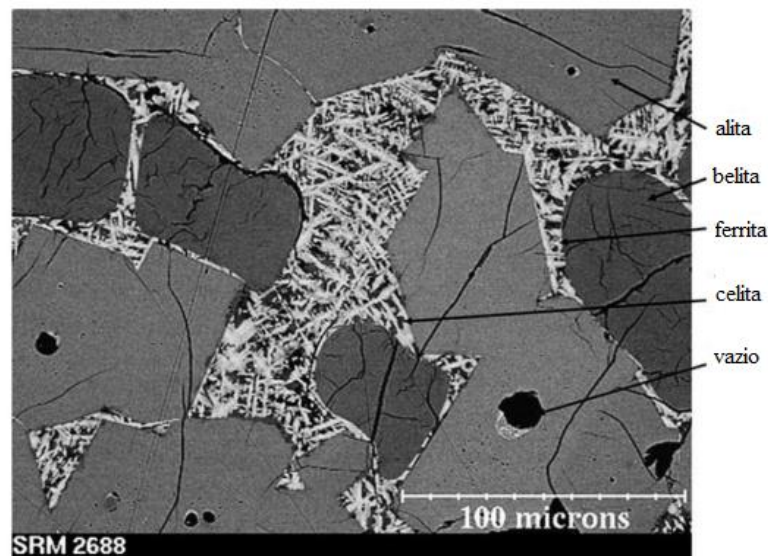
Tabela 5 - Principais Compostos do cimento Portland

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato de tricálcico	$3CaO.SiO_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2CaO.SiO_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3CaO.AL_2O_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4Ca.AL_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

Fonte: Neville (2016).

A distribuição de percentual, em massa, de cada fase pode ser observada na Figura 8, onde a alita é vista como a fase dominante. Alita e belita formam massas sólidas após a hidratação, enquanto celita e ferrita formam matrizes intersticiais entre as fases sólidas (YEO, 2011).

Figura 8 – Imagem retrodifundida com zoom de 100 μ m de uma seção típica de clínquer de cimento não hidratado



Fonte: Taylor (1997), *apud* Yeo (2011).

Além dos principais compostos listados na Tabela 5, existem compostos secundários, como MgO (óxido de magnésio), TiO_2 (dióxido de titânio), Mn_2O_3 (óxido de manganês), K_2O (óxido de potássio), e Na_2O (óxido de sódio), que normalmente constituem um pequeno percentual da massa de cimento (NEVILLE, 2016).

Os aglomerantes hidráulicos são produtos de processos a altas temperaturas, caracterizados, portanto, pela ausência de água quimicamente combinada (SILVA, 2010). Quando os compostos do cimento Portland entram em contato com a água, ocorre o processo denominado de hidratação do cimento, que corresponde às reações químicas que acontecem entre a água e silicatos e aluminatos presentes no cimento.

Os componentes do clínquer atuam de diferentes maneiras no processo químico de hidratação, cada um com contribuições específicas nas propriedades de materiais cimentados. Mehta e Monteiro (2008) explicam que quando o cimento Portland é disperso em água, o sulfato de cálcio e os compostos formados a altas temperaturas começam a entrar em solução e a fase líquida se torna saturada com várias espécies de íons. Em poucos minutos da hidratação do cimento, como resultado da interação entre cálcio, sulfato, aluminato e íons hidroxilas, começam a aparecer cristais aciculares de trissulfoaluminato de cálcio hidratado, conhecido como etringita. Horas mais tarde, grandes cristais prismáticos de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e pequenos cristais fibrosos de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) começam a preencher os espaços vazios antes ocupados por água e partículas de cimento em dissolução. Dentro de alguns dias, dependendo da relação alumina-sulfato do cimento Portland, a etringita pode se tornar instável e se decompor para formar o monossulfatoaluminato hidratado, que tem forma de placa hexagonal. As características das quatro principais fases sólidas na pasta de cimento hidratada são apresentadas a seguir (METHA e MONTEIRO, 2008):

- a) Silicato de cálcio hidratado: A fase de silicato de cálcio hidratado, abreviada como C-S-H, compõe 50% a 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento completamente hidratada e determina as propriedades da pasta. O material por vezes citado como gel de C-S-H, é originário da hidratação do C_3S e C_2S . O tamanho dos poros de gel, ou distância sólido-sólido, é cerca de 18 Å;
- b) Hidróxido de cálcio: Os cristais de hidróxido de cálcio (também denominados portlandita) constituem de 20% a 25% do volume de sólidos na pasta de cimento hidratada. Comparado com o C-S-H, a potencial contribuição à resistência do hidróxido de cálcio é limitada devido à sua área superficial consideravelmente mais baixa;
- c) Sulfoaluminatos de cálcio: ocupam de 15% a 20% do volume sólido da pasta de cimento hidratada. Nos estágios iniciais de hidratação do cimento Portland, a relação iônica entre

o sulfato/alumina, favorece a formação de etringita ($C_6AS_3H_{32}$). A etringita eventualmente se transforma em monossulfato hidratado (C_4ASH_{18}), o qual cristaliza em placas hexagonais, tornando o concreto vulnerável ao ataque por sulfato;

- d) Grãos de clínquer não hidratados: A depender da distribuição e tamanho das partículas do cimento anidro e do grau de hidratação, alguns grãos de clínquer não hidratados podem ser encontrados na microestrutura da pasta de cimento hidratada.

Helene e Andrade (2010) relatam que imediatamente após a mistura, as pastas de cimento são constituídas por cimento anidro, água e ar. Porém, com a hidratação progressiva do cimento, novas fases se formarão e ocorrerá a variação dos volumes de cada fase, apesar do volume total da pasta permanecer constante, desde que não ocorra evaporação da água capilar, a qual introduziria retração por secagem.

A Tabela 6 mostra as fases da pasta de cimento para 100% de hidratação e relação água cimento de 0,30; 0,40 e 0,60. Considerando que todas as pastas atingiram o mesmo nível de hidratação, percebe-se a influência da relação água cimento na porosidade capilar da pasta de cimento. Nota-se que menores percentuais de fases não resistentes foram obtidos para menores relações água/cimento. Para um mesmo grau de hidratação, a melhoria das características mecânicas da pasta e a redução de sua porosidade estão diretamente relacionadas à redução da relação água/cimento (HELENE E ANDRADE, 2010).

Tabela 6 – Percentual das fases em pastas com relação água/cimento distintas

Fases da pasta de cimento			Pasta com 100% de hidratação								
			1:0,60			1:0,40			1:0,30		
			dm³	%	%	dm³	%	%	dm³	%	%
Fases resistentes (dm³)	Vol. de gel hidratada	Produto sólido	0,491	51,2	70,2	0,479	63,8	88,5	0,359	55,6	89,4
		Poro de gel	0,182	19,0		0,177	23,6		0,133	20,6	
	Volume do cimento anidro		0	0		0,008	1,07		0,085	13,2	
Fases não resistentes (dm³)	Vol. total de ar		0,037	3,9	29,8	0,029	3,9	11,5	0,025	3,9	10,6
	Vol. de poros vazios		0,059	6,1		0,057	7,6		0,043	6,7	
	Vol. de poros com água		0,190	19,8		0,000	0,0		0,000	0,0	
Volume total da pasta endurecida			0,959	100%		0,750	100%		0,645	100%	

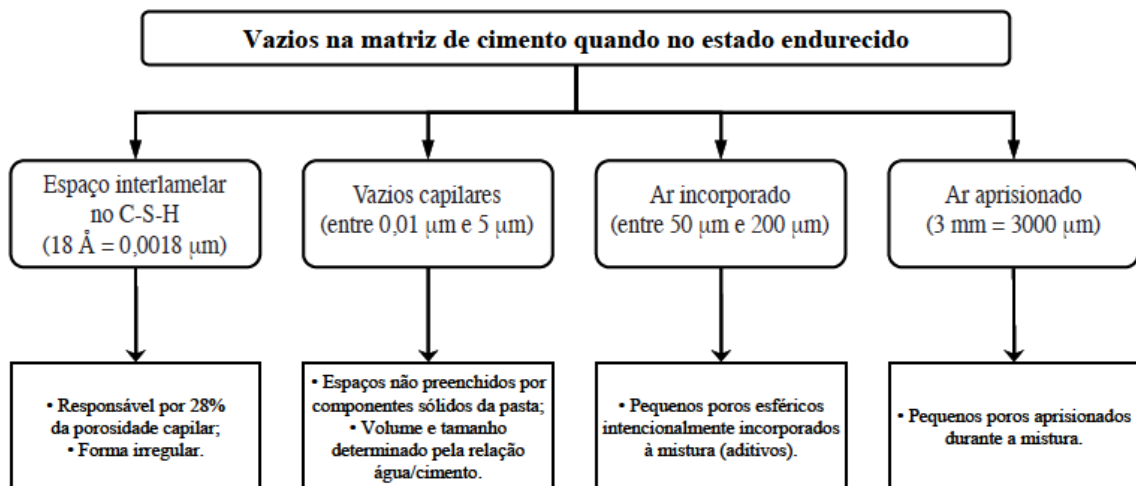
Fonte: Helene e Andrade (2010).

Para as pastas com relação água/cimento de 0,30 e 0,40 (Tabela 6), a água não foi suficiente para hidratar o cimento, mesmo após 100% de hidratação, restando um volume de cimento anidro ao final do processo. É interessante destacar que, para os limites utilizados, o cimento não hidratado presente na pasta não interferiu negativamente na resistência. Entretanto,

a presença dessas partículas em compósitos com baixa porosidade pode influenciar a estabilidade termodinâmica ou a durabilidade do material (DUREKOVIC, 1995).

A pasta de cimento hidratada contém vazios com importante influência nas propriedades da pasta (MEHTA E MONTEIRO, 2008). A Figura 9 indica os tipos de vazios presentes na matriz de cimento e suas principais características.

Figura 9 – Vazios presentes na matriz de cimento quando no estado endurecido



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

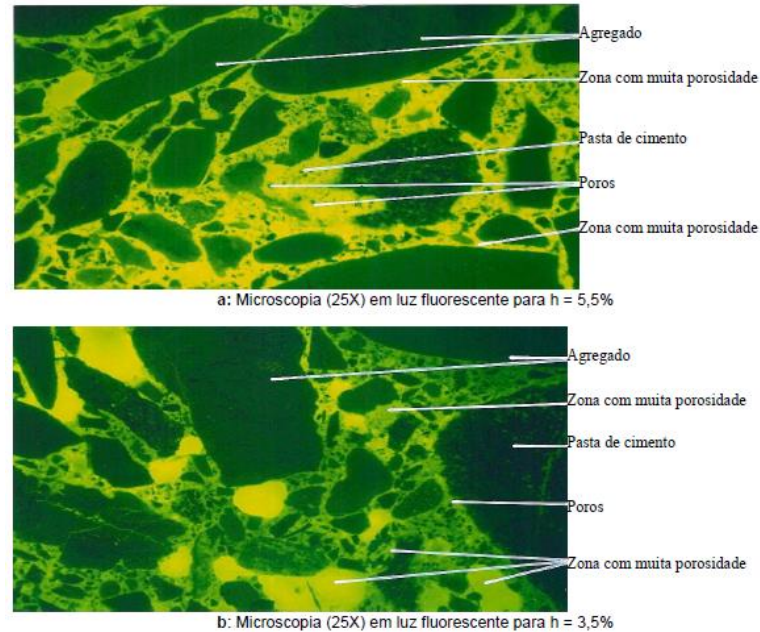
Mehta e Monteiro (2008) relatam que o espaço interlamelar no C-S-H possui tamanho muito pequeno para ter efeito na resistência e permeabilidade da pasta de cimento hidratada. Porém, as pontes de hidrogênio podem reter água nesses vazios e sua remoção contribuir para retração por secagem e fluência. Os autores explicam que os vazios ou poros capilares representam os espaços não preenchidos pelos componentes sólidos da pasta de cimento hidratado. A hidratação do cimento pode ser vista como um processo durante o qual o espaço originalmente ocupado pelo cimento e pela água é preenchido gradualmente pelos produtos da hidratação.

Para Castro e Pandolfelli (2009) os vazios ou poros capilares em uma matriz de cimento pura hidratada são determinados principalmente pela relação água/cimento. Assim, materiais à base de cimento com porosidade e permeabilidade reduzidas são obtidos com a adoção de uma relação água/cimento baixa.

Balbo (1997, 2006) analisou a influência do teor de umidade na resistência e módulo de elasticidade da BGTC. Foram preparadas seções delgadas, 30 µm, de corpos de prova de BGTC aos quarenta e dois dias de cura, moldados com a mesma granulometria, tipo de agregado (agregado de origem calcária), mesmo consumo de cimento (4% em peso), porém com

umidades de compactação distintas (umidade ótima e 2% abaixo da ótima). As lâminas delgadas foram submetidas à análise microscópica com luz fluorescente e luz polarizada, obtendo-se as imagens apresentadas na Figura 10.

Figura 10 – Imagens de microscópio de misturas de BGTC



Fonte: Balbo (1997, 2006).

A Figura 10 e os resultados obtidos no estudo demonstraram que a amostra mais seca (menor umidade) não aparentava água em excesso, possuíam hidratação mais fraca da pasta de cimento (em % de cimento total), média capilaridade da pasta de cimento e ligações mais fortes cimento/agregados em relação à situação oposta, com a mistura compactada na umidade ótima. Assim, concluiu-se que as amostras compactadas no ramo seco da curva de compactação apresentavam matriz mais homogênea e menos porosa, quando comparadas as amostras compactadas na umidade ótima.

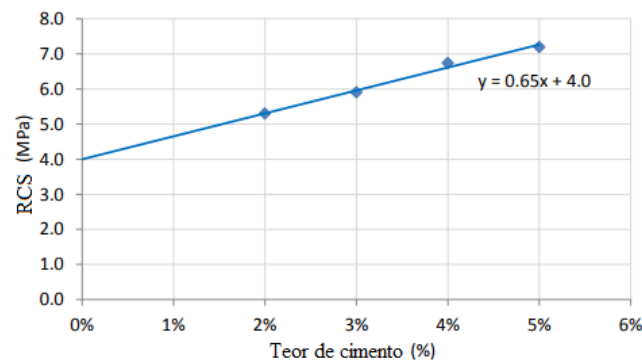
Ao avaliar misturas de BGTC com percentuais de cimento de 2%, 4% e 6%, Yeo (2011) encontrou maiores valores de resistência à compressão simples (RCS) associados a misturas com maiores teores de cimento, conforme se observa na Tabela 7 e Figura 11, em decorrência das reações de hidratação do cimento. Os resultados do ensaio de compactação da Tabela 7 para os teores de 1%, 3% e 5% foram determinados a partir da interpolação dos resultados encontrados nos percentuais ensaiados (2%, 4% e 6%).

Tabela 7 – Densidade, umidade ótima e razão água/cimento para diferentes teores de cimento em misturas de BTGC aos 28 dias de cura

Teor de cimento	1%	2%	3%	4%	5%	6%
Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)	2,348	2,347	2,346	2,345	2,344	2,343
umidade ótima (%)	5,75	6,00	6,25	6,50	6,75	7,00
RCS	4,65	5,30	5,91	6,74	7,20	-

Fonte: Yeo (2011).

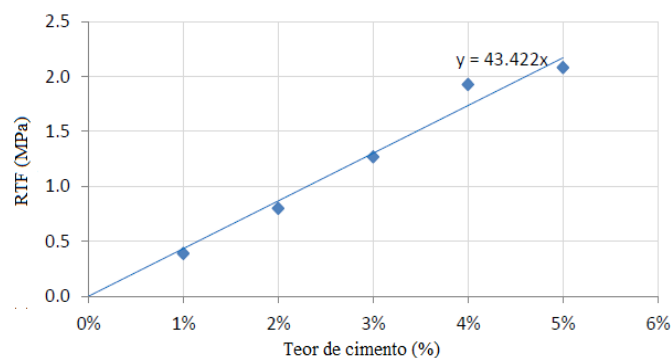
Figura 11 – Resistência à compressão *versus* teor de cimento em amostras de BGTC aos 28 dias de cura



Fonte: Yeo (2011).

A resistência à tração na flexão (RTF) também foi investigada por Yeo (2011). Os resultados obtidos (Figura 12) indicam a influência do teor de cimento na RTF.

Figura 12 – Resistência à tração na flexão *versus* teor de cimento em amostras de BGTC aos 28 dias de cura



Fonte: Yeo (2011).

A RCS de misturas de BGTC também foi avaliada por Prado (2018). Analisou-se a RCS de misturas de BGTC com duas curvas granulométricas distintas (A e B), moldadas na umidade ótima e 1% abaixo da ótima, com diferentes teores de cimento tipo CP II-Z-32 RS (cimento Portland composto com pozolana e classe de resistência 32 MPa). Ao avaliar os resultados aos

28 dias de cura com mesma composição granulométrica (Tabela 8), percebe-se a influência da umidade, teor de cimento e interação entre esses dois parâmetros na resistência das misturas. A análise de significância realizada na pesquisa apontou o teor de cimento como variável de maior influência na RCS, obtendo-se maiores resistência para maiores teores do ligante hidráulico.

Tabela 8 – Resultados de ensaios mecânicos para amostras de BGTC aos 28 dias de cura

Amostra		A				
Teor de cimento	3%	3% (-1)	4%	4% (-1)	5%	5% (-1)
Teor de umidade	9,00	8,00	9,20	8,20	9,70	8,70
RCS (MPa)	5,41	5,66	8,15	-	10,35	10,45
Amostra		B				
Teor de cimento	3%	3% (-1)	4%	4% (-1)	5%	5% (-1)
Teor de umidade	8,20	7,20	8,80	7,80	9,80	8,80
RCS (MPa)	4,42	5,40	8,57	7,13	-	8,82

Nota: I% (-1) = I% de cimento e umidade 1% abaixo da ótima.

Fonte: Prado (2018).

A influência do teor de cimento e umidade nas propriedades da brita graduada com cimento é verificada nas pesquisas conduzidas por Balbo (1997, 2006), Yeo (2011) e Prado (2018). As discussões apresentadas demonstram a importância dos produtos da hidratação do cimento na coesão da mistura e suas propriedades mecânicas. Todavia, o efeito do cimento na porosidade e características mecânicas da BGTC não está condicionado apenas ao seu teor, mas também ao tipo de cimento utilizado na mistura, ou seja, sua composição.

2.3.3 Tipo de cimento

Atualmente, o mercado brasileiro dispõe de algumas opções de cimento Portland, que diferem entre si pela proporção de clínquer, sulfatos de cálcio, materiais carbonáticos e adições, como escórias, pozolanas e calcário, acrescentadas no processo de moagem.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da NBR 16697 (ABNT, 2018c) indica as nomenclaturas e siglas dos cimentos Portland normatizados no país (Tabela 9) e especifica as principais características de cada um dos tipos normatizados.

Tabela 9 – Designação normativa dos cimentos no Brasil

Designação normatizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC -
	Com adição	CP I-S		
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E		
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material pozzolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III		
Cimento Portland pozzolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40	
	Não estrutural	CPB	-	-

Nota: O sufixo RS significa resistente a sulfatos; o sufixo BC é a sigla para baixo calor de hidratação; as classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em MPa; ARI corresponde ao cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14MPa.

Fonte: ABNT (2018c).

As adições ao cimento melhoram certas características do ligante, tornando-o mais vantajoso ou recomendável para determinadas aplicações. A Tabela 10 mostra os limites de composição de cada tipo de cimento Portland brasileiro.

Tabela 10 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagem em massa)

Sigla	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozzolânico	Material Carbonático
CP I	95 – 100	0 – 5		
CP I-S	90 – 94	0	0	6 – 10
CP II-E	51 -94	6 – 34	0	0 – 15
CP II-Z	71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
CP II-F	75 – 89	0	0	11 – 25
CP III	25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
CP IV	45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
CP V	90 – 100	0	0	0 – 10
CPB 25, 32 ou 40	75 – 100	-	-	0 – 25
CPB	50 – 74	-	-	26 – 50

Fonte: ABNT (2018c).

As reações de hidratação do cimento têm efeito direto na porosidade de misturas cimentadas e, conseqüentemente, na resistência. A variedade na composição dos diferentes tipos de cimento Portland resulta em propriedades distintas, devido a diferenças na velocidade, calor e grau de hidratação que as adições promovem.

Conforme afirmam Battagin e Rodrigues (2014), todos os tipos de cimento produzidos no Brasil têm características que os qualificam para uso geral. No entanto, alguns tipos são mais adequados a algumas aplicações. O cimento Portland Comum (CP I) é considerado como referência de comparação das características e propriedades dos tipos de cimento posteriormente desenvolvidos. Esse tipo de cimento é adequado para o uso em construções em que não exista o risco de exposição a sulfatos no solo ou em águas subterrâneas (NEVILLE, 2016).

A Associação Brasileira de cimento Portland (ABCP, 2002) define os cimentos Portland compostos (CP II) como os que possuem composição intermediária entre os cimentos Portland comuns e os cimentos Portland com adições (alto-forno e pozzolânico). O CP II é um cimento no qual podem ser acrescidas adições como escória (CP II-E), material carbonático (CP II-F) e material pozzolânico (CP II-Z), nos limites estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018c), Tabela 10.

Battagin e Rodrigues (2014) explicam que os materiais carbonáticos são rochas moídas que apresentam carbonato de cálcio em sua constituição, como o próprio calcário. Quando presentes no cimento são conhecidos como fíler calcário. Conforme define Silva (2010), fíler é um material finamente dividido, com diâmetro médio próximo ao do cimento Portland, que, em decorrência da sua ação física, modifica algumas propriedades do concreto, tais como: melhoria na trabalhabilidade e diminuição da permeabilidade, exsudação e tendência à fissuração.

Usualmente, os fíler são inertes, mas podem apresentar alguma atividade hidráulica ou participar de reações com os compostos do clínquer, como o C_3A e C_4AF_8 . O fíler pode também atuar como agentes de nucleação e acelerar a hidratação do clínquer (SILVA, 2010).

Os efeitos da adição da escória de alto-forno e material pozzolânico na composição do cimento Portland do tipo, CP II-E e CP II-Z, respectivamente, são discutidos a seguir. Porém, por se apresentarem em proporções bem inferiores às contidas no CP III e CP IV, as mudanças de propriedades em relação ao CP I não são tão acentuadas. O CP II-E e CP II-Z se destinam a aplicações gerais, enquanto o CP III e CP IV comportam-se melhor em situações específicas (BATTAGIN E RODRIGUES, 2014).

O consumo elevado de energia durante o processo de fabricação de cimento motivou a busca por medidas para diminuição do consumo energético (ABCP, 2002). As alternativas bem-

sucedidas para essa finalidade foram o uso de escórias de alto-forno e materiais pozolânicos na composição dos cimentos Portland de alto-forno (CP III) e pozolânicos (CP IV), respectivamente.

Segundo a CSN (2016), a escória de alto-forno tem propriedades hidráulicas que quando misturada ao clínquer reage quimicamente, produzindo o endurecimento dos materiais cimentados. Quando comparados a outros tipos de cimento, a utilização do CP III está associada a maior resistência à compressão em idades avançadas e uma maior durabilidade, causada por melhorias como a diminuição da porosidade capilar do material cimentado e, consequentemente, redução da permeabilidade. A escória de alto-forno se processa mais lentamente, o que conduz a uma hidratação com menor liberação de calor, garantindo mais estabilidade de volume e diminuindo a probabilidade do surgimento de trincas e fissuras. Todavia, conforme discutido pela ABCP (2002), as reações de hidratação das escórias são tão lentas que para aplicações que exigem um endurecimento mais rápido da mistura pode ser necessário o uso de agentes ativadores, químicos e físicos, para acelerar o processo de hidratação.

A cal liberada durante a hidratação do clínquer é o principal ativador químico da escória de alto-forno quando esta é adicionada ao cimento, ao passo que a ativação física é conseguida pelo aumento da finura quando a escória é moída separada ou conjuntamente com o clínquer (ABCP, 2002).

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), a interação física e química de materiais pozolânicos com o cimento Portland modifica a reologia de concretos, argamassas e pastas no estado fresco e conferem propriedades especiais relacionadas à durabilidade e ao desempenho mecânico no estado endurecido. Esses materiais reagem com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) da hidratação do cimento, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional. Quando comparados a cimento sem uso de materiais pozolânicos ou com menor proporção do material, os cimentos Portland pozolânicos (CP IV) conferem ao concreto, argamassa e pastas um aumento da resistência à compressão e à flexão, em idades avançadas, apesar de uma diminuição nas primeiras idades; redução da porosidade e permeabilidade; aumento da resistência a sulfatos; aumento da resistividade à difusibilidade de íons cloreto; mitigação da reação álcali-agregado; redução da ocorrência de eflorescência; e aumento da resistividade elétrica.

Diante das propriedades do cimento do tipo CP III e CP IV, Battagin e Rodrigues (2014) indicam algumas situações especiais nas quais o uso desses cimento é recomendado: obras de concreto-massa, como barragens e peças de grandes dimensões, fundações de máquinas e

pilares; obras em contato com ambientes agressivos por sulfatos e terrenos salinos; tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, esgotos ou efluentes industriais; concretos com agregados reativos, pois esses cimentos concorrem para minimizar os efeitos expansivos da reação álcali-agregado; pilares de pontes ou obras submersas em contato com águas correntes puras; obras em zonas costeiras ou em água do mar; e pavimentação de estradas e pistas de aeroportos.

Em se tratando dos cimentos de alta resistência inicial (CP V), Neville (2016) explica que o aumento na velocidade de ganho de resistência do cimento de alta resistência inicial é obtido por meio de um teor mais elevado de C_3S e pela maior moagem do clínquer, resultando em maior finura. A maior finura aumenta significativamente a resistência entre 10 e 20 horas, persistindo o aumento até os 28 dias.

Mehta e Monteiro (2008) explicam que no cimento Portland as resistências iniciais serão altas se o cimento contiver grandes quantidades de C_3S (silicato tricálcico) e C_3A (aluminato tricálcico) e apresentarão baixa resistência inicial se o cimento for composto por uma proporção elevada de C_2S (silicato dicálcico). Por outro lado, a resistência final, em idades mais avançadas, de um cimento rico em C_2S deverá ser maior do que a de outro cimento com baixo teor desse componente mineral. A Tabela 11 mostra resultados de resistência à compressão de cimentos brasileiros, em função do tempo de hidratação do cimento.

Tabela 11 – Resultados de resistência à compressão dos cimentos brasileiros, em função da idade

Tipo de cimento	Resultados de resistência à compressão, em MPa, em função da idade					
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	63 dias	91 dias
CP-II-E-32	9,4	22,1	30,5	41,2	44,4	48,9
CP-II-F-32	12,7	26,9	32,4	39,7	42,1	44
CP-II-E-40	-	28,9	37,3	47,2	51,4	56,6
CP-II-Z-32	12,7	24,9	30,5	38,2	40,1	42,6
CP-III-32	6,5	16,3	27,2	41,8	48,4	51,4
CP-III-40	10,5	21,4	33,4	48,2	51,3	56
CP-IV-32	9,6	21,5	28,6	39,9	43,6	46,3
CPV-ARI	24,5	37,4	42,7	48,5	48,8	52,5
CPV-ARI RS	19	33,1	40,2	47,2	49,9	52,4

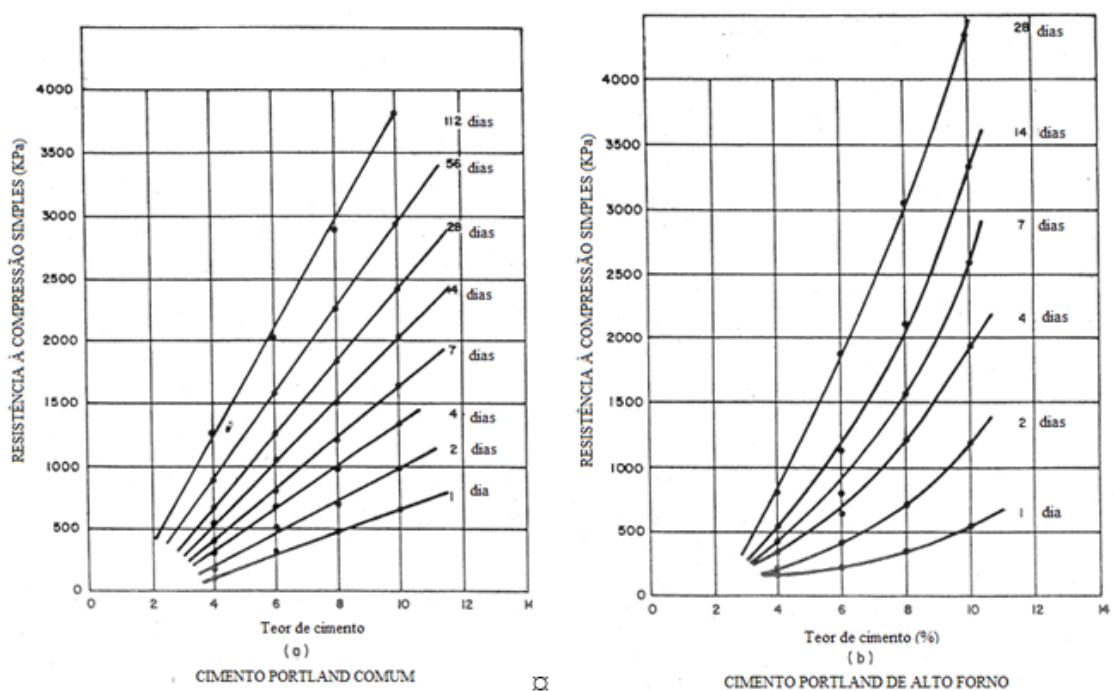
Fonte: Battagin e Battagin (2010).

O cimento Portland branco, como o próprio nome remete, se diferencia dos demais pela sua cor. É produzido a partir de matérias-primas que contêm baixíssimos teores de óxido de ferro (menos do que 0,3% em relação à massa de clínquer) e de magnésio (NEVILLE, 2016). De acordo com a ABCP (2002), esse tipo de cimento pode ser classificado como estrutural,

com classes de resistência similar aos demais tipos de cimento e geralmente utilizados para fins arquitetônicos, ou não estruturais, sem indicação de classe de resistência e utilizados em aplicações não estruturais como rejuntamento de azulejos.

Diante da disponibilidade de diferentes tipos de cimento Portland, a influência do tipo de cimento em misturas cimentadas passou a ser objeto de investigação de pesquisadores. O comportamento mecânico de areias estabilizadas com cimento foi estudado pelo *National Institute for Transport and Road Research* (1986). Na pesquisa foi realizada a comparação do comportamento do material estabilizado com cimento Portland comum e cimento Portland de alto-forno. Foi observado que a resistência à compressão simples de areias tratadas com cimento Portland comum crescia linearmente com o aumento do teor de cimento, enquanto as tratadas com cimento Portland de alto-forno apresentaram um crescimento não linear. Constatou-se, ainda, que após 28 dias de cura as misturas com cimento Portland de alto-forno apresentaram maiores valores de resistência, quando comparadas com os resultados com cimento Portland comum (Figura 13).

Figura 13 – Resistência à compressão simples em areias estabilizadas com cimento



Fonte: *National Institute for Transport and Road Research* (1986).

Os resultados apresentados na Tabela 11 e na Figura 13, além de confirmarem a influência do tipo de cimento no comportamento de misturas cimentadas, demonstram o efeito de outro parâmetro nas características desses materiais, o tempo de cura.

2.3.4 Cura do cimento

O termo “cura do cimento” envolve uma combinação de condições que promovem a hidratação do cimento, como tempo, temperatura e umidade, consideradas imediatamente depois do lançamento de uma mistura cimentada na fôrma (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Conforme dissertado por Neville (2016), o objetivo da cura é manter o concreto saturado, ou o mais próximo possível disso, até que os espaços originalmente preenchidos com água na pasta de cimento fresca tenham sido preenchidos pela quantidade requerida de produtos de hidratação do cimento. Esse processo pode ocorrer segundo dois principais procedimentos: cura úmida e cura por membrana. No primeiro, a superfície do concreto deve estar permanentemente em contato com a água. Tal condição é obtida, na prática, por aspersão contínua, por represamento ou pela cobertura do concreto com areia ou serragem úmida. O segundo método de cura, também denominado método de barreira de água, consiste na prevenção de perda de água da superfície da mistura cimentada sem a possibilidade de ingresso de água do meio externo. As técnicas utilizadas incluem a cobertura da superfície do concreto com lâminas de polietileno sobrepostas ou com papel reforçado.

Como já discutido, as reações de hidratação do cimento, que conferem rigidez às misturas cimentadas e afetam sua porosidade, iniciam-se após o contato da água com cimento e seguem por dias, a depender da composição do cimento e disponibilidade de água na matriz. Assim, para misturas igualmente constituídas e curadas nas mesmas condições de temperatura e umidade, o tempo de cura se torna uma variável relevante na porosidade de misturas cimentadas. A pasta de cimento terá porosidade mínima nas seguintes condições: baixo fator água/cimento; maior idade, para uma dada temperatura; e cura cuidadosa e prolongada (CAMPITELI, 1987).

Apesar da diminuição da porosidade e aumento da resistência de uma dada mistura estarem relacionados com o tempo de cura, esse incremento diminui ao longo do tempo, à medida que as reações de hidratação vão cessando. Balbo (1997) avaliou a resistência à compressão da brita graduada tratada com cimento após 7, 28 e 56 dias de cura, concluindo que aos 28 dias de cura o material já apresentava 97% da resistência registrada aos 56 dias de cura.

Nesse sentido, Lim e Zollinger (2003), propuseram um modelo de evolução da resistência à compressão simples ao longo do tempo de cura da BGTC, Equação (1), a partir da calibração do modelo de previsão indicado pelo *American Concrete Institute* (1998). Para tal, os autores analisaram misturas compostas por calcário britado, com 4% e 8% de cimento Tipo

I (ASTM, 2021b), e misturas de agregado de concreto reciclado, nos mesmos teores e tipo de cimento, conforme resultados apresentados na Figura 14.

$$RCS(t) = RCS(28) \frac{t}{2,5 + 0,90t} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

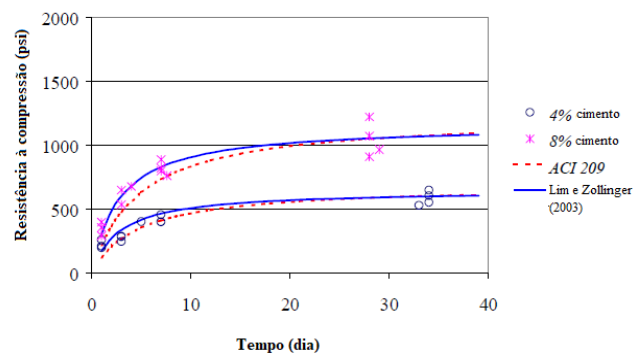
t = tempo em dias;

RCS (t) = resistência à compressão no tempo t;

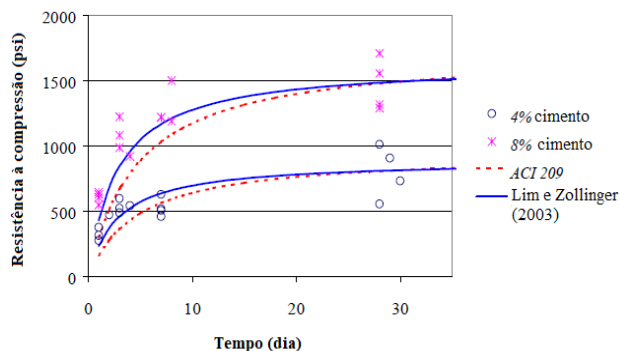
RCS (28) = resistência à compressão aos 28 dias de cura.

A partir da Equação (1), percebe-se maior ganho de resistência nas primeiras idades. Aos 7 dias, o modelo de previsão fornece uma RCS de, aproximadamente, 79% da obtida aos 28 dias. Reforçando as conclusões de Balbo (1997), aos 28 dias é esperada uma RCS em torno de 96% da resistência aos 56 dias. Como mostra a Figura 14, o modelo ACI e o modelo calibrado por Lim e Zollinger (2003) produzem estimativas próximas um do outro, porém o modelo ACI fornece algumas estimativas conservadoras para a resistência das misturas de BGTC em idades iniciais.

Figura 14 – Previsão da evolução da RCS de Misturas de BGTC a) com agregado de concreto reciclado; b) com calcário britado



(a) Mistura de agregado de concreto reciclado

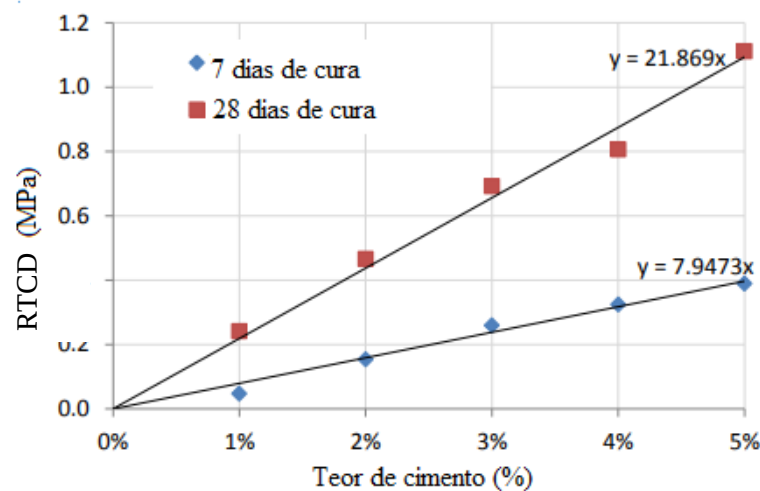


b) mistura com calcário britado

Fonte: Lim e Zollinger (2003).

Yeo (2011) avaliou a resistência à tração por compressão diametral (RTCD), aos 7 e 28 dias de cura, de misturas de BGTC com diferentes teores de cimento, conforme resultados da Figura 15. Percebe-se que, para todos os teores de cimento analisados, um maior tempo de cura resulta em maior RTCD. A influência do teor de cimento no aumento da resistência também é observada, com maiores resistências associadas a maiores teores de cimento. Ao extrapolar os resultados, a interseção em y dos gráficos, que representam a condição granular não tratada, mostra que sem o ligante hidráulico a mistura não possui resistência à tração.

Figura 15 – Resistência à tração por compressão diametral *versus* teor de cimento em amostras de BGTC



Fonte: Yeo (2011).

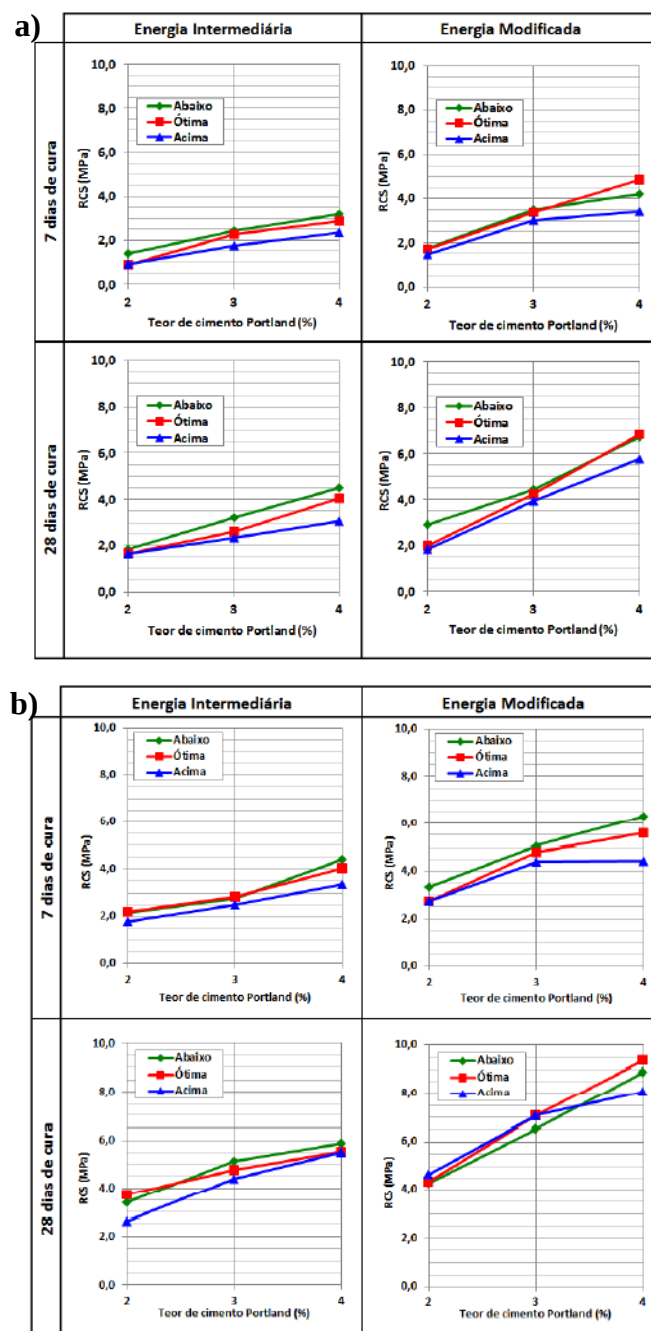
O efeito do tempo de cura na porosidade e características mecânicas de misturas de BGTC está relacionado ao tempo das reações de hidratação do cimento. Entretanto, deve-se destacar a influência da compactação nesses mesmos parâmetros. Para Yeo (2011), devido à baixa proporção de cimento, as misturas de BGTC dependem principalmente da compactação para promover o intertravamento do material, ao contrário do concreto convencional, que depende mais do desenvolvimento de uma matriz de cimento para ligar os agregados e a areia.

2.3.5 Compactação

Com aumento do grau de compactação a RCS da mistura cimentada aumentará e, embora uma baixa densidade possa ser compensada por maior teor de cimento, geralmente é mais econômico alcançar alta resistência por uma boa compactação (XUAN *et al.*, 2012).

Klinsky e Faria (2015) constataram a influência da energia de compactação na RCS da brita graduada tratada com cimento ao analisarem a resistência de misturas com dois tipos de agregados, graníticos e basálticos, compactados em energias de compactação distintas, intermediária e modificada (Figura 16). Percebe-se que, de modo geral, as amostras compactadas na energia modificada levaram a maiores valores de RCS, quando comparadas às misturas compactadas na energia intermediária. Observa-se, ainda, o efeito o tempo de cura e teor de cimento nas resistências das amostras ensaiadas.

Figura 16 – RCS média de BGTC para energias de compactação distintas a) com agregado granítico b) basálticos

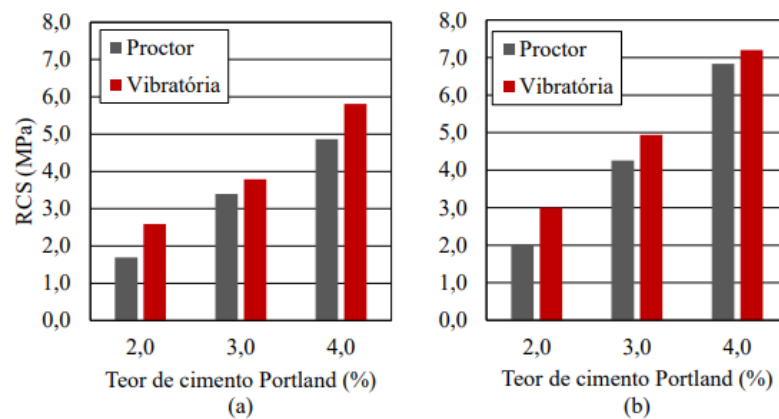


Fonte: Klinsky e Faria (2015).

Os autores também avaliaram a resistência à tração por compressão diametral (RTCD) das misturas. Foi verificado que aos sete dias de cura a RTCD alcançou cerca de 50% da obtida em vinte e oito dias e as misturas compactadas na energia Proctor modificada obtiveram RTCD 55% superiores à alcançada nas misturas compactadas na energia intermediária, demonstrando o efeito do tempo de cura e da energia de compactação também na RTCD.

O modo de compactação também pode impactar nas características da BGTC. Klinsky *et al.* (2018) avaliaram a eficiência da compactação vibratória na moldagem de corpos de prova de BGTC, em laboratório, a fim de atingir a massa específica seca máxima determinada na compactação Proctor. A ruptura por compressão simples desses corpos de prova indicou que tanto o tipo de compactação, quanto o tempo de cura podem influenciar neste parâmetro de resistência (Figura 17).

Figura 17 – Resultados de RCS a) aos 7 dias de cura b) aos 28 dias de cura

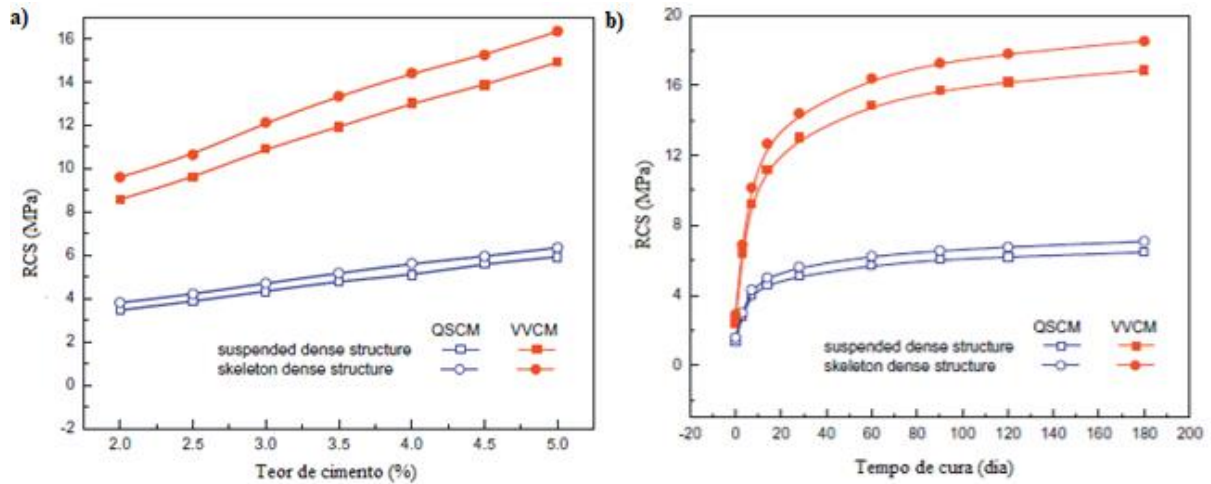


Fonte: Klinsky *et al.* (2018).

Investigação semelhante foi conduzida por Jiang e Fan (2013). Os autores avaliaram a RCS, RTF e MR de agregados estabilizados com cimento submetidos a compactação quase-estática e compactação por vibração vertical, com nível de compactação final de 98% em ambos os métodos. Foram avaliados dois arranjos de agregados: *suspended dense structure*, que revela o estado em que os agregados graúdos se apresentam em menor quantidade na mistura, e *skeleton dense structure*, que indica o estado no qual existe contato entre agregados graúdos. Os resultados de resistência à compressão são mostrados na Figura 18. Percebe-se que a compactação por vibração vertical levou a valores de resistência superiores nas duas distribuições de agregados analisadas, em comparação com os resultados das amostras nas quais foi realizada a compactação quase-estática. A influência do tempo de cura e teor de cimento também é verificada, com maior resistência associada a maior teor de cimento e tempo de cura.

Sobre o tempo de cura, vale destacar que nas primeiras idades ocorre um aumento significativo do parâmetro analisado. Posteriormente, a tendência de aumento da resistência à compressão da mistura cimentada diminui.

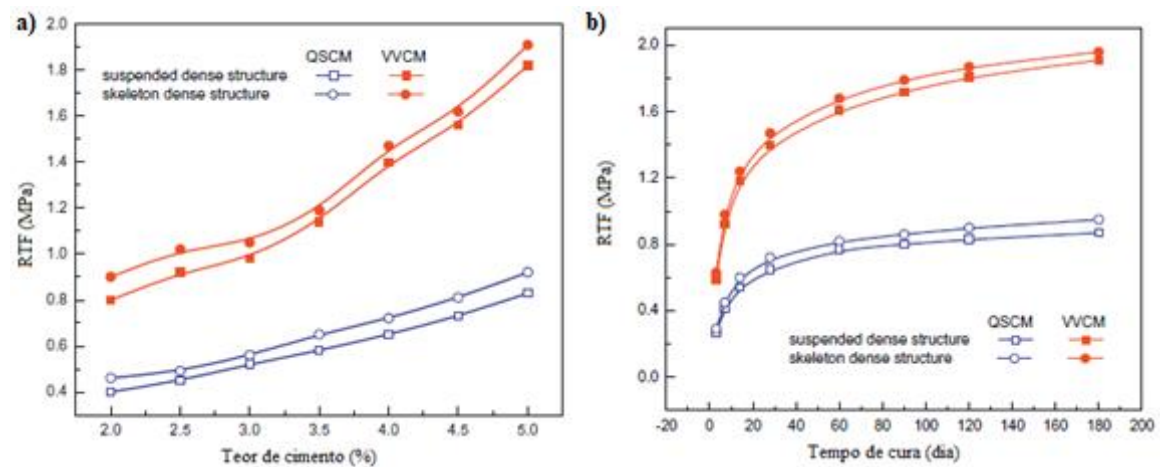
Figura 18 – Resultados de RCS de agregados tratado com cimento a) aos 28 dias; b) com 4% de cimento



Fonte: Jiang e Fan (2013).

A Figura 19 mostra os resultados de RTF obtidos por Jiang e Fan (2013). Assim como na RCS, o aumento do teor de cimento conferiu maior RTF para as misturas. O tempo de cura também é responsável pelo aumento da RTF, sendo mais significativo nas idades iniciais. Em se tratando do método de compactação, é verificado que a compactação por vibração vertical resulta em maior resistência à tração na flexão.

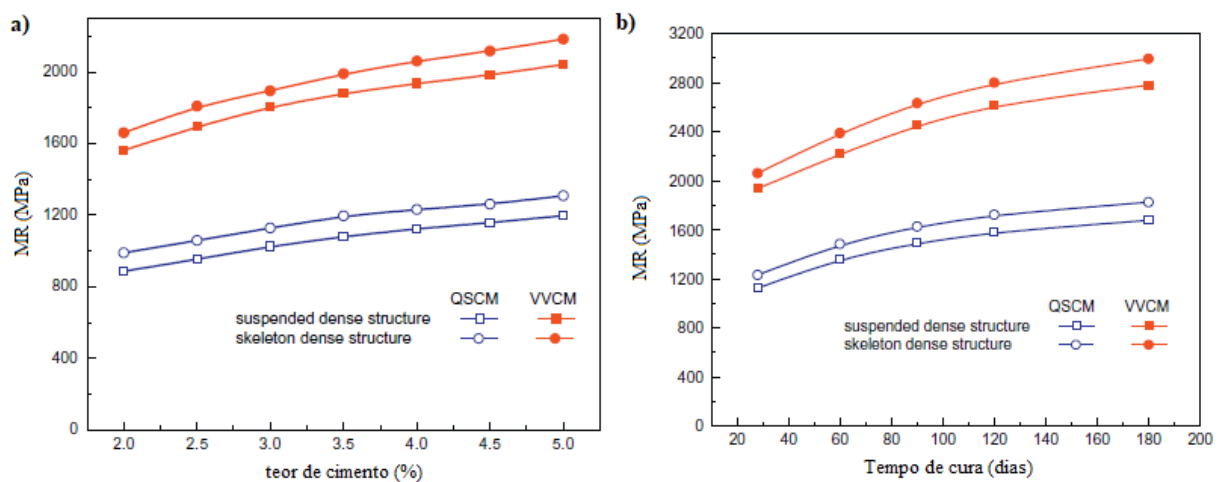
Figura 19 – Resultados de RTF de agregados tratado com cimento a) aos 28 dias; b) com 4% de cimento



Fonte: Jiang e Fan (2013).

A avaliação do módulo de resiliência das misturas investigadas permitiu concluir que aumento do teor de cimento, tempo de cura e compactação por vibração vertical são responsáveis por aumento do MR (Figura 20). Os resultados mostram que, mantidos os demais parâmetros, a resistência à compressão, resistência à tração e módulo de resiliência da mistura de agregado tratado com cimento compactado por vibração vertical são 2,5, 1,9 e 1,6 vezes, respectivamente, os da mistura com compactação quase estática. Constata-se também que a distribuição granulométrica com maior teor de agregado graúdo conferiu maior resistência e menor deformação às misturas.

Figura 20 – Resultados de MR de agregados tratado com cimento a) aos 28 dias; b) com 4% de cimento



Fonte: Jiang e Fan (2013).

Babić (1987) avaliou a influência de mudanças na composição de misturas de materiais granulares estabilizados com cimento em suas características mecânicas. O autor avaliou fatores como granulometria, teor de cimento, tipo de cimento, densidade e tempo de cura na resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade dinâmico dos materiais cimentados. Com os resultados obtidos foi possível confirmar a relação aproximadamente linear entre resistência à compressão simples (RCS) e resistência à tração por compressão diametral (RTCD), representada pela Equação (2), verificar que o tipo de cimento não afeta muito a relação entre RTCD e RCS, a agitação do material também não influencia significativamente o coeficiente experimental da relação, entretanto, o grau de compactação é uma variável de impacto na Equação. Com grau de compactação de 98%, 95% e 90% na energia Proctor modificada, o coeficiente experimental atingiu 11,5%, 13,0% e 15%, respectivamente.

$$RTCD = a' \times RCS$$

Equação (2)

Onde:

RTCD = resistência à tração por compressão diametral;

a' = coeficiente experimental;

RCS = resistência à compressão simples.

A revisão da literatura apresentada até aqui indica que uma mistura de BGTC menos porosa e mais resistente pode ser obtida por meio de critérios de dosagens apropriados, que levem em consideração as características dos agregados, teor de cimento, umidade, tipo de cimento, condições de cura e compactação. Porém, podem ser inseridos aditivos e adições às misturas cimentadas que modifiquem a estrutura e/ou as reações de hidratação do cimento, afetando sua porosidade e propriedades mecânicas, a exemplo das emulsões asfálticas.

2.3.6 Emulsões asfálticas

Uma emulsão pode ser definida como a dispersão de pequenas partículas de um líquido em outro líquido. Assim, a emulsão pode ser formada por dois líquidos não miscíveis onde geralmente a fase contínua é a água (REIS *et al.*, 2010). No caso da emulsão asfáltica os dois líquidos são o asfalto e a água.

De acordo com Bernucci *et al.* (2006), a emulsão asfáltica representa uma classe de emulsão óleo-água, na qual a fase óleo tem uma elevada viscosidade e as duas fases não formam a emulsão por simples mistura. Para o preparo da emulsão é necessária uma ação mecânica que transforme o asfalto em pequenas partículas, ou glóbulos, além da utilização de um produto auxiliar para manter a emulsão estável. Esse produto é chamado de agente emulsificante e reduz a tensão superficial, o que permite que os glóbulos de asfalto permaneçam em suspensão na água por algum tempo, evitando a aproximação entre as partículas e sua posterior coalescência (junção entre partes que se encontravam separadas).

Reis *et al.* (2010) explicam que a ruptura da emulsão asfáltica ocorre quando os glóbulos de asfalto dispersos na água entram em contato com o agregado mineral. A velocidade em que ocorre a separação e a evaporação da água depende: do tipo de emulsão, reatividade/superfície específica dos agregados, teor de umidade, temperaturas dos materiais e ambiente e ação mecânica de compactação. O sinal de ruptura é dado pela mudança de cor da emulsão, que passa de marrom para preta.

Quanto a carga elétrica das partículas as emulsões asfálticas podem ser classificadas em catiônicas e aniônicas. Segundo a NBR 14594 (ABNT, 2017a), as emulsões asfálticas catiônicas podem ser distinguidas pela sua velocidade de ruptura, viscosidade, teor de solvente

e resíduo da destilação. A referida norma apresenta a especificação de cada tipo de emulsão asfáltica catiônica, bem como os métodos de ensaio para obtenção dos parâmetros de caracterização do material.

No que diz respeito à velocidade de ruptura, as emulsões asfálticas são classificadas em ruptura rápida (RR), ruptura média (RM), ruptura lenta (RL) e ruptura controlada (RC). Dependendo da quantidade de cimento asfáltico envolvido na fabricação das emulsões, elas podem ser denominadas 1C e 2C, onde a terminologia C indica emulsão do tipo catiônica e os números 1 e 2 estão associados a menor e maior viscosidade/teor de asfalto, respectivamente. As emulsões para lama asfáltica são classificadas em três tipos: LA-1C, LAN e LARC, onde a terminologia N significa carga de partícula neutra e RC significa ruptura controlada. Tem-se, ainda, a emulsão asfáltica para imprimação (EAI).

Tendo em vista a variedade de emulsão asfáltica disponível, Reis *et al.* (2010) apresenta um resumo das principais características e aplicações de cada tipo de emulsão. Algumas dessas especificações são mostradas a seguir:

- RR-1C – emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida, que apresenta, no mínimo, 62% de teor de ligante asfáltico, desemulsibilidade não inferior a 50% e viscosidade Saybolt-Furol a 25°C no máximo de 90 segundos, ou seja, apresenta baixa consistência. Essa emulsão é recomendada para serviços de pintura de ligação entre as camadas do pavimento;
- RR-2C – emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida, que apresenta, no mínimo, 67% de ligante asfáltico, desemulsibilidade não inferior a 50% e viscosidade Saybolt-Furol a 50°C entre 100 e 400 segundos, ou seja, apresenta alta consistência. Seu maior campo de aplicação: tratamentos superficiais e macadame betuminoso por penetração;
- RM-1C – emulsão asfáltica catiônica de ruptura média, que apresenta, no mínimo, 62% de ligante asfáltico, desemulsibilidade no máximo de 50%, teor de solvente destilado no máximo de 12% e viscosidade Saybolt-Furol a 50°C entre 20 e 200 segundos. Seu maior campo de aplicação: pré-misturado a frio (PMF) e areia asfalto a frio;
- RM-2C – emulsão asfáltica catiônica de ruptura média, que apresenta, no mínimo, 65% de ligante asfáltico, desemulsibilidade no máximo de 50%, teor de solvente destilado no máximo de 12% e viscosidade Saybolt-Furol a 50°C entre 100 e 400 segundos, ou seja, alta consistência. Seu maior campo de aplicação: pré-misturado a frio (PMF) e areia asfalto a frio;

- RL-1C – emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta, que apresenta, no mínimo, 60% de ligante asfáltico, não apresenta solvente em sua composição e viscosidade Saybolt-Furol a 25°C no máximo de 90 segundos, ou seja, baixa consistência. Não se faz o ensaio de desemulsibilidade para caracterizá-la e sim o teste de mistura com cimento ou com fíler silícico, dependendo do agregado mineral que for usado. Seu maior campo de aplicação: pré-misturado a frio (PMF) denso, areia asfalto a frio e estabilização solo emulsão.

O uso de emulsões asfálticas como aditivos em materiais de pavimentação tem sido objeto de estudo de algumas pesquisas. Dareyni *et al.* (2018) investigaram o efeito da emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida na durabilidade do concreto compactado a rolo (CCR). Utilizou-se uma emulsão asfáltica com 60% de sólidos, densidade igual a 1,01g/cm³ e coloração marrom escuro. Foram realizados ensaios de absorção de água, profundidade de penetração de água e resistividade elétrica em corpos de prova de CCR, moldados na umidade ótima, com 16% (em massa dos agregados) de cimento Tipo II (ASTM, 2021) e emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida, nos teores de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% da massa de cimento. A distribuição granulométrica adotada apresentava 68% de agregados miúdo e 32% de agregados graúdos. Nessa pesquisa a umidade ótima foi obtida por meio do ensaio de compactação na energia Proctor modificada (ASTM, 2012) para cada proporção de emulsão asfáltica. Vale ressaltar que a massa de água considerada para cada percentual de umidade levou em consideração a água da emulsão mais a água pura, que foi considerada na determinação das razões água/cimento, conforme Tabela 12.

Tabela 12 – Quantidade dos componentes da mistura de CCR (Kg/m³)

mistura	cimento	emulsão	agregados	água	água/cimento
B0	308	0	1923	137	0,45
B2	307	6	1920	133	0,44
B4	306	12	1913	129	0,44
B6	306	18	1909	125	0,43
B8	306	24	1912	118	0,42
B10	306	31	1912	112	0,41

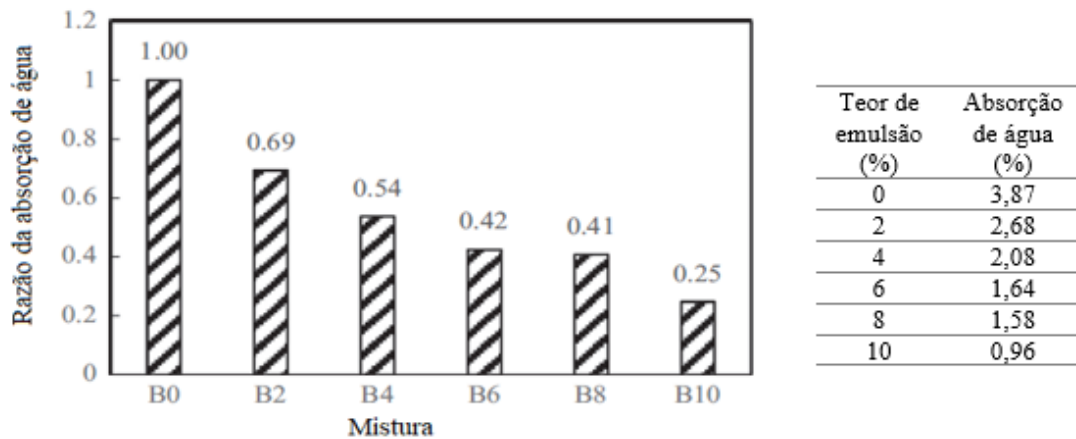
Nota: Bj = mistura de CCR contendo j% de emulsão asfáltica em massa de cimento.

Fonte: Dareyni *et al.* (2018).

Após moldagem, os corpos de prova foram desmoldados em 24 horas, prosseguindo com a cura por imersão em água durante 90 dias, até a realização dos ensaios. Os resultados obtidos por Dareyni *et al.* (2018) indicaram que a incorporação de emulsão asfáltica às misturas promove a diminuição da absorção, redução da profundidade de penetração de água e o

aumento da resistividade elétrica. A redução da absorção de água conferida com o aumento do teor de emulsão foi atribuída a dois fatores: preenchimento de vazios de concreto (incluindo poros capilares e ar aprisionados) com asfalto; e a redução de ar aprisionados no interior do concreto devido ao efeito positivo do asfalto na compactação da mistura de CCR. A Figura 21 apresenta os resultados em termos da razão entre a absorção de água das misturas e a absorção de água da mistura de controle (B0).

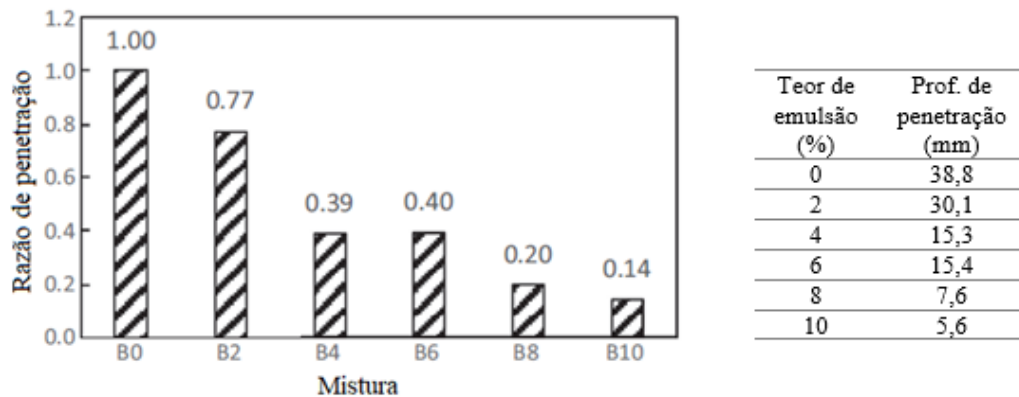
Figura 21 – Razão da absorção de água de misturas com diferentes teores de emulsão asfáltica



Fonte: Dareyni *et al.* (2018).

Os resultados do ensaio de penetração de água realizado pelos autores apontaram uma tendência decrescente na profundidade de penetração das misturas de CCR ao aumentar o teor de asfalto, conforme pode ser constatado na Figura 22.

Figura 22 – Razão da penetração de água de misturas com diferentes teores de emulsão asfáltica

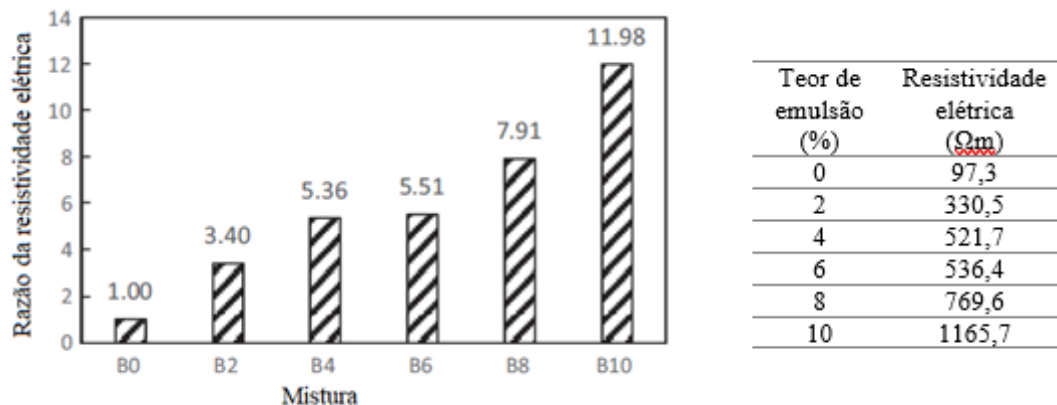


Fonte: Dareyni *et al.* (2018).

Outro parâmetro relacionado à porosidade analisado por Dareyni *et al.* (2018) foi a resistividade elétrica, que depende principalmente da conectividade dos poros e da

possibilidade de deslocamento dos íons dentro do concreto. Assim, o aumento da resistividade elétrica nas misturas pode ser atribuído ao bloqueio da rede de poros dentro do concreto com o asfalto e, portanto, à impossibilidade de deslocamento dos íons. Os resultados da resistividade elétrica das misturas de CCR são apresentados na Figura 23, a partir das quais se pode perceber a redução da resistividade elétrica com o aumento do teor de emulsão asfáltica nas misturas.

Figura 23 – Razão de resistividade elétrica de misturas com diferentes teores de emulsão asfáltica



Fonte: Dareyni *et al.* (2018).

Diante dos resultados obtidos, os autores concluíram que a emulsão asfáltica pode ser um aditivo adequado para uso no CCR em áreas onde a possibilidade de saturação da camada de base é alta, uma vez que a quantidade de soluções destrutivas sendo absorvidas pela superfície da camada poderia ser reduzida pelo preenchimento dos poros capilares com asfalto. Porém, tendo em vista a função estrutural da camada do pavimento, a decisão necessitaria da análise conjunta dos parâmetros mecânicos, o que levou a continuidade da pesquisa, com resultados publicados por Dareyni e Moghaddam (2019).

Dareyni e Moghaddam (2019) analisaram a trabalhabilidade, compactação e as propriedades mecânicas do CCR com adição de emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida. A trabalhabilidade e compactação da mistura foram analisadas a partir da utilização do Compactador Giratório *Superpave*, já as propriedades mecânicas foram avaliadas por meio de ensaios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão de corpos de prova cilíndricos e prismáticos, respectivamente.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 13 é possível constatar que a presença de emulsão asfáltica resultou em maiores densidades de mistura sob compactação inicial e menor energia necessária para atingir a densidade favorável. O índice de energia de trabalhabilidade (WEI) indica o nível de compactação sob a energia de compactação inicial,

enquanto índice de densificação de compactação (RCDI) é a quantidade de energia de compactação extra, necessária para o concreto permeável atingir a densidade favorável.

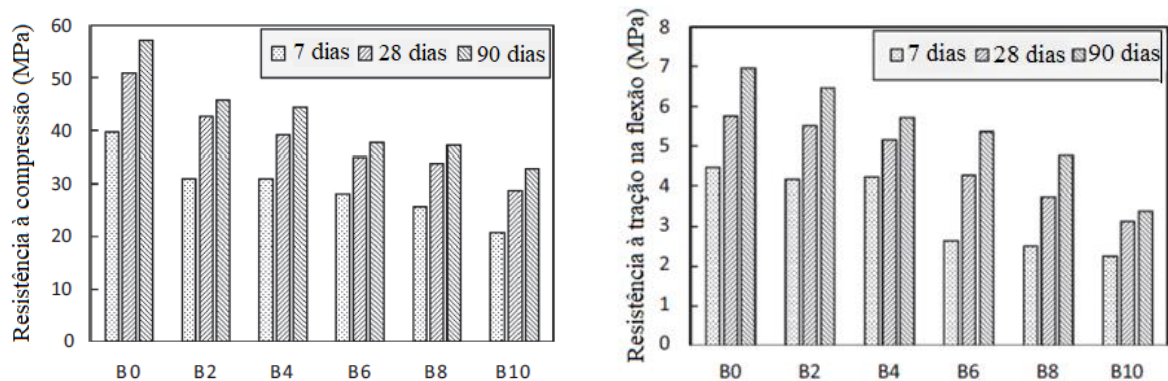
Tabela 13 – Índice de energia de trabalhabilidade (RWEI) e índice de densificação de compactação (RCDI) de CCR com diferentes teores de emulsão asfáltica

Mistura	RWEI	RCDI
B0	324	2751
B2	325	211
B4	347	186
B6	349	189
B8	353	114
B10	355	55

Fonte: Dareyni e Moghaddam (2019).

Para a avaliação dos parâmetros mecânicos os corpos de prova foram desmoldados com 24 horas, seguindo para cura por imersão. Após 7, 28 e 90 dias os ensaios de RCS e RTF conduzidos por Dareyni e Moghaddam (2019) demonstram uma redução nas resistências com o acréscimo do teor de emulsão asfáltica, conforme ilustra a Figura 24. Os autores sugerem duas hipóteses: as partículas de cimento são recobertas pelo asfalto e, portanto, não são completamente hidratadas; e/ou a superfície coberta dos agregados torna sua adesão à pasta de cimento mais fraca e, conseqüentemente, o concreto rompe sob menores tensões.

Figura 24 – Resultados de RCS e RTF de misturas de CCR com adição de emulsão em diferentes teores



Fonte: Dareyni e Moghaddam (2019).

No que diz respeito a redução da porosidade em misturas cimentadas, percebe-se que resultados positivos foram obtidos com a utilização de emulsão asfáltica, ainda que observada uma redução no comportamento mecânico para os teores de aditivo utilizados. Todavia, existem outros aditivos que podem ser incorporados às misturas cimentadas a fim de reduzir a porosidade do material, com algum ganho em termos de resistência.

2.3.7 Aditivos e adições

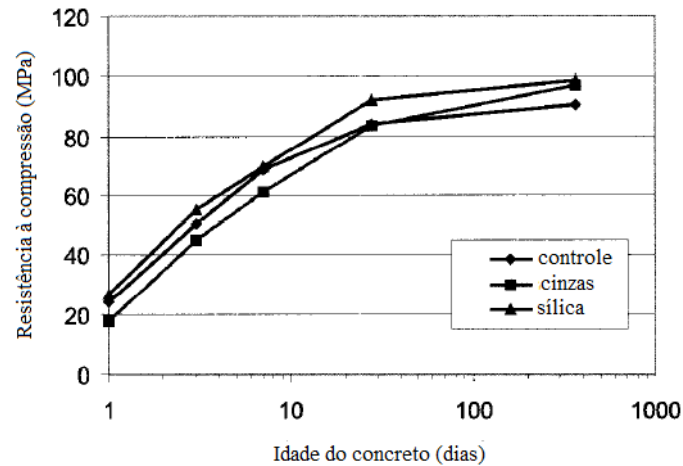
Em misturas cimentadas além de critérios adequados de dosagem, a redução da porosidade e aumento das propriedades mecânicas podem ser obtidas com o uso de aditivos e adições. De acordo com Hassan *et al.* (2000), os aditivos permitem uma diminuição substancial da água de mistura e, por consequência, o tamanho dos poros e a quantidade de ar aprisionado são reduzidos, criando-se uma microestrutura mais densa quando no estado endurecido. Já as adições minerais fornecem uma redução adicional da porosidade da matriz da argamassa e melhoram a interface com os agregados.

Segundo Campiteli (1987) adições como escória granulada de alto-forno, cinzas volantes, microssílica, cinzas de casca de arroz e outras de eficiência comprovada, provocam a diminuição do tamanho dos poros, se forem convenientemente dosadas. Já os aditivos redutores de água e superplastificantes possibilitam a redução do fator água/cimento, mantendo trabalhabilidade adequada.

No mesmo sentido, Leite *et al.* (2018) explicam que o uso das adições tem objetivo de melhorar as propriedades que o aglomerante confere ao concreto, enquanto os aditivos modificam e melhoram uma ou mais características do concreto, tanto no estado fresco como no endurecido. O aditivo é um produto químico que, exceto em casos especiais, é adicionado ao concreto em quantidades máximas de 5%, em relação à massa de cimento, com o objetivo de obter uma alteração específica, ou alterações, nas propriedades normais do concreto (NEVILE, 2016).

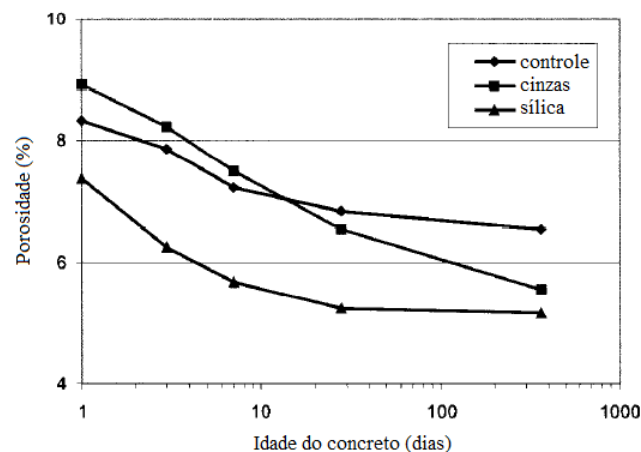
Resultados que confirmam a eficácia de adições minerais incorporadas a misturas cimentadas são discutidos por Hassan *et al.* (2000). Os autores analisaram o efeito da sílica ativa e cinzas volantes no desempenho de concretos de alto desempenho. A mistura de controle foi dosada a fim de atingir um empacotamento máximo das partículas e, portanto, uma porosidade mínima. A composição da mistura de controle correspondia a 1:2:3 em peso de cimento: areia: agregado graúdo, com teor de cimento de 400 kg/m³. Para as misturas com sílica ativa e cinzas volante, 10% e 30%, respectivamente, em peso da mistura de referência foram substituídas pelas adições. Foi utilizado superplastificante na mesma dosagem em todas as misturas e a quantidade de água foi definida de modo a manter mesma trabalhabilidade, correspondendo a uma relação água cimento de 0,32, 0,32 e 0,29 para as misturas de controle, com sílica e cinzas volantes, respectivamente. Os resultados de resistência à compressão e porosidade das misturas investigadas são mostrados nas Figura 25 e Figura 26.

Figura 25 – Resultados de RCS de concreto com adições de sílica e cinza



Fonte: Hassan *et al.* (2000).

Figura 26 – Resultados de porosidade de concreto com adições de sílica e cinza



Fonte: Hassan *et al.* (2000).

As partículas extremamente finas de sílica, além de serem materiais altamente pozolânicos, melhoram o empacotamento da matriz da argamassa e nas interfaces com o agregado, resultando em uma mistura de concreto mais densa e com poros mais finos. Neste estudo, verificou-se que a sílica contribui mais para a melhoria da porosidade do que a resistência à compressão. O concreto com sílica apresentou valores de porosidade inferiores (até 25%) quando comparado ao concreto de controle. Em se tratando da mistura com cinzas volantes, percebe-se maiores valores de porosidade nas primeiras idades. No entanto, uma redução significativa é observada com o decorrer do tempo. Após 28 dias, a mistura com cinzas foi a única que apresentou redução notável na porosidade.

Pesquisas já conduzidas sobre o tema indicam que a porosidade e características mecânicas da BGTC é influenciada por diversos fatores, como o teor de cimento, tipo de

agregado e sua granulometria, compactação, umidade, condições de cura e presença de aditivos (BALBO, 1997, WU, 2011, YEO *et al.* 2011, XUAN *et al.*, 2012, KLINSKY e FARIA, 2015, KLINSKY *et al.*, 2018, PRADO, 2018; DAREYNI *et al.*, 2018; DAREYNI e MOGHADDAM, 2019). Por outro lado, a porosidade influencia parâmetros como: resistência, permeabilidade, variação de volume e módulo de deformação. O módulo de deformação das amostras de pasta de cimento é proporcional a aproximadamente a terceira potência da relação gel-espaço (CAMPITELI, 1987, FORNASIER, 1995).

Segundo Balbo (2006), a peculiar heterogeneidade na matriz de BGTC propicia o surgimento de poros e descontinuidade na estrutura interna durante o processo de execução, o que confere grande suscetibilidade ao fenômeno da fadiga, quando comparada a outros materiais à base de ligantes hidráulicos e executados com os mesmos equipamentos de pavimentação (rolos compressores). Assim, a indicação de critérios de dosagem que resultem em menor porosidade à mistura cimentada poderia melhorar seu desempenho na estrutura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de investigar as hipóteses levantadas, elaborou-se um plano experimental, dividido em três etapas, as quais envolvem dosagem das misturas, ensaios mecânicos e avaliação da porosidade da brita graduada tratada com cimento. A Figura 27 apresenta a sequência de atividades da presente pesquisa.

Nesse estudo foram utilizados o cimento Portland tipo CP II-F 32 e o CP IV-32 RS, e as emulsões asfálticas catiônicas RR-1C e RL-1C.

As atividades referentes dosagem das misturas, que compreendem os ensaios de caracterização dos materiais, definição da curva granulométrica e ensaio de compactação. Dentre os ensaios de caracterização, fez-se a análise granulométrica de cada agregado selecionado, o que permitiu a definição da curva granulométrica das misturas de BGTC. Também foram medidas a absorção do agregado gráudo e a umidade do agregado miúdo, parâmetros utilizados na definição de umidade das misturas, determinada por meio do ensaio de compactação.

Na sequência, a pesquisa seguiu para a primeira etapa, na qual foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e resistência à tração por compressão diametral (RTCD) ou resistência à tração indireta (RTI), aos 7 dias. Nessa etapa foram avaliadas diferentes misturas de BGTC, com variações no tipo de cimento e teor de cimento, com incorporação de emulsão asfáltica em diferentes dosagens. Desse modo, elaborou-se um planejamento fatorial para nortear as análises quanto à influência das variáveis nos citados parâmetros mecânicos.

Na concepção de um planejamento fatorial se faz necessário, primeiramente, especificar as variáveis envolvidas (fatores) e seus respectivos níveis aplicados, ou seja, valores que a variável poderá assumir no experimento. Nesse estudo as variáveis analisadas são o tipo de cimento (CP II-F 32 e CP IV-32 RS), o teor de cimento, 3,0% e 5,0%; o tipo de emulsão, RR-1C e RL-1C; e teor da emulsão, 0,0%, 0,5%, 1,0% e 2,0%. Uma vez que não foi analisado o efeito combinado do CP IV-32 RS e emulsão asfáltica, fez-se necessária a utilização de dois planejamentos fatoriais em paralelo, A e B, sendo o plano fatorial B constituído apenas com misturas contendo CP II-F 32. Na Tabela 14 e na Tabela 15 podem ser visualizadas as variáveis analisadas e a codificação dos níveis aplicados.

Figura 27 – Fluxograma de atividades da pesquisa

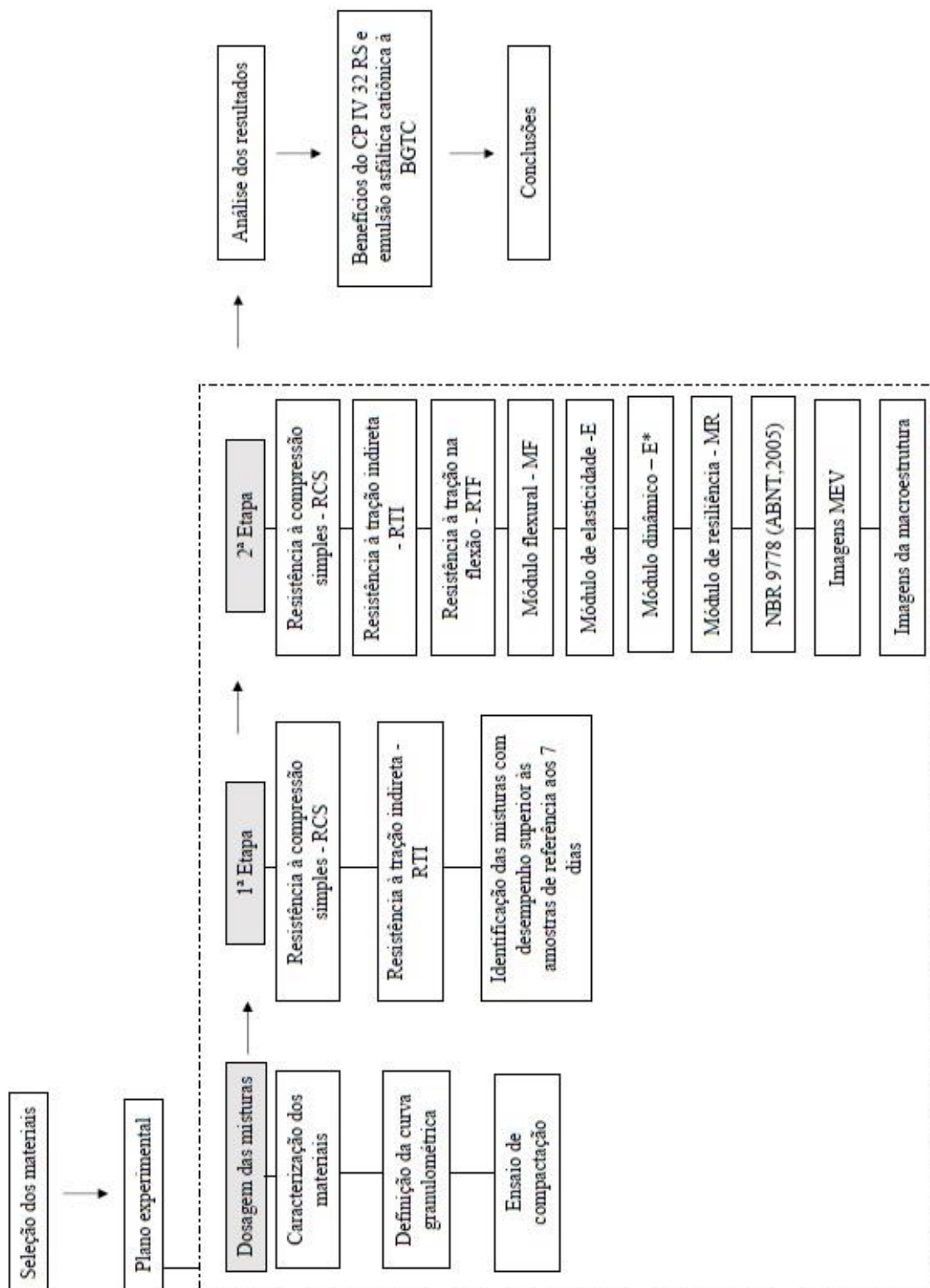


Tabela 14 – Plano experimental A (2²)

Fator	Variável	Limite inferior	Limite superior
		(-1)	(+1)
C	Cimento	CP II-F 32	CP IV 32 RS
TC	Teor de cimento	3,0%	5,0%

Tabela 15 – Plano experimental B (2² x 4)

Fator	Variável	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
		(1)	(2)	(3)	(4)
TC	Teor de cimento	3,0%			5,0%
E	Tipo de emulsão	RR-1C			RL-1C
TE	Teor de emulsão	0,0%	0,5%	1,0%	2,0%

Uma grande vantagem desse tipo de análise é a indicação de todas as combinações (tratamentos) possíveis dos fatores envolvidos. O plano experimental A apresenta 4 combinações possíveis (2x2), enquanto o plano B possui 16 combinações (2x2x4), totalizando 20 combinações para o estudo. Na Tabela 16 e Tabela 18 são indicados os planejamentos fatoriais para as variáveis de interesse, com todos os tratamentos possíveis e a quantidade de réplicas analisadas em cada ensaio. O tratamento 1 (Tabela 16), por exemplo, corresponde à mistura com 3,0% de cimento CP II-F 32, já o tratamento 6 (Tabela 17) corresponde à mistura com 3,0% de cimento CP II-F 32 e 0,5% de emulsão RR-1C.

Tabela 16 – Planejamento fatorial completo A

Tratamento	Cimento	Teor de Cimento	Réplicas por ensaio	
			RCS	RTCD
1	-1	-1	2	3
2	-1	+1	2	3
3	+1	-1	2	3
4	+1	+1	2	3

Tabela 17 – Planejamento fatorial completo B

Tratamento	Teor de cimento	Emulsão	Teor de emulsão	Réplicas por ensaio	
				RCS	RTCD
5	1	1	1	2	3
6	1	1	2	2	3
7	1	1	3	2	3
8	1	1	4	2	3
9	4	1	1	2	3
10	4	1	2	2	3
11	4	1	3	2	3
12	4	1	4	2	3
13	1	4	1	2	3
14	1	4	2	2	3

Tratamento	Teor de cimento	Emulsão	Teor de emulsão	Réplicas por ensaio	
				RCS	RTCD
15	1	4	3	2	3
16	1	4	4	2	3
17	4	4	1	2	3
18	4	4	2	2	3
19	4	4	3	2	3
20	4	4	4	2	3

Das combinações apresentadas, observam-se tratamentos em repetições. Os tratamentos 5 e 9 correspondem ao tratamento 1, com 3,0% de cimento CP II-F 32 e sem aditivo, bem como os tratamentos 13 e 17 correspondem ao tratamento 2, com 5,0% de cimento CP II-F 32 e sem aditivo. Portanto, ao descartar os tratamentos em repetições, resta um total de 16 combinações a serem investigadas, por meio de 80 ensaios, sendo 32 ensaios de resistência à compressão simples e 48 ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

Com o planejamento fatorial apresentado e os resultados dos ensaios propostos, foi possível encontrar a resposta, em termos médio, para cada parâmetro avaliado, o que permitiu elaborar uma análise de significância dos efeitos. Em seguida, considerando os tratamentos 1 e 2 como misturas de referência em seus respectivos teores de cimento, iniciou-se uma nova etapa de análise, segunda etapa, apenas com os tratamentos que apresentaram influência no aumento dos parâmetros ensaiados.

A segunda etapa envolve os ensaios de RCS e RTCD aos 28 dias; resistência à tração na flexão (RTF), módulo flexural (MF), módulo de elasticidade (E) e módulo dinâmico (E*), aos 7 e 28 dias; módulo de resiliência (MR), aos 28 dias, além da avaliação da porosidade, por meio da determinação da absorção de água, índice de vazios e obtenção de imagens em escala macro e micro, incluindo a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Por fim, de posse dos resultados, foi possível concluir sobre a relevância das hipóteses levantadas e realizar uma análise de viabilidade técnica e financeira para o uso dos materiais estudados, contribuindo com o método de dosagem da BGTC.

3.1 Caracterização dos materiais

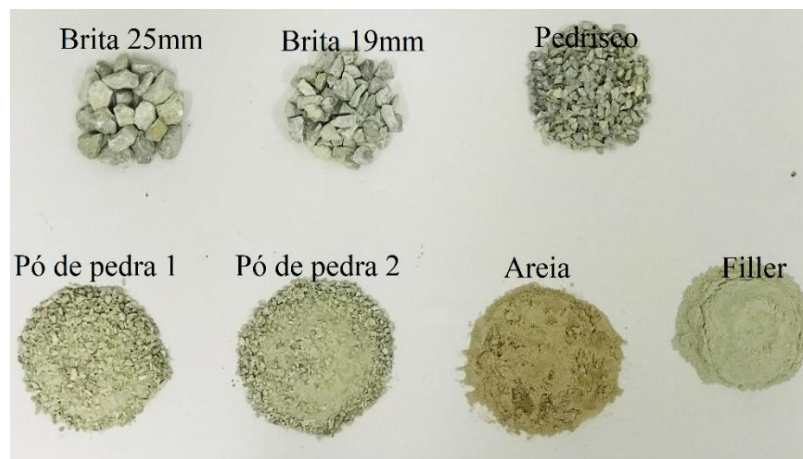
Os agregados foram caracterizados com base na sua granulometria, massa específica, absorção, índice de forma e durabilidade. Os cimentos foram classificados a partir da finura, massa específica, tempo de pega e resistência. As emulsões utilizadas foram identificadas por

meio de propriedades como viscosidade, sedimentação, peneiração, resíduo seco e densidade a 25°C.

3.1.1 Agregados

Na pesquisa foram utilizados agregados de origem gnáissicas, além de areia obtida no comércio local (Figura 28). Os agregados de origem gnáissicas são oriundos de uma pedreira localizada no Povoado Cajaíba, no município de Itabaiana, em Sergipe. Na Figura 29 é possível visualizar o mapa de localização da pedreira e na Figura 30 são apresentadas imagens registradas durante a coleta dos agregados.

Figura 28 – Agregados utilizados na pesquisa



Fonte: Própria autora (2022)

Figura 29 – Mapa de localização da Pedreira: Povoado Cajaíba, Itabaiana/SE



Fonte: Imagem Google Earth. Acesso em julho de 2022.

Figura 30 – Imagens da pedreira: Povoado Cajaíba, Itabaiana/SE

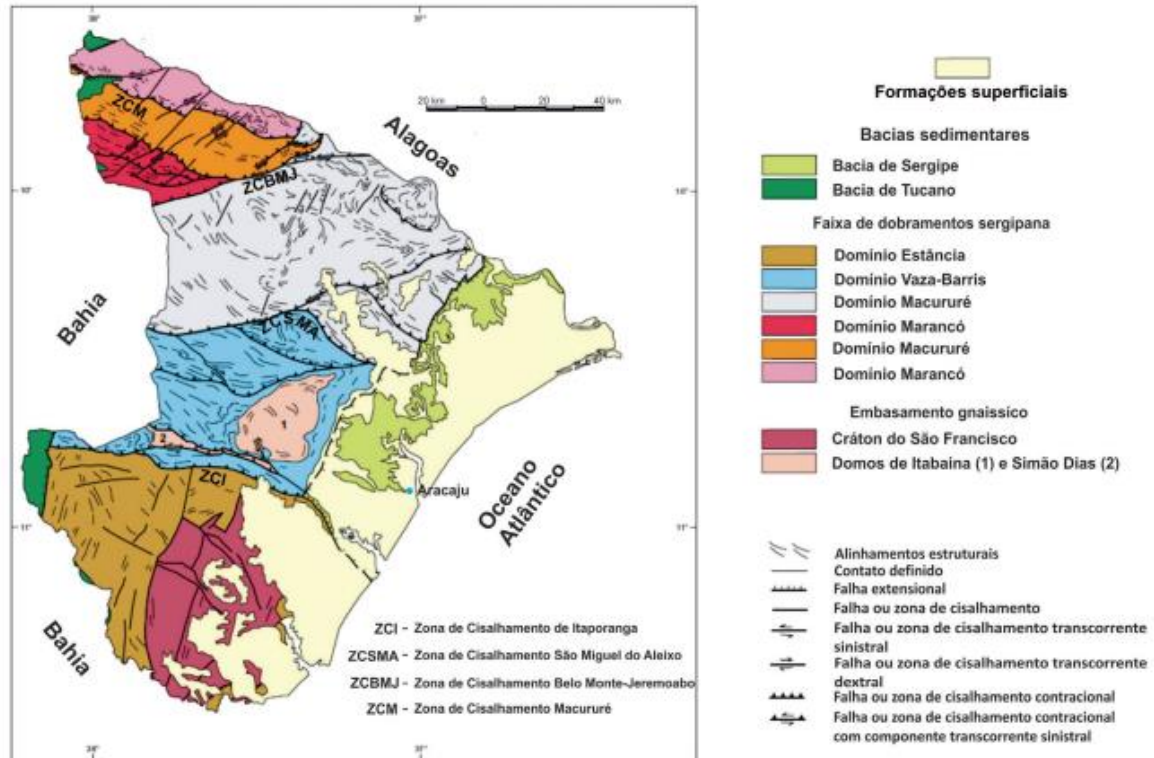


Fonte: Próprio autora (2022)

A pedreira escolhida está situada no agreste central sergipano, na região conhecida por Domos de Itabaiana, circundada por litotipos da faixa de dobramentos sergipana, mais precisamente do domínio litoestratigráfico Vaza Barris, conforme compartimentação litoestratigráfica representada na Figura 31. Como explica Santiago *et al.* (2017), as principais microestruturas encontradas são: porfiroclástica - representada por cristais de microclíneo e plagioclásio, envoltos por matriz mais fina, cominuída; granolepidoblástica - representada por agregado poligonal de quartzo e feldspato, associado a palhetas orientadas de biotita; milonítica - gerada por processos de cominuição da rocha; e augen - conferida pelos porfiroclastos em formas lenticulares.

Realizada a coleta, iniciou-se a etapa de caracterização do material no LTT (laboratório de topografia e transportes) da Universidade Federal de Sergipe, segundo normatização mostrada na Tabela 18.

Figura 31 - Esboço tectono-estratigráfico do Estado de Sergipe



Fonte: Santiago *et al.* (2017).

Tabela 18 – Caracterização dos agregados

Ensaio	Norma	Ilustração
Redução da amostra por quarteamento ou uso de repartidores de amostra	DNER-ME 041/94	
Agregados - análise granulométrica	DNER-ME 083/98	

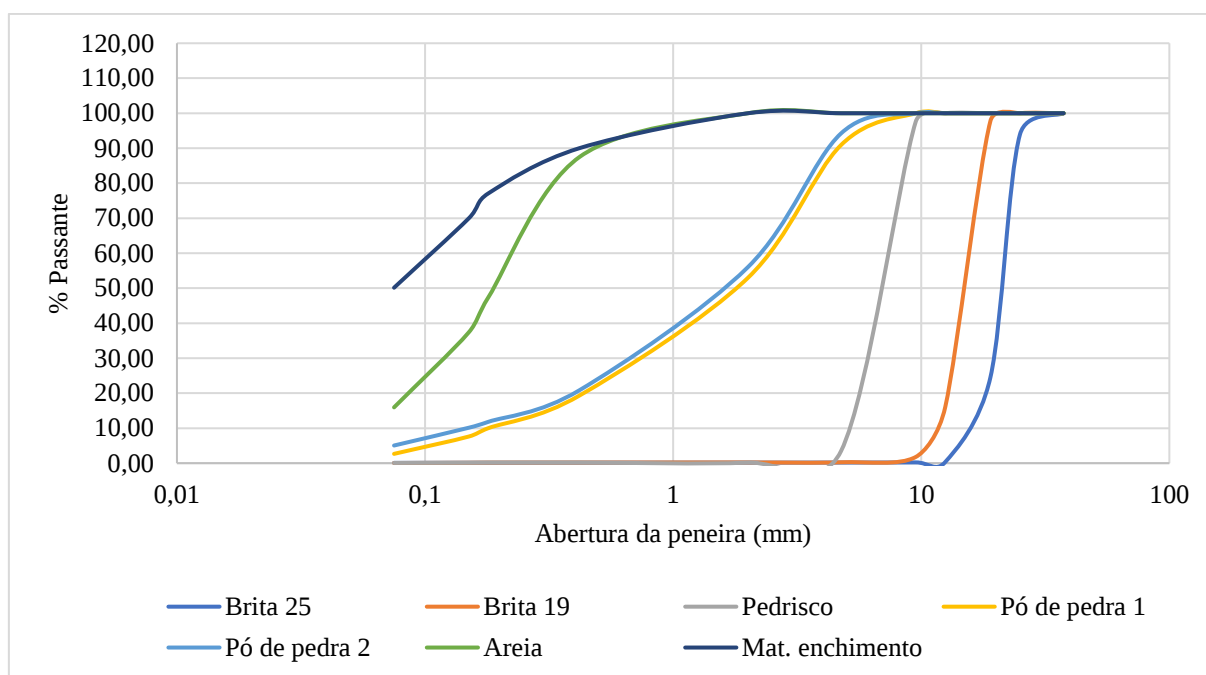
Ensaio	Norma	Ilustração
Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo	DNER-ME 081/98	
Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com paquímetro – Método de ensaio	DNIT 425/2020 - ME	
Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio	DNER-ME 089/94	

O resultado do ensaio de determinação da composição granulométrica dos agregados por peneiramento é mostrado na Tabela 19 e Figura 32.

Tabela 19 – Composição granulométrica dos agregados

Abertura da Peneiras (mm)	Brita 25	Brita 19	Pedrisco	Pó de pedra 1	Pó de pedra 2	Areia	Filler
37,5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
25	93,95	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
19	24,53	97,78	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
12,5	0,35	16,09	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
9,5	0,23	1,78	97,58	100,00	100,00	100,00	100,00
4,75	0,19	0,27	3,46	90,91	94,24	100,00	100,00
2	0,17	0,21	0,17	52,94	56,01	100,00	100,00
0,42	0,15	0,19	0,17	19,36	20,89	87,53	90,04
0,18	0,13	0,16	0,17	10,02	11,82	47,40	77,11
0,15	0,12	0,12	0,14	7,62	10,13	37,37	69,96
0,075	0,08	0,05	0,07	2,67	5,06	15,96	50,14

Figura 32 – Curvas granulométricas dos agregados



A caracterização dos agregados com base no índice de forma, absorção e massa específica é mostrada na Tabela 20. A absorção e índice de forma foram determinados para os agregados com dimensão superior a 4,8mm e a determinação do índice de forma com os agregados de dimensão superior a 9,5mm.

Tabela 20 – Caracterização do agregado graúdo

Agregados	Absorção (%)	Massa específica seca g/cm ³	Índice de forma
Brita 25	0,26	2,697	2,01
Brita 19	0,29	2,700	2,28
Pedrisco	0,55	2,697	

Por fim, avaliou-se a durabilidade da fração compreendida entre 25mm e 29mm da brita 25 utilizando os procedimentos descritos na norma DNER-ME 089 (1994), utilizando solução de sulfato de sódio, obtendo-se o resultado apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 – Avaliação da durabilidade da fração compreendida ente 25 e 19mm da brita 25

Brita 25				
Malha das peneiras	granulometria da amostra original	Massa das frações antes do ensaio (g)	% passante após o ensaio	perda ponderada (%)
25,0 mm a 19,0 mm	60	1610	2,27	1,36

3.1.2 Cimento Portland e água

Foram utilizados o cimento Portland tipo CP II-F 32 (cimento Portland composto com material carbonático e classe de resistência de 32 MPa) e o cimento Portland tipo CP IV 32 RS (cimento Portland pozolânico resistente a sulfato, com classe de resistência de 32 MPa). O CP II-F 32 possui em sua composição 75% a 89% de clínquer mais sulfatos de cálcio e 11% a 25% de material carbonático, enquanto o CP IV 32 RS possui 45% a 85% de clínquer mais sulfatos de cálcio, 15% a 50% de material pozolânico e 0% a 10% de material carbonático (ABNT, 2018).

Os dois tipos de cimento utilizados nas misturas de BGTC foram caracterizados com base no índice de finura, tempo de pega, e resistência (Tabela 22 e Tabela 23). A normatização dos métodos de ensaio para os parâmetros mencionados é listada a seguir:

- Determinação do índice de finura do cimento Portland por meio da peneira 75µm (nº 200), seguindo a NBR 11579 (ABNT, 2012b);
- Determinação da massa específica do cimento Portland, com os procedimentos da NBR 16605 (2017b);
- Determinação dos tempos de pega do cimento Portland, através do método apresentado na NBR 16607 (2018b);
- Determinação da resistência à compressão do cimento Portland, NBR 7215 (ABNT, 2019a).

Tabela 22 – Ensaio de caracterização dos cimentos Portland

Tipo de cimento	Índice de finura (%)	Massa específica (g/cm³)	Início de pega
CP II-F 32	2,20	3,151	2h
CP IV 32 RS	0,48	3,138	1h50min

Tabela 23 – Resistência à compressão simples dos cimentos Portland

Tipo de cimento	Resistência à compressão simples (MPa)		
	24 h	7 dias	28 dias
CP II-F 32	10,16	18,46	25,42
CP IV 32 RS	12,12	22,30	28,04

Da Tabela 22, nota-se que o cimento tipo CP IV 32 RS apresenta menor índice de finura, sendo esperado, portanto, um menor tempo de pega, em decorrência da maior área superficial, que promove reações de hidratação mais aceleradas.

Observando a Tabela 23, percebe-se que aos 28 dias nenhum dos tipos de cimentos avaliados atingiram 32MPa, o que pode ser atribuído ao tempo entre a execução do ensaio e a aquisição e uso dos cimentos. Em termos de resistência, vale ressaltar a superioridade do cimento CP IV 32 RS em relação ao cimento CP II-F 32 em todas as idades investigadas.

A água potável usada estava livre de materiais orgânicos, óleos ou outras substâncias prejudiciais à hidratação do cimento.

3.1.3 Emulsão asfáltica

Foram utilizadas as emulsões asfálticas RR-1C (emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida) e RL-1C (emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta). As emulsões foram doadas por empresas atuantes no estado de Sergipe, com as características descritas nas Tabela 24 e Tabela 25.

Tabela 24 – Carta de especificações para emulsões asfálticas

EMULSÕES ASFÁLTICAS PARA PAVIMENTAÇÃO										
CARACTERÍSTICAS	MÉTODO DE ENSAIO (ABNT)	RUPTURA RÁPIDA		RUPTURA MÉDIA		RUPTURA LENTA				RUPTURA CONTROLADA
		RR-1C	RR-2C	RM-1C	RM-2C	RL-1C	LA-1C	LAN	EAI	LARC
ENSAIOS SOBRE EMULSÃO										
Viscosidade sobre Saybolt-Furol, S, a 25°C	NBR 14491	90 máx.	-	-	-	90 máx.	90 máx.	90 máx.	90 máx.	90 máx.
Viscosidade sobre Saybolt-Furol, S, a 50°C	NBR 14491	-	100-400	20-200	100-400	-	-	-	-	-
Sedimentação, % em massa, máx.	NBR 6570	5	5	5	5	5	5	5	10	5
Peneiração, 0,84 mm, % massa, máx.	NBR 14393	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Resistência à água, % de cobertura, mín.	NBR 14249	80	80	80	80	80	-	-	-	-
Adesividade em agregado miúdo, % mín.	NBR 14757	-	-	-	-	-	75	-	-	75
Carga de partícula	NBR 6567	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	neura	-	positiva
pH, máx.	NBR 6299	-	-	-	-	6,5	-	6,5	8	6,5
Destilação: Solvente destilado, % em vol.	NBR 6568	-	-	0-12	0-12	-	-	-	0-15	-
Resíduo seco, % em massa, mín./h	NBR 14376	62	67	62	65	60	60	60	45	60
Desemulsibilidade, % em massa	NBR 6569	50 mín.	50 mín.	50 máx.	50 máx.	-	-	-	-	-
Mistura com filler silício, % ou mistura com cimento, %	NBR 6302 NBR 6297	- -	- -	- -	- -	2 máx. 2 máx.	1,2-2,0 2 máx.	- -	- -	2 mín. 2 mín.
Ensaio sobre o resíduo da emulsão obtido pela ABNT NBR 14896										
Penetração a 25°C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	NBR 6576	40-150	40-150	40-150	40-150	40-150	40-150	40-150	40-250	40-150
Teor de betume, % mín	NBR 14855	97	97	97	97	97	97	97	97	97
Ductilidade a 25°C, cm, mín.	NBR 6293	40	40	40	40	40	40	40	40	40

Fonte: Reis *et al.* (2001).

Tabela 25 – Controle de qualidade para emulsão asfáltica RL-1C, conforme NBR 14376 (ABNT, 2019b) e NBR 14393 (ABNT, 2012c)

RESÍDUO POR EVAPORAÇÃO (DESEMULSIFICAÇÃO)					
ENSAIO		SEQUÊNCIA	1º ENSAIO	2º ENSAIO	
PESO DO BECKER + BASTÃO + AMOSTRA		(g)	(A)	294,0	288,0
PESO DO BECKER + BASTÃO		(g)	(B)	194,0	168,0
PESO DA AMOSTRA		(g)	C = A - B	100,0	100,0
PESO DO BECKER + BASTÃO + RESÍDUO APÓS ENSAIO		(g)	(D)	232,0	225,0
PESO DO RESÍDUO		(g)	E = D - B	62,0	63,0
% DO PESO DO RESÍDUO		%	F = (E/C) x 100	62%	63%
MÉDIA % DO RESÍDUO		%	(H)		
RESÍDUO POR DESTILAÇÃO		%	(I)		
DESEMULSÃO		%	J = (H / I) x 100		
PENEIRAÇÃO (% RETIDA nº 20)					
ENSAIO		SEQUÊNCIA	1º ENSAIO	2º ENSAIO	
PESO DA PENEIRA (g)		A	(A)	454,00	454,00
PESO DA PENEIRA + RESÍDUO (g)		B	(B)	454,01	454,01
AMOSTRA RETIDA (%)		(%)	% = (B - A)/10	0,1%	0,1
MÉDIA DA AMOSTRA RETIDA (%)		(%)			

Fonte: CAMEL Empreendimento e Construções (2021).

3.2 Definição da Curva Granulométrica

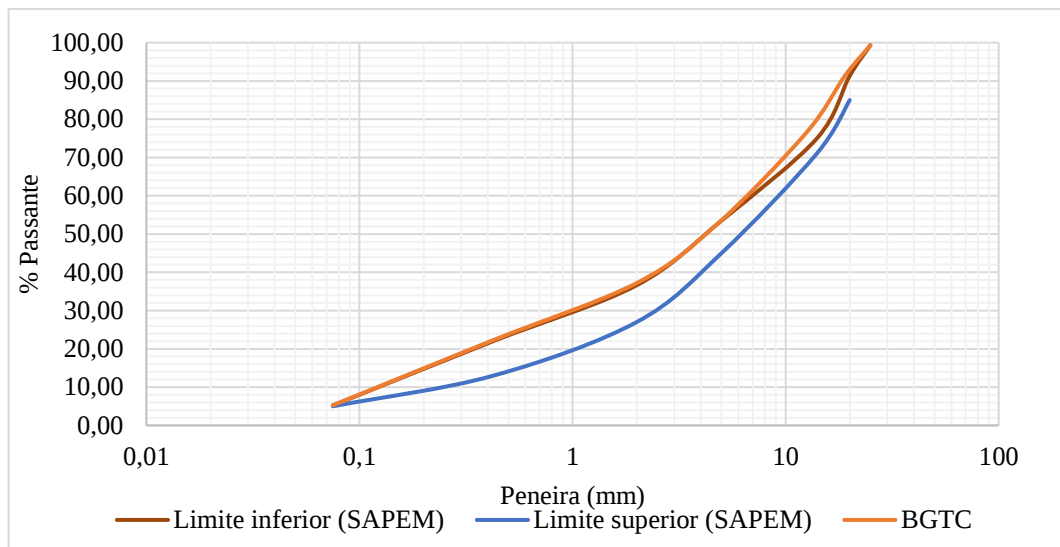
A partir da granulometria de cada fração de agregado foi indicada, por tentativa, uma composição dos agregados que se enquadrasse em uma faixa granulométrica estabelecida.

Com base nos resultados obtidos por Prado (2018) e dando continuidade aos avanços nos estudos sobre o tema, essa pesquisa utilizou a faixa granulométrica apresentada no manual sul-africano, *South African Pavement Engineering Manual* (SAPEM, 2014). Assim, foi obtida uma composição granulométrica, antes da adição de cimento Portland, constituída por 11,0% de brita 25; 15,0% de brita 19; 19,0% de pedrisco; 31,0% de pó de pedra 1; 7,5% de pó de pedra 2; 12,5% de areia; e 4,0% de material de enchimento (Tabela 26 e Figura 33). Antes da utilização da brita 25mm o material retido na peneira de abertura igual a 25mm era descartado para atender a especificação utilizada.

Tabela 26 - Composição granulométrica da BGTC

Abertura das peneiras (mm)	Percentual passante							BGTC	SAPEM	
	Brita 25	Brita 19	Pedrisco	Pó de pedra 1	Pó de Pedra 2	Areia	Mat. de enchimento		limite inf.	limite sup.
%	0,110	0,150	0,190	0,310	0,075	0,125	0,040	1,00		
37,5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		
25	93,95	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,33		100
19	24,53	97,78	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	91,37	85	95
12,5	0,35	16,09	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	76,45	71	84
4,75	0,19	0,27	3,46	90,91	94,24	100,00	100,00	52,47	45	64
2	0,17	0,21	0,17	52,94	56,01	100,00	100,00	37,20	27	45
0,42	0,15	0,19	0,17	19,36	20,89	87,53	90,04	22,19	13	27
0,075	0,08	0,05	0,07	2,67	5,06	15,96	50,14	5,24	5	12

Figura 33- Curva granulométrica da BGTC



Vale ressaltar que além de atender aos limites da faixa granulométrica, a curva granulométrica deve corresponder a uma mistura bem graduada. Conforme explica Pinto (2010), a expressão “bem-graduado” indica a existência de grãos com diversos diâmetros na mistura. As partículas menores ocupam os vazios entre as partículas maiores, criando um entrosamento, do qual resulta menor compressibilidade e maior resistência. Essa característica é expressa pelo coeficiente de não uniformidade (CNU), definido pela razão entre D60 e D10, onde D60 corresponde ao diâmetro abaixo do qual se situam 60% em peso das partículas e, analogamente, D10 representa o diâmetro abaixo do qual se situam 10% em peso das partículas. Da Figura 33, tem-se que o D60 é igual a 6,50 mm, o D10 corresponde a 0,12mm e, consequentemente, o CNU da mistura de agregados equivale a 54,17 (granulometria desuniforme).

Outro coeficiente que pode ser extraído da curva granulométrica (Figura 33) é o coeficiente de curvatura (Cc), expresso pela Equação (3). Sendo o D30 igual a 1 mm, o coeficiente de curvatura da mistura de agregados é 1,282 (bem graduada). Percebe-se, ainda, que a mistura é constituída por 52,47% de partículas com diâmetro inferior a 4,75 mm (material fino) e 47,53% de material grosso.

$$\frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad \text{Equação (3)}$$

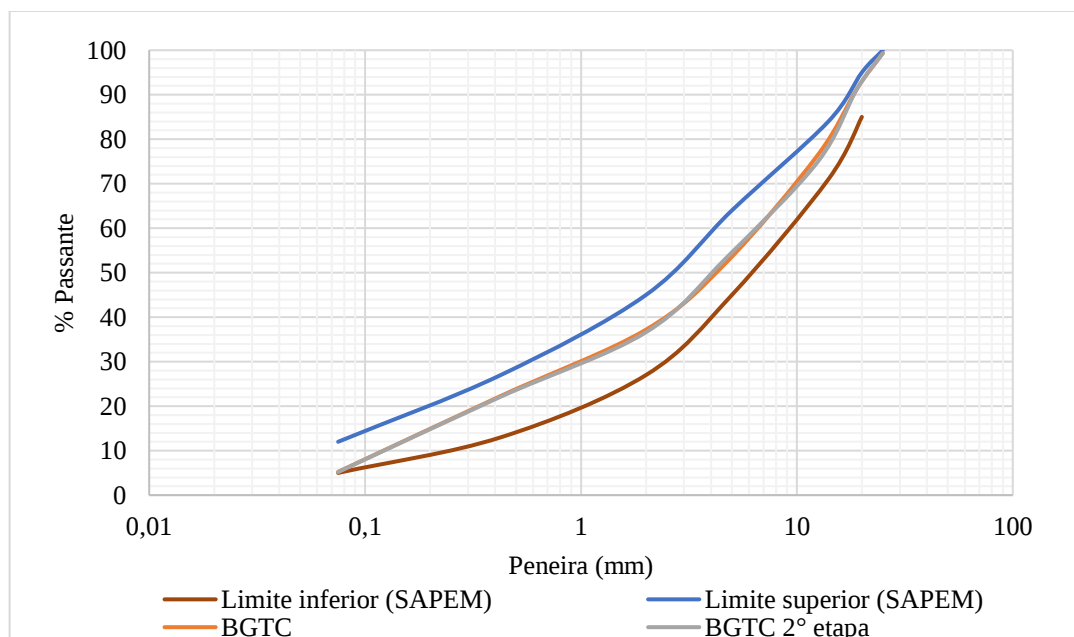
Com a conclusão dos ensaios mecânicos da primeira etapa, percebeu-se a necessidade de aquisição de mais agregados para a conclusão do plano experimental. Desse modo, foram adquiridos pedrisco, pó de pedra e filler, que foram novamente caracterizados com base na composição granulométrica e umidade. Com a composição granulométrica desses agregados,

determinou-se novamente a proporção de cada agregado na mistura, a fim de manter a composição granulométrica utilizada na primeira etapa. Na Tabela 27 e Figura 34 é possível observar a sobreposição das curvas, evidenciando a composição granulométrica similar utilizada nas duas etapas do plano experimental.

Tabela 27 – Composição granulométrica da BGTC – segunda etapa

Percentual passante									
peneiras	Brita 25	Brita 19	Pedrisco 2	Pó de pedra 3	Areia	Filler 2	BGTC 2	SAPEM	
%	0,11	0,168	0,29	0,27	0,156	0,006	1,00		
37,5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		
25	93,95	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,33	85	100
19	24,53	97,78	100,00	100,00	100,00	100,00	91,33	85	95
12,5	0,35	16,09	100,00	100,00	100,00	100,00	74,94	71	84
4,75	0,19	0,27	36,01	99,23	100,00	100,00	53,50	45	64
2	0,17	0,21	3,68	71,49	100,00	100,00	36,62	27	45
0,42	0,15	0,19	1,92	26,54	87,53	100,00	22,03	13	27
0,075	0,08	0,05	1,15	7,16	15,96	73,89	5,22	5	12

Figura 34 – Curva granulométrica da BGTC – segunda etapa



A curva granulométrica indica a proporção de cada agregado utilizado na mistura. Entretanto, esse percentual deve ser ajustado em função do teor de cimento adicionado, ou seja, deve haver uma substituição em percentual de massa para inclusão do cimento, conforme Equação (4).

$$m\% = m^* \times (100\% - \text{cim}\%)$$

Equação (4)

Onde:

$m\%$ = percentual em massa do agregado “m” na mistura com cimento (%);

m^* = proporção em massa do agregado sem o cimento (decimal);

$cim\%$ = percentual de cimento que se deseja adicionar (%).

3.3 Ensaio de compactação

Definida a proporção de cimento e agregados na mistura, realizou-se o ensaio de compactação para determinar a quantidade de água correspondente à umidade ótima.

O ensaio de compactação foi executado seguindo os procedimentos descritos na norma DNIT 164-ME (DNIT, 2013), na energia Proctor modificada (Figura 35).

Figura 35 – Molde de compactação com amostra compactada



Fonte: Própria autora (2022).

Na determinação da umidade de compactação devem ser levadas em consideração a quantidade de água adicionada na mistura, a média ponderada da umidade do agregado miúdo e a média ponderada da absorção do agregado graúdo, como mostrado na Equação (5). Assim, foi obtida a curva de compactação utilizando teores de umidade crescentes com adições de 1,0%, cinco pontos, sendo a umidade ótima o valor da abscissa correspondente ao ponto da massa específica aparente seca máxima. Na Figura 36 e Figura 37 é possível visualizar as curvas de compactação obtidas por meio do ensaio de compactação com os tratamentos 3% de CP II-F 32 e 5% de CP II-F 32, respectivamente.

$$H_c = H_{ad} + H_{am} - A_{b_{ag}} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

H_c = umidade de compactação;

H_{ad} = umidade adicionada;

H_{am} = média ponderada da umidade do agregado miúdo;

Ab_{ag} = média ponderada da absorção do agregado graúdo.

Figura 36 – Curva de compactação para mistura com 3% de CP II-F 32

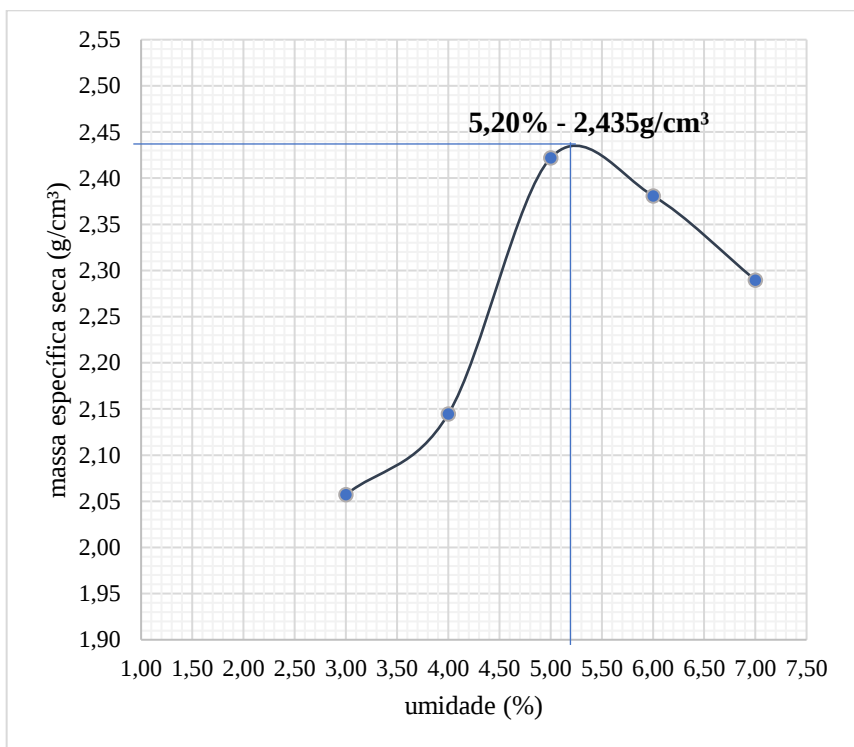
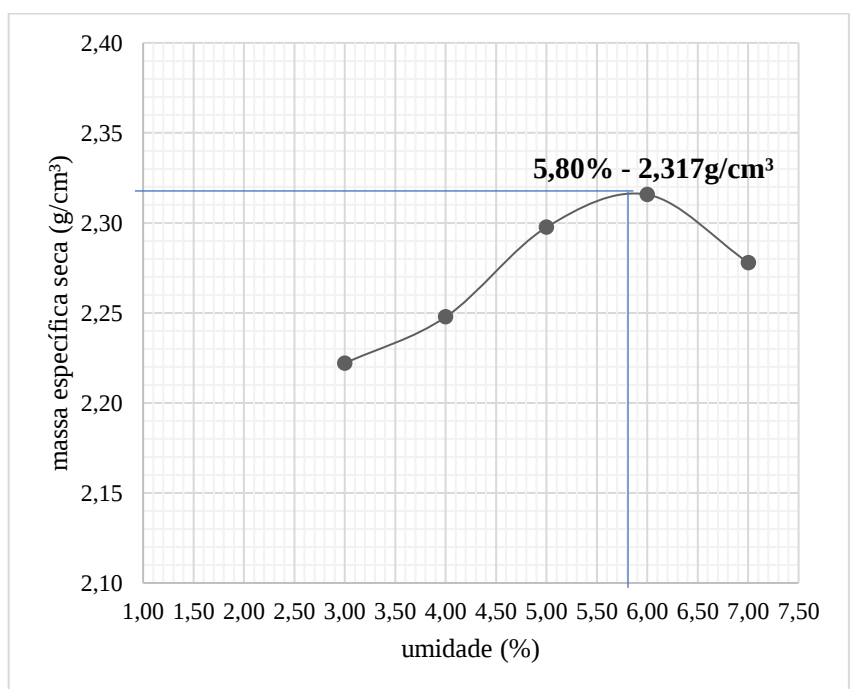


Figura 37 – Curva de compactação para mistura com 5% de CP II-F 32



Com base nos valores obtidos, percebe-se que o incremento do teor de cimento, de 3% para 5%, promove uma diminuição da massa específica seca máxima e aumento da umidade ótima, que a princípio não seria um resultado esperado. Entretanto, nos ensaios realizados por Prado (2018) que analisou as propriedades mecânicas de misturas de BGTC seguindo duas granulometrias distintas, uma segundo o DER/SP e outra segundo o SAPEM (2014) – especificação utilizada na presente pesquisa, percebeu-se que para nas misturas dosadas segundo o DER/SP o aumento do teor de cimento resultava em um aumento da umidade ótima e da massa específica aparente seca máxima. Por outro lado, nas misturas dosadas segundo o Manual de Engenharia de pavimentos da África do Sul o aumento do teor de cimento levou a um aumento da umidade ótima e redução da massa específica aparente seca máxima., como observado na Figura 36 e na Figura 37.

Com intuito de avaliar o influência do tipo de cimento, teor do ligante hidráulico, tempo de cura, além do tipo e teor de emulsão asfáltica nas misturas de BGTC, para as misturas com 3% de cimento foi utilizada a umidade ótima da mistura com 3% de CP II-F 32 (mistura de referência para os tratamentos com 3% de cimento), 5,20%, e para os tratamentos com 5% de cimento se utilizou a umidade ótima da mistura com 5% de CP II-F 32 (mistura de referência para os tratamentos com 5% de cimento), 5,80%.

Determinadas as proporções de agregados, cimento e água, as amostras sem aditivos (emulsões asfálticas) foram preparadas e moldadas. Essas misturas correspondem às citadas na Tabela 16.

Para misturas com emulsão asfáltica foi realizada uma correção na água adicionada à mistura, que diminuiu em decorrência da água presente na emulsão, a fim de garantir a moldagem na umidade ótima do tratamento de referência. Nessas amostras, primeiro eram misturados os agregados e o cimento, depois eram inseridas a água misturada previamente com a emulsão.

A umidade da mistura de agregados era confirmada por meio da diferença de massa entre 50g da mistura de agregados no momento da separação do material para cada corpo de prova e a massa dessa mistura após permanência em estufa por um período de 24 horas, ou até constância de massa. Para preservar a umidade aferida, a mistura de agregados de cada corpo de prova foi previamente separada em sacos plásticos, que permaneciam vedados até a moldagem (Figura 38).

Figura 38 – Mistura de agregados para moldagem dos corpos de prova



Fonte: Própria autora (2022).

Definiu-se a massa total utilizada em cada corpo de prova a partir do peso específico aparente seco máximo, da úmida ótima e do volume do corpo de prova, definido nas normas de referência.

As amostras misturadas foram moldadas com mecanismos de compactação e em moldes específicos para cada ensaio. Concluída a moldagem, embalou-se o conjunto (molde e material compactado) em filme de policloreto de vinil (PVC), para conservar a umidade (Figura 39a). O conjunto foi levado à câmara úmida, onde permaneceu por um período de 24 horas (Figura 39b). Decorrido esse tempo, o corpo de prova foi desmoldado e novamente embalado em filme de PVC. Então, deixou-se a amostra na câmara úmida para conclusão do período de cura de sete ou vinte e oito dias, quando foram realizados os ensaios mecânicos e avaliação da porosidade.

Figura 39 – Corpos de prova em câmara úmida: a) Conjunto corpo de prova e molde envoltos em filme de PVC.
b) corpo de prova envolto em filme de PVC



Fonte: Própria autora (2022).

3.4 Ensaios Mecânicos

a) Resistência à Compressão Simples (RCS)

Determinou-se a resistência à compressão simples (RCS) com base na metodologia da NBR 5739 (ABNT, 2018a) e a moldagem conforme a norma DNIT 181-ME (DNIT, 2018).

A norma DNIT 181-ME (DNIT, 2018) descreve os métodos de ensaio para determinação do módulo de resiliência de materiais estabilizados quimicamente, como a BGTC. Tal norma utiliza o mesmo cilindro do ensaio de resistência à compressão simples e apresenta as condições de compactação de corpo de prova em cilindro tripartido. Na Figura 40 é possível observar o molde e soquete utilizado na moldagem dos corpos de prova. O controle do grau de compactação é realizado a partir da relação percentual entre a massa específica aparente seca efetivamente alcançada na moldagem do corpo de prova e a massa específica aparente seca máxima obtida no ensaio de compactação para o teor de cimento analisado.

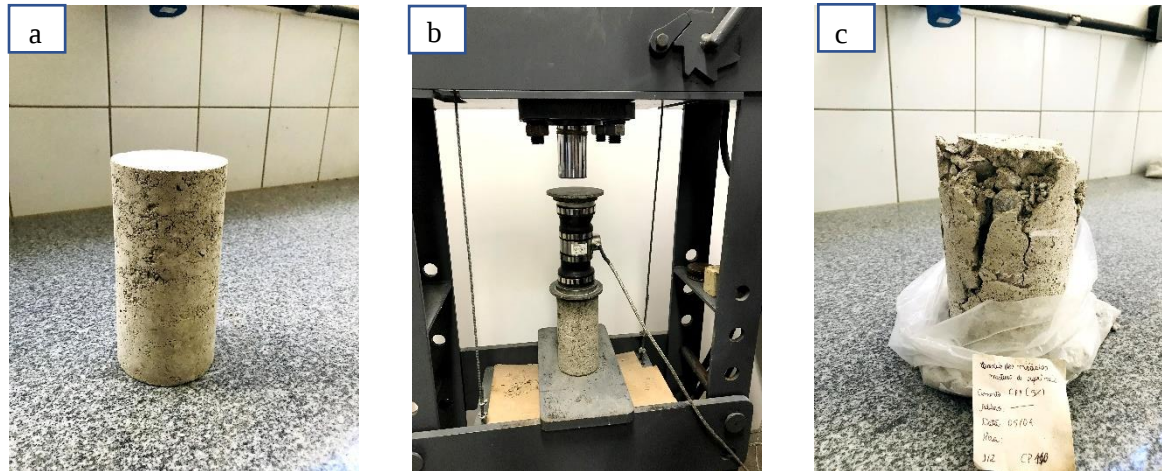
Figura 40 – Molde e cilindro utilizando no ensaio de RCS



Fonte: Própria autora (2022).

Para a determinação da RCS, aplica-se um carregamento contínuo e sem choques, paralelo ao maior eixo do cilindro, com velocidade de carregamento constante. O carregamento só deve cessar quando houver uma queda de força que indique a ruptura. A Figura 41 mostra o corpo de prova antes da execução do ensaio, sua configuração para a realização do ensaio e o corpo de prova após ruptura.

Figura 41 – Ensaio de RCS em misturas de BGTC: a) corpo de prova antes de ensaio; b) ensaio; c) corpo de prova após o ensaio



Fonte: Própria autora (2022).

O carregamento foi aplicado por meio de uma prensa hidráulica com capacidade de carga de até 15 toneladas. Para a obtenção dos resultados foi utilizada uma célula de carga do tipo coluna e seu respectivo o programa de leitura *IWM Tool*. A célula de carga e programa de leitura foram utilizados nos ensaios de RTCD, RTF e MF.

Com os dados registrados no ensaio, a resistência à compressão foi calculada pela Equação (6):

$$RCS = \frac{4 F}{\pi d^2} \quad \text{Equação (6)}$$

Onde:

RCS = resistência à compressão (MPa);

F = força máxima alcançada (N);

d = diâmetro do corpo de prova (mm).

Conforme indica a NBR 12261 (ABNT, 2013b), a resistência à compressão média corresponde ao valor médio do resultado de, no mínimo, dois corpos de prova, devendo ser excluídos da composição média valores individuais de resistência que se afastem de mais de 10% da média.

Ressalta-se que os corpos de prova a serem ensaiados devem atender à relação altura (h) pelo diâmetro (d) nunca maior que 2,06. Para os casos em que os corpos de prova apresentem essa mesma relação inferior a 1,94, deve-se multiplicar a resistência à compressão pelo fator de correção correspondente, conforme NBR 5739 (ABNT, 2018a).

b) Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD)

Uma vez que ainda não existe uma normatização própria para BGTC, a determinação da resistência à tração por compressão diametral seguiu os procedimentos apresentados pela norma DNIT 136-ME (DNIT, 2018), que descreve a metodologia deste ensaio para misturas asfálticas.

Para esse ensaio os corpos de prova são moldados em cilindros com 10cm de diâmetro e 6cm de altura (Figura 42). Assim, para de atingir a energia modificada durante a compactação, são aplicados 62 golpes em camada única, por meio de um soquete com massa de 4.540g e altura de queda livre de 45,72cm, conforme norma DNIT 181-ME (DNIT,2018).

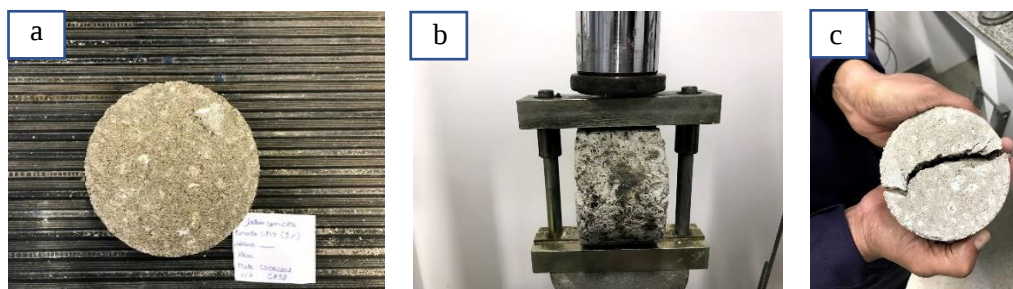
Figura 42 – Molde e cilindro utilizado no ensaio de RTCD



Fonte: Própria autora (2022).

A Figura 43 mostra o corpo de prova antes, durante e após a realização do ensaio de RTCD.

Figura 43 – Ensaio de RTCD em misturas de BGTC: a) corpo de prova antes de ensaio; b) ensaio; c) corpo de prova após o ensaio



Fonte: Própria autora (2022).

A resistência à tração por compressão diametral foi calculada pela Equação (7):

$$RTCD = \frac{2F}{\pi dh} \quad \text{Equação (7)}$$

Onde:

RTCD = resistência à tração indireta (MPa);

F = carga de ruptura (N);

d = diâmetro do corpo de prova (mm);

h = altura do corpo de prova (espessura) (mm).

A resistência à tração por compressão diametral deve ser a média aritmética dos valores obtidos de três corpos de prova, desde que a variação entre os valores individuais e a média esteja em um intervalo de $\pm 10\%$.

c) Resistência à Tração na Flexão (RTF)

Fratura e falha da camada de base de agregado estabilizado com cimento são causadas, principalmente, pela tensão de tração flexão e deformação de tração produzida na parte inferior da camada de base (MANDAL *et al.*, 2017).

Para determinar a resistência à tração na flexão foram utilizados os métodos de ensaios descritos em C78/78M (ASTM, 2021), AP-R462 (AUSTROADS, 2014), *Report 789* (NCHRP, 2014) e NBR 12142 (ABNT, 2010).

Os corpos de prova foram confeccionados em moldes prismáticos com dimensões 10cm x 10cm x 40cm. Utilizou-se a metodologia de compactação por amassamento, com prensagem estática, em três camadas com igual quantidade de material em cada uma delas. Foram feitas marcações no molde, a fim de dividir sua espessura em três partes iguais para nortear o processo de compactação. A quantidade de material em cada camada foi calculada com base na massa específica aparente seca, teor de umidade da mistura e volume de cada camada. As camadas são prensadas com uma força de compressão variável e crescente até que se atinja a altura pretendida para cada camada, atingindo o grau de compactação desejado. Como descrito no *Report 789* (NCHRP, 2014), a superfície entre as camadas deve ser escarificada até uma profundidade de 0,6mm para garantir uma boa adesão. Compactada a última camada, deve-se fazer o acabamento da superfície por um processo conhecido como rasamento, no qual o material é retirado com o auxílio de uma régua biselada e substituído por um material mais fino. Ao final da moldagem o corpo de prova deve alcançar o grau de compactação desejado para a energia Proctor modificada. A Figura 44 ilustra o processo de moldagem do corpo de prova.

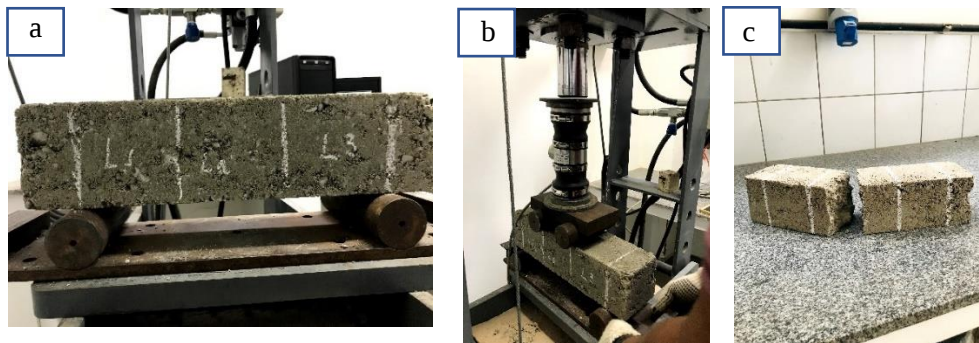
Figura 44 – Molde e cilindro utilizado no ensaio de RTF



Fonte: Própria autora (2022).

Decorrido o tempo de cura, 7 ou 28 dias, foram determinadas as dimensões das vigotas, tomando-se pelo menos três medidas para cada dimensão. Foram efetuadas marcações na vigota, destacando-se os 30cm de vão central, o limite do terço médio e o centro da viga. Essas marcações garantem o posicionamento adequado da vigota na máquina de ensaio, proporcionando uma relação vão/profundidade igual a 3. Na realização do ensaio, a força foi aplicada continuamente no intervalo de 0,9MPa/min a 1,2MPa/min (ASTM, 2021). O posicionamento da viga para o ensaio e o corpo de prova rompido ilustrado na Figura 45.

Figura 45 – Ensaio de RTF em misturas de BGTC: a) corpo de prova antes de ensaio; b) ensaio; c) corpo de prova após o ensaio



Fonte: Própria autora (2022).

A resistência à tração na flexão foi calculada de acordo com a Equação (8):

$$RTF = \frac{FL}{b d^2} \quad \text{Equação (8)}$$

Caso a ruptura ocorra fora do terço médio, a uma distância não superior a 5% da dimensão do vão entre apoios (L), a resistência à tração deve ser calculada conforme Equação (9):

$$RTF = \frac{3Fa}{b d^2} \quad \text{Equação (9)}$$

Onde:

RTF = resistência à tração na flexão (MPa);

F = força máxima registrada na máquina de ensaio (N);

L = dimensão do vão entre apoios (mm);

b = largura média do corpo de prova (mm);

d = altura média do corpo de prova (mm);

a = distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo (mm).

Quando a ruptura está mais que 5% fora do comprimento do vão, os resultados devem ser descartados.

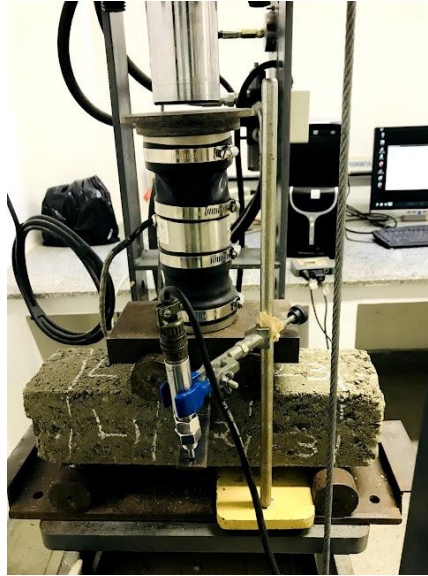
d) Módulo Flexural (MF)

Nesse ensaio, os corpos de prova foram confeccionados em moldes prismáticos, com as mesmas dimensões e metodologia de compactação do ensaio de resistência à tração na flexão.

Respeitado o tempo de cura, foram realizadas as medições da amostra com aproximação de 1mm, fazendo-se ao menos três medições para cada dimensão. Em seguida, o corpo de prova foi posicionado na máquina do ensaio como ilustrado na Figura 45 (b), ou seja, na mesma configuração do ensaio de RTF. Desse modo, a carga máxima do ensaio deve ser determinada para ser aplicada à amostra de forma que ela permaneça dentro de sua faixa elástica. O *Report 789* (NCHRP, 2014) recomenda um pico entre 20% e 40% da resistência à tração na flexão. Na presente pesquisa foi adotada a carga correspondente a 40% da RTF, em pulso monotônico.

No ensaio foi aplicada uma força crescente, contínua e sem choques. Obteve-se a deflexão vertical no centro do corpo de prova através de um medidor de deslocamento linear acoplado na amostra por meio de uma barra metálica encaixada no centro do corpo de prova, na altura média da face lateral deste, de modo a impedir que deslocamentos externos interfiram no deslocamento da amostra (Figura 46).

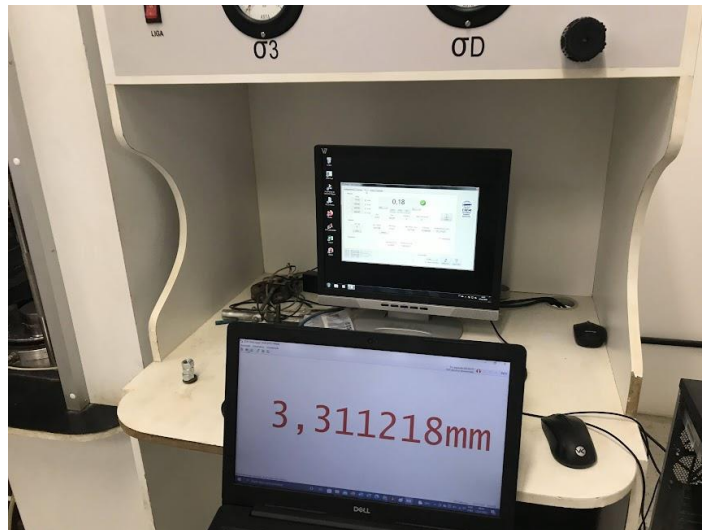
Figura 46 – Configuração do ensaio de módulo flexural



Fonte: Própria autora (2022).

A leitura da deflexão vertical obtida pelo medidor de deslocamento acoplado à amostra foi efetuada com uso do Programa Metrolog, conforme Figura 47.

Figura 47 – Leitura da deflexão vertical com Programa Metrolog



Fonte: Própria autora (2022).

Com a execução do ensaio, o módulo flexural foi determinado através da curva tensão-deformação e Equação (10).

$$S_{max} = \frac{23FL^3}{108 b d^3 \delta h} \times 1000$$

Equação (10)

Onde:

S_{max} = módulo flexural (MPa);

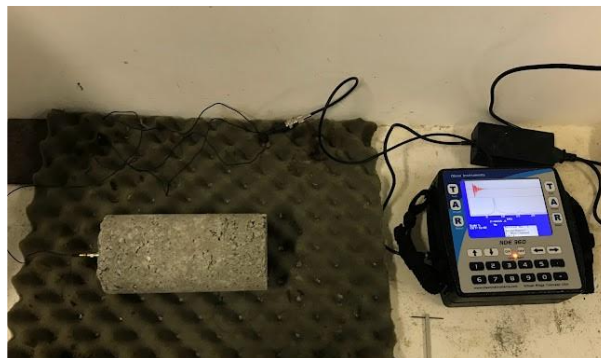
F = carga máxima aplicada (N);
 L = comprimento do vão (mm);
 b = largura média da amostra (mm);
 d = altura média da amostra (mm);
 δh = pico de deslocamento médio do vão (mm).

e) Módulo Dinâmico (E^*)

O ensaio para determinação do módulo dinâmico seguiu as especificações da norma americana C215 (ASTM, 2019). Esta norma descreve o método de ensaio para aferir as frequências ressonantes transversais, longitudinais e de torção de prismas e cilindros de concreto. Nessa pesquisa foram utilizados corpos de prova cilíndricos com 10cm de diâmetro e 20cm de altura, moldados conforme a metodologia descrita para o ensaio de determinação da RCS.

Após a cura dos corpos de prova, registrou-se as dimensões e massa destes, informações necessárias para o cálculo dos módulos. Para iniciar o ensaio, posicionou-se o corpo de prova de forma que ele pudesse vibrar livremente no modo longitudinal, transversal ou de torção e que não ocorressem interferências externas. Em seguida, preparou-se o equipamento de aquisição de dados, que registrou as frequências atingidas por meio de um acelerômetro colado no corpo de prova. Nessa pesquisa foi utilizado o equipamento *Non-Destructive Evaluation* (NDE 360) (Figura 48).

Figura 48 – Non-Destructive Evaluation – NDE 360

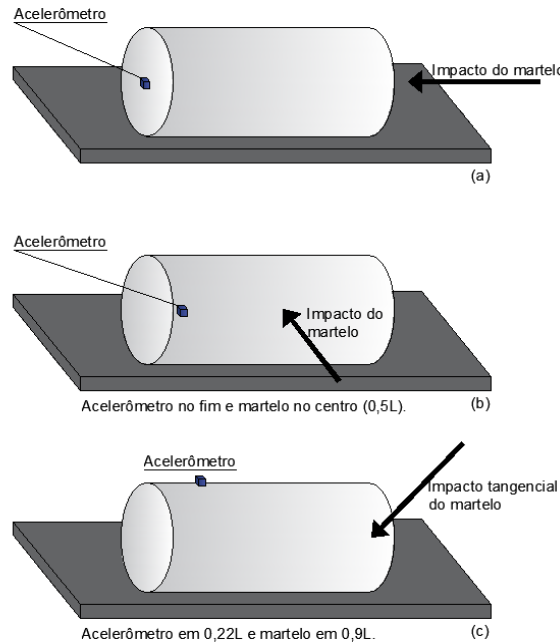


Fonte: Própria autora (2022).

O ensaio de determinação do módulo dinâmico consiste em utilizar um pequeno martelo para promover diferentes modos de vibração e frequências ressonantes correspondentes, que

são obtidas por localizações adequadas do ponto de impacto e do acelerômetro, como ilustra a Figura 49.

Figura 49 – Configurações para o ensaio dinâmico: a) longitudinal, b) transversal e c) torção



Fonte: Traduzido, *Olson Instruments* (2021).

Para cada modo de vibração o ensaio deve ser realizado três vezes e a frequência média deve ser registrada. Caso alguma frequência se desvie do valor médio em mais de 10%, deve-se refazer o ensaio. Com a realização do ensaio o módulo dinâmico longitudinal é calculado como mostra a Equação (11):

$$E^*_{\text{long}} = DM(n')^2 \quad \text{Equação (11)}$$

Onde:

E^*_{long} = módulo dinâmico longitudinal (Pa);

n' = frequência longitudinal (Hz);

$D = 5,093 (L/d^2)$, (m^{-1});

L = altura do corpo de prova (m);

d = diâmetro do corpo de prova (m).

Para a determinação do módulo dinâmico de torção, será utilizada a Equação (12):

$$E^*_{\text{tor}} = B M (n'')^2 \quad \text{Equação (12)}$$

Onde:

E^*_{tor} = módulo dinâmico na torção (Pa);

n'' = frequência na torção (Hz);

$B = (4LR/A)$, (m^{-1});

R = fator de forma = 1 para cilindros;

A = área da seção transversal do corpo de prova (m^2).

Por fim, o módulo dinâmico transversal será obtido pela Equação (13).

$$E^*_{transv} = C M n^2 \quad \text{Equação (13)}$$

Onde:

E^*_{transv} = módulo dinâmico transversal (Pa);

$C = 1,6067 (L^3T/d^4)$, (m^{-1}), para cilindros;

T = fator de correção que depende da razão do raio de giração K (o raio de giração para um cilindro é $d/4$), da altura L da amostra, e do coeficiente de Poisson μ . Na Tabela 1 da C215 (ASTM, 2019) são apresentados alguns valores de T . Para valores de coeficiente de Poisson diferentes dos apresentados na referida norma, utiliza-se a Equação (14) para obtenção desse fator de correção.

$$T = T \left[\frac{1 + (0,26\mu + 3,22\mu^2)K/L}{1 + 0,1328 K/L} \right] \quad \text{Equação (14)}$$

f) Módulo de Elasticidade (E)

Uma vez que o ensaio para obtenção do módulo dinâmico é um ensaio não destrutivo, utilizou-se o mesmo corpo de prova no ensaio de módulo de elasticidade com carregamento monotônico. A metodologia de ensaio foi embasada na NBR 8522 (ABNT, 2021), que estabelece os procedimentos para determinação do módulo de elasticidade do concreto endurecido em corpos de prova cilíndricos.

Antes da realização do ensaio foram aferidas as dimensões do corpo de prova. Em seguida, fez-se a sua instrumentação, com a instalação de medidores de deformação (Figura 50)

Figura 50 – Instrumentação para ensaio de módulo de elasticidade



Fonte: Própria autora (2022).

A determinação do módulo de elasticidade foi realizada seguindo a metodologia da tensão fixa. Esse método é dividido em quatro etapas, sendo necessário conhecer previamente a tensão de resistência à compressão do tratamento analisado.

Na primeira etapa, o corpo de prova deve ser carregado até uma força correspondente à tensão limite superior (σ_b), que corresponde à 30% da RCS, a qual deve ser mantida por 60 segundos. Em seguida, o corpo de prova deve ser descarregado até uma força próxima a zero, sem que o prato superior da máquina do ensaio perca contato com o topo do corpo de prova. Então, inicia-se a segunda etapa com carregamento do corpo de prova até uma força correspondente à tensão de 0,5MPa (σ_a), devendo ser mantida por 60 segundos. Posteriormente se carrega novamente o corpo de prova até a tensão limite superior, mantendo-a por 60 segundos, descarregando em seguida até uma força próxima a zero. Na terceira etapa é repetido o procedimento da etapa anterior. Depois, a quarta etapa é iniciada com o carregamento do corpo de prova até uma força correspondente à tensão de 0,5MPa (σ_a), que deverá ser mantida por 60 segundos, devendo ser registradas as deformações lidas nos primeiros 30 segundos (ϵ_a). Por fim, o corpo de prova deve ser carregado até a força correspondente à tensão limite superior (σ_b), que deve ser mantida por 60 segundos e registradas as deformações lidas (ϵ_b) nos primeiros 30 segundos. Após essas leituras o corpo de prova pode ser descarregado e pode ser retirada a instrumentação.

Com os dados obtidos no ensaio, o módulo de elasticidade (E) é calculado pela Equação (15):

$$E = \frac{\sigma_b - 0,5}{\epsilon_b - \epsilon_a} 10^{-3} \quad \text{Equação (15)}$$

g) Módulo de Resiliência (MR)

O módulo de resiliência do material representa sua resposta elástica resultante de uma carga aplicada em pulsos de curta duração (DNIT, 2018). A norma DNIT 181-2018 estabelece os critérios e procedimentos para a determinação do módulo de resiliência de materiais estabilizados quimicamente como a BGTC, o CCR, material de reciclagem de revestimento e de base com adição de cimento Portland, solo cimento e outros materiais de pavimentação estabilizados quimicamente.

Foram utilizados os mesmos corpos de prova dos ensaios de determinação do módulo dinâmico e de elasticidade, corpos de prova cilíndricos com 20cm de altura e 10cm de diâmetro. A frequência das cargas repetidas na tensão vertical (tensão principal maior) é de 1 Hz (60

ciclos por minuto), que corresponde à duração do pulso de carga de 0,1 segundo e 0,9 segundo de repouso. A configuração do ensaio é representada na Figura 51.

Figura 51 - Configuração do ensaio de módulo de resiliência



Fonte: Própria autora (2022).

O cálculo do MR é realizado utilizando as Equações (16) e Equação (17)

$$MR = \frac{\sigma_1}{\epsilon_R} \quad \text{Equação (16)}$$

$$\epsilon_R = \frac{\delta_r}{H_0} \quad \text{Equação (17)}$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, MPa;

σ_1 = tensão vertical, MPa;

ϵ_R = deformação resiliente;

δ_r = deslocamento resiliente, mm;

H_0 = distância entre alças que fixam os LVDTs no corpo de prova, descontado o deslocamento plástico ou permanente acumulado correspondente a tensão vertical usada no cálculo (mm).

3.5 Avaliação da Porosidade

a) NBR 9778 (ABNT, 2005)

A porosidade das misturas de BGTC foi avaliada com base na NBR 9778 (ABNT, 2005), que prescreve o ensaio para determinação da absorção de água, do índice de vazios por imersão e fervura, e das massas específicas de argamassas e concretos endurecidos.

Para cada mistura estuada foram confeccionados três corpos de prova com as mesmas dimensões e condições de compactação do ensaio de RCS, moldados conforme DNIT 181-ME (DNIT, 2018b). Para cada mistura o valor do parâmetro avaliado é a média dos resultados desses três corpos de prova ensaiados.

Após o tempo de cura em câmara úmida, 7 ou 28 dias, os corpos de prova foram levados à estufa com temperatura controlada $105 \pm 5^\circ\text{C}$, onde permaneceram por 72 horas. Ao serem retirados da estufa, registrou-se a massa da amostra (m_s). Posteriormente, os corpos de prova foram imersos em água à temperatura $23 \pm 2^\circ\text{C}$, onde foram mantidos por 72 horas. Completada a etapa de saturação em água, colocou-se os corpos de prova em um recipiente cheio de água, que foi levado progressivamente à ebulição por um período de 5 horas, tomando-se o cuidado de manter o volume de água aproximadamente constante (Figura 52). Cessada a fase de ebulição e ainda imersos em água, quando a água atingiu a temperatura ambiente, registrou-se a massa com auxílio de uma balança hidrostática (m_i). Por fim, secou-se o corpo de prova com um pano úmido e se registrou sua massa saturada com superfície seca (m_{sat}). A absorção (A) e índice de vazios (Iv) foram calculados pela Equação (18) e Equação (19), respectivamente.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (18)$$

$$Iv = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (19)$$

Figura 52 – Corpo de prova levado ao fogo para etapa de ebulição



Fonte: Própria autora (2022).

b) Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Foram obtidas imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), nas instalações do Centro Multiusuário de Nanotecnologia da UFS (CMNano-UFS) a fim analisar a microestrutura das misturas propostas.

Na formação das imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura os sinais de maior relevância são os elétrons secundários e os retroespalhados. À medida que o feixe de elétrons primários varre a amostra, os sinais sofrem modificações com base nas variações da superfície. Os elétrons secundários fornecem imagem de topografia da superfície da amostra e são os responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução. Enquanto os elétrons retroespalhados fornecem imagem característica de variação de composição. A imagem gerada pelos elétrons retroespalhados é representada na cor cinza, cujos tons claros correspondem a regiões constituídas por elementos com número atômico médio maior, o que facilita a identificação das fases presentes.

Inicialmente, recobriu-se as amostras com ouro (processo de metalização). Na Figura 53 é possível constatar a diferença entre as amostras antes e após o processo de metalização, e na Figura 54 é observado o equipamento utilizado na metalização das amostras.

Figura 53 - Amostras metalizados e amostras preparadas para o processo de metalização



Fonte: Própria autora (2022).

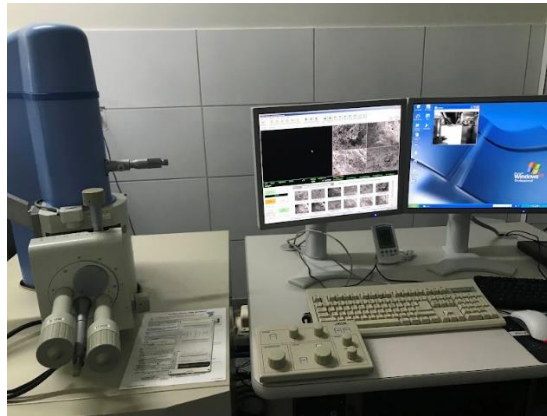
Figura 54 – Amostras no equipamento para metalizar com ouro



Fonte: Própria autora (2022).

Após o processo de metalização, as amostras foram colocadas no amostrador e a microscopia eletrônica de varredura foi realizada utilizando o equipamento SEM-LV (JSM6510LV) e o programa de registro das imagens JEOL – *Scanning Electron Microscope* (Figura 55).

Figura 55 – Obtenção de imagens por microscopia eletrônica de Varredura



Fonte: Própria autora (2022).

c) Imagens da macroestrutura

A avaliação da macroestrutura foi realizada por meio de imagens obtidas por meio do equipamento fotográfico Nikon 5500, com lente Nikon AF-S DX Nikkor 18-105mm f/3.5-5.6G ED VR e resolução máxima igual a 24 Megapixels (6000X4000).

As imagens foram obtidas em amostras preparadas conforme metodologia descrita a seguir:

- Com uma serra policorte, dividiu-se os corpos de prova com 10cm de diâmetro e 20cm de altura em três partes iguais, no sentido perpendicular ao diâmetro;
- A parte central de cada corpo de prova foi imerso em solução aquosa de azul de metileno, na concentração 1,0 grama de azul de metileno para 1,0 litro de água, por um período de 72 horas (Figura 56);

Figura 56 - Corpos de prova imersos na solução aquosa de azul de metileno



Fonte: Própria autora (2022).

- Após esse período, os corpos de prova imersos na solução de azul de metileno foram levados à fervura, onde permaneceram por um período de 5 horas;
- Com o resfriamento da solução em contato com o ambiente, retirou-se os corpos de prova da solução, deixando-os em repouso por um período superior a 48 horas para garantir a secagem completa dos corpos de prova (Figura 57);

Figura 57 – Corpos de prova em processo de secagem



Fonte: Própria autora (2022).

- Foi realizado um corte de 5mm da superfície, no sentido perpendicular ao diâmetro, nos corpos de prova pigmentados (Figura 58).

Figura 58 – Corte no corpo de prova

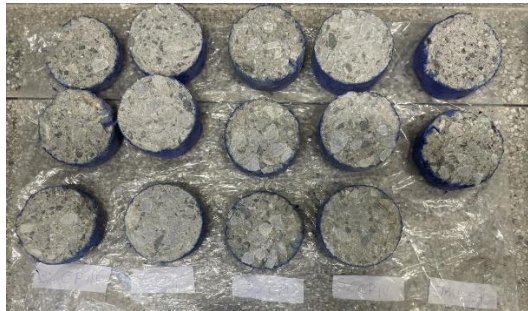


Fonte: Própria autora (2022).

Pretendia-se com esse procedimento avaliar a porosidade dos tratamentos por meio da constatação da maior ou menor absorção do pigmento. Entretanto, com o corte dos corpos de prova, percebeu-se que a pigmentação observada na superfície em contato direto com a solução

não era visualizada no interior do corpo de prova, não sendo possível verificar distinção entre tratamentos com índice de vazios e absorção distintos (Figura 59). Assim, realizou-se um corte no centro dos corpos de prova, com o intuito de verificar alguma diferença na profundidade de penetração do pigmento na direção do raio das amostras (das bordas ao centro).

Figura 59 – Corpos de prova após corte a 5mm da superfície



Fonte: Própria autora (2022).

3.6 Análise dos Resultados

Nesse estudo foi realizada uma análise fatorial para avaliar a significância do efeito do teor de cimento, tipo de cimento e utilização de emulsão asfáltica na RCS e RTCD das misturas investigadas na primeira etapa do planejamento experimental. Com auxílio do *software* Minitab 19, foram obtidos modelos de regressão linear simples e múltipla para as variáveis estudadas, ao nível de significância de 95%.

Foram realizadas correlações lineares e indicados os modelos fatoriais lineares para medir as relações entre os parâmetros de resistência, rigidez e porosidade, a fim de entender como a variabilidade de um parâmetro afeta outro na mistura cimentada.

Por fim, realizou-se uma análise de viabilidade técnica e viabilidade econômica por meio de simulações utilizando o método de dimensionamento sul-africano, com auxílio do mePADS (*Mechanistic-Empirical Pavement Design and Analysis Software*), e através do método PROMETHEE GAYA (*Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations*), respectivamente.

a) Viabilidade técnica

O mePADS é um *software* sul-africano baseado na teoria elástica multicamada linear, que permite a análise de estruturas de até 5 camadas. O método de análise e dimensionamento de pavimentos desenvolvido na África do Sul, disponível no manual de engenharia de

pavimentos (SAPEM, 2014), é um método bastante consolidado e elaborado para condições climáticas, de tráfego e geomorfológicas semelhantes às do Brasil. Por essas razões foi o método adotado na pesquisa.

Utilizando o *software* mePADS, realizou-se simulações do comportamento à fadiga das misturas propostas, tomando como referência a estrutura estudada por Nascimento e Albuquerque (2018). A Tabela 28 mostra os parâmetros utilizados no dimensionamento.

Sabendo-se que o valor típico utilizado nas rodovias estaduais de Sergipe para um período de projeto igual a de 10 anos é igual a $N = 1 \times 10^6$, utilizou-se o *software* sul-africano para analisar o desempenho estrutural das misturas propostas na pesquisa.

Tabela 28 – Parâmetros para dimensionamento

Camada	Espessura (mm)	Módulo (MPa)	Coef. Poisson
Revestimento – CAUQ	50	4273	0,30
Camada de ligação – binder	75	9309	0,30
Base – BGTC	150	variável	0,25
Sub-base – material granular	150	503	0,35
Subleito	∞	411	0,45

b) Viabilidade econômica

Utilizou-se o método PROMETHEE GAYA, desenvolvido por Brans *et al.* (1986), para apoio à tomada de decisão quanto a viabilidade técnica e econômica a respeito da utilização dos insumos propostos (cimento Portland tipo CP II-F 32 RS, cimento Portland tipo CP IV 32 RS e emulsão asfáltica). O PROMETHEE consiste na construção de uma relação de classificação/hierarquização de valores, na qual o decisor estabelece um peso para cada critério que aumenta conforme a sua importância (Almeida & Costa, 2002).

A aplicação do método PROMETHEE foi utilizada para analisar comparativamente as misturas com 3% de cimento tipo CP II-F 32, misturas com 3% de cimento tipo CP IV 32 RS e misturas nas quais foi utilizado 3% cimento tipo CP II-F 32 com 0,50% de emulsão asfáltica RR-1C. Como critérios de avaliação, adotou-se a relação RTF/RCS, RTF/E*long, Abs, Iv e custo/m³, conforme descreve Tabela 29.

Tabela 29 – Descrição dos critérios de avaliação

Critério	Natureza	Descrição
RTF/RCS	Quantitativa	Relação entre resistência à tração na flexão e resistência à compressão simples, aos 28 dias de cura.
RTF/E*long	Quantitativa	Relação entre resistência à tração na flexão e módulo dinâmico longitudinal, aos 28 dias de cura.
Abs	Quantitativa	Absorção, aos 28 dias de cura.
Iv	Quantitativa	Índice de vazios, aos 28 dias de cura.
custo/m ³ ,	Quantitativa	Custo por metro cúbico da mistura.

No problema em estudo, os pesos atribuídos a cada critério consideram a importância que cada um assume na tomada de decisão. Nesta ponderação deve ser levado em consideração quais critérios são mais relevantes no projeto, sejam eles critérios técnicos ou econômicos. Na presente pesquisa, adotou-se pesos iguais para os critérios técnicos e econômicos (Tabela 30).

Tabela 30 – Peso atribuído a cada critério

Critérios	Pesos (%)
RTF/RCS	12,50
RTF/E*long	12,50
Abs	12,50
Iv	12,50
custo/m ³	50,00

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos com a execução do plano experimental proposto. Primeiramente, são avaliados os parâmetros mecânicos obtidos na primeira etapa (Figura 27). Depois, considerando as misturas com 3% de CP II-F 32 e as misturas com 5% de CP II-F 32, sem emulsão asfáltica, como misturas de referência em seus respectivos teores de cimento, são identificadas e selecionadas as misturas com desempenho superior a estas. Por fim, são apresentados e discutidos os resultados da segunda etapa, realizados com as misturas de referências e as selecionadas na etapa anterior.

4.1 Primeira Etapa: Seleção das Misturas Estudadas

A primeira etapa do plano experimental corresponde aos ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral, aos 7 dias de cura, dos tratamentos (combinações) apresentados nos planejamentos fatoriais A e B, Tabela 16 e Tabela 17, respectivamente. Assim, são avaliados os efeitos dos fatores de interesse (tipo de cimento, teor de cimento, tipo de emulsão asfáltica e teor de emulsão asfáltica), a partir dos resultados de 32 ensaios de RCS e 48 ensaios de RTCD.

a) Resistência à compressão simples (RCS)

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples, aos 7 dias de cura, para os 16 tratamentos propostos, são mostrados na Tabela 31.

Tabela 31 – RCS de amostras de BGTC aos 7 dias de cura

Planejamento fatorial	Tratamento	Tipo de Cimento	Teor de cimento	Aditivo	RCS (MPa)		Média (MPa)
A	1	CP II-F 32	3%	-	4,73	4,73	4,73
	2	CP II-F 32	5%	-	7,91	8,52	8,21
	3	CP IV 32 RS	3%	-	5,10	5,26	5,18
	4	CP IV 32 RS	5%	-	10,92	9,47	10,19
B	6	CP II-F 32	3%	0,5% RR-1C	4,29	4,32	4,30
	7	CP II-F 32	3%	1,0% RR-1C	3,45	2,98	3,22
	8	CP II-F 32	3%	2,0% RR-1C	3,28	2,80	3,04
	10	CP II-F 32	5%	0,5% RR-1C	6,42	6,72	6,57
	11	CP II-F 32	5%	1,0% RR-1C	5,93	5,06	5,49
	12	CP II-F 32	5%	2,0% RR-1C	5,65	4,66	5,16
	14	CP II-F 32	3%	0,5% RL-1C	3,18	3,36	3,27
	15	CP II-F 32	3%	1,0% RL-1C	3,56	3,21	3,38
	16	CP II-F 32	3%	2,0% RL-1C	2,50	2,35	2,42

Planejamento fatorial	Tratamento	Tipo de Cimento	Teor de cimento	Aditivo	RCS (MPa)		Média (MPa)
B	18	CP II-F 32	5%	0,5% RL-1C	5,00	6,71	5,85
	19	CP II-F 32	5%	1,0% RL-1C	4,79	4,88	4,83
	20	CP II-F 32	5%	2,0% RL-1C	3,65	4,61	4,13

Conforme discutido no Capítulo 3 – Materiais e Métodos, uma vez que não foi avaliado o efeito combinado do cimento tipo CP IV 32 RS e emulsão asfáltica em misturas de BGTC, elaborou-se dois planejamentos fatoriais (A e B). Desse modo, com o auxílio do *software* Minitab 19, foi possível avaliar o efeito dos fatores de interesse na RCS das misturas de brita graduada tratada com cimento.

O planejamento fatorial A busca verificar a relevância do efeito do tipo de cimento (CP II-F 32 e CP IV 32 RS) e teor de cimento (3% e 5%) na resistência à compressão simples da BGTC, aos 7 dias de cura. A Tabela 32 mostra o resultado da regressão fatorial RCS *versus* tipo de cimento e teor de cimento.

Tabela 32 - Resultado da regressão fatorial – Planejamento Fatorial A

Termo	Efeito	Coef	Valor-T	P-valor	Significante
Constante		7,080	35,820	0,000	
Tipo de Cimento	1,215	0,608	3,070	0,037	SIM
Teor de cimento	4,250	2,125	10,750	0,000	SIM
Tipo de Cimento*Teor de cimento	0,765	0,383	1,940	0,125	NÃO

Os efeitos são estatisticamente significativos quando seus valores-P são menores do que α . Em um α padrão de 0,05, as seguintes considerações podem ser destacadas:

- O tipo de cimento e teor de cimento são variáveis com efeitos significantes na RCS de misturas de BGTC, sendo o teor de cimento a variável de maior relevância;
- O efeito da interação do tipo de cimento e teor de cimento não é significante na RCS das misturas investigadas, pois a interação certamente é redundante.

Analisando o gráfico normal dos efeitos padronizados, gráfico de Pareto e gráfico de efeitos principais para RCS, Figura 60, Figura 61 e Figura 62, respectivamente, algumas considerações adicionais podem ser apresentadas:

- No gráfico de Pareto, quaisquer efeitos que se estendam além da linha de referência são significantes, confirmando a relevância do efeito do tipo de cimento e teor de cimento na RCS de BGTC;

- Aos 7 dias, as misturas de BGTC com cimento tipo CP IV 32 RS apresentam maiores valores de RCS, quando comparadas às misturas com cimento tipo CP II-F 32, para os mesmos teores do ligante hidráulico;
- Como esperado, dentro do intervalo analisado, o maior teor de cimento confere maior resistência à compressão simples às misturas cimentadas.

Figura 60 – Gráfico Normal dos Efeitos Padronizados para RCS – Planejamento Fatorial A

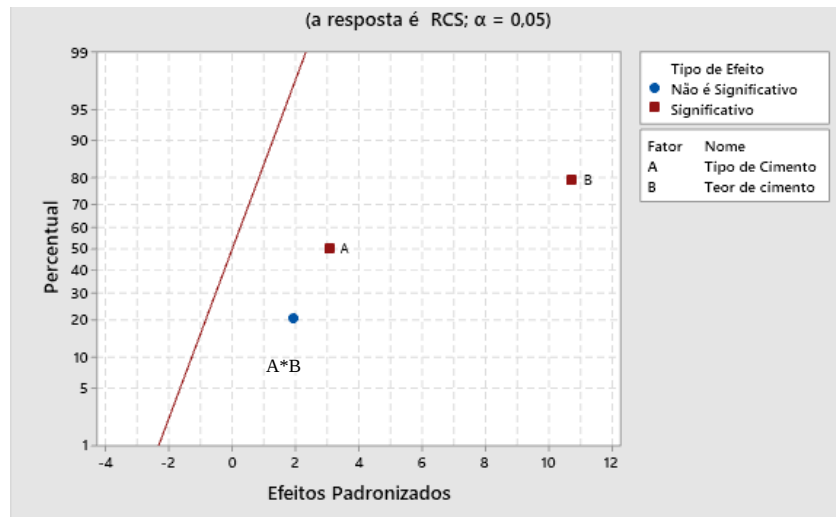


Figura 61 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para RCS – Planejamento Fatorial A

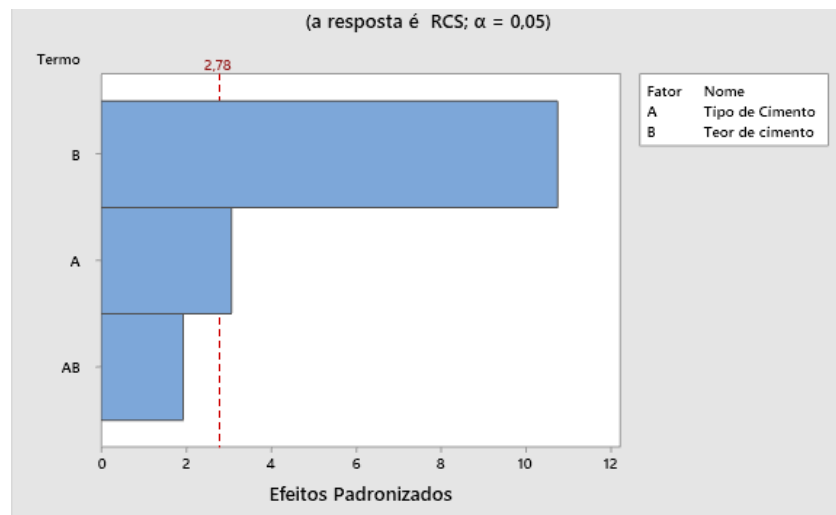
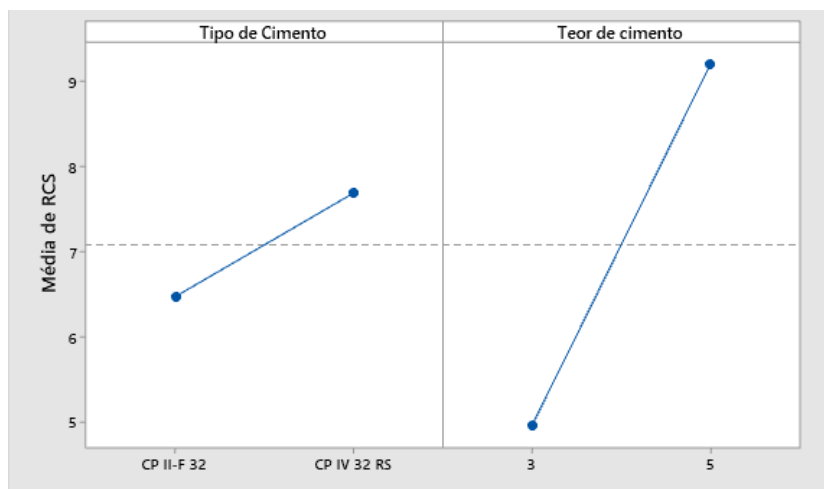


Figura 62 - Gráfico de efeitos principais para RCS para Planejamento Fatorial A



A influência do tipo de cimento na RCS da BGTC pode ser explicada pelo fato de cada cimento possuir uma curva específica de evolução da resistência ao longo do tempo, em decorrência das diferenças significativas na composição e, consequentemente, nas características físicas e químicas nos estágios iniciais de hidratação. Entretanto, com base na Tabela 11, era prevista uma superioridade das propriedades mecânicas das misturas com CP II-F-32 nas primeiras idades de hidratação do cimento, aos sete dias.

A Tabela 11 indica que o cimento CP II-F 32 confere maior resistência à compressão nas primeiras idades de hidratação do cimento, em comparação ao CP IV 32 RS. Todavia, aos 28 dias, percebem-se maiores resistência no cimento CP IV 32 RS. A partir dos resultados obtidos, constata-se que para as proporções de cimento, água e agregados utilizados na presente pesquisa, há uma antecipação da curva de evolução da resistência para o CP IV 32 RS.

Em se tratando da influência do teor de cimento na resistência da mistura cimentada, sabe-se que o cimento confere maior coesão, em decorrência da união pontual que o ligante promove entre os agregados graúdos, sendo esperada maiores resistências nas misturas com maior teor de cimento Portland.

No planejamento fatorial B, com misturas de BGTC utilizando o cimento tipo CP II F-32, é verificada a intensidade dos efeitos das variáveis: teor de cimento (3% e 5%), tipo de emulsão (RR-1C e RL-1C) e teor de emulsão (0,5%, 1,0% e 2,0%) na resistência à compressão simples da BGTC. Por meio do diagrama de Pareto, do gráfico de efeitos principais e do gráfico de interação entre os fatores (Figura 63, Figura 64 e Figura 65), verifica-se a significância dos efeitos e algumas observações são apresentadas:

- As três variáveis analisadas (teor de cimento, tipo de emulsão e teor de emulsão) possuem efeito significativo na RCS de misturas de BGTC;

- Para os percentuais ensaiados, maior teor de cimento está associado a um aumento da RCS;
- Para o mesmo teor do aditivo, a emulsão asfáltica de ruptura rápida (RR-1C) confere maior resistência à compressão simples em misturas de BGTC, quando comparada à emulsão asfáltica de ruptura lenta (RL-1C);
- Dentro do intervalo analisado, quanto maior o teor de emulsão asfáltica menor é a RCS da mistura cimentada;
- Dos efeitos combinados, apenas o efeito combinado do teor de cimento e teor de emulsão possui relevância no valor da RCS do material.

Figura 63 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para RCS – Planejamento Fatorial B

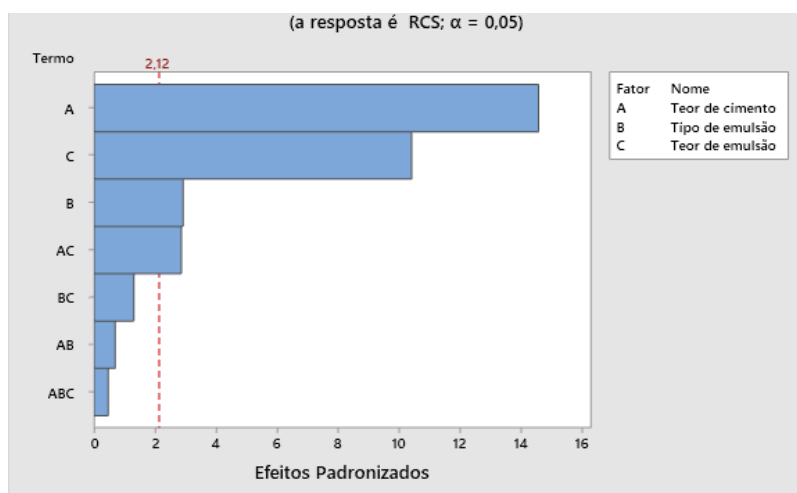


Figura 64 – Gráfico de efeitos principais para RCS – Planejamento Fatorial B

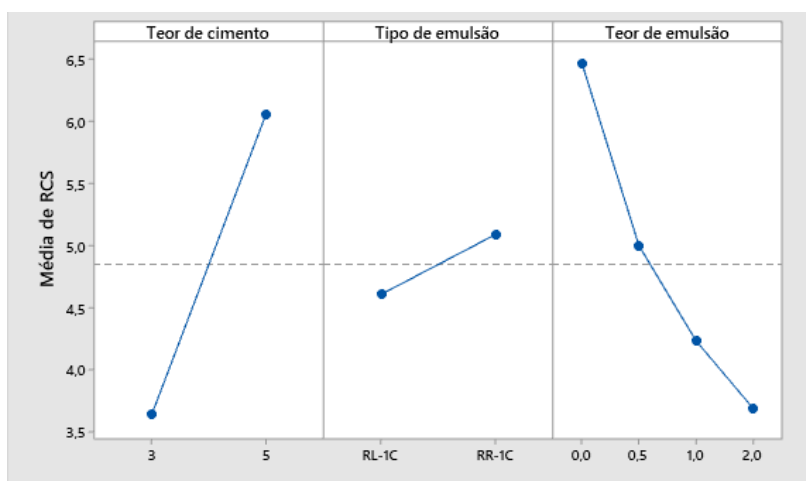
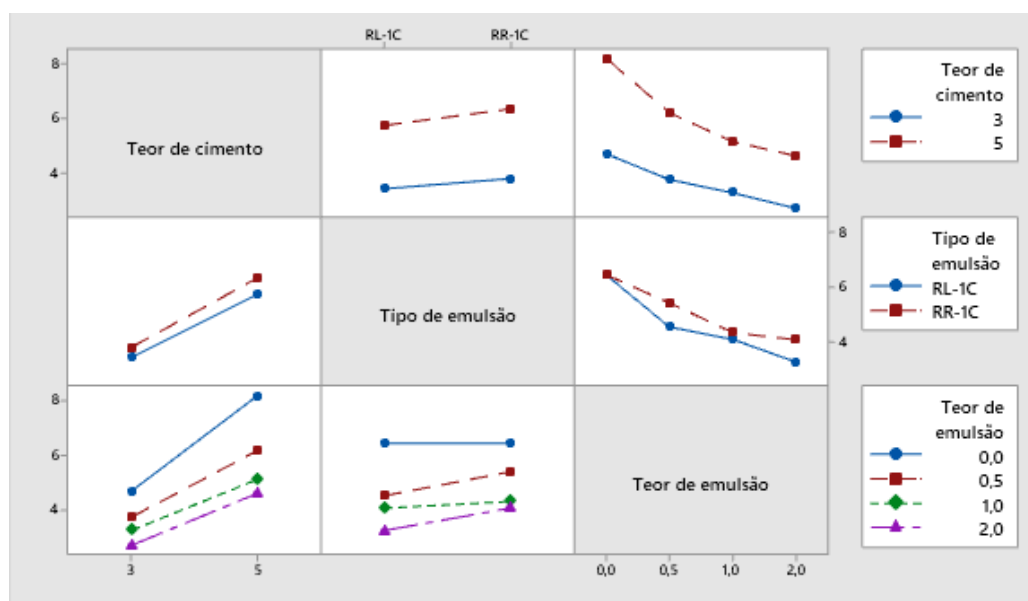


Figura 65 - Gráfico de interação entre fatores para RCS – Planejamento fatorial B



A redução da resistência à compressão simples com o aumento do teor de emulsão asfáltica de ruptura rápida concorda com as análises realizadas por Dareyni e Moghaddam (2019) em misturas de concreto compactado a rolo (CCR). De forma semelhante às observações dos resultados obtidos em misturas de CCR, tendo em vista a sequência de utilização dos insumos, as seguintes hipóteses podem ser levantadas para justificar a redução da RCS com o aumento do teor de emulsão asfáltica: as partículas de cimento são recobertas pelo asfalto e, portanto, não são completamente hidratadas; e/ou a superfície coberta dos agregados torna sua adesão à pasta de cimento mais fraca e, conseqüentemente, o concreto rompe sob menores tensões.

b) Resistência à tração por compressão diametral (RTCD)

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral, aos 7 dias de cura, são mostrados na Tabela 33.

Tabela 33 - RTCD de amostras de BGTC aos 7 dias de cura

Planejamento fatorial	Tipo de cimento	Teor de cimento	Aditivo	RTCD (MPa)			Média
A	CP II-F 32	3 %	-	0,47	0,42	0,43	0,44
	CP II-F 32	5 %	-	1,00	1,06	0,97	1,01
	CP IV 32 RS	3%	-	0,65	0,58	0,59	0,61
	CP IV 32 RS	5%	-	1,17	1,19	1,30	1,22
B	CP II-F 32	3 %	0,5% RR-1C	0,50	0,51	0,44	0,48
	CP II-F 32	3 %	1,0% RR-1C	0,31	0,38	0,00	0,34

Planejamento fatorial	Tipo de cimento	Teor de cimento	Aditivo	RTCD (MPa)			Média
	CP II-F 32	3 %	2,0% RR-1C	0,28	0,24	0,37	0,29
	CP II-F 32	5 %	0,5% RR-1C	0,00	0,87	0,83	0,85
	CP II-F 32	5 %	1,0% RR-1C	0,84	0,83	0,71	0,79
	CP II-F 32	5 %	2,0% RR-1C	0,64	0,53	0,66	0,61
	CP II-F 32	3 %	0,5% RL-1C	0,42	0,29	0,40	0,37
	CP II-F 32	3 %	1,0% RL-1C	0,25	0,33	0,27	0,28
	CP II-F 32	3 %	2,0% RL-1C	0,25	0,28	0,22	0,25
	CP II-F 32	5 %	0,5% RL-1C	0,59	0,73	0,71	0,68
	CP II-F 32	5 %	1,0% RL-1C	0,69	0,46	0,58	0,57
	CP II-F 32	5 %	2,0% RL-1C	0,48	0,42	0,44	0,45

Com o planejamento fatorial A, foi possível avaliar o efeito do tipo de cimento e teor de cimento na resistência à tração por compressão diametral em misturas de BGTC. A partir do gráfico de Pareto (Figura 66) e gráficos dos efeitos principais (Figura 67), algumas observações podem ser destacadas:

- O teor de cimento e o tipo de cimento exercem efeito significativo na resistência à tração por compressão diametral das misturas cimentadas;
- Assim como na RCS, o teor de cimento é a variável com maior efeito no aumento da resistência à tração por compressão diametral;
- Dentro do intervalo avaliado, maiores teores de cimento estão relacionados com maior RTCD;
- Para o mesmo teor de cimento, a utilização do cimento tipo CP IV 32 RS confere maior resistência às misturas em comparação com o uso do cimento tipo CP II-F 32;
- O efeito combinado do teor de cimento e tipo de cimento não é relevante para o parâmetro avaliado.

Figura 66 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para RTCD – Planejamento A

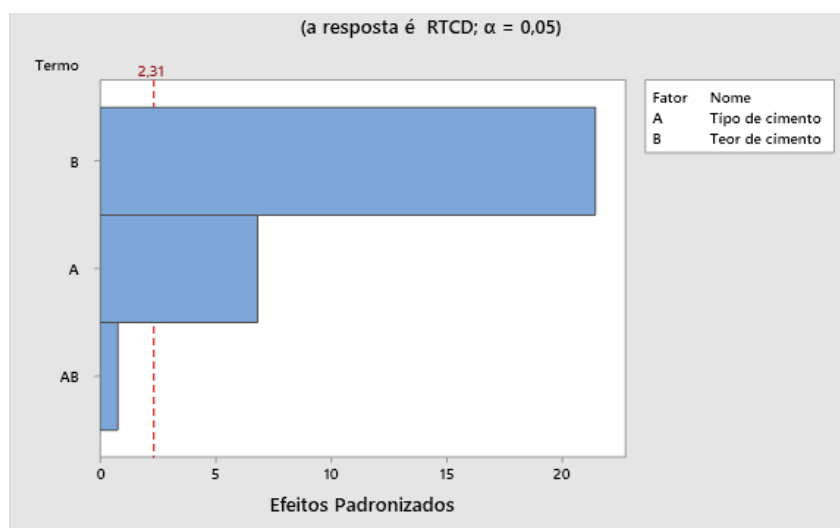
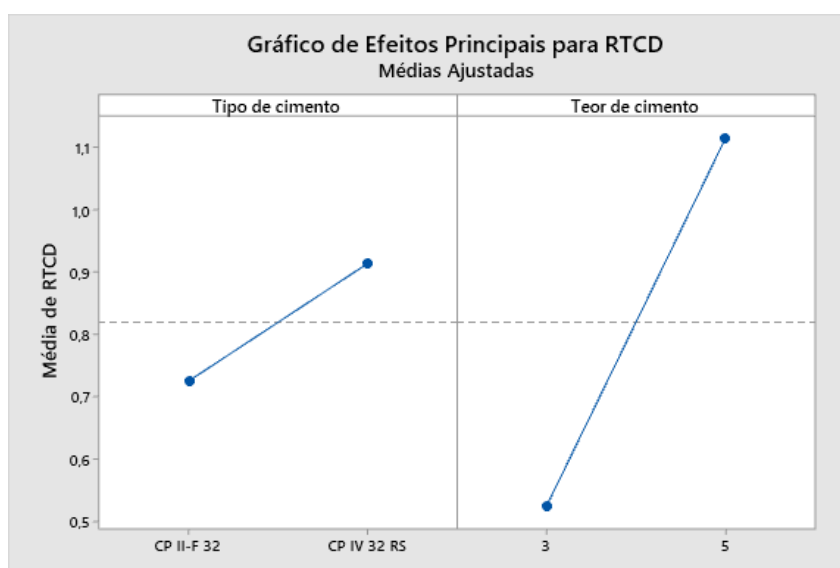


Figura 67 - Gráfico de efeitos principais para RTCD – Planejamento A



A investigação do efeito do teor de cimento, tipo de emulsão e teor de emulsão na resistência à tração por compressão diametral em misturas de BGTC com cimento tipo CP II-F 32, planejamento fatorial B, demonstrou a relevância do efeito das três variáveis analisadas, levando às seguintes conclusões, conforme gráficos apresentados na Figura 68, Figura 69 e Figura 70:

- Para os intervalos ensaiados, o teor de cimento se apresentou como variável de maior relevância dentre as observadas;
- O efeito combinado do teor de cimento e teor de emulsão, tipo de emulsão e teor de emulsão, além do efeito do teor de cimento e tipo de emulsão apresentam alguma relevância no parâmetro mecânico avaliado;

- Dentro do intervalo observado, de forma semelhante aos resultados de RCS, um maior teor de emulsão está relacionado a menores RTCD, podendo chegar a uma redução de mais de 50%;
- Para um mesmo teor, a emulsão de ruptura rápida (RR-1C) confere maior resistência à tração por compressão diametral quando comparada a emulsão de ruptura lenta (RL-1C);
- O efeito combinado das três variáveis investigadas não apresenta significância na RTCD da BGTC.

Figura 68 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para RTCD - Planejamento B

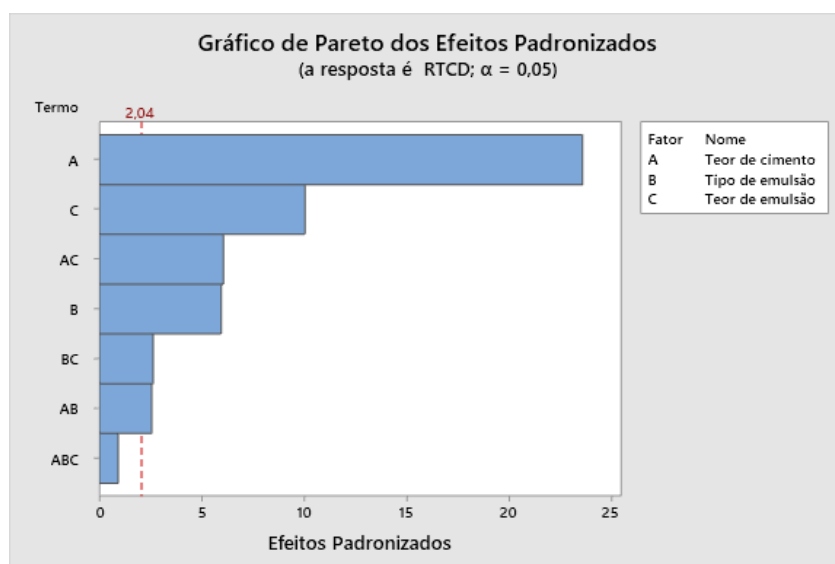


Figura 69 - Gráfico de efeitos principais para RTCD - Planejamento B

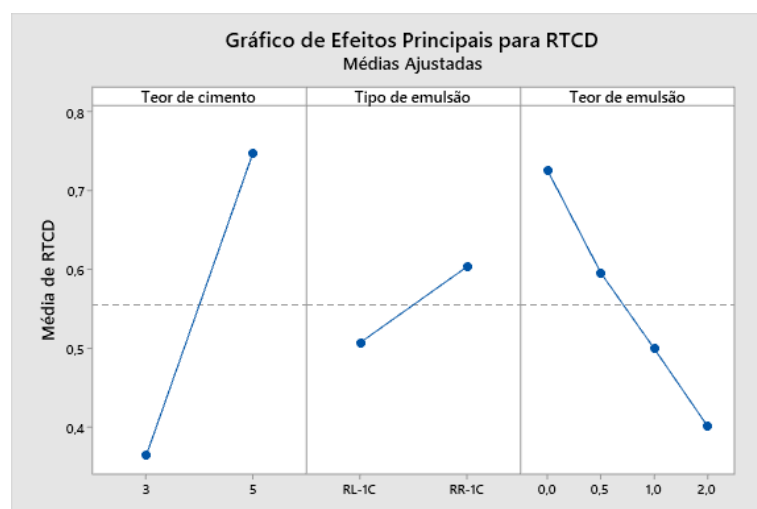
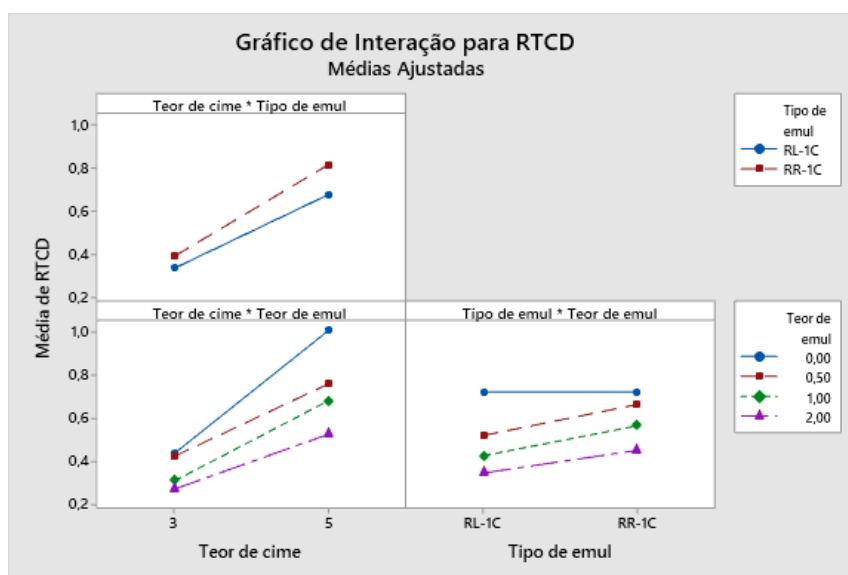


Figura 70- Gráfico de interação para RTCD - Planejamento B



4.2 Seleção das Misturas

A partir dos resultados obtidos com os ensaios da Primeira Etapa, constatou-se que, para o mesmo teor de cimento, o uso do cimento tipo CP IV 32 RS confere, aos 7 dias de cura, maior RCS e RTCD em misturas de BGTC, quando comparado ao uso do cimento tipo CP II-F 32 nas misturas cimentadas. Desse modo, as misturas com 3% de CP IV 32 RS e 5% de CP IV 32 RS, sem aditivo, serão investigadas por meio dos ensaios previstos para Segunda Etapa.

No que diz respeito ao uso de emulsão asfáltica como aditivo, verifica-se a influência do material na RCS e RTCD das misturas cimentadas, sendo o acréscimo do aditivo responsável pela redução das resistências. Apesar de tal constatação, uma vez que a média dos resultados da RTCD da mistura contendo 3% de CP II-F 32 com 0,5% de RR-1C foi superior à média dos resultados das misturas com 3% de CP II F 32 e sem aditivo (mistura de referência), optou-se por realizar mais ensaios com as misturas contendo 3% de CP II-F 32 e 0,5% de RR-1C, a fim de inferir maiores informações sobre a ação da emulsão asfáltica em misturas de BGTC.

Portanto, a segunda etapa do planejamento experimental contará com os dois tratamentos de referência e mais três tratamentos selecionados a partir dos resultados de RCS e RTCD aos 7 dias de cura, conforme Tabela 34.

Tabela 34 – Tratamentos selecionados para Terceira Etapa

Tratamento	Tipo de Cimento	Teor de cimento	Aditivo	RCS (MPa)	RTCD (MPa)
1	CP II-F 32	3%	-	4,73	0,44
2	CP II-F 32	5%	-	8,21	1,01
3	CP IV 32 RS	3%	-	5,18	0,61
4	CP IV 32 RS	5%	-	10,19	1,22
6	CP II-F 32	3%	0,5% RR-1C	4,30	0,48

4.3 Segunda Etapa: Estudo das Misturas de Melhor Desempenho

Na segunda etapa foram avaliados o índice de vazios e absorção da BGTC para cada tratamento da Tabela 34. Apesar da pesquisa ser voltada para a avaliação da porosidade das misturas de BGTC, não seria racional ignorar os parâmetros mecânicos associados a variação da absorção e índice de vazios das misturas, tendo em vista seu uso em camadas do pavimento. Desse modo, de forma a complementar as conclusões da pesquisa, foram realizados os respectivos ensaios de RCS, RTCD e MR aos 28 dias de cura e RTF, MF, E, E* aos 7 e 28 dias de cura.

Foram confeccionados 10 corpos de prova para ensaios de RCS, 15 para ensaios de RTCD, 30 para ensaios de RTF e MF, 20 para ensaios de E e E*, sendo 10 desses utilizados também no ensaio de MR, além da confecção de 30 corpos de prova para avaliação do índice de vazios e absorção. Os resultados e discussões de cada parâmetro são apresentados a seguir.

4.3.1 Avaliação da porosidade

a) NBR 9778 (ABNT, 2005)

Seguindo os procedimentos da NBR 9778 (ABNT, 2005), foi possível determinar a absorção e índice de vazios dos tratamentos investigados, conforme apresentado na Tabela 35, Tabela 36, Figura 71 e Figura 72.

Tabela 35 – Absorção de BGTC aos 7 e 28 dias

Tipo de Cimento	Teor de cimento	Aditivo	Cura (dias)	Absorção (%)	Absorção média (%)
CP II-F 32	3%	-	7	5,29	5,20
				5,17	
				5,14	
			28	5,03	4,92
				4,65	
				5,09	

Tipo de Cimento	Teor de cimento	Aditivo	Cura (dias)	Absorção (%)	Absorção média (%)
CP II-F 32	5%		7	4,69	4,60
				4,43	
				4,67	
			28	4,55	4,54
				4,61	
				4,45	
CP IV 32 RS	3%		7	5,01	5,04
				5,03	
				5,08	
			28	4,50	4,63
				4,75	
				4,63	
CP IV 32 RS	5%		7	4,33	4,43
				4,56	
				4,39	
			28	4,10	4,02
				3,91	
				4,06	
CP II-F 32	3%	0,5% RR-1C	7	4,86	4,85
				4,80	
				4,89	
			28	4,52	4,50
				4,52	
				4,46	

Tabela 36 – Índice de vazios de BGTC aos 7 e 28 dias

Tipo de Cimento	Teor de cimento	Aditivo	Cura (dias)	Índice de vazios (%)	Índice de vazios (%)
CP II-F 32	3%	-	7	12,17	12,04
				11,99	
				11,97	
			28	11,92	11,66
				11,03	
				12,05	
CP II-F 32	5%		7	11,00	10,81
				10,47	
				10,96	
			28	10,85	10,82
				10,98	
				10,64	
CP IV 32 RS	3%		7	11,63	11,70
				11,66	
				11,80	
			28	10,79	11,03
				11,27	
				11,01	

Tipo de Cimento	Teor de cimento	Aditivo	Cura (dias)	Índice de vazios (%)	Índice de vazios (%)
CP IV 32 RS	5%		7	10,15	10,34
				10,61	
				10,25	
			28	9,87	9,71
				9,49	
				9,76	
CP II-F 32	3%	0,5% RR-1C	7	11,25	11,25
				11,14	
				11,36	
			28	10,75	10,69
				10,73	
				10,59	

Figura 71 – Absorção de BGTC aos 7 e 28 dias de cura

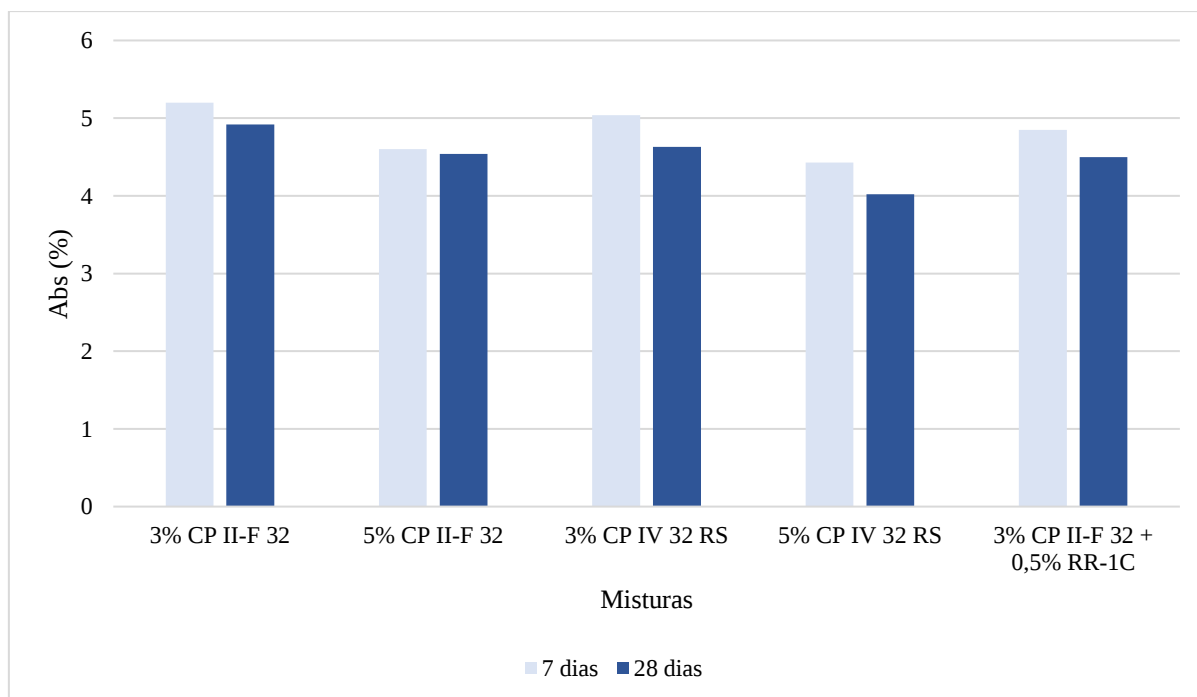
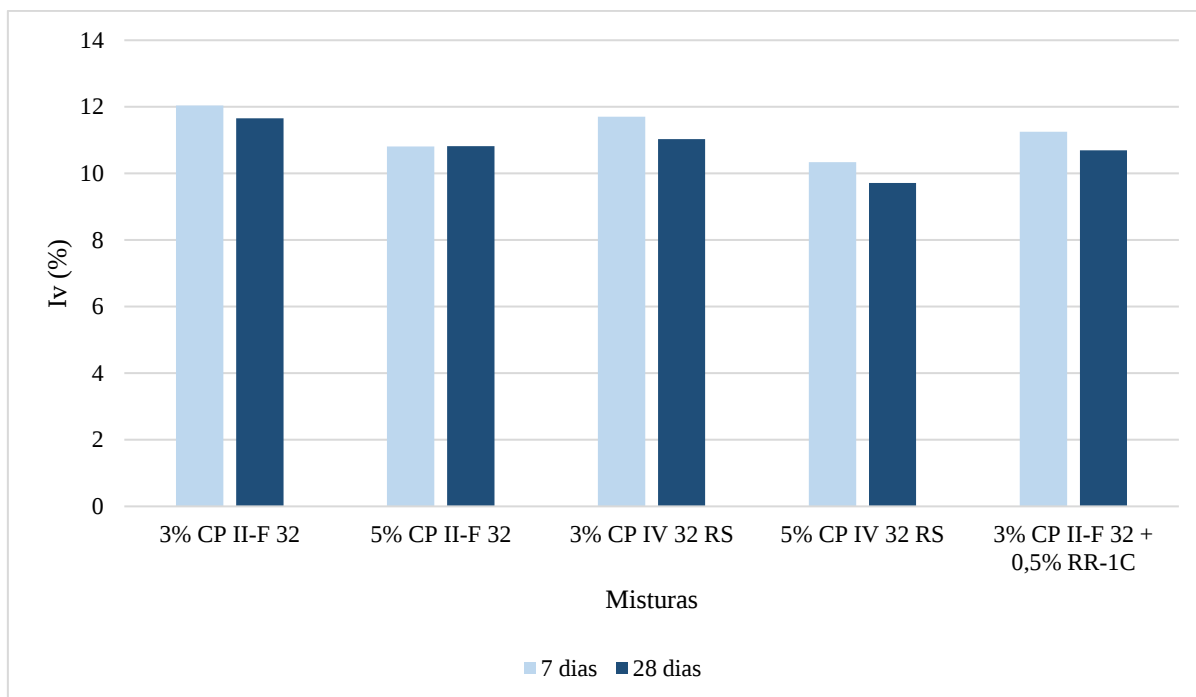


Figura 72 – Índice de vazios de BGTC aos 7 e 28 dias de cura



Com base nos resultados obtidos, percebe-se:

- Para o mesmo teor de cimento e tempo de cura, como esperado, as misturas com cimento tipo CP IV 32 RS apresentam menor absorção e índice de vazios quando comparadas às misturas com CP II-F 32 RS. Os materiais pozolânicos reagem com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) da hidratação do cimento, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional. Quando comparados a cimento sem uso de materiais pozolânicos ou com menor proporção do material, os cimentos Portland pozolânicos (CP IV) conferem às misturas cimentadas redução da porosidade e permeabilidade;
- Para o mesmo tipo de cimento e tempo de cura, o acréscimo de cimento Portland confere menor absorção e índice de vazios às misturas cimentadas;
- Considerando o mesmo tipo e teor de cimento, observou-se que, de modo geral, um maior tempo de cura levou a menores absorções e índice de vazios. Para as misturas com 5% de CP II-F 32 o aumento do tempo de cura resultou em uma discreta variação da absorção e índice de vazios. Nesse sentido, nota-se que para as misturas com cimento tipo CP II-F 32, para maiores teor de cimento, o tempo de cura não parece ser um fator relevante na variação dos indicadores de porosidade;
- A utilização 0,5% de emulsão asfáltica RR-1C nas misturas com 3% de cimento tipo CP II-F 32 levou a uma redução da absorção e índice de vazios em torno de 6% aos 7 dias de cura e de aproximadamente 8% aos 28 dias de cura. Ao comparar o efeito da

utilização do cimento tipo CP IV 32 RS e o efeito da emulsão asfáltica na redução da absorção e índice de vazios das misturas com 3% de cimento, percebe-se que a redução promovida pela utilização de emulsão ultrapassa em 3% a redução decorrente do uso do cimento tipo CP IV 32 RS. A redução da absorção e índice de vazios resultante do uso de emulsão asfáltica como aditivo pode estar relacionada ao efeito positivo da emulsão na compactação da BGTC, sendo necessária menor energia de compactação para atingir uma mesma massa específica uma mistura sem o uso de emulsão.

b) Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

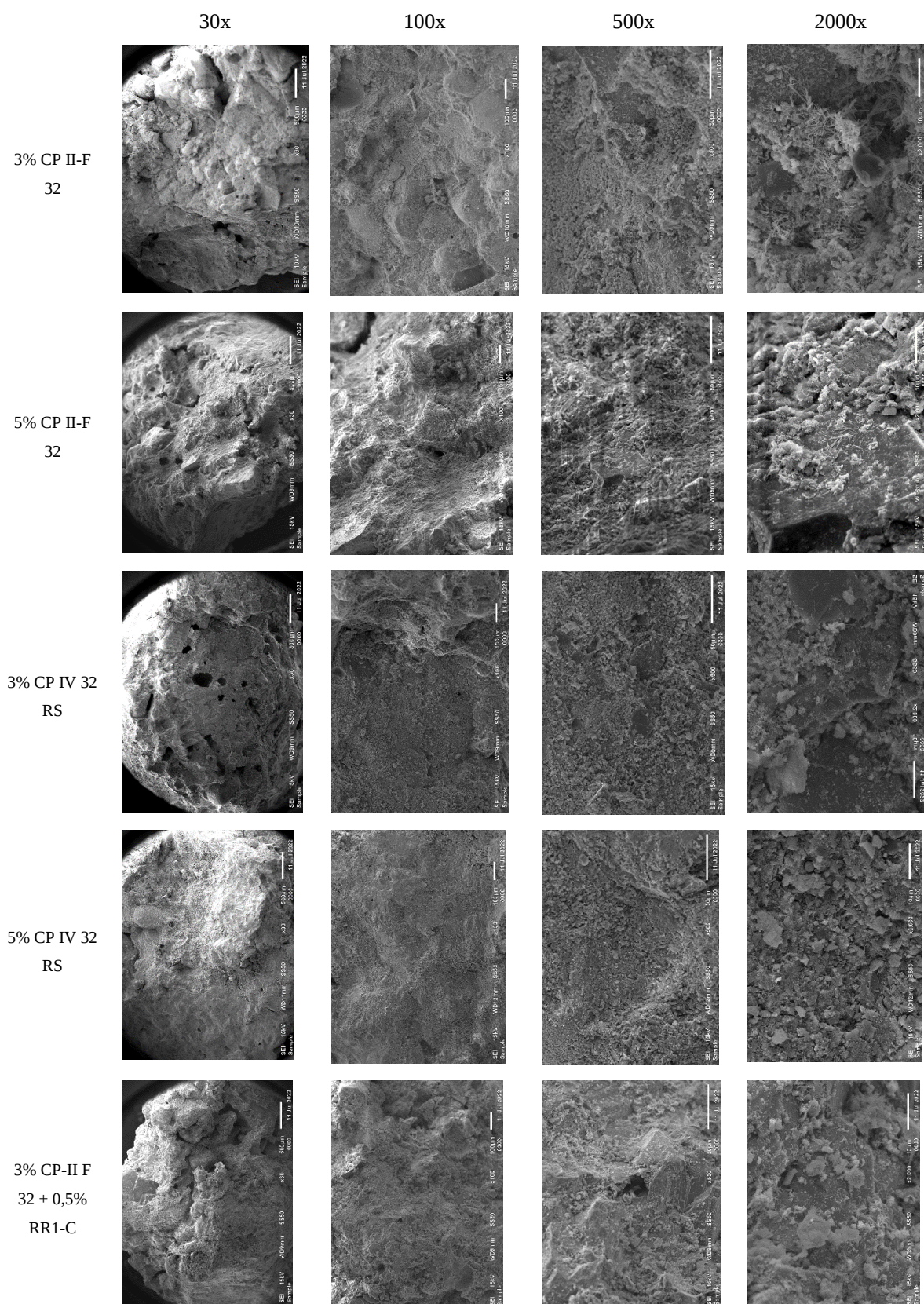
Foram obtidas imagens de microscopia eletrônica de varredura com aumento de 30 vezes, 100 vezes, 500 vezes e 2.000 vezes de três amostras para cada um dos 5 tratamentos investigados (Tabela 37), após 28 dias de cura.

Tabela 37 – Tratamentos investigados por meio do MEV

Tratamento	Número de replicas	Aumento	Total de imagens
3% de CP II-F 32	3	30, 100, 500, 2000	12
5% de CP II-F 32	3	30, 100, 500, 2000	12
3% de CP IV 32 RS	3	30, 100, 500, 2000	12
5% de CP IV 32 RS	3	30, 100, 500, 2000	12
3% de CP II-F 32 + 0,50% de RR-1C	3	30, 100, 500, 2000	12

Na Figura 73 são observadas as imagens de um corpo de prova, escolhido de forma aleatória, de cada tratamento investigado. No Apêndice A se encontram as demais imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura.

Figura 73 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura

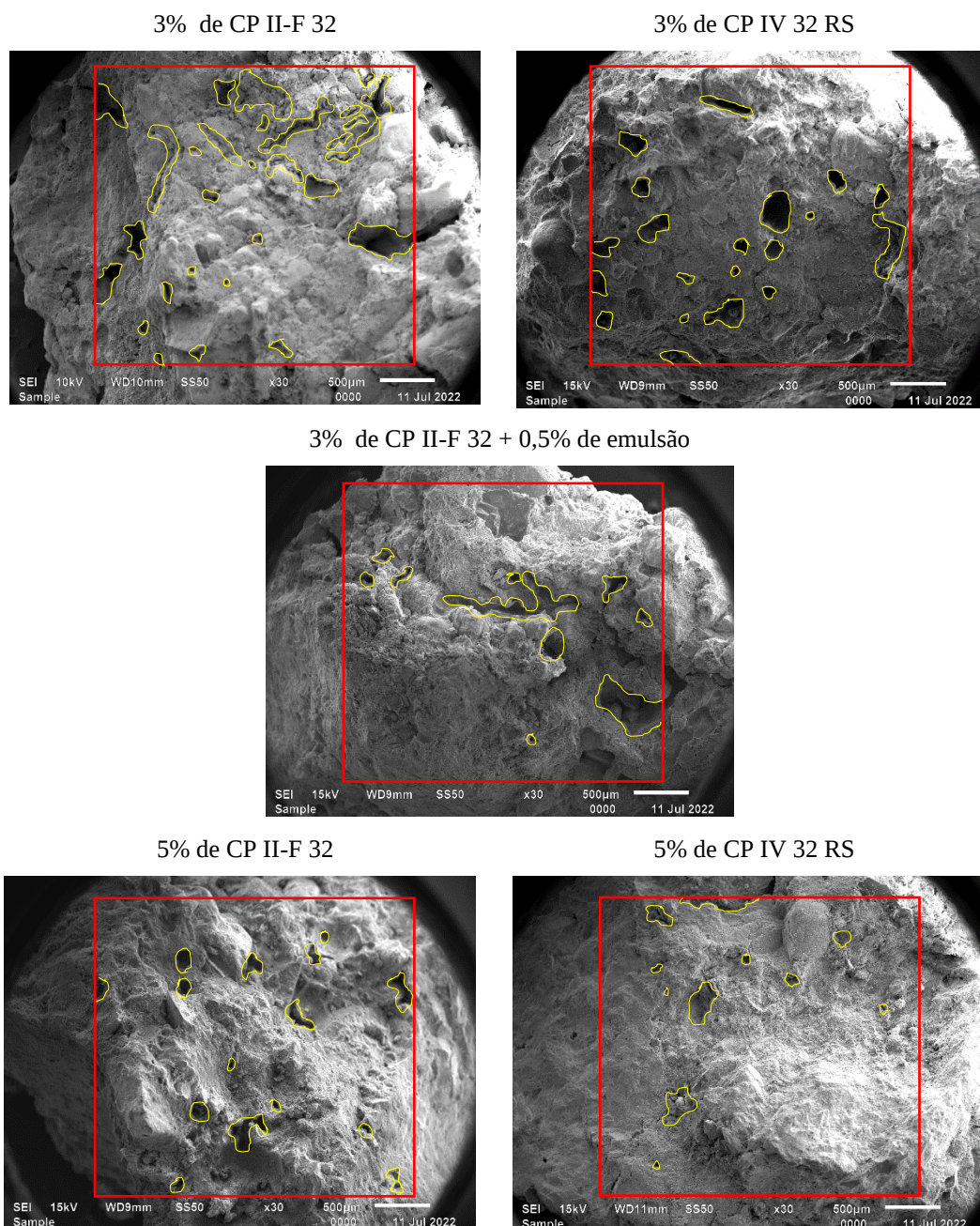


Apesar da reconhecida heterogeneidade das misturas de BGTC, é possível constatar comportamento semelhante entre amostras de mesmo tratamento. Através das imagens obtidas por MEV com aumento de 2000x, percebe-se que nas misturas constituídas por 3% de cimento o agregado miúdo se encontra mais visível, enquanto nas amostras com 5% de cimento se observa um maior recobrimento desses agregados.

Ao comparar uma imagem com ampliação de 30x de uma amostra do tratamento com maior índice de vazios (3% de CP II-32) e uma com menor índice de vazios (5% de CP IV 32 RS), é perceptível a maior quantidade de poros no tratamento com 3% de CP II-F 32. A Figura 74 apresenta as imagens de MEV ampliadas em 30x de uma amostra para cada tratamento avaliado na pesquisa, evidenciando as cavidades identificadas.

Os resultados do ensaio de índice de vazios indicam que, aos 28 dias, o tratamento com maior índice é o composto por 3% de CP II-F 32, seguido da mistura com 3% de CP IV 32 RS, 5% de CP II-F 32, 3% de CP II-F 32 e 0,5% de emulsão asfáltica tipo RR-1C, sendo a mistura com menor índice de vazios a composta por 5% de CP IV 32 RS. De forma qualitativa, é possível observar uma certa concordância entre os resultados de índice de vazios e os poros identificados nas imagens com ampliação de 30x.

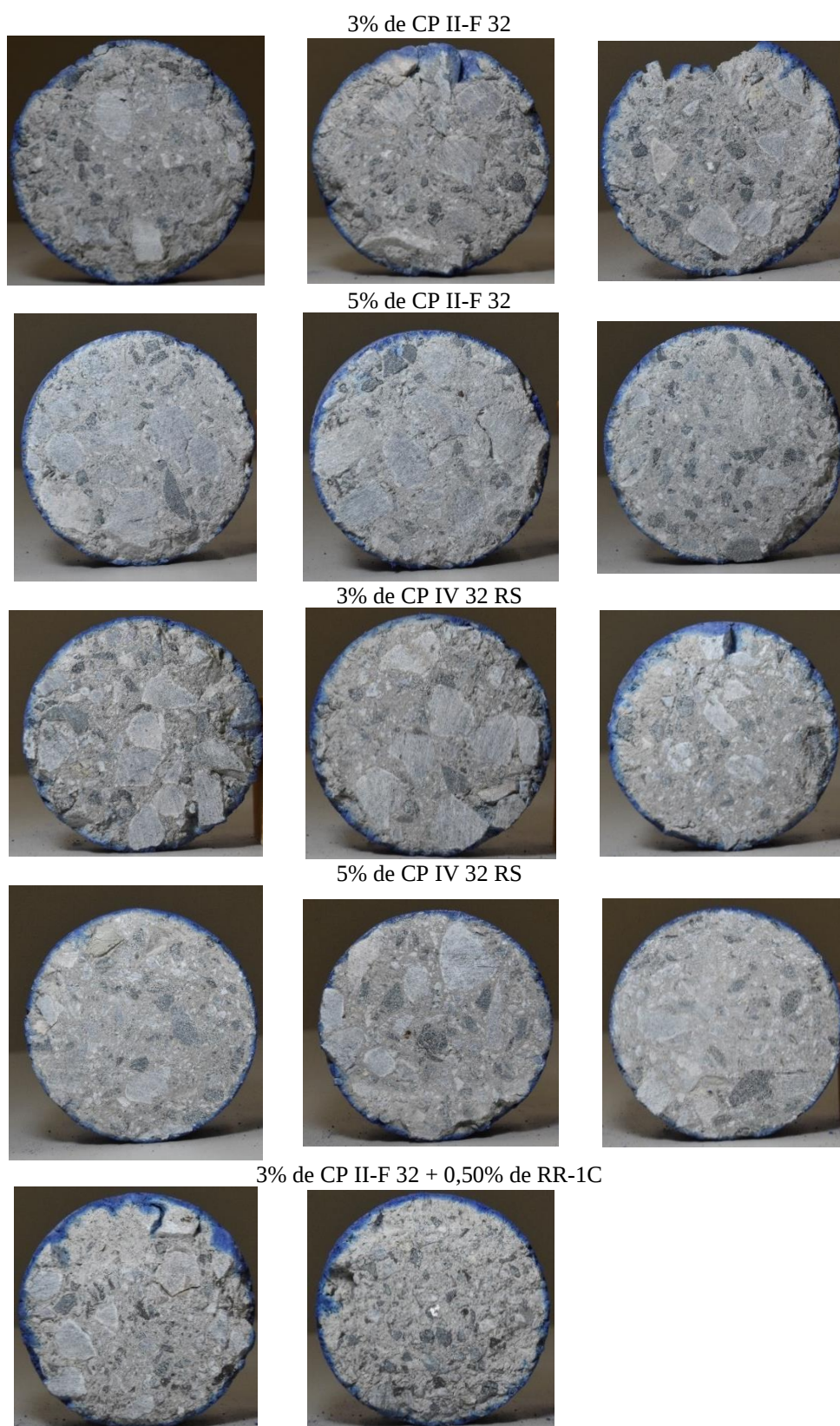
Figura 74 – Imagens MEV – 30x



c) Imagens da macroestrutura

As imagens obtidas com a câmera fotográfica de resolução igual a 24 Megapixels são apresentadas na Figura 75. Percebe-se que o pigmento utilizado não conseguiu penetrar nos poros dos corpos de prova, ficando a pigmentação restrita à área superficial, sendo observada uma pequena absorção nas bordas das amostras. Diante dessa constatação, existe a possibilidade dos poros da BGTC não terem espessura suficiente para permitir a penetração da solução aquosa do azul de metileno, ficando restrita às cavidades não capilares.

Figura 75 – Fotografias dos corpos de prova pigmentados



Apesar da impossibilidade de uma análise quantitativa, as imagens da macroestrutura permitem identificar alguns aspectos em relação ao arranjo estrutural das misturas de BGTC, quais sejam:

- A mistura que obteve o maior índice de vazios, mistura com 3% de CP II-F 32, apresentou um aspecto mais rugoso na superfície de corte. Durante o processo de corte desses corpos de prova, foi observado maior desprendimento de material, demonstrando ligações mais fracas na estrutura;
- Os corpos de prova correspondentes aos tratamentos com 5% de CP IV 32 RS, que obtiveram os menores índices de vazios, apresentaram uma superfície de textura mais lisa e pouco desprendimento de material durante o corte da amostra, o que pode indicar ligações mais fortes entre os componentes da mistura;
- Para o mesmo teor de cimento, as misturas com CP IV 32 RS apresentam uma superfície de corte com aspecto textural mais liso;
- Para o mesmo tipo de cimento as misturas com 5% de cimento apresentam superfície de corte com aspecto mais liso;
- Observa-se que os corpos de prova das misturas com 3% de cimento conferem maiores cavidades nas suas superfícies, perceptíveis por maiores áreas pigmentadas com azul de metileno;
- As áreas pigmentadas nos corpos de prova das misturas com 3% de cimento, embora não atinjam seu núcleo central, visivelmente são maiores que o dobro das observadas em misturas com 5% de cimento.

4.3.2 Avaliação mecânica das misturas

a) Resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração por compressão diametral (RTCD) e resistência à tração na flexão (RTF)

A resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão, aos 7 e 28 dias de cura, para as misturas estudadas são mostradas na Tabela 38, Tabela 39 e Tabela 40, respectivamente, e os gráficos obtidos na Figura 76, na Figura 77e na Figura 78.

Tabela 38 – Resistência à compressão simples de BGTC aos 7 e 28 dias de cura

Tipo de Cimento	Teor de cimento	Aditivo	Cura (dias)	RCS (MPa)	RCS média (MPa)
CP II-F 32	3%	-	7	4,73	4,73
				4,73	
			28	4,64	4,63
				4,62	
CP II-F 32	5%		7	7,91	8,21
				8,52	
			28	7,60	8,35
				9,11	
CP IV 32 RS	3%		7	5,10	5,18
				5,26	
			28	7,55	7,92
				8,28	
CP IV 32 RS	5%		7	10,92	10,19
				9,47	
			28	12,81	13,22
				13,63	
CP II-F 32	3%	0,5% RR-1C	7	4,29	4,30
				4,32	
			28	4,87	5,22
				5,58	

Tabela 39 – Resistência à tração por compressão diametral de BGTC aos 7 e 28 dias de cura

Tipo de Cimento	Teor de cimento	Aditivo	Cura (dias)	RTCD (MPa)	RTCD média (MPa)
CP II-F 32	3%	-	7	0,47	0,44
				0,42	
				0,43	
			28	0,69	0,68
				0,65	
				0,70	
CP II-F 32	5%		7	1,00	1,01
				1,06	
				0,97	
			28	1,44	1,39
				1,43	
				1,32	
CP IV 32 RS	3%		7	0,65	0,61
				0,58	
				0,59	
			28	0,96	0,96
				1,03	
				0,88	
CP IV 32 RS	5%		7	1,17	1,22
				1,19	
				1,30	
			28	2,10	2,08
				1,91	
				2,23	

Tipo de Cimento	Teor de cimento	Aditivo	Cura (dias)	RTCD (MPa)	RTCD média (MPa)
CP II-F 32	3%	0,5% RR-1C	7	0,50	0,48
				0,51	
				0,44	
			28	0,81	0,74
				0,70	
				0,73	

Tabela 40 – Resistência à tração na flexão de BGTC aos 7 e 28 dias

Tipo de Cimento	Teor de cimento	Aditivo	Cura (dias)	RTF (MPa)	RTF média (MPa)
CP II-F 32	3%	-	7	0,33	0,33
				0,34	
				0,32	
			28	0,78	0,77
				0,70	
				0,83	
CP II-F 32	5%		7	0,98	0,99
				0,97	
				1,03	
			28	1,47	1,51
				1,59	
				1,48	
CP IV 32 RS	3%		7	0,46	0,52
				0,48	
				0,61	
			28	1,07	1,13
				1,09	
				1,23	
CP IV 32 RS	5%		7	1,47	1,47
				1,28	
				1,67	
			28	2,29	2,31
				2,15	
				2,49	
CP II-F 32	3%	0,5% RR-1C	7	0,48	0,42
				0,37	
				0,40	
			28	0,92	0,86
				0,78	
				0,89	

Figura 76 – Resistência à compressão simples de BGTC aos 7 e 28 dias de cura

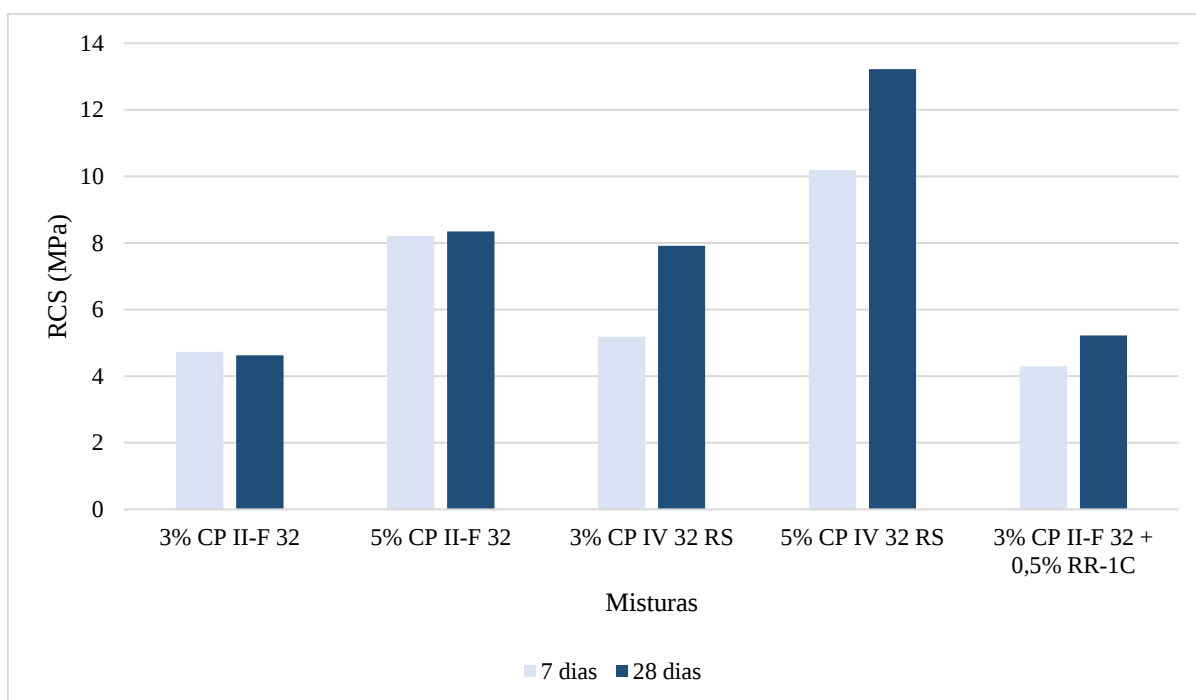


Figura 77 – Resistência à tração por compressão diametral de BGTC aos 7 e 28 dias de cura

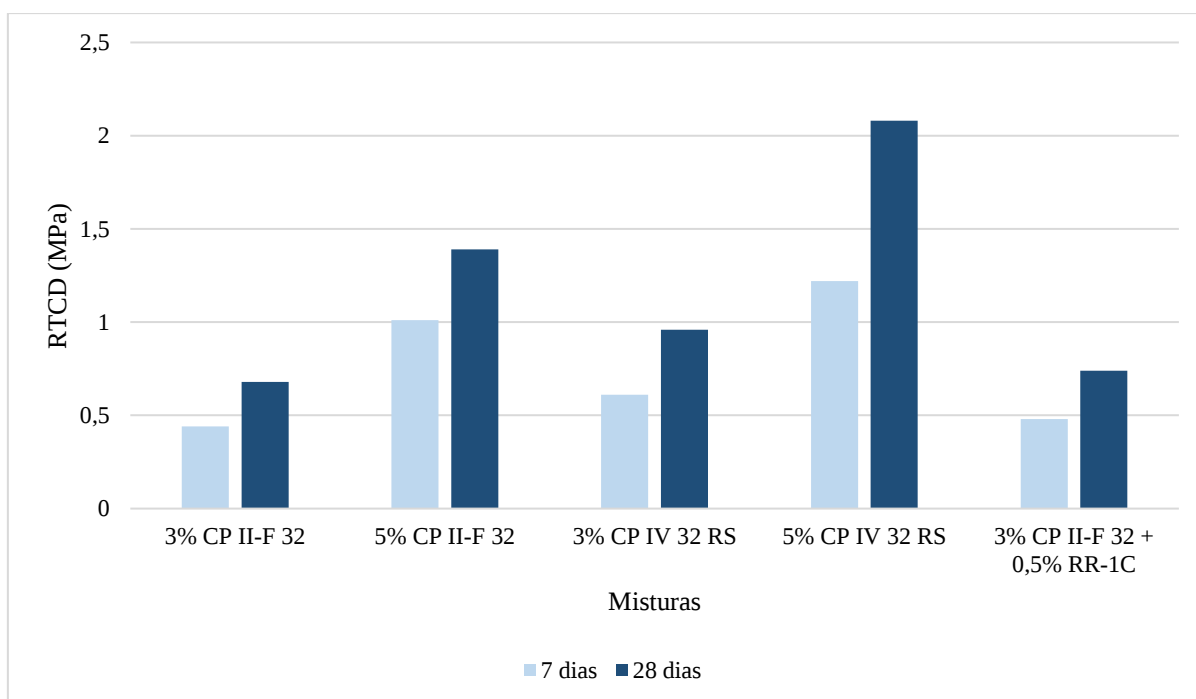
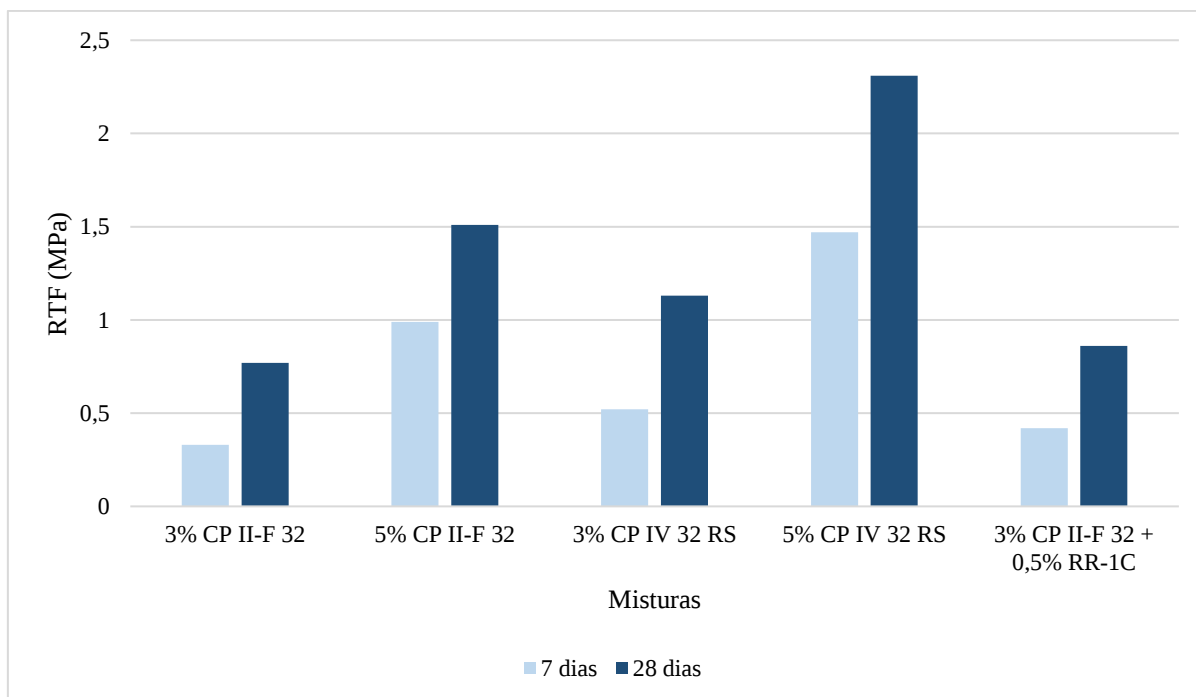


Figura 78 – Resistência à tração na flexão de BGTC aos 7 e 28 dias de cura



Com base nos resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- Para o mesmo teor de cimento e tempo de cura, as misturas com cimento tipo CP IV 32 RS apresentam maiores RCS, RTCD e RTF quando comparadas às misturas com CP II-F 32 RS. Em relação a cimentos sem uso de materiais pozolânicos ou com menor proporção do material, os cimentos Portland pozolânicos (CP IV) conferem ao concreto, argamassa e pastas um aumento da resistência à compressão e à flexão, em idades avançadas, apesar de uma diminuição nas primeiras idades. Constando-se, portanto, uma antecipação da curva de evolução da resistência para o CP IV 32 RS;
- Como esperado, para o mesmo tipo de cimento e tempo de cura, o acréscimo de cimento Portland confere maiores resistências. No que diz respeito à RTF, para o mesmo tipo de cimento e tempo de cura igual a 7 dias, o acréscimo de cimento Portland na mistura, de 3% para 5%, resulta em um aumento aproximado da RTF de 3 vezes. Para tempo de cura igual a 28 dias esse aumento é em torno de 2 vezes;
- Além do tipo e teor de cimento apresentarem influência na RCS, RTCD e RTF de misturas de BGTC (como observado nos resultados de RCS e RTCD da primeira etapa), o tempo de cura é uma variável importante nesses parâmetros mecânicos das misturas. As reações de hidratação do cimento, que conferem rigidez às misturas cimentadas, iniciam-se após o contato da água com cimento e seguem por dias, a depender da composição do cimento e disponibilidade de água na matriz. Destaca-se o

comportamento das misturas com CP II-F 32, sendo observado um aumento discreto da RCS com o aumento do tempo de cura para as misturas com 5% de cimento e um pequeno decréscimo da resistência à compressão simples para as misturas com 3% de cimento, com o acréscimo do tempo de cura de 7 dias para 28 dias. Apesar de ser um resultado fora do padrão obtido, resultado semelhante foi encontrado por Prado (2018) em misturas de BGTC com 3% de cimento tipo CP II-Z 32 RS, seguindo a granulometria indicada pelo SAPEM (2014) e moldadas na umidade ótima. Na pesquisa em questão, o aumento no tempo de cura, de 7 dias para 28 dias, levou a um decréscimo na RCS média de 4,58MPa para 4,42MPa;

- Apesar de haver uma redução de 0,43MPa na RCS da BGTC aos 7 dias de cura com a utilização da emulsão asfáltica RR-1C, constata-se que a utilização da mesma proporção do aditivo confere um aumento de 0,59MPa na RCS aos 28 dias da BGTC, indicando que para maiores tempos de cura o efeito da utilização de emulsão asfáltica como aditivo à BGTC passa a ser relevante no aumento da RCS;
- O efeito da utilização da emulsão asfáltica RR-1C na RTCD é superior aos 28 dias de cura em comparação ao efeito aos 7 dias. Aos 7 dias de cura a utilização de emulsão na mistura de BGTC com 3% de CP II-F 32 conferiu um aumento de 0,04MPa, enquanto aos 28 dias a utilização da mesma proporção da emulsão levou a um acréscimo de 0,06MPa;
- Tanto para um tempo de cura de 7 dias quanto para 28 dias de cura, a utilização de emulsão asfáltica como aditivo à BGTC levou a um aumento de 0,09MPa na RTF. O que representa um aumento de 27,27% aos 7 dias e 11,69% aos 28 dias de cura.

Segundo o manual de engenharia de pavimentos da África do Sul (SAPEM, 2014), as misturas de BGTC devem apresentar resistência média à compressão simples, aos 7 dias, entre 3,0 MPa e 6,0 MPa; para grau de compactação de 100% obtido na energia modificada. Verifica-se que aos 7 dias todas as misturas atendem ao valor mínimo da RCS exigida. Percebe-se, também, que as misturas com 5% de cimento ultrapassam o limite superior estabelecido no manual. A NBR 11803 (ABNT, 2013), norma que trata dos requisitos para materiais de base e sub-base de brita graduada tratada com cimento, apresenta como faixa para RCS aos 7 dias valores entre 3,5 MPa e 8,0 MPa.

Fazendo-se uma análise conjunta entre os resultados de RCS, RTCD e RTF e parâmetros de porosidade, percebe-se que, o fato das misturas com 3% de cimento tipo CP II-F 23 com 0,5% de emulsão apresentarem os menores valores de absorção e índice de vazios em comparação com as misturas com cimento tipo CP IV 32 RS, sem uso de aditivo e no mesmo

teor de cimento, não garantiu maiores valores de resistências às misturas com emulsão, o que demonstra que apesar de haver alguma relação entre a porosidade de propriedades mecânicas da BGTC, essa relação não é direta e é influenciada por outros fatores.

b) Módulo flexural (MF)

Os resultados dos ensaios para determinação do módulo flexural podem ser visualizados na Tabela 41.

Tabela 41 – Módulo Flexural de BGTC aos 7 e 28 dias

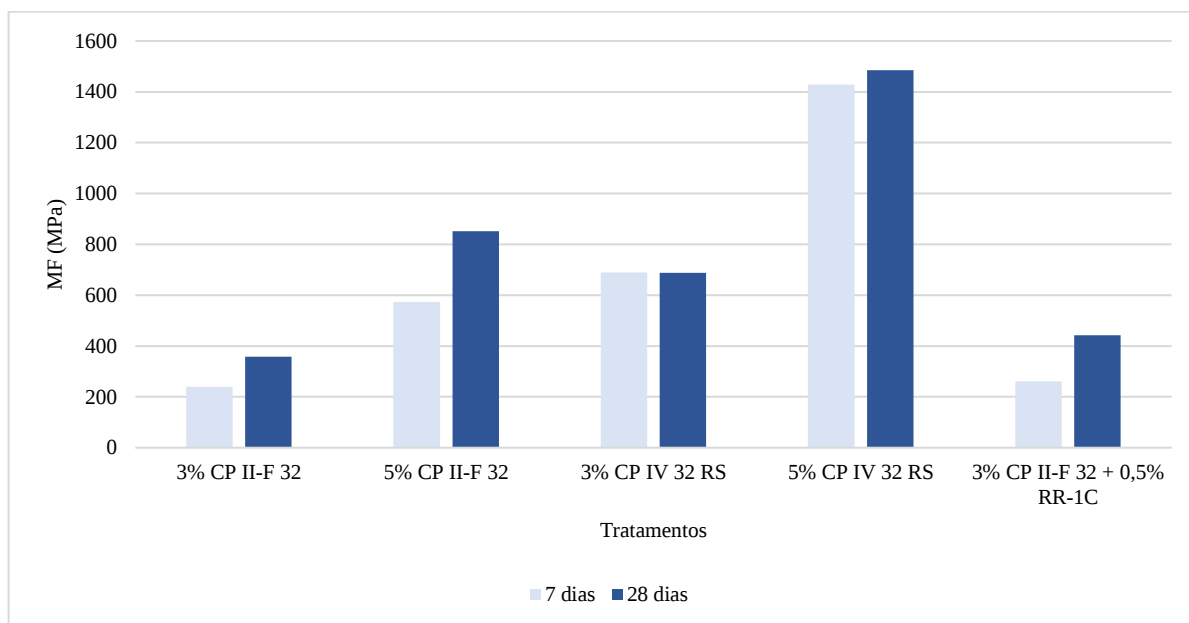
Tipo de Cimento	Teor de cimento	Aditivo	Cura (dias)	MF (MPa)	MF médio (MPa)
CP II-F 32	3%	-	7	239,65	239,65
			28	358,06	358,06
CP II-F 32	5%		7	592,34	573,93
				585,64	
			28	543,81	852,22
				720,12	
CP IV 32 RS	3%		7	792,46	688,62
				1044,08	
			28	660,96	687,66
				716,28	
CP IV 32 RS	5%		7	676,17	1428,66
				772,83	
			28	613,99	1485,18
				1443,64	
CP II-F 32	3%	0,5% RR-1C	7	1403,41	261,24
				1438,93	
			28	1107,93	442,91
				1862,43	
CP II-F 32	3%	0,5% RR-1C	7	243,27	261,24
				349,43	
			28	191,02	442,91
				568,88	
CP II-F 32	3%	0,5% RR-1C	7	316,93	442,91
			28		

Com base na Figura 79, algumas observações podem ser apresentadas:

- Para o mesmo teor de cimento e tempo de cura, as misturas com cimento tipo CP IV 32 RS apresentam maior rigidez à flexão quando comparadas às misturas com CP II-F 32 RS;

- Para o mesmo tipo de cimento e tempo de cura, o acréscimo de cimento Portland confere maior rigidez às misturas cimentadas;
- Considerando o mesmo tipo e teor de cimento, observou-se que, de modo geral, um maior tempo de cura levou a módulos maiores (maior rigidez). Para as misturas com 3% de cimento tipo CP IV 32 RS o aumento do tempo de cura não parece ser um fator relevante na variação do módulo flexural da BGTC. Nesse sentido, percebe-se que para as misturas com cimento tipo CP II-F 32 o tempo de cura representa um fator de maior relevância, quando comparado o efeito do tempo de cura nos tratamentos com cimento tipo CP IV 32 RS;
- A utilização de emulsão asfáltica como aditivo à BGTC possui algum efeito no MF das misturas investigadas, entretanto, seriam necessários mais ensaios para uma análise conclusiva a respeito do efeito da emulsão asfáltica RR-1C no módulo flexural da brita graduada tratada com cimento.

Figura 79 – Módulo flexural de BGTC aos 7 e 28 dias de cura



Resultados de mesma magnitude foram obtidos por Prado (2018) em misturas de BGTC com 5% de cimento tipo CP II-Z 32 RS, moldadas 1% abaixo da umidade ótima e seguindo a composição granulométrica indicado no SAPEM (2014). Na pesquisa em questão o valor médio do MF atingiu 580,00 MPa.

O desempenho da BGTC em estruturas de pavimento está associado ao módulo flexural da camada cimentada. As camadas cimentadas com baixo MF podem experimentar altos níveis

de tensão de tração na parte inferior da camada, levando a trincas por fadiga. Por outro lado, altos valores de MF em misturas de BGTC significam maior rigidez da camada e, portanto, uma estrutura de ruptura frágil.

c) Módulo de Elasticidade (E) e Módulos dinâmicos (E*)

Os ensaios para determinação do módulo de elasticidade e módulos dinâmicos resultaram nos dados mostrados na Tabela 42, na Tabela 43, na Tabela 44 e na Tabela 45.

Tabela 42 – Módulo de elasticidade da BGTC aos 7 e 28 dias

Tipo de Cimento	Teor de cimento	Aditivo	Cura (dias)	E (GPa)	E média (GPa)
CP II-F 32	3%	-	7	6,10	6,17
				6,24	
			28	11,80	10,60
				9,40	
CP II-F 32	5%		7	16,37	16,20
				16,02	
			28	19,33	20,34
				21,35	
CP IV 32 RS	3%		7	14,81	13,54
				12,26	
			28	16,67	16,02
				15,37	
CP IV 32 RS	5%		7	29,20	27,74
				26,27	
			28	27,53	27,75
				27,97	
CP II-F 32	3%	0,5% RR-1C	7	7,48	6,94
				6,40	
			28	12,91	13,35
				13,78	

Tabela 43 – Módulo de dinâmico longitudinal de BGTC aos 7 e 28 dias

Tipo de Cimento	Teor de cimento	Aditivo	Cura (dias)	E* long (GPa)	E* long média (GPa)
CP II-F 32	3%	-	7	17,39	19,42
				21,44	
			28	25,19	25,73
				26,27	
CP II-F 32	5%		7	28,11	27,17
				26,23	
			28	30,71	31,15
				31,59	
CP IV 32 RS	3%		7	23,34	23,89
				24,45	
			28	30,70	29,96
				29,22	

Tipo de Cimento	Teor de cimento	Aditivo	Cura (dias)	E* long (GPa)	E* long média (GPa)
CP IV 32 RS	5%		7	32,22	32,41
				32,59	
			28	36,05	36,02
				35,99	
CP II-F 32	3%	0,5% RR-1C	7	20,38	20,36
				20,33	
			28	23,22	24,17
				25,12	

Tabela 44 – Módulo dinâmico transversal de BGTC aos 7 e 28 dias

Tipo de Cimento	Teor de cimento	Aditivo	Cura (dias)	E* transv (GPa)	E* transv média (GPa)
CP II-F 32	3%	-	7	15,63	17,93
				20,22	
			28	25,64	25,71
				25,78	
CP II-F 32	5%		7	28,13	27,66
				27,19	
			28	30,12	30,52
				30,93	
CP IV 32 RS	3%		7	23,69	23,49
				23,29	
			28	30,84	29,50
				28,17	
CP IV 32 RS	5%		7	31,88	32,22
				32,56	
			28	36,04	35,57
				35,09	
CP II-F 32	3%	0,5% RR-1C	7	19,16	18,97
				18,77	
			28	21,81	23,16
				24,51	

Tabela 45 – Módulo dinâmico torcional de BGTC aos 7 e 28 dias

Tipo de Cimento	Teor de cimento	Aditivo	Cura (dias)	E* tor (GPa)	E* tor média (GPa)
CP II-F 32	3%	-	7	6,36	6,36

Tipo de Cimento	Teor de cimento	Aditivo	Cura (dias)	E* tor (GPa)	E* tor média (GPa)
CP II-F 32	5%		28	8,53	8,96
				9,38	
			7	9,78	9,33
				8,89	
CP IV 32 RS	3%		28	11,52	11,72
				11,93	
			7	8,26	8,26
CP IV 32 RS	5%		28	10,78	10,42
				10,07	
			7	11,36	11,36
CP II-F 32	3%	0,5% RR-1C	7	14,00	13,99
				13,98	
			28	7,32	7,15
				6,99	
			28	7,80	8,41
				9,02	

Com os resultados dos ensaios, foram obtidos os gráficos da Figura 80, da Figura 81 e da Figura 82 e as seguintes observações são apresentadas:

- Para o mesmo tipo de cimento e tempo de cura, maiores valores de E e E* são encontrados para maior teor do ligante hidráulico;
- Considerando o mesmo tempo de cura e teor de cimento, as misturas com cimento tipo CP IV 32 RS apresentam maior rigidez à compressão, ou seja, maior módulo de elasticidade e dinâmico;
- As misturas de BGTC com o mesmo tipo e teor de cimento, mas com maior tempo de cura possuem maior E e E*;
- De forma similar ao observado com os resultados de módulo flexural, para o mesmo teor de cimento, a variação do tempo de cura nas misturas com cimento tipo CP II-F 32 é mais significativa no módulo de elasticidade do material, quando comparada com as misturas com cimento tipo CP IV 33 RS.;
- Sobre a utilização de emulsão asfáltica como aditivo às misturas de BGTC, verifica-se que aos 7 dias de cura ocorre um aumento discreto dos módulos dinâmicos. Entretanto, aos 28 dias há uma redução dos mesmos módulos.
- Os módulos elásticos das misturas com 3% de CP II-F 32 e com emulsão asfáltica como aditivo são superiores às misturas com o mesmo teor e tipo de cimento, mas sem aditivo.

Os módulos elásticos obtidos por Prado (2018) aos 28 dias de cura em misturas de BGTC com cimento tipo CP II-Z 32 RS, seguindo a curva granulométrica do SAPEM (2014) e moldados na umidade ótima, atingiram 7,0 GPa para as misturas com 3% de cimento e 15,0 GPa para as misturas com 5% de cimento. Observa-se uma concordância entre os valores obtidos pra as misturas cimentadas com 3% de cimento de CP II-F 32.

Figura 80 – Comparação de módulos dinâmicos de BGTC

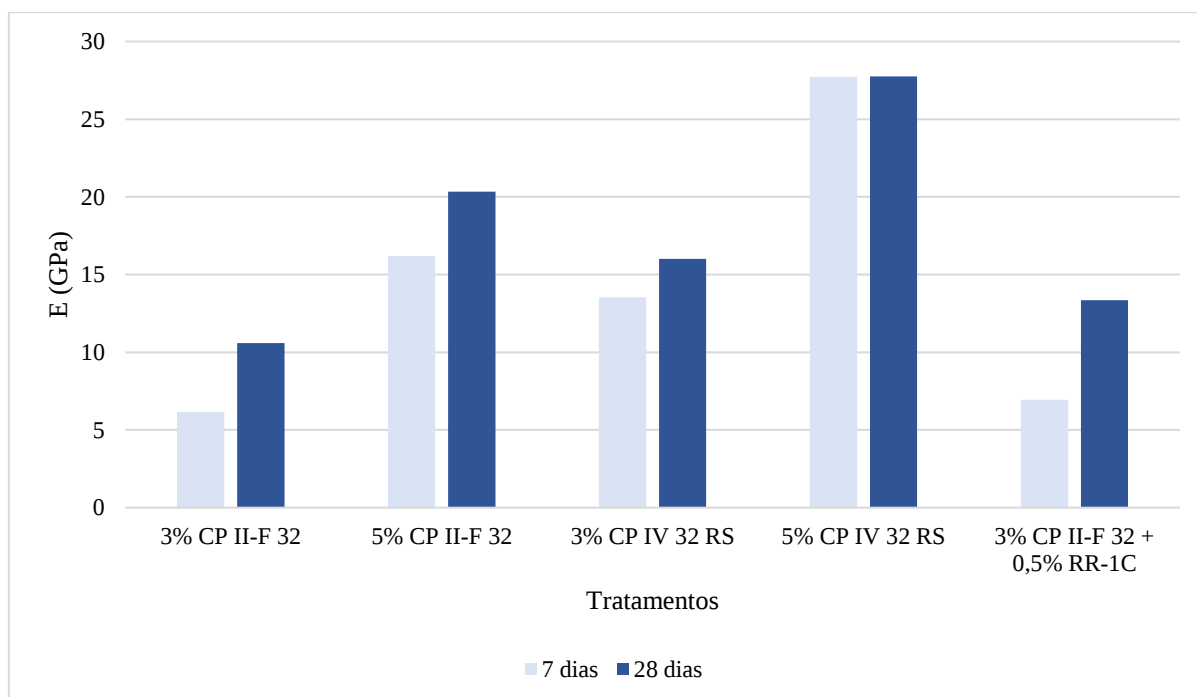


Figura 81 – Comparação de módulos dinâmicos de BGTC

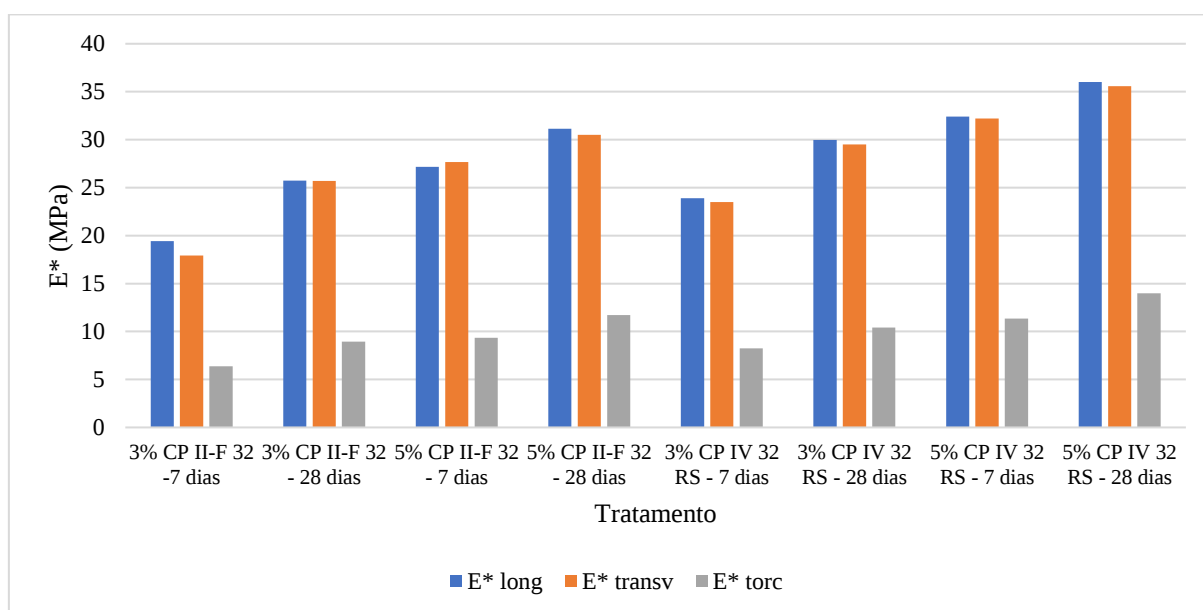
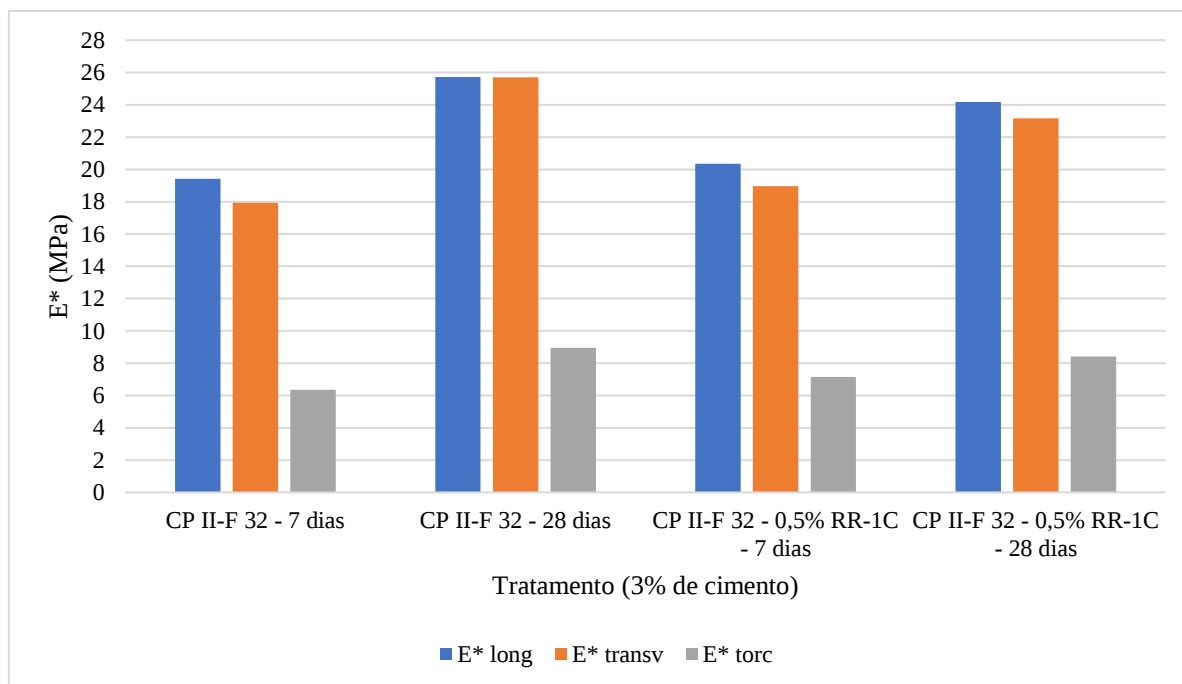


Figura 82 – Comparação de módulos dinâmicos de BGTC (efeito emulsão)



d) Módulo de resiliência (MR)

O módulo de resiliência das misturas constituídas com CP II-F 32 foi obtido aos 28 dias de cura, conforme Tabela 46 e Figura 83. Não foi possível determinar o módulo de resiliência das misturas com CP IV 32 RS em decorrência de problemas técnicos com o equipamento de ensaio.

Com o gráfico tensão x MR dos pares obtidos no ensaio de carregamento uniaxial dinâmico, verificou-se um crescimento do módulo de resiliência com o aumento da tensão vertical. Desse modo, como forma de comparação entre os tratamentos estudados, adotou-se o módulo de resiliência referente à tensão vertical de 200 kPa (Tabela 47), tensão na qual as camadas de BGTC (em seu ponto central) normalmente estão sujeitas em campo quando posicionadas como base, não sendo levado como regra (PRADO, 2018).

A partir da Tabela 46, Tabela 47 e Figura 83, percebe-se:

- Para as misturas com cimento tipo CP II-F 32, o acréscimo do teor de cimento (de 3% para 5%) resulta em um aumento do módulo de resiliência;
- A utilização de 0,50% de emulsão asfáltica RR-1C como aditivo à BGTC promove uma pequena redução do MR.

Resultados de MR obtidos por Prado (2018), aos 28 dias de cura, em misturas de BGTC constituídas por 3% de CP II-Z 32, moldadas na umidade ótima e seguindo a faixa granulométrica estabelecida pelo SAPEM (2014), atingiram valor médio de 13.635,4 MPa,

quase duas vezes o valor obtido nessa pesquisa. Para as misturas com 5% de CP II-Z 32 RS, a autora obteve um resultado igual a 10.207,6 KPa, para tensão desvio de 200KPa. Percebe-se que diferente da presente pesquisa, houve uma redução do módulo de resiliência com o aumento do teor de cimento.

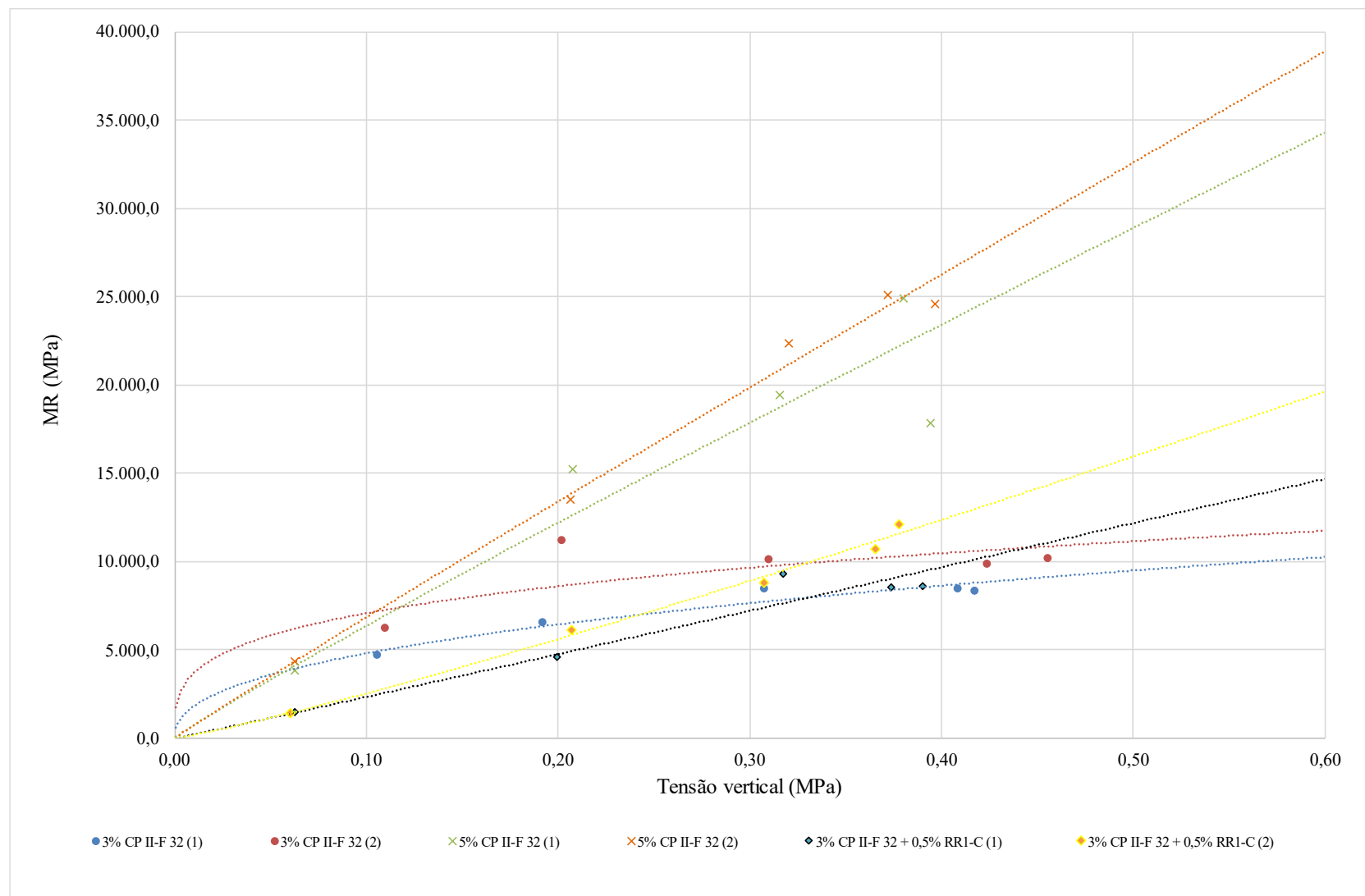
Tabela 46 – Módulo de resiliência de BGTC aos 28 dias de cura

CP	Ciclo	Tensão vertical (MPa)	Desloc. recuperável (mm)	H ₀ (mm)	Deformação Resiliente	Módulo de Resiliência (MPa)
3% CP II F 32 (1)	1	0,11	0,00222	99,8	0,000022	4.723,4
	2	0,19	0,00292		0,000029	6.545,4
	3	0,31	0,00363		0,000036	8.449,7
	4	0,41	0,00481		0,000048	8.463,2
	5	0,42	0,00500		0,000050	8.326,9
3% CP II F 32 (2)	1	0,11	0,00184	104,5	0,000018	6.223,3
	2	0,20	0,00188		0,000018	11.190,0
	3	0,31	0,00320		0,000031	10.113,3
	4	0,42	0,00449		0,000043	9.843,0
	5	0,46	0,00467		0,000045	10.198,0
5% CP II F 32 (1)	1	0,06	0,00171	104,0	0,000016	3.822,5
	2	0,21	0,00142		0,000014	15.188,1
	3	0,32	0,00169		0,000016	19.435,5
	4	0,38	0,00159		0,000015	24.898,1
	5	0,39	0,00230		0,000022	17.809,7
5% CP II F 32 (2)	1	0,06	0,00137	95,0	0,000014	4.358,2
	2	0,21	0,00145		0,000015	13.486,5
	3	0,32	0,00136		0,000014	22.366,7
	4	0,37	0,00141		0,000015	25.095,5
	5	0,40	0,00153		0,000016	24.552,6
	2	0,20	0,00167	94,6	0,000018	11.470,5
	3	0,32	0,00185		0,000020	16.366,6
	4	0,43	0,00207		0,000022	19.578,4
	5	0,47	0,00185		0,000020	23.881,3
	1	0,06	0,00429		0,000044	1.430,4
3% CP II F 32 + 0,50 RR-1C (1)	2	0,20	0,00423	98,0	0,000043	4.610,4
	3	0,32	0,00335		0,000034	9.285,7
	4	0,37	0,00431		0,000044	8.503,5
	5	0,39	0,00445		0,000045	8.584,5
	1	0,06	0,00425		0,000043	1.418,2
3% CP II F 32 + 0,50 RR-1C (2)	2	0,21	0,00339	100,0	0,000034	6.105,4
	3	0,31	0,00349		0,000035	8.800,8
	4	0,37	0,00341		0,000034	10.719,9
	5	0,38	0,00312		0,000031	12.113,5

Tabela 47 – Módulo de resiliência de BGTC para tensão desvio de 200 kPa

Tipo de cimento	% de cimento	Cura (dias)	(%) RR-1C	MR (MPa)
CP II-F 32	3	28	0	7.529,22
CP II-F 32	5	28	0	12.809,13
CP II-F 32	3	28	0,5	5.187,38

Figura 83 – Gráfico tensão x MR de BGTC aos 28 dias de cura



4.3.3 Relações constitutivas da porosidade com a mecânica

Nesta seção foram estabelecidas correlações lineares entre os parâmetros de resistência, rigidez e parâmetros associados à porosidade e verificado se os parâmetros mecânicos e de porosidade estavam associados entre si.

Foram realizadas as correlações lineares entre os parâmetros investigados na presente pesquisa, a fim de entender como uma variável se comporta quando da variação da outra, com o intuito de constatar se existe alguma relação entre a variabilidade de ambas. Embora essa correlação não implique em uma relação de causalidade, a determinação do coeficiente de correlação quantifica a relação entre os parâmetros de interesse. As correlações lineares entre os parâmetros investigados podem ser observadas na Tabela 48.

Tabela 48 – Coeficiente de correlações lineares entre os parâmetros mecânicos e parâmetros associados a porosidade (28 dias)

	% de cimento	RCS (MPa)	RTCD (MPa)	RTF (MPa)	MF (MPa)	E (GPa)	E* long (GPa)	E* transv (GPa)	E* tor (GPa)	Abs (%)	Iv (%)
% de cimento	1,000										
RCS (MPa)	0,782	1,000									
RTCD (MPa)	0,889	0,974	1,000								
RTF (MPa)	0,867	0,983	0,999	1,000							
MF (MPa)	0,823	0,994	0,990	0,996	1,000						
E (GPa)	0,875	0,979	0,991	0,993	0,989	1,000					
E* long (GPa)	0,813	0,971	0,950	0,954	0,959	0,945	1,000				
E* transv (GPa)	0,797	0,957	0,936	0,940	0,944	0,923	0,997	1,000			
E* tor (GPa)	0,875	0,973	0,981	0,980	0,975	0,970	0,990	0,984	1,000		
Abs (%)	-0,679	-0,881	-0,876	-0,888	-0,899	-0,906	-0,750	-0,710	-0,789	1,000	
Iv (%)	-0,669	-0,864	-0,861	-0,873	-0,883	-0,894	-0,728	-0,686	-0,768	0,999	1,000

Na Tabela 48, percebe-se a relação direta entre os parâmetros mecânicos investigados, com coeficientes de correlações lineares próximos de 1, o que denota relações muito fortes.

Nesse contexto, chama atenção o coeficiente de correlação entre a RTF e RTCD. Quando comparado ao ensaio de resistência à tração na flexão, o ensaio de resistência à tração por compressão diametral demanda menos tempo e material, consequentemente é um ensaio de menor custo e mais prático à rotina de obras. No ensaio de RTCD é necessário 12% do volume requerido no ensaio de RTF, além do método de compactação do corpo de prova prismático

para o ensaio de RTF demandar um aparato mais sofisticado. Desse modo, o elevado coeficiente de correlação encontrado indica a possibilidade de utilização do ensaio de RTCD na compreensão da capacidade resistiva à tração da BGTC.

No que diz respeito às relações entre os parâmetros mecânicos e índice de vazios (Iv) e absorção (Abs), percebe-se uma boa correlação entre Iv e Abs com os parâmetros de resistência e uma relação forte com módulo de elasticidade e módulo flexural. Vale ressaltar o sinal negativo do coeficiente de correlação, o que indica que menores valores de absorção e índice de vazios estão associados a menores resistências e rigidezes.

Após a análise das correlações lineares e a constatação de que existe uma relação entre a variabilidade dos parâmetros estudados, procede-se com as regressões fatoriais para avaliar a significância dessas relações. Para tal, utilizou-se a equação de padronização apresentada na Equação (20) (regressão fatorial) e os resultados dos ensaios mecânicos e absorção determinados aos 28 dias de cura. Na Tabela 50 é possível observar os valores médios dos parâmetros de resistência, rigidez e parâmetros associados à porosidade, aos 28 dias de cura, e na Tabela 51 os coeficientes de regressão obtidos com uso do programa *software* Statística 7.

$$Y = b_0 + b_1 * C + b_2 * A + b_3 * V + b_4 * C * A + b_5 * C * V + b_6 * A * V + b_7 * C * A * V \quad \text{Equação (20)}$$

Onde:

Y = parâmetro avaliado (variável dependente);

b_i = i-ésimo coeficientes de regressão do modelo;

C = fator associado ao teor de cimento;

-1 = 3% de cimento;

1 = 5% de cimento.

A = fator associado à absorção (Tabela 49);

Tabela 49 – Fator associado à absorção

tratamento	Corpos de prova	RCS - E - E*long - E*trans - E* torc	RTCD - RTF - MF
3% CP II-F 32	1	1,000	0,898
3% CP II-F 32	2	0,321	0,254
3% CP II-F 32	3	-	1,000
5% CP II-F 32	1	0,143	0,085
5% CP II-F 32	2	0,250	0,186
5% CP II-F 32	3	-	-0,085
3% CP IV 32 RS	1	0,054	0,000
3% CP IV 32 RS	2	0,500	0,424
3% CP IV 32 RS	3	-	0,220
5% CP IV 32 RS	1	-0,661	-0,678

tratamento	Corpos de prova	RCS - E - E*long - E*trans - E* torc	RTCD - RTF - MF
5% CP IV 32 RS	2	-1,000	-1,000
5% CP IV 32 RS	3	-	-0,746
3% CP II-F 32 + 0,5% RR 1-C	1	0,089	0,034
3% CP II-F 32 + 0,5% RR 1-C	2	0,089	0,034
3% CP II-F 32 + 0,5% RR 1-C	3	-	-0,068

V = fator associado aos materiais para os aglutinantes;

-1 = CP II-F 32;

1 = CP IV 32 RS;

0 = CP II-F 32 + 0,50% de emulsão asfáltica RR-1C.

Tabela 50 – Valores médios dos parâmetros mecânicos e parâmetros associados à porosidade da BGTC aos 28 dias

Tratamento	% de cimento	Abs (%)	Iv (%)	RCS (MPa)	RTCD (MPa)	RTF (MPa)	MF (MPa)	E (GPa)	E* long (GPa)	E* transv (GPa)	E* tor (GPa)
CP II-F 32	3	4,92	11,66	4,63	0,68	0,77	358,06	10,6	25,73	25,71	8,96
CP II-F 32	5	4,54	10,82	8,35	1,39	1,51	852,22	20,34	31,15	30,52	11,72
CP IV 32 RS	3	4,50	10,69	7,92	0,96	1,13	687,66	16,02	39,96	29,5	10,42
CP IV 32 RS	5	4,63	11,03	13,22	2,08	2,31	1485,18	27,75	36,02	35,57	13,99
CP II-F 32 + 0,5% RR-1C	3	4,02	9,71	5,22	0,74	0,86	442,91	13,35	24,17	23,16	8,41

Tabela 51 – Coeficientes da regressão

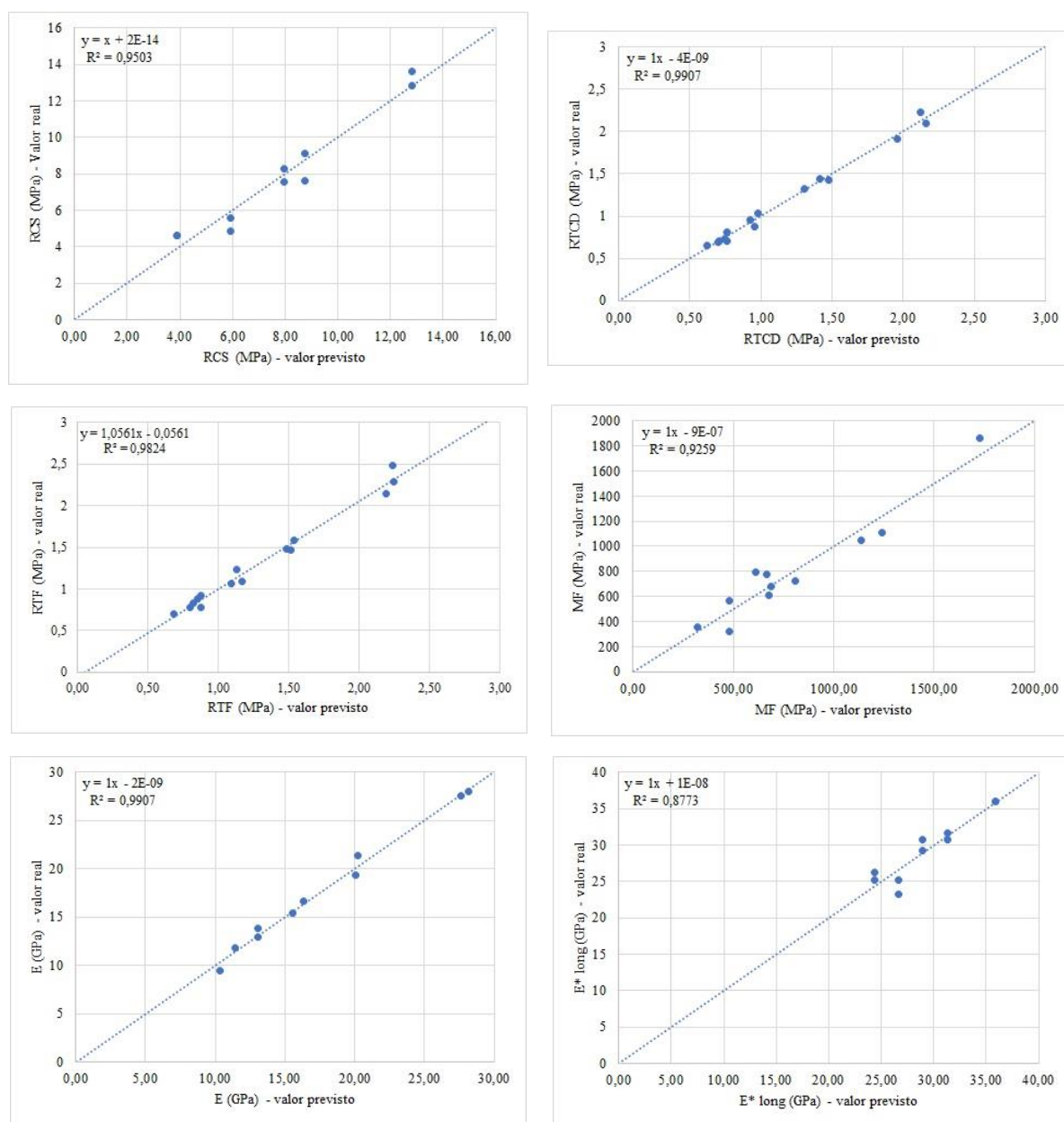
	C	A	V	C*A	C*V	A*V	C*A*V	
	b0	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
RCS	8,36	2,43	-	2,04	-	-	-	-
RTCD	1,37	0,61	0,38	0,39	0,26	0,23	-	-
RTF	1,40	0,54	0,18	0,33	-	0,10	-	-
MF	1274,12	794,78	-	652,64	-	444,38	934,62	990,88
E	18,14	5,04	-	3,34	-	-	-1,69	-
E*lon	30,10	3,48	-	2,28	-	-	-	-
E* trans	29,59	3,46	-	2,21	-	-	-	-
E* torc	11,06	1,80	-	0,93	-	-	-	-

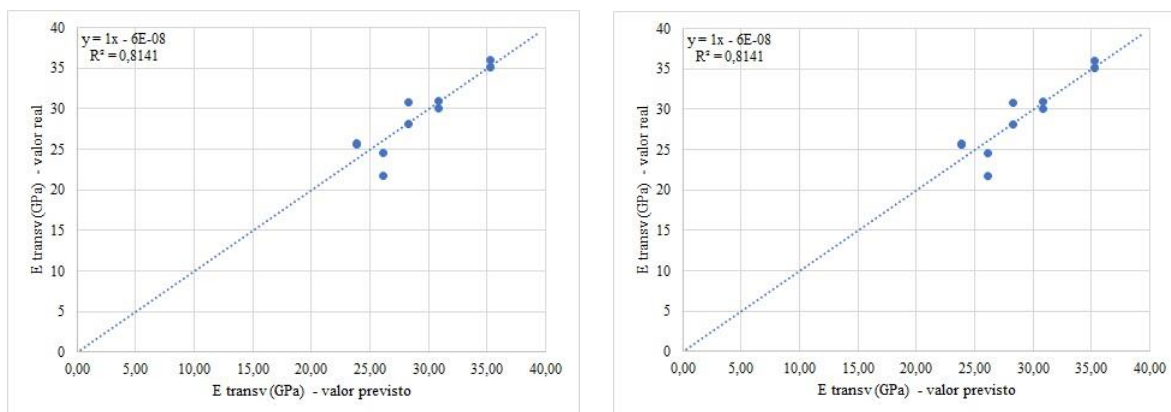
Da Tabela 51, verifica-se que as resistências à tração (RTF e RTCD) e o MF em menor grau dependem da absorção, evidenciado pelos coeficientes com P-valor significativo associado ao fator A. Já os parâmetros obtidos em carregamento axial não dependem da absorção. Desse modo, nota-se que apesar das correlações lineares fortes entre absorção os parâmetros de

resistência e rigidez, o estudo de significância dos coeficientes dos modelos de regressão fatorial não confirmou a relevância de todas as relações.

Com os modelos ajustados, foram elaborados gráficos de dispersão dos valores previstos *versus* valores reais (Figura 84), sendo constatada a boa simetria entre as inferências dos modelos e os resultados dos tratamentos para as misturas investigadas, dando destaque aos resultados obtidos com os modelos para previsão de resistência à tração por compressão diametral (RTCD) e módulo de elasticidade (E), com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,9907 em ambos os modelos.

Figura 84 – Gráficos previsto x valor real





4.3.4 Viabilidade técnica e econômica

a) Viabilidade técnica - mePADS

Tomando como referência a estrutura de pavimento estudada por Nascimento e Albuquerque (2018), avaliou-se o desempenho estrutural das misturas propostas com auxílio do *software* sul-africano mePADS.

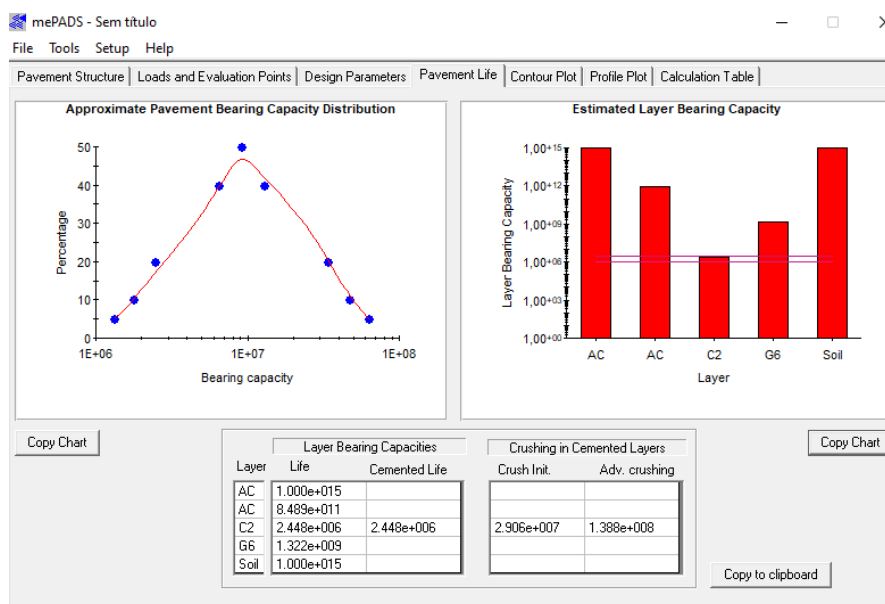
Utilizando os parâmetros da estrutura de referência, atingiu-se um N igual a $2,45 \times 10^6$, conforme mostrado na Figura 85. Ao substituir o módulo elástico da estrutura proposta pelos módulos torcionais médios, obtidos aos 28 dias, das misturas estudadas, determinou-se a capacidade estimada da camada de BGTC para os 5 cenários possíveis (Tabela 52).

Sabendo-se que o valor típico utilizado nas rodovias estaduais de Sergipe para um período de projeto igual a de 10 anos é igual a $N = 1 \times 10^6$, constata-se que todas as misturas propostas atendem ao N especificado. Entretanto, em termos de custos, constata-se que a mistura com 3% de CP II-F e 3 0,5% de emulsão RR-1C apresenta menor benefício, uma vez que se utilizam mais insumos em relação à mistura com o mesmo teor de cimento e sem o uso do aditivo, despendendo maior gasto, para um desempenho inferior às demais.

Tabela 52 – Capacidade estimada das camadas

Cenários	Mistura	N
Estrutura referência	3% CP II-F 32	$2,45 \times 10^6$
1	3% CP II-F 32	$2,88 \times 10^6$
2	5% CP II-F 32	$3,35 \times 10^6$
3	3% CP IV 32 RS	$3,00 \times 10^6$
4	5% CP IV 32 RS	$3,47 \times 10^6$
5	3% CP II-F 32 com emulsão	$2,83 \times 10^6$

Figura 85 - Resultado do cálculo da estrutura de referência



b) Viabilidade econômica - Método Promethee Gaya

A simples substituição do tipo de cimento nas misturas de BGTC baseada apenas nos ganhos de comportamento mecânico não seria racional sem que se avaliasse também o aspecto econômico. Para tal, utilizou-se o método PROMETHEE GAYA, adotando-se como: parâmetros mecânicos as relações RTF/RCS e RTF/E*long; parâmetros de porosidade a absorção (Abs) e índice de vazios (Iv); e parâmetro econômico, custo/m³.

Para o cálculo do custo de cada alternativa de mistura foi utilizado o banco de dados do ORSE, com mês de referência correspondente a setembro de 2022, obtendo-se os valores expressos na Tabela 53.

Tabela 53 – Descrição dos custos associados a cada alternativa com 3% de cimento.

Insumos	Unidade	Custo unitário	CP II-F 32	CP IV 32 RS	CP II-F 32 + 0,50% RR-1C
Filler para concreto asfáltico	kg	0,16	2,33	2,33	2,33
Areia fina adquirida em depósito, frete incluso (Areia Fina Comercial)	m³	95,00	14,25	14,25	14,25
Pó de pedra - incluso frete	m³	123,00	31,98	31,98	31,98
Pedra britada n. 0, ou pedrisco (4,8 a 9,5 mm) posto pedreira/fornecedor, sem frete	m³	111,77	31,30	31,30	31,30
Brita 2 (19,0 a 25,0 mm) - incluso frete	m³	195,00	50,70	50,70	50,70
Água	l	0,03	3,16	3,16	3,02
CP II	kg	0,80	60,00	0,00	60,00
CPIV	kg	0,88	0,00	66,00	0,00
Emulsão asfáltica RR-1C	t	3430,81	0,00	0,00	42,89
		Total	193,71	199,71	236,45

A Tabela 54 apresenta os valores dos demais parâmetros de comparação.

Tabela 54 – Parâmetros de comparação para análise benefício-custo (%)

Tipo de cimento	RR-1C (%)	RTF/RCS (%)	RTF/E*long (%)	Abs (%)	Iv (%)	Custo (R\$)
CP II-F 32	0,00	16,63	2,99	4,92	11,66	193,71
CP IV 32 RS	0,00	14,27	2,83	4,63	11,03	199,71
CP II-F 32	0,50	16,48	3,56	4,50	10,69	236,45

Com a definição dos valores associados aos critérios escolhidos, foi utilizado o *software* VISUAL PROMETHEE, versão 1.4.0.0, de apoio ao método PROMETHEE GAYA, que resultou na interface da Figura 86. Em coluna constam os critérios e em linha as alternativas disponíveis.

Figura 86 – Interface do software PROMETHEE

	☒	☒	☒	☒	☒
Scenario1	RTF/RCS	RTF/E*	Abs	Iv	custo
Unit	(%)	(%)	(%)	(%)	R\$
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences					
Min/Max	min	max	min	min	min
Weight	1,25	1,25	1,25	1,25	5,00
Preference Fn.	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- P: Preference	1,00	4,00	4,00	10,50	190,00
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics					
Minimum	14,27	2,83	4,50	10,69	193,71
Maximum	16,63	3,56	4,92	11,66	236,45
Average	15,79	3,13	4,68	11,13	209,96
Standard Dev.	1,08	0,31	0,18	0,40	18,89
Evaluations					
☒ CP II-F 32	16,63	2,99	4,92	11,66	193,71
☒ CP IV 32 RS	14,27	2,83	4,63	11,03	199,71
☒ CP II-F 32 + 0,5...	16,48	3,56	4,50	10,69	236,45

Esta primeira análise auxilia na identificação, em cada alternativa, dos critérios mais fortes e os que apresentam maior fragilidade, sendo possível obter perspectiva desagregada dos

pontos fortes e fracos de uma alternativa. Nota-se que a alternativa representada pelo cimento CP II-F 32 aparece como alternativa com menor custo, entretanto possui os piores valores de três dos quatro parâmetros técnicos avaliados. A alternativa correspondente às misturas com CP IV 32 RS aparece com a melhor relação RTF/RCS e pior relação RTF/E*, sendo a alternativa intermediária para os demais parâmetros. Já a alternativa com emulsão asfáltica como aditivo possui maior custo para execução do mesmo volume das demais alternativas e possui como ponto forte a melhor relação resistência-rigidez e menor índice de vazios e absorção.

Foram utilizadas duas ferramentas do *software* VISUAL PROMETHEE para auxílio na tomada de decisão: *ranking* completo e *rainbow*. Por meio da Figura 87 e Figura 88 é possível constatar que para os critérios e pesos utilizados, as misturas com cimento tipo CP IV 32 RS aparecem como melhores alternativas para execução de camadas cimentadas, seguida das misturas com CP II-F 32 e misturas de BGTC constituídas por CP II-F 32 com emulsão asfáltica, respectivamente.

Figura 87 – PROMETHEE – Ranking completo

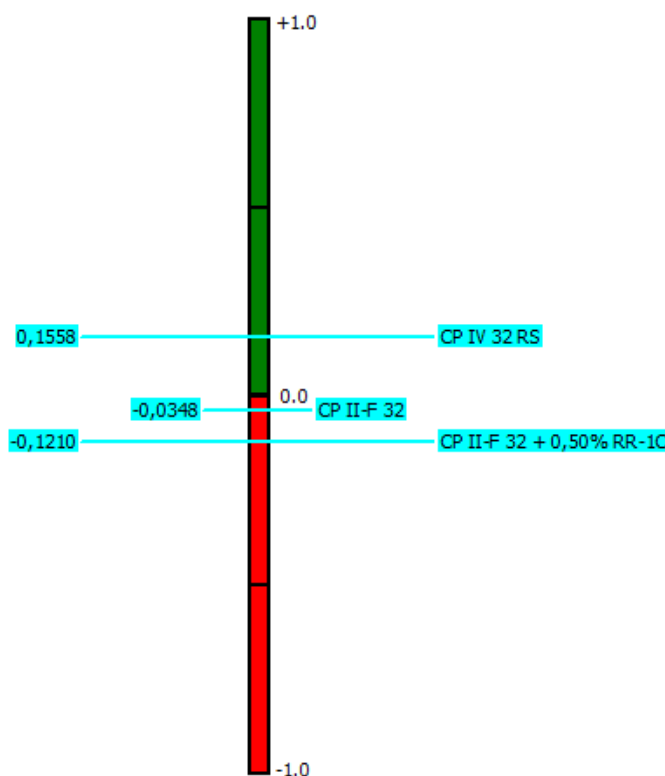
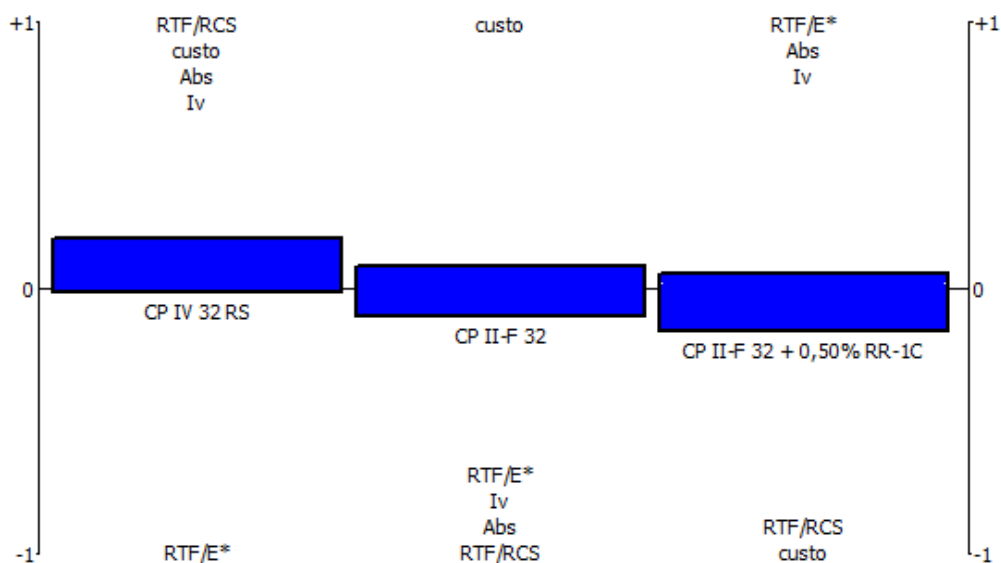


Figura 88 – PROMETHEE Rainbow



O método utilizado necessita que alguns critérios e pesos sejam adotados. Portanto, a viabilidade econômica e técnica depende de uma avaliação particular de cada caso (ótica do tomador de decisão), levando em consideração os recursos financeiros disponíveis, as especificações do projeto, as vantagens em termos de comportamento mecânico, o teor de cimento utilizado, a espessura da camada, a extensão da via, além do valor e disponibilidade de cada tipo de cimento na região de interesse.

5 CONCLUSÕES

Com o intuito de verificar o efeito do cimento rico em pozolana e da emulsão asfáltica na porosidade e propriedades mecânicas de misturas de brita graduada com cimento, foi proposto um planejamento experimental composto por ensaios de caracterização dos materiais, ensaios mecânicos e avaliação da absorção e índice de vazios. Nas análises, adotou-se como tratamentos de referências em seus respectivos teores de cimento as misturas com 3% de cimento tipo CP II-F 32 e as misturas com 5% de CP II-F 32, sem o uso de aditivos.

Os ensaios dos parâmetros associados à porosidade indicaram que a substituição do tipo de cimento CP II-F 32 pelo cimento tipo CP IV 32 RS, o acréscimo do teor de cimento, o aumento do tempo de cura e a utilização de emulsão asfáltica como aditivo, no teor utilizado, resultam em misturas de BGTC com menor absorção e índice de vazios.

Devido a diferenças na velocidade, calor e grau de hidratação que as adições promovem, a variedade na composição dos diversos tipos de cimento Portland possibilita a obtenção de cimentos com propriedades distintas. Conforme explica a NBR 12653 (ABNT, 2014), as reações que ocorrem entre os materiais pozolânicos e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) da hidratação do cimento, formam silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional. Assim, quando comparados a cimento sem uso de materiais pozolânicos ou com menor proporção do material, os cimentos Portland pozolânicos (CP IV) conferem às misturas cimentadas redução da porosidade e permeabilidade.

A influência do teor de cimento e tempo de cura na redução da absorção e índice de vazios está associada as reações de hidratação do cimento. A redução dos indicadores de porosidade com o acréscimo do tempo de cura denota um processo de hidratação de cimento ainda ativo.

No que diz respeito ao uso da emulsão asfáltica na redução da absorção e índice de vazios, uma hipótese possível seria o efeito positivo da emulsão na compactação da BGTC, indicando que uma menor energia de compactação pode ser empregada para atingir a mesma massa específica que uma mistura sem o uso de emulsão, o que acarreta em ganhos em termos de tempo de execução e, por consequência, economia. Seriam necessários ensaios de compactação com diversos teores da emulsão para comprovação do efeito positivo da compactação na porosidade da BGTC.

Com os ensaios complementares, para determinação de parâmetros de resistência e rigidez, foi possível observar a relação entre a porosidade da BGTC e propriedades mecânicas.

Verificou-se um aumento de todos parâmetros investigados (RCS, RTCD, RTF, MF, E e E*) com a substituição do cimento tipo CP II-F 32 pelo cimento tipo CP IV 32 RS, como também foi observado o aumento dos parâmetros mecânicos com o acréscimo do teor de cimento.

Em se tratando da influência do teor de cimento na resistência da BGTC, sabe-se que o cimento confere maior coesão, em decorrência da união pontual que a argamassa constituído pelo ligante hidráulico e agregados miúdos promove entre os agregados graúdos, sendo esperada maiores resistência e rigidez nas misturas com maior teor de cimento Portland.

O tempo de cura também aparece como uma variável relevante nas propriedades mecânicas das misturas investigadas, obtendo-se valores superiores de resistência e rigidez para maiores tempos de cura. Vale ressaltar que o incremento de resistência para maiores tempos de cura diminui ao longo do tempo, à medida que as reações de hidratação do cimento vão cessando.

No que diz respeito ao tipo de cimento, as reações que ocorrem entre os materiais pozolânicos e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) da hidratação do cimento, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional, além de propiciarem uma menor porosidade e permeabilidade, aumentam a resistência à compressão simples e resistência à tração na flexão das misturas cimentadas. Os resultados indicaram que para a mesma idade, as misturas com CP IV 32 RS atingem maiores resistências quando comparadas às misturas com o mesmo teor de cimento e utilizando o cimento do tipo CP II-F 32. Essa característica pode ser interessante em termos de liberação do tráfego mais precocemente, minimizando os transtornos que as obras de pavimentação causam na rotina dos usuários.

O aumento das resistências aos 28 dias, assim como a redução da porosidade associada ao uso do aditivo (emulsão asfáltica), pode ser efeito da compactação mais efetiva em comparação às misturas sem emulsão. Destaca-se que apesar do uso de emulsão asfáltica em misturas de BGTC com 3% de cimento tipo CP II-F 32 resultar em uma mistura menos porosa em comparação às misturas com 3% de CP IV 32 RS, verifica-se que essa tendência não se confirmou nos ensaios de resistência e rigidez, sendo obtidas maiores resistências e rigidezes nas misturas com 3% de CP IV 32 RS em comparação às misturas com 3% de CP II-F 32 com emulsão asfáltica como aditivo, ou seja, a menor porosidade das misturas com emulsão não foi garantia de melhor desempenho mecânico.

Sobre o módulo de resiliência das misturas cimentadas, os resultados obtidos aos 28 dias de cura com as misturas compostas por CP II-F 32 apontaram que o aumento do teor de cimento resulta em uma mistura com maior MR e a utilização de emulsão asfáltica como aditivo à BGTC leva a uma redução desse módulo aos 28 dias. Desse modo, o uso de emulsão asfáltica como

aditivo à BGTC propicia uma mistura com um discreto aumento da resistência à compressão e à tração aos 28 dias e uma redução do MR, o que pode ser positivo em termo de desempenho do material. Segundo Bernucci *et al.* (2006), em estruturas de pavimentos é esperado que as misturas apresentem baixa rigidez, a fim de evitar elevada absorção de tensões que levem ao trincamento prematuro. Por outro lado, espera-se também alta resistência à tração, pois a maior resistência na ruptura, de modo geral, é também associada a uma maior resistência à fadiga

A análise das imagens da macroestrutura e microestrutura das misturas de BGTC indicou que as misturas com maiores resistências e menor índice de vazios e absorção apresentam uma matriz mais compacta, com menores cavidades, em relação às misturas com maiores absorção e índice de vazios. Essas imagens consolidam os resultados dos ensaios de laboratório.

A utilização de correlações lineares para verificar a relação entre as propriedades mecânicas e de porosidade mostrou que existe alguma relação entre uma menor absorção e índice de vazios e maiores resistências, reforçando a hipótese de que a indicação de critérios de dosagem que resultem em menor porosidade à mistura cimentada poderia melhorar seu desempenho mecânico enquanto camada do pavimento, apesar dessa relação não ser necessariamente direta, como evidenciaram os resultados apresentados. Entretanto, apesar das correlações lineares fortes entre a absorção e os parâmetros de resistência e rigidez, o estudo de significância dos coeficientes dos modelos de regressão fatorial não confirmou a significâncias de todas as correlações estabelecidas. Verifica-se que apenas as resistências à tração (RTF e RTCD) e o MF, em menor grau, dependem da absorção, evidenciado pelos coeficientes com P-valor significativo associado ao fator A (fator referente à absorção da BGTC).

Salienta-se que apesar dos resultados indicarem um aumento da resistência e rigidez e diminuição da absorção e índice de vazios de misturas de BGTC com a substituição do cimento Portland composto com material carbonático (CP II-F 32) pelo cimento Portland pozolânico (CP IV 32 RS) e de alguns benefícios com o uso de emulsão asfáltica como aditivo às misturas cimentadas, seu uso prático deve levar em consideração uma análise particular do benefício-custo desses insumos, levando em consideração os aspectos mais relevantes na execução do projeto, sejam eles de ordem técnica ou econômica.

5.1 Sugestão de Novos Estudos

- Avaliar o comportamento mecânico e os parâmetros de porosidade de BGTC com outros tipos de cimento, cimento com escória granulada de alto forno e cimento com um menor percentual de pozolana;

- Verificar a porosidade e desempenho mecânico de misturas de BGTC com adição de subprodutos (materiais residuais da indústria) como a cinza volante e a cinza de casca de arroz;
- Avaliar a absorção e índice de vazios e o comportamento mecânico da BGTC com diferentes metodologias de compactação, Proctor e vibratória;
- Realizar ensaios de vida de fadiga em misturas investigadas na pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018a.

____. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019a.

____. **NBR 8522**: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2021.

____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012a.

____. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do teor de resíduo seco de emulsões asfálticas convencionais ou modificadas - Métodos expeditos. Rio de Janeiro, 2012b.

____. **NBR 11803**: Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento – Requisitos. Rio de Janeiro, 2013a.

____. **NBR 12142**: Concreto – Determinação de resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

____. **NBR 12261**: Dosagem de brita graduada tratada com cimento - procedimentos. Rio de Janeiro, 2013b.

____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

____. **NBR 14376**: Ligantes asfálticos - Determinação do teor do resíduo seco de emulsões asfálticas convencionais ou modificadas - Métodos expeditos. Rio de Janeiro, 2019b.

____. **NBR 14393**: Emulsões asfálticas – Determinação da peneiração. Rio de Janeiro, 2012c.

____. **NBR 14594**: Emulsões asfálticas catiônicas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2017a.

____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017b.

____. **NBR 16607**: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018b.

____. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018c.

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

ALBUQUERQUE, F. S.; DE MENDONÇA, A. T. Análise crítica e ajuste de modelos de previsão de fadiga com análise incremental de danos para BGTC executada em pavimento asfáltico semirrígido. **TRANSPORTES**, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 101–117, 2017. DOI: 10.14295/transportes.v25i2.1046. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1046>. Acesso em: 27 setembro 2021.

ANDRADE, L. R.; KUCHIISHI, A. K.; BESSA, I. S.; VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. L. B. Comportamento mecânico de camadas de base granular e tratada com cimento em rodovias de tráfego muito pesado. In: XXIX Congresso nacional de pesquisa em transporte da ANPET, 215, Ouro Preto. **Anais [...]**. Ouro Preto, 2015. p.148-159.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C78/C78M**. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). Estados Unidos, 2021.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C150/C150M**. Standard Specification for Portland Cement. Estados Unidos, 2021b.

____. **C215**. Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. Estados Unidos, 2020.

AUSTROADS. **AP-R462**: Cemented Materials Characterization. Sydney, 2014.

BABIC, B. Relationships between mechanical properties of cement stabilized materials. **Materials and structures/matériaux et constructions**, 1987, 20. p. 455-460.

BALBO, J. T. **High quality cement treated crushed stones for concrete pavement bases**. Escola Politécnica Departamento de Engenharia de Transportes Cidade Universitária. 1997.

BALBO, J. T. **Pavimentação: Materiais, suas Propriedades e Técnicas Construtivas**, no prelo, editora USP, 2002

BALBO, J. T. Britas graduadas tratadas com cimento: uma avaliação de sua durabilidade sob o enfoque de porosidade, tenacidade e fratura. **TRANSPORTES**, [s. l.], v. 14, n. 1, 2006. DOI: 10.14295/transportes.v14i1.59. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/59>. Acesso em: 27 setembro 2021.

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

BATTAGIN, A. F.; BATTAGIN, I. L. S. O cimento Portland no Brasil. In: ISAIA; G. C. (org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 761-790.

BATTAGIN A. F.; RODRIGUES, H. Recomendações sobre o uso dos distintos tipos de cimento Portland nas diferentes aplicações. **Concreto e Construções**. p. 30-38, 2014.

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, 2006. 504 p.

BOLTRYK, M.; MALASZKIEWICZ, D. Application of anionic asphalt emulsion as an admixture for concrete. **Construction and Building Materials**. 40. 2013. P. 556-565.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretora de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Pavimentação**. 3ª edição. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual%20de%20Pavimentacao%20E3o_05.12.06.pdf. Acesso em 15 de setembro de 2021.

CAMPITELI, V. C. Porosidade do concreto. Boletim técnico do departamento de engenharia de construção civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1987.

CASTRO, A. L. DE; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceito de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**. 55. 2009. p. 18-32.

CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. A influência do tipo de cimento no desempenho de concretos avançados formulados a partir do método de dosagem computacional. **Cerâmica**, v. 57, p. 10-21, 2011.

CHO, Y.; LEE, K.; RYU, S. Development of Cement-Treated Base Material for Reducing Shrinkage Cracks. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1952, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, 2006, p. 134-143.

CNT. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias 2019**. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2019. 236 p. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/gerencial.pdf>. Acesso em 26 de setembro de 2021.

CNT. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Anuário CNT do transporte: estatísticas consolidadas**. Brasília, 2020. Disponível em: <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2020/Rodoviario/1-1-/Principais-dados>. Acesso em 26 de setembro de 2021.

CSN. COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. **Apostila de cimentos**. 2016

DAREYNI, M.; MOGHADDAM, A. M. Fresh and mechanical properties of roller compacted concrete containing cationic asphalt emulsion admixture. **Construction and Building Materials** 198 (2019) 226-236.

DAREYNI, M.; MOGHADDAM, A. M.; DELARAMI, A. Effect of cationic asphalt emulsion as an admixture on transport properties of roller-compacted concrete. **Construction and Building Materials** 163 (2018) 724-733.

DAVIS, K. A.; Warr, L. S.; BUMS, S. E.; HOPPE, E. J. Physical and Chemical Behavior of Four Cement-Treated Aggregates. **Journal of materials in civil engineering**, outubro de 2007.

DER/PR. DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **ET-DE-P00/009**: Sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento – BGTC. Paraná, 2018. Disponível em: http://www.der.pr.gov.br/sites/der/arquivos_restritos/files/documento/2019-10/es-p16-bgtc2018.pdf. Acesso em: 13 de setembro de 2021.

DER/SP. DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **ES-P 16/18**: Pavimentação: brita graduada tratada com cimento. São Paulo, 2005. Disponível em: http://www.der.sp.gov.br/WebSite/Arquivos/normas/ET-DE-P00-007_B.pdf. Acesso em: 20 de julho de 2021.

DNIT. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE. **DNER-ME 195**: Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1997. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner_me_195_97.pdf. Acesso em: 20 de julho de 2021.

____. **DNIT 136-ME**: Pavimentação asfáltica – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2018a. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_136_2018_me-1.pdf. Acesso em: 22 de julho de 2021.

____. **DNIT 164-ME**: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_164_2013_me.pdf. Acesso em: 21 de julho de 2021.

____. **DNIT 181-ME**: Pavimentação – Material estabilizado quimicamente – Determinação do módulo de resiliência – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2018b. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_181_2018_me-2.pdf. Acesso em: 22 de julho de 2021.

DUREKOVIC, A. Cement pastes of low water to solid ratio: an investigation of the porosity characteristics under the influence of a superplasticizer and silica fume. *Cement and concrete research*, vol. 25, nº 2, p. 365-375, 1995.

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M. Agregados para construção civil. In: ISAIA; G. C. (org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 483-526.

FORNASIER, R. S. **Porosidade e permeabilidade do concreto de alto desempenho com microsilica**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

HAN, Z.; SHA, A.; HU, L.; WU, R.; LI, H. Full-scale investigation on the traffic load influence zone and its dimension for HMA layer in inverted pavement. **Construction and Building Materials**, 219, p. 19-30, 2019.

HASSAN, K. E.; CABRERA, J. G.; MALIEHE, R. S. The effect of mineral admixtures on the properties of high-performance concrete. **Cement & concrete composites**, 22, p. 267-271, 2000.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. Tese (Professor Livre Docente) – Universidade de São Paulo. Escola Politécnica, São Paulo, 1993. Disponível em: <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/TD1.pdf>. Acesso em: 15 de janeiro de 2022.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de cimento Portland. In: ISAIA; G. C. (org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 945-984.

JIANG, Y. J.; FAN, L. F. An investigation of mechanical behavior of cement-stabilized crushed rock material using different compaction methods. **Construction and Building Materials**, 48, p. 508-5150, 2013.

KLINSKY, L. M. G.; FARIA, V. C. **Estudo da influência do teor de cimento Portland, da energia de compactação e da umidade no comportamento mecânico da brita graduada tratada com cimento (BGTC) para duas gêneses de agregados**. 2015. Relatório elaborado para a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) – Centro de pesquisas rodoviárias (CPR), Concessionária CCR Nova Dutra, Grupo CCR, 2015. Disponível em: <https://portal.antt.gov.br/documents/359170/1033480/Estudo+da+Influ%C3%Aancia.pdf/06bd2a7c-1880-8f98-7aae-c26d8df0ee4d?t=1593212125880>. Acesso em: 21 de julho de 2021.

KLINSKY, L. M. G.; BARDINI, V. S. S.; FARIA, V. C. Comparativo entre as compactações proctor e vibratória na brita graduada tratada com cimento. In: 32º Congresso de pesquisa e ensino em transporte da ANPET, Gramado. **Anais [...]** Brasil, 2018. p. 2088-2097.

LEITE, H. R.; GIRARDI, R.; HASTENPFLUG, D. Durabilidade do concreto: análise dos requisitos dos materiais constituinte. **Revista de engenharias da faculdade salesiana**, 8, p. 14-25, 2018.

LIM, S.; ZOLLINGER, D. G. Estimation of the compressive strength and modulus of elasticity of Cement-Treated aggregate base materials. **Transportation Research Record**, v. 1837, n. 1, 2003.

MANDAL, T.; EDIL, T. B.; TIMJUM, J. M. Study on flexural strength, modulus, and fatigue cracking of cementitiously stabilized materials. **Road materials and pavement design**. 2017.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro. Editora: COPPE-UFRJ. 2ª edição, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais**. Rio de Janeiro: Editora IBRACON, v. 3, 2008.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003.

NASCIMENTO, R. S. **Estudo de desempenho à fadiga de base cimentada tipo BGTC na BR-101/SE**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2017.

NASCIMENTO, R. S; ALBUQUERQUE F. S. Estudo de desempenho à fadiga de base cimentada tipo BGTC na BR-101/SE. *TRANSPORTES*, 26(1), 157–171, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/transportes.v26i1.1358>.

NATIONAL INSTITUTE FOR TRANSPORT AND ROAD RESEARCH. Technical recommendations for highways: cementitious stabilizers in road construction. Pretoria, South Africa, 1986.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Porto Alegre: Bookman, 5ª edição, 2016.

NCHRP. NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Report 789**. Characterization of Cementitiously Stabilized Layers for Use in Pavement Design and Analysis. Washington, 2014.

OLIVEIRA I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R.G.; PANDOLFELLI, V.C. **Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico**. Ed. Fazendo Arte Editorial. São Paulo, SP. 224p., 2000.

OLSON INSTRUMENTS. **NDE 360**. 1 fotografia. Disponível em: olsoninstruments.com/data-platforms/nde-360-platform. Acesso em 23 de julho de 2021.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. São Paulo: Globo, 13ª edição, 1998.

PRADO, K. **Estudo de Critérios de dosagem para melhoria de desempenho mecânico de brita graduada tratada com cimento**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018. Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/12006>. Acesso em: 20 de julho de 2021.

PRADO, K.; ALBUQUERQUE, F. S.; ALMEIDA, G. B. de O. Influence of granulometry, cement content, and moisture in the mechanical performance of the cemented crushed stone. *TRANSPORTES*, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 81–98, 2020. DOI: 10.14295/transportes.v28i1.1861. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1861>. Acesso em: 27 set. 2021.

REIS, R. M.; TEIXEIRA, L. H.; CONSTANTINO, R.; OMENA, W. **Manual básico de emulsões asfálticas**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2001, 2ª edição, 2010.

SANTOS, A. V.; VIANA, M. M.; MEDEIROS, F. H. A.; MOHALLEM, N. D. S. O incrível mundo dos materiais porosos – características, propriedades e aplicações. **Química nova**. vol. 38, p. 4-11, 2015.

SAPEM. **South African Pavement Engineering Manual**. 2ª edição. South African National Roads Agency Soc Ltd. 2014.

SILVA, Cimento Portland com adições minerais. In: ISAIA; G. C. (org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 791-824.

SILVA, F. F.; FIUZA, G. F. S.; NEVES, L. H. S. S. B.; GOMES, G. J. C. Estudo da influência de cal hidratada na permeabilidade do concreto. **Revista Teccen**. 2018.

U.S. Department of Transportation. (2013-DRAFT). **Advisory Circular. Standards for Specifying Construction of Airports**. AC No. 150/5370-10G. United States. 2018.

WU, P. **Cement-bound road base materials**. Report 7-11-218-1. PoweCem Technologies. Delft University of Technology. Julho, 2011.

VIEIRA, G. L. **Influência da microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento**. 2008. Tese (Doutor em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/18291/000728116.pdf?sequence=1>

YEO, Y. S. **Characterisation of cement treated crushed rock basecourse for western australian roads**. 2011. Thesis (Doctor of philosophy of curtin university) – School of civil and mechanical engineering, 2011.

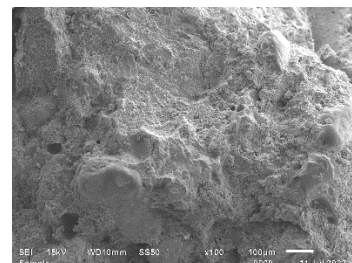
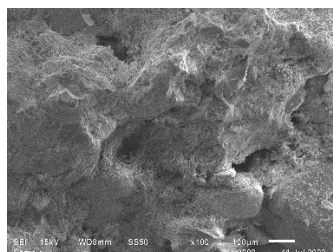
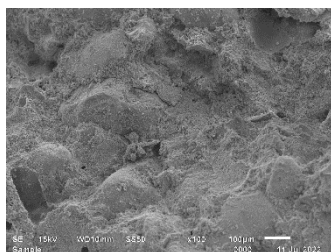
YEO, Y. S.; JITSANGIAM, P.; NIKRAZ, H. Mix design of cementitious basecourse. In: International Conference on Advances in Geotechnical Engineering, Perth, Australia. Anais [...] Australia, 2011. p. 379-385

XUAN, D. X.; HOUBEN, L. J. M.; MOLENAAR, A. A. A.; SHUI, Z. H. Mechanical properties of Cement-Treated aggregate material – A review. **Materials and Design**. 33. 2012.

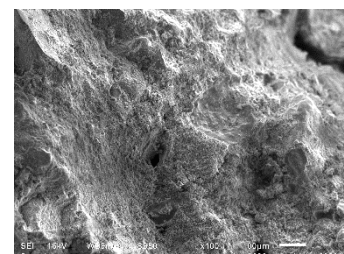
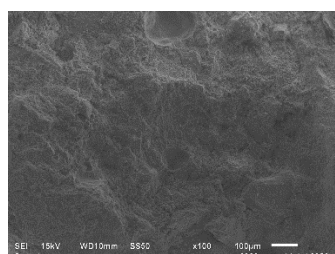
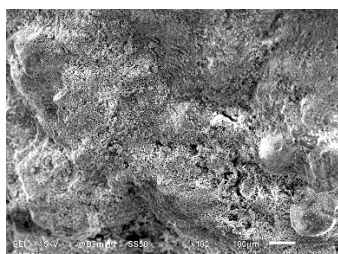
APÊNDICE A - IMAGENS DE MEV

100X

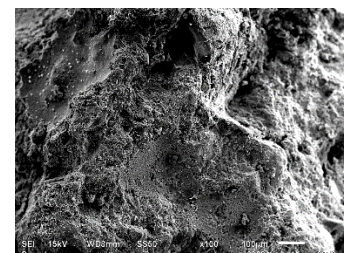
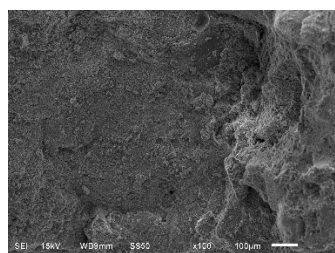
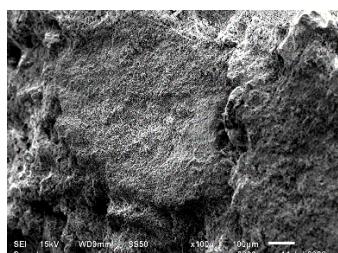
3% de CP II-F 32



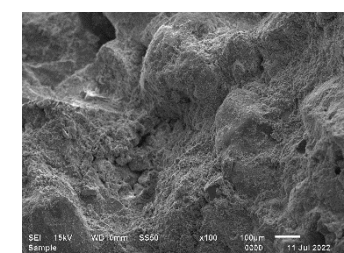
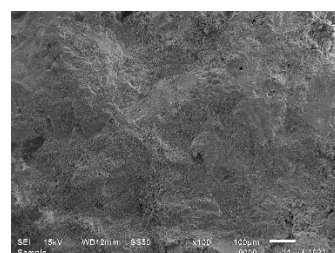
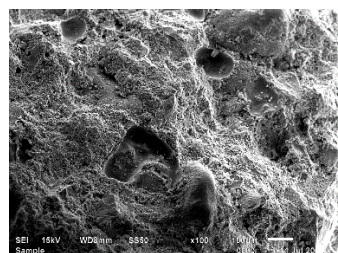
5% de CP II-F 32



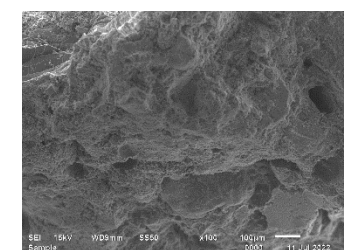
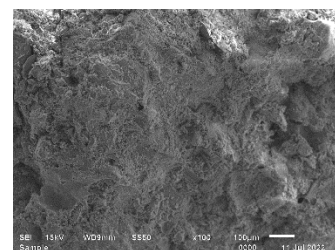
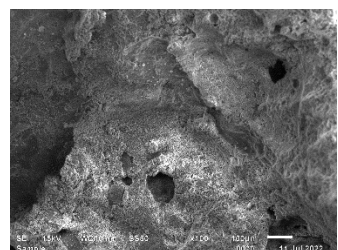
3% de CP IV 32 RS



5% de CP IV 32 RS

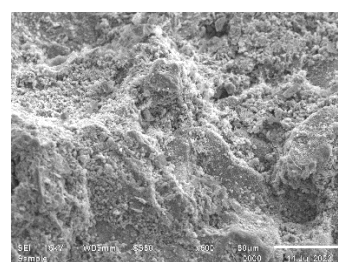
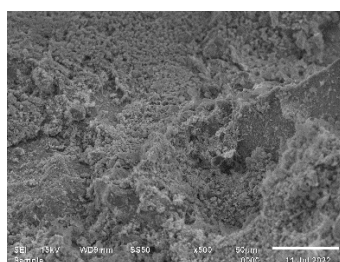
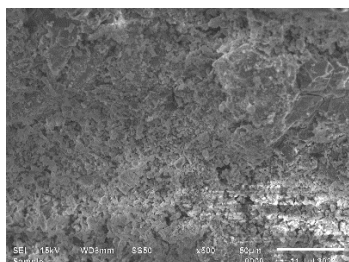


3% de CP II-F 32 + 0,50% de RR-1C

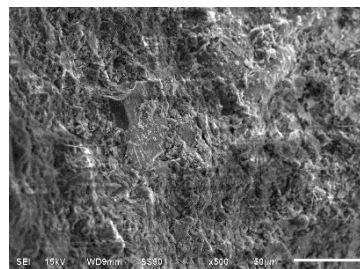
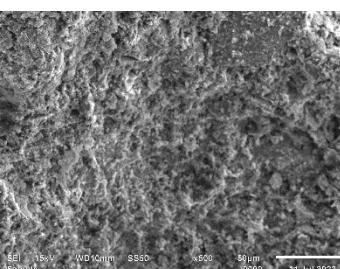
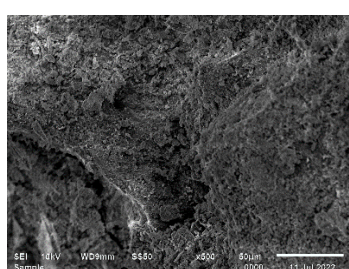


500X

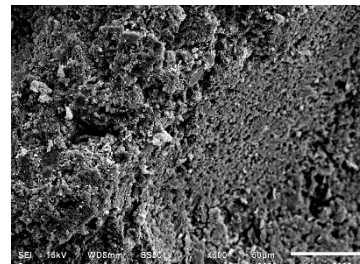
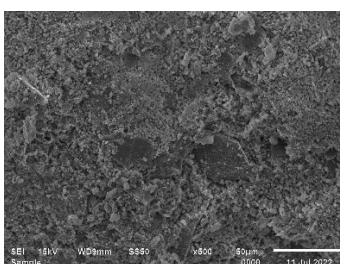
3% de CP II-F 32



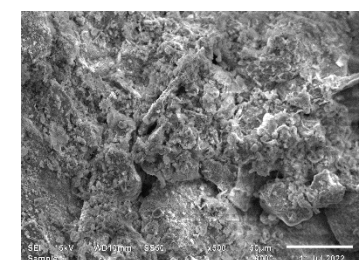
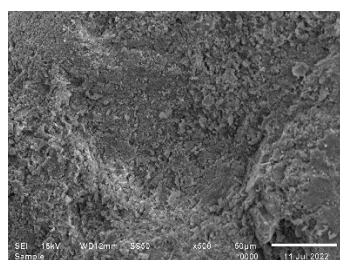
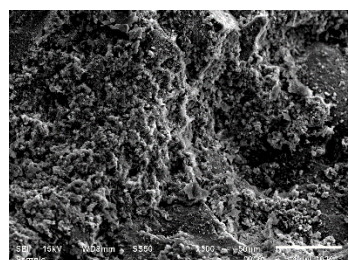
5% de CP II-F 32



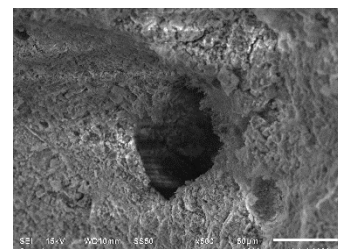
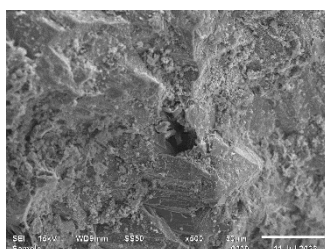
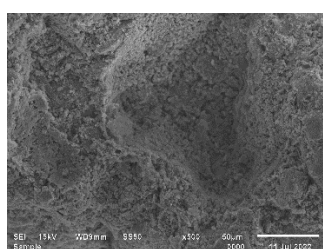
3% de CP IV 32 RS



5% de CP IV 32 RS

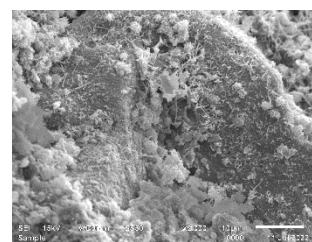
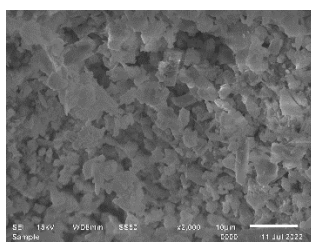
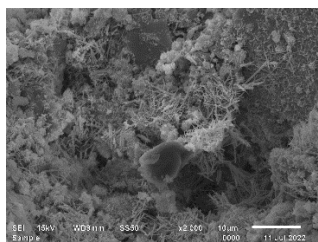


3% de CP II-F 32 + 0,50% de RR-1C

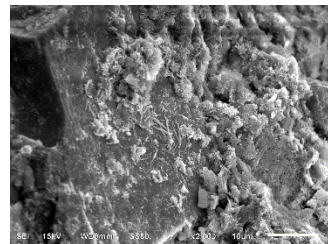
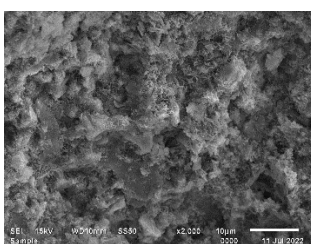
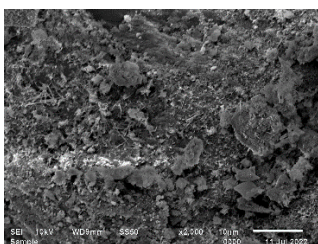


2000X

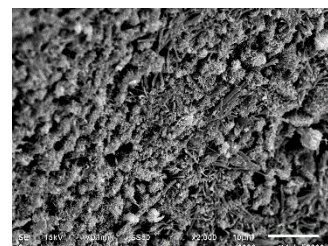
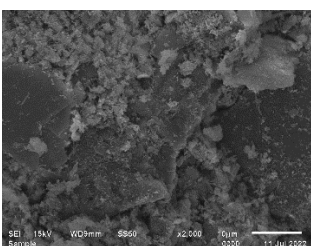
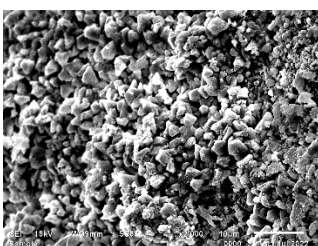
3% de CP II-F 32



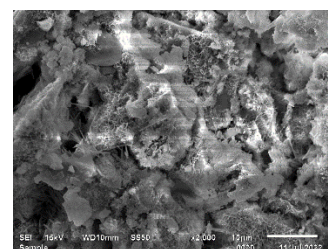
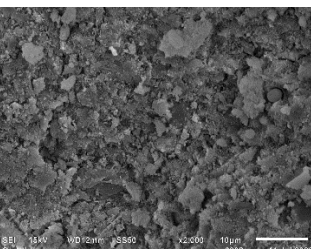
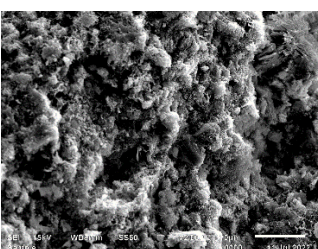
5% de CP II-F 32



3% de CP IV 32 RS



5% de CP IV 32 RS



3% de CP II-F 32 + 0,50% de RR-1C

