

PLANO DE TRABALHO

Recursos para Desenvolvimento Tecnológico - RDT

Capítulo XX do Edital 02, Lote 05, item 10 do PER

Rodovia BR 381 – Trecho Belo Horizonte - São Paulo

PROJETO 05 - SGP/AFD_05 REV.00

**AVALIAÇÃO LABORATORIAL E EM PISTA DA TECNOLOGIA DE RECICLAGEM A FRIO IN SITU COM
USO DE EMULSÃO ASFÁLTICA E COM CIMENTO PARA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS**



RELATÓRIO DE FINAL

FEVEREIRO – 2014

SUMÁRIO

1. CONCESSIONÁRIA	13
2. DESCRIÇÃO DO PROJETO.....	13
2.1. TÍTULO DO PROJETO	13
2.2. OBJETIVOS	13
3. JUSTIFICATIVA	14
4. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	16
4.1. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS	17
4.2. ATIVIDADES	17
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
5.1. RECICLAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	18
5.2. RECICLAGEM DE BASE COM CIMENTO PORTLAND	20
5.2.1. Caracterização de misturas recicladas com cimento	21
5.2.2. Umidade ótima	22
5.2.3. Tempo de cura	23
5.3. RECICLAGEM A FRIO COM EMULSÃO ASFÁLTICA	24
5.3.1. Emulsão asfáltica	26
5.3.2. Produção de misturas recicladas a frio com emulsão	27
5.3.3. Estruturas com camadas recicladas	28
5.4. ESTRUTURA DE PAVIMENTOS.....	29
6. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DA PESQUISA	32
6.1. CARACTERÍSTICAS DA AUTOPISTA FERNÃO DIAS	32
6.2. PROJETO DE MISTURAS.....	35
6.2.1. Reciclagem com cimento Portland	35
6.2.2. Reciclagem com emulsão asfáltica	37
7. EXECUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL	39
8. ESTUDOS LABORATORIAIS	47
8.1. RECICLADO COM CIMENTO	47
8.1.1. Caracterização do material.....	48

8.1.2.	Projeto de mistura	51
8.1.2.1.	Avaliações adicionais com o material 2.....	65
8.1.2.2.	Avaliação dos métodos de ensaio de ruptura	75
8.2.	RECICLADO COM EMULSÃO	81
8.2.1.	Caracterização do material.....	81
8.2.2.	Projeto da mistura	83
8.2.3.	Comportamento mecânico.....	87
8.2.4.	Compactação Marshall	89
8.2.5.	Compactação Proctor	113
9.	MONITORAMENTO DO TRECHO EXPERIMENTAL	165
9.1.	TRECHO EXPERIMENTAL.....	165
9.1.1.	Condição superficial.....	165
9.1.2.	Condição estrutural	168
9.2.	RECICLADO COM CIMENTO	181
9.3.	RECICLADO COM EMULSÃO	198
10.	CONCLUSÕES FINAIS	200
10.1.	ESTUDOS LABORATORIAIS	201
10.2.	TRECHO EXPERIMENTAL.....	206
10.3.	CONTRIBUIÇÃO PARA A ENGENHARIA RODOVIÁRIA.....	207
11.	ENTIDADE OU EQUIPE EXECUTORA	208
12.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	209
ANEXO A		215

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Variação dos materiais que compõem as camadas de base da rodovia, encontrados por sondagem	33
Tabela 2 – Resultados da classificação dos solos	50
Tabela 3 – Composição granulométrica dos agregados na mistura	52
Tabela 4 - Resultados da comparação entre os dois materiais	55
Tabela 5 – Umidade Ótima para as misturas com o Material 2	65
Tabela 6 – Relação água/cimento das misturas ensaiadas	69
Tabela 7 – Composição dos CPs do Grupo 1	84
Tabela 8 – Parâmetros volumétricos das amostras do Grupo 1	85
Tabela 9 – Composição dos CPs do Grupo 2	86
Tabela 10 – Parâmetros volumétricos das amostras do Grupo 2	87
Tabela 11 – Resultados mecânicos para as amostras do Grupo 1	88
Tabela 12 – Resultados mecânicos para as amostras do Grupo 2	89
Tabela 13 - Porcentagens de MR e RT retidos.....	102
Tabela 14 – Misturas testadas no estudo da variação do teor de ligante hidráulico	103
Tabela 15 – Teor de água na emulsão asfáltica utilizada	115
Tabela 16 – Procedimentos de cura de misturas recicladas em diferentes trabalhos	116
Tabela 17 – Resultados de RCS para as misturas com diferentes teores de emulsão	122
Tabela 18 – Resultados de RCS para as misturas com diferentes temperaturas de cura.....	126
Tabela 19 – Resultados de RCS para as misturas com diferentes teores de cimento	131
Tabela 20 – Resultados de RCS para as misturas com diferentes teores de água	142
Tabela 21 – Valores de energia dissipada no ensaio de RCS (variação no teor de emulsão)	144
Tabela 22 – Massa específica seca para as misturas com tempos de cura variáveis	146
Tabela 23 – Valores médios de MR para os diferentes tempos de cura.....	152
Tabela 24 – Valores médios de RT para os diferentes tempos de cura	153
Tabela 25 – Valores médios de RCS para os diferentes tempos de cura	155
Tabela 26 – Valores de massa específica para as diferentes configurações de cura acelerada	159

Tabela 27 – Valores médios de RT para as diferentes configurações de cura acelerada	160
Tabela 28 – Resultados dos ensaios de micro e macrotextura	168
Tabela 29 - Resultados de MR por Retroanálise (20cm)	169
Tabela 30 - Resultados de MR por Retroanálise (25cm)	170
Tabela 31 - Resultados de MR por retroanálise (30cm)	171
Tabela 32 – Resultados de MR através da retroanálise	176
Tabela 33 – Resultados dos ensaios de ultrassom (CPs extraídos após 7 e 8 meses da execução).....	183
Tabela 34 – Resultados dos ensaios de ultrassom (CPs extraídos após 2 anos da execução)	184
Tabela 35 - Resultados de MR triaxial (primeira e segunda coletas)	185
Tabela 36 - Resultados de MR triaxial (terceira coleta)	186
Tabela 37 – Resultados de ensaio de ME (primeira e segunda coletas)	188
Tabela 38 – Resultados de ensaio de ME (terceira coleta)	188
Tabela 39 – Resultados de ensaio de RT (segunda coleta)	196
Tabela 40 – Resultados de ensaio de RT (terceira coleta)	197
Tabela 41 - Resultados de ensaio de resistência à compressão (primeira e segunda coletas)	197
Tabela 42 - Resultados de ensaio de resistência à compressão (terceira coleta).....	197

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Diferentes aplicações de agregados fresados, com ênfase nos tipos de reciclagem a frio.....	19
Figura 2 – Processo de hidratação do cimento (Modificado de Mehta e Monteiro, 2008).....	23
Figura 3 – Pavimento flexível.....	30
Figura 4 – Pavimento rígido.....	30
Figura 5 – Pavimento semi-rígido.....	31
Figura 6 – Pavimento Invertido	32
Figura 7 – Variação da tensão de tração na camada reciclada com cimento	33
Figura 8 – Esquema da distribuição do trecho experimental com variação nas espessuras da camada reciclada com cimento	34
Figura 9 – Resultados de: (a) RT e (b) RCS da mistura reciclada com cimento	36
Figura 10 – Resultados de RT em amostras de mistura reciclada com emulsão	38
Figura 11 – Resultados de MR para a mistura reciclada com emulsão.....	39
Figura 12 – Esquema do trecho experimental	40
Figura 13 – (a) Material proveniente da fresagem e (b) trecho após a fresagem	41
Figura 14 – (a) Distribuição do cimento e (b) trecho após a distribuição	42
Figura 15 – (a) Distribuição da água pelo equipamento reciclador e (b) painel de controle do equipamento reciclador	42
Figura 16 – (a) Equipamento reciclador e (b) detalhe do equipamento.....	43
Figura 17 – (a) Medição da profundidade da camada, (b) compactação da camada reciclada com cimento e (c) finalização da camada reciclada com cimento.....	44
Figura 18 – (a) Revestimento danificado sendo fresado e (b) usina de produção do reciclado com emulsão asfáltica	45
Figura 19 – (a) Aplicação da mistura reciclada e (b) trecho após a aplicação da camada reciclada.....	46
Figura 20 – Compactação da camada reciclada com emulsão.....	46
Figura 21 – Materiais empregados no estudo: (a) material 1 e (b) material 2	47
Figura 22 – Ensaio de granulometria: (a) peneiras e (b) material fracionado para pesagem..	48

Figura 23 – Distribuição granulométrica do material.....	49
Figura 24 – (a), (b) Ensaio de contração e (c) ensaio de penetração	50
Figura 25 – Determinação da umidade do material: (a) material úmido, (b) material secando na estufa e (c) estufa de secagem	51
Figura 26 – Compactação dos CPs: (a) molde e sotaque, (b) CP no ramo seco e (c) CP no ramo úmido.....	53
Figura 27 – Curvas obtidas com o ensaio de compactação (energia intermediária)	54
Figura 28 – Ensaio de RT: (a) equipamento e posicionamento do CP e (b) CP rompido	56
Figura 29 – Resultados de RT com cura.....	57
Figura 30 – Resultados de RT para a variação da energia de compactação	59
Figura 31 – CP rompido após ensaio de RCS	60
Figura 32 – Resultado do ensaio de RCS	60
Figura 33 – Variação da resistência à tração com a cura	61
Figura 34 – Variação da resistência à compressão com a cura	62
Figura 35 – Avaliação da cura do material cimentado	64
Figura 36 – Curva de compactação para o material 2 (energia intermediária)	66
Figura 37 – Curva de compactação para o material 2 (energia modificada)	66
Figura 38 – Resultados de RT (variação nos teores de cimento)	68
Figura 39 – Resultados de resistência à compressão - Variação de teores de cimento	69
Figura 40 – Resultados de MR (variação de teores de cimento).....	70
Figura 41 – Resultados de MR (5% de cimento).....	71
Figura 42 – Resultados de MR (6% de cimento).....	71
Figura 43 – Resultados de MR (7% de cimento).....	72
Figura 44 – Resultados de MR (28 dias de cura)	73
Figura 45 – Resultados de RT (variação na energia de compactação)	74
Figura 46 – Resultados de resistência à compressão (variação na energia de compactação)	74
Figura 47 – Ilustração do plano de compactação e do plano de ensaios de RT e de RCS.....	75
Figura 48 – Comparativo entre métodos de ensaio de RT	77
Figura 49 – Comparativo entre métodos de ensaio de RCS.....	78
Figura 50 – Curva tensão × deformação para CPs com 7 dias de cura.....	80

Figura 51 – Curva tensão × deformação para CPs com 28 dias de cura	80
Figura 52 – Distribuição granulométrica do material fresado	81
Figura 53 – Ensaio de caracterização física do fresado: (a) abrasão Los Angeles e (b) índice de forma	82
Figura 54 – CP embalado para pesagem imersa	91
Figura 55 – Resultados de porcentagem de vazios (2% de emulsão)	91
Figura 56 – Resultados de porcentagem de vazios (3% de emulsão)	92
Figura 57 – Resultados de porcentagem de vazios (4% de emulsão)	92
Figura 58 – Porcentagens de vazios vs. teor de emulsão	93
Figura 59 – Ensaio de MR	94
Figura 60 – Resultados de MR (2% de emulsão)	95
Figura 61 – Resultados de MR (3% de emulsão)	95
Figura 62 – Resultados de MR (4% de emulsão)	96
Figura 63 – MR versus teor de emulsão	96
Figura 64 – Ensaio de RT	97
Figura 65 – Resultados de RT (2% de emulsão)	98
Figura 66 – Resultados de RT (3% de emulsão)	98
Figura 67 – Resultados de RT (4% de emulsão)	99
Figura 68 – RT versus teor de emulsão	100
Figura 69 – CPs em condicionamento	101
Figura 70 – Resultados MR retido	102
Figura 71 – Resultados de RT retida	102
Figura 72 – Volume de Vazios em função do teor de cimento	104
Figura 73 – Volume de Vazios em função do teor de cal	105
Figura 74 – Volume de Vazios em função do teor de cimento + cal	106
Figura 75 – Instrumentação para ensaio de MR	106
Figura 76 – MR em função do teor de cimento	107
Figura 77 – MR em função do teor de cal	108
Figura 78 – MR em função do teor de cimento + cal	108
Figura 79 – Instrumentação para o ensaio de RT	109

Figura 80 – RT em função do teor de cimento	110
Figura 81 – RT em função do teor de cal	110
Figura 82 – RT em função do teor de cimento + cal	111
Figura 83 – Força × deslocamento (adição de cimento)	112
Figura 84 – Força × deslocamento (adição de cal)	112
Figura 85 – Força × deslocamento (adição de cimento + cal)	113
Figura 86 – Matriz experimental da dosagem do material reciclado com compactação Proctor	114
Figura 87 – Distribuição granulométrica do material fresado	115
Figura 88 – Curvas de compactação para as misturas (energia modificada)	118
Figura 89 – CPs com variação de teor de água	119
Figura 90 – Variação da umidade com a cura (2% de emulsão)	120
Figura 91 – Variação da umidade com a cura (3% de emulsão)	120
Figura 92 – Variação da umidade com a cura (4% de emulsão)	121
Figura 93 – Valores de RCS para as misturas com 2% de emulsão	122
Figura 94 – Valores de RCS para as misturas com 3% de emulsão	123
Figura 95 – Valores de RCS para as misturas com 4% de emulsão	123
Figura 96 – Curvas de compactação para as misturas com variação da temperatura de cura	124
Figura 97 – Perda de umidade (25°C)	125
Figura 98 – Perda de umidade (40°C)	126
Figura 99 – Valores de RCS para as misturas a 25°C	127
Figura 100 – Valores de RCS para as misturas a 40°C	127
Figura 101 – Curvas de compactação para as misturas com variação do teor de cimento ...	128
Figura 102 – Perda de umidade (0% de cimento)	129
Figura 103 – Perda de umidade (1% de cimento)	130
Figura 104 – Perda de umidade (2% de cimento)	130
Figura 105 – Valores de RCS para as misturas com 0% de cimento	132
Figura 106 – Valores de RCS para as misturas com 1% de cimento	132
Figura 107 – Valores de RCS para as misturas com 2% de cimento	133

Figura 108 – Valores de RCS × valores de massa específica.....	134
Figura 109 – Gráficos obtidos no ensaio de RCS (variação no teor de emulsão).....	135
Figura 110 – Gráficos obtidos no ensaio de RCS (variação na temperatura de cura).....	135
Figura 111 – Gráficos obtidos no ensaio de RCS (variação no teor de cimento)	136
Figura 112 – Valores de energia dissipada durante o ensaio de RCS (variação no teor de emulsão)	137
Figura 113 – Valores de energia dissipada durante o ensaio de RCS (variação na temperatura de cura).....	138
Figura 114 – Valores de energia dissipada durante o ensaio de RCS (variação no teor de cimento).....	139
Figura 115 – Aspectos das misturas com 1% de cimento e sem emulsão	140
Figura 116 – Curvas de compactação para a mistura sem emulsão (energia modificada)....	140
Figura 117 – Variação da umidade com a cura (0% de emulsão)	141
Figura 118 – Valores de RCS para as misturas com 0% de emulsão	142
Figura 119 – Valores de RCS para variação no teor de emulsão e no teor de água	143
Figura 120 – Gráficos obtidos no ensaio de RCS (variação no teor de emulsão).....	144
Figura 121 – CPs moldados em laboratório sendo submetidos ao processo de cura a temperatura controlada (25°C)	146
Figura 122 – Valores médios de massa específica seca em função do tempo de cura	146
Figura 123 – Variação da umidade com a cura (7 dias).....	147
Figura 124 – Variação da umidade com a cura (28 dias).....	147
Figura 125 – Variação da umidade com a cura (60 dias).....	148
Figura 126 – Variação da umidade com a cura (90 dias).....	148
Figura 127 – Ensaio de MR: (a) preparação do CP, (b) colocação da membrana, (c) CP pronto para o ensaio e (d) realização do ensaio	149
Figura 128 – MR vs. tensão confinante (7 dias)	150
Figura 129 – MR vs. tensão confinante (28 dias)	150
Figura 130 – MR vs. tensão confinante (60 dias)	151
Figura 131 – MR vs. tensão confinante (90 dias)	151
Figura 132 – Ensaio de RT: (a) início do ensaio e (b) CP rompido após término do ensaio...	153

Figura 133 – RT vs. tempo de cura	153
Figura 134 – RT vs. massa específica e umidade final	155
Figura 135 – RCS vs. tempo de cura	156
Figura 136 – RCS vs. massa específica e umidade final	157
Figura 137 – Valores médios de massa específica seca em função do tempo e da temperatura de cura	159
Figura 138 – Valores médios de massa específica seca em função do tempo e da temperatura de cura	160
Figura 139 – RT vs. tempo de cura acelerada para cada temperatura	161
Figura 140 – RT vs. massa específica e umidade final	162
Figura 141 – Cura convencional vs. cura acelerada	163
Figura 142 – MR (Marshall) vs. MR (Proctor)	164
Figura 143 – RT (Marshall) vs. RT (Proctor)	165
Figura 144 – (a) trecho experimental e (b) levantamento visual	166
Figura 145 – Ensaio de microtextura (pêndulo britânico)	167
Figura 146 – Ensaio de mancha de areia: (a) realização do ensaio e (b) medição da circunferência	167
Figura 147 – Resultados de Ensaio FWD	169
Figura 148 – Aproximação da bacia de deflexões obtida por retroanálise (20 cm)	170
Figura 149 – Aproximação da bacia de deflexões obtida por retroanálise (25 cm)	171
Figura 150 – Aproximação da bacia de deflexões obtida por retroanálise (30 cm)	172
Figura 151 – Segundo levantamento deflectométrico (segmento de 20cm)	173
Figura 152 – Segundo levantamento deflectométrico (segmento de 25cm)	173
Figura 153 – Segundo levantamento deflectométrico (segmento de 30cm)	174
Figura 154 – Bacias de deflexão médias (primeiro e segundo levantamentos)	174
Figura 155 – Bacias deflectométricas (terceiro levantamento)	175
Figura 156 – Aproximação da bacia deflectométrica obtida por retroanálise (20cm)	176
Figura 157 – Aproximação da bacia deflectométrica obtida por retroanálise (25cm)	177
Figura 158 – Aproximação da bacia deflectométrica obtida por retroanálise (30cm)	177
Figura 159 – Bacias deflectométricas (20cm de reciclado com cimento)	178

Figura 160 – Bacias deflectométricas (25cm de reciclado com cimento).....	178
Figura 161 – Bacias deflectométricas (30cm de reciclado com cimento).....	179
Figura 162 – Ilustração da superfície dos três segmentos avaliados no trecho experimental (a) 20cm, (b) 30cm e (c) 25cm	180
Figura 163 – Extração dos CPs da pista	181
Figura 164 – Ensaio de ultrassom.....	183
Figura 165 – Ensaio de MR nas amostras de Reciclado com Cimento	184
Figura 166 – CPs extraídos de pista para ensaio de MR.....	186
Figura 167 – Ensaio de ME	187
Figura 168 – Correlação entre o ensaio de ultrassom e o ensaio de MR.....	190
Figura 169 – Correlação entre o ensaio de ultrassom e o ensaio de ME.....	190
Figura 170 – Comparação entre MR e ME (primeira coleta)	191
Figura 171 – Comparação entre MR e ME (segunda coleta).....	192
Figura 172 – Comparação entre MR e ME (terceira coleta).....	193
Figura 173 – Exemplo de ensaio de MR	194
Figura 174 – Exemplo de ensaio de ME.....	195
Figura 175 – Instrumentação do Ensaio de RT por compressão diametral	196
Figura 176 - Resultados de MR para CPs de reciclado com emulsão de pista	199
Figura 177 - Resultados de RT para os CPs de reciclado com emulsão de pista	200

1. CONCESSIONÁRIA

Autopista Fernão Dias

2. DESCRIÇÃO DO PROJETO

2.1. TÍTULO DO PROJETO

Avaliação Laboratorial e em Pista da Tecnologia de Reciclagem a Frio in situ com Uso de Emulsão Asfáltica e com Cimento para Reabilitação de Pavimentos

2.2. OBJETIVOS

Objetivo geral

O objetivo central desta pesquisa é analisar o benefício estrutural, por meio da redução de deflexões, e o comportamento geral de pavimentos através da construção de camadas recicladas a frio com o uso de emulsão asfáltica modificada por polímero e de aditivo como o cimento e a cal, aqui denominada de reciclagem com emulsão, e de camadas de base recicladas in situ com o uso de cimento Portland, aqui denominadas de reciclagem com cimento.

Para tanto, foram realizados ensaios em laboratório com materiais coletados em campo e testes em pista em trechos experimentais construídos na Autopista Fernão Dias, onde as duas soluções de reciclagem são empregadas. Foram avaliadas as diferenças de respostas deflectométricas e de deterioração das camadas recicladas. Objetiva-se, através dos resultados obtidos, auxiliar na definição de parâmetros de projeto destas camadas e de contribuir com as especificações para construção destas soluções.

Objetivos específicos

Tendo em vista o projeto de pesquisa realizado na Autopista Régis Bittencourt com o uso da reciclagem a frio in situ com emulsão, alguns pontos ficaram com necessidade de resposta, ou de complementação de estudos. Observou-se a necessidade de melhor discutir, delinear e estabelecer critérios para os projetos de dosagem de misturas recicladas. Para tanto, propõe-se estudar mais a fundo as diretrizes dos projetos de dosagem e, entre outros:

- Investigar a influência da variação nos teores dos diferentes constituintes dessas misturas, como emulsão asfáltica e cimento/cal, na definição do seu teor ótimo de umidade;
- Investigar a influência da quantidade de água adicionada às misturas em seu comportamento mecânico e em suas propriedades de estado;
- Estudar diferentes métodos de compactação, avaliando a sensibilidade dos métodos à variação da composição das misturas;
- Entender a variação do comportamento mecânico das misturas recicladas através de diferentes processos de cura, variando-se o tempo e a temperatura;
- Tentar propor método de compactação e cura para o projeto de misturas asfálticas recicladas a frio com emulsão;
- Avaliar, em laboratório, os materiais reciclados com cimento e entender a variação de comportamento mecânico com o tempo de cura e os teores de cimento;
- Estudar a influência da energia de compactação utilizada para esse tipo de mistura cimentada;
- Compreender as relações campo × laboratório de parâmetros de rigidez, como módulo de resiliência, das misturas recicladas com cimento para uso deste parâmetro nos projetos de dimensionamento e de reforço;
- Analisar dados de deflexões obtidos de avaliações estruturais em campo para estudar o processo de deterioração das camadas cimentadas;
- Analisar dados das bacias deflectométricas obtidos através da avaliação em campo para estudar a aplicabilidade e a limitação dos métodos de reforço com o uso dos materiais reciclados.

3. JUSTIFICATIVA

Muitos esforços têm sido realizados no desenvolvimento de tecnologias com menor impacto ambiental e que não sacrifiquem a qualidade dos materiais empregados nas obras de engenharia, tampouco a durabilidade da infraestrutura construída. As pesquisas direcionadas à reutilização de materiais são capazes de fornecer um maior valor técnico a eles. Antes, esses materiais seriam descartados, porém agora podem ser utilizados em

substituição à matéria-prima virgem. As pesquisas e a utilização dos materiais provenientes de pavimentos degradados se intensificaram na década de 1970 em função da crise econômica e do petróleo (ASCE, 2006). O material fresado, ou RAP (do inglês *Reclaimed Asphalt Pavement*), tem encontrado ampla aplicabilidade na composição de diferentes misturas asfálticas e, mais recentemente, a adição de cimento nessas misturas tem sido feita em maiores quantidades, objetivando a obtenção de materiais com maior rigidez.

Esse panorama reflete a necessidade da reutilização de materiais e, por conseguinte a necessidade de pesquisas de processos, métodos e materiais atuais. As condições de aplicabilidade dos itens pesquisados dependem de uma série de fatores que levam a soluções adequadas. Entre esses fatores, encontram-se: a disponibilidade de material, as características dos pavimentos, ou camadas, a serem reciclados, a consagração de métodos de aplicação, os fatores de impacto ambiental e as questões políticas.

Desde que foi assinado o Protocolo de Kyoto em 1997, muitos países se comprometeram a reduzir os impactos ambientais de suas atividades, forçando a incorporação de medidas sustentáveis e conduzindo à criação de normatizações regionais de controle destes impactos. Dentre os principais objetos de exploração que podem ser usados para atender às normas de proteção ambiental, estão os materiais reciclados, provenientes de diversas fontes. Os revestimentos asfálticos envelhecidos figuram neste contexto, como fornecedor de materiais agregados valiosos, que dependendo de sua forma de reuso, podem promover vários benefícios para atender estas metas de redução dos impactos.

Conforme pesquisa editada pela ARRA (2001), a restauração dos pavimentos asfálticos é normalmente obtida através da adição de novas camadas de material asfáltico, com ou sem a retirada das camadas deterioradas. Os agregados usualmente utilizados na indústria da pavimentação são regularmente extraídos de minas, iniciando um ciclo de produção e transporte com profundos impactos ambientais, sem mencionar ainda os custos destes processos, que segundo o MnDOT (2000), são entre 50 e 60% maiores do que processos que contemplam algum tipo de reciclagem.

Na outra extremidade, estão os pavimentos envelhecidos, compostos por agregados em formas diversas, que ora são recobertos por camadas sucessivas de materiais novos, ora são extraídos e conduzidos a medidas paliativas e ineficientes de destinação. Contudo, a empregabilidade destes materiais agregados que antes seriam descartados tem aumentado com o desenvolvimento de novas técnicas de produção de misturas asfálticas e de misturas com cimento. Existe grande dificuldade em contabilizar os benefícios ambientais e operacionais, apesar de evidentes; esses benefícios se refletem na escolha por técnicas de execução mais eficientes que têm sido cada vez mais empregadas por agências de transporte, empresas e concessões.

Das técnicas de processamento deste material, destaca-se no presente projeto de pesquisa a reciclagem a frio de revestimentos asfálticos com uso de emulsão e a reciclagem de base in situ com adição de cimento. Ambos os métodos utilizam materiais agregados extraídos pavimentos deteriorados, com processamento em temperatura ambiente, gerando misturas capazes de suportar os esforços do tráfego e as condições climáticas locais.

Esta pesquisa vai ao encontro de necessidades de desenvolvimento tecnológico sustentável e eficiente, ponderando os parâmetros que concernem à reciclagem a frio de pavimentos asfálticos envelhecidos, buscando uma restauração que traga melhoria estrutural e funcional.

4. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Este projeto prevê, inicialmente, a realização de testes em laboratório, no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LTP-EPUSP) e no Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Arteris (CDT-Arteris), com o uso de materiais coletados em pista provenientes das restaurações e reforços de pavimentos que vêm sendo executados na Autopista Fernão Dias. Foi proposta a construção de trechos experimentais com soluções alternativas àquelas encontradas em projeto, em níveis hierárquicos, concernentes à deflexão de projeto do trecho antes da restauração.

Após a execução e o acompanhamento do controle tecnológico dos trechos, avaliações estruturais e funcionais foram coordenadas pelo CDT-Arteris, e analisados pelo LTP-EPUSP em conjunto com o CDT-Arteris, de forma a atingir os objetivos propostos neste projeto de pesquisa.

4.1. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS

Os ensaios em laboratório e em pista foram realizados com base em especificações da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e AFNOR-CEN (*Association Française de Normalisation - Comité Européen de Normalisation*).

4.2. ATIVIDADES

Esta pesquisa foi concebida para ser realizada através das seguintes atividades:

- Pesquisa bibliográfica;
- Definição das estruturas de pavimentos a serem construídas como o trecho experimental. Os trechos foram selecionados a partir do projeto original de restauração, dos resultados de deflexão e visita à rodovia. Esta definição foi feita pelo CDT-Arteris e LTP-EPUSP em comum acordo;
- Realização de coleta de material fresado em pista para pesquisa laboratorial;
- Caracterização de material fresado em laboratório e realização de ensaios de dosagem com emulsão modificada por polímero. Realização de ensaios de módulo de resiliência expondo à cura por períodos diferentes;
- Caracterização de material fresado em laboratório e realização de ensaios de resistência à compressão e à tração, além de módulo de resiliência da mistura com cimento, expondo à cura por períodos diferentes;
- Acompanhamento e controle tecnológico da obra;
- Análise de dados da pesquisa de laboratório, dos dados coletados na obra e de monitoramento dos trechos quanto às deflexões, e quanto ao levantamento de defeitos e condições de superfície;

- Análise de dados para a definição de parâmetros de projeto de dimensionamento de reforços de pavimentos para camadas recicladas com emulsão e camadas recicladas com de cimento;
- Relatórios Técnicos.
- Conclusões a respeito das investigações realizadas

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1. RECICLAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

A restauração por meio de reciclagem configura o reaproveitamento total ou parcial de camadas já existentes, que são submetidas a um processo de mistura em equipamento apropriado, compondo uma nova mistura homogênea, podendo haver a adição de novos elementos. Esse processo tem como principal objetivo reaplicar a camada destinada a resistir aos esforços do tráfego e condições ambientais.

A gestão de resíduos sólidos é um problema de grande proporção, agravado pela expansão das cidades. Além do espaço físico exigido pelo grande volume de resíduos, existe a preocupação com a contaminação do meio ambiente, incluindo contaminação do solo e contaminação de lençol freático por metais pesados, entre outros. Os resíduos de construção civil representam uma parcela significativa neste cenário, incluindo-se nesta denominação o resíduo proveniente dos serviços de pavimentação. O uso do RAP encontra ampla aplicabilidade na composição de diferentes misturas asfálticas, conforme se verifica na Figura 1.

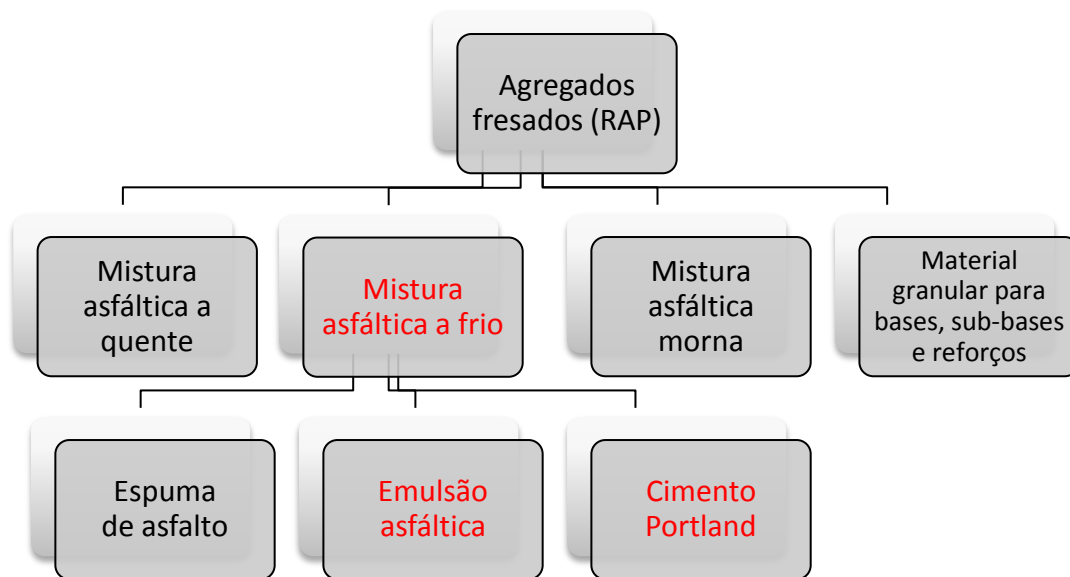


Figura 1 – Diferentes aplicações de agregados fresados, com ênfase nos tipos de reciclagem a frio

Entre os benefícios que podem ser associados ao uso de material fresado em misturas asfálticas, alguns foram citados (Alkins et al., 2008): otimização do uso de recursos naturais, redução no consumo de energia, redução na emissão de gases, menor emissão de poluentes, contribuindo, portanto, para melhorias nas questões relativas à saúde, meio ambiente e prevenção de riscos.

Uma extensa lista de defeitos pode ser corrigida ou mitigada com a aplicação da técnica de reciclagem, segundo o MnDOT (2000), sendo o principal deles a redução da reflexão de trincas proveniente de revestimentos asfálticos envelhecidos, já que este é um importante e comum defeito em pavimentos. A reciclagem corrige também defeitos como desagregação de origem não estrutural, deformação permanente de misturas asfálticas por problemas de dosagem, corrugação, escorregamento, defeitos de superfície e exsudação. Rogge e Hicks (1993) indicam a reciclagem para pavimentos com recapeamentos sucessivos, para combater problemas de drenagem, de insuficiência de agregados na região, ou de alinhamento vertical e horizontal.

5.2. RECICLAGEM DE BASE COM CIMENTO PORTLAND

A reconstrução/reparo profunda de pavimentos é uma técnica onde a intervenção não ocorre apenas na camada de revestimento e sim nas camadas subjacentes, podendo atingir a base, sub-base e mesmo as camadas de reforço do subleito, com substituições do solo de fundação em alguns casos. Consiste na retirada e na rebitagem de material deteriorado até a camada de interesse e posterior mistura e recompactação do material, representando uma nova camada de base ou sub-base; por fim, executa-se nova camada de revestimento configurando-se o fim da reconstrução (ARRA, 2001).

A utilização do cimento Portland na estabilização de bases tem sido amplamente estudada, com verificações de melhora das propriedades mecânicas de RT e RCS das misturas, além de elevar o módulo elástico da camada. Experimentos mostram que a capacidade de distribuição de esforços de 10cm de camada cimentada pode equivaler a 25cm de brita graduada simples (BGS), tornando essas camadas uma alternativa eficiente (Balbo, 1993).

Quando um aglomerante hidráulico é utilizado na camada de base, tem-se um pavimento semirrígido com comportamento mecânico muito semelhante àqueles de base em brita graduada tratada com cimento (BGTC). Este tipo de configuração estrutural exige procedimento de dosagem e dimensionamento apropriados, que contemple as características dos agregados, do cimento Portland, da mistura de ambos e da cura associada às propriedades inerentes ao cimento.

O processo de dosagem desse tipo de mistura se inicia com a fixação de teores iniciais de cimento e com determinação da umidade ótima de compactação para cada teor, seguindo o procedimento de ensaio de compactação do tipo Proctor para a determinação da curva de compactação. Fixada a umidade ótima para cada teor de cimento, são feitos ensaios mecânicos para a determinação de RT e RCS. Ensaios complementares, como MR e vida de fadiga, podem contribuir para uma melhor caracterização da mistura, fornecendo dados que poderão ser utilizados no dimensionamento mecanicista dos pavimentos.

5.2.1. Caracterização de misturas recicladas com cimento

As propriedades dos agregados reciclados devem ser avaliadas de acordo com o projeto original e divididas em trechos homogêneos de acordo com o desempenho do pavimento e não apenas da área mais problemática (ARRA, 2001). A norma brasileira para a utilização de agregados reciclados em pavimentação apresenta valores limites para algumas propriedades que esse tipo material deve atender para que a mistura apresente desempenho apropriado. A especificação técnica ET-DE-P00/035 do DER-SP (Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo) especifica a distribuição granulométrica para utilização agregados fresados em bases cimentadas na pavimentação, podendo ser adicionados agregados virgens à mistura a fim de atender os limites definidos.

Deve-se haver ainda, um controle preciso na relação água/cimento, o que em misturas com cimento Portland, pode afetar sensivelmente suas propriedades mecânicas. Sabendo-se que os agregados em seu estado natural, da forma como são utilizados em campo, já possuem água em sua estrutura, é importante que se conheça tal teor; o DNIT padroniza o ensaio de teor de umidade em agregados (DNER-ME 196/98), que consiste da verificação da diferença entre massas de certa quantidade de agregados, antes e após secagem em estufa a 105°C.

A seleção da quantidade de aglomerante hidráulico a ser utilizada em uma camada de base deve levar em consideração os carregamentos impostos pelo tráfego e a solicitação pelo clima, além de proporcionar durabilidade para que suas propriedades não sejam severamente afetadas durante a vida de serviço (Guthrie et al., 2002). A porcentagem em massa de cimento a ser incorporada à mistura reciclada deve ser fixada de modo a atender a resistência à compressão simples e à tração no ensaio de compressão diametral, ambas aos 7, 14, 21 e 28 dias de cura, fixadas no projeto da estrutura do pavimento (ET-DE-P00/035).

O aumento do teor de cimento leva a um maior enrijecimento da camada, o que durante seu processo de cura, pode levar a um trincamento por retração. Dessa forma, a determinação do teor de cimento deve atender a limites inferiores e superiores. O limite inferior deve atender a um mínimo de resistência do material, e o superior tem a finalidade de evitar a

excessiva retração volumétrica e ainda o excessivo enrijecimento da camada cimentada que pode levar a trincamento por elevadas tensões de tração desenvolvidas. Dependendo da estrutura de pavimento e distribuição das solicitações, excessivas tensões de tração e deterioração da camada cimentada podem leva-la a se comportar como uma camada com diversos blocos cimentados e agregados, passando a ser considerada como camada de comportamento granular. Ou seja, nestas condições o efeito do aglomerante desaparece em apenas alguns anos de serviço.

Especificações brasileiras para bases cimentadas, seja com a utilização de agregados reciclados ou não, sugerem teor ótimo de cimento entre 3% e 5,5%. Em estudo de base estabilizada com cimento e agregado calcário, Guthrie et al. (2002) encontrou teor ótimo de cimento de 3% em massa, valor com o qual os CPs atingiram valores satisfatórios de resistência, durabilidade e suscetibilidade à água. Miller et al. (2006) determinou que 4% de cimento levavam a valores de resistência à compressão não confinada após sete dias de cura satisfatórios para quatro diferentes tipos de agregado, todos provenientes de fresagem de revestimento, ou base granular de diferentes localidades. Nesse mesmo estudo, verificou-se que fresados de revestimento asfáltico de mistura descontínua necessitam de uma quantidade de cimento entre 6 e 8% em massa, devido à descontinuidade do esqueleto pétreo original.

5.2.2. Umidade ótima

O teor ótimo de umidade é determinado em ensaio de compactação, realizado em cilindro padrão tipo Proctor, de modo que ocorra a maior densificação de uma amostra de aproximadamente 7kg. Normalmente são moldados cinco CPs, com variação no teor de umidade de modo a se construir uma curva onde as ordenadas são os valores de massa específica aparente e as abscissas os teores de umidade correspondentes. Dessa curva, obtém-se o teor ótimo de umidade sendo este o valor o que leva a maior massa específica aparente (DNER-ME 129/94).

A especificação técnica ET-DE-P00/035 para execução de camadas de base reciclada com cimento define que deve ser utilizada a energia intermediária de compactação no ensaio para a determinação da umidade ótima. Contudo estudos indicam que CPs utilizados para caracterização mecânica devam ser moldados na energia modificada.

Estudo realizado por Balbo (1993) demonstrou que britas graduadas tratadas com cimento apresentam valor máximo de resistência mecânica cerca de 30% superiores quando dosadas a cerca de 1% abaixo da umidade ótima de compactação.

5.2.3. Tempo de cura

A avaliação da evolução nas propriedades mecânicas de misturas estabilizadas com cimento Portland se faz necessária devido às características de hidratação desse aglomerante que faz com suas características químicas e físicas se modifiquem, passando do estado de pasta plástica a sólido.

O processo de hidratação do cimento possui três fases principais: na primeira, a pasta plástica de cimento se torna não trabalhável e é denominada início de pega (Mehta e Monteiro, 2008). Este ponto marca o fim do período onde é possível fazer a mistura e compactação da camada. A segunda etapa é o fim da pega, onde é marcado o fim do processo de solidificação da mistura. Apesar disso, sua resistência é quase nula. Por fim, acontece o endurecimento da mistura, processo no qual há o ganho de resistência provocado pela hidratação (Figura 2).

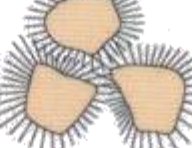
Idade da hidratação			
< 10 min	10 - 45 min	1 - 2 horas	2 - 4 horas
trabalhável	trabalhável	menos trabalhável	pega normal
			

Figura 2 – Processo de hidratação do cimento (Modificado de Mehta e Monteiro, 2008)

Considerando-se essa evolução nas propriedades de misturas envolvendo o cimento, e que as reações químicas que as provocam são dependentes do tipo dos materiais envolvidos, justifica-se a necessidade de uma avaliação do período de cura. Em termos práticos, a determinação da evolução das propriedades mecânicas de uma base cimentada define o tempo para abertura ao tráfego em uma rodovia.

A abertura ao tráfego se dá quando a base atingir resistência compatível aos níveis de sollicitação local. Para tanto, deve-se realizar uma pintura com emulsão RR-2C e selamento para criação de uma camada de proteção mecânica da base (ET-DE-P00/035). Apesar de a recomendação ser de 7 dias, na prática é comum adotar-se um período de espera de apenas 3 dias.

Merighi e Fortes (2005) realizaram estudos visando maior rapidez na execução de bases recicladas tratadas com cimento, ao analisar as características mecânicas nas primeiras idades das misturas. Com isso, determinaram que períodos de cura menores são suficientes, e que uma camada de base reciclada com adição de 3% ou 5% de cimento é capaz de suportar cargas de até 4t por eixo 24h, o que permitira a abertura a um tráfego leve após esse período. Miller et al. (2006) verificou que, após 2 dias de cura, uma base reciclada com 4% de cimento possui módulo elástico entre 200 e 700% superior em relação ao mesmo material sem adição de cimento.

5.3. RECICLAGEM A FRIO COM EMULSÃO ASFÁLTICA

A reciclagem a frio com uso de emulsão asfáltica apresenta uma série de características intrínsecas à formulação das misturas e aos métodos executivos. A principal fonte de variabilidade da mistura reciclada está associada justamente ao material agregado utilizado proveniente de fresagem dos pavimentos asfálticos deteriorados.

Frequentemente a restauração de pavimentos se dá pelo recapeamento sucessivo de material asfáltico diretamente sobre o pavimento deteriorado, ou após a extração de parte

da estrutura existente; como consequência, encontram-se pavimentos com defeitos refletidos das camadas subjacentes que não receberam nenhum tratamento, e, em casos de substituição do revestimento, existe o descarte indiscriminado do material extraído.

A reciclagem promove maior valor técnico e comercial aos agregados fresados dos pavimentos deteriorados, dando destinação qualificada a este material que é pela legislação brasileira, tratado como resíduo inerte, podendo receber destinação similar a resíduos domésticos. A Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP – Lei Nº 14.015/2005), precursora no tratamento deste resíduo, exige o reaproveitamento dos agregados fresados, preferencialmente em pavimentação, e impedindo o descarte fora dos limites do município.

Estas medidas são semelhantes às aquelas adotadas em diversos países. O Canadá taxa significativamente o desperdício do material fresado, enquanto a Austrália taxa o uso dos aterros; Alemanha e Suíça reciclam 100% dos materiais, e assim como o Japão, definem leis para a reciclagem na construção (FHWA, 2000); alguns países ainda aumentam a taxa sobre agregados virgens como incentivo à reciclagem. O tratamento adequado deste material fresado garante a redução de custos com a obtenção de agregados de jazidas, o que implica diretamente numa menor exploração ambiental.

Os agregados fresados são frequentemente classificados de três formas distintas: (i) considerado agregado negro, onde o agregado fresado é tratado como um agregado convencional e o ligante oxidado presente nos grumos não é considerado na dosagem; (ii) o ligante aderido é passível de regeneração até a consistência original ou próxima a ela, por incorporação de agentes rejuvenescedores e, por fim, a mais aceita; (iii) relativo grau de amolecimento do asfalto, de difícil mensuração, mas que interfere no resultado de ensaios de comportamento mecânico (ARRA, 2001). Com base em conhecimentos de pesquisas anteriores e ainda de acordo com o DNIT (2006), o material fresado a ser incorporado a misturas a frio deve ser considerado um agregado negro; segundo Motta e Leite (2002), é questionável a recuperação do ligante envelhecido em misturas a frio.

5.3.1. Emulsão asfáltica

As misturas recicladas a frio com utilização de emulsão asfálticas apresentam peculiaridades que são função direta das características desses materiais. A formação do produto emulsionado é feita a partir da dispersão mecânica de cimento asfáltico de petróleo aquecido em água, que é estabilizado quimicamente com auxílio de um agente emulsificante e energia de mistura, implicando em condições variáveis de cura e recobrimento dos agregados. O agente emulsificante tem muita influência nas características das emulsões, sendo responsáveis por facilitar a dispersão, manter a estabilidade, e impedir a aglomeração dos glóbulos de asfalto (James, 2006).

A emulsão asfáltica inicia o processo de ruptura quando entra em contato com os agregados, de modo que os glóbulos dispersos de asfalto passam a se unir, formando um filme asfáltico que recobre os agregados. A saída da água que compõe a emulsão, após o início da coalescência, representa um papel importante neste processo, pois enquanto a presença da água garante trabalhabilidade, pode também se interpor entre o filme asfáltico em formação e o agregado a ser recoberto, o que pode gerar falhas de recobrimento, com pontos frágeis que devem originar defeitos. A ruptura é um processo rápido, ao passo que a cura, até a saída total da água é um processo que pode se estender por meses.

O uso de emulsão asfáltica apresenta vantagens como o fácil armazenamento e distribuição (fornecimento por caminhões-tanque em obras), e ainda a aplicação em temperatura ambiente, permitindo a ampliação do tempo de aplicação sem preocupações concernentes à perda de temperatura, como em misturas a quente. O período que a água necessita pra sair completamente da mistura é o período de cura; a presença da água na mistura implica em variações nas propriedades mecânicas das misturas a frio, existindo, portanto, uma relação direta do comportamento da mistura com o período de cura proporcionado. Estudos anteriores mostraram que a cura ocorre de forma distinta em cada mistura, com especial influência da distribuição granulométrica. Devido a grande variabilidade dos agregados fresados, este também pode ser um fator de significativa influência nas características de ruptura e cura das emulsões asfálticas.

Os ensaios normatizados no Brasil para produção de misturas asfálticas a frio não consideram os efeitos da cura prolongada, limitando-se a cura em estufa por 24 horas à temperatura de 60°C (DNER 107/94). Resultados baseados em curtos períodos de cura podem indicar valores mínimos inferiores ao comportamento adequado verificado em campo. O período de cura mais extenso, além do que é preconizado em norma, tem revelado que os ganhos são muito variáveis e podem conduzir a erros na categorização de diferentes misturas, tanto quanto no fornecimento de parâmetros mínimos de controle para desempenho em campo, o que pode permitir a execução de misturas de baixa qualidade, mas que atendem aos valores definidos em laboratório.

Observa-se, por experiências anteriores, que os ganhos de resistência podem ser consideráveis após curtos períodos de cura. A aplicação deste conceito em campo se dá especialmente pelo tempo de espera antes da colocação de camadas de revestimento sobre a camada reciclada, respeitando períodos de 7 a 14 dias, de modo a se garantir a eliminação de grande parte da água incorporada na mistura (tanto água de molhagem, quanto água presente na emulsão asfáltica), conforme indicado por MnDOT (2000).

5.3.2. Produção de misturas recicladas a frio com emulsão

A produção de misturas recicladas com emulsão asfáltica apresentam características variáveis, dependente do processo de execução. A produção pode ser realizada em usinas estacionárias, em usinas móveis (em áreas adjacentes à rodovia), ou in situ. As usinas estacionárias têm funcionamento simplificado similar às usinas de solos, exigindo poucas adaptações, e permitindo maior controle dos materiais, o que inclui o destorroamento dos agregados fresados. As usinas móveis, semelhantes às usinas estacionárias, também permitem melhor classificação dos agregados, e ainda apresentam a vantagem da redução do transporte dos materiais (Castro, 2003). No processo in situ a reciclagem é feita diretamente na pista, proporcionando agilidade ao processo, apesar de não permitir um controle efetivo do material fresado e da mistura reciclada.

O fornecimento dos agregados fresados para a reciclagem pode seguir diferentes caminhos: o material pode ser extraído da pista, sendo transportado até a usina para imediata utilização, ou pode ser fornecido de estoques existentes de agregados fresados. Este material não pode ser exposto a altas temperaturas, sob o risco de extensas mudanças nas características dos grumos de asfalto aderidos (Mallick, 2010).

O processo de obtenção dos agregados por meio de fresagem influencia diretamente nas características deste material. A velocidade de avanço, o número de dentes do cilindro fresador e a resistência do material à fratura geram variações na granulometria dos agregados. Com o objetivo de uniformizar o material, é indicado proceder a um destorroamento, garantindo que os agregados não apresentem pontos de fragilidade adicional, com ligações fracas que possam ser soltas com pouco esforço. A produção in situ apresenta dificuldades nesse tipo de controle.

5.3.3. Estruturas com camadas recicladas

A aplicação de camada reciclada com emulsão na restauração de pavimentos asfálticos deve ser avaliada de modo criterioso, tanto quanto a alocação de outros tipos de materiais. As misturas a frio com emulsão asfáltica apresentam em geral, características de resistência e coesão inferiores às misturas a quente, e ainda apresentam elevado volume de vazios. Apesar do elevado volume de vazios, a mistura não deve ser tratada como camada drenante, pois a exposição à água é significativamente danosa. Para proteção desta camada, indica-se a utilização de camada selante, que impeça o acesso direto da água. As considerações sobre drenagem devem ser asseguradas para proporcionar continuidade hidráulica após a reciclagem.

A execução de revestimento em concreto asfáltico sobre a camada reciclada aumenta a vida útil da mistura. A variação na espessura do revestimento altera a distribuição de tensões na camada reciclada, sendo necessária uma avaliação mecanicista. Não existem critérios de fadiga definidos para as misturas recicladas a frio, mas experimentos de campo e análises laboratoriais têm indicado comportamento muito similar às misturas a frio com agregados

virgens. Chan et al. (2009) afirmam que o Módulo de Resiliência (MR) esperado para misturas recicladas a frio com emulsão varia em torno de 1.400 a 1.700MPa, após a cura completa da emulsão asfáltica.

A incorporação de camada reciclada em estruturas semirrígidas pode atuar como camada de transição modular; a alocação direta entre a camada cimentada e a camada de revestimento em concreto asfáltico assegura maior absorção das tensões de ruptura que podem advir da camada cimentada para o revestimento, reduzindo a eventual reflexão de trincas devido ao elevado volume de vazios. A camada reciclada a frio exerce função similar a camada de brita graduada simples, contudo tem características de resistência e coesão bastante superiores. A alocação desta camada na estrutura deve ser avaliada em função das condições de contorno (Suzuki, 2005).

O comportamento intermediário da mistura reciclada, entre uma brita graduada simples e uma mistura de concreto asfáltico a quente, mostra que a camada reciclada deve ser avaliada mais profundamente, para que possam ser definidos os padrões de deterioração e estimativas de vida de fadiga.

5.4. ESTRUTURA DE PAVIMENTOS

As estruturas de pavimentos são geralmente projetadas tendo como referência padrões clássicos de disposição das camadas, propondo-se variações nas espessuras e algumas características dos materiais constituintes. A classificação dos tipos de pavimento é razoavelmente restritiva e insuficiente, dadas as variações mais recentemente utilizadas no projeto de pavimentos. As classificações apresentadas abaixo são consideradas, ressaltando-se que as duas primeiras são as diferenciações mais expressivas entre os tipos de estruturas de pavimentos (Yoder e Witczak, 1975; apud Balbo, 2007).

Pavimento flexível (Figura 3): composto integralmente por camadas com características elásticas de deformabilidade, de modo que as tensões atuam de forma mais concentrada nas proximidades do ponto de aplicação de carga.



Figura 3 – Pavimento flexível

Pavimento rígido (Figura 4): possui camada em concreto de cimento Portland, sendo que a estrutura responde com a dispersão das tensões aplicadas num campo mais amplo. As camadas apresentam rigidez mais elevadas.

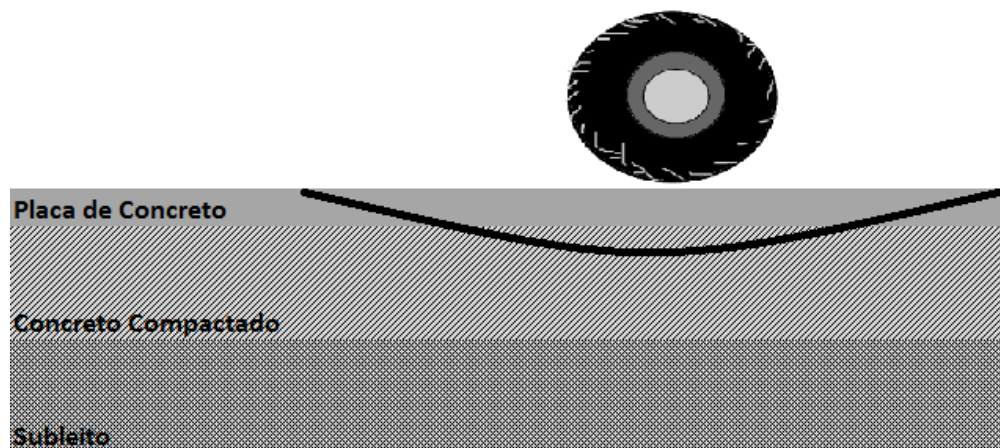


Figura 4 – Pavimento rígido

Pavimento semirrígido (Figura 5): tem sua base constituída por material estabilizado com ligante hidráulico, e revestimento flexível trabalhando sob tensão de compressão. Um dos principais problemas associados a este tipo de pavimento é a reflexão de trincas da camada cimentada para o revestimento asfáltico. O trincamento verificado no início da vida de

serviço são atribuídos ao processo de retração, inerente à cura do material cimentado. O trincamento por fadiga ao longo da vida de serviço também representa um importante processo na durabilidade da camada cimentada, que apresenta redução modular em função do aumento da fissuração.



Figura 5 – Pavimento semi-rígido

Pavimento semirrígido invertido (Figura 6): possui camada de sub-base em material cimentado, tal qual o pavimento semirrígido, contudo conta com a presença de camada granular entre a camada cimentada e a camada asfáltica de revestimento, permitindo combater eventuais reflexões de trincas oriundas da camada cimentada. Sua concepção se deu após a observação de uma série de pavimentos com trincamento refletido na camada de revestimento. Neste caso, no entanto, as tensões de tração atuantes no revestimento, passam a ser mais significativas, sendo necessário equilibrar a distribuição de tensões de modo que tanto a camada asfáltica, quanto a camada cimentada resistam à fadiga provocada pelos esforços de tração.



Figura 6 – Pavimento Invertido

No caso de pavimentos flexíveis, a adoção de camada reciclada com emulsão atua principalmente como material de base, garantindo menores deformações de tração na fibra inferior do revestimento em concreto asfáltico, principal fator de fadiga das misturas. É importante ressaltar que a camada reciclada com emulsão apresenta alta susceptibilidade à ação da água, o que indica a necessidade de camada de revestimento denso, como proteção da camada reciclada.

6. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DA PESQUISA

6.1. CARACTERÍSTICAS DA AUTOPISTA FERNÃO DIAS

A Autopista Fernão Dias, no trecho que liga as capitais São Paulo e Belo Horizonte, foi construída na década de 1950, tendo passado por obras de duplicação em meados da década de 1990, sendo o traçado original mantido praticamente na sua totalidade. Muitos problemas de subleito são advindos do período de sua construção devido a deficiências e variações nos materiais disponíveis para compor as camadas de base, ao longo de toda a extensão da rodovia. Como resultado, observa-se uma série de variações no tipo do material, além das espessuras encontradas nas camadas de base ao longo da rodovia, constadas por meio de sondagem, conforme se verifica esquematicamente na Tabela 1.

Tabela 1 – Variação dos materiais que compõem as camadas de base da rodovia, encontrados por sondagem

Canga de Minério + Escória	Escória	Escória
Canga de Minério	Escória + Argila	Argila
Canga de Minério + Cal	Saibro	Canga de Minério
Brita + Solos	Canga de Minério	Rachão
Brita Graduada	Quartzo	Quartzo
	Saibro + Brita	
	Rachão	
	Brita + Solos	
	Canga de Minério + Escória	
Camada de Base	Camada de Sub-base	Reforço do Subleito/Subleito

A Figura 7 apresenta uma correlação teórica, obtida por meio de simulações no programa computacional *Elsym 5*, entre a capacidade de suporte do subleito e a variação na tensão de tração na fibra inferior da camada reciclada com cimento, com variação de espessura da camada cimentada.

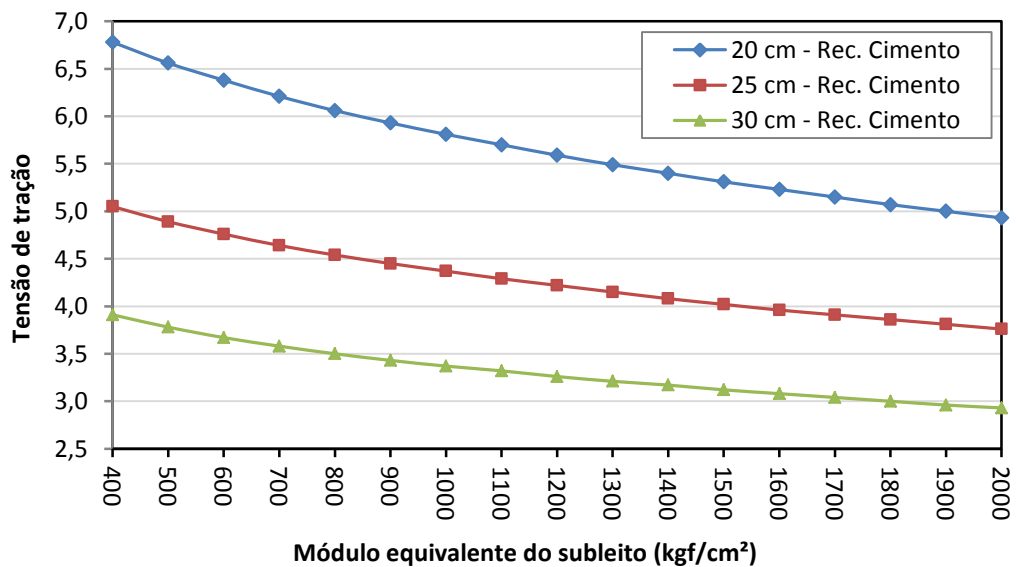


Figura 7 – Variação da tensão de tração na camada reciclada com cimento

A fim de se verificar a variação da distribuição de tensões e sua interferência na vida de serviço dos pavimentos, esta pesquisa contemplou a execução de um trecho experimental com três segmentos, propondo-se a variação nas espessuras de reciclagem com cimento, de acordo com o esquema apresentado na Figura 8.

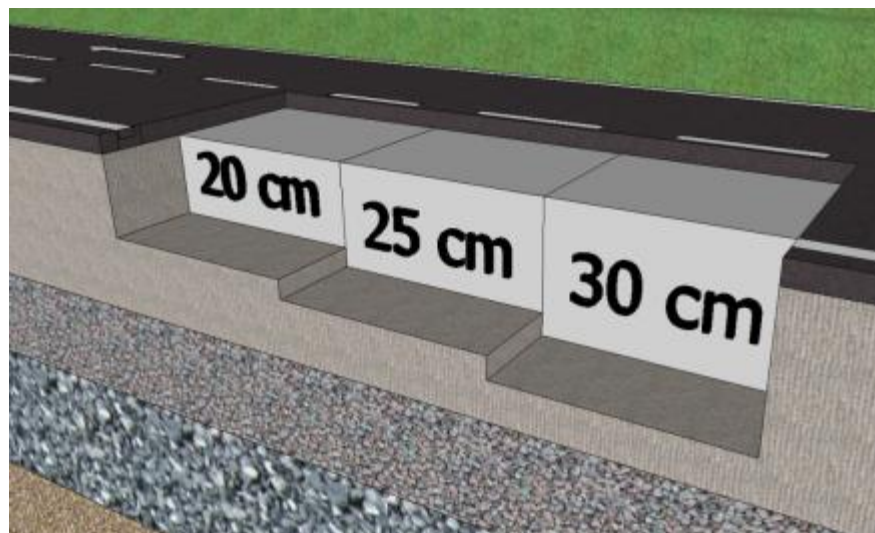


Figura 8 – Esquema da distribuição do trecho experimental com variação nas espessuras da camada reciclada com cimento

Neste contexto, o desenvolvimento do trecho experimental, composto por camada de sub-base reciclada estabilizada com cimento, base em mistura reciclada com emulsão e revestimento em concreto asfáltico pode ser classificado como pavimento invertido. A substituição de camada em brita graduada simples para base, por uma camada betuminosa como a mistura reciclada com emulsão propicia um benefício significativo para a estrutura. A camada reciclada com emulsão tem características muito similares a misturas do tipo pré-misturado a frio em termos de coesão, resistência e densidade. O volume de vazios mais elevado, por volta de 15%, atua neste tipo de estrutura como um agente antirreflexão de trincas, de modo similar ao comportamento de camadas de brita graduada simples. A mistura reciclada com emulsão tem, no entanto, comportamento muito superior ao da BGS, no que se refere à contribuição estrutural, atuando neste caso, como espessura de camada asfáltica requerida como revestimento, em função do número N de solicitações, conforme

indicado pelo método do DNIT. Cabe ressaltar que a espessura mínima para proteger a camada betuminosa da ruptura por esforços repetidos de tração, ainda seja um ponto em aberto na engenharia rodoviária brasileira (DNIT, 2006).

6.2. PROJETO DE MISTURAS

6.2.1. Reciclagem com cimento Portland

A dosagem das misturas recicladas realizada em laboratório, objetivando a execução do trecho experimental, tratou de considerar especificamente os materiais constituintes do pavimento onde foi executada a pista experimental. Para a reciclagem com cimento, o material extraído do km 640 da Autopista Fernão Dias, apontou as seguintes características de camadas existentes: base constituída de solo-brita, numa espessura de 20cm; e sub-base em canga de minério, com espessura de 18cm. Considerando-se que a construção do trecho poderia contemplar esses dois materiais, especialmente para a maior espessura de reciclagem (30 cm), estes foram definidos como mistura homogênea.

Os resultados de teor ótimo obtido na dosagem se mostraram acima do inicialmente proposto, que era de 4%, chegando a um teor de 5% de cimento, devido a maior presença de finos e a menor porcentagem de agregados graúdos. Os ensaios realizados para a obtenção das propriedades mecânicas da mistura cimentada (RT por compressão diametral e RCS) são apresentados na Figura 9. É importante ressaltar que a camada cimentada desempenha padrões de comportamento e responsabilidade numa estrutura de pavimento, que são diferentes das camadas em material asfáltico, como é o caso da reciclagem com emulsão.

A análise estrutural do sistema de camadas em um pavimento com base cimentada mostra que tal camada encontra-se em compressão em sua fibra superior e tração na fibra inferior (Balbo, 2007). Sendo assim, ambas as características de resistência devem ser conhecidas. Além disso, a análise elástico-linear da estrutura depende dos valores de MR e do coeficiente de Poisson de todas as camadas, o que faz com que o conhecimento dessas

propriedades e sua evolução ao longo do tempo seja necessário quando da previsão e acompanhamento do seu desempenho em campo.

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado de acordo com a especificação ASTM D 2166 (2006), e o ensaio de resistência à tração por compressão diametral de acordo com a especificação ASTM D 6931 (2007). As amostras de laboratório utilizadas nesta etapa tiveram 28 dias de cura em câmara úmida. Os CPs de campo apresentam, geralmente, uma resistência superior à de laboratório. Possivelmente a homogeneização mais enérgica e a compactação em campo propiciaram melhores propriedades de resistência. O material de laboratório pode também diferenciar-se daquele usado em campo, introduzindo mais uma variável. O valor de RCS aos 28 dias ultrapassa o valor de 2,1MPa, valor que é normalmente utilizado como limite mínimo.

É importante ressaltar que, nesta etapa, os ensaios realizados nas amostras de pista se referem ao controle tecnológico de outros segmentos restaurados na rodovia em estudo, a partir da reciclagem com cimento. Os resultados obtidos para as amostras do trecho experimental serão apresentados nos itens a seguir, fornecendo dados específicos para este estudo e integrando as ferramentas para o seu monitoramento.

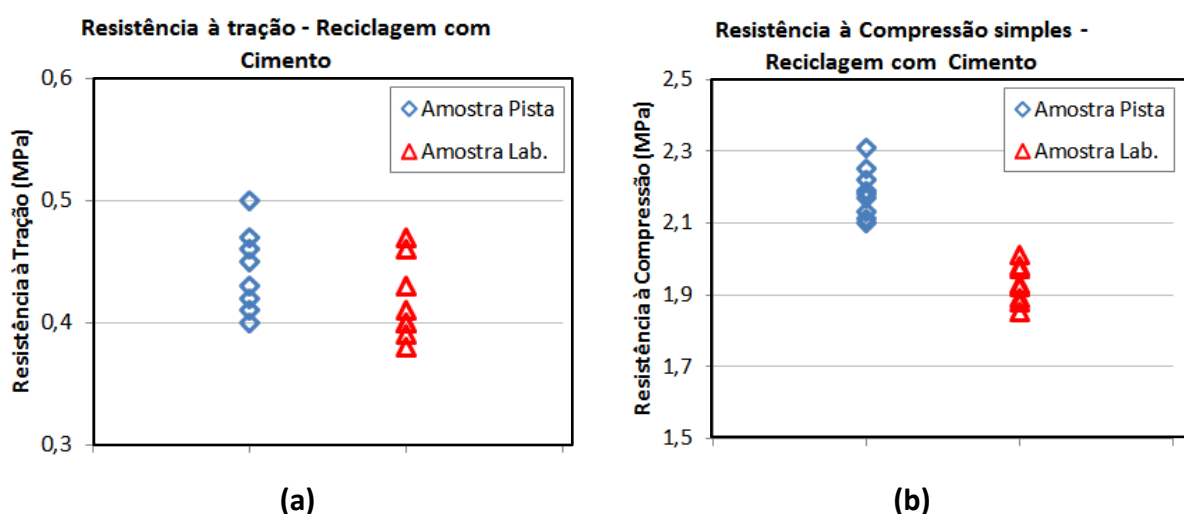


Figura 9 – Resultados de: (a) RT e (b) RCS da mistura reciclada com cimento

6.2.2. Reciclagem com emulsão asfáltica

A mistura reciclada com emulsão apresenta uma variabilidade em seus resultados de ensaios mecânicos, devido à frequente variabilidade dos agregados fresados. O processo de dosagem procurou avaliar as propriedades mecânicas dessas misturas, sendo que não foi considerada a caracterização dos grumos de asfalto envelhecidos e aderidos aos agregados, uma vez que essa não é uma variável que introduza grande dispersão de resultados. A dosagem pelo método Marshall indicou teor ótimo de 3% de emulsão modificada por polímero.

Os ensaios de comportamento mecânico definidos inicialmente foram RT e MR. O ensaio de RT realizado em misturas asfálticas verifica seu comportamento quando existe tensão de tração por flexão, em geral na fibra inferior da camada aplicada. Mesmo que a camada reciclada não esteja sobre tração, o ensaio pode mensurar, ainda que indiretamente, a coesão causada pela adição de emulsão asfáltica e cimento que agem como um ligante de partículas. Os ensaios realizados a partir de amostras de laboratório foram comparados com os resultados obtidos em amostras de pista.

A execução de trecho com camada reciclada com emulsão procura atender a duas necessidades: (i) a restauração ordinária da rodovia, que está sendo restaurada em segmentos definidos em projeto, por meio de reciclagem com emulsão e (ii) a necessidade proposta nesta pesquisa de melhor avaliar a reciclagem com emulsão com vistas à calibração do fator campo-laboratório. A seleção do ponto para extração dos CPs procurou identificar o que se enquadrava melhor em termos de desenho geométrico (traçado simplificado) e condições de drenagem adequadas. Os resultados de RT por compressão diametral são apresentados na Figura 10, para amostras extraídas de campo e para amostras moldadas em laboratório.

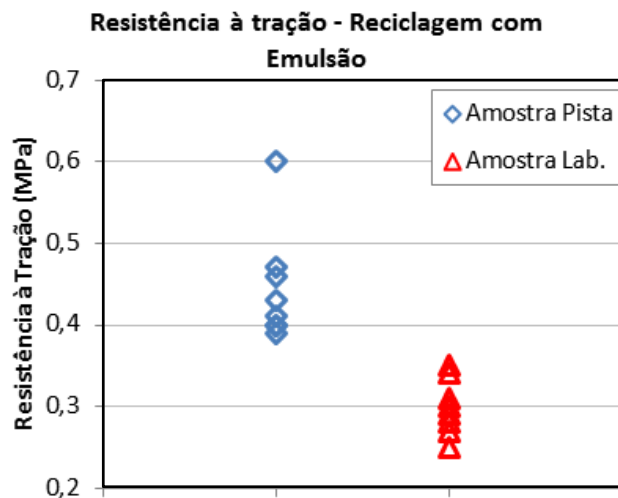


Figura 10 – Resultados de RT em amostras de mistura reciclada com emulsão

O MR está relacionado à rigidez do material e determina os padrões de esforços, em termos de tensões e deformações, ou à sua capacidade de resistir às deformações quando solicitados pelo tráfego. O ensaio realizado com uma prensa universal de carga repetida, a prensa do tipo *Material Testing System* (MTS), segue os procedimentos preconizados na norma ASTM D 7369/09. Sua determinação em laboratório é feita através da solicitação cíclica, abaixo da tensão de ruptura do CP.

São medidas as deformações recuperáveis que ocorrem a cada ciclo, e a relação entre a tensão desvio e a deformação recuperável instantânea correspondente resulta no valor de MR. Os ensaios são realizados em CPs cilíndricos com solicitações diametrais verticais e medidas de deslocamentos diametrais horizontais.

Os valores de MR de materiais para pavimentos asfálticos são essenciais no dimensionamento de suas camadas através de métodos mecanísticos, visto que esses valores funcionam como parâmetro de entrada na avaliação estrutural. As amostras de laboratório foram submetidas ao processo de cura de acordo com a norma para produção de misturas a frio (DNER-ES 390/99), e os CPs de pista foram extraídos após 30 dias da execução. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 11.

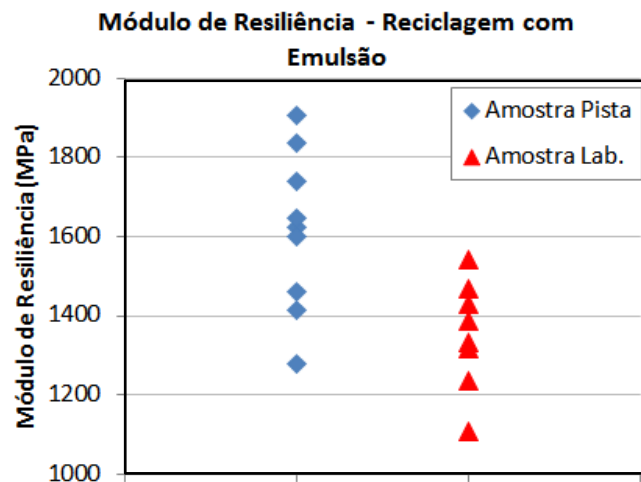


Figura 11 – Resultados de MR para a mistura reciclada com emulsão

Observa-se que os valores nas amostras de pista são superiores àqueles verificados em amostras de laboratório, o que está associado diretamente à variação no processo de compactação (por rolagem em pista e por impacto em laboratório) e no processo de cura (contínuo sob diferentes condições climáticas, em pista; e em estufa à temperatura controlada por 24h, em laboratório).

Os resultados prévios apresentados nesta etapa foram utilizados para nortear o projeto dos trechos experimentais e sua execução. Os ensaios foram realizados para serem empregados na verificação de comportamento mecânico das estruturas propostas. Como análise mais efetiva e para atender os objetivos a que a pesquisa se propõe, serão apresentados resultados obtidos com ensaios em diferentes amostras, com variação nos teores de seus constituintes, variação no tempo de cura e variação no tipo de compactação.

7. EXECUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL

O trecho experimental foi executado no segundo semestre do ano de 2011, a fim de atender os objetivos propostos nesta pesquisa. O trecho, constituído de pavimento semirrígido, e composto por camada reciclada com cimento e camada reciclada com emulsão, foi executado conforme discriminado anteriormente, com variação apenas na sequência de

segmentos proposta, em função de demandas operacionais. O esquema é apresentado na Figura 12.

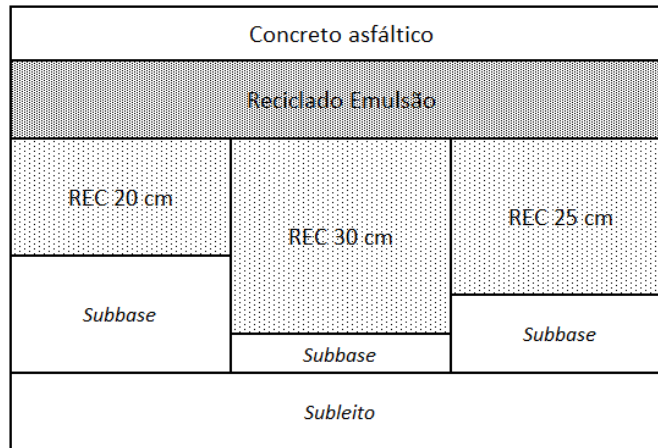


Figura 12 – Esquema do trecho experimental

A construção do trecho experimental com camada de base reciclada com cimento e com reciclagem do revestimento, constituindo a camada de binder na estrutura, foi feito durante um período de sete dias. A restauração se inicia com a extração da camada de revestimento em concreto asfáltico deteriorado na espessura total da camada, sendo 11cm para este caso (Figura 13). A fresagem, realizada a frio, fratura o revestimento existente, reduzindo em partes menores que serão posteriormente tratadas de modo a compôr a camada reciclada com emulsão.

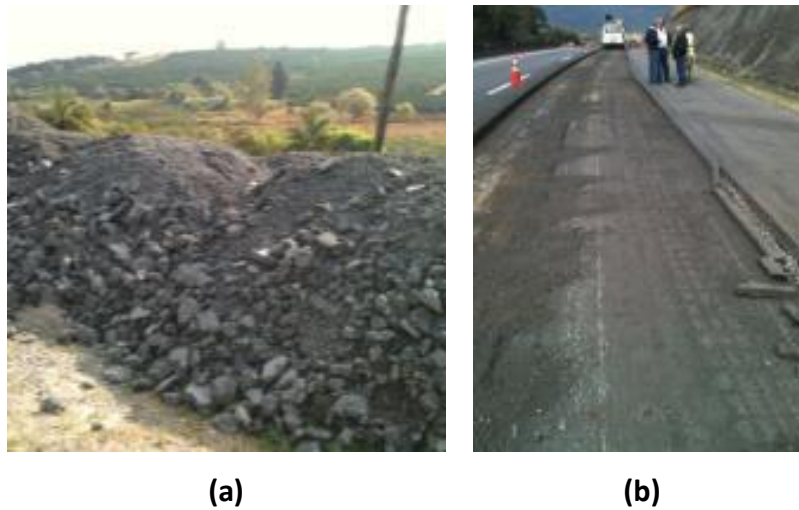


Figura 13 – (a) Material proveniente da fresagem e (b) trecho após a fresagem

Após a retirada do material fresado, a camada de base existente em solo-brita ficou exposta. Este material recebeu estabilização química através da adição do cimento a fim de constituir a camada reciclada de base, denominada reciclagem com cimento. Para a execução da camada reciclada com cimento, a base recebeu a adição do cimento distribuído com auxílio de caminhão – silo, no teor de 5% em massa (definido em projeto), conforme apresentado na Figura 14a. É possível também realizar a distribuição do cimento por um processo manual de espalhamento de sacos de cimentos, na proporção necessária, contudo o processo que conta com o apoio do caminhão apresenta maior precisão no teor e garante espalhamento adequado por toda a largura da pista (Figura 14b).



(a)



(b)

Figura 14 – (a) Distribuição do cimento e (b) trecho após a distribuição

A adição de água é realizada por meio do equipamento reciclador. O caminhão tanque é acoplado através de uma mangueira ao equipamento reciclador de modo que o próprio equipamento controle eletronicamente o teor de água lançado na mistura (Figura 15). O caminhão não interfere na velocidade de reciclagem, sendo empurrado pelo reciclador por meio de ligação por mangote.



(a)



(b)

Figura 15 – (a) Distribuição da água pelo equipamento reciclador e (b) painel de controle do equipamento reciclador

O equipamento reciclador utilizado constava de largura máxima de 2m; a faixa possuía largura total de 3,6m, o que implicou num recobrimento no centro da faixa, uma vez que o equipamento realiza a reciclagem em duas etapas para contemplar a largura total da faixa (Figura 16). O equipamento é controlado eletronicamente, com definição da espessura necessária, garantindo a homogeneização do material existente de base (solo + brita), do cimento e da água por um processo contínuo de rotação do cilindro misturador.



(a)



(b)

Figura 16 – (a) Equipamento reciclador e (b) detalhe do equipamento

Devido à variação da espessura da camada cimentada, o equipamento foi ajustado para respeitar o projeto, contemplando as diferentes espessuras (Figura 17a). Um rolo vibratório corrugado seguiu a recicladora para realizar a compactação da camada (Figura 17b). O processo de reciclagem com cimento respeitou o prazo máximo de 3h após o lançamento da água na mistura, de modo a assegurar que o processo de compactação não causasse danos, uma vez que os cristais de cimentação se iniciam nessa fase construtiva (Figura 17c). O acabamento final da camada foi realizado com o auxílio de uma motoniveladora. A camada executada recebeu uma pintura ligação com emulsão asfáltica para garantir de cura, evitando a perda excessiva de umidade para o ambiente, além de ser uma ligação necessária com a camada reciclada com emulsão.

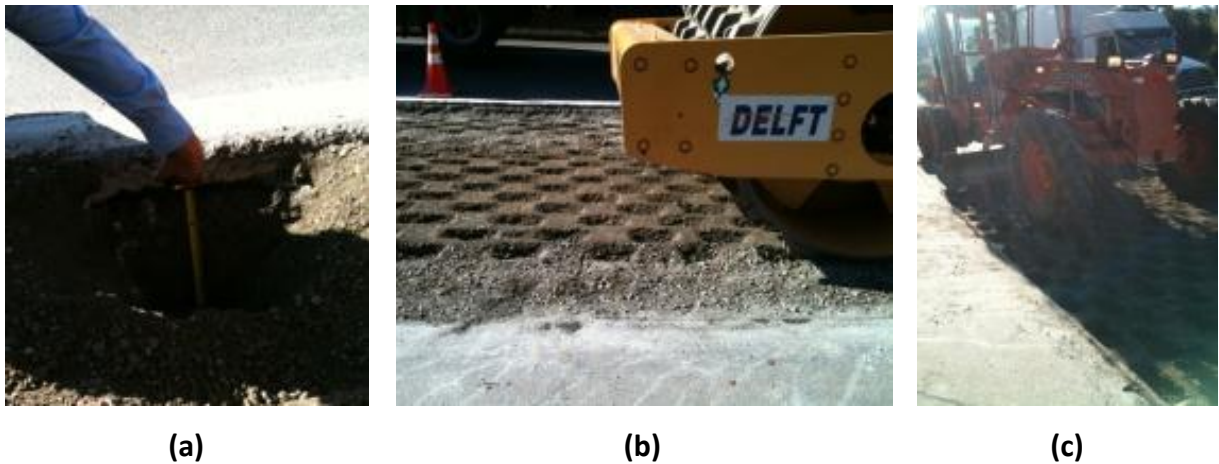


Figura 17 – (a) Medição da profundidade da camada, (b) compactação da camada reciclada com cimento e (c) finalização da camada reciclada com cimento

O processo de cura das misturas cimentadas possui tempos variáveis e pode ser consideravelmente longo em alguns casos. No entanto, após 72h a camada reciclada com cimento já apresentava rigidez suficiente para resistir aos novos esforços de compactação de sobrecamadas e do tráfego. Dessa forma, a execução da camada reciclada com emulsão ocorreu após esse período da execução da camada reciclada com cimento.

A camada reciclada com emulsão foi executada na espessura de 7,5 cm a partir do material fresado do revestimento deteriorado. Esta mistura reciclada com emulsão permanece exposta (sem incidência de tráfego) por um período de 48 horas, garantindo que a mistura tenha um processo de cura acelerado. Após este período é executada a camada delgada de revestimento em concreto asfáltico convencional, na espessura de 4cm.

A camada asfáltica de revestimento deteriorado foi fresada em toda a sua espessura existente (Figura 18a). O material resultante da fresagem foi conduzido até a usina, na qual passou por um processo de destorroamento (passando por um britador tipo mandíbula, de modo que os agregados em atrito entre si forcem a separação de grumos fracamente aderidos) e processo de peneiramento classificatório que limita o diâmetro máximo de agregados (Figura 18b).



(a)



(b)

Figura 18 – (a) Revestimento danificado sendo fresado e (b) usina de produção do reciclado com emulsão asfáltica

A mistura reciclada é produzida a partir dos agregados fresados, numa sequência de adição de cimento no teor de 1%, adição de água de molhagem - que facilita a mistura e impede que o agregado absorva precocemente a água que compõe a emulsão e, ainda a adição de emulsão modificada pelo polímero SBS (estireno-butadieno-estireno). A mistura é carregada em caminhões que retornam ao trecho para execução da camada reciclada, distribuindo a mistura com auxílio de vibroacabadora (Figura 19).



(a)



(b)

Figura 19 – (a) Aplicação da mistura reciclada e (b) trecho após a aplicação da camada reciclada

A compactação se inicia imediatamente após a distribuição da mistura, com rolos em sequência, de modo que (i) o rolo chapa garanta a acomodação adequada da mistura, reduzindo consideravelmente o empolamento, (ii) o rolo de pneu, com pressão de 110 libras, garanta a compactação efetiva da mistura e (iii) uma nova passada com rolo chapa propicie acabamento sem marcas (Figura 20).



Figura 20 – Compactação da camada reciclada com emulsão

Devido às características da emulsão, composta em parte por água, é necessário que a camada reciclada permaneça aberta por um período mínimo de 48 horas, permitindo que a

água evapore e o material reciclado ganhe resistência. Após este período, é executada uma camada delgada de revestimento em concreto asfáltico.

8. ESTUDOS LABORATORIAIS

8.1. RECICLADO COM CIMENTO

Assim como realizado em campo, a mistura reciclada com cimento para os ensaios laboratoriais é composta de uma mistura de solo e brita, acrescida de cimento e água, submetida à compactação e cura. A mistura de solo e brita, que constituía a base original do pavimento, foi extraída do trecho experimental da Autopista Fernão Dias, conforme descrito anteriormente. Por se tratar de um material obtido em campo, foram realizados ensaios de caracterização para o conhecimento de suas propriedades básicas tais como distribuição granulométrica e teor de umidade em seu estado natural. Para a moldagem de cada CP, o material recebeu cimento na proporção de 5% em massa, quantidade correspondente àquela utilizada em campo; e água, no teor ótimo para a compactação.

Dois materiais distintos foram coletados da Autopista Fernão Dias, a fim de verificar a variação nas propriedades mecânicas do reciclado com cimento quando se variavam as características dos materiais empregados. A Figura 21 ilustra os dois materiais estudados, sendo possível observar diferenças inclusive em suas colorações.

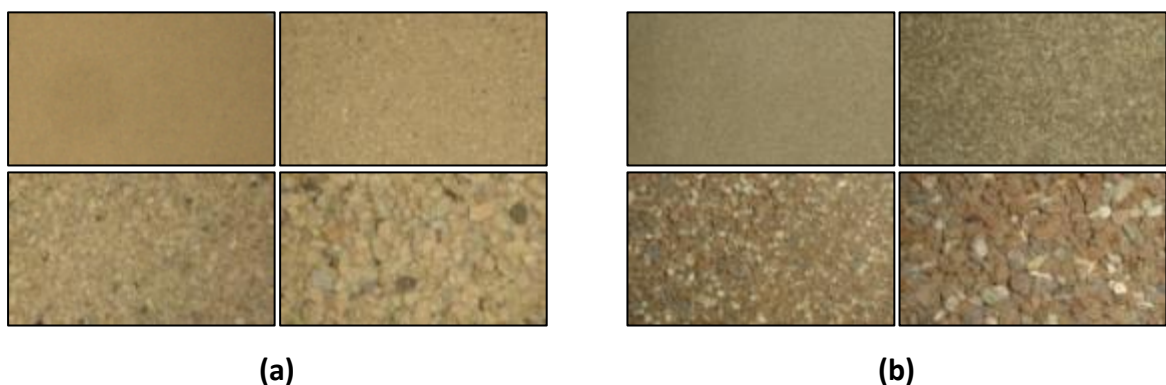


Figura 21 – Materiais empregados no estudo: (a) material 1 e (b) material 2

8.1.1. Caracterização do material

As mistura de solo e brita provenientes do trecho experimental foram caracterizadas em termos de distribuição granulométrica e teor de umidade natural encontrada em campo. Ambos os parâmetros são essenciais para a definição do projeto de mistura e posterior investigação de suas características de resistência.

Ensaio de granulometria

A distribuição granulométrica dos agregados é uma de suas principais características, uma vez que influencia propriedades como resistência, rigidez e coesão das misturas produzidas (Bernucci et al., 2008). A granulometria dos materiais em estudo foram determinadas por meio de peneiramento, ensaio onde uma amostra seca do agregado é fracionada em uma série de peneiras, com malhas progressivamente menores (Figura 22). A massa do material retido em cada peneira é comparada com a massa total da amostra, obtendo-se assim uma relação percentual para cada tamanho de agregado.



(a)



(b)

Figura 22 – Ensaio de granulometria: (a) peneiras e (b) material fracionado para pesagem

As amostras para a determinação de curva granulométrica foram obtidas por quarteamento, conforme preconiza o método de ensaio DNER-ME 083/98. O quarteamento foi realizado

com o equipamento repartidor, até se obter uma quantidade representativa de 5kg do material. Os resultados obtidos para os dois materiais são apresentados na Figura 23.

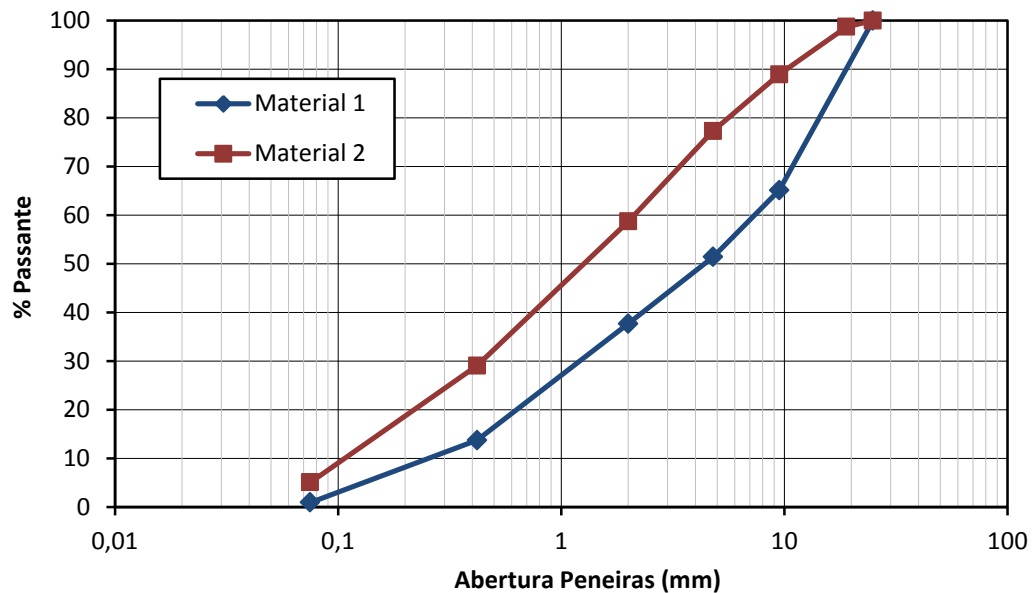


Figura 23 – Distribuição granulométrica do material

A diferença na granulometria entre os materiais estudados é bastante evidente. O Material 1 apresenta uma maior quantidade de fração graúda, sendo a proporção solo:brita de 40%:60%. Já o Material 2 apresenta predominância da fração fina, sendo a proporção solo:brita de 60%:40%. Dessa forma, espera-se que o comportamento da mistura com o Material 1 seja semelhante ao de uma base de solo-brita-cimento, e o do Material 2 ao de uma base de solo-cimento. Sendo assim, já se pode inferir que o Material 2 terá consumo de cimento superior ao Material 1 para atingir níveis equivalentes de resistência.

As propriedades mecânicas de misturas de solo + brita + cimento estão associadas não apenas à granulometria do material, mas também à hidratação do cimento. Esse processo está diretamente ligado ao tipo de solo presente na mistura. Devido a isso, solos contidos nas duas misturas foram classificados de acordo com o Método das Pastilhas, procedimento expedito de classificação da metodologia MCT (Nogami e Villibor, 1994). Para a classificação do solo contido nas misturas de solo-brita selecionou-se, o material passante na peneira nº

40, conforme estabelecido no procedimento para o ensaio do método das pastilhas. As pastilhas obtidas foram submetidas ao ensaio de contração (Figuras 24a e 24b) e penetração por agulha e altura padronizadas (Figura 24c).

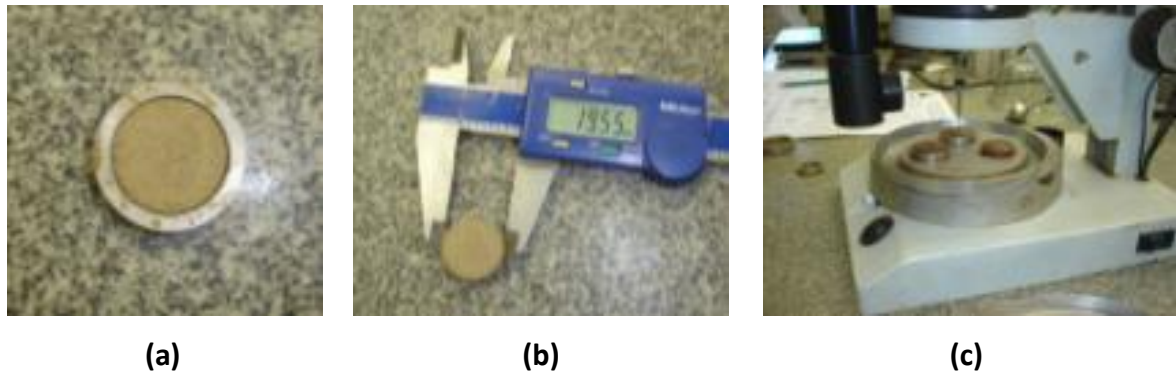


Figura 24 – (a), (b) Ensaio de contração e (c) ensaio de penetração

Os resultados, apresentados na Tabela 2, estabelecem que as duas misturas de solo-brita diferem também na classificação e comportamento dos solos que as compõem. O Material 1 apresenta solo de comportamento laterítico, enquanto o Material 2 apresenta solo de comportamento não-laterítico. A literatura aponta que solos lateríticos reagem melhor com o cimento em relação aos solos não-lateríticos.

Tabela 2 – Resultados da classificação dos solos

Solo	Contração (mm)	Penetração (mm)	Classificação
Material 1	0,40	1,5	LA-LA'
Material 2	0,40	5,0	NS'-NA'

Determinação do teor de umidade

A determinação do teor de umidade incorporada ao material em seu estado natural em campo deve ser realizada para que haja um controle durante a aplicação da mistura, uma vez que, em laboratório, o material pode estar seco. Desta forma, sabe-se a quantidade de água existente no material e, por consequência, a quantidade que deve ser adicionada em campo, a fim de se obter o teor de umidade previsto no projeto da mistura.

No ensaio – realizado aqui apenas para o Material 1, uma amostra representativa de aproximadamente 5kg de todo o material foi obtida por quarteamento e, em seguida, seca em estufa a 110°C (Figura 25). A diferença entre massa úmida e massa seca é a quantidade de umidade natural do material. O resultado obtido foi de 4,1% de água presente no material.

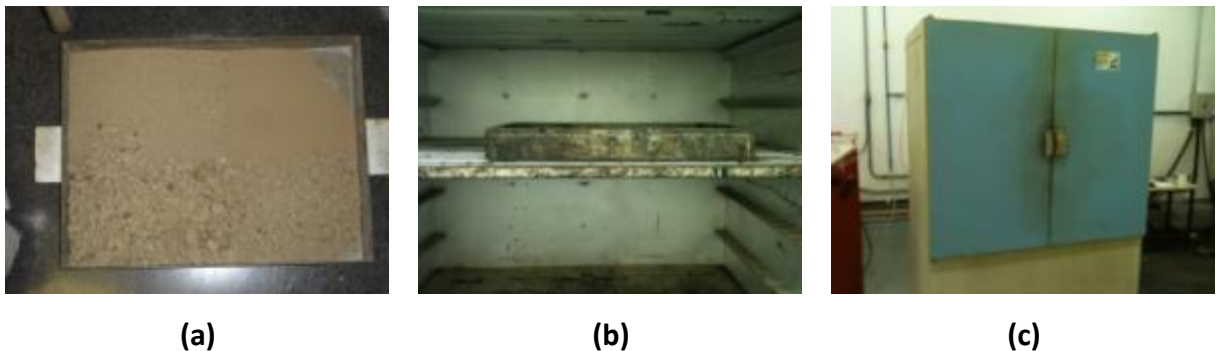


Figura 25 – Determinação da umidade do material: (a) material úmido, (b) material secando na estufa e (c) estufa de secagem

8.1.2. Projeto de mistura

Variação no tipo de material

A fim de se obter CPs homogêneos, todo o material extraído de campo foi fracionado, e a faixa granulométrica a ser adotada foi fixada, de modo a atender àquela determinada pela especificação técnica ET-DE-P00/007A do DER/SP para misturas de solo-brita-cimento, além de representar a granulometria original do material extraído de campo. Desta forma, todos os CPs produzidos nesta pesquisa apresentam a mesma distribuição granulométrica, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Composição granulométrica dos agregados na mistura

Peneiras		% retida
#	(mm)	
3/8"	9,5	36
Nº 4	4,8	15
Nº 10	2	12
Nº 40	0,42	24

Assim como aplicado em campo, a quantidade de cimento utilizada na mistura para a confecção dos CPs foi de 5% em massa. A porcentagem de água que deve ser incorporada à mistura sofre grande influência da distribuição granulométrica do material e da quantidade de cimento utilizada. Estudos anteriores (Balbo, 1993) indicam que CPs fabricados com umidade inferior à ótima levam a resultados de resistência superiores, no entanto optou-se por utilizar a umidade ótima de compactação nos CPs, por ser a prática corrente em estudos acadêmicos e de campo.

Determinação da umidade ótima de compactação

Ao se definir a umidade ótima de compactação da mistura cimentada, assim como em solos, busca-se a maior massa específica aparente seca, parâmetro esse que é a representação numérica da maior compactação da mistura. O ensaio consiste da variação do teor de água incorporada à mistura, em torno de uma umidade ótima presumida. A NBR 7182/86 determina que os resultados do ensaio devem apresentar as massas específicas de CPs com umidade abaixo da ótima, “ramo seco” da curva de compactação, e as massas específicas de CPs com umidade acima da ótima, “ramo úmido” da curva de compactação.

Os CPs utilizados no ensaio de compactação para os dois materiais foram moldados em cilindros do tipo CBR, como determina a NBR 7182/86, e compactados manualmente com energia intermediária, como definido na ET-DE-P00/007A do DER/SP para este tipo de mistura (Figura 26).

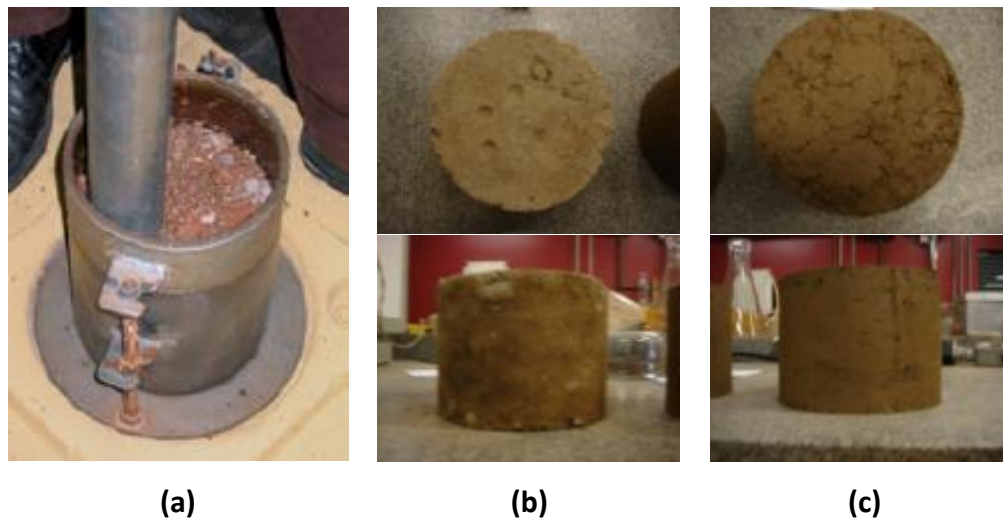


Figura 26 – Compactação dos CPs: (a) molde e sotaque, (b) CP no ramo seco e (c) CP no ramo úmido

As curvas de compactação, resultantes do ensaio, são apresentadas na Figura 27. Nota-se que, para o Material 1, o teor de umidade ótima de compactação para a mistura reciclada, com adição de 5% de cimento, foi de 5,5% em massa. Para o Material 2, esse teor foi de 7,5% em massa. A diferença nas umidades ótimas encontradas se deve principalmente à acentuada diferença na quantidade de fração fina presente nos dois materiais (quanto maior a quantidade de finos, maior é a superfície específica do material e, conseqüentemente, maior a quantidade de água necessária para a compactação).

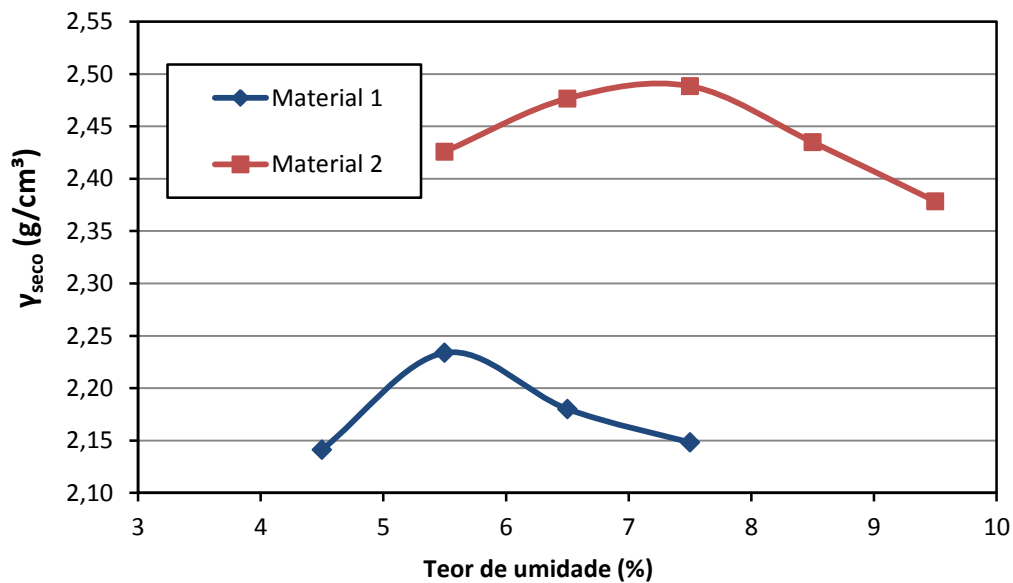


Figura 27 – Curvas obtidas com o ensaio de compactação (energia intermediária)

A caracterização mecânica foi realizada por ensaios de resistência a tração indireta e resistência à compressão simples. Como o cimento confere ao material a dependência do tempo de cura, aumentando suas características de resistência com o passar do tempo, foram, inicialmente, realizados ensaios em diferentes idades de cura, variando entre 3 e 28 dias, para o Material 1. Para o Material 2, foram verificadas as propriedades mecânicas das amostras apenas para o tempo de cura de 28 dias.

Para a realização dos ensaios mecânicos, foram moldados CPs que obedeciam ao projeto de mistura apresentado anteriormente. Por características peculiares de cada equipamento de ensaio, os CPS para ensaios de RT foram moldados em cilindros do tipo Proctor, de dimensões de 10cm de diâmetro e 12,7cm de altura; os CPs destinados ao ensaio de resistência a compressão foram moldados em cilindros de 10cm de diâmetro e 20cm de altura. Em ambos os casos, a compactação dos CPs foi manual, com energia intermediária, que é normatizada para esse tipo de mistura.

Os resultados e a comparação obtidos para o Material 1 encontram-se na Tabela 4. O Material 2 apresenta distribuição granulométrica com a predominância da fração solo e

apresenta um solo considerado de pior qualidade para fins de pavimentação, dessa forma estimou-se um teor de cimento inicial de 6% em massa para o início das análises de propriedades mecânicas desse material.

Tabela 4 - Resultados da comparação entre os dois materiais

Material	Teor de cimento (%)	RT (MPa)		RCS (MPa)	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Material 1	5	1,72	0,15	9,68	0,35
Material 2	6	1,26	0,07	7,06	0,14

Verifica-se que o Material 2, mesmo tendo teor de cimento superior ao Material 1, não atingiu os mesmos valores de resistência à tração, nem os mesmos valores de resistência à compressão. Esse fato é explicado pela diferença da fração de solo contida nas duas misturas, uma vez que o cimento atua principalmente nessa fração formando uma massa cimentada. Como a quantidade de solo presente no Material 1 é inferior àquela contida no Material 2, a relação cimento/solo do Material 1 é maior, justificando os maiores valores de resistência. Ressalta-se que a normatização brasileira e internacional para camadas cimentadas não prevê valores mínimos de resistência para esse tipo de mistura reciclada, desde que os valores obtidos sejam contemplados em projeto.

Resistência à Tração (RT)

O ensaio de resistência à tração indireta (Figura 28) consiste em solicitar um CP cilíndrico diametralmente, através da combinação de uma prensa e frisos metálicos. Dessa forma o CP fica sujeito a tensões de tração no plano de aplicação de carga, levando-o a ruptura. Conhecendo-se a carga de compressão aplicada, o valor de RT pode ser calculado analiticamente.



(a)



(b)

Figura 28 – Ensaio de RT: (a) equipamento e posicionamento do CP e (b) CP rompido

Apesar de se ter definido, em função das diferenças dos materiais, que o Material 2 teria consumo de cimento superior aos 5% estabelecidos para o Material 1, CPs desse grupo de ensaios foram moldados, para ambos os materiais com o teor de 5% de cimento e energia intermediária para a comparação direta entre os dois materiais.

Por se tratarem de misturas com elevado teor de cimento, adotou-se uma norma de execução do ensaio que trata de argamassas de cimento Portland (NBR 7222/94). Durante o ensaio, o CP é solicitado por uma carga continuamente crescente, com incrementos de 0,05MPa/s. Para cada período de cura, foram moldados três CPs. Os resultados médios dos ensaios realizados nos CPs compostos por ambos os materiais, considerando os diferentes tempos de cura, são apresentados na Figura 29.

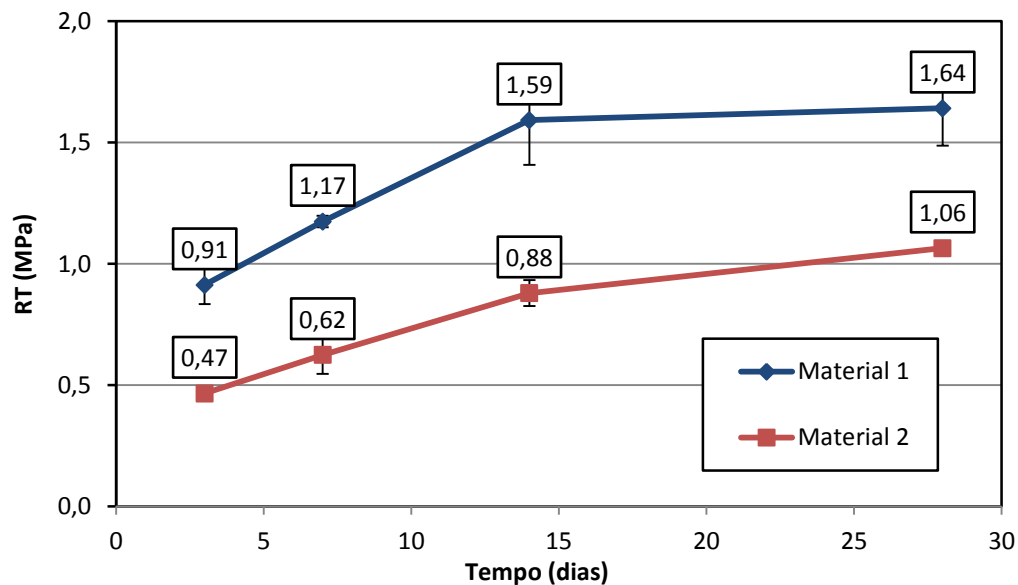


Figura 29 – Resultados de RT com cura

É possível perceber que os materiais estudados diferem nos valores de resistência obtidos. O Material 1, aos 28 dias de cura, apresenta RT de 1,64MPa, enquanto que o Material 2 apresenta 1,06 MPa. Essa variação pode ser explicada pelo teor de água acrescentado nas misturas, que foi mais elevado para as amostras compostas pelo Material 2. Considera-se ainda que a diferença entre os teores de 1% de cimento foi insuficiente para garantir comportamento comparável entre os dois materiais.

Nota-se também que o ganho de resistência com o tempo ocorre de maneira diferente para os dois materiais. O Material 1 apresenta ganho mais acentuado até os 14 dias de cura e posterior estabilização após esse período, já o Material 2 apresenta ganho significativo até os 28 dias de cura. Essa diferença pode ser explicada pelas diferentes quantidades de solo e, automaticamente, umidade presentes na mistura. O Material 2 por ser mais fino e, consequentemente, apresentar umidade ótima de compactação superior, possui maior quantidade de água disponível para a continuidade do processo de hidratação do cimento fazendo com que esse se estenda por mais tempo.

Em estudos com misturas do tipo BGTC, Balbo (2006) obteve um valor de RT de 2,3MPa. Considerando-se que a mistura do tipo BGTC do estudo citado apresentava diferente granulometria e umidade de compactação no ramo seco, o que favorece os resultados de resistência, pode-se considerar que o resultado de RT de 1,6 MPa da mistura proposta é satisfatório.

Por fim, foi feito um estudo contemplando a variação da energia de compactação utilizada na confecção dos CPs. As normas brasileiras, conforme citado anteriormente, definem a energia intermediária de compactação para misturas solo-brita-cimento ou solo-cimento. Contudo, é sabido que em campo a compactação sofrida por tais camadas é maior, devido à capacidade dos equipamentos utilizados. Sabe-se ainda que a normatização internacional não prevê uma energia intermediária de compactação, sendo utilizadas apenas a normal ou a modificada. Por esse motivo, optou-se por avaliar a influência da energia de compactação nas características mecânicas de misturas cimentadas.

A aplicação da energia modificada garante uma compactação mais eficiente e um menor consumo de água no teor ótimo de umidade. A fim de se identificar e quantificar os benefícios da maior energia de compactação, o material reciclado com cimento foi testado, em termos de RT, para as energias de compactação intermediária e modificada.

Para a determinação da umidade ótima de compactação na energia modificada, o ensaio de curva de compactação foi realizado novamente, resultando-se em 6,5% de teor de umidade na energia modificada para o Material 2, ao passo que na compactação utilizando energia intermediária são necessários 7,5% de umidade. Os resultados dos ensaios de RT obtidos para nas duas energias e para os tempos de cura de 3, 7 e 28 dias com 5% de consumo de cimento são apresentados na Figura 30.

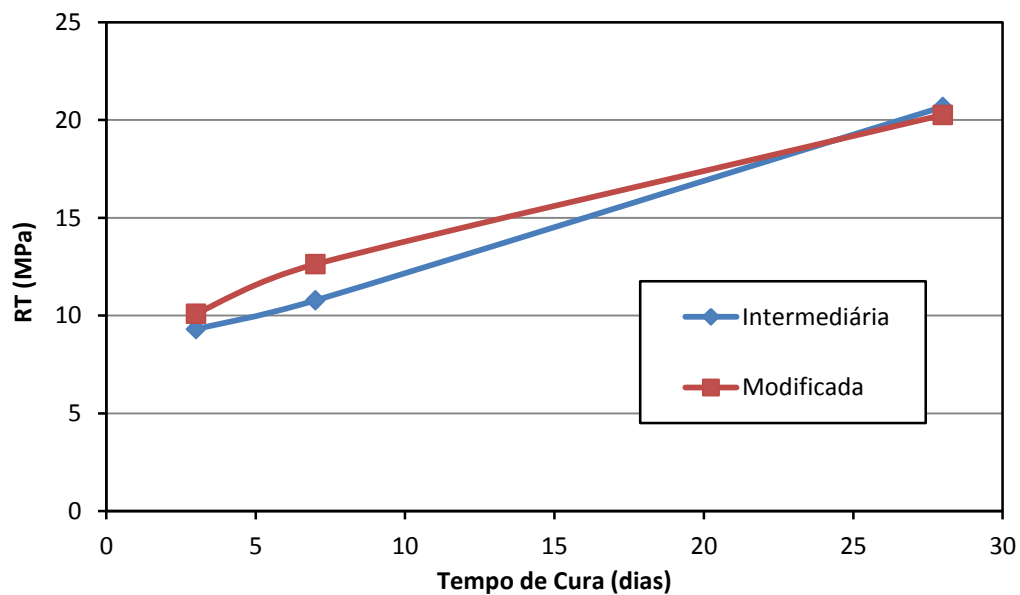


Figura 30 – Resultados de RT para a variação da energia de compactação

Os resultados obtidos para as duas energias de compactação testadas apresentaram pequena variação, indicando que a compactação manual em laboratório não apresenta distinções significativas quanto à RT.

Resistência à Compressão Simples (RCS)

No ensaio de RCS, o CP cilíndrico é solicitado por uma carga de compressão aplicada axialmente (Figura 31). O ensaio foi realizado em prensa hidráulica MTS, sendo o CP solicitado com carga de compressão, a uma taxa de deformação de 1mm/min, como determina a norma ABNT MB 3361/90. Para cada período de cura, foram moldados três CPs. Os resultados médios obtidos para amostras compostas pelo Material 1, considerando os diferentes tempos de cura, são apresentados na Figura 32.



Figura 31 – CP rompido após ensaio de RCS

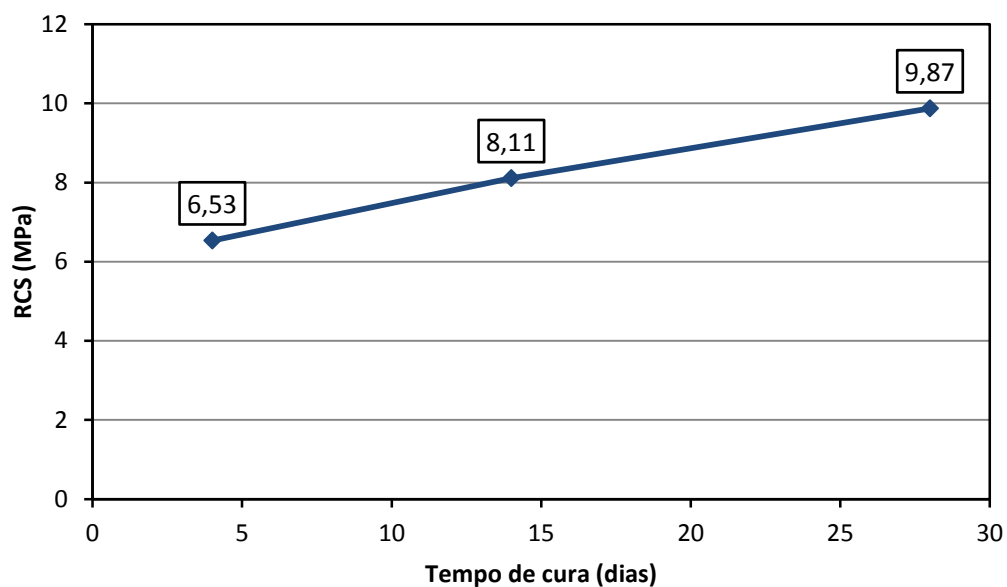


Figura 32 – Resultado do ensaio de RCS

Assim como no ensaio de RT, o ganho de resistência com o tempo de cura foi observado. Nota-se que, aos 28 dias de cura, os CPs chegaram a uma resistência média da ordem de 10MPa, resultado que pode ser comparado a resistência a compressão simples de uma BGTC, que apresenta valores médios de 13MPa (Balbo, 2006).

Tempo de cura

Obras rodoviárias buscam o menor tempo possível de abertura para o tráfego, tornando o conhecimento dos parâmetros de resistência do material nas primeiras idades extremamente importante. Anteriormente, foram apresentadas curvas de ganho de RT para quatro tempos de cura distintos, tendo os ensaios sido iniciados aos 3 dias de cura. Neste momento, são apresentados os resultados de ensaios de resistência à compressão para os dois materiais cimentados testados e uma curva detalhada da evolução da resistência à tração para o Material 2.

Resistência à Tração (RT)

A Figura 33 já foi apresentada anteriormente. Os materiais são diferentes no que diz respeito aos valores de RT obtidos: o Material 1 apresenta, aos 28 dias de cura, um valor de RT médio de 1,64MPa, enquanto o Material 2 apresenta um valor de 1,06MPa. Essa variação pode ser explicada pela diferença granulométrica encontrada entre os dois materiais, onde o material com granulometria mais fina e maior percentual de solo (Material 2) apresentou resistência mais baixa.

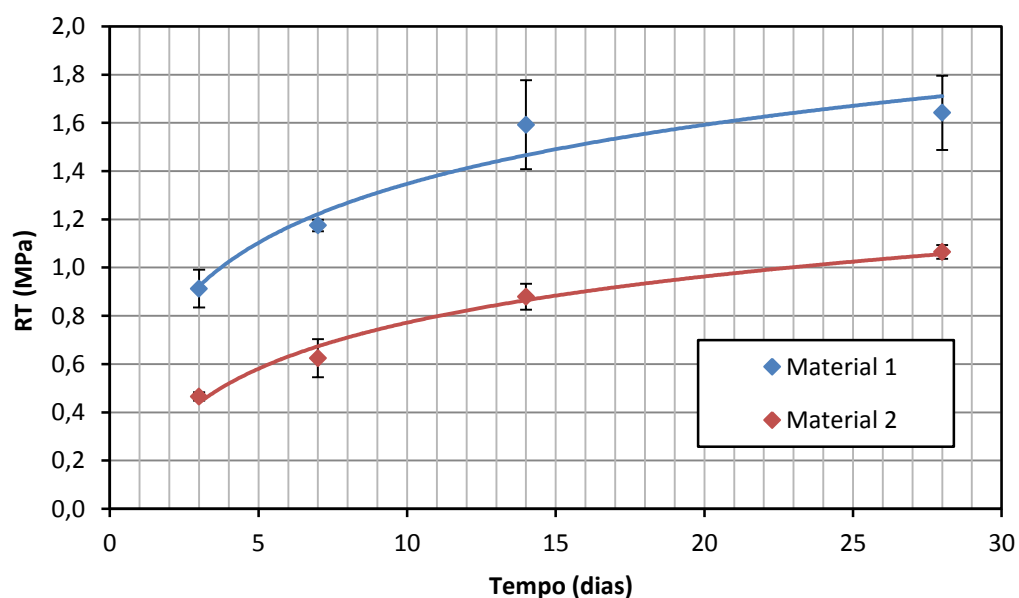


Figura 33 – Variação da resistência à tração com a cura

Resistência à Compressão Simples (RCS)

Os valores de RCS foram obtidos apenas para os tempos de cura de 7 e 28 dias, previstos nas normas brasileiras e internacionais. Esses resultados são apresentados na Figura 34. Assim como nos ensaios de RT, verificou-se a influência da cura na resistência à compressão dos dois materiais. O Material 1 manteve a superioridade nos resultados, com tensões de ruptura da ordem de 9,5MPa, enquanto o Material 2 apresentou tensões de ruptura da ordem de 5,5MPa, em ambos os casos considerando os 28 dias de cura. Novamente, a quantidade de água ou a relação água/cimento da mistura composta pelo Material 2 pode ter sido o fato responsável pelos menores valores de resistência obtidos para essas amostras.

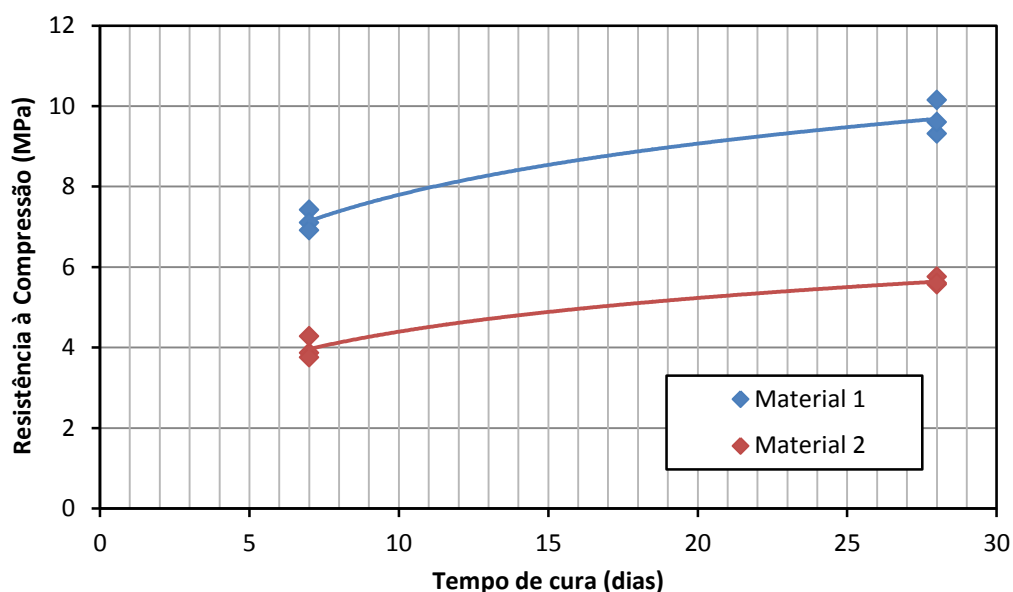


Figura 34 – Variação da resistência à compressão com a cura

De acordo com as especificações do DER/SP, os dois materiais apresentaram resistências à compressão superiores às mínimas estipuladas para materiais do tipo CCR, BGTC e solo-cimento (5, 4 e 4MPa, respectivamente). Em um estudo comparativo entre misturas de solo-cimento com um solo laterítico e outro não laterítico, Bechara (2010) encontrou valores de resistência à compressão da ordem de 5,5MPa em misturas com adição de 6% de cimento. Esses valores são compatíveis com aqueles obtidos para o Material 2, reforçando a idéia de

que a quantidade de material granular presente nessa mistura não é suficiente para garantir comportamento semelhante ao de misturas do tipo solo-brita-cimento, ou BGTC, mostrando também a grande influência do material de base reciclado.

O Material 1, por sua vez, apresentou valores de resistência à compressão compatíveis, apesar de inferiores, aos obtidos para uma BGTC com 4% de cimento, estudada por Balbo (2002), indicando que, apesar de apresentar granulometria graúda, esse material tem seus valores de resistência diminuídos pela presença de solo. Contudo, quando comparado às misturas solo-brita-cimento de material virgem com o mesmo teor de cimento (Tomei e Balbo, 2006), o Material 1 apresentou valores de resistência à compressão da ordem de 3 vezes superiores.

Curva detalhada da cura

Através dos ensaios realizados, foi possível identificar que o crescimento da resistência à tração com o tempo não ocorre de maneira linear. Verifica-se que, após 14 dias de cura, o acréscimo de resistência é muito inferior ao que ocorre até os 14 dias, indicando que as reações de hidratação do cimento são muito mais intensas nesse período e vão diminuindo gradativamente até estabilizarem, o que ocorre, teoricamente, aos 28 dias (Figura 35).

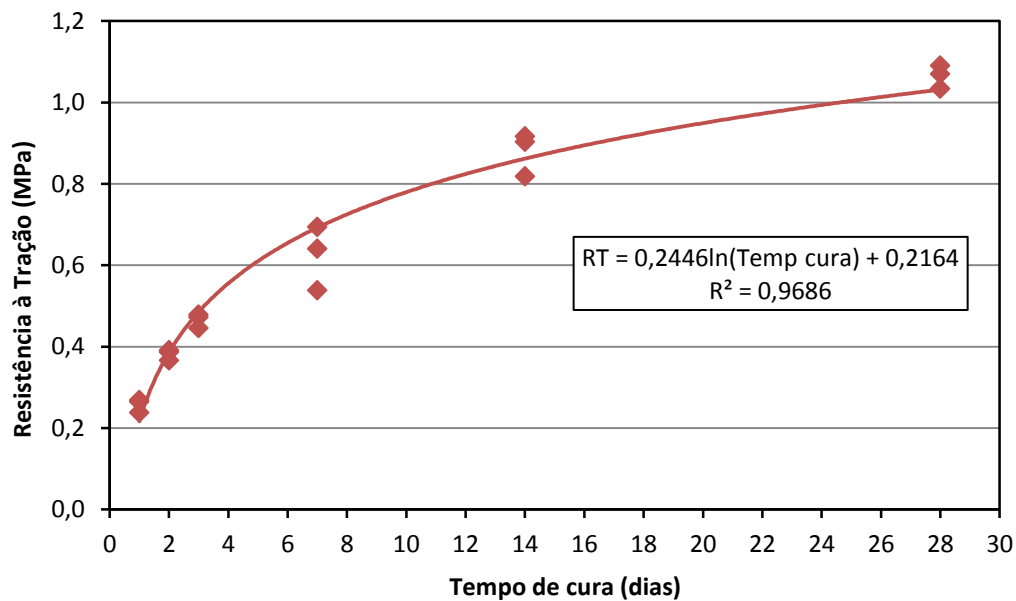


Figura 35 – Avaliação da cura do material cimentado

A evolução na cura de materiais cimentados em pavimentação geralmente é avaliada através de modelos lineares com menos pontos de observação. Contudo, estudos mostram que o ganho de resistência não ocorre linearmente. Aio (2004) testou quatro misturas de solo-cimento para seis tempos de cura que variavam de 3 a 120 dias. Verificou-se a tendência não linear de ganho de resistência e a influência da relação água/cimento no formato dessa curva.

O IBRACON (Instituto Brasileiro de Concreto) define tempos mínimos de cura do concreto com base nessa relação água/cimento. Quanto maior a relação, menor será a velocidade do ganho de resistência (IBRACON, 2005), sendo que se essa relação for dobrada, o tempo mínimo de cura para o concreto passa de 3 para 10 dias. Para uma mistura solo-cimento com relação água/cimento de 2, Moraes (2002) verificou ganhos de resistência até os 240 dias de cura.

A velocidade do ganho de resistência nas misturas cimentadas também é dependente do cimento utilizado. Cada tipo de cimento atende a objetivos específicos e tem o tempo de hidratação distinto (IBRACON, 2005). Assim, verifica-se que a forma da curva da cura do

material é específica para cada mistura e dependente da granulometria, dosagem e do cimento utilizado.

8.1.2.1. Avaliações adicionais com o material 2

Dando continuidade ao estudo do material reciclado com cimento, foram avaliadas quatro novas misturas compostas pelo Material 2, variando-se o teor de cimento e a energia de compactação empregada. Para a determinação da umidade ótima das misturas testadas, foram obtidas as curvas de compactação conforme a NBR 7182 (1986), mesma metodologia apresentada nas compactações realizadas anteriormente. Assim, os resultados de umidade ótima para cada uma das misturas testadas são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Umidade Ótima para as misturas com o Material 2

Energia de Compactação	Teor de Cimento	Umidade Ótima
Intermediária	5%	7,5%
Modificada	5%	* 6,5% *
	6%	6,5%
	7%	7,5%

Sabendo-se que o ensaio para a determinação da curva de compactação demanda uma elevada quantidade de material e devido à quantidade limitada disponível do Material 2, o teor de umidade ótima para a mistura com 5% de cimento compactada na energia modificada foi estimado. Como aumento da energia de compactação há a redução da umidade ótima de compactação das misturas (Pinto, 2007), portanto conhecendo-se a curva de compactação do Material 2 com teor de 5% de cimento na energia intermediária, definiu-se que a umidade ótima para a mesma mistura compactada na energia modificada seria 1% inferior, ou seja, 6,5%.

As curvas de compactação obtidas são apresentadas nas Figuras 36 e 37. Os resultados obtidos para as misturas com teor variável de cimento, porém mesma energia de compactação, mostram que maiores teores de cimento levaram a maiores teores de

umidade ótima de compactação. Isso ocorre pelo aumento da fração fina do material granular, e consequentemente da sua superfície específica, além disso, ele reage com a água, dando início ao processo de hidratação e consumindo a água contida na mistura nessas reações químicas.

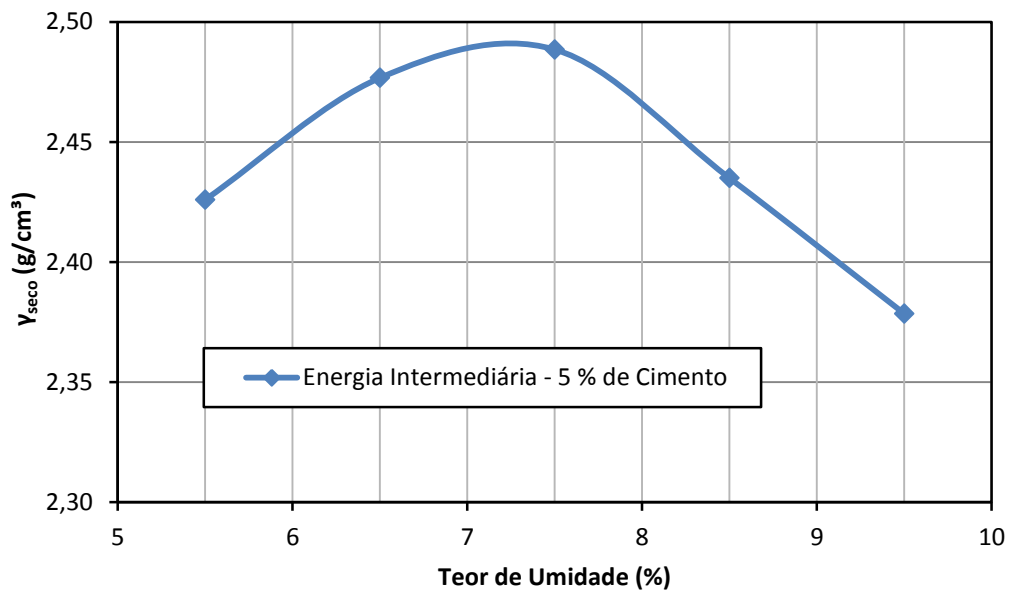


Figura 36 – Curva de compactação para o material 2 (energia intermediária)

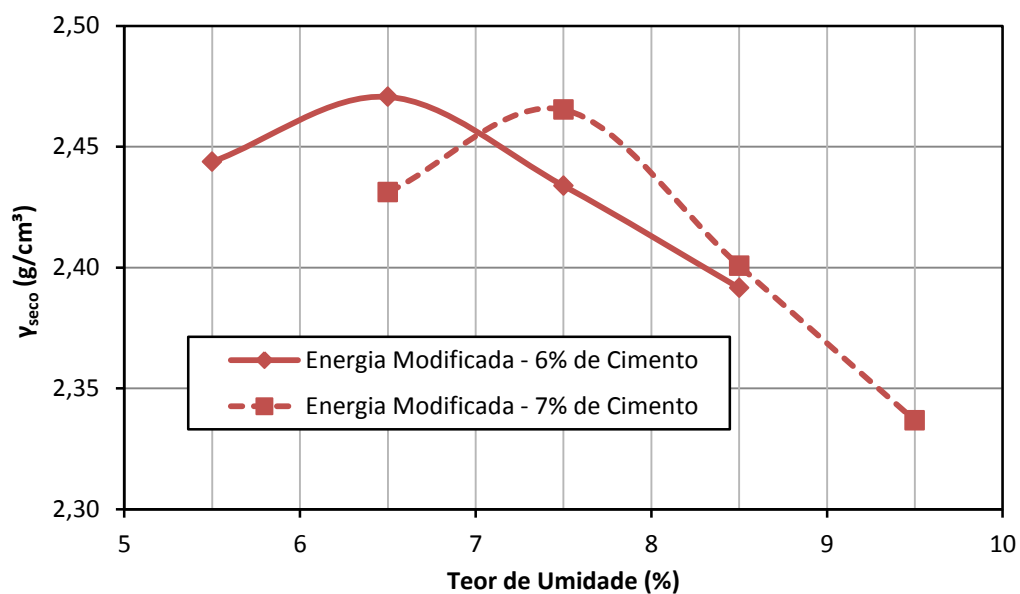


Figura 37 – Curva de compactação para o material 2 (energia modificada)

Variação no teor de cimento

O Material 2 possui distribuição granulométrica com a predominância da fração solo e se apresenta como um solo considerado de pior qualidade para fins de pavimentação. Desta forma, estimou-se um teor de cimento inicial de 6% em massa para o início das análises de propriedades mecânicas desse material. Como apresentado nos itens anteriores, verificou-se que esse teor não foi suficiente para atingir os mesmos valores de resistência obtidos para o Material 1, ambos aos 28 dias de cura e compactados na energia intermediária. Assim, foram testadas três misturas do Material 2 com teores de 5, 6 e 7% de cimento, compactadas em energia modificada, com o objetivo de se avaliar os efeitos do ganho na resistência e rigidez proveniente desses incrementos, em tempos de cura distintos.

Resistência à Tração (RT)

Os resultados para ensaios de RT (Figura 38) nos três períodos de cura testados (3, 7 e 28 dias) mostraram um aumento nos valores de RT com o aumento nos teores de cimento. Nota-se que, aos 3 dias de cura, todos os CPs apresentaram valores similares de RT, não sendo possível diferenciar os teores de cimento dos três grupos, indicando ainda que as reações de hidratação do cimento não haviam ocorrido de forma significativa.

Aos 28 dias de cura, foi possível identificar os três patamares de resistência, referentes aos três teores de cimento avaliados. Pelos valores obtidos, verifica-se que enquanto o aumento de 5 para 6% na quantidade de cimento resultou em um aumento médio de 0,2MPa na tensão de ruptura das misturas, o aumento de 6 para 7% resultou em um aumento médio de 0,5MPa.

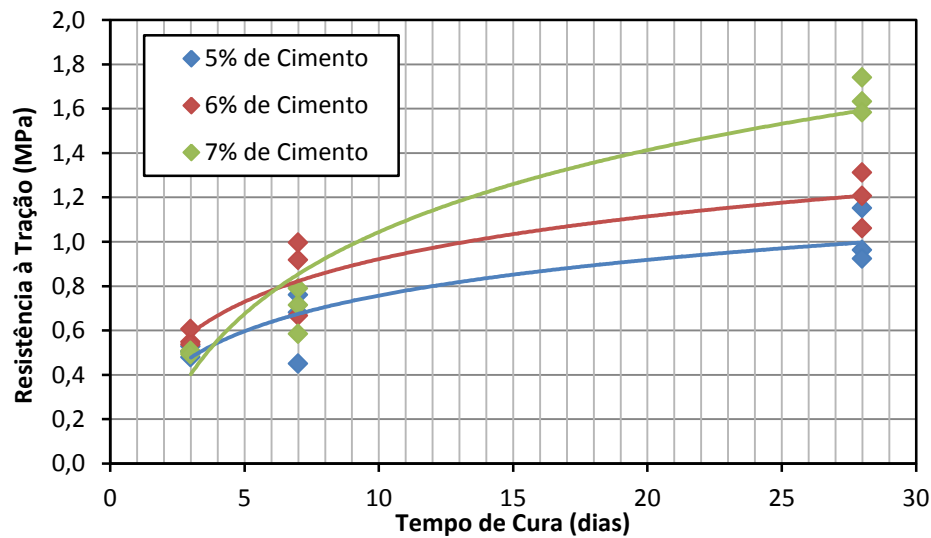


Figura 38 – Resultados de RT (variação nos teores de cimento)

Ao se testar estatisticamente as médias para os três teores de cimento e para os três períodos de cura, verificou-se que, para 3 e 7 dias, as médias de RT para os três teores de cimento podem ser consideradas iguais, dentro um mesmo período de cura, para um grau de 95% de confiabilidade no teste-t. Para o tempo de 28 dias de cura, são consideradas iguais, pelo mesmo teste estatístico, as amostras com 5% e 6% de cimento, sendo possível diferenciar apenas as amostras de 7% de cimento.

Em estudos relativos à tecnologia do concreto, verifica-se que a relação água/cimento tem influência determinante nos valores de resistência (à tração e à compressão). Sabe-se que quanto maior essa relação, menores serão os valores de resistência apresentados pelo concreto, uma vez que quanto maior a quantidade de água presente na mistura maior será o volume de vazios da mesma (Mehta e Monteiro, 2008). Dessa forma, foram calculadas as relações água/cimento das misturas testadas (Tabela 6). Verifica-se que, além de ter o maior teor, a mistura com consumo de 7% de cimento apresenta a menor relação água/cimento, o que corrobora com o ganho mais acentuado de sua resistência.

Tabela 6 – Relação água/cimento das misturas ensaiadas

Teor de cimento (%)	Teor de umidade (%)	Relação água/cimento
5	6,5	1,30
6	6,5	1,08
7	7,5	1,07

Resistência à Compressão Simples (RCS)

Os resultados obtidos nos ensaios de RCS para 7 e 28 dias de cura e para os três teores de cimento são apresentados na Figura 39. Verifica-se que foi possível avaliar os efeitos da cura para os três teores de cimento. Os ensaios das misturas com 5 e 6% de cimento apresentaram aumento de resistência com o tempo de cura, conforme esperado. Porém a mistura com 7% de cimento apresentou valores significativamente inferiores aos demais, além de uma menor influência do tempo de cura.

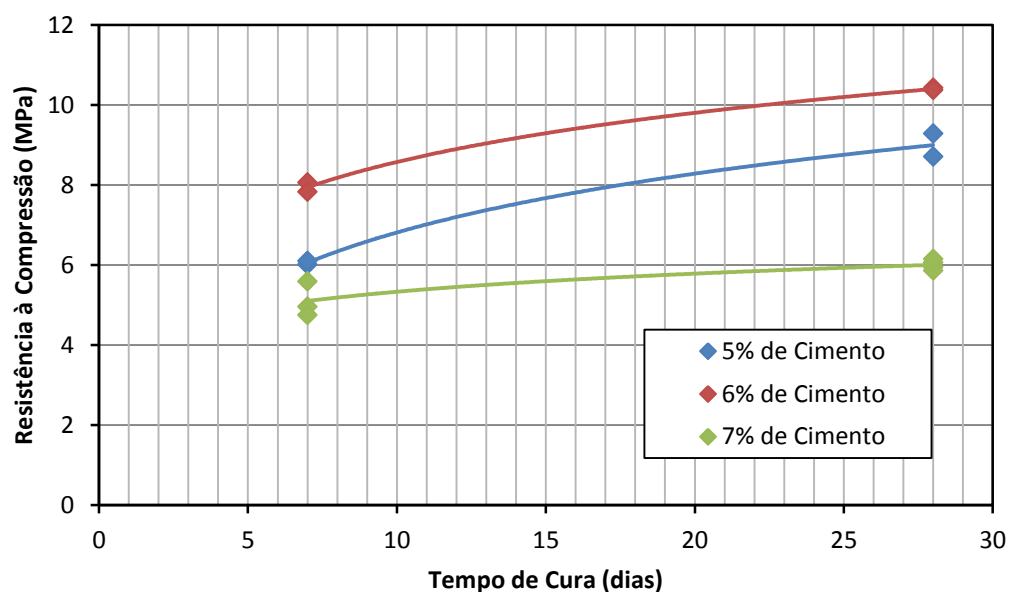


Figura 39 – Resultados de resistência à compressão - Variação de teores de cimento

A queda nos valores de RCS para 7% de cimento com relação aos demais percentuais avaliados pode estar relacionada à dosagem (definição da umidade ótima) dessas misturas, ou à problemas pontuais, ocorridos apenas nas amostras com esse teor de cimento.

Descartaram-se os problemas de dosagem, uma vez que os ensaios de RT não apresentaram a mesma queda. Dessa forma acredita-se que os problemas foram exclusivos desse grupo de CPs.

Módulo de Resiliência (MR)

Os resultados médios para os três teores de cimento, para uma tensão de confinamento de 0,1MPa, são apresentados na Figura 40. É possível observar que os resultados obtidos apresentam grande variabilidade, não sendo possível ranquear as misturas e nem os tempos de cura, devido aos elevados desvios padrão obtidos. Verifica-se, porém, que houve uma tendência de influência da cura na rigidez obtida para os três teores de cimento testados.

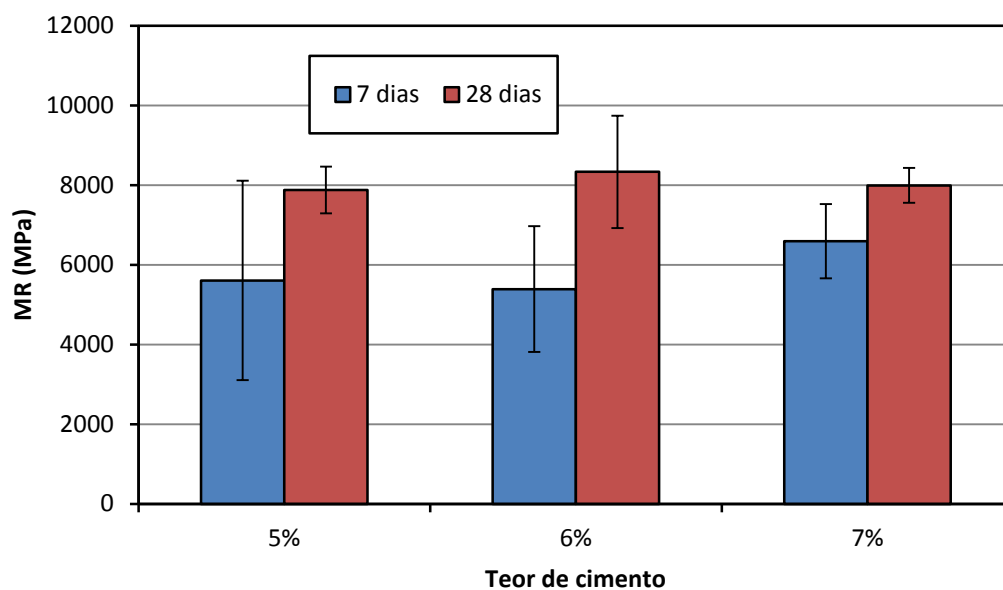


Figura 40 – Resultados de MR (variação de teores de cimento)

Para os três teores de cimento testados, o valor médio de MR obtido para os 28 dias de cura foi de 8.000MPa, condizente com aquele obtido por Balbo (2002) para um concreto compactado a rolo (CCR) que possuía 3% de cimento. Quando comparado com misturas que contém solo em sua formulação, o material reciclado com cimento apresenta rigidez semelhante ao solo-cimento (10% em massa), também apresentado por Balbo (2002).

O gráfico apresentado anteriormente não contempla o efeito do confinamento nas misturas avaliadas. Dessa forma, os resultados completos do ensaio de MR, para cada teor de cimento e para os dois tempos de cura, levando em consideração as diferentes combinações de tensão de confinamento, são apresentados nas Figuras 41 a 43.

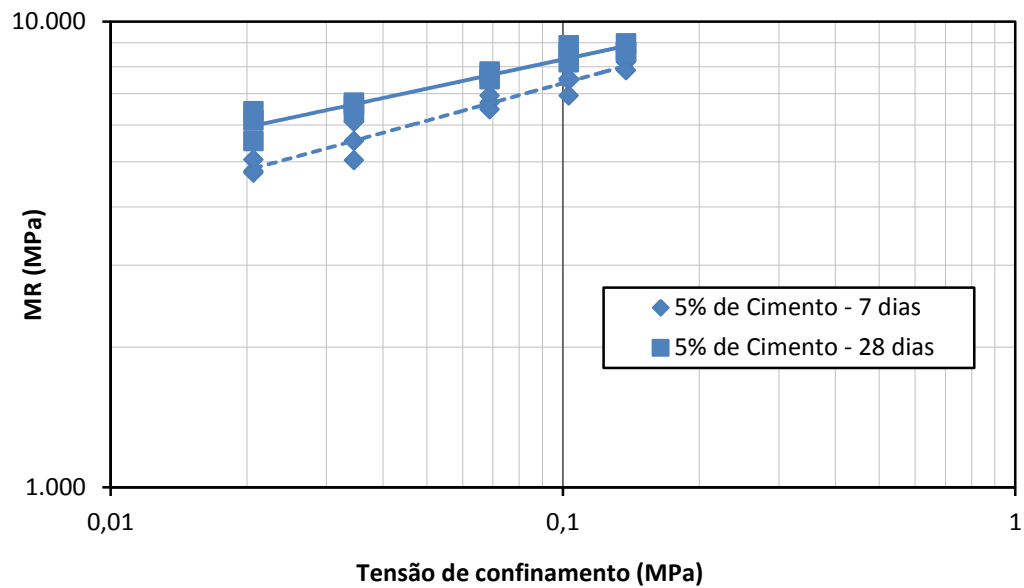


Figura 41 – Resultados de MR (5% de cimento)

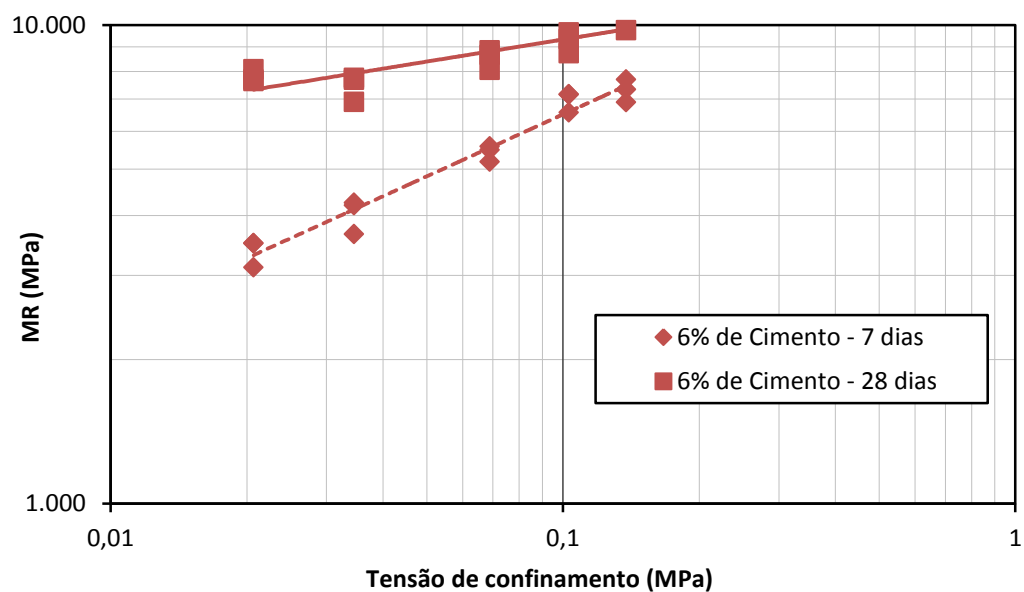


Figura 42 – Resultados de MR (6% de cimento)

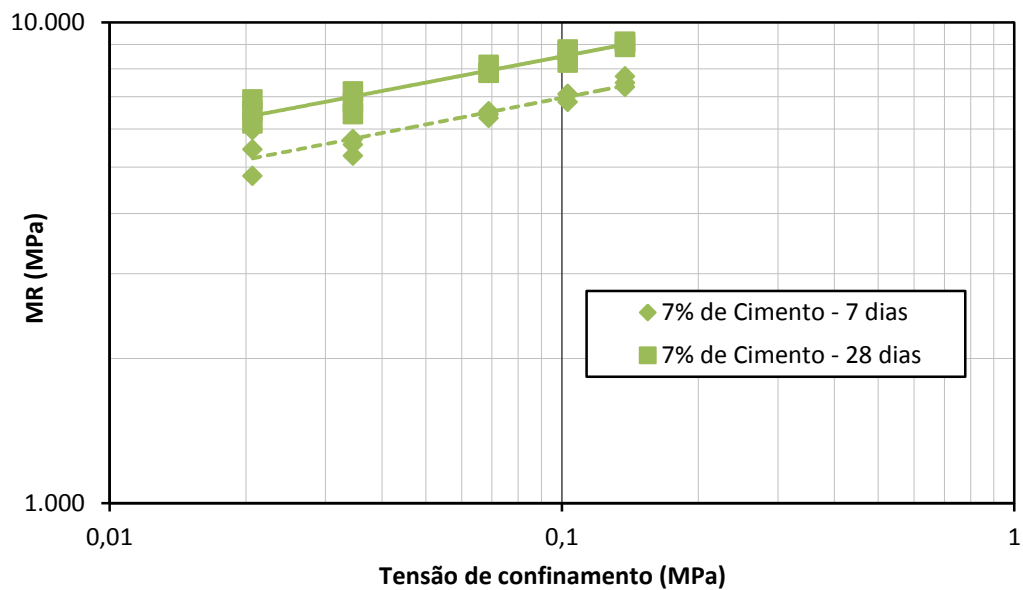


Figura 43 – Resultados de MR (7% de cimento)

Para os três casos apresentados, é possível verificar a influência da tensão de confinamento no valor de MR dos materiais, sendo que essa influência diminui aos 28 dias, quando o material já apresentou o enrijecimento devido à hidratação do cimento. A Figura 44 apresenta uma curva de cada mistura com os valores de MR aos 28 dias de cura, para melhor visualização das diferenças. Esse gráfico ilustra também a menor influência da tensão de confinamento para as três misturas ao fim do período de cura, indicando que o material passou a ter um comportamento mais próximo daquele de materiais coesivos e não granulares, diferente de como ocorre em suas primeiras idades.

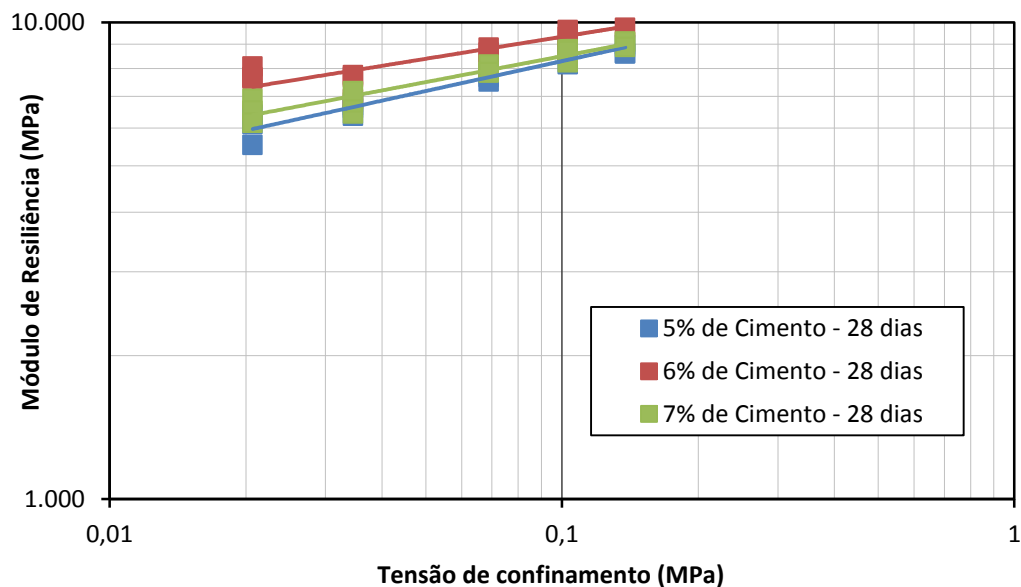


Figura 44 – Resultados de MR (28 dias de cura)

Variação na energia de compactação

As normas brasileiras definem a energia intermediária de compactação para misturas de solo-brita-cimento, ou solo-cimento. Contudo, é sabido que, na Europa e nos Estados Unidos, todo o controle da compactação do campo é feito com base na energia modificada (Balbo, 2002). Somado a isso, sabe-se que a normatização internacional não prevê uma energia intermediária de compactação, sendo utilizadas apenas a energia normal, ou a modificada.

A aplicação da energia modificada deve garantir uma compactação mais eficiente e um teor ótimo de umidade menor com relação a energias de compactação menos severas, o que traz o benefício adicional da redução da relação água/cimento.

Resistência à Tração (RT)

Anteriormente já foi apresentado que a energia de compactação não influenciou no parâmetro de RT, conforme mostra a Figura 45. O estudo foi complementado através da avaliação da RCS.

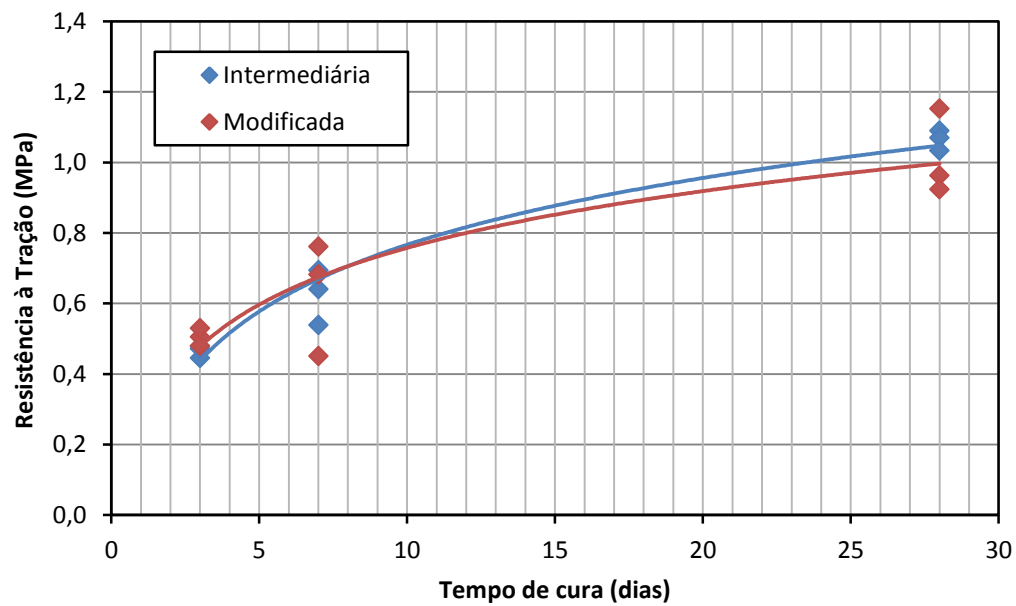


Figura 45 – Resultados de RT (variação na energia de compactação)

Resistência à Compressão Simples (RCS)

Através dos resultados de RCS, apresentados na Figura 46, é possível verificar a influência da variação na compactação das amostras. Os CPs compactados na energia modificada apresentaram valores de resistência superiores desde os 7 dias de cura.

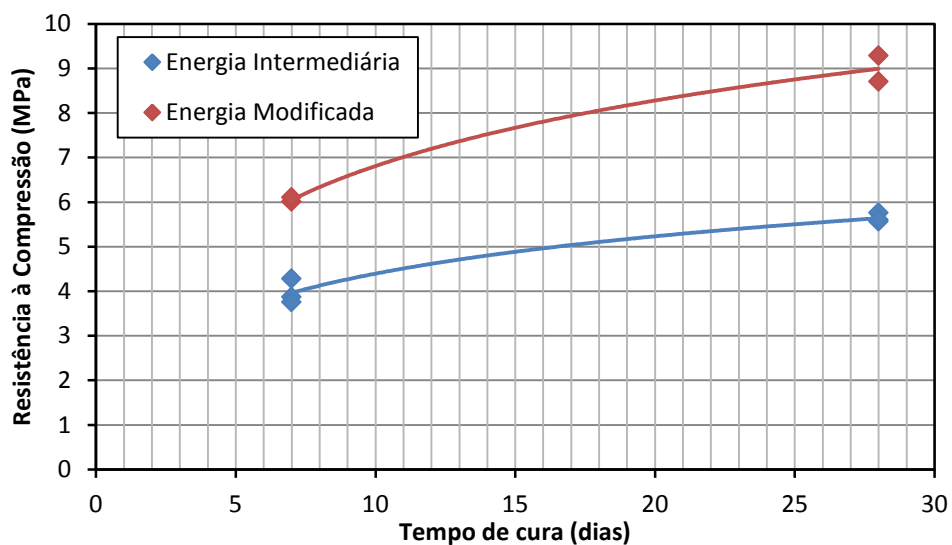


Figura 46 – Resultados de resistência à compressão (variação na energia de compactação)

Atribuiu-se o fato da energia de compactação não ter influenciado nos ensaios de RT à coesão que o cimento proporciona à mistura no plano de solicitação do ensaio (tração indireta). Em contrapartida, o ensaio à compressão causa o cisalhamento entre as partículas que apresenta mais resistência a esse esforço quando as amostras estão mais compactadas, havendo maior contato entre os grãos. Outra causa que pode ter levado a essa diferença no efeito da compactação entre a resistência da amostra à tração e à compressão seria a direção do plano de compactação com relação ao plano de ensaio, conforme ilustrado na Figura 47.

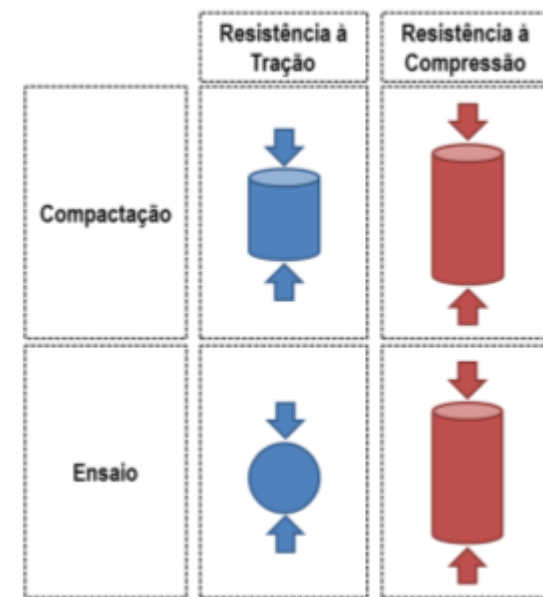


Figura 47 – Ilustração do plano de compactação e do plano de ensaios de RT e de RCS

8.1.2.2. Avaliação dos métodos de ensaio de ruptura

Tendo em vista as variações de resultados nos ensaios de rigidez em função da forma de aplicação de carga, conforme apresentado anteriormente, diferentes métodos de ensaio para a determinação da resistência à tração e da resistência à compressão foram testados.

Os materiais em estudo nesta pesquisa, compostos por uma mistura de solo, brita e cimento, apresentam comportamento intermediário entre o comportamento de um concreto e de um material granular. Desta forma, optou-se por realizar um estudo para

verificação da influência dos métodos de ensaio nas respostas desse tipo de material, conforme abordado nos itens a seguir.

Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Para a determinação da resistência à tração, foi selecionado o ensaio indireto pela disponibilidade de equipamento. Para o ensaio de RT de concreto, a norma ASTM C 496/11 define que o carregamento monotônico deve ser aplicado nas amostras através de incrementos lineares de tensão a uma taxa de 0,7 a 1,4MPa/s, tendo sido adotada a taxa de 1MPa/s. Os materiais granulares não são resistentes à tração, por isso não existe um método de ensaio aplicado pra solo. Optou-se por realizar os ensaios preconizados para misturas asfálticas, através da norma ASTM D 6931/07, que define que o carregamento, também monotônico, seja aplicado a uma taxa de deslocamento de 50mm/min.

Foram testadas 18 amostras de mesmas dimensões e mesma composição, variando-se apenas o tempo de cura e o método de ensaio. As amostras foram moldadas em cilindros com as dimensões do Proctor (10,0 × 12,7cm), compactadas na energia intermediária, na umidade ótima de compactação e com adição de 5% de cimento. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 48.

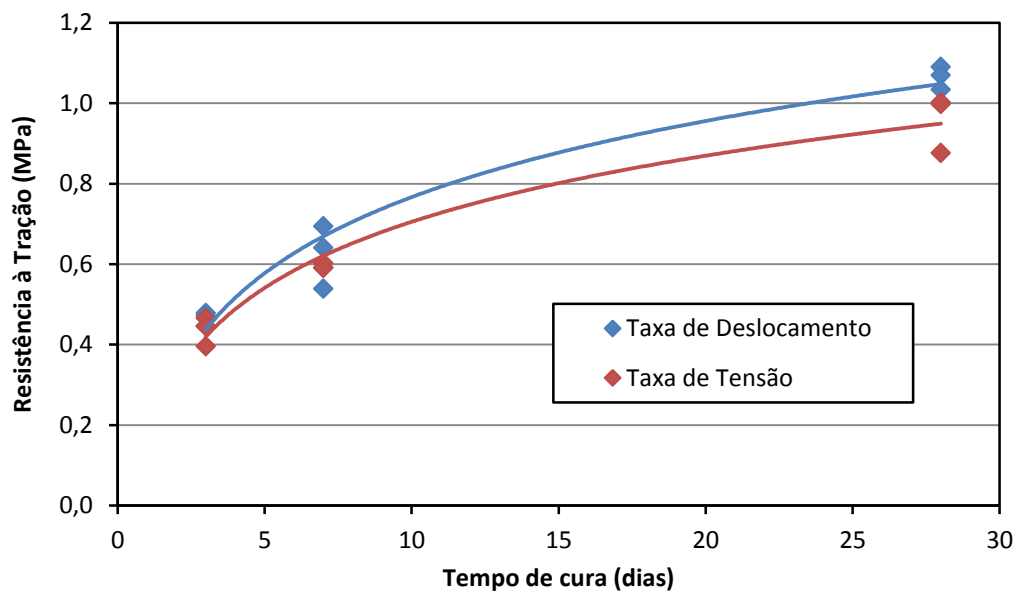


Figura 48 – Comparativo entre métodos de ensaio de RT

Verificam-se, primeiramente, os incrementos de resistência com a cura dos CPs, conforme o esperado em materiais que contém cimento. Em termos da variação do método de ensaio, verificou-se que, para 3 e 7 dias de cura, os ensaios realizados à taxa de deslocamento controlado apresentaram valores semelhantes aos realizados à taxa de tensão controlada. Aos 28 dias, o ensaio realizado à taxa de deslocamento controlado apresentou valores médios superiores. Foi realizado o teste-t entre as amostras de cada método de ensaio e para cada tempo de cura. Para um nível de 95% de confiança, não houve diferença estatisticamente significativa entre as médias obtidas em nenhum dos casos.

A pequena diferença observada pode ser explicada pela velocidade com a qual o ensaio é realizado. Os ensaios à taxa de deslocamento controlado são muito mais rápidos, durando aproximadamente 2s, enquanto que os realizados à taxa de tensão controlada são mais lentos, com duração de aproximadamente de 25 segundos.

Em estudo com misturas asfálticas, Moura e Bernucci (2004) verificaram variações nos resultados obtidos para ensaios de RT com diferentes velocidades de carregamento, sendo

que os ensaios mais rápidos (50mm/min) chegaram a valores de RT entre 100 e 150% superiores aos obtidos nos ensaios mais lentos (1mm/min).

Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS)

Os ensaios de RCS também foram realizados por dois procedimentos distintos. A ASTM C 39/12 define que em ensaios de RCS de CPs de concreto, a carga deve ser aplicada nas amostras através de incrementos lineares de tensão a uma taxa de 0,25MPa/s. Para solos, a ASTM D 2166 preconiza que esse carregamento seja aplicado a uma taxa de deslocamento de 1mm/min.

Assim, como nos ensaios de RT, foram testadas 18 amostras de mesmas dimensões e características, variando-se apenas o tempo de cura e o método de ensaio. As amostras foram moldadas em cilindros com as dimensões do Proctor (10,0 × 12,7 cm), compactadas na energia intermediária, na umidade ótima de compactação e com adição de 5% de cimento. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 49.

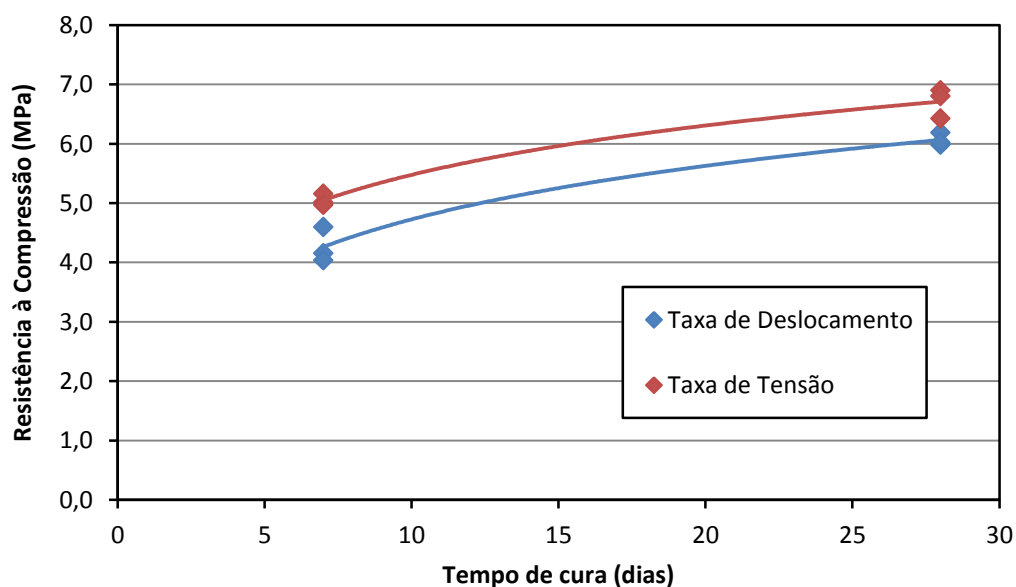


Figura 49 – Comparativo entre métodos de ensaio de RCS

Novamente, verificou-se o acréscimo de resistência decorrente da cura. Contudo, houve a inversão de resultados no que diz respeito ao método utilizado. Os CPs ensaiados à taxa de deslocamento controlado apresentaram resultados inferiores àqueles ensaiados à tensão controlada. Os ensaios feitos à taxa de tensão controlada tiveram duração média de 20s, enquanto que os ensaios realizados à taxa de deslocamento controlado tiveram duração média de 150s. Dessa forma, atribui-se essa inversão justamente a inversão nos tempos de duração dos ensaios de acordo com os métodos adotados.

Portanto, assim como nos ensaios de RT, os ensaios de RCS apresentam resultados superiores quando realizados a velocidades maiores uma vez que não há tempo para a acomodação do material durante o ensaio. Quando submetidas ao teste-t, as médias para os dois métodos de ensaio, para cada tempo de cura, se mostraram estatisticamente diferentes para um nível de confiança de 95%, podendo-se assim afirmar que houve diferença significativa entre os resultados obtidos para os diferentes métodos de ensaio. Silva et al. (2004) realizaram um estudo para CPs de concreto de cimento Portland. Os resultados para ensaios rápidos de ruptura à compressão (6,5MPa/s) apresentaram pouca variação em relação aos resultados para ensaios lentos (0,5MPa/s), no entanto apresentaram a mesma tendência de maiores valores de resistência para maiores velocidades de ensaios.

A fim de se compreender melhor os efeitos do tempo de carregamento, as curvas de tensão × deformação foram traçadas para os dois tempos de cura e nos dois métodos de ensaio avaliados. Essas curvas são apresentadas na Figura 50 para 7 dias de cura, e na Figura 51 para 28 dias de cura.

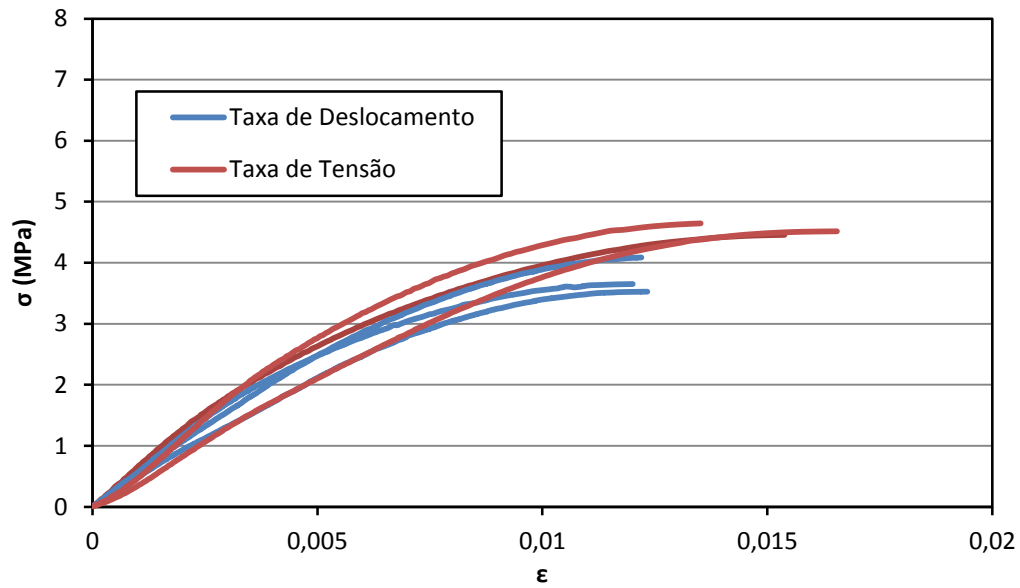


Figura 50 – Curva tensão × deformação para CPs com 7 dias de cura

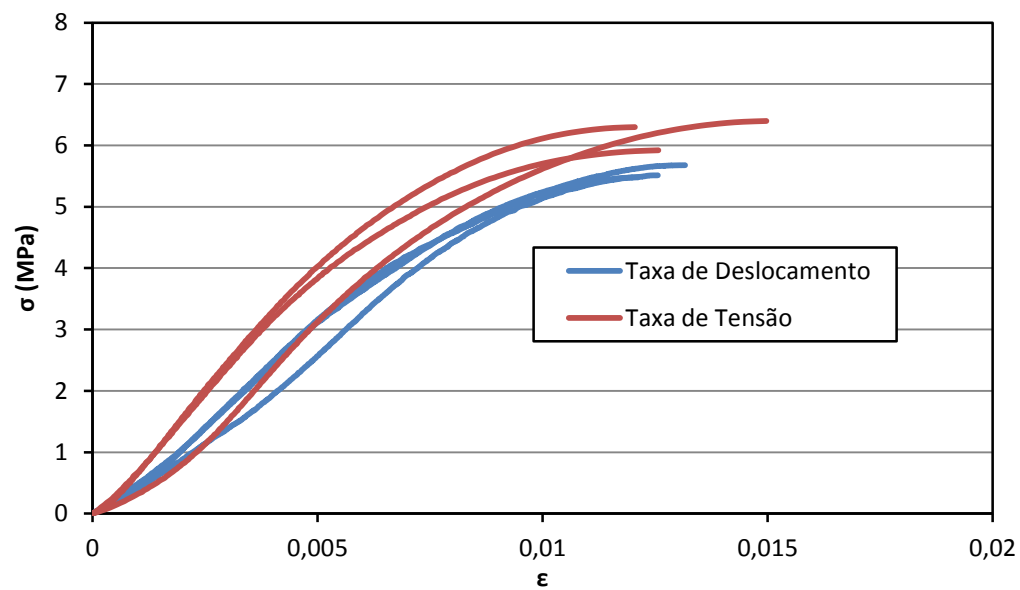


Figura 51 – Curva tensão × deformação para CPs com 28 dias de cura

Verifica-se que, para 7 dias de cura, os ensaios realizados à taxa de tensão controlada (mais rápidos) apresentaram valores superiores de resistência e ruptura com maiores níveis de deformação, indicando que o ensaio mais lento foi menos severo. Para os ensaios realizados aos 28 dias de cura, verificou-se que a ruptura ocorreu para níveis iguais de deformação para os dois métodos de ensaio. Isso pode ter ocorrido devido ao fim do processo de hidratação

do cimento, estando os CPs mais enrijecidos e reduzindo os efeitos da acomodação da amostra ao longo do ensaio.

8.2. RECICLADO COM EMULSÃO

A mistura reciclada com emulsão foi avaliada nesta pesquisa de modo a se obter os parâmetros de influência no comportamento deste material. Procurou-se avaliar os parâmetros relativos a variações na dosagem das misturas.

8.2.1. Caracterização do material

O material fresado, proveniente da camada de revestimento asfáltico deteriorada dos trechos experimentais, foi avaliado em relação à sua distribuição granulométrica, índice de forma e abrasão Los Angeles. O material foi homogeneizado e quarteado de modo a se obter uma amostra representativa para as análises em laboratório. A análise granulométrica do material é apresentada na Figura 52, bem como os limites da Faixa C da norma de pré-misturado a frio (DNER-ES 390/99).

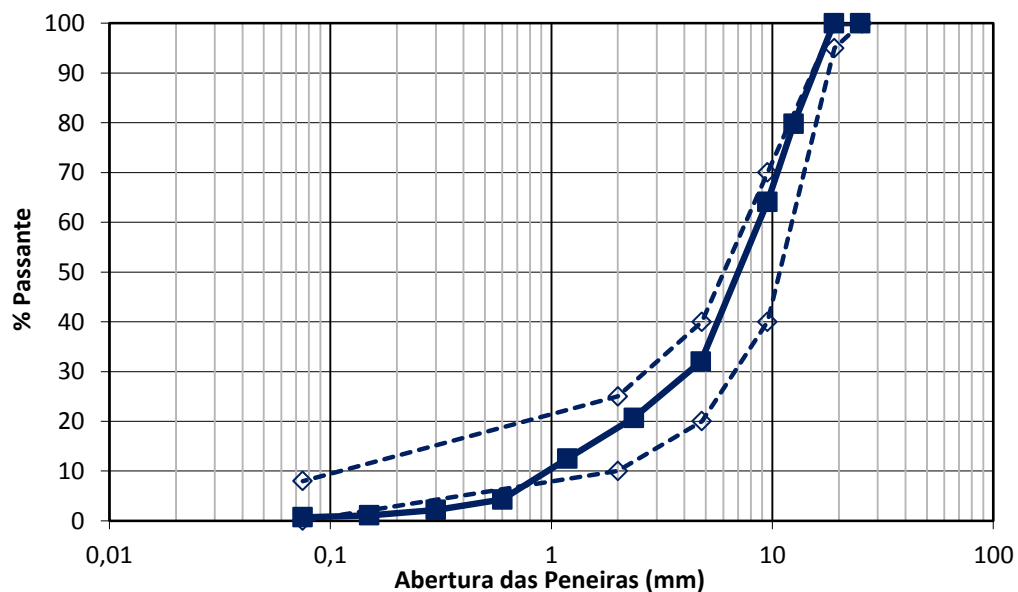


Figura 52 – Distribuição granulométrica do material fresado

Para a avaliação do desgaste no ensaio de abrasão, foi utilizada a norma DNER ME 035/98, com auxílio do equipamento Los Angeles (Figura 53a). Apesar de a norma não definir parâmetros específicos para agregados fresados, optou-se por ensaiar amostras lavadas, com secagem à temperatura de 30°C, para que não houvesse interferência da alta temperatura na forma dos grumos. O resultado do ensaio foi de 28% de perda, estando dentro do valor admissível de 40%, definido na norma. É importante ressaltar que o ensaio deste material é afetado pelo teor de ligante incorporado, uma vez que o ligante protege o material pétreo do desgaste, no entanto, estes grumos podem desprender durante o ensaio.

A avaliação do índice de forma dos agregados se deu de acordo com a norma ASTM D 4791/08, com determinação das partículas alongadas nas proporções 1:3 e 1:5. O procedimento de determinação é manual e se dá por meio do equipamento apresentado na Figura 53b. A norma determina um limite de 5% para a proporção 1:5, sendo que os agregados fresados apresentaram 0% nesta classe, e o limite de 20% para a proporção de 1:3, tendo os agregados fresados apenas 5% de agregados nesta classe, o que evidencia a predominância de partículas com boa cubicidade. O processo de fresagem a frio, no qual os agregados são fraturados, garante estes resultados.



(a)



(b)

Figura 53 – Ensaios de caracterização física do fresado: (a) abrasão Los Angeles e (b) índice de forma

8.2.2. Projeto da mistura

As misturas asfálticas recicladas avaliadas nesta pesquisa são produzidas em temperatura ambiente, a partir dos agregados fresados em sua granulometria original, com adição de água de molhagem, fíler ativo (cimento no teor de 1%) e emulsão asfáltica modificada por polímero SBS. Como primeiro grupo de ensaio, foi avaliado o comportamento mecânico das misturas recicladas com emulsão, permitindo definir qual o tempo de cura ideal para que os resultados dos demais ensaios sejam comparados com confiabilidade.

A produção seguiu os parâmetros definidos na norma DNER ME 107/94 para misturas a frio, uma vez que não existe especificação para as misturas recicladas a frio. A compactação foi realizada com 75 golpes por face no compactador Marshall, e o processo de cura foi garantido em estufa à temperatura de 60°C, até a estabilização do peso, o que ocorreu em média, após 48 horas. Definiu-se, então, que após o período de cura até a constância de peso, somado ao prazo de 14 dias em temperatura constante de 25°C, os resultados dos ensaios não apresentam variabilidade associada ao tempo de cura. Os dados podem ser pareados e comparados em termos de comportamento mecânico.

Tendo em vista que o teor de fluido das misturas recicladas com emulsão exerce significativa influência no comportamento desse material, procurou-se definir se o comportamento mecânico varia sob condições distintas, como: (i) mantendo-se fixa a proporção entre emulsão e umidade (Grupo 1) e (ii) mantendo-se fixa a parcela de umidade na mistura (Grupo 2).

O processo de dosagem inicial, realizado de acordo com a metodologia Marshall, resultou em teores ótimos de 3% de emulsão e 3% de umidade. Esses resultados acabaram norteando a primeira etapa da avaliação do efeito do teor de umidade. Os demais teores, variando-se a cada 0,3%, tiveram a mesma proporção, conforme apresentado na Tabela 7. É importante ressaltar que a quantidade de água presente na emulsão era de 40%.

Tabela 7 – Composição dos CPs do Grupo 1

	Grupo 1				
Teor de emulsão (%)	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6
Teor de água a adicionar (%)	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6
Total de fluido (%)	4,8	5,4	6,0	6,6	7,2
Teor de emulsão (%)	1,44	1,62	1,80	1,98	2,16
Teor de água total (%)	3,36	3,78	4,20	4,62	5,04

Todas as amostras foram avaliadas em relação a seus parâmetros volumétricos (Tabela 8). Observou-se que a densidade dos CPs não foram afetadas significativamente pelo teor de água adicionado e que o aumento no teor de umidade resultou em menores densidades, o que implica em maior volume de vazios deixado pelo excesso do teor de fluido.

Tabela 8 – Parâmetros volumétricos das amostras do Grupo 1

Grupo 1			
CP	Teor de emulsão (%)	Teor de água a adicionar (%)	Densidade
1	2,40	2,40	1,918
2			1,949
3			1,857
4			1,964
Média			1,922
5	2,70	2,70	1,836
6			1,922
7			1,886
8			1,888
Média			1,883
9	3,00	3,00	1,892
10			1,939
11			1,836
12			1,921
Média			1,897
13	3,30	3,30	1,887
14			1,881
15			1,889
16			1,775
Média			1,858
17	3,60	3,60	1,828
18			1,926
19			1,912
20			1,896
Média			1,891

Ainda de acordo com o processo de dosagem Marshall, com variação no teor de emulsão a cada 0,3%, variou-se o teor de umidade de modo que o teor de umidade total (formado por água adicionada e pela água que compõe a emulsão) fosse mantido constante, conforme se observa na Tabela 9.

Tabela 9 – Composição dos CPs do Grupo 2

	Grupo 2				
Teor de emulsão (%)	2,40	2,70	3,0	3,30	3,60
Teor de água a adicionar (%)	3,24	3,12	3,0	2,88	2,76
Total de fluido (%)	5,64	5,82	6,0	6,18	6,36
Teor de emulsão (%)	1,44	1,62	1,8	1,98	2,16
Teor de água total (%)	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2

Os parâmetros volumétricos obtidos para as amostras do Grupo 2, apresentados na Tabela 10, indicam que, mesmo com a quantidade total de água constante, há uma variação nos valores de densidade em função do teor de ligante. No ramo mais seco, há uma maior resistência à compactação, assim como no ramo umido, onde os maiores vazios deixados pelo fluido total mostram como os teores de emulsão e de umidade afetam os parâmetros volumétricos.

Tabela 10 – Parâmetros volumétricos das amostras do Grupo 2

Grupo 2			
CP	Teor de emulsão (%)	Teor de água a adicionar (%)	Densidade
21	2,40	3,24	1,915
22			1,990
Média			1,953
23	2,70	3,12	1,997
24			1,947
25			1,899
Média			1,948
9	3,00	3,00	1,892
10			1,939
11			1,836
Média			1,889
26	3,30	2,88	1,937
27			1,964
28			1,939
Média			1,947
29	3,60	2,76	1,960
30			1,905
31			1,904
Média			1,923

8.2.3. Comportamento mecânico

Os ensaios de comportamento mecânico procuraram avaliar duas características importantes das misturas: MR e RT por compressão diametral. Os ensaios foram realizados em temperatura ambiente, com quatro CPs para cada condição. Os resultados para o Grupo I são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados mecânicos para as amostras do Grupo 1

CP	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	MR (kgf/cm ²)	RT (MPa)	Teor de emulsão (%)	Teor de água (%)
1	69,0	101,6	731	0,631	2,40	2,40
2	68,5	101,6	753	0,583		
3	68,5	101,6	707	0,753		
4	66,6	101,6	1098	0,674		
Media			822,3	0,660		
5	70,0	101,6	861	0,543	2,70	2,70
6	68,4	101,6	999	0,696		
7	69,9	101,6	884	0,729		
8	72,0	101,6	834	0,664		
Media			894,5	0,658		
9	70,2	101,6	842	0,693	3,00	3,00
10	69,0	101,6	803	0,730		
11	71,2	101,6	774	0,658		
12	69,7	101,6	888	0,805		
Media			826,8	0,721		
13	72,6	101,6	634	0,721	3,30	3,30
14	72,1	101,6	761	0,666		
15	72,2	101,6	796	0,693		
16	72,4	101,6	750	0,699		
Media			735,3	0,695		
17	68,1	101,6	1032	0,838	3,60	3,60
18	71,0	101,6	813	0,713		
19	71,2	101,6	911	0,805		
20	72,9	101,6	-	0,667		
Media			918,7	0,756		

Os resultados indicam coerência entre o comportamento mecânico e os parâmetros volumétricos. Observa-se, no entanto, que os resultados de RT são superiores a relações conhecidas entre este e o MR, o que pode estar associado ao período de cura. Os resultados obtidos nos ensaios realizados nas amostras do Grupo II são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados mecânicos para as amostras do Grupo 2

CP	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	MR (kgf/cm ²)	RT (MPa)	Teor de emulsão (%)	Teor de água (%)
21	66,4	101,6	1001	0,860	2,40	2,40
22	66,3	101,6	1080	0,733		
Média			1040,5	0,797		
23	65,9	101,6	1345	1,040	2,70	2,70
24	68,5	101,6	832	0,672		
25	67,2	101,6	740	0,779		
Média			972,3	0,830		
9	70,2	101,6	842	0,693	3,00	3,00
10	69,0	101,6	803	0,730		
11	71,2	101,6	774	0,658		
12	69,7	101,6	888	0,805		
Média			826,8	0,721		
26	68,2	101,6	989	0,791	3,30	3,30
27	67,7	101,6	1024	0,939		
28	69,5	101,6	835	0,776		
Média			949,3	0,835		
29	67,8	101,6	1000	0,816	3,60	3,60
30	69,5	101,6	933	0,708		
31	68,3	101,6	823	0,772		
Média			918,7	0,765		

Os resultados de comportamento mecânico das amostras do Grupo 2 com teor de fluido constante se apresentaram superiores, podendo indicar que a adição de teores muito elevados de água podem prejudicar o comportamento das misturas recicladas com emulsão. Isso pode ser atribuído à formação do filme asfáltico, que, na presença de teores muito elevados de umidade, pode ter deficiências de recobrimento. A dosagem deve, portanto, considerar tanto os parâmetros volumétricos quanto o comportamento mecânico.

8.2.4. Compactação Marshall

8.2.4.1. Variação no teor de emulsão

Dando continuidade aos estudos relativos ao material reciclado com emulsão foram realizados ensaios variando-se o teor de emulsão em torno do ótimo, determinado por dosagem Marshall apresentada anteriormente. Essa variação tem o objetivo de determinar

valores para o comportamento mecânico dessa mistura quando se utiliza falta e excesso de emulsão asfáltica, procurando verificar os possíveis benefícios ou problemas nessas práticas.

Foram moldados três grupos de CPs, através da compactação Marshall, com teores de emulsão de 2, 3 e 4%. Foram mantidos constantes o teor de água de molhagem, em 3%, como na mistura aplicada em campo, e a faixa granulométrica definida anteriormente. Os CPs foram ensaiados de modo a fornecer resultados de MR e RT. Além disso, os CPs foram submetidos a ensaios de DUI (Dano por Umidade Induzida), para determinação de possíveis perdas de adesividade e coesão do filme de ligante asfáltico das misturas após a ação da água.

Porcentagem de vazios

O conhecimento da porcentagem de vazios das misturas com emulsão traz informações referentes à compactação da massa e a sua permeabilidade, ou suscetibilidade à entrada e saída de água. É sabido que a presença de água em camadas asfálticas do pavimento provoca problemas de adesividade e coesividade comprometendo a estabilidade da mistura.

A determinação da porcentagem de vazios é feita por meio de pesagem hidrostática onde os CPs são submetidos à pesagem seca e pesagem imersa em água, estando, nesta última etapa, impermeabilizados por selagem a vácuo devido ao elevado volume de vazio desse tipo de mistura (Figura 54). Os resultados obtidos para os três percentuais de emulsão são apresentados nos gráficos das Figuras 55 a 57.



Figura 54 – CP embalado para pesagem imersa

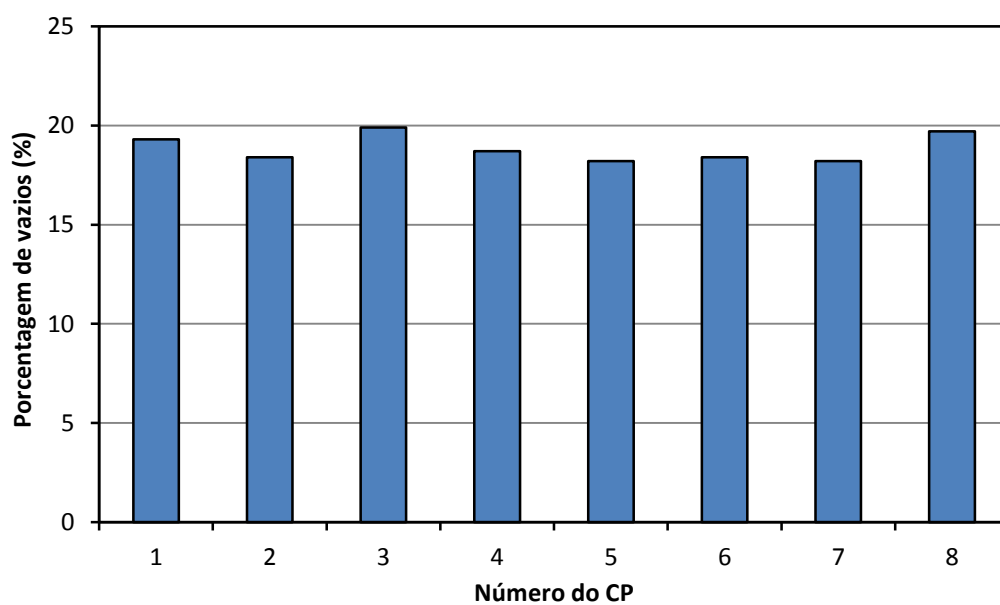


Figura 55 – Resultados de porcentagem de vazios (2% de emulsão)

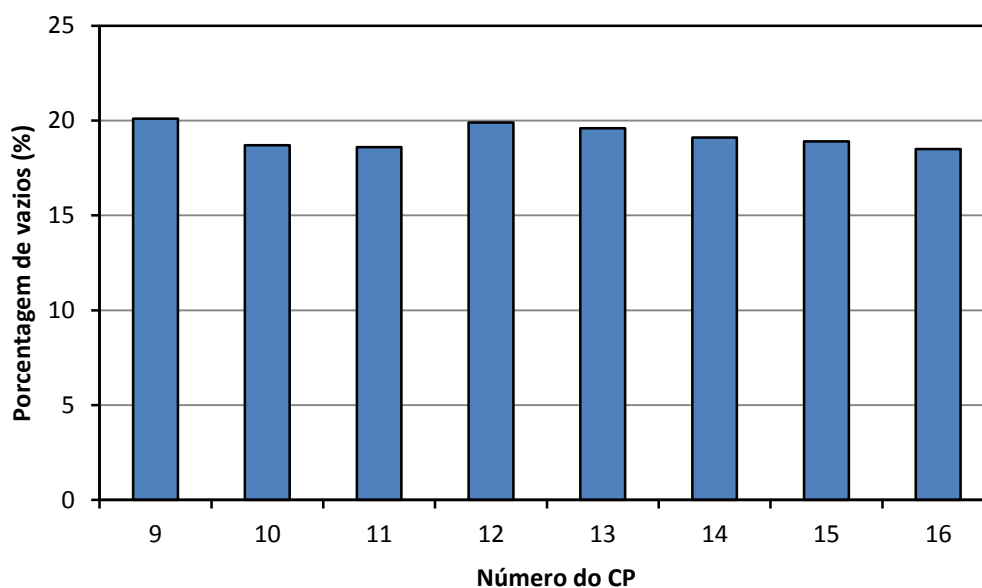


Figura 56 – Resultados de porcentagem de vazios (3% de emulsão)

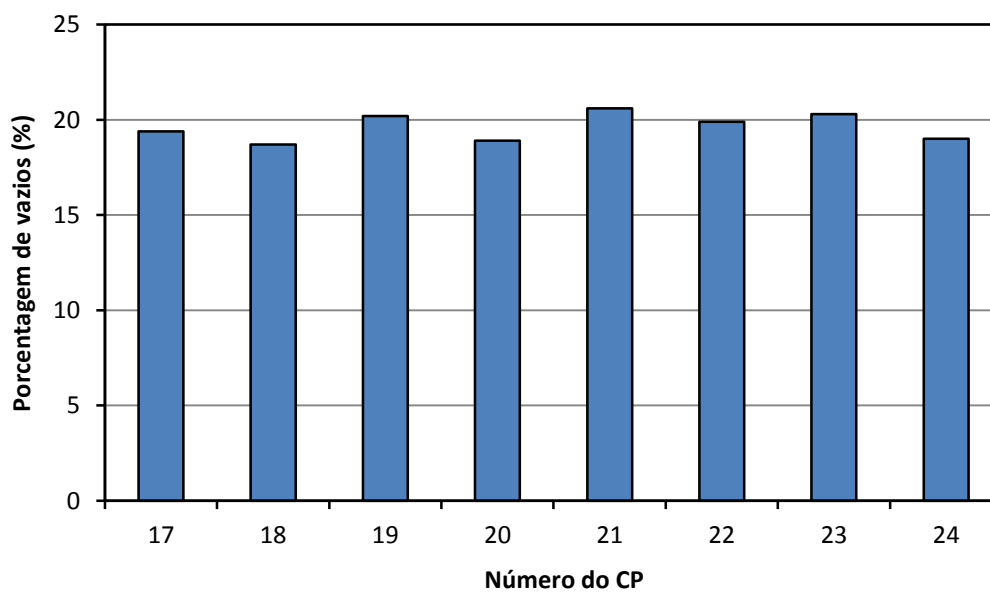


Figura 57 – Resultados de porcentagem de vazios (4% de emulsão)

Pelos dados apresentados, verifica-se que houve pouca variabilidade nos resultados de CPs de um mesmo grupo e que o teor de emulsão não variou significativamente a porcentagem de vazios. Contudo, verifica-se que, assim como os resultados apresentados anteriormente, maiores teores de fluído na mistura levam a maiores porcentagens de vazios, indicando

maior dificuldade de compactação dos CPs. A Figura 58 apresenta a tendência de crescimento da porcentagem de vazios em função do crescimento do teor de emulsão.

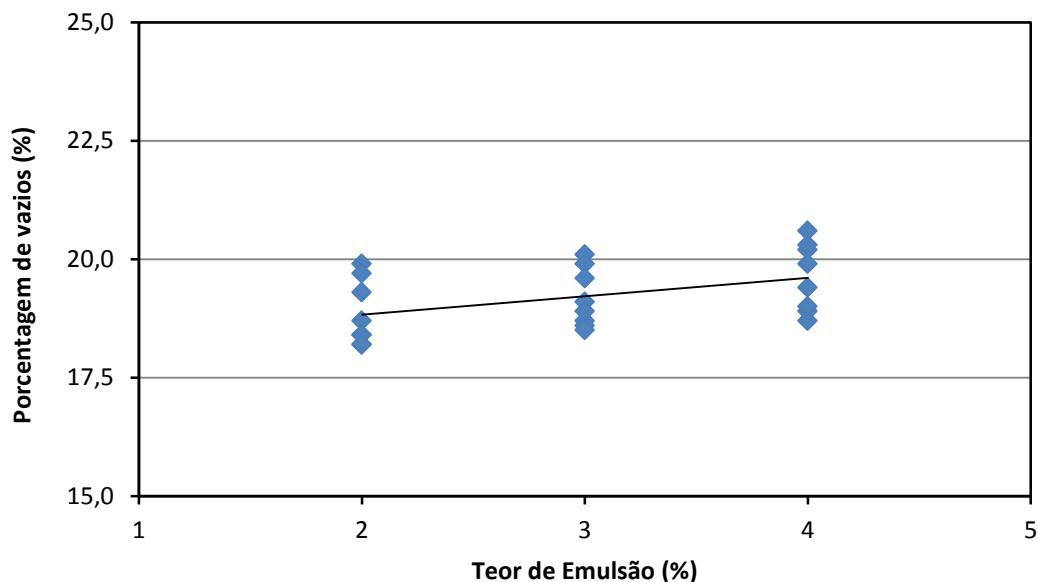


Figura 58 – Porcentagens de vazios vs. teor de emulsão

Módulo de Resiliência (MR)

O ensaio de MR tem o objetivo de quantificar as características de rigidez da mistura asfáltica, parâmetro essencial para métodos mecanicistas de análise, ou projeto estrutural. Os ensaios foram realizados em prensa hidráulico do tipo MTS (Figura 59), que possibilita um melhor controle do pulso de tensão e medidas de deformação.

Os CPs Marshall foram ensaiados por compressão diametral onde são realizadas solicitações cíclicas verticais e medidas as deformações horizontais, permitindo que se obtenha matematicamente o MR das amostras, seguindo-se o método de ensaio para misturas asfálticas (ASTM D 7369-09).

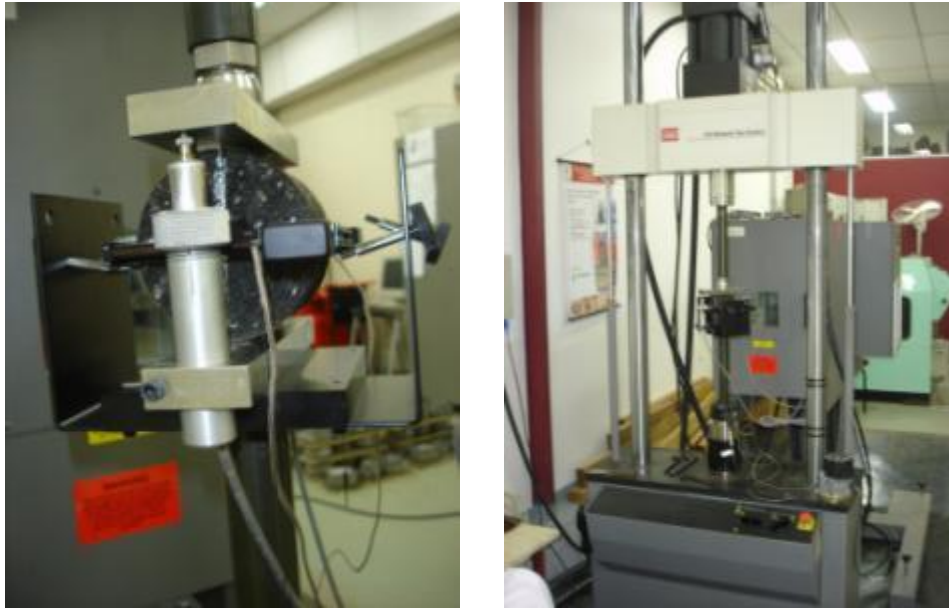


Figura 59 – Ensaio de MR

Foram testados oito CPs para cada tipo de mistura. Os resultados dos ensaios (Figuras 60 a 62) demonstram que não foi possível diferenciar as misturas pelos resultados de MR. percebe-se que todos os valores encontrados são muito próximos, independente do teor utilizado. Os valores de volume de vazios semelhantes para os diferentes teores de emulsão avaliados são os prováveis responsáveis por esses também semelhantes resultados de MR. Apesar de o MR ser intimamente afetado pelo teor de ligante em misturas asfálticas a quente, no caso de misturas a frio, a diferença no teor de betume residual não demonstra a mesma tendência.

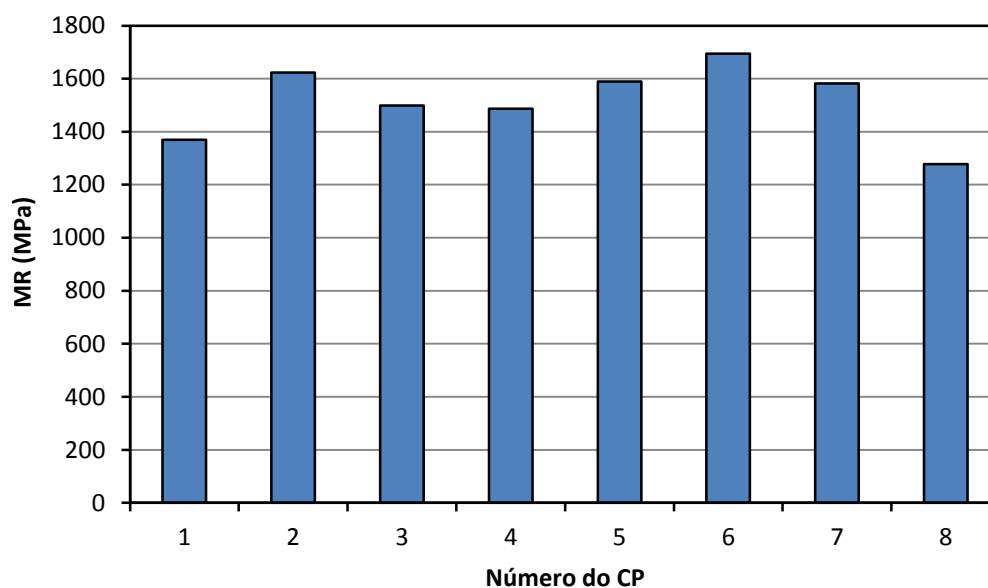


Figura 60 – Resultados de MR (2% de emulsão)

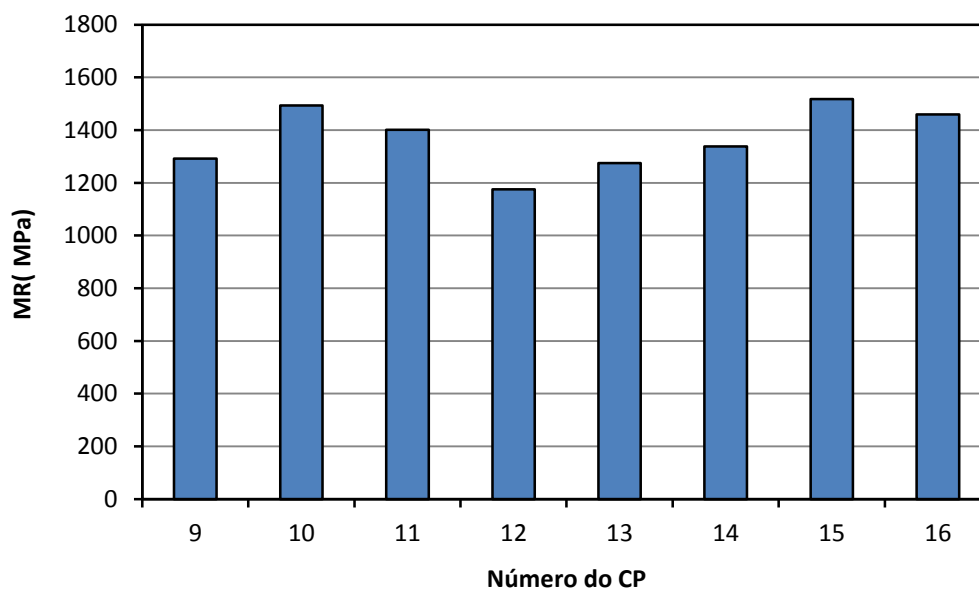


Figura 61 – Resultados de MR (3% de emulsão)

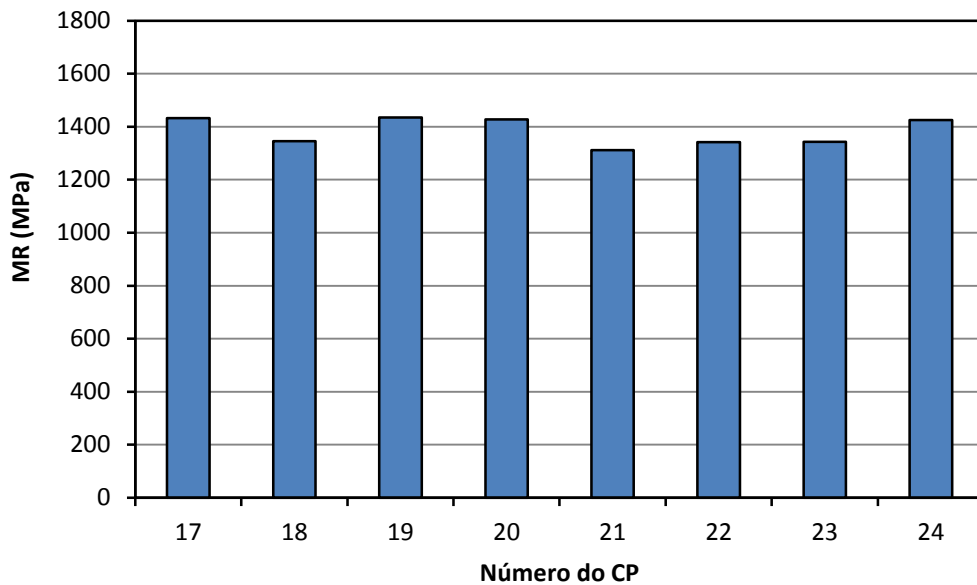


Figura 62 – Resultados de MR (4% de emulsão)

Com base nos dados observados, foram realizados testes-t para amostras não pareadas para a verificação da igualdade das médias, com nível de significância de 95%. Verificou-se que as médias dos valores de MR para as misturas com teor de emulsão de 3 e 4% podem ser consideradas estatisticamente iguais. Contudo, a Figura 63 mostra que maiores teores de emulsão resultam em módulos de resiliência menores.

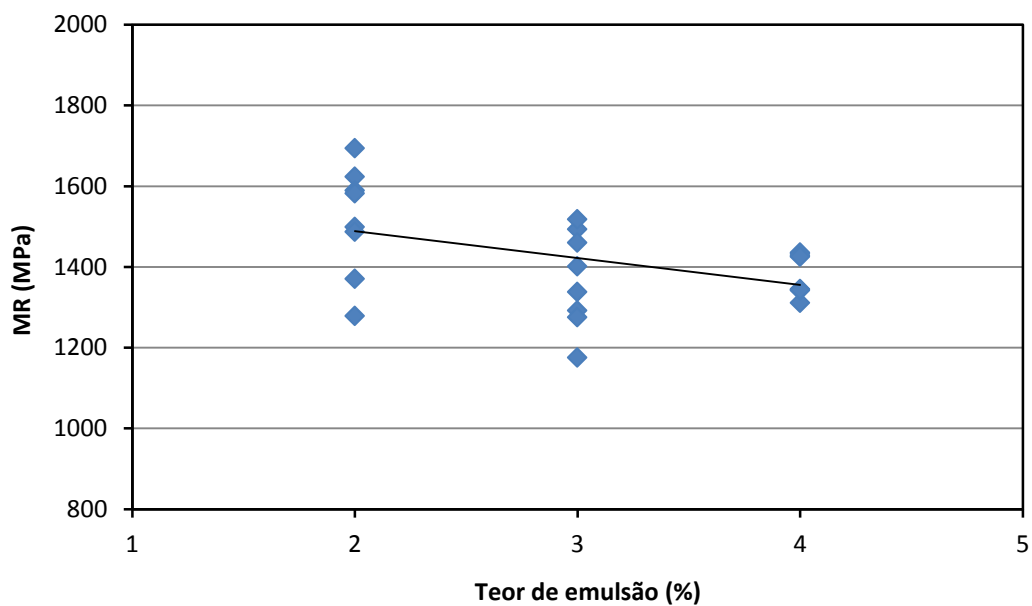


Figura 63 – MR versus teor de emulsão

A maior rigidez apresentada pelas misturas com menor teor de emulsão está associada ao menor volume de vazios desses CPs. No caso de misturas a frio os efeitos dessa propriedade preponderam sobre os efeitos da pequena quantidade de ligante residual na mistura.

Resistência à Tração (RT)

O ensaio de RT seguiu o procedimento estabelecido para misturas betuminosas da ASTM (ASTM D 6931 – 07), sendo também realizados na prensa hidráulica MTS (Figura 64). Para cada teor de emulsão, foram testados quatro CPs moldados no compactador Marshall. Os resultados dos ensaios são apresentados nas Figuras 65 a 67.



Figura 64 – Ensaio de RT

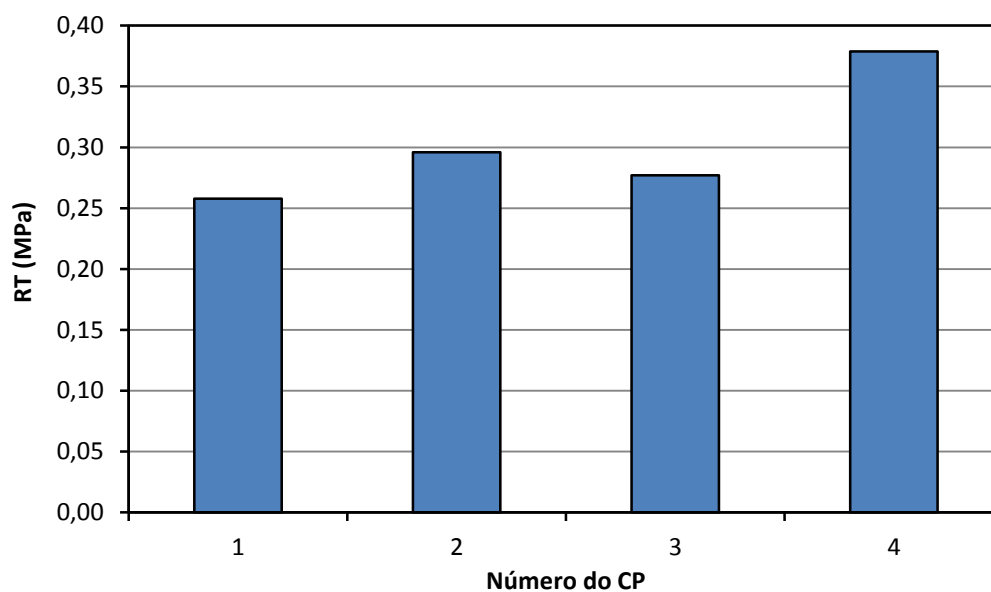


Figura 65 – Resultados de RT (2% de emulsão)

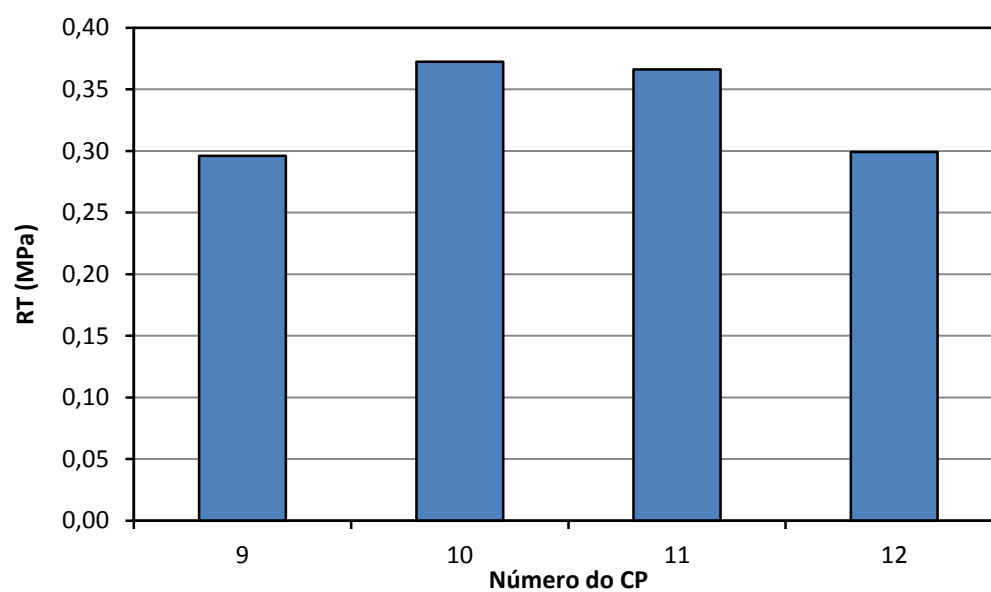


Figura 66 – Resultados de RT (3% de emulsão)

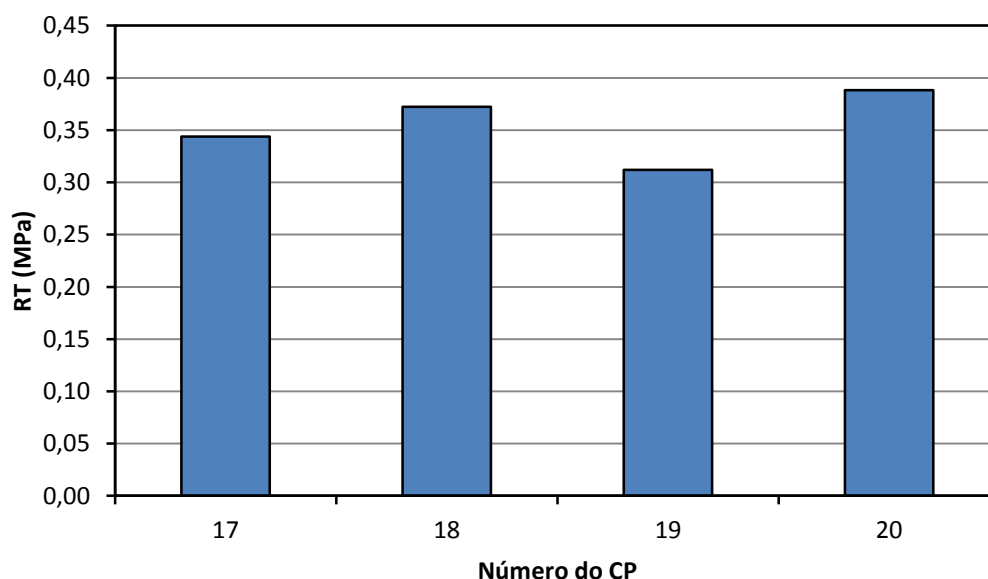


Figura 67 – Resultados de RT (4% de emulsão)

Conforme apresentado na Figura 68, os CPs apresentaram uma leve tendência de crescimento nos valores de RT na medida em que se aumentou o teor de emulsão, indicando que maiores teores de ligante residual levam a uma melhor adesividade entre partículas. Como base nos resultados de RT e MR, pode-se dizer que a ruptura do material está mais relacionada à quantidade de ligante presente na mistura e que a rigidez está mais associada ao volume de vazios presente nas amostras.

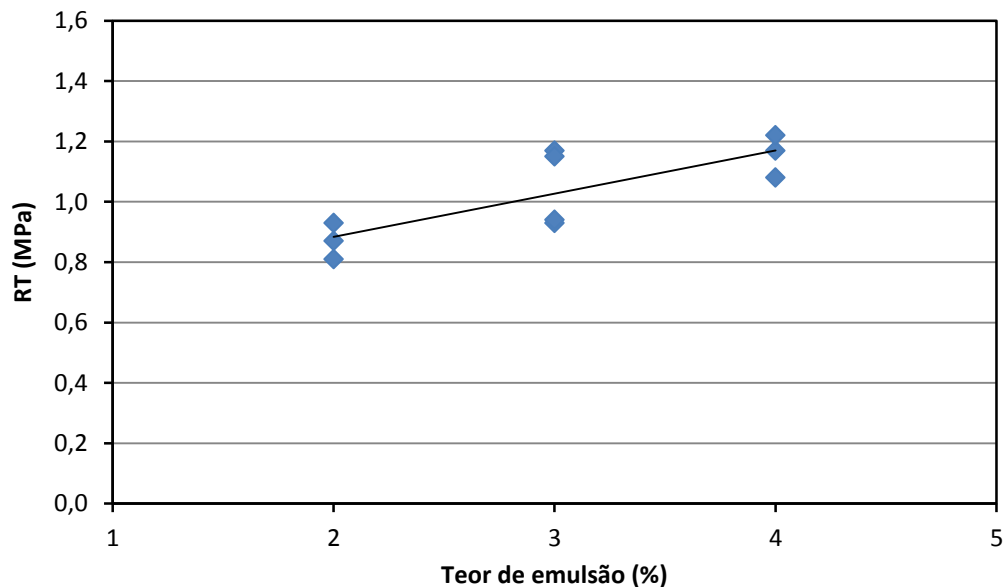


Figura 68 – RT versus teor de emulsão

Dano por Umidade Induzida (DUI)

O ensaio de DUI tem o objetivo de identificar possíveis problemas de adesividade agregado-ligante asfáltico, ou mesmo uma elevada perda de coesão do filme de ligante. Uma vez que o dano causado nas misturas asfálticas pela umidade afeta o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos, e o elevado volume de vazios da mistura reciclada com emulsão a torna mais suscetível à presença de água em seu interior, verifica-se a necessidade da quantificação desse dano na mistura estudada.

O ensaio consiste em submeter amostras a um condicionamento em água, medir seu comportamento mecânico após o condicionamento e comparar os resultados com os de amostras sem condicionamento. A metodologia de ensaio adotada foi baseada na norma ASTM D 1075/11.

Foram moldados oito CPs Marshall para cada teor de emulsão. Quatro desses CPs foram submetidos a ensaio de MR diametral e posterior ensaio de RT, sendo esse grupo denominado não condicionado. Os outros quatro CPs de cada teor, aqui denominados

condicionados, foram imersos em água à 60°C por 24h (Figura 69) e, posteriormente, submetidos aos mesmos ensaios mecânicos que os não condicionados.



Figura 69 – CPs em condicionamento

Os resultados dos ensaios são apresentados nas Figuras 70 e 71 e na Tabela 13. Tanto os ensaios de MR quanto os de RT não apresentaram perda significativa. As diferenças observadas entre amostras condicionadas e não condicionadas estão dentro da variabilidade dos ensaios, conforme observado nas barras de desvio padrão apresentadas nas mesmas figuras. Dos três teores de emulsão, o de 4% foi o que apresentou a maior perda percentual, tanto para o MR, como para a resistência à tração. Isso não era esperado, uma vez que geralmente aumentando-se o teor de ligante asfáltico, aumenta-se a espessura do filme sobre o agregado, e consequentemente reduz-se o problema de descolamento, ou perda de adesividade, porém o maior volume de vazios apresentado nas misturas com maior teor de emulsão aumenta a área exposta da mistura deixando-a mais suscetível ao dano da água.

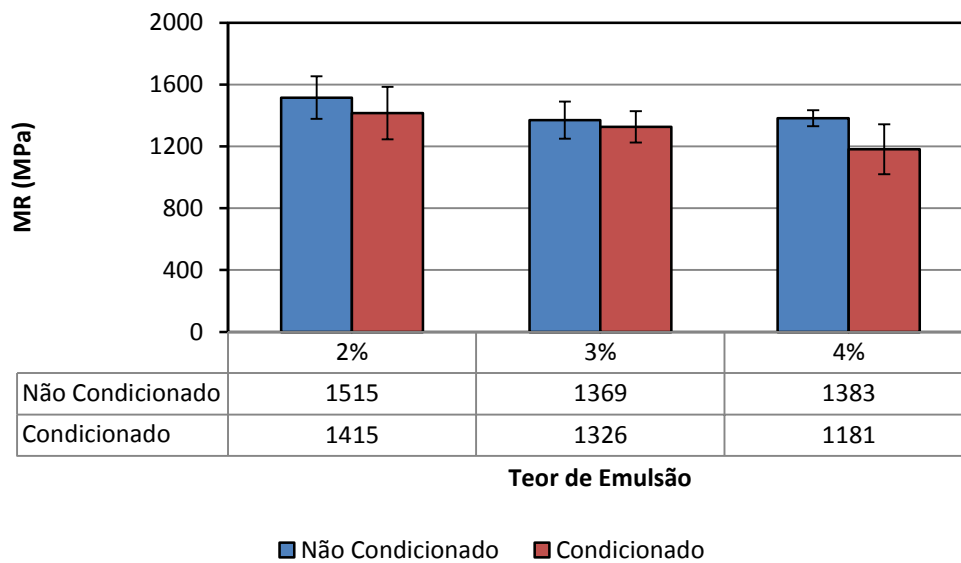


Figura 70 – Resultados MR retido

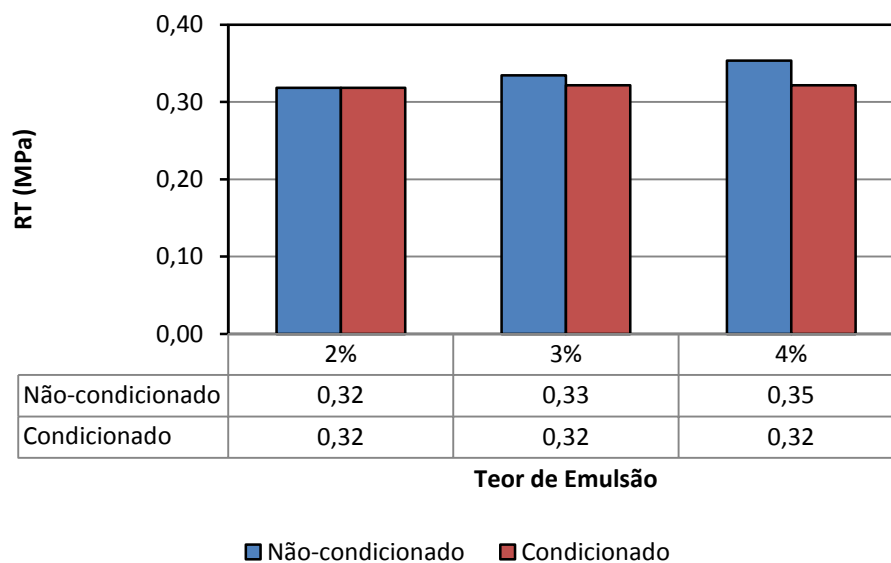


Figura 71 – Resultados de RT retida

Tabela 13 - Porcentagens de MR e RT retidos

Teor de emulsão (%)	MR retido	RT retida
2	93%	100%
3	97%	97%
4	85%	91%

Observando-se os valores de RT retida, verifica-se que em todos os casos os valores foram superiores a 90%. O volume de vazios elevado facilita a entrada da água, mas também permite que ela saia mais facilmente. Não existem especificações para misturas a frio de tais parâmetros, contudo para misturas a quente o limite inferior para essa propriedade é de 70%.

8.2.4.2. Variação no teor de ligante hidráulico

Dando continuidade aos estudos relativos ao material reciclado com emulsão, nessa etapa foram realizados ensaios variando-se o ligante hidráulico adicionado entre cimento e cal, bem como o teor dessa adição entre 1% e 2%. Foram testadas também uma mistura sem nenhum um tipo de adição de ligante hidráulico e uma mistura com adição de ambos os ligantes hidráulicos. Os teores de emulsão e água utilizados foram mantidos em 3% cada, conforme obtido na dosagem para essa mistura. Dessa forma, foram analisadas seis misturas, apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Misturas testadas no estudo da variação do teor de ligante hidráulico

	Teor de Emulsão	Teor de Cimento	Teor de Cal
Grupo 1	3%	-	-
Grupo 2	3%	1%	-
Grupo 3	3%	2%	-
Grupo 4	3%	-	2%
Grupo 5	3%	-	1%
Grupo 6	3%	1%	1%

Foi utilizada a mesma faixa granulométrica definida anteriormente. Os CPs foram ensaiados de modo a fornecer resultados de MR e de RT, parâmetros essenciais do material para a realização do projeto de um pavimento.

Porcentagem de Vazios

Os resultados da determinação do volume de vazios são apresentados de modo a ilustrar a variação desse parâmetro de acordo com a variação do teor de ligante hidráulico adicionado à mistura. Dessa forma, são apresentados três gráficos: a Figura 72 apresenta a variação do volume de vazios em função da variação do teor de cimento na mistura; a Figura 73 ilustra a variação do volume de vazios em função da variação do teor de cal na mistura; e a Figura 74 apresenta a variação do volume de vazios para a mistura com cimento e cal.

Verifica-se que, para as misturas com adição de cimento, não houve variação do volume de vazios em função do aumento do teor de cimento. Uma vez que o volume de vazios é um parâmetro ligado à compactação do material e que a esta é dependente da granulometria, da fluidez da mistura e da lubrificação entre partículas, atribui-se que a presença do cimento não afetou as características de fluidez da mistura e de viscosidade da emulsão.

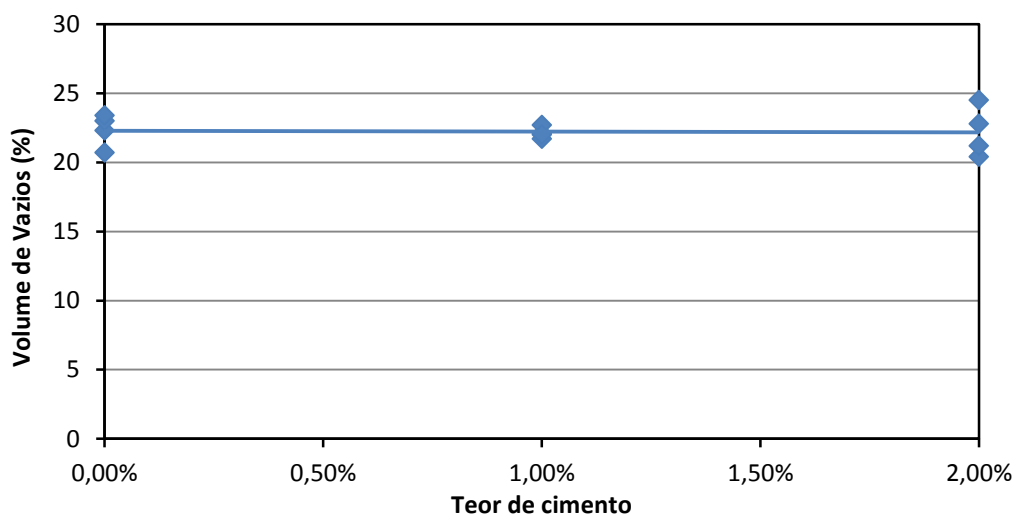


Figura 72 – Volume de Vazios em função do teor de cimento

Para as misturas com adição de cal, verifica-se que houve uma pequena variação no volume de vazios conforme se aumentou o teor desse material na mistura. O aumento no teor de cal na mistura reduziu o volume de vazios da mistura compactada, indicando que a presença de cal alterou as características de fluidez da mistura e lubrificação entre partículas, fazendo

com que houvesse uma maior compactação nos CPs, apesar de essa diferença de volume de vazios ser considerada pequena.

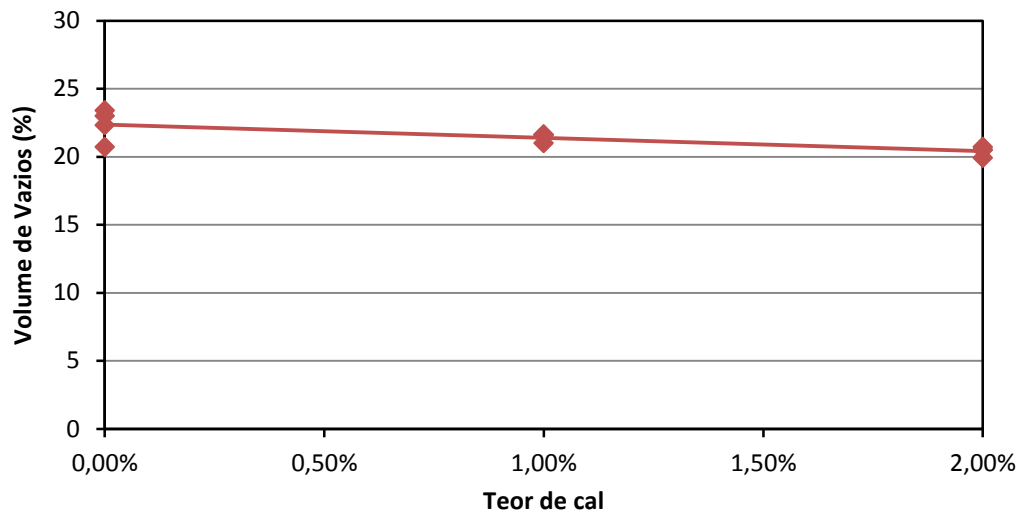


Figura 73 – Volume de Vazios em função do teor de cal

Por fim, verificou-se que houve uma pequena queda no volume de vazios na mistura com adição de 1% de cimento e 1% de cal em relação à mistura de referência – sem nenhuma adição. Com base nos resultados anteriores, essa queda é decorrente da parcela de cal na mistura, uma vez que a diminuição do volume de vazios foi semelhante à que ocorreu para a adição de 1% de cal, e que o cimento não apresentou variação significativa no volume de vazios.

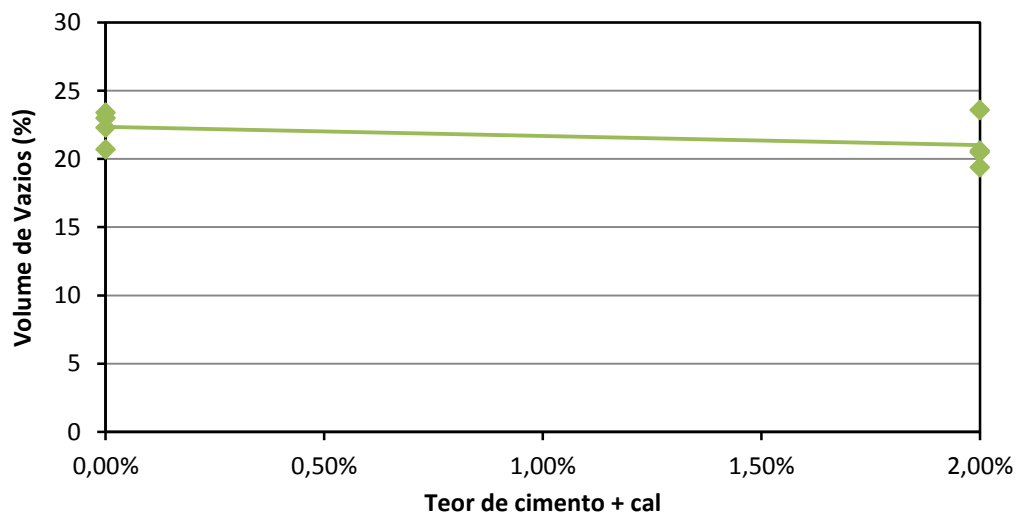


Figura 74 – Volume de Vazios em função do teor de cimento + cal

Módulo de Resiliência (MR)

Este ensaio tem como objetivo quantificar as características de rigidez da mistura asfáltica, parâmetro essencial para métodos mecanicistas de análise, ou projeto. Os ensaios novamente foram realizados no equipamento hidráulico MTS (Figura 75). Assim como os ensaios apresentados anteriormente, os CPs Marshall foram ensaiados por compressão diametral seguindo-se o método de ensaio para misturas asfálticas (ASTM D 7369-09).



Figura 75 – Instrumentação para ensaio de MR

Assim como nos resultados da determinação do volume de vazios, os resultados de MR são apresentados de modo a ilustrar a variação desse parâmetro de acordo com a variação do teor de ligante hidráulico adicionado à mistura. Dessa forma, são apresentados três gráficos: a Figura 76 ilustra a variação do MR em função da variação do teor de cimento na mistura; a Figura 77 ilustra a variação do MR em função da variação do teor de cal na mistura; e a Figura 78 apresenta a variação do MR para a mistura com cimento e cal.

Para as misturas com adição de cimento, verificou-se uma tendência de crescimento do valor de MR conforme se aumentava o teor de cimento. Sabe-se que o volume de vazios afeta diretamente a rigidez das misturas asfálticas, e, mesmo sem a variação deste parâmetro, houve o aumento da rigidez, indicando que esse aumento MR foi efeito direto da quantidade de cimento adicionada à mistura.

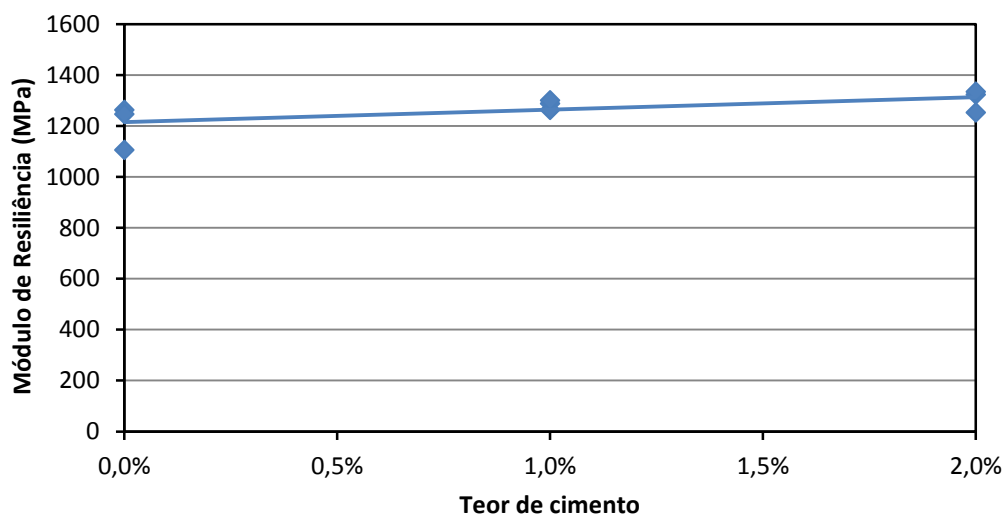


Figura 76 – MR em função do teor de cimento

As misturas com adição de cal não apresentaram aumento significativo no valor de MR com o aumento do teor de ligante hidráulico, mesmo essas misturas tendo apresentado menores valores de volumes de vazios, indicando que o teor de cal, apesar de melhorar a compactação da mistura, não contribuiu para o ganho de rigidez das misturas estudadas.

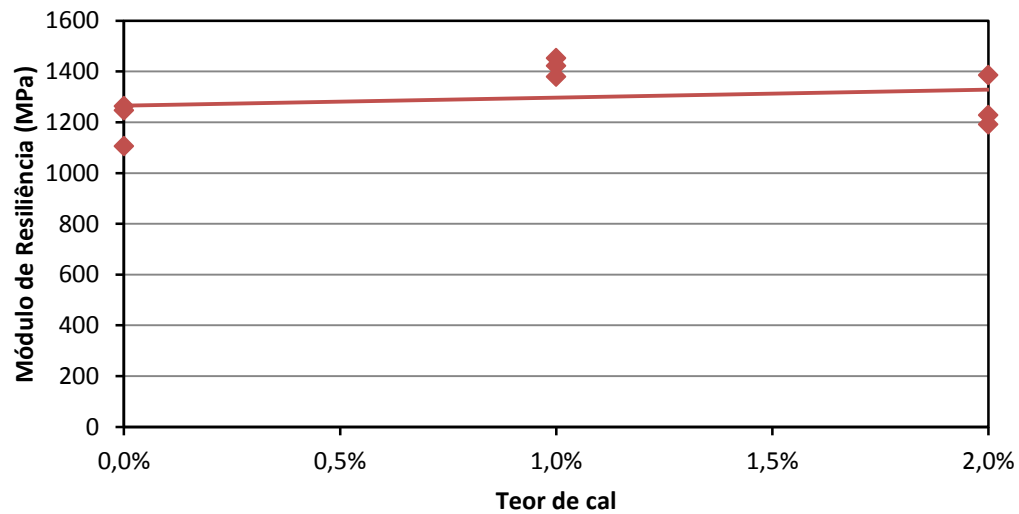


Figura 77 – MR em função do teor de cal

Por fim, a mistura com adição de 1% de cimento e 1% de cal apresentou um ganho de rigidez semelhante ao da mistura com 2% de cimento. Esse ganho é decorrente da presença do cimento e o incremento de rigidez que ele provoca e da diminuição do volume de vazios ocasionada pela cal.

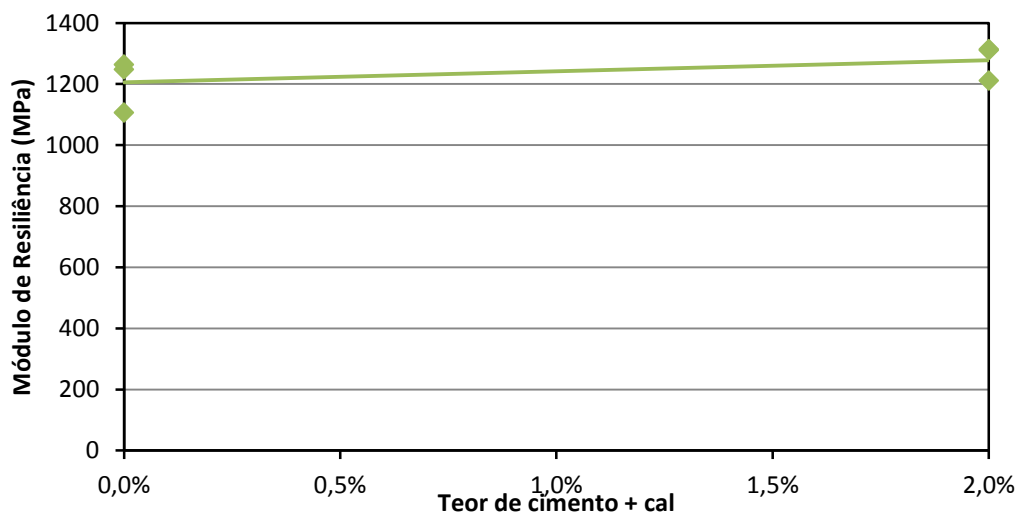


Figura 78 – MR em função do teor de cimento + cal

Resistência à Tração (RT)

Para a determinação da resistência à tração das misturas, foi utilizado o ensaio de RT indireta, seguindo-se o procedimento estabelecido para misturas betuminosas da ASTM (ASTM D 6931/07). Os ensaios foram realizados na prensa MTS (Figura 79).

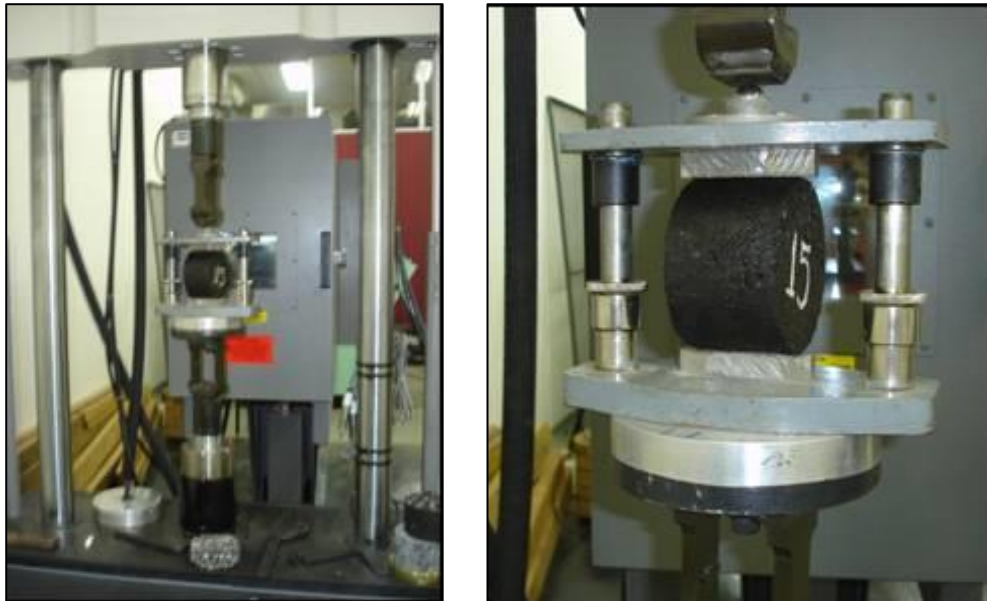


Figura 79 – Instrumentação para o ensaio de RT

Assim como nos demais ensaios realizados, os resultados de RT por compressão diametral são apresentados de modo a se ilustrar a variação desse parâmetro de acordo com a variação do teor de ligante hidráulico adicionado à mistura. Dessa forma, são apresentados três gráficos: a Figura 80 apresenta a variação da resistência à tração em função da variação do teor de cimento na mistura; a Figura 81 ilustra a variação da resistência à tração em função da variação do teor de cal na mistura; e a Figura 82 apresenta a variação da resistência à tração para a mistura com cimento e cal.

Para as seis misturas testadas, não foi possível diferenciar o efeito do ligante hidráulico e de seu teor em termos de resistência à tração. Conforme apresentado anteriormente, esse parâmetro está diretamente ligado ao teor de ligante asfáltico na mistura e esses grupos de CPs não contemplaram variação no teor de emulsão asfáltica utilizada.

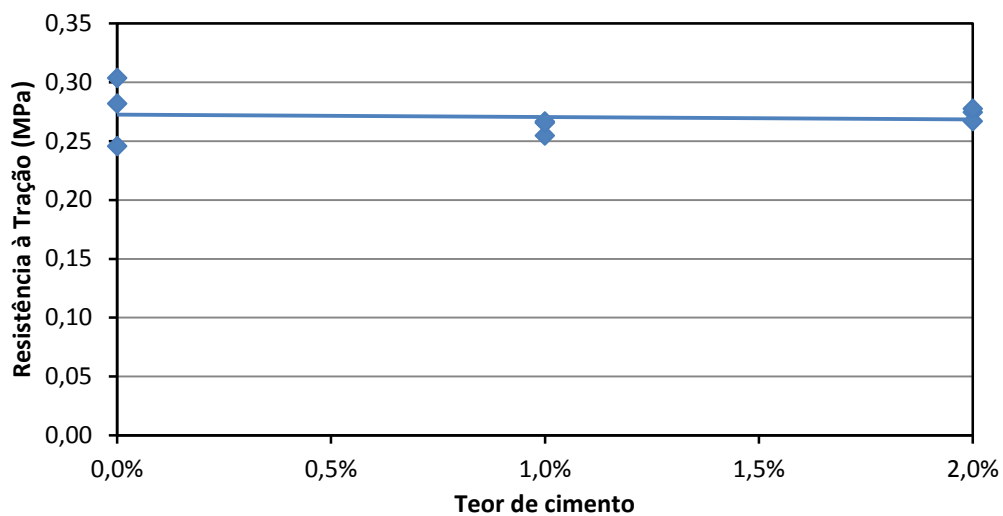


Figura 80 – RT em função do teor de cimento

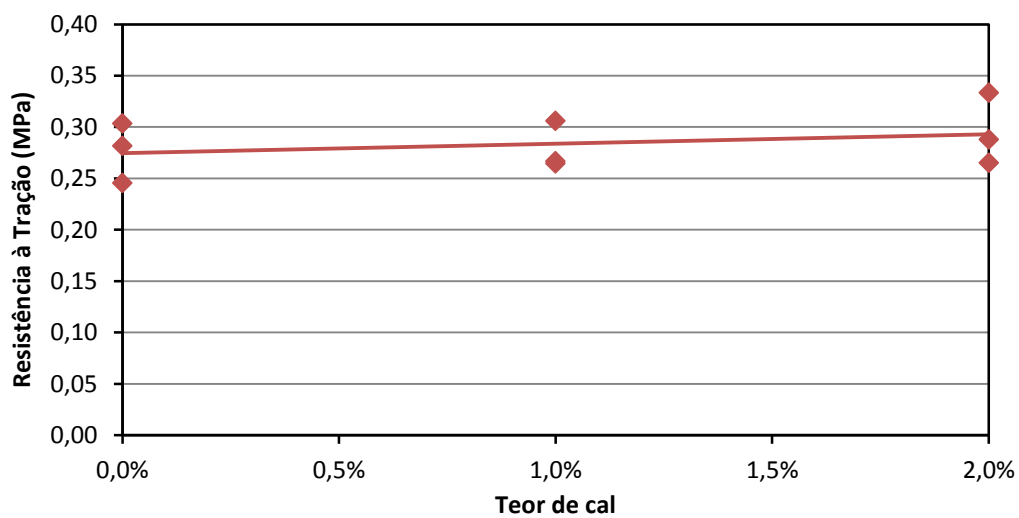


Figura 81 – RT em função do teor de cal

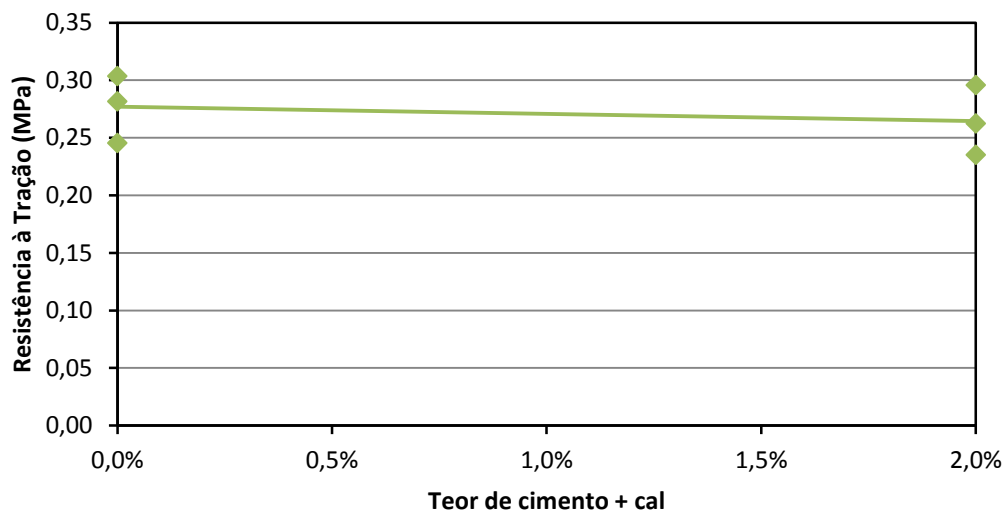


Figura 82 – RT em função do teor de cimento + cal

Apenas o valor de ruptura de um CP não é o suficiente para representar seu comportamento durante o processo de aplicação de carga. Para um melhor entendimento o modo de ruptura nos ensaios de RT foram traçadas as curvas de Carga × Deslocamento durante os ensaios. Os resultados são apresentados nas Figuras 83 a 85. É possível observar o efeito que a adição dos materiais hidráulicos tem na fragilidade das misturas. Quanto maior o teor de ligante hidráulico, mais frágil é a ruptura das amostras, ou seja, menos elas se deformam antes de chegar ao valor de carga máxima.

Verifica-se também que a adição de cimento leva a uma ruptura mais frágil do que a adição de cal, tanto nos teores de 1% quanto nos teores de 2%, e que a adição combinada de cimento e cal leva a deslocamentos inferiores aos observados para 1% de cal ou 1% de cimento, mas superiores aos observados para os teores de 2% de cimento, indicando que seu comportamento é mais influenciado pela cal.

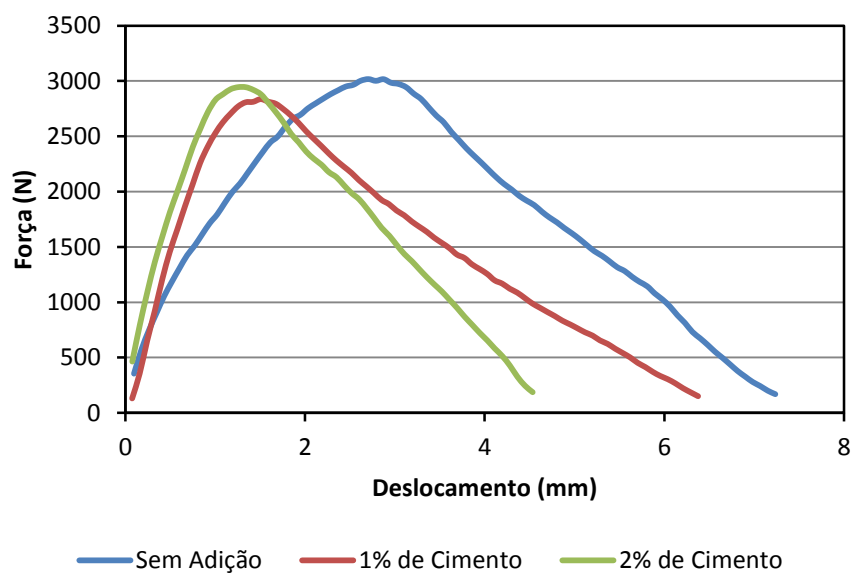


Figura 83 – Força × deslocamento (adição de cimento)

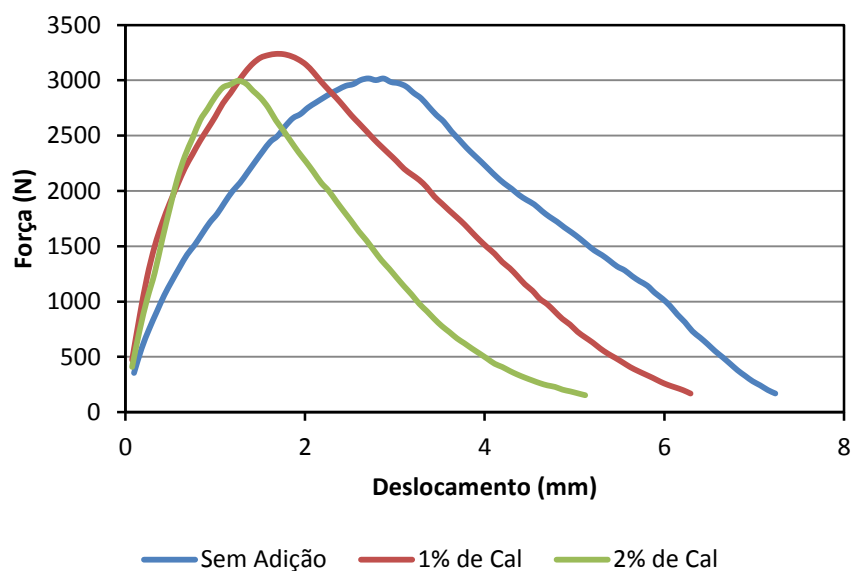


Figura 84 – Força × deslocamento (adição de cal)

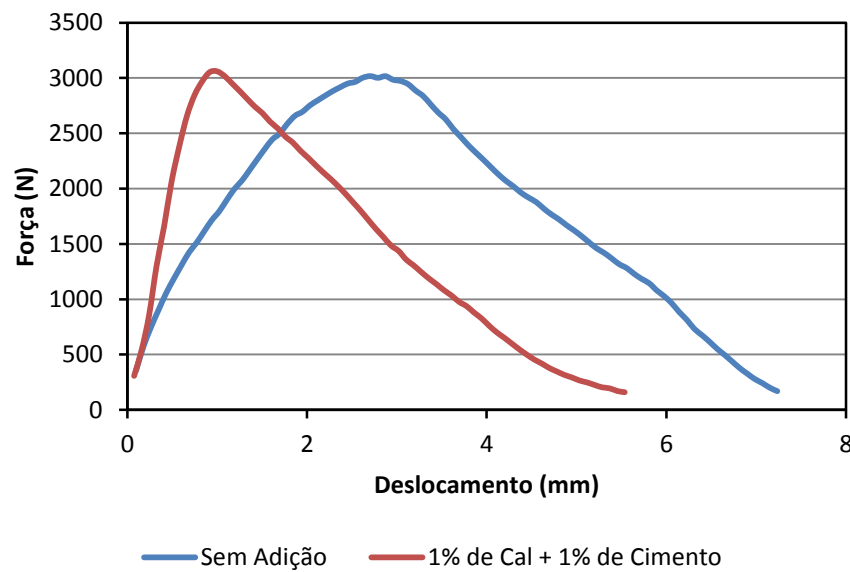


Figura 85 – Força × deslocamento (adição de cimento + cal)

8.2.5. Compactação Proctor

Foi dada continuidade ao estudo do material reciclado com emulsão, modificando-se o tipo de compactação das misturas a serem produzidas em laboratório, além do tamanho dos CPs. Essa mudança foi realizada numa tentativa de se fazer uma melhor análise em relação às mudanças nas propriedades das misturas quando se varia principalmente o teor de umidade das mesmas, uma vez que quando realizada a compactação Marshall, não foi possível capturar variações nos diferentes tipos de misturas produzidos. Outro objetivo do estudo era obter os teores ótimos de emulsão e de água para o material reciclado, além de compreender o efeito do teor de cimento nesse tipo de mistura.

Nesta etapa, foram realizadas dosagens através das curvas de compactação Proctor variando-se as quantidades de cada um dos componentes da mistura. Inicialmente, foram moldados CPs com teores de emulsão variando entre 2, 3 e 4%, com cura de 7 dias a 25°C em estufa. Para cada um desses teores, foram selecionados, em geral, cinco teores de água para obter as curvas de compactação das dosagens. Em seguida, fixou-se um teor de emulsão (3%) para que fosse modificado o tipo de cura (7 dias a 40°C), além de variar o teor

de cimento (0%, 1% e 2%). A Figura 86 apresenta a matriz experimental com as características das misturas de material reciclado dosadas.

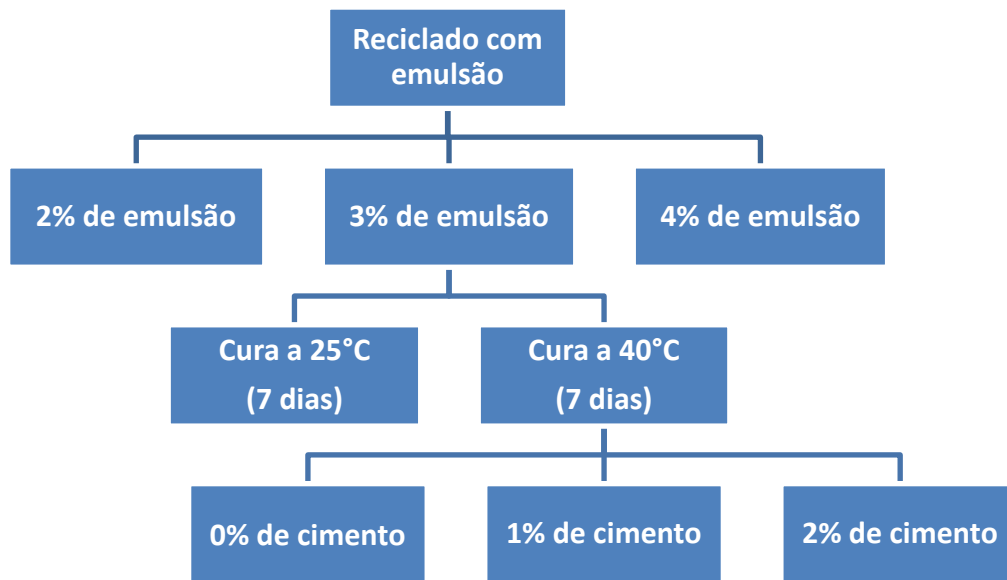


Figura 86 – Matriz experimental da dosagem do material reciclado com compactação Proctor

A Figura 87 apresenta uma comparação da composição granulométrica do RAP utilizada para a produção do material reciclado com emulsão em CPs Proctor de 10 x 20 com a composição do RAP utilizada na moldagem dos CPs Marshall (10 x 12,7cm). Esse gráfico tem como objetivo mostrar a diferença entre a distribuição granulométrica dos materiais utilizados nas diferentes etapas do estudo (ambos provenientes da Fresagem na Fernão Dias). O material atual é mais fino em relação ao usado anteriormente. Para a confecção das misturas, o RAP foi novamente fracionado a fim de manter sua composição granulométrica uniforme em todas as amostras produzidas em laboratório.

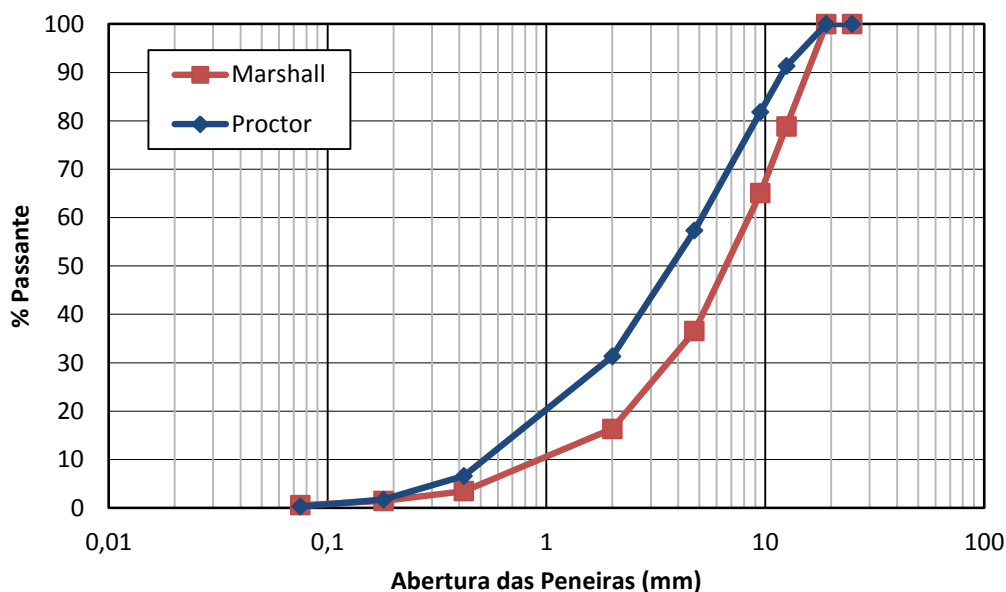


Figura 87 – Distribuição granulométrica do material fresado

Na escolha dos teores de água a serem utilizados na curva de compactação Proctor, foi considerada a quantidade de água já presente na emulsão asfáltica. Para isso, foi realizado ensaio para obtenção do percentual de asfalto residual, e consequentemente, do percentual de água. Os resultados obtidos ao final do ensaio encontram-se resumidos na Tabela 15. A quantidade de água presente na emulsão foi em média de 38%.

Tabela 15 – Teor de água na emulsão asfáltica utilizada

Massas	Amostra	
	1	2
Massa inicial (g)	300,0	302,1
Massa final (g)	184,8	189,1
Perda de água (%)	38,4	37,4

Em relação ao processo de cura de misturas recicladas a frio, não há um padrão na literatura quando se trata desse tipo de mistura. Optou-se por realizar a cura a 25°C (a fim de aproximar das condições da massa em campo) durante 7 dias, conforme apresentado no item 8.2.5.1. Porém, é importante salientar que não existe um procedimento de cura que seja internacionalmente aceito. Diversos autores que já estudaram essas misturas realizaram

diferentes procedimentos de cura, variando o tempo e a temperatura aplicada. A Tabela 16 apresenta um resumo de uma pesquisa bibliográfica realizada a respeito desse assunto. Devido a não uniformidade dos procedimentos de cura de misturas recicladas com emulsão, decidiu-se comparar duas temperaturas de cura (25 e 40°C) com o objetivo de buscar um processo que gerasse melhores resultados já na fase de projeto das misturas (abordado no item 8.2.5.2).

Tabela 16 – Procedimentos de cura de misturas recicladas em diferentes trabalhos

Local	Trabalho	Cura
Espanha	Recasens et al. (2000)	Vários períodos de cura para avaliar o efeito
África do Sul	Asphalt Academy (2002)	25°C por 24 horas (CP não selado) + 40°C por 48 horas (CP selado)
EUA	Sebaaly et al. (2004)	Cura inicial: 25°C por 15h + 3h à temp. ambiente após retirada dos moldes Cura final: amostras retiradas dos moldes + 60°C por 3 dias + 3h à temp. ambiente Cura a longo prazo: 60°C por 30 dias
Alemanha	Wirtgen GmbH (2006)	40°C por 24h (CP não selado) + 40°C por 48h (CP selado)
Brasil	David (2006)	Cura a 60°C por 24h (DNER-ME 107/94) + esfriamento por 2h até retirada do molde
Espanha	Martinez et al. (2007)	60°C por 3 dias
Irã	Niazi e Jalili (2008)	24 horas a 60°C + 24h à temp. ambiente + 5 dias a temp. ambiente (após extração dos cps dos moldes)
UK	Thanaya et al. (2009)	40°C em estufa (aprox. entre 18 a 21 dias para cura completa, até atingir 8-9% de vazios) Cura ao ar livre: 24°C por 24h + 24 semanas de cura ao ar livre
EUA	Fu et al. (2009)	40°C por 72h

Itália	Italian road authority (2009)	40°C por 72h + 25°C por 4h
EUA	Kim et al. (2010)	Matriz com vários tempos e temperaturas de cura para testar o efeito disso nos resultados mecânicos Cura inicial de 0, 1, 3 e 5h (amostras descobertas) / cura prolongada de 7 e 14 dias (amostras cobertas) / duas temps: 25 e 45°C
Brasil	Silva (2011)	Cura a 60°C por 24h (DNER-ME 107/94)
Austrália	Autostroads project (2011)	60°C por 3 dias
Egito	Behiry (2012)	Sem cura
EUA	Attoh-Okine (2012)	Ao ar livre por 24h
EUA	Lee et al. (2012)	25°C / 60°C por 24h / 6h
EUA	Departamento de Transportes da Pensilvânia	14 a 24h a temperatura ambiente + 72h a 40°C após extração do molde

Nos itens a seguir são apresentados os resultados obtidos para a dosagem das diferentes misturas de material reciclado. Todos os CPs confeccionados foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples (RCS) após o seu período de cura. Os resultados desse parâmetro também são apresentados na sequência.

8.2.5.1. Variação no teor de emulsão

Em uma primeira etapa, optou-se por variar o teor de emulsão do material reciclado em torno do teor utilizado em campo. Misturas com 2, 3 e 4% de emulsão foram dosadas em laboratório de acordo com ABNT/NBR 7182/86, em cilindro de dimensões 10cm x 20cm, utilizando-se energia modificada para compactação. A cura das misturas foi feita a 25°C durante 7 dias e as curvas de compactação são apresentadas na Figura 88.

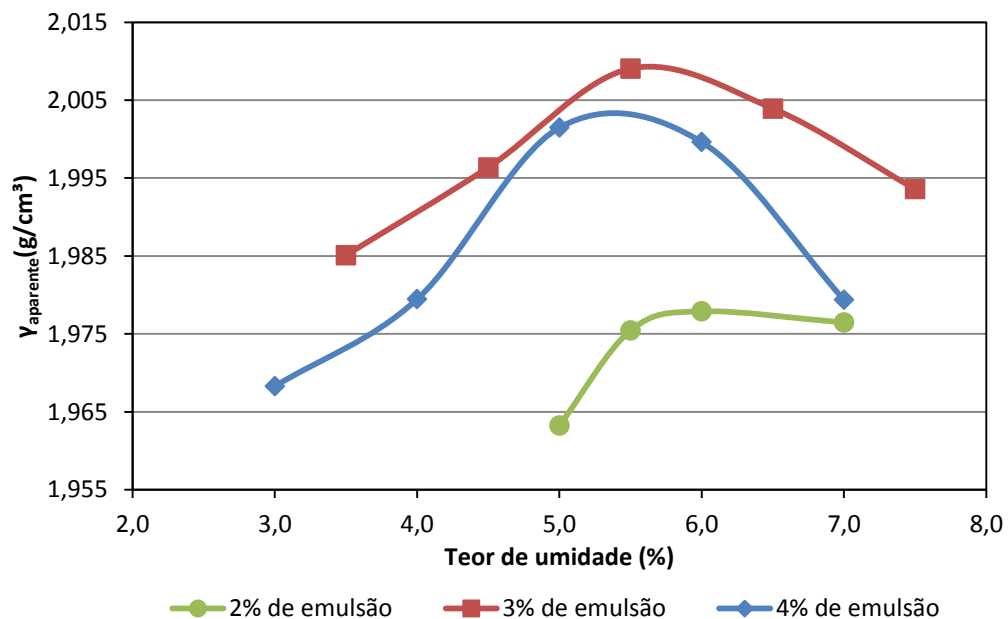


Figura 88 – Curvas de compactação para as misturas (energia modificada)

Os resultados obtidos mostram que os valores de massa específica variam muito pouco para um mesmo teor de emulsão quando se varia o teor de água (da ordem de $0,05 \text{ g/cm}^3$). Essa variação, em massa, é muitas vezes da ordem de 20 ou 30 gramas, mostrando que, independente do teor de água, misturas muito semelhantes podem ser produzidas.

O teor ótimo de umidade foi de aproximadamente: 6,2% para a mistura com 2% de emulsão; 5,5% para a mistura com 3% de emulsão; e 5,3% para a mistura com 4% de emulsão. Uma comparação feita entre as curvas obtidas para os três teores de emulsão indica que a mistura com 3% foi a que produziu misturas com maiores valores de massa específica. Sendo assim, foram feitas novas dosagens com esse teor de emulsão, porém variando-se a temperatura de cura, e o teor de cimento, a fim de se avaliar a influência dessas variáveis no teor ótimo de umidade e na resistência à compressão desses materiais. A Figura 89 apresenta algumas fotos das amostras produzidas com os diferentes teores de água, a fim de ilustrar a variação no aspecto dos CPs compactados.



(a) 3,5%



(b) 4,5%



(c) 5,5%



(d) 6,5%



(e) 7,5%

Figura 89 – CPs com variação de teor de água

Perda de umidade após a cura

Após a compactação, as amostras permaneceram em estufa para serem submetidas ao processo de cura com temperatura controlada. O tempo de cura foi de 7 dias, e a temperatura adotada nesta fase do estudo foi de 25°C. Após a finalização do processo, todos os CPs foram pesados a fim de verificar quanto da umidade inicial dos CPs havia sido perdida. As Figuras 90 a 92 apresentam o teor de umidade inicial e o teor de umidade final (após cura).

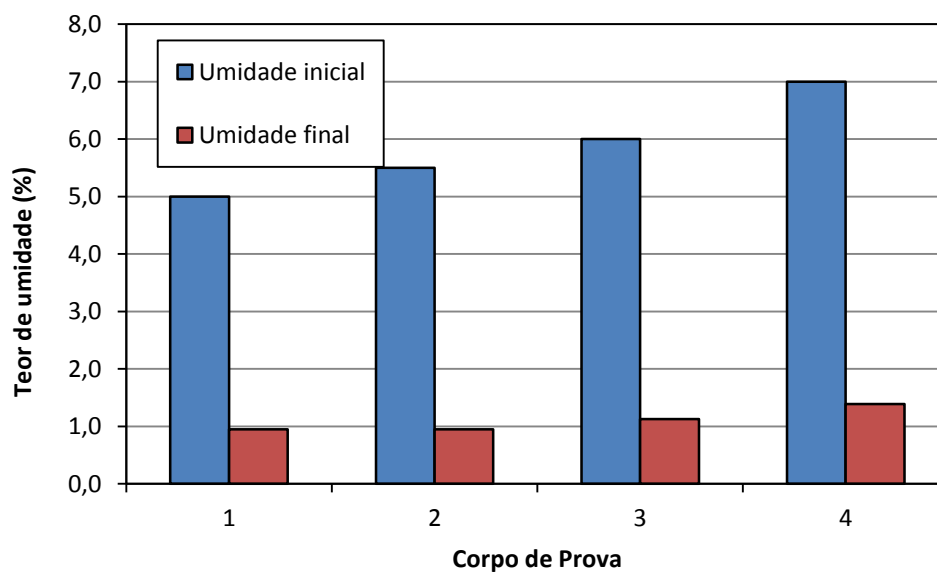


Figura 90 – Variação da umidade com a cura (2% de emulsão)

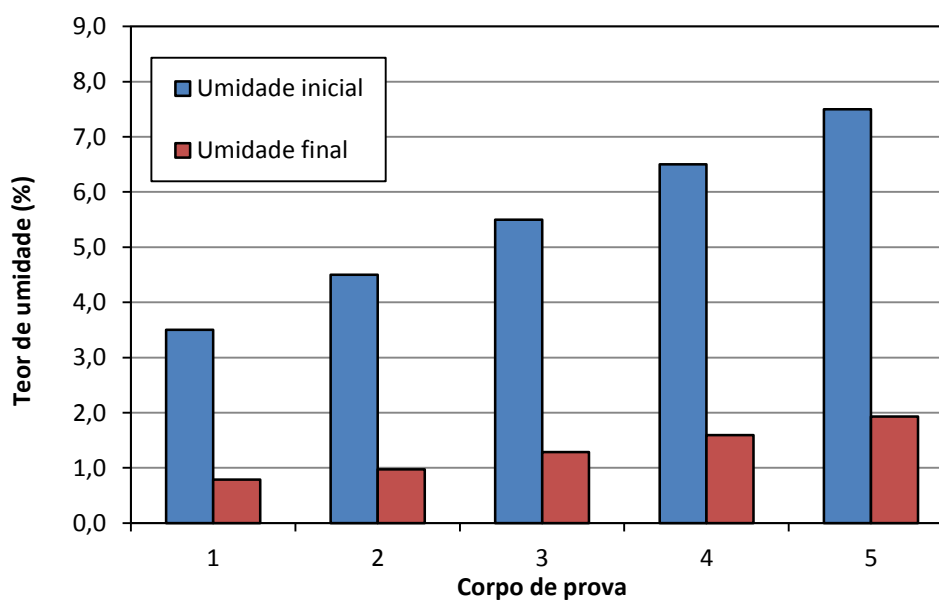


Figura 91 – Variação da umidade com a cura (3% de emulsão)

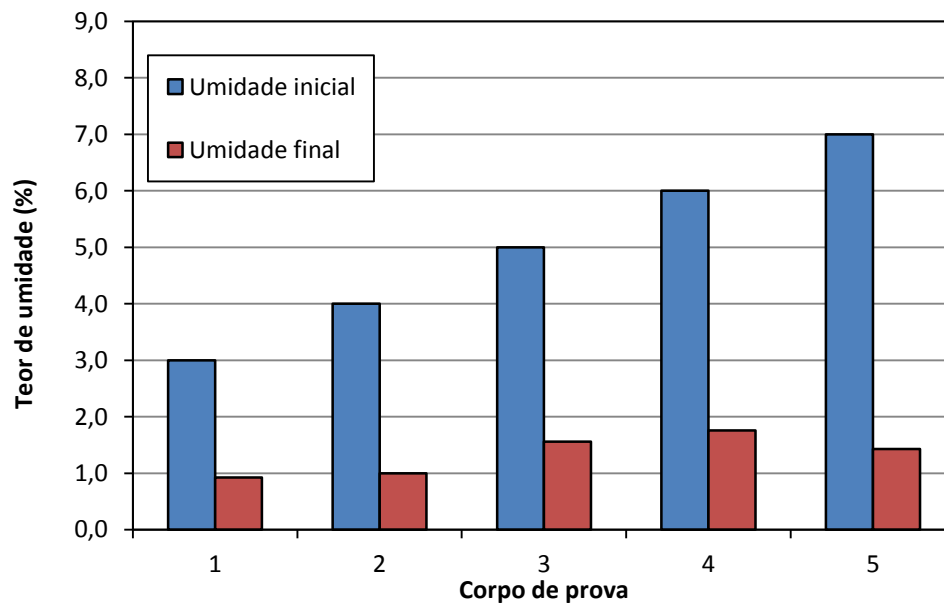


Figura 92 – Variação da umidade com a cura (4% de emulsão)

Os resultados apresentados mostram que nenhum dos CPs perdeu completamente sua umidade inicial, permanecendo, em média, aproximadamente 1,5% da água acrescentada durante a compactação. No geral, quanto maior o teor de umidade, maior a perda percentual de água durante a cura; a perda não percentual evidencia a eficiência do processo adotado para cura do material.

Resistência à Compressão Simples (RCS)

Após as dosagens e o período de cura, todos os CPs foram submetidos ao ensaio de RCS para verificar as diferenças quando se comparam misturas produzidas com diferentes teores de emulsão e de água. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 17 e nas Figuras 93 a 95.

Tabela 17 – Resultados de RCS para as misturas com diferentes teores de emulsão

Teor de emulsão	Teor de água	Valor de RCS (MPa)
2%	4,0%	0,35
	5,0%	0,37
	5,5%	0,39
	6,0%	0,38
	7,0%	0,36
	8,0%	0,35
3%	3,5%	0,29
	4,5%	0,31
	5,5%	0,35
	6,5%	0,34
	7,5%	0,28
4%	3,0%	0,24
	4,0%	0,25
	5,0%	0,18
	6,0%	0,27
	7,0%	0,26

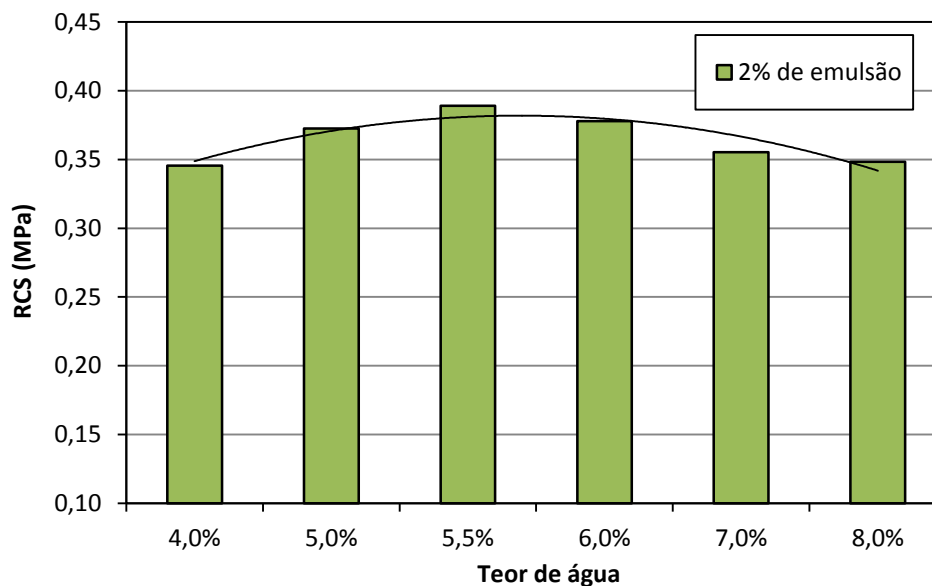


Figura 93 – Valores de RCS para as misturas com 2% de emulsão

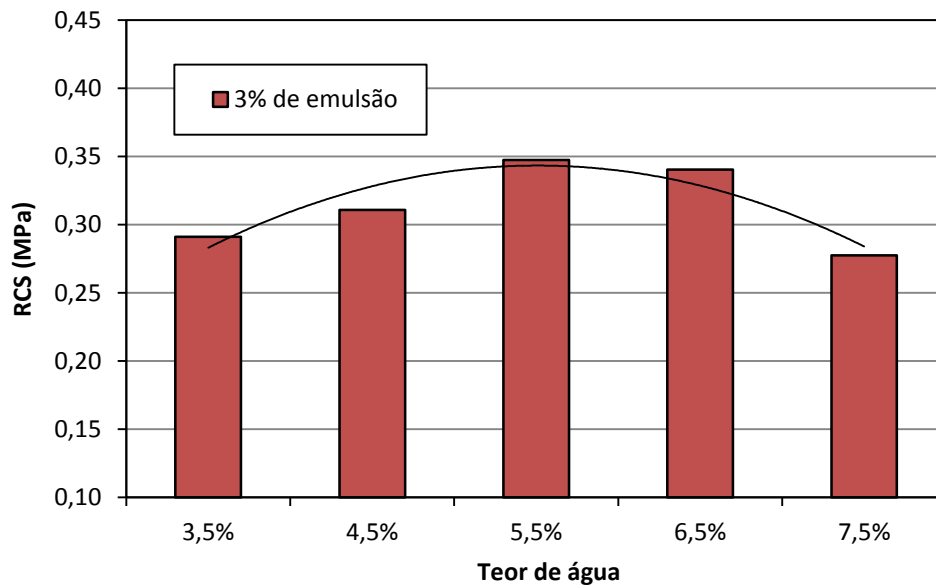


Figura 94 – Valores de RCS para as misturas com 3% de emulsão

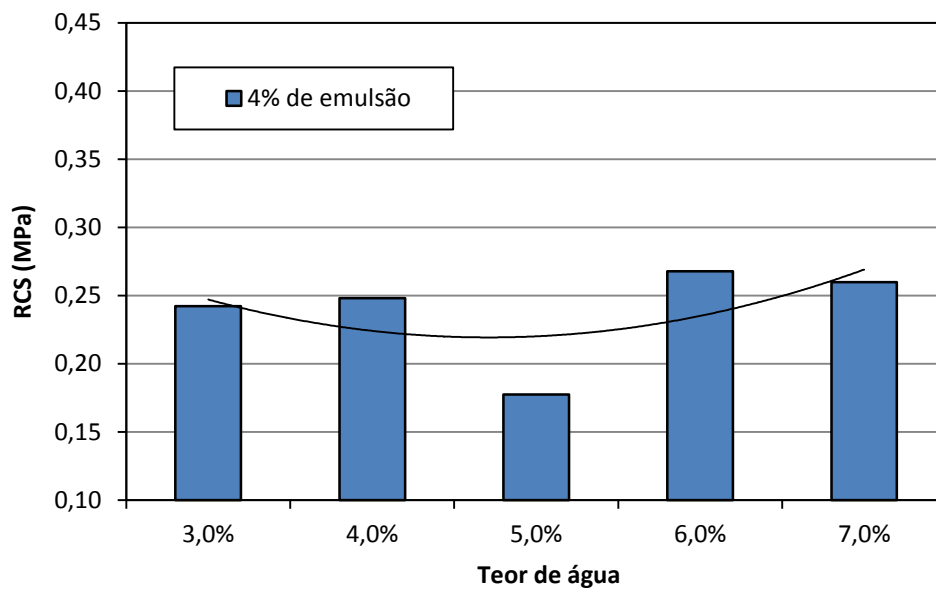


Figura 95 – Valores de RCS para as misturas com 4% de emulsão

Por meio dos gráficos apresentados, é possível perceber que a variação do teor de água em misturas com mesmo teor de emulsão não alterou significativamente os valores de RCS. Também se observa que, à medida que se aumentou o teor de emulsão nas misturas, o valor de RCS teve uma tendência a diminuir, apesar de os valores de massa específica para os CPs

produzidos com 2% de emulsão terem sido mais baixos do que aqueles para os CPs dos demais teores.

Vale salientar que esse resultado foi de apenas um CP por condição (teor de umidade e teor de emulsão) em um único tipo de ensaio mecânico (RCS). As características de rigidez e potencial ao acúmulo de deformação permanente devem também ser verificadas para uma melhor avaliação do comportamento mecânico dessas misturas e, consequentemente, desempenho em campo.

8.2.5.2. Variação na temperatura de cura

Com o objetivo de verificar a influência da variação do procedimento de cura das misturas recicladas, a dosagem da mistura com 3% de emulsão foi refeita (considerando que este é o teor utilizado em campo), mantendo-se: (i) a quantidade de cimento em 1%, (ii) o número de dias de cura em 7, porém aumentando a temperatura de cura para 40°C. O aumento da temperatura teve como objetivo: (i) observar sua influência nas propriedades das misturas; e (ii) avaliar o limite do percentual de perda de água ocorrido durante a cura e antes do ensaio mecânico. A Figura 96 apresenta as curvas de compactação obtidas.

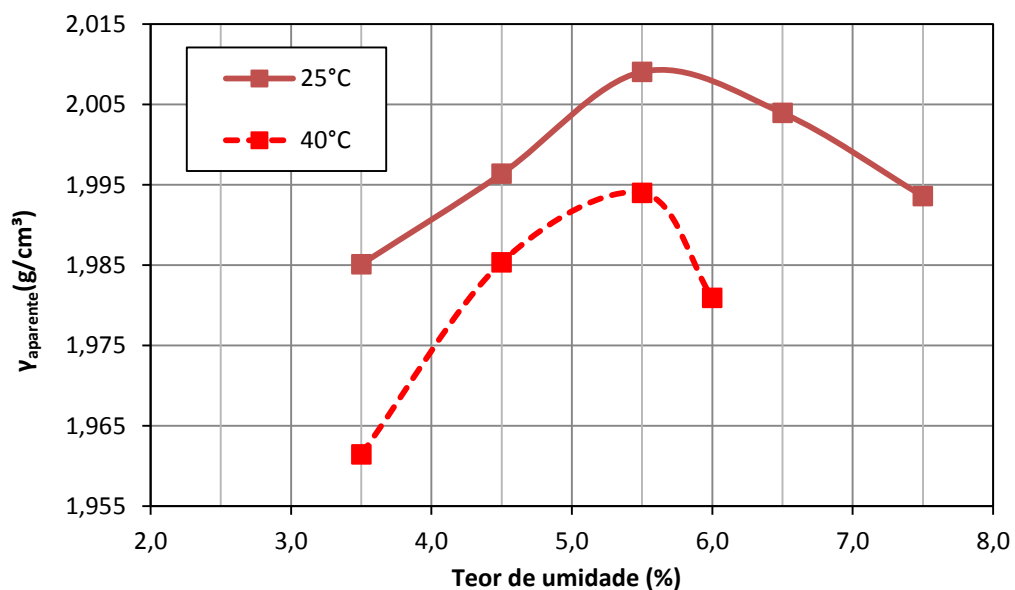


Figura 96 – Curvas de compactação para as misturas com variação da temperatura de cura

Através das curvas de compactação, é possível perceber que as misturas curadas a 40°C possuem valores de massa específica mais baixos. Isso deve-se ao fato de que a uma temperatura mais elevada provavelmente ocorre a evaporação de uma maior quantidade de água das amostras, diminuindo então a massa final do CP após a cura. Apesar dessa diferença, não foi possível perceber mudança no teor ótimo de umidade quando se modifica a temperatura de cura (para ambas as temperaturas o teor está por volta de 5,5%).

Perda de umidade após a cura

A verificação da quantidade de água restante em cada CP compactado após a cura, bem como o teor inicial adicionado, encontram-se apresentados nas Figuras 97 e 98. Percebe-se que a cura com maior temperatura levou a uma maior perda de água, porém a água presente nos CPs não saiu completamente, ficando aproximadamente 1% de umidade após a cura de 7 dias.

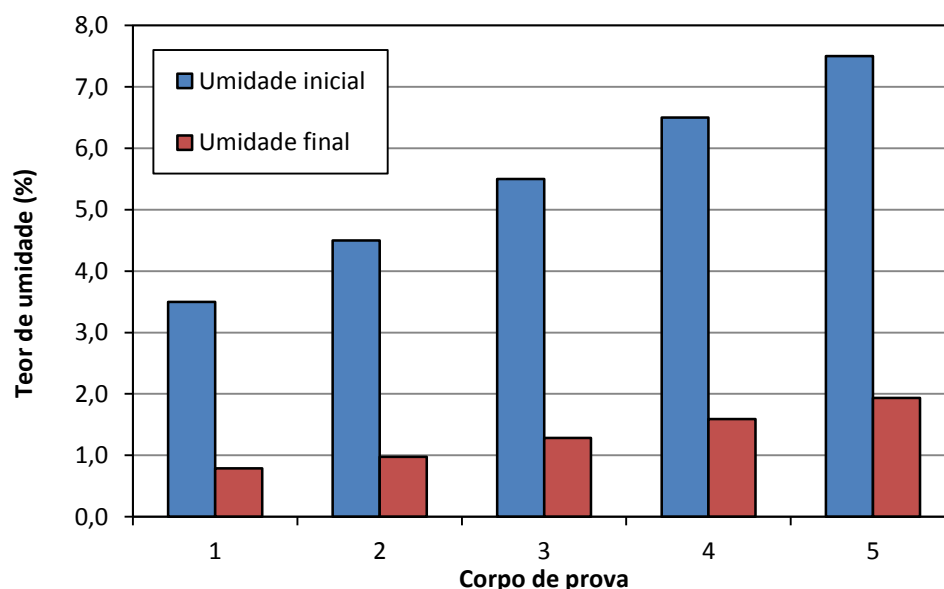


Figura 97 – Perda de umidade (25°C)

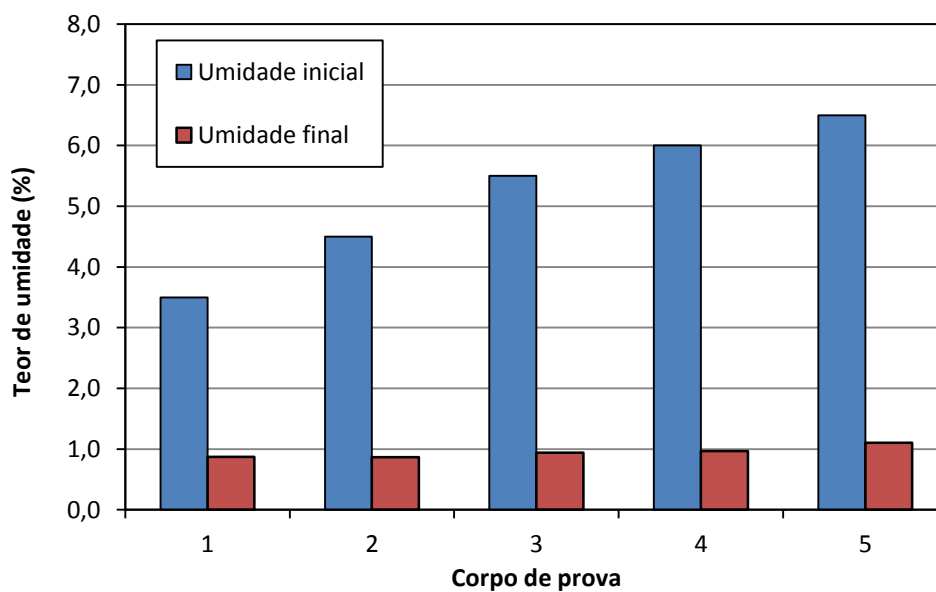


Figura 98 – Perda de umidade (40°C)

Resistência à Compressão Simples (RCS)

As amostras curadas foram submetidas ao ensaio de RCS. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 18 e nas Figuras 99 e 100.

Tabela 18 – Resultados de RCS para as misturas com diferentes temperaturas de cura

Teor de emulsão	Temperatura de cura	Teor de água	Valor de RCS (MPa)
3%	25°C	3,5%	0,29
		4,5%	0,31
		5,5%	0,35
		6,5%	0,34
		7,5%	0,28
	40°C	3,5%	0,23
		4,5%	0,22
		5,5%	0,21
		6,0%	0,21
		6,5%	0,19

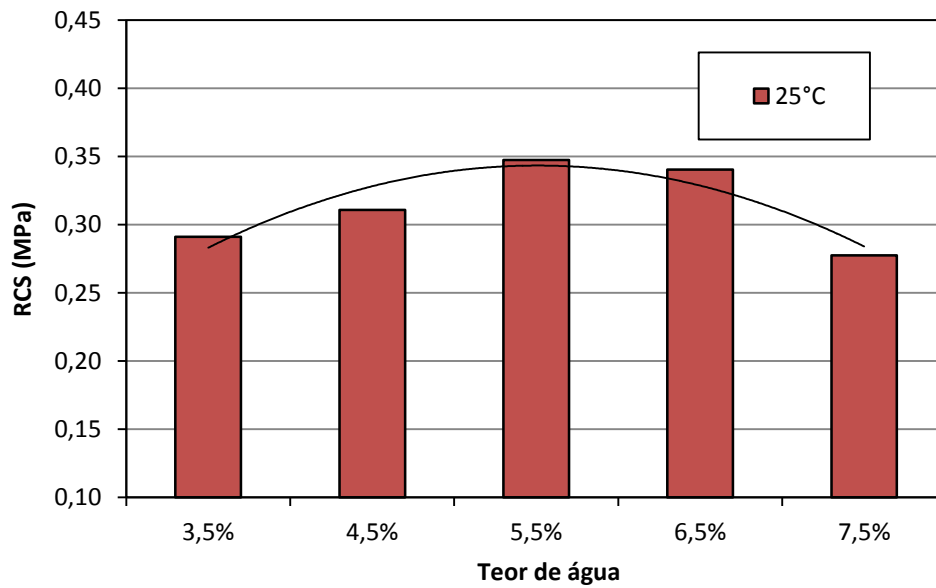


Figura 99 – Valores de RCS para as misturas a 25°C

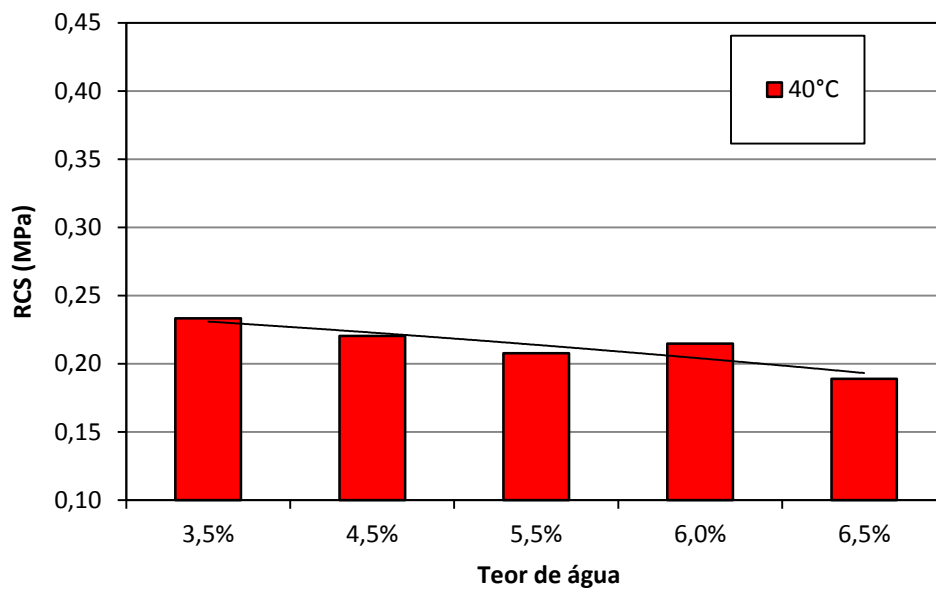


Figura 100 – Valores de RCS para as misturas a 40°C

Os resultados apresentados nos gráficos mostram que os valores de RCS, assim como a massa específica, diminuíram com o aumento da temperatura de cura, apesar da presença de menor quantidade de água nas amostras ensaiadas para o caso de 40°C. A média de valores caiu aproximadamente 25% quando se variou a temperatura de cura. Uma possível explicação seria o menor valor da massa específica que os CPs tiveram após a cura a 40°C.

Quando se compara as misturas com mesma temperatura de cura, porém com variação no teor de água, observam-se valores de RCS próximos. No caso das misturas curadas a 40°C, o maior valor de RCS foi obtido com o CP produzido com 3,5% de umidade.

8.2.5.3. Variação no teor de cimento

O teor de cimento das misturas produzidas foi inicialmente de 1%. Após a obtenção dos resultados de RCS, decidiu-se por verificar a influência da variação desse teor nas propriedades físicas e mecânicas das misturas, acreditando-se poder obter maiores valores de resistência, com o aumento no percentual de ligante hidráulico. Foram dosadas novas misturas, sem cimento e com 1% e 2% de cimento, para que as comparações pudessem ser feitas. A Figura 101 apresenta as curvas de compactação obtidas para essas misturas.

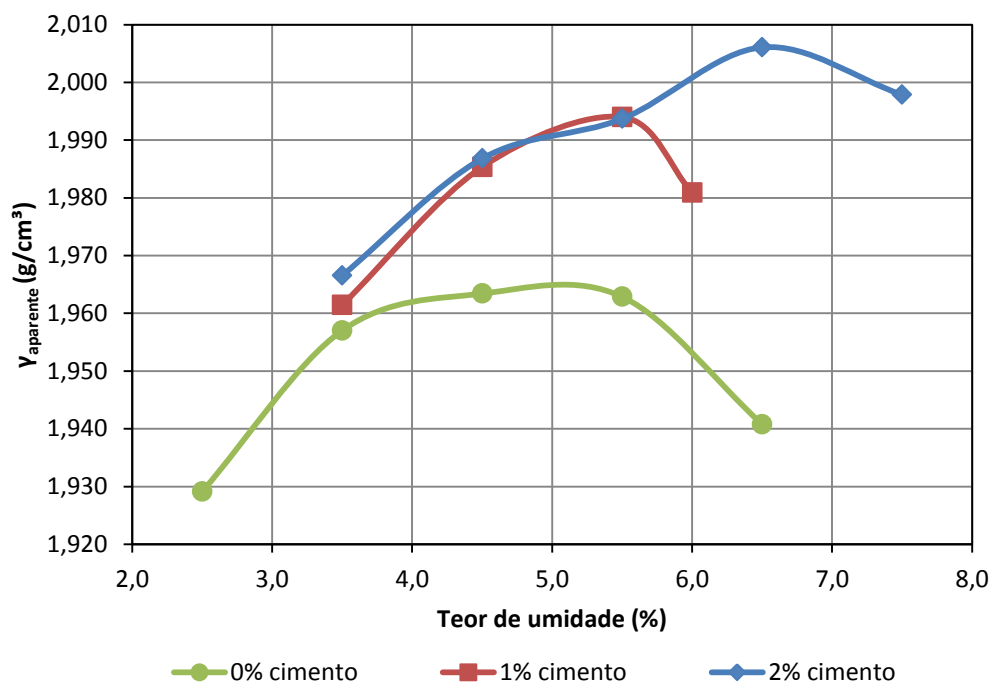


Figura 101 – Curvas de compactação para as misturas com variação do teor de cimento

Através das curvas de compactação obtidas pela dosagem, percebe-se uma tendência de maior densificação das misturas que possuem cimento em sua composição. Em relação ao teor ótimo de umidade, a tendência foi de aumento nesse teor com o aumento da

quantidade de cimento, fato esperado uma vez que uma maior presença de finos (e consequente aumento da superfície específica) exige mais água para a lubrificação da superfície das partículas presentes na mistura.

Perda de umidade após a cura

Após os 7 dias de cura em estufa à temperatura de 40°C, foi feita uma verificação na perda de água dos CPs produzidos. As Figuras 102 a 104 apresentam os teores de umidade inicial e final.

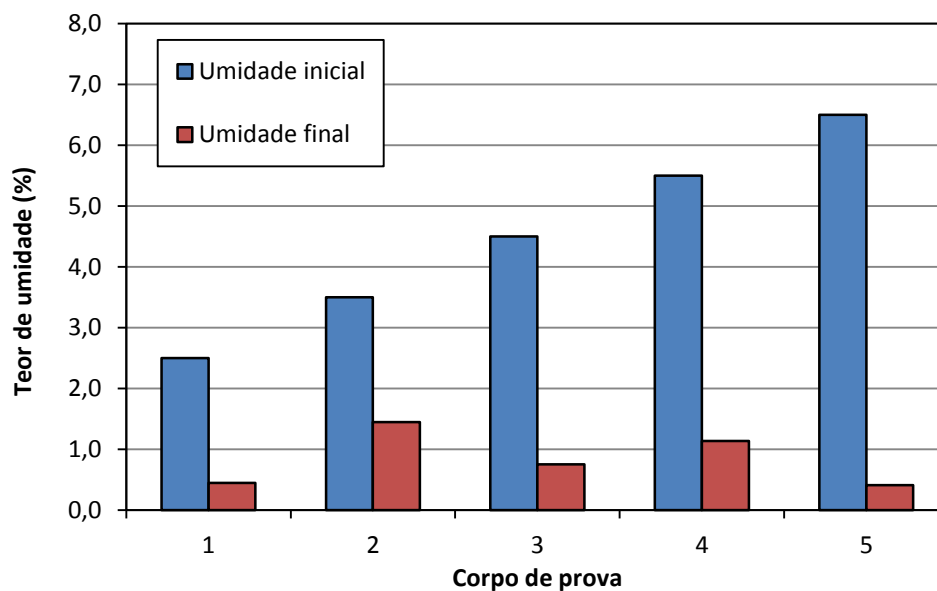


Figura 102 – Perda de umidade (0% de cimento)

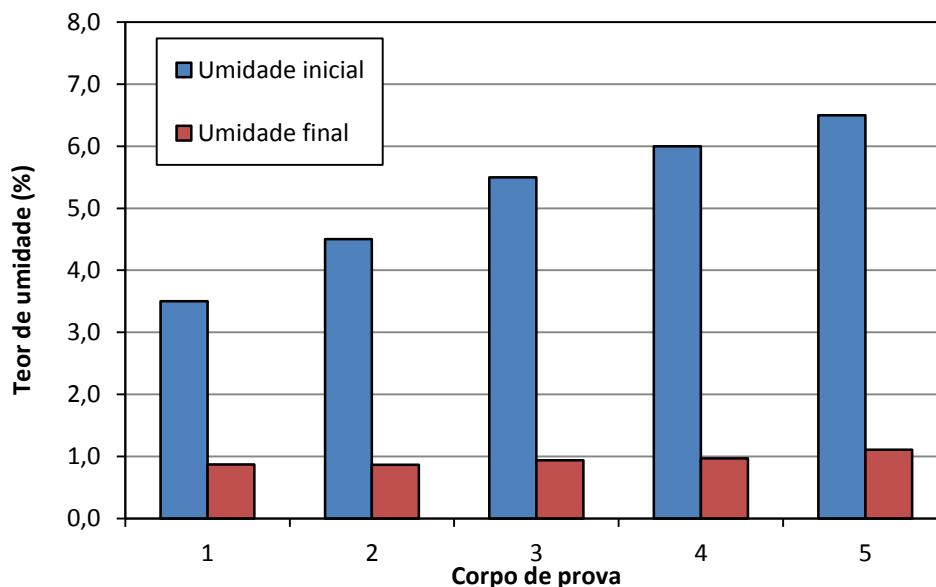


Figura 103 – Perda de umidade (1% de cimento)

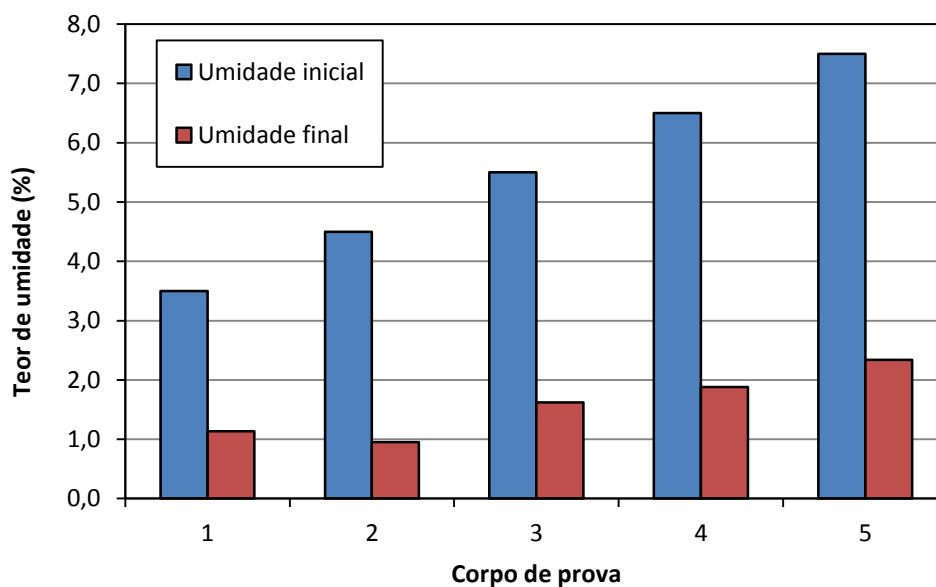


Figura 104 – Perda de umidade (2% de cimento)

Os resultados apresentados nos gráficos mostram que as misturas com 2% de cimento foram as que menos perderam água durante o processo de cura. Em alguns casos, essa umidade esteve por volta de 2%, valor, no geral, correspondente ao dobro da umidade final das misturas compostas com os outros teores de cimento testados. Isso provavelmente ocorreu devido à maior necessidade que essa mistura tem de hidratar suas partículas de cimento,

presentes em maior quantidade para esse teor. Parte da água adicionada durante a produção dessa mistura foi incorporada ao cimento, ou seja, acabou não evaporando.

Resistência à Compressão Simples (RCS)

Após o processo de cura, foi realizado o ensaio de RCS nas amostras confeccionadas. Os resultados são apresentados na Tabela 19 e nas Figuras 105 a 107.

Tabela 19 – Resultados de RCS para as misturas com diferentes teores de cimento

Teor de emulsão	Teor de cimento	Teor de água	Valor de RCS (MPa)
3%	0%	2,5%	0,07
		3,5%	0,09
		4,5%	0,08
		5,5%	0,10
		6,5%	0,07
	1%	3,5%	0,23
		4,5%	0,22
		5,5%	0,21
		6,0%	0,22
		6,5%	0,19
	2%	3,5%	0,23
		4,5%	0,27
		5,5%	0,40
		6,5%	0,27
		7,5%	0,25

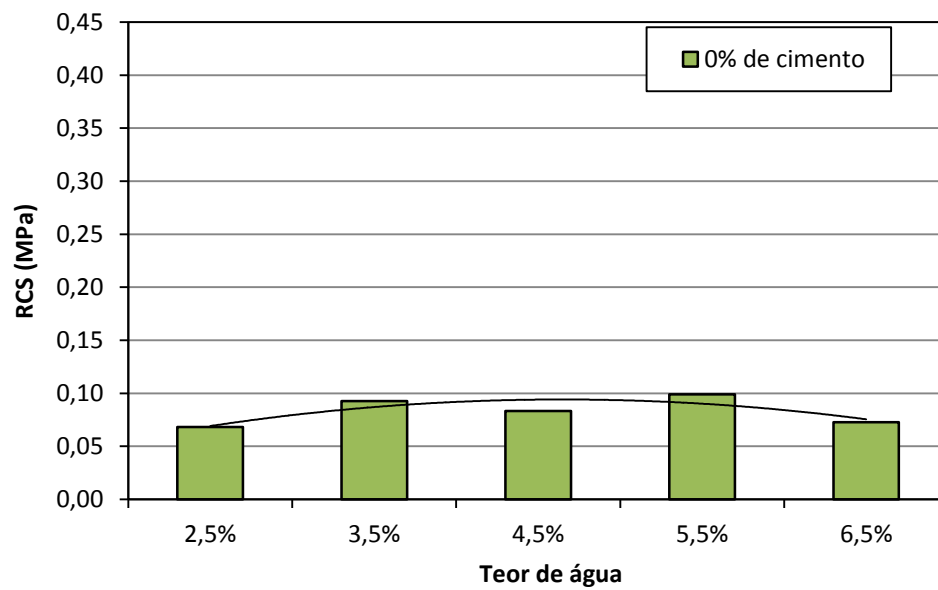


Figura 105 – Valores de RCS para as misturas com 0% de cimento

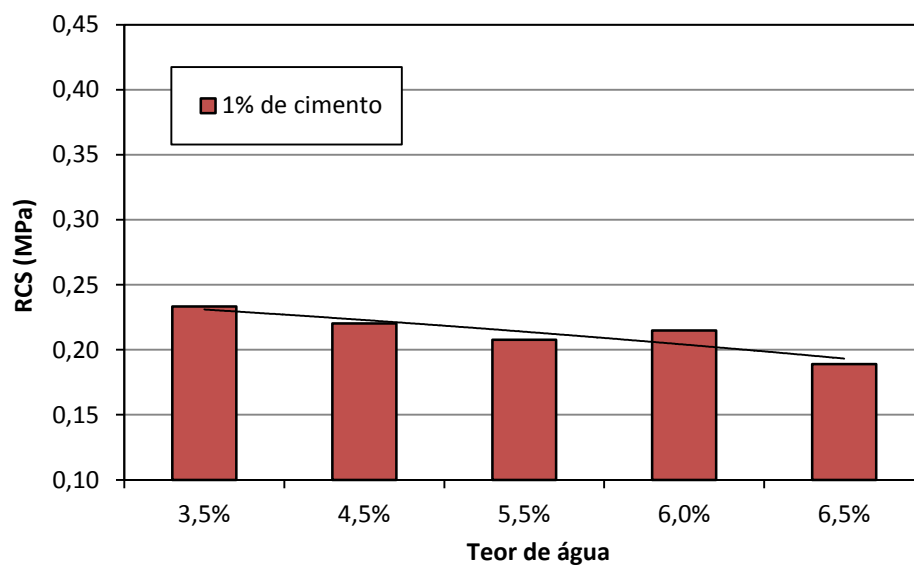


Figura 106 – Valores de RCS para as misturas com 1% de cimento

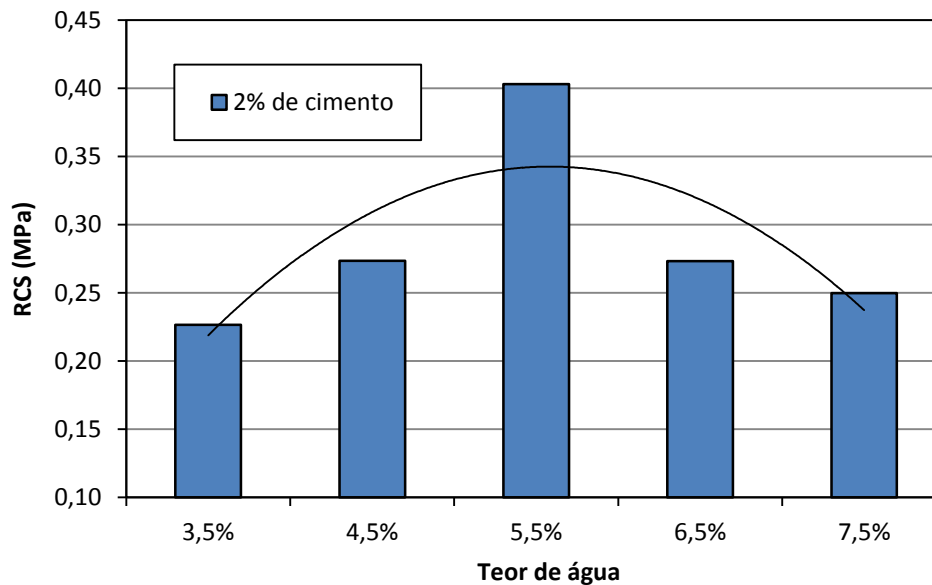


Figura 107 – Valores de RCS para as misturas com 2% de cimento

Os valores de RCS para as misturas sem cimento foram muito baixos, em comparação com aqueles das misturas que possuíam 1 ou 2% desse material em sua composição, mostrando que o cimento eleva realmente a resistência das misturas. A variação do teor de água não trouxe diferenças significativas nos resultados, porém é possível perceber que para a mistura com 2% de cimento, a amostra no teor mais próximo do teor ótimo de umidade (5,5%) trouxe melhores resultados em relação a esse parâmetro.

A Figura 108 apresenta a relação entre os valores de massa específica e os valores de RCS de todos os CPs compactados e ensaiados nesta etapa do estudo do material reciclado com emulsão. Percebe-se que não há uma tendência linear entre esses parâmetros, ou seja, o aumento da massa específica das misturas, ou sua maior densificação, não necessariamente significa a obtenção de misturas com maior resistência à compressão.

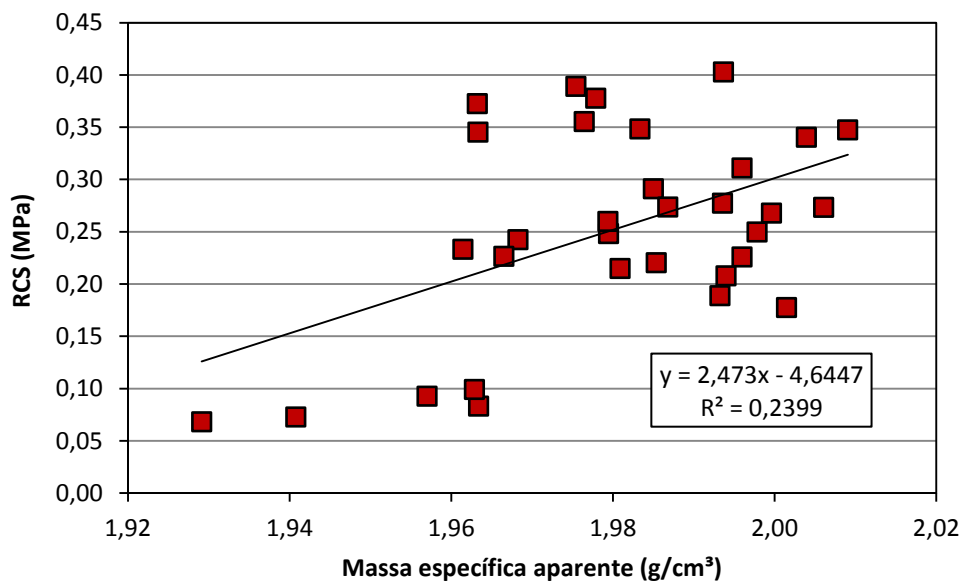


Figura 108 – Valores de RCS × valores de massa específica

8.2.5.4. Energia Dissipada – Ensaio de Resistência à Compressão Simples

O ensaio de RCS gera curvas de carga *versus* deslocamento, e, a partir da área sob essas curvas, foi possível calcular a energia dissipada durante o ensaio. Também através das curvas, foi possível obter o valor máximo de carga atingido, que está ligado a resistência apresentada pelo material. As Figuras 109 a 111 apresentam as curvas obtidas durante o ensaio de RCS para cada tipo de mistura analisada.

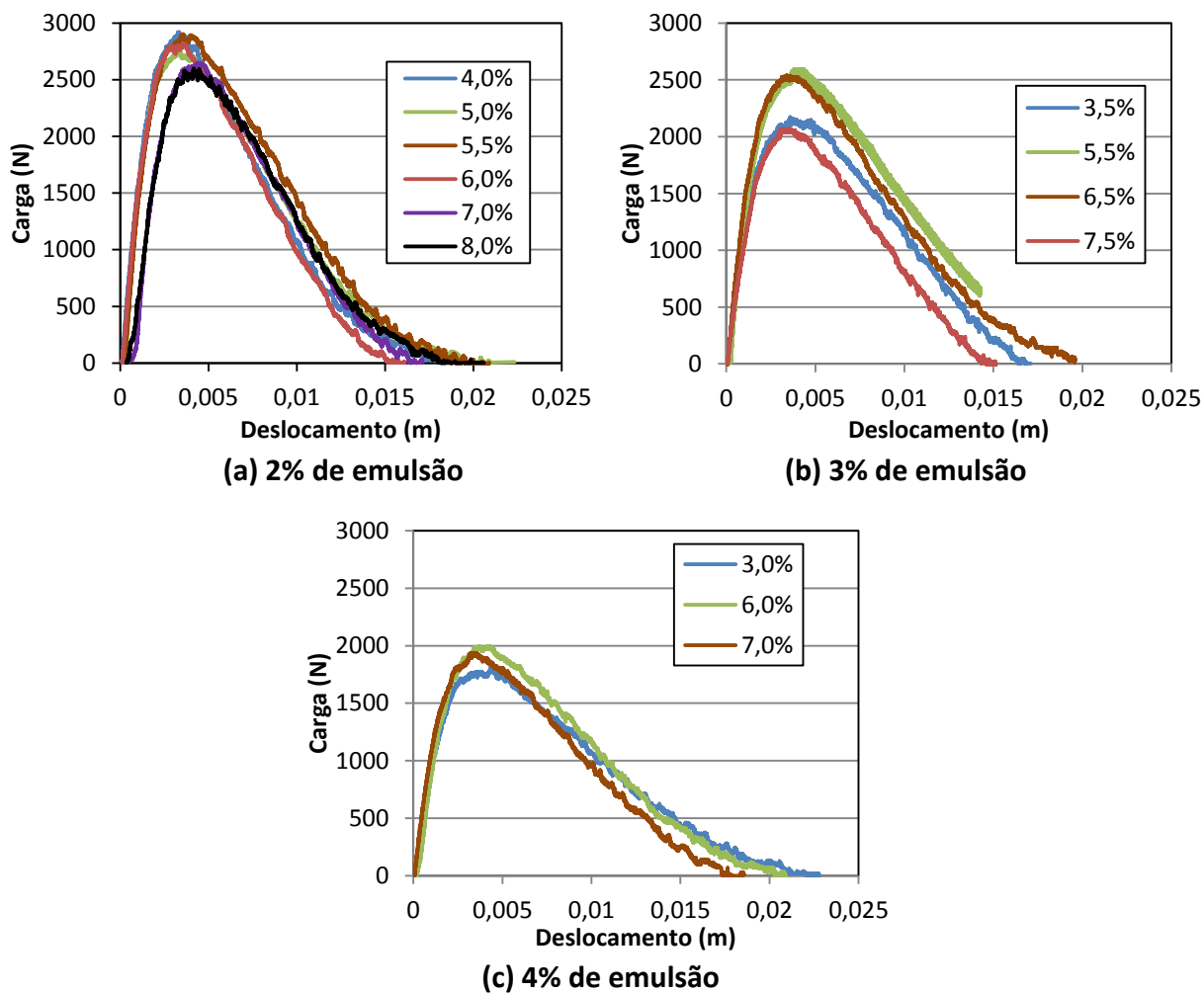


Figura 109 – Gráficos obtidos no ensaio de RCS (variação no teor de emulsão)

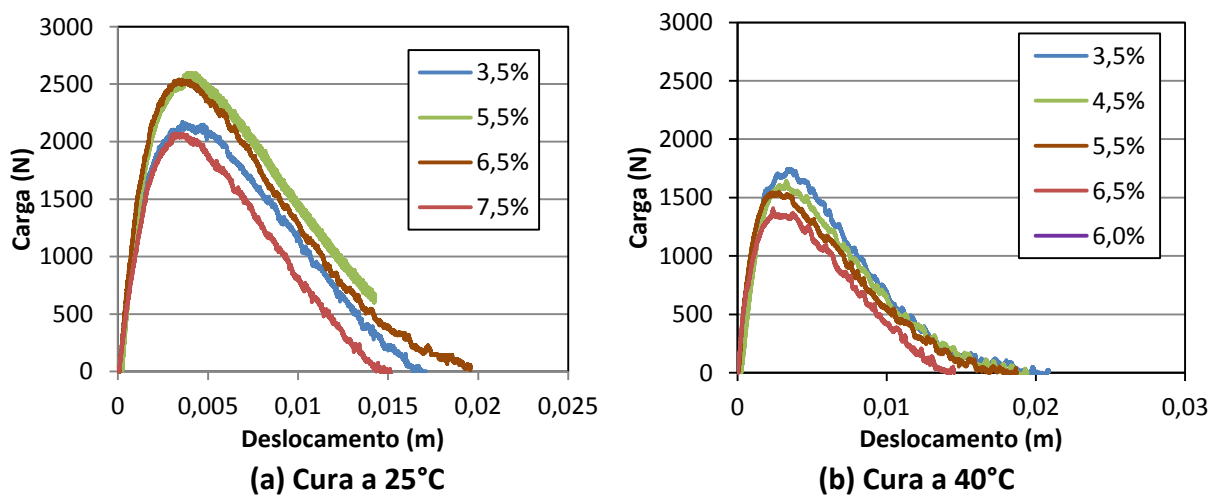


Figura 110 – Gráficos obtidos no ensaio de RCS (variação na temperatura de cura)

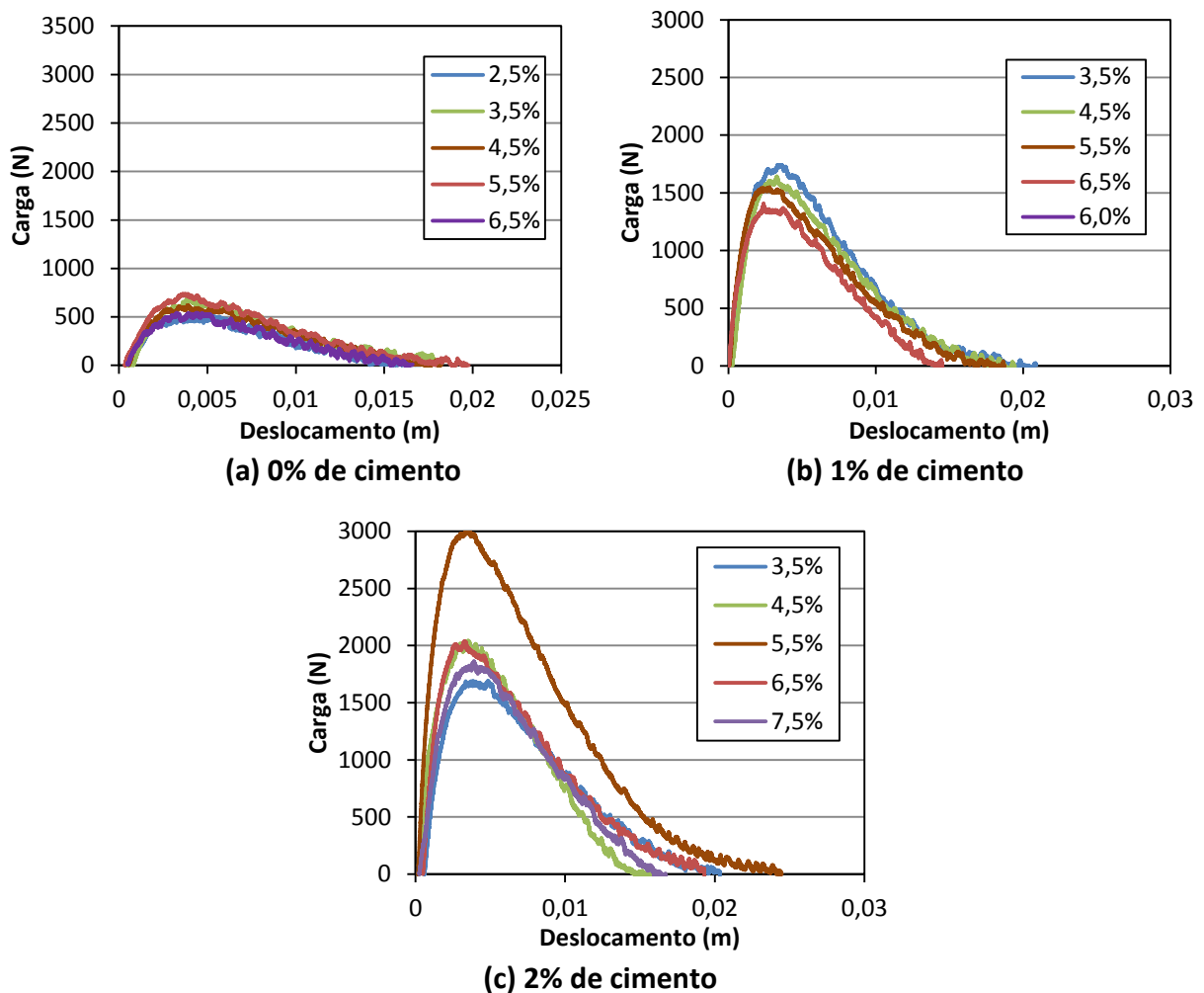


Figura 111 – Gráficos obtidos no ensaio de RCS (variação no teor de cimento)

Como forma de tentar buscar diferenças nas propriedades dos CPs produzidos, foi calculada a energia dissipada durante o ensaio de RCS. As Figuras 112 a 114 apresentam os valores obtidos para os diferentes casos analisados.

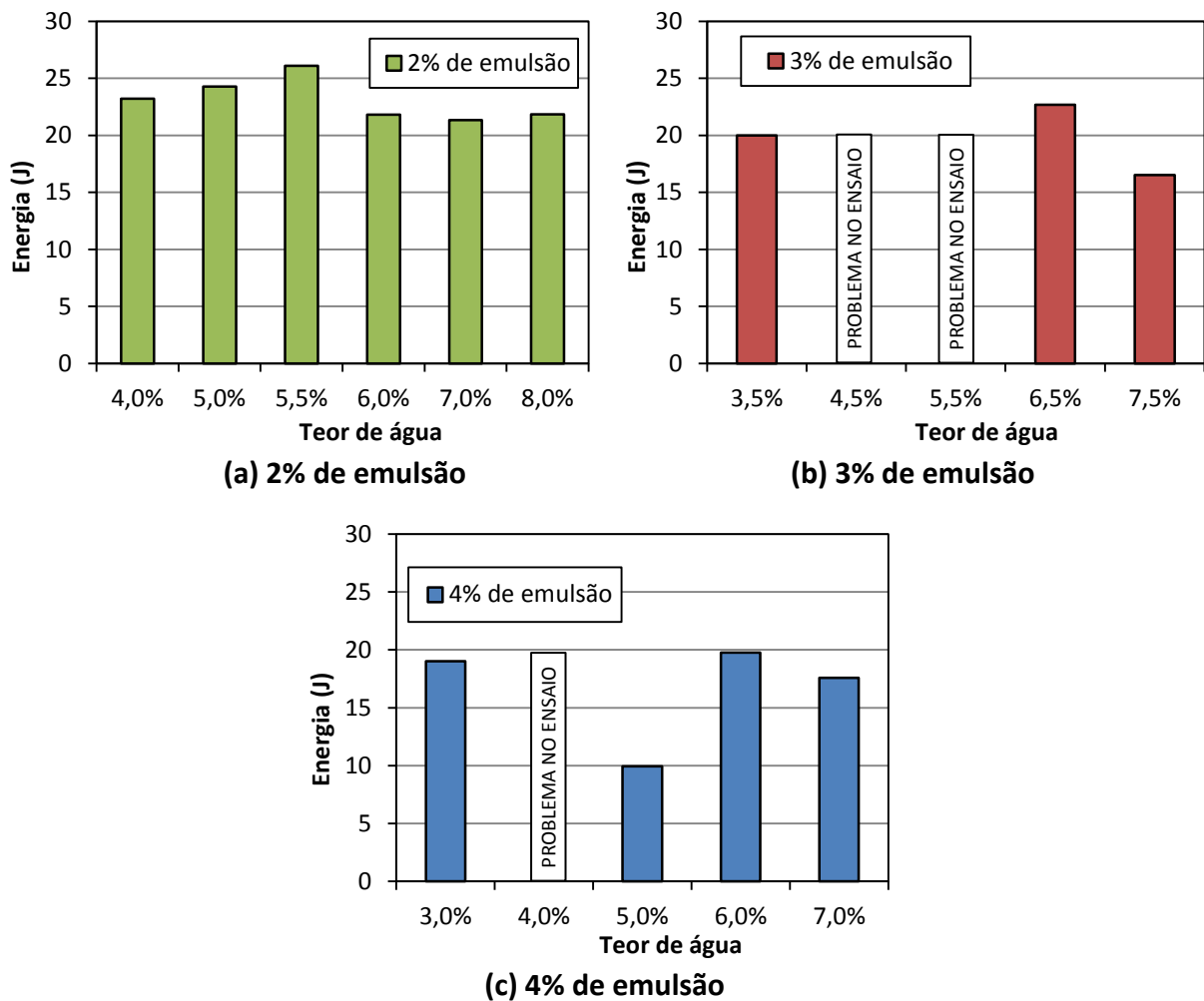


Figura 112 – Valores de energia dissipada durante o ensaio de RCS (variação no teor de emulsão)

Os resultados apresentados mostram que os valores de energia dissipada tiveram a mesma tendência dos valores de RCS. Não há variações significativas entre os diferentes teores de água para cada teor de emulsão. No geral, os CPs que continham 2% de emulsão necessitaram de um pouco mais de energia para serem rompidos em relação aos CPs dos demais teores.

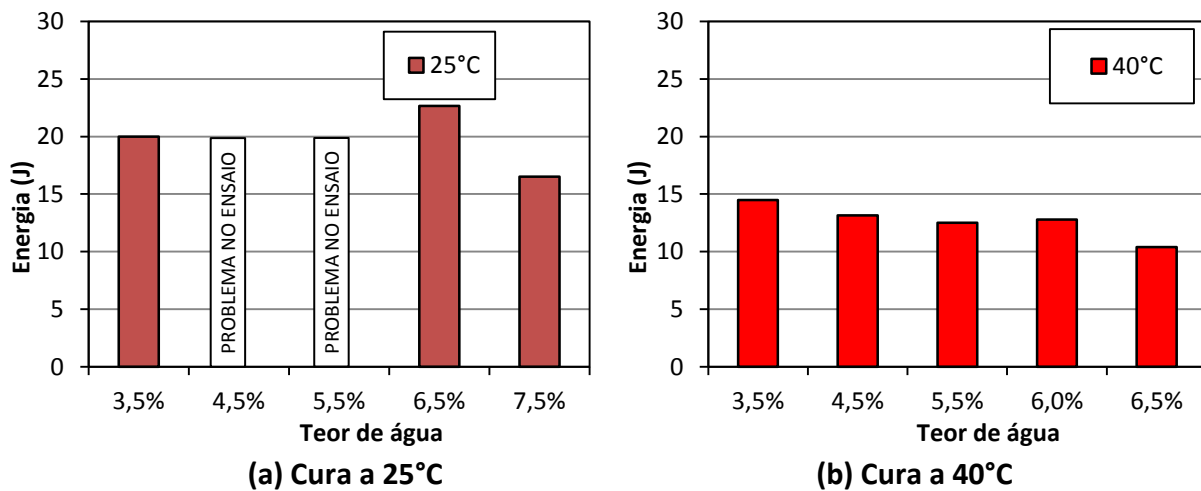


Figura 113 – Valores de energia dissipada durante o ensaio de RCS (variação na temperatura de cura)

Também não foi observada diferença significativa nos valores de energia dissipada para diferentes teores de água quando se analisou cada uma das temperaturas de cura isoladamente. Em relação à variação na temperatura de cura, a mesma tendência observada para os valores de RCS se repetiu, sendo os valores de energia dissipada durante o ensaio de ruptura inferior para as misturas curadas a 40°C (em torno de 30%).

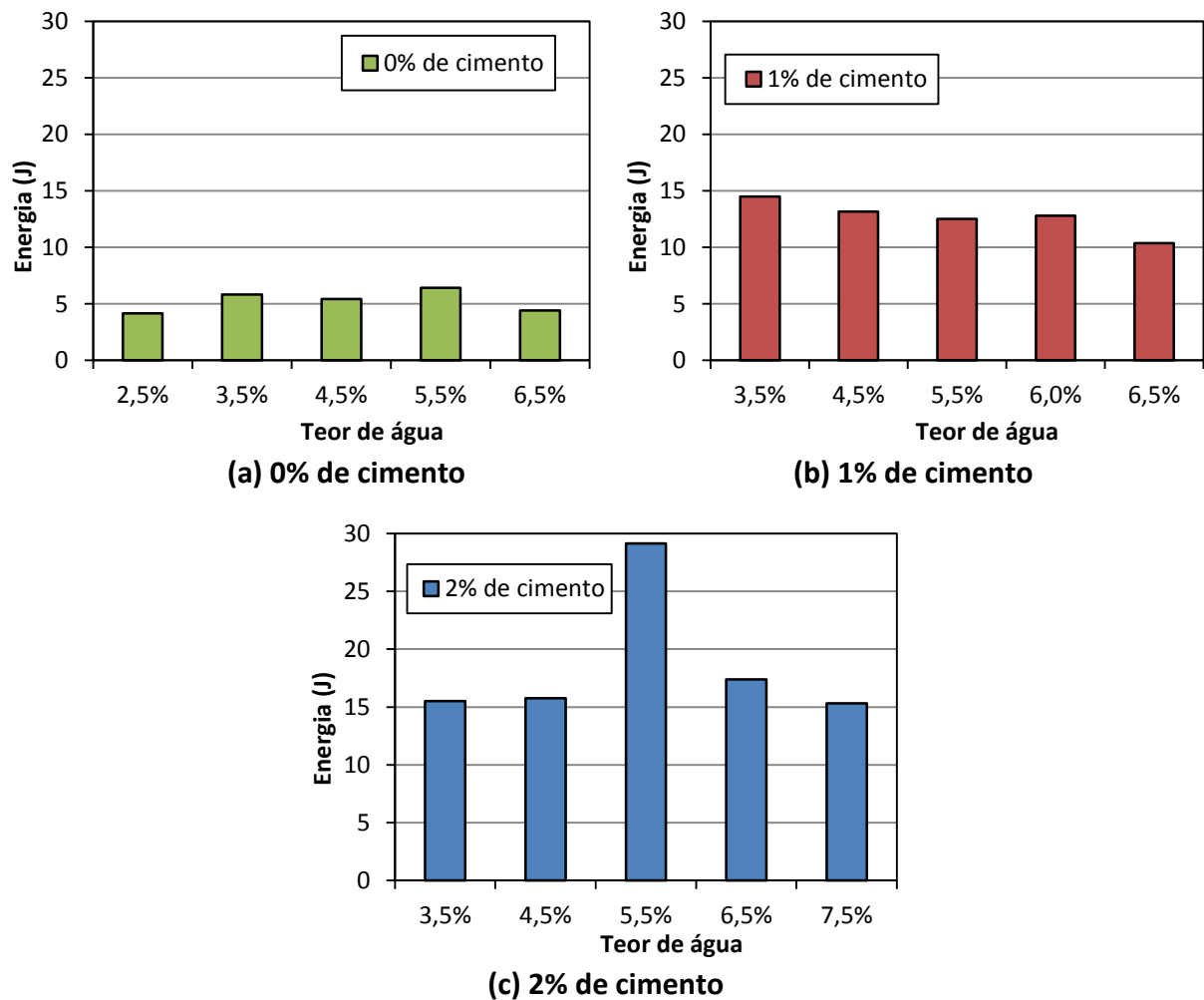


Figura 114 – Valores de energia dissipada durante o ensaio de RCS (variação no teor de cimento)

Os valores de energia dissipada seguiram a mesma tendência dos valores de RCS também para a variação no teor de cimento. Para a mistura com 0% de cimento, os valores foram muito baixos, sendo necessária pouca energia para romper os CPs ensaiados. A variação do teor de água não afetou significativamente esta propriedade, mas é possível perceber que, no caso das misturas com 2% de cimento, o teor de 5,5% de água foi aquele que produziu uma mistura possivelmente mais resistente, já que o valor de energia foi quase o dobro daquele obtido para as demais quantidades de água.

8.2.5.5. Misturas sem emulsão asfáltica

Com o objetivo de verificar se as propriedades mecânicas das misturas recicladas eram afetadas negativamente pela interação entre a emulsão asfáltica e o cimento Portland, decidiu-se por realizar a dosagem de misturas que não continham, em sua composição, nenhuma quantidade de emulsão, porém 1% de cimento (Figura 115). A Figura 116 apresenta a curva de compactação.



Figura 115 – Aspectos das misturas com 1% de cimento e sem emulsão

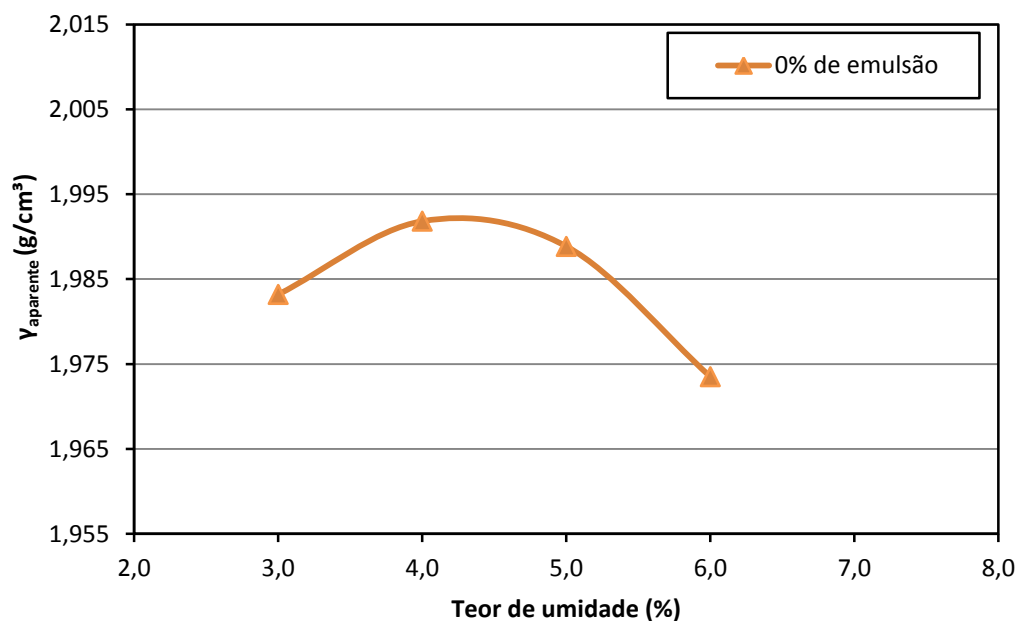


Figura 116 – Curvas de compactação para a mistura sem emulsão (energia modificada)

Os resultados obtidos para a curva de compactação mostram que, também para este caso, os valores de massa específica variam muito pouco quando se varia o teor de água. O teor ótimo de umidade para a mistura com 0% de emulsão seria de aproximadamente 4,3%, ou seja, menor do que os teores ótimos para as misturas compactadas com os demais teores de emulsão. A massa específica seca máxima foi superior àquela obtida pra a mistura com 2% de emulsão, porém inferior às demais misturas (com 3 e 4% de emulsão).

Perda de umidade após a cura

Após a compactação, as amostras permaneceram estufa para serem submetidas ao processo de cura com temperatura controlada. O tempo de cura foi de 7 dias, e a temperatura foi de 25°C. A fim de se obter os teores de umidade remanescentes nas amostras após a cura, os CPs foram pesados novamente para que pudesse medir a perda de água. A Figura 117 apresenta os resultados. Percebe-se que, no geral, essa mistura foi a que apresentou o menor teor de água após a cura, em comparação com as misturas produzidas com qualquer quantidade de emulsão asfáltica.

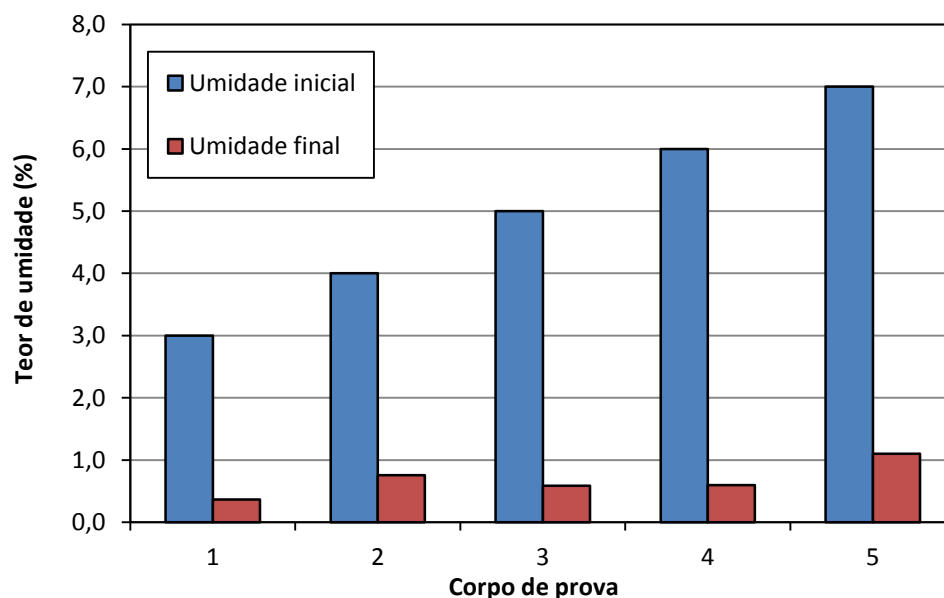


Figura 117 – Variação da umidade com a cura (0% de emulsão)

Resistência à Compressão Simples (RCS)

Após as dosagens e o período de cura, todos os CPs foram submetidos ao ensaio de RCS para verificar as diferenças quando se comparam misturas produzidas com diferentes teores de água. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 20 e na Figura 118.

Tabela 20 – Resultados de RCS para as misturas com diferentes teores de água

Teor de emulsão	Teor de água	Valor de RCS (MPa)
0%	3,0%	0,55
	4,0%	0,58
	5,0%	0,53
	6,0%	0,46
	7,0%	0,54

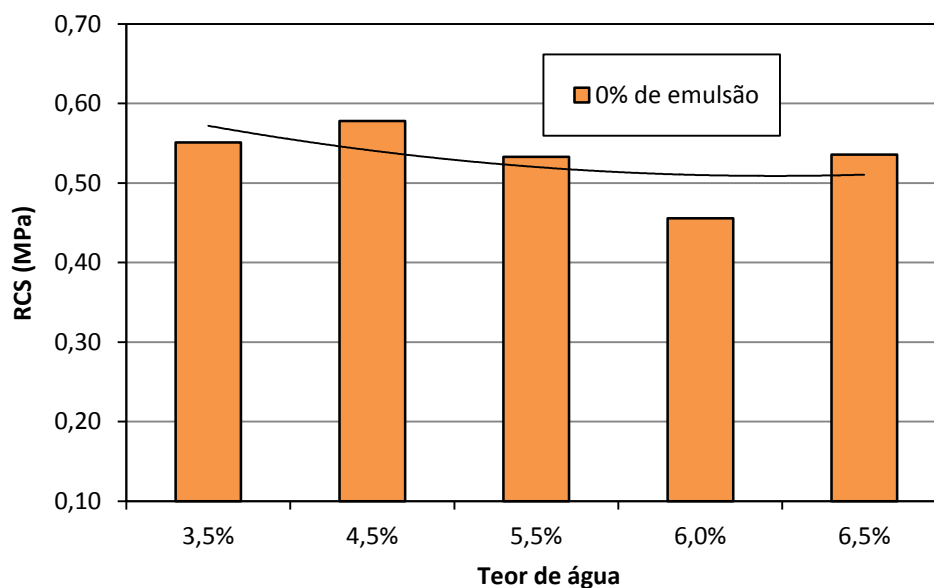


Figura 118 – Valores de RCS para as misturas com 0% de emulsão

Os resultados indicam que, independente do teor de água utilizados, as misturas possuem comportamento parecido em termos de RCS, com valores próximos a 0,5MPa. Observa-se, no entanto, que há um valor intermediário de umidade que gera misturas com resistência levemente superior às demais (4,5% de água). A Figura 119 traz uma comparação dos valores de RCS obtidos para os diferentes teores de emulsão. Foram considerados aqui os

maiores resultados obtidos entre os obtidos com a variação do teor ótimo de água para cada teor de emulsão.

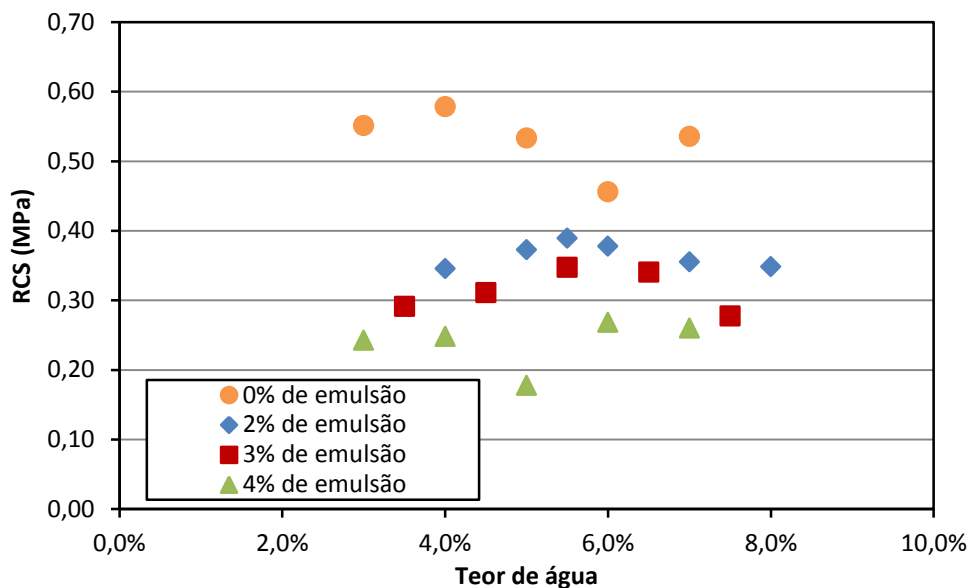


Figura 119 – Valores de RCS para variação no teor de emulsão e no teor de água

O gráfico apresentado indica que, para qualquer teor de umidade, os valores de RCS para as misturas sem adição de emulsão foram os mais elevados. Uma possível explicação para isso seria que a interação do cimento com a emulsão esteja prejudicando o ganho de resistência que esse ligante hidráulico é capaz de fornecer. Novos estudos relacionados ao uso de ambos os materiais em conjunto devem ser feitos para entender melhor o comportamento deles nas misturas recicladas. Além disso, sabe-se que a emulsão asfáltica fornece à estrutura das amostras certa flexibilidade e menos rigidez, o que pode também justificar os resultados obtidos, já que a falta da emulsão pode ter produzido CPs mais rígidos, ou seja, mais resistentes ao ensaio realizado. Também é possível afirmar que as misturas com 4% de emulsão foram as piores em termos de RCS, e as misturas com 2 e 3% resultaram em valores próximos de resistência.

As curvas carga *versus* deslocamento geradas pelo ensaio de RCS, para todos os teores de emulsão são apresentadas na Figura 120. É importante ressaltar que, neste momento,

apenas um teor de água (considerado ótimo) está sendo representado, a fim de poder fazer comparações entre as diferentes misturas produzidas. Foi escolhido o teor de água que gerou amostras com maiores valores de energia. A Tabela 21 apresenta o valor da energia dissipada durante o ensaio (área sob as curvas apresentadas).

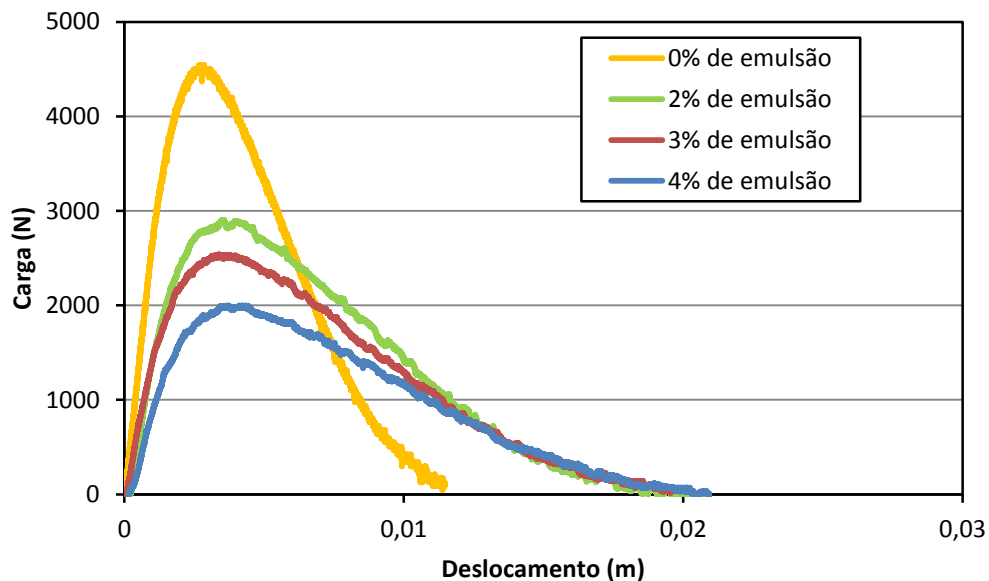


Figura 120 – Gráficos obtidos no ensaio de RCS (variação no teor de emulsão)

Tabela 21 – Valores de energia dissipada no ensaio de RCS (variação no teor de emulsão)

Teor de emulsão	Valor de RCS (MPa)	Valor de energia dissipada (N.m)
0%	0,58	23,27
2%	0,39	26,11
3%	0,34	22,67
4%	0,27	19,75

Pelos resultados apresentados, pode-se afirmar que, para as misturas que continham algum teor de emulsão, é possível estabelecer uma tendência nos valores de energia, uma vez que quanto menor o valor de RCS, menor a energia dissipada durante o ensaio. Isso pode ser comprovado pelas curvas obtidas através do ensaio, pois elas possuem formatos parecidos. Já para a mistura sem emulsão asfáltica, é possível perceber que, mesmo com valor elevado

de RCS, a energia dissipada durante o ensaio foi próxima daquela obtida para as demais misturas. A curva obtida para essa mistura apresentou comportamento diferente, uma vez que, após a ruptura do CP, o material retorna mais rapidamente ao valor nulo de resistência. Esse comportamento se assemelha àquele de materiais que não possuem parcela viscosa em sua composição, o que era esperado, já que não foi incorporado qualquer tipo de ligante asfáltico.

8.2.5.6. Efeito do tempo de cura (25°C)

Esta etapa da pesquisa envolvendo o material reciclado com emulsão tratou do estudo da cura controlada em laboratório. Foram reproduzidas réplicas de amostras da mistura reciclada, contendo teores fixos de emulsão (3%), água (5,5%) e cimento (1%), que são valores bem próximos àqueles utilizados em campo e que geraram as melhores misturas de laboratório em termos de propriedades de estado e mecânicas, conforme mostrado anteriormente no relatório.

Para esta etapa, foram estudados os seguintes tempos de cura: 7, 28, 60 e 90 dias, todos à temperatura de 25°C (Figura 121). Para cada um dos tempos, foram moldados seis CPs com dimensões de 10cm de diâmetro e 20cm de altura, todos com mesma composição e características. Todas as amostras foram ensaiadas em termos de MR triaxial. Em seguida, três desses CPs foram rompidos no ensaio de RT, e os outros três rompidos no ensaio de RCS. A Tabela 22 apresenta os valores médios de massa específica seca obtida para todos os CPs confeccionados, de acordo com cada tempo de cura, bem como os valores de desvio padrão e coeficiente de variação (CV). A Figura 122 mostra os valores médios com as barras de erro, representadas pelos valores de desvio padrão para cada tempo de cura. Os resultados indicam que, independente do tempo de cura adotado, os CPs mantiveram o mesmo valor de massa específica seca. Além disso, não houve variação significativa entre amostras de um mesmo grupo de misturas, uma vez que os valores de CV foram baixos.



Figura 121 – CPs moldados em laboratório sendo submetidos ao processo de cura a temperatura controlada (25°C)

Tabela 22 – Massa específica seca para as misturas com tempos de cura variáveis

Tempo de cura (dias)	Média (g/cm ³)	Desvio padrão (g/cm ³)	CV (%)
7	2,00	0,01	0,67
28	1,99	0,01	0,55
60	1,99	0,01	0,61
90	1,99	0,01	0,58

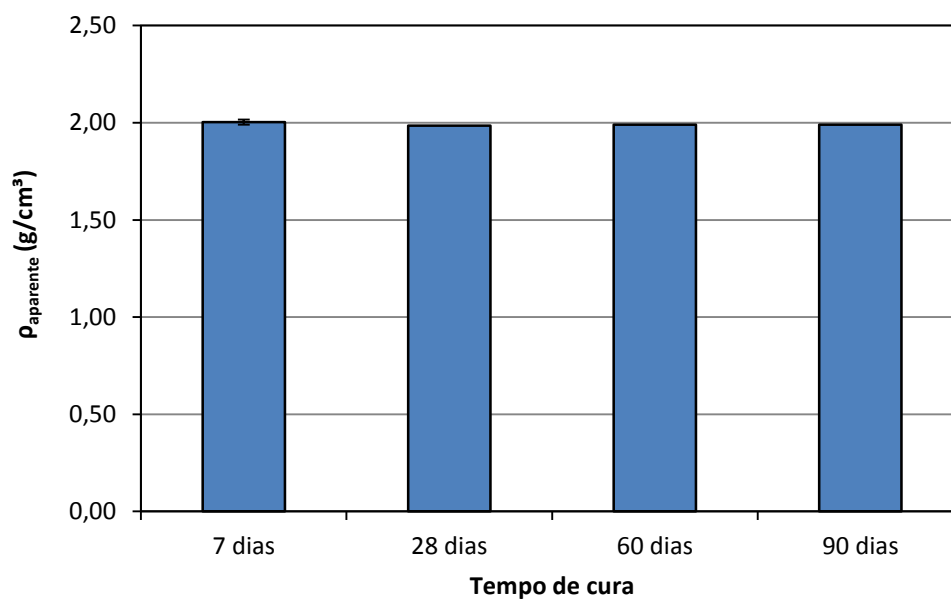


Figura 122 – Valores médios de massa específica seca em função do tempo de cura

Perda de umidade após a cura

Após as amostras permanecerem em estufa sendo submetidas ao processo de cura com temperatura controlada, todos os CPs foram pesados a fim de verificar quanto da umidade inicial havia sido perdida. As Figuras 123 a 126 apresentam o teor de umidade inicial e o teor de umidade final, para os diferentes tempos de cura.

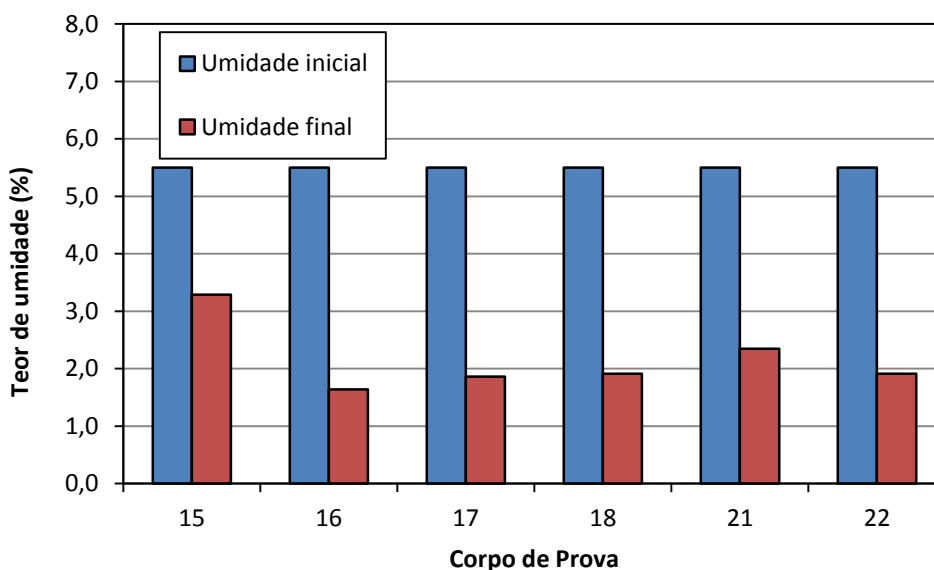


Figura 123 – Variação da umidade com a cura (7 dias)

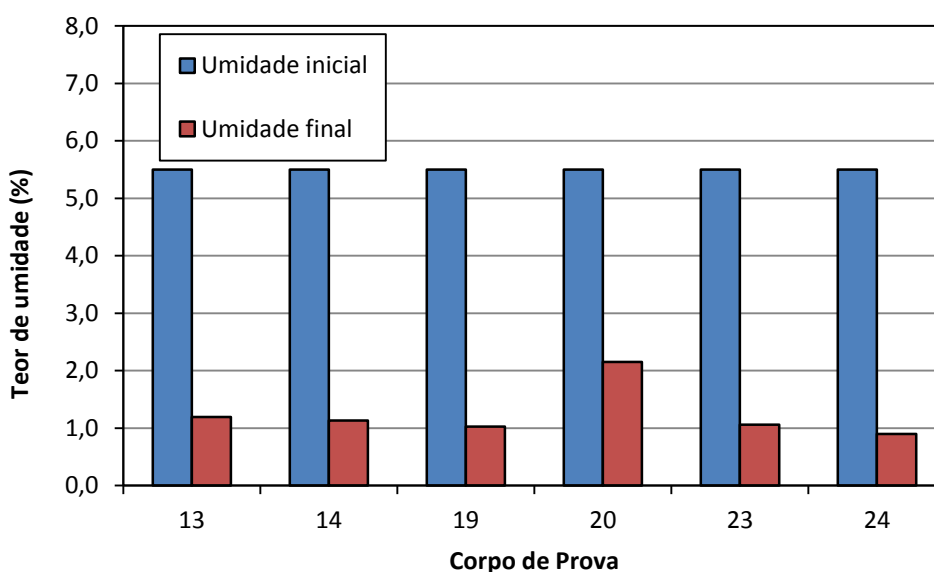


Figura 124 – Variação da umidade com a cura (28 dias)

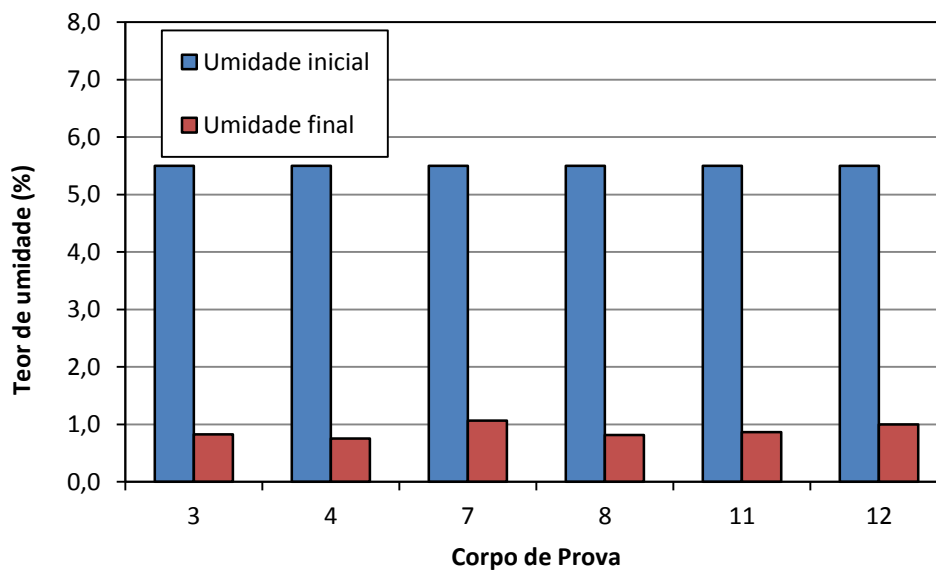


Figura 125 – Variação da umidade com a cura (60 dias)

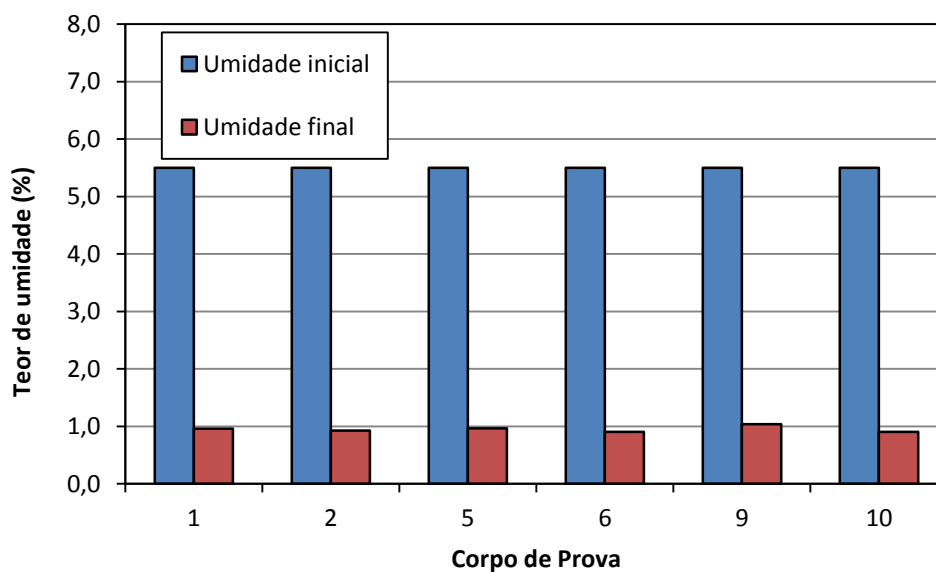


Figura 126 – Variação da umidade com a cura (90 dias)

Os resultados apresentados mostram que, para todos os tempos de cura, nenhum dos CPs perdeu completamente sua umidade inicial. No geral, para 7 dias de cura, o valor final da umidade foi de 2%; para 28 dias, foi de aproximadamente 1%; e para 60 e 90 dias, a umidade final esteve por volta de 0,85%. Esses resultados indicam que a mistura vai perdendo água durante o seu processo de cura até que, em determinado momento, essa perda não

prossegue. Provavelmente, a água residual nos CPs com tempo de cura de 90 dias corresponde, na verdade, àquela porção que serviu para hidratar o cimento da mistura.

Módulo de Resiliência (MR)

Todas as amostras moldadas no laboratório foram submetidas ao ensaio de MR triaxial para que pudesse ser verificado o avanço da rigidez do material reciclado ao longo do tempo de cura. A Figura 127 ilustra o passo a passo da realização desse ensaio.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 127 – Ensaio de MR: (a) preparação do CP, (b) colocação da membrana, (c) CP pronto para o ensaio e (d) realização do ensaio

Como foram ensaiados seis CPs para cada tempo de cura, os resultados obtidos serão apresentados em forma de média. É importante ressaltar que todos os CPs, para cada tempo de cura, resultaram em valores muito próximos de MR, para cada par de tensões. As Figuras 128 a 131 apresentam os resultados plotados em relação à tensão de confinamento.

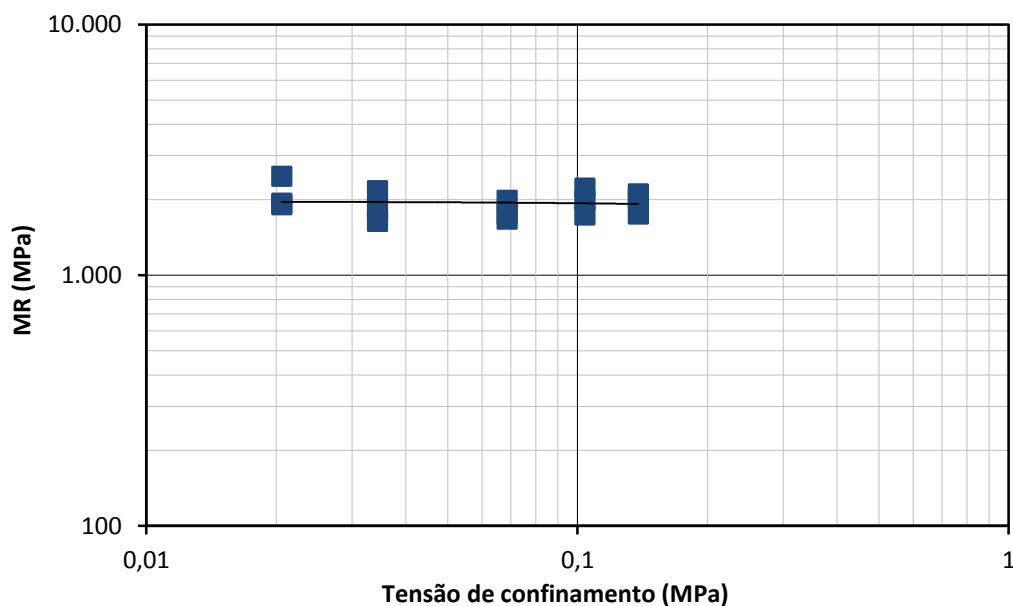


Figura 128 – MR vs. tensão confinante (7 dias)

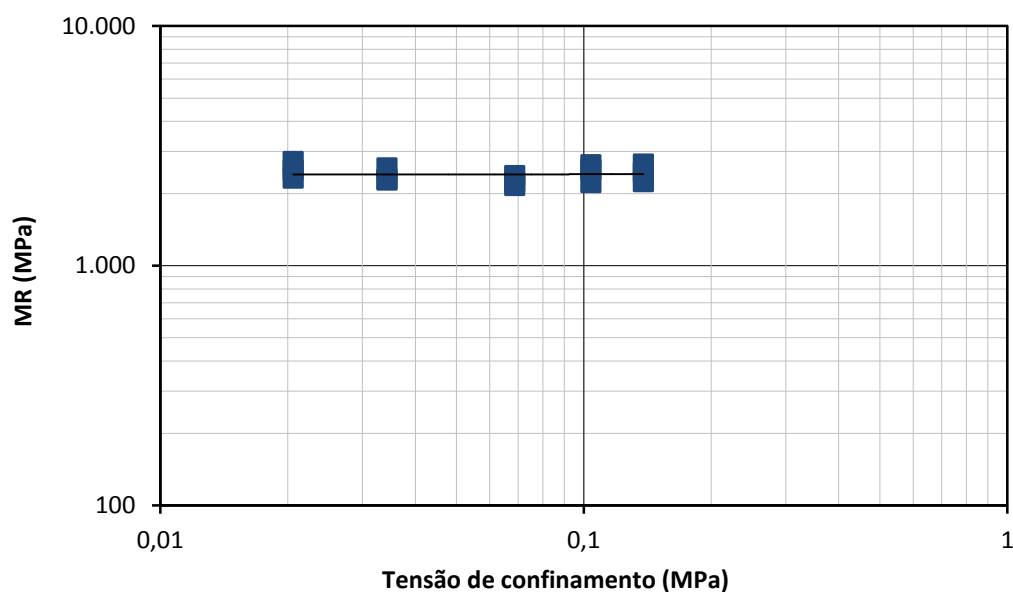


Figura 129 – MR vs. tensão confinante (28 dias)

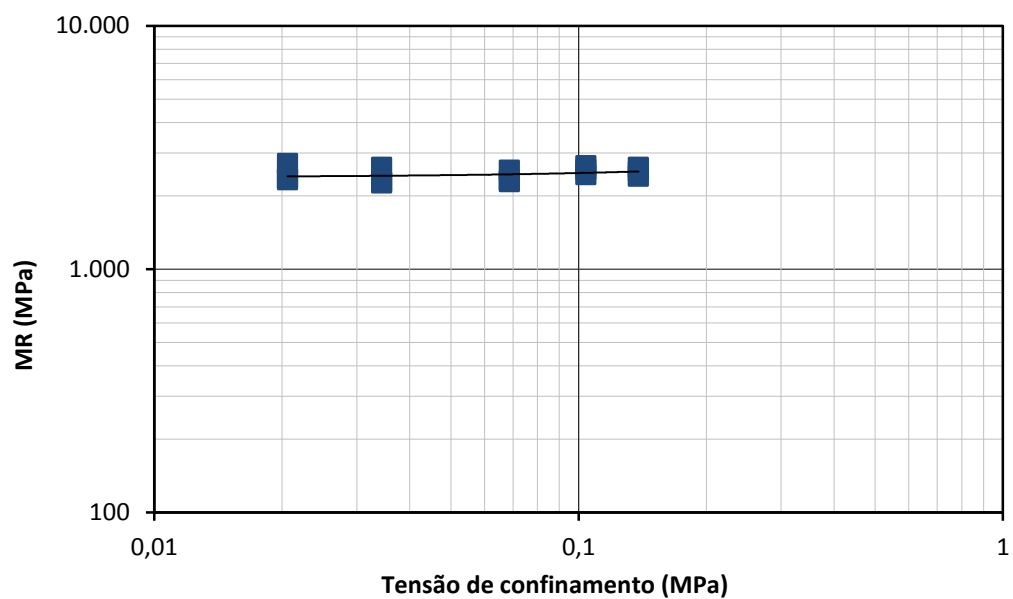


Figura 130 – MR vs. tensão confinante (60 dias)

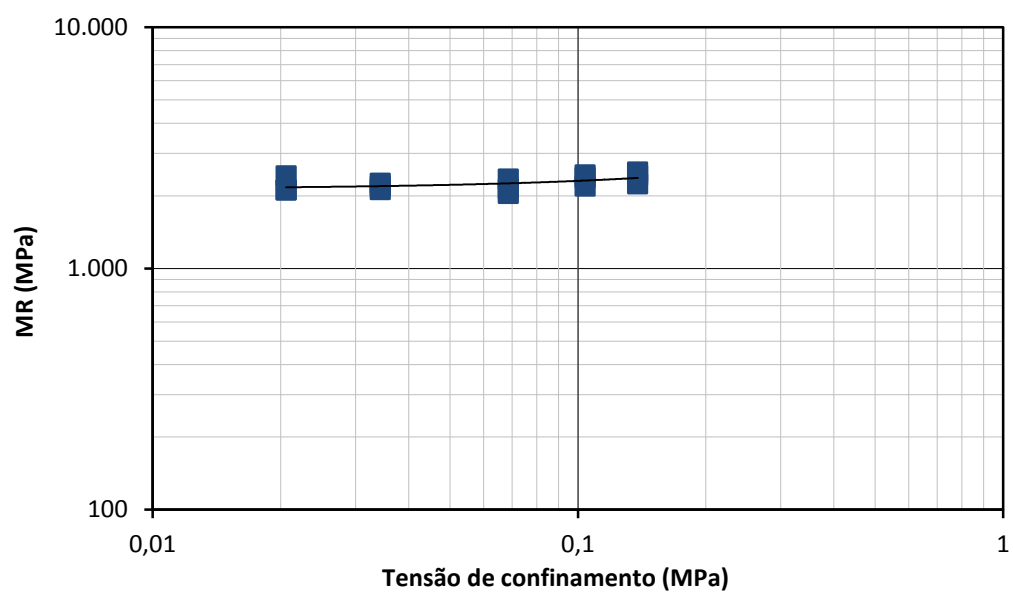


Figura 131 – MR vs. tensão confinante (90 dias)

Pode-se dizer que, para todos os tempos de cura, as amostras da mistura reciclada com emulsão não tem seu comportamento influenciado pela tensão confinante aplicada no ensaio de MR. Dessa forma, essa camada não se comporta como um material granular,

estando seu comportamento mais próximo ao de um solo cimentado. A Tabela 23 apresenta os valores médios de MR, obtidos para a tensão de confinamento de 0,1MPa.

Tabela 23 – Valores médios de MR para os diferentes tempos de cura

Tempo de cura (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
7	1981	227	11,44
28	2452	174	7,10
60	2550	189	7,40
90	2336	311	13,29

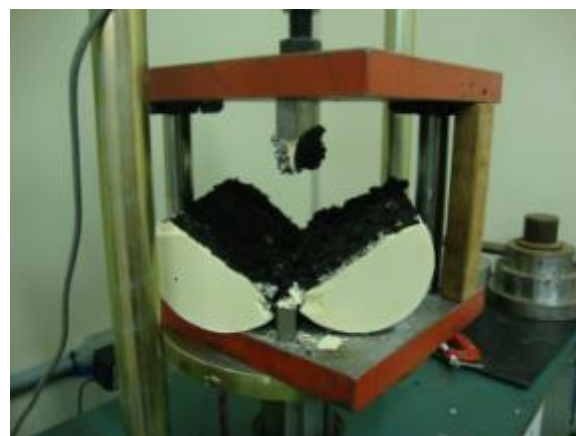
Os resultados apontam que o material reciclado apresenta um ganho de rigidez entre 7 e 28 dias de cura de aproximadamente 24% em relação aos valores de MR encontrados. Após esse período, o ganho de rigidez não é significativo e, aos 90 dias, o MR apresentou valores mais baixos. Porém essa redução nos valores de MR ao final da cura pode ser explicada pela variabilidade do próprio ensaio. No geral, o ganho de rigidez das misturas ocorreu primordialmente até os primeiros 28 dias de cura, atingindo então um patamar máximo após esse tempo.

Resistência à Tração (RT)

Metade dos CPs ensaiados em termos de MR foi submetida também ao ensaio de RT (Figura 132). Os resultados médios para cada tempo de cura encontram-se na Tabela 24. A Figura 133 apresenta os resultados individuais para cada amostra, com uma linha de tendência que mostra a influência do tempo de cura nos valores de RT.



(a)



(b)

Figura 132 – Ensaio de RT: (a) início do ensaio e (b) CP rompido após término do ensaio

Tabela 24 – Valores médios de RT para os diferentes tempos de cura

Tempo de cura (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
7	0,26	0,01	2,36
28	0,46	0,05	10,78
60	0,53	0,06	10,69
90	0,47	0,04	8,63

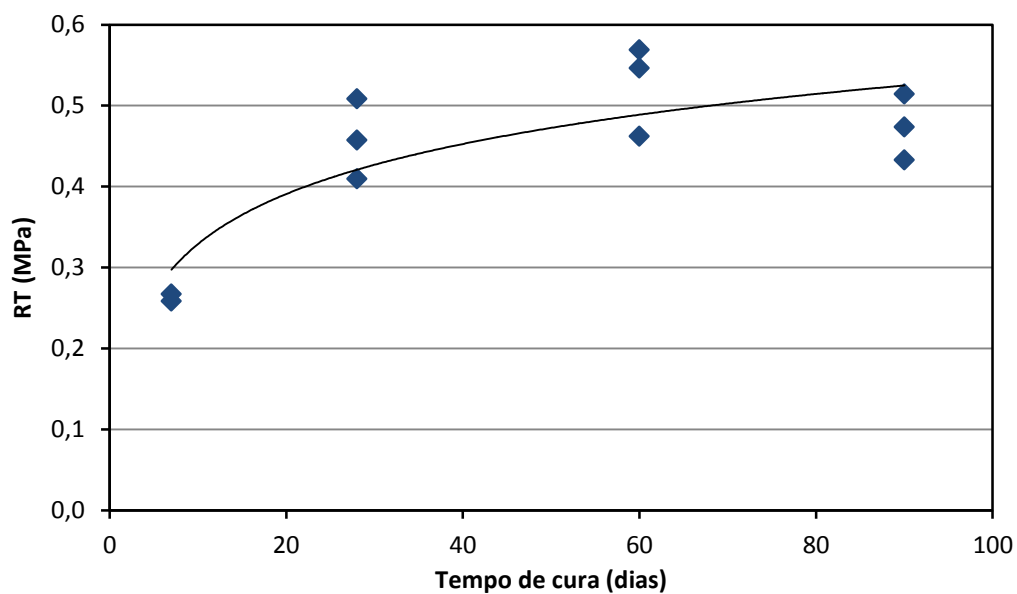


Figura 133 – RT vs. tempo de cura

Os resultados apresentados indicam que o valor de RT tende a aumentar até 60 dias de cura. O valor médio nesta idade de cura é quase o dobro daquele obtido para a primeira idade da cura avaliada (7 dias). Após o período de 60 dias, o valor médio de RT caiu, porém os valores encontrados para o tempo de 90 dias de cura são bem próximos àqueles de 60 dias, com as diferenças podendo ser explicadas pela própria variabilidade do ensaio e das amostras.

Em termos de variabilidade entre amostras dentro de um mesmo grupo de tempo de cura, os valores de CV foram considerados baixos, principalmente levando-se em consideração que o material reciclado, por natureza, já apresenta normalmente uma variação de seu comportamento mecânico. Alguns autores consideram que um CV abaixo de 20% pode ser considerado como satisfatório.

A Figura 134 apresenta a relação entre os valores de RT e os valores de massa específica seca e de teor de umidade final para cada um dos CPs ensaiados. Pode-se perceber que, em relação à massa específica das amostras, não existe uma tendência, uma vez que os valores dessa propriedade foram praticamente iguais, independente do tempo de cura das amostras, mostrando que esse parâmetro é função das características da mistura, independente do tempo de cura. Já a correlação entre o teor de umidade final e o valor de RT foi satisfatória, com valor de R^2 igual a 0,91. Isso significa que, no geral, quanto menos água está contida no CP, ou seja, quanto mais eficiente a cura, mais resistente será a mistura.

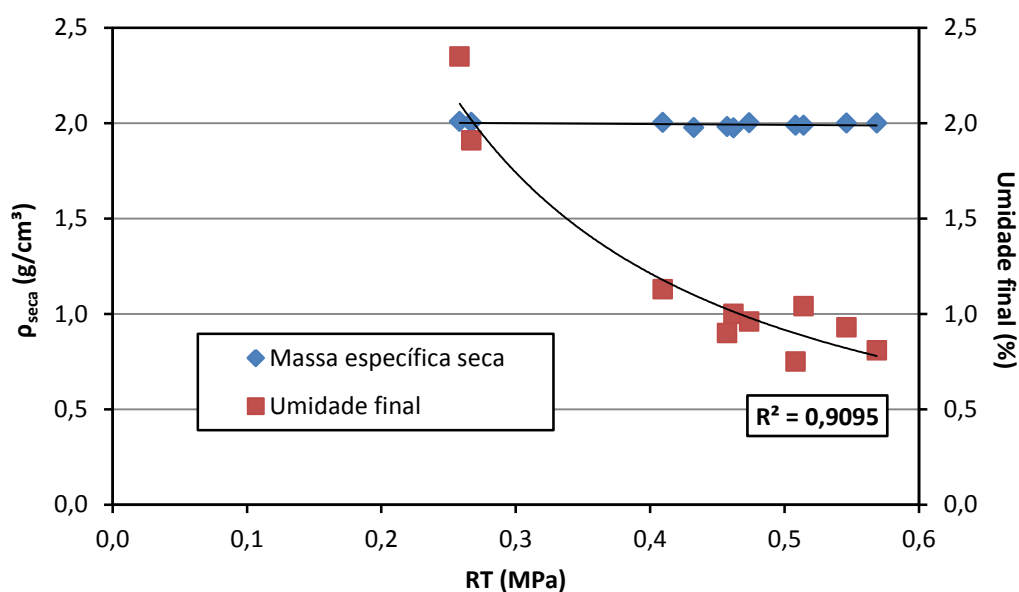


Figura 134 – RT vs. massa específica e umidade final

Resistência à Compressão Simples (RCS)

Em termos de RCS, foram ensaiados 3 CPs para cada tempo de cura. A Tabela 25 apresenta os resultados médios obtidos, e a Figura 135 mostra a evolução dessa propriedade ao longo das diversas idades de cura.

Tabela 25 – Valores médios de RCS para os diferentes tempos de cura

Tempo de cura (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
7	0,35	0,02	4,54
28	0,62	0,00	0,73
60	0,68	0,05	7,83
90	0,64	0,08	12,20

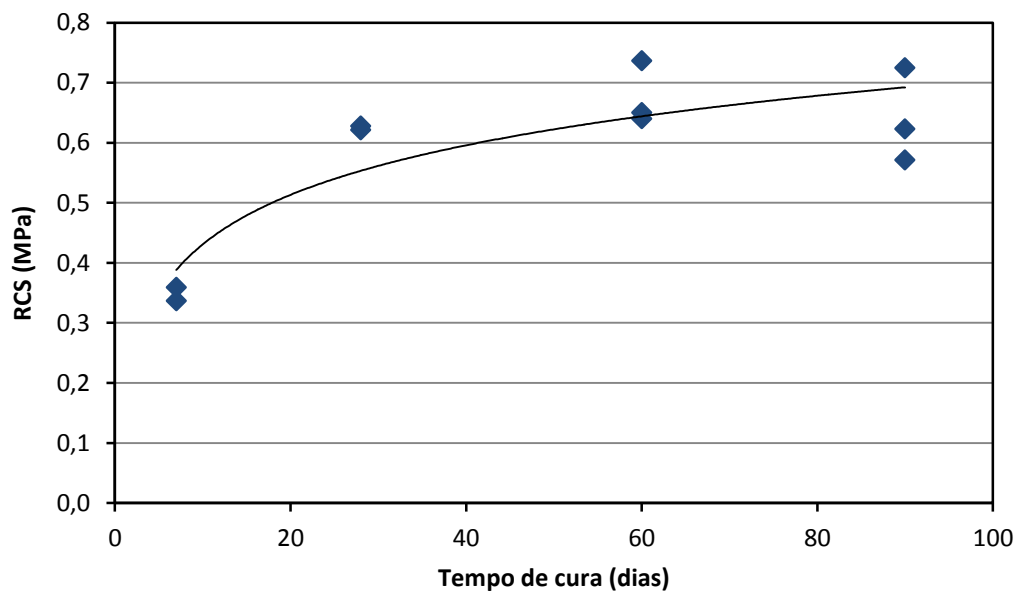


Figura 135 – RCS vs. tempo de cura

Os resultados obtidos no ensaio de RCS mostram a mesma tendência encontrada nos demais ensaios (MR e RT). Os valores tendem a crescer com o aumento no tempo de cura, chegando a quase dobrar de grandeza ao atingir os 60 dias. Após esse período, o valor médio de RCS sofre uma redução, porém o gráfico da evolução da propriedade ao longo do tempo indica que, na verdade, a resistência das misturas se estabiliza entre 60 e 90 dias de cura. A pequena diferença entre os valores se deve à variação do ensaio dentro de um mesmo grupo de amostras. O CV para todos os tempos de cura pode ser considerado como baixo por se tratar de misturas recicladas.

É importante ressaltar que esse ensaio é realizado a uma taxa de deformação de 1mm/s, de acordo com o que prevê a norma. Isso tende a gerar resultados mais baixos do que seriam encontrados caso o ensaio fosse realizado a uma taxa de 50mm/s, a mesma utilizada no ensaio de RT.

A Figura 136 apresenta a relação entre os valores de RCS e os valores de massa específica seca e de teor de umidade final para cada um dos CPs ensaiados. Em relação à massa específica das amostras, os valores foram praticamente iguais, independente do tempo de

cura das amostras. No entanto, existe uma correlação razoável entre o teor de umidade final dos CPs e seu valor de RT, com R^2 igual a 0,80. A água presente nos CPs influenciou essa propriedade mecânica das misturas, porém não tanto como no caso da propriedade de RT.

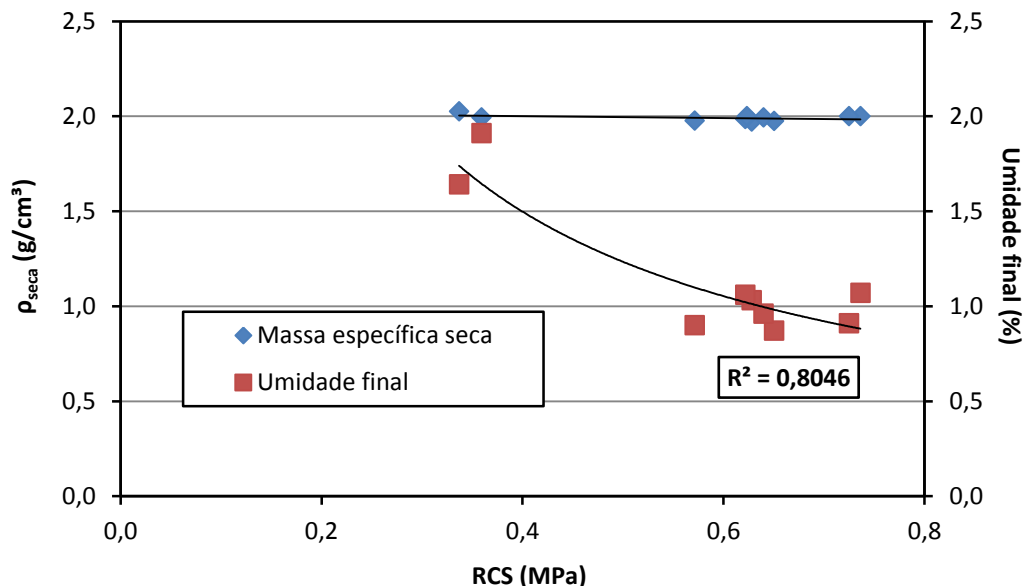


Figura 136 – RCS vs. massa específica e umidade final

8.2.5.7. Cura acelerada em laboratório

Com o objetivo de tentar acelerar o processo de cura das misturas recicladas com emulsão em laboratório, foi proposta uma técnica de cura acelerada para tentar prever as propriedades mecânicas das misturas em um tempo reduzido, a fim de auxiliar no projeto das misturas.

De acordo com Kekwick (2005), o manual da Associação de Asfalto da África do Sul recomenda dois métodos de cura para materiais reciclados com emulsão asfáltica: 24h a temperatura ambiente, no molde, seguidas de 48h a 40°C, para teores de umidade inferiores a 8%; ou 45hs a 60°C, para teores de umidade acima de 8%. Alternativamente, as misturas podem ser curadas por 7 dias a temperatura ambiente, quando há adição de cimento, ou por 28 dias também a temperatura ambiente, para misturas sem cimento (Kekwick, 2005). Bondietti et al. (2004) seguiram a recomendação de Sabita (1999) em seus estudos e

concluíram que o resultado dos ensaios de resistência à compressão simples para a cura acelerada diferem daqueles realizados a temperatura ambiente.

Kekwick (2005) procurou avaliar e recomendar métodos mais apropriados de cura acelerada em laboratório para misturas recicladas com emulsão asfáltica, trabalhando com baixo teor de cimento. Para melhor entender a relação entre esses processos em laboratório e a cura que ocorre em campo, este autor propôs a comparação entre a cura ambiente em campo durante 3, 7 e 28 dias e 14 e 52 semanas, analisada através de ensaios de deflexão, e a cura acelerada durante 1, 3 e 7 dias, analisada através de ensaios de rigidez. A cura a temperatura ambiente por 24h seguida de 48 horas a 40°C, em laboratório, foi a que mais se aproximou da condição de campo após 6 meses. Chelelgo (2010), em seu estudo com misturas recicladas com emulsão, mostrou que existe uma boa correlação entre as temperaturas de cura em laboratório e a cura em campo. O mesmo estudo também mostrou que, predominantemente, a temperatura do pavimento tem um maior efeito na taxa de ativação do ligante envelhecido do que na perda de água, e que regimes de cura em laboratório com altas temperaturas constantes envelhecem severamente as misturas recicladas a frio com emulsão asfáltica.

Nesta etapa da pesquisa, foram produzidos 27 CPs, todos com os mesmos teores de emulsão, água e cimento (3% 5,5% e 1%, respectivamente), porém com temperaturas e tempos de cura distintos. Para cada grupo de amostras, foram confeccionados 3 CPs:

- Temperatura de cura de 40°C – 1, 3 e 7 dias;
- Temperatura de cura de 60°C – 1, 3 e 7 dias;
- Temperatura de cura de 100°C – 1, 3 e 7 dias.

A Tabela 26 apresenta os valores médios de massa específica seca obtida para todos os CPs, de acordo com cada temperatura e tempo de cura, bem como os valores de desvio padrão e CV. A Figura 137 mostra os valores médios com as barras de erro, representadas pelos valores de desvio padrão para cada tempo de cura. Os resultados indicam que, independente da temperatura e do tempo de cura adotados, os CPs mantiveram quase que

os mesmos valores de massa específica seca, apesar de a massa específica a temperatura de 100°C ter sido levemente inferior em relação às demais temperaturas.

Tabela 26 – Valores de massa específica para as diferentes configurações de cura acelerada

Temperatura de cura (C°)	Tempo de cura (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
40	1	2,03	0,01	0,29
	3	2,02	0,01	0,39
	7	2,02	0,01	0,31
60	1	2,01	0,01	0,25
	3	2,03	0,00	0,24
	7	2,02	0,01	0,35
100	1	1,97	0,00	0,17
	3	1,99	0,00	0,23
	7	1,98	0,01	0,48

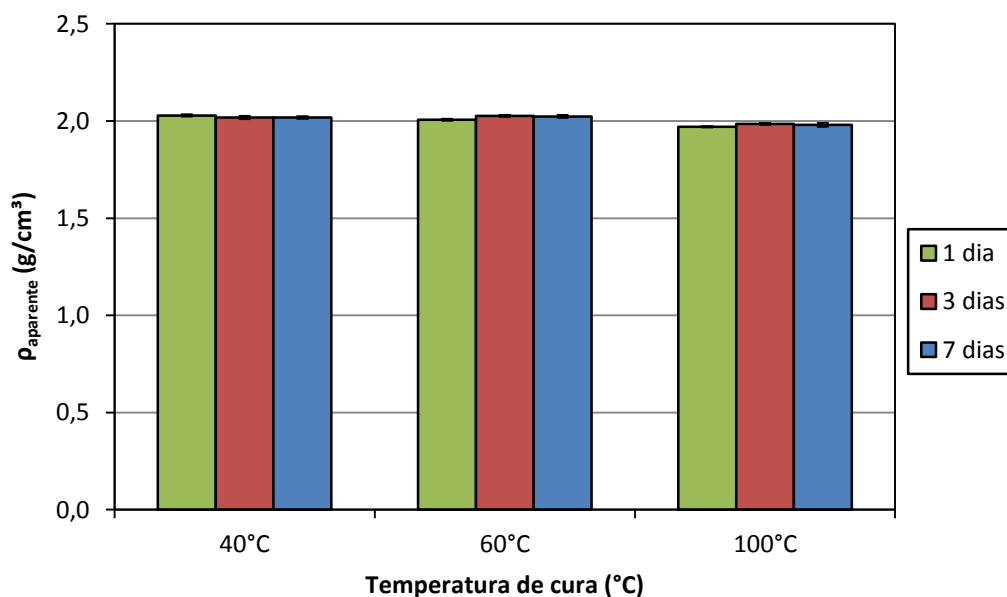


Figura 137 – Valores médios de massa específica seca em função do tempo e da temperatura de cura

Cada CP foi submetido ao ensaio de RT, realizado a 25°C – é importante ressaltar que após o período de cura nas diferentes temperaturas, todos os CPs foram levados novamente à

estufa à temperatura de 25°C até a estabilização. Os resultados médios encontram-se na Tabela 27. A Figura 138 ilustra esses resultados de uma forma mais ilustrativa, para efeito de comparação entre as diferentes temperaturas de cura. É mostrado ainda o valor médio de RT para as misturas que sofreram processo de cura a 25°C durante 7 dias.

Tabela 27 – Valores médios de RT para as diferentes configurações de cura acelerada

Temperatura de cura (C°)	Tempo de cura (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	CV (%)
40	1	0,23	0,01	5,34
	3	0,39	0,01	2,08
	7	0,54	0,04	6,95
60	1	0,49	0,02	4,68
	3	0,58	0,04	6,23
	7	0,59	0,03	4,38
100	1	0,40	0,02	4,01
	3	0,51	0,03	5,55
	7	0,59	0,02	3,35

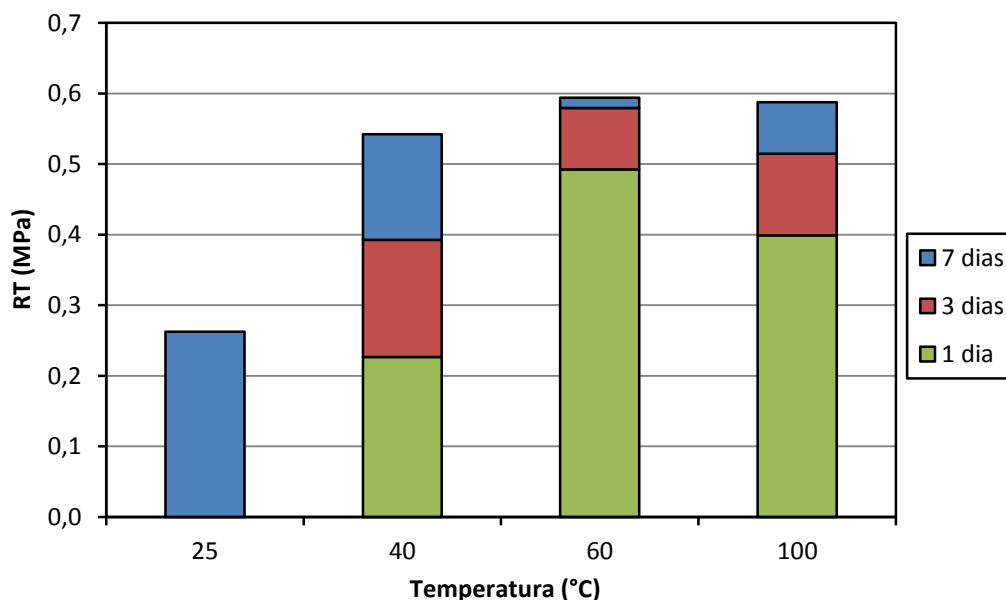


Figura 138 – Valores médios de massa específica seca em função do tempo e da temperatura de cura

Os resultados apresentados indicam que a cura em laboratório com temperaturas mais elevadas traz benefícios para o projeto de misturas recicladas com emulsão, uma vez que é capaz de fornecer resultados mecânicos mais elevados em menos tempo. À temperatura de 40°C, por exemplo, os CPs apresentaram, em apenas 1 dia de cura, valor médio de RT próximo àquele obtido para os CPs que foram curados a 25°C durante 7 dias.

O aumento no número de dias, mesmo que limitado a no máximo 7, melhora ainda mais a resistência das amostras. No caso do aumento da temperatura de cura, percebe-se que a temperatura de 60°C é aquela que fornece melhores resultados dentre as temperaturas estudadas, uma vez que forneceu os valores mais elevados em todos os tempos de cura, inclusive superiores àqueles obtidos para a temperatura de 100°C. Uma possível explicação para isso seria que essa temperatura extremamente elevada possa causar deterioração nas amostras, devido ao seu envelhecimento. Além disso, a temperatura de 100°C pode ter eliminado parte da água que seria utilizada na hidratação do cimento, impedindo então o ganho de resistência fornecido por esse material. A Figura 139 apresenta a evolução dos valores de RT das misturas recicladas ao longo do tempo de cura acelerada, para cada temperatura utilizada.

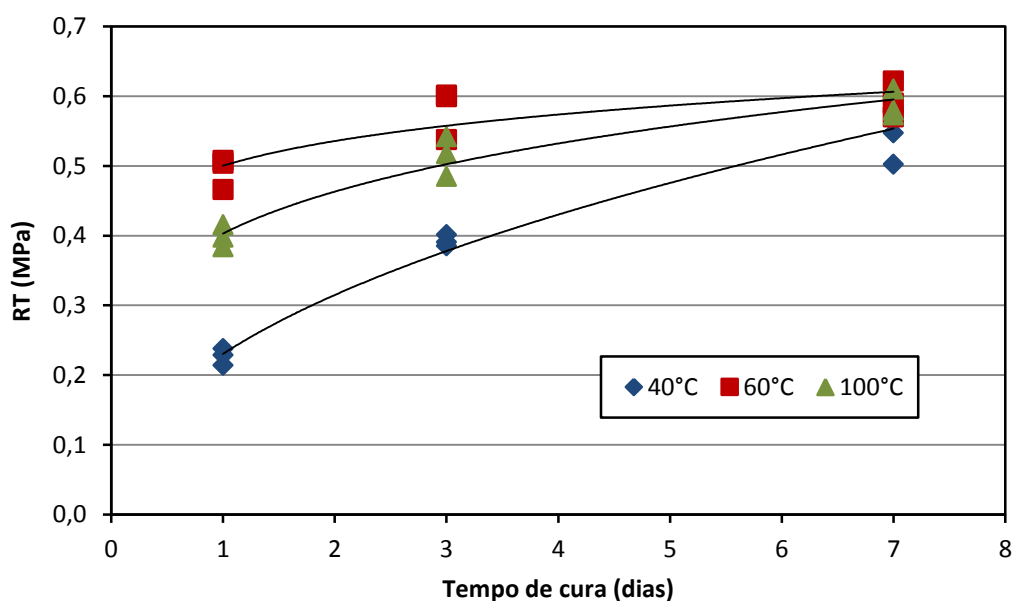


Figura 139 – RT vs. tempo de cura acelerada para cada temperatura

Os resultados mostram que, ao final de 7 dias de cura acelerada, as três temperaturas geraram misturas com valores de RT muito próximos. Isso significa que pode haver um limite máximo para o ganho de resistência dessas misturas. A temperatura de 60°C foi aquela que gerou misturas mais resistentes em todos os tempos de cura acelerada. Após apenas 1 dia, essa temperatura foi suficiente para fornecer às misturas um valor de RT de aproximadamente 0,5MPa, próximo àquele obtido para as misturas curadas à 40°C depois de 7 dias. A Figura 140 apresenta uma relação entre os valores de RT e valores de massa específica e de umidade final dos CPs. Percebe-se que existe uma tendência de aumento no valor de RT com o aumento na perda de água, porém essa relação não é tão boa devido às misturas curadas com temperaturas mais elevadas. Estas acabaram perdendo a mesma quantidade de água independente do tempo de cura, porém tiveram uma resistência mais elevada para os tempos maiores. Em relação à massa específica, novamente foi possível perceber que essa propriedade se manteve muito próxima independente da temperatura e do tempo de cura, não havendo uma correlação com a propriedade de RT.

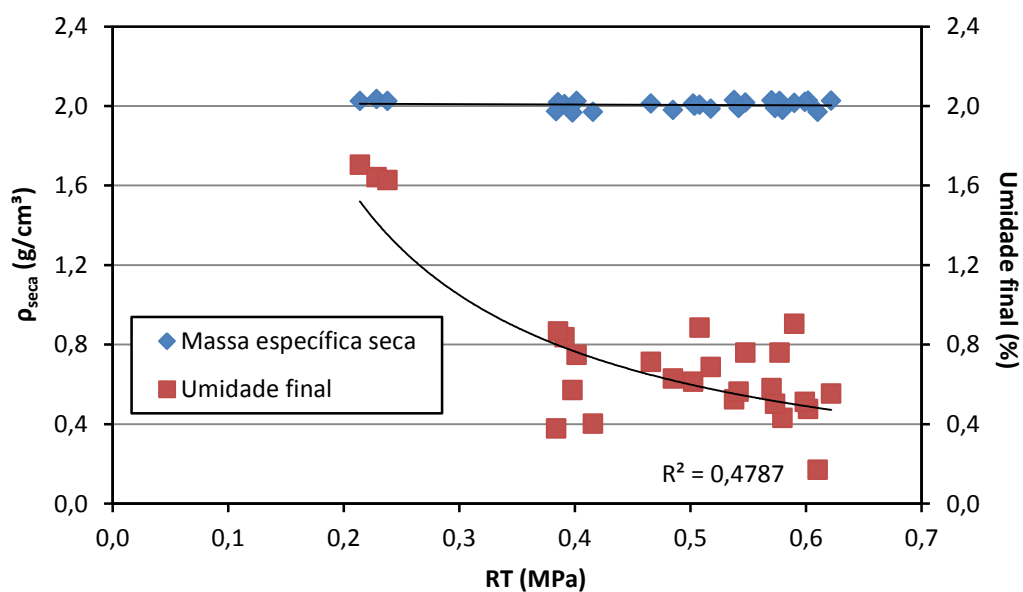


Figura 140 – RT vs. massa específica e umidade final

8.2.5.8. Cura convencional vs. cura acelerada

Como o objetivo principal da realização da cura acelerada era de tentar prever as propriedades mecânicas das misturas recicladas mais rapidamente, resolveu-se comparar os resultados obtidos com aqueles da cura convencional (a 25°C). A Figura 141 apresenta essa comparação.

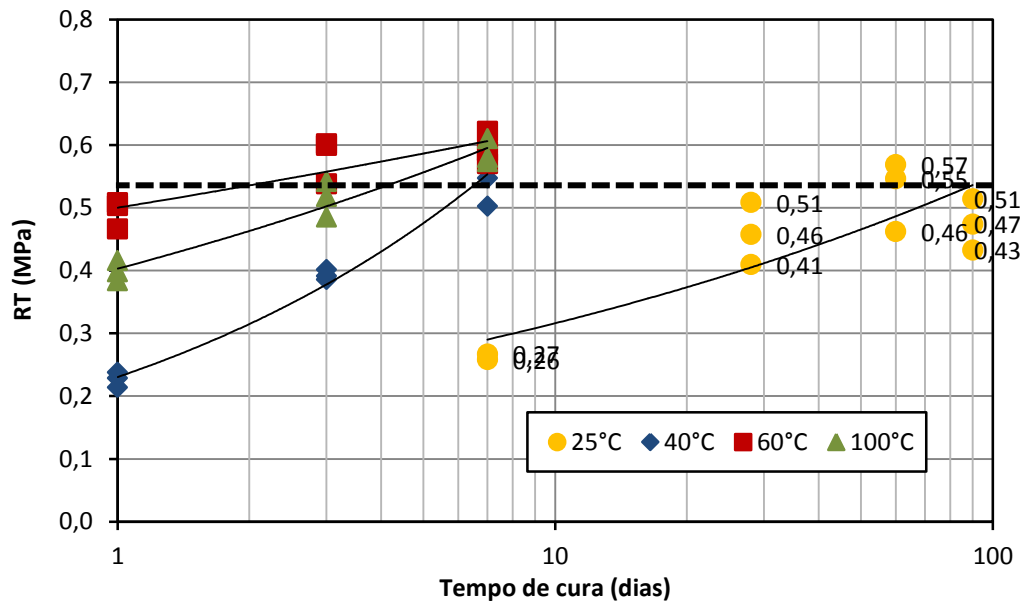


Figura 141 – Cura convencional vs. cura acelerada

O gráfico representado em escala semi-logarítmica permite verificar que os resultados de RT para a cura a 25°C atingem uma espécie de patamar, ou valor médio máximo após 28 dias de cura. Esse valor é, inclusive, menor do que aquele obtido para as outras temperaturas de cura em tempos consideravelmente menores. Os valores obtidos com a cura convencional a 25°C, após 60 ou 90 dias, foram obtidos rapidamente com a cura a 60°C após apenas um dia (conforme ilustrado pela linha tracejada no gráfico). Isso pode indicar que a metodologia de cura acelerada é um bom artifício para a concepção de projetos desse tipo de mistura reciclada.

8.2.5.9. Proctor vs. Marshall

A pesquisa envolvendo o estudo da mistura reciclada com emulsão foi realizada utilizando-se duas metodologias distintas de compactação e dosagem: através do compactador

Marshall e do compactador Proctor. As misturas que foram produzidas por ambos os métodos com os mesmos teores de emulsão asfáltica e cimento, ou seja, 3% e 1%, respectivamente, foram comparadas em termos de sua propriedade mecânica de RT. O tempo de cura também foi o mesmo para ambas as misturas (28 dias). As Figuras 142 e 143 apresentam esses resultados, para MR e RT, respectivamente. Os resultados mostram que tanto para o parâmetro de MR como para o de RT, a compactação Proctor gerou misturas com valores mais elevados. No caso do MR, isso pode ser explicado pelos diferentes métodos de ensaio adotados para as diferentes misturas (triaxial versus compressão diametral). É importante deixar claro ainda que as misturas diferem um pouco com relação à granulometria, conforme apresentado na Figura 87, o que pode ter aumentado a diferença entre os resultados. Os métodos de compactação distintos também são um fator a ser considerado

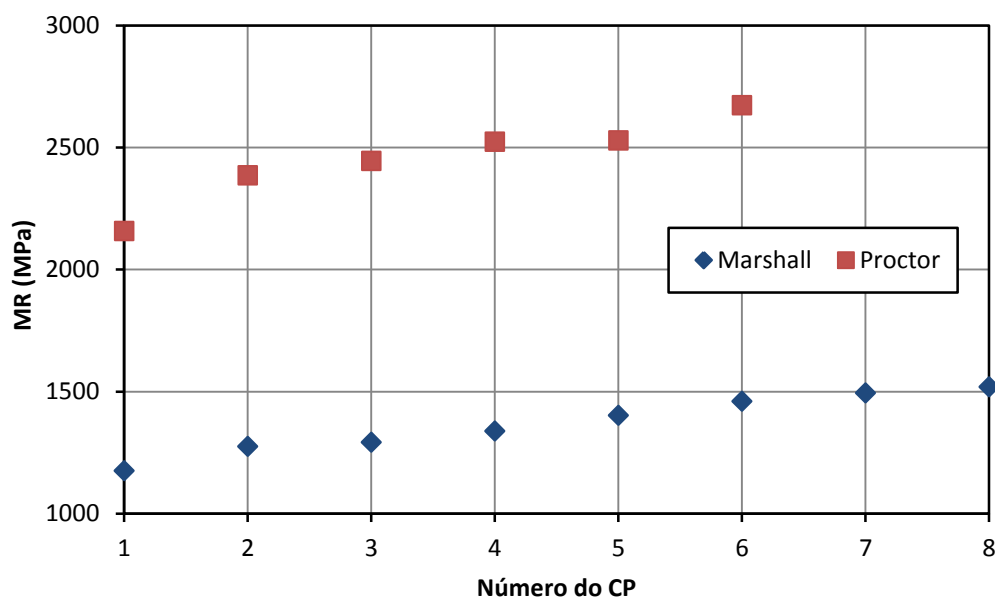


Figura 142 – MR (Marshall) vs. MR (Proctor)

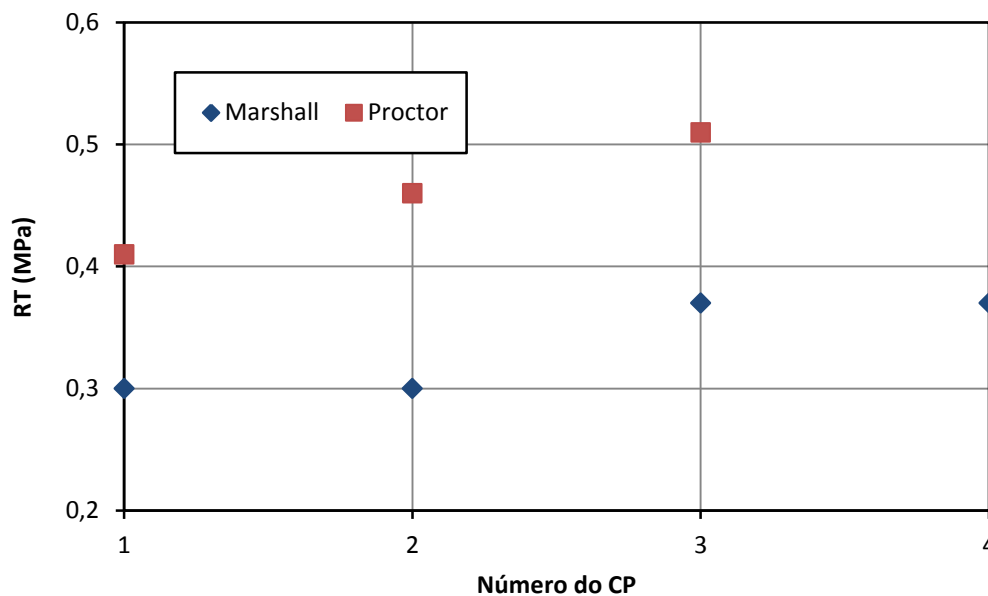


Figura 143 – RT (Marshall) vs. RT (Proctor)

9. MONITORAMENTO DO TRECHO EXPERIMENTAL

9.1. TRECHO EXPERIMENTAL

O trecho experimental foi monitorado quanto à evolução de suas condições superficiais e estruturais. Os resultados do monitoramento são apresentados nos itens que se seguem.

9.1.1. Condição superficial

Levantamento Visual Detalhado

Um levantamento visual foi realizado por técnicos a fim de se verificar possíveis defeitos na superfície do pavimento após o término de sua construção (Figura 144a). O levantamento segue uma metodologia específica onde os defeitos são sistematicamente anotados em uma ficha, caracterizando assim a evolução de defeitos superficiais e as áreas onde eventualmente exista a necessidade de intervenção funcional. Conforme se verifica pela Figura 144b, a condição superficial do pavimento era boa, não apresentando fissuração ou deformações plásticas. Vale ressaltar que a faixa I não passou por processo de restauração, pois não havia necessidade de intervenções estruturais; alguns segmentos na faixa I que apresentavam defeitos funcionais, receberam apenas reparos localizados no revestimento.



(a)



(b)

Figura 144 – (a) trecho experimental e (b) levantamento visual

Textura Superficial

A textura do revestimento de um pavimento é responsável pelo conforto do usuário, pela digiribilidade, pelo ruído, pela resistência ao rolamento, pela distância de frenagem e drenagem superficial. A *PIARC: World Road Association* (fórum internacional para a discussão de rodovias) classifica a textura segundo a distância entre dois picos ou depressões na superfície (Bernucci et al., 2008). No trecho experimental, foram avaliadas duas classes de textura:

- Microtextura: caracterizada pela relação de picos e vales de cada agregado e medida pelo ensaio de Pêndulo Britânico, que resulta no VRD (valor da resistência à derrapagem).
- Macrotextura: caracterizada pela relação entre picos e vales entre agregados e é medida pelo ensaio de Mancha de Areia, que resulta no HS (altura da mancha).

No ensaio de pêndulo britânico um braço pendular com a extremidade de borracha é atitado à superfície do pavimento molhado partindo de uma altura padrão (Figura 145). O valor de VRD é obtido através de uma correlação com a altura que o pêndulo atinge após perder energia no pavimento. De acordo com o DNIT (2006), uma superfície de pavimento deve ser classificada como mediantemente rugosa a rugosa para que tenha a mínima segurança necessária.



Figura 145 – Ensaio de microtextura (pêndulo britânico)

No ensaio de mancha de areia, uma quantidade conhecida de esferas de vidro é espalhada na superfície do pavimento. Partindo do volume de esferas e da área ocupada por elas, determina-se o valor de HS (Figura 146). DNIT (2006) sugere que a macrotextura superficial de um pavimento deve ser de média a grosseira. Os resultados dos ensaios de pêndulo britânico e mancha de areia são apresentados na Tabela 28. Nesse ponto da análise, os segmentos do trecho experimental não foram diferenciados, visto que todos possuíam a mesma camada de revestimento.

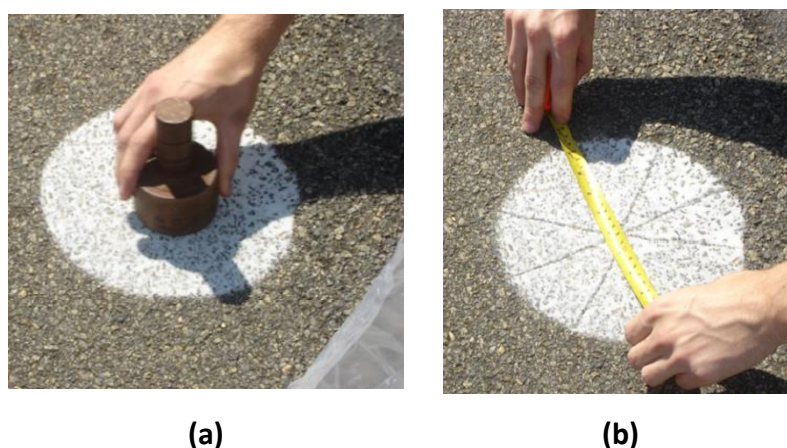


Figura 146 – Ensaio de mancha de areia: (a) realização do ensaio e (b) medição da circunferência

Tabela 28 – Resultados dos ensaios de micro e macrotextura

Estaca	VRD	HS
641+600	50,8	0,50
641 + 670	55,8	0,52
641 + 920	50,2	0,63
642 + 120	47,6	0,58
642 + 200	57,0	0,50

Segundo a classificação do DNIT, são superfícies mediamente rugosas aquelas com valor de VRD entre 47 e 54; superfícies rugosas são aquelas com valor de VRD entre 55 e 75. Sendo assim, todos os pontos testados seguem a recomendação do DNIT em relação à VRD. De acordo com a mesma classificação, a textura superficial média tem HS entre 0,40mm a 0,80mm e a grosseira entre 0,50mm a 1,20mm. Sendo assim, também para essa característica, todos os pontos medidos atenderam aos limites sugeridos.

9.1.2. Condição estrutural

O trecho experimental foi monitorado através de ensaios não destrutivos de deflexão. Os ensaios foram realizados através do uso do equipamento FWD, que aplica uma carga circular padrão no pavimento, enquanto há a medição do deslocamento vertical sofrido na superfície, em sete diferentes pontos, sendo um deles no ponto de aplicação da carga e os outros localizados a distâncias padronizadas. Este ensaio fornece as bacias deflectométricas do pavimento. Ao todo, foram realizados três levantamentos deflectométricos ao longo dos últimos três anos: o primeiro em agosto de 2011; o segundo em setembro de 2012; e o terceiro em março de 2013. Os resultados obtidos foram separados para cada idade do uso do FWD.

Primeiro levantamento

Os dados das bacias deflectométricas do primeiro levantamento realizado no trecho experimental encontram-se na Figura 147. A partir dos resultados obtidos, foi feita uma retroanálise, através de software computacional, para a obtenção dos valores de MR de

cada camada que compõe a estrutura do pavimento, fazendo ainda uma comparação com os valores obtidos para essa propriedade em ensaios laboratoriais.

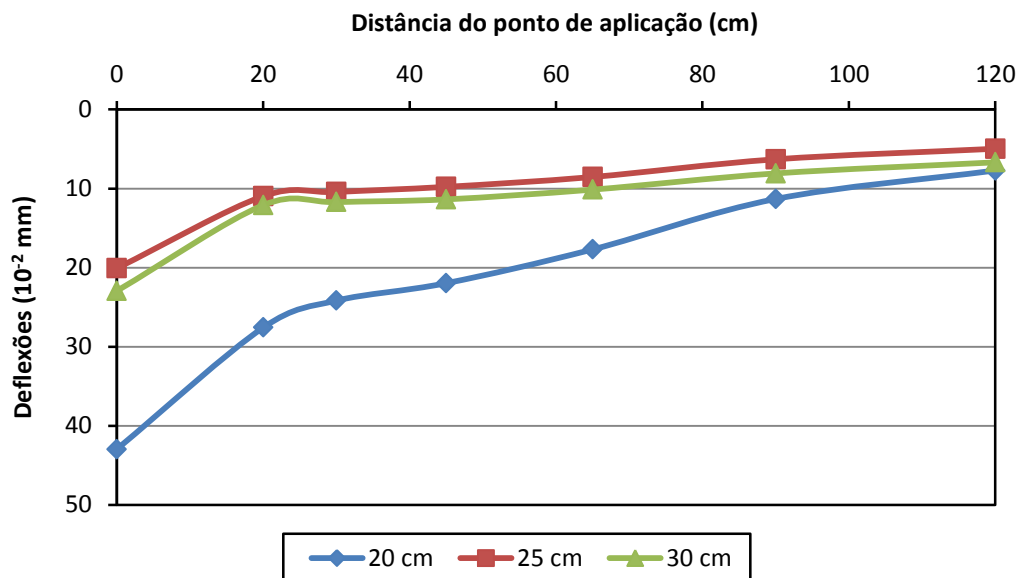


Figura 147 – Resultados de Ensaio FWD

Com base em ensaios de laboratório nos CPs de concreto asfáltico, verificou-se que a média de MR da camada de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) em pista é 4.088MPa. As misturas recicladas também foram previamente ensaiadas em laboratório, de forma que o valor estabelecido para a mistura reciclada com emulsão foi de 1646 MPa e para a mistura reciclada com cimento 5273 MPa. Os valores de MR obtidos para cada camada um dos três segmentos do trecho experimental são apresentados nas Tabelas 29 a 31. As Figuras 148 a 150 apresentam as aproximações das bacias de deflexão obtidas através da retroanálise para os segmentos do trecho experimental.

Tabela 29 - Resultados de MR por Retroanálise (20cm)

Camada	MR por Retroanálise (MPa)	MR por Ensaios (MPa)
CBUQ	3000	4088
Reciclado com emulsão	900	1646
Reciclado com cimento	3800	5273
Subleito	90	-

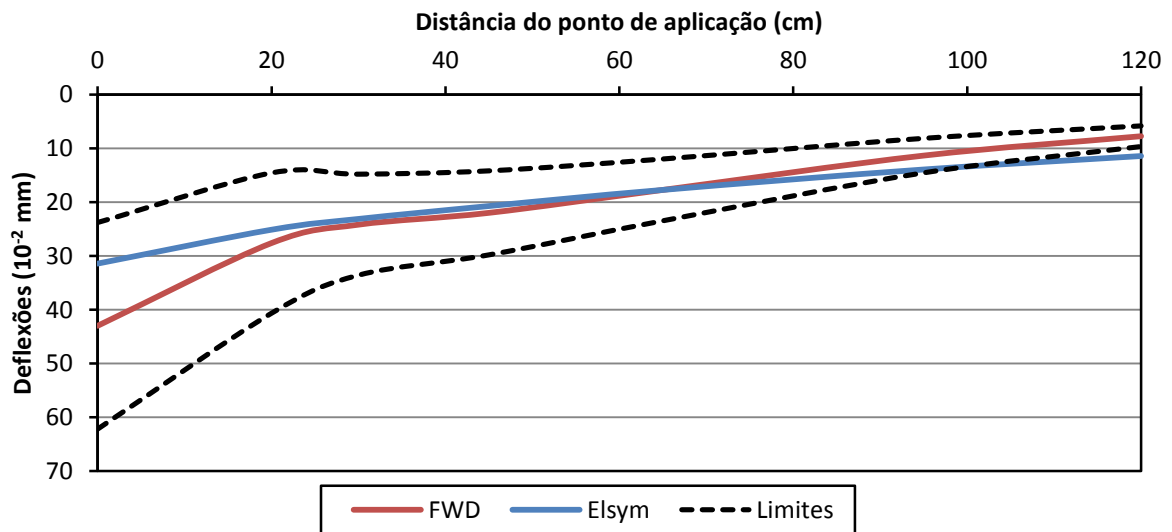


Figura 148 – Aproximação da bacia de deflexões obtida por retroanálise (20 cm)

Verificou-se grande variação entre os resultados obtidos por retroanálise em comparação com os obtidos nos ensaios laboratoriais. Isso deve-se ao fato da maior variabilidade nas leituras do FWD para esse trecho. Usualmente adota-se como limites para a retroanálise o desvio padrão multiplicado por 3. Ao se utilizar cálculos com modelo elástico linear, como o software Elsym 5, para a retroanálise de bacias médias com alto desvio padrão, perde-se a confiabilidade nos resultados.

Tabela 30 - Resultados de MR por Retroanálise (25cm)

Camada	MR por Retroanálise (MPa)	MR por Ensaios (MPa)
CBUQ	4000	4088
Reciclado com emulsão	1300	1646
Reciclado com cimento	6000	5273
Subleito	150	-

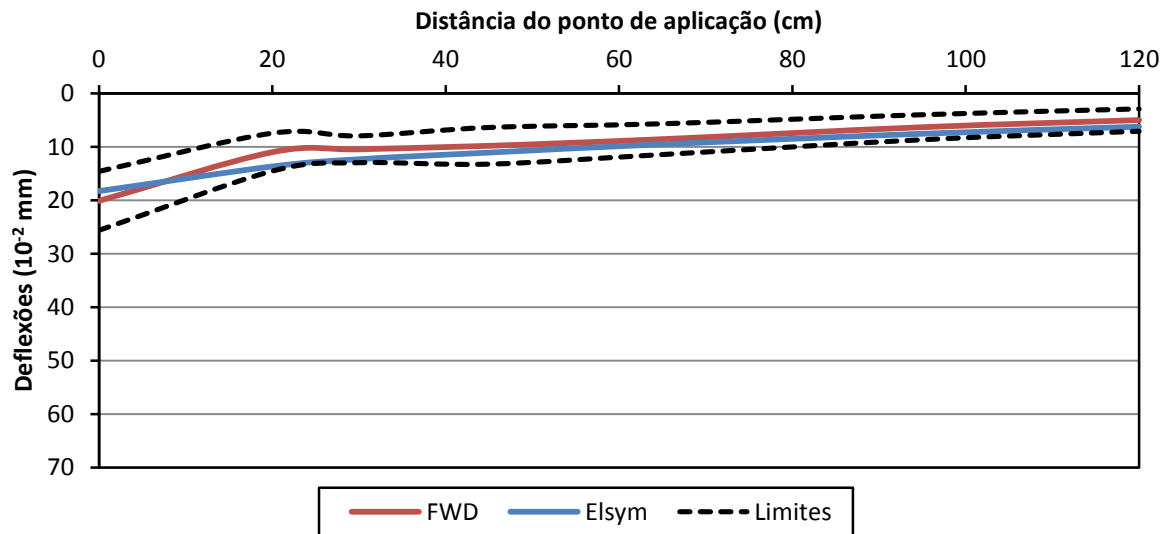


Figura 149 – Aproximação da bacia de deflexões obtida por retroanálise (25 cm)

Para o trecho com 25cm de reciclado com cimento, verificou-se os resultados obtidos por retroanálise em comparação aos obtidos por ensaios apresentaram boa correlação. Verifica-se que os desvios padrão obtidos nesse trecho foram muito inferiores aos obtidos no trecho com 20cm de camada cimentada fazendo assim com que o cálculo por meio de software seja mais confiável.

Tabela 31 - Resultados de MR por retroanálise (30cm)

Camada	MR por Retroanálise (MPa)	MR por Ensaios (MPa)
CBUQ	3750	4088
Reciclado com emulsão	1250	1646
Reciclado com cimento	5500	5273
Subleito	130	-

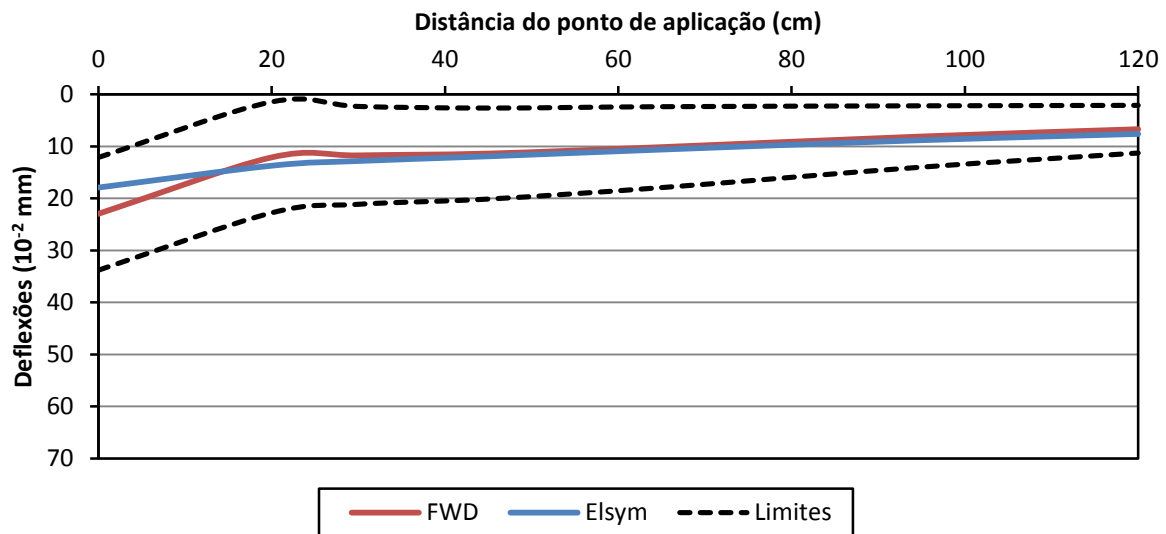


Figura 150 – Aproximação da bacia de deflexões obtida por retroanálise (30 cm)

Para o segmento com 30cm de reciclado com cimento, verificou-se novamente boa correlação entre os resultados. Dessa maneira pode-se afirmar que os resultados obtidos nas análises para os trechos com 25 e 30cm de camada reciclada com cimento apresentaram resultados compatíveis com o previsto em laboratório.

Segundo levantamento

O segundo levantamento deflectométrico realizado no trecho experimental aconteceu um ano após a abertura do pavimento ao tráfego. Neste segundo levantamento deflectométrico, foram levantadas 25 bacias para cada segmento de 250m do trecho experimental, proporcionando uma melhor avaliação dos dados e permitindo uma melhor análise da variabilidade dos mesmos.

Verifica-se através da Figura 151 que o segmento com 20cm de camada reciclada com cimento continua apresentado elevada dispersão nos resultados (desvio padrão de $10,0 \times 10^{-2}$ mm), indicando elevada variação nas condições estruturais, corroborando os resultados obtidos no primeiro levantamento.

A tendência de resultados para os demais segmentos também se manteve. Os trechos de 25cm (Figura 152) e de 30cm (Figura 153) de camada cimentada apresentaram baixa dispersão de resultados, com desvios padrão nas deflexões máximas de $1,0 \times 10^{-2}$ mm e $1,5 \times 10^{-2}$ mm, respectivamente. Além disso, suas deflexões máximas mantiveram-se semelhantes entre si e inferiores às do segmento de 20cm de camada cimentada.

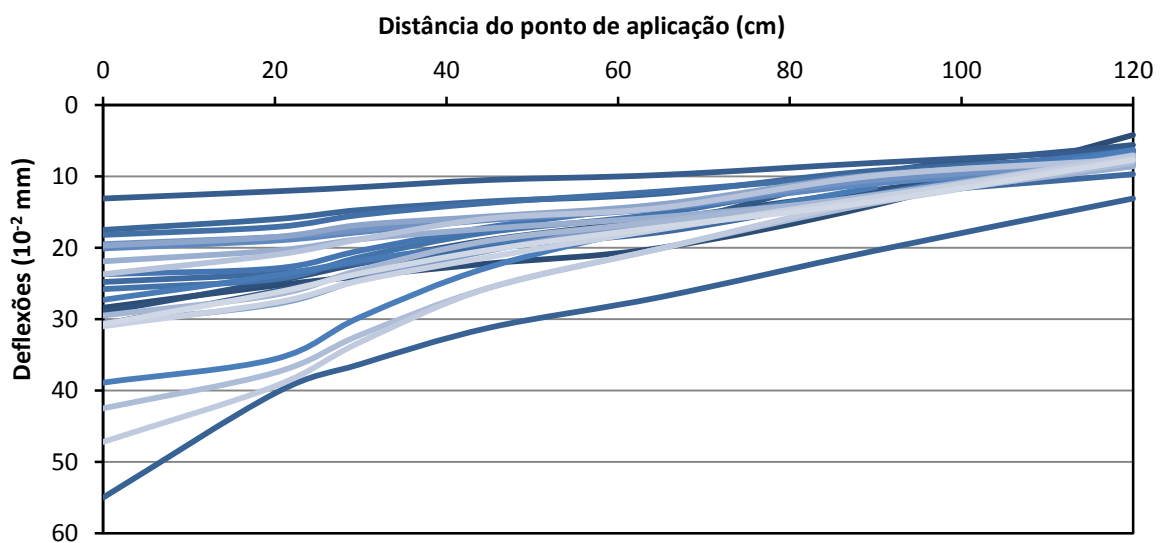


Figura 151 – Segundo levantamento deflectométrico (segmento de 20cm)

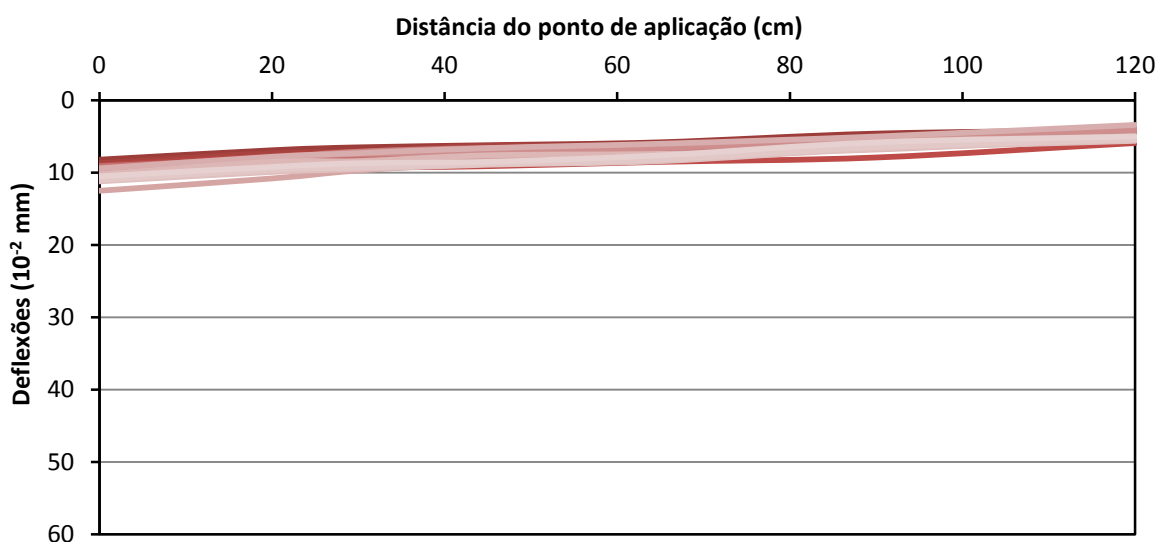


Figura 152 – Segundo levantamento deflectométrico (segmento de 25cm)

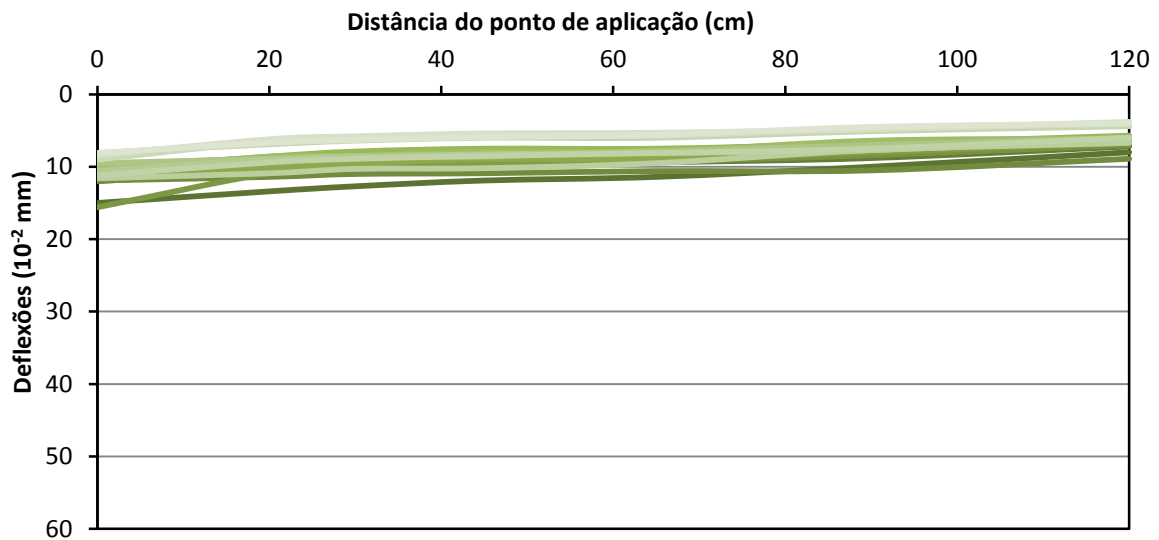


Figura 153 – Segundo levantamento deflectométrico (segmento de 30cm)

Para comparação entre os resultados obtidos dos dois levantamentos, os resultados médios são apresentados na Figura 154. É possível verificar que em todos os casos houve diminuição das deflexões, indicando que o pavimento com um ano ainda não apresenta danos estruturais, principalmente na camada reciclada com cimento, já que ela é a principal responsável pela resposta estrutural desse pavimento, devido a sua rigidez e espessura superiores.

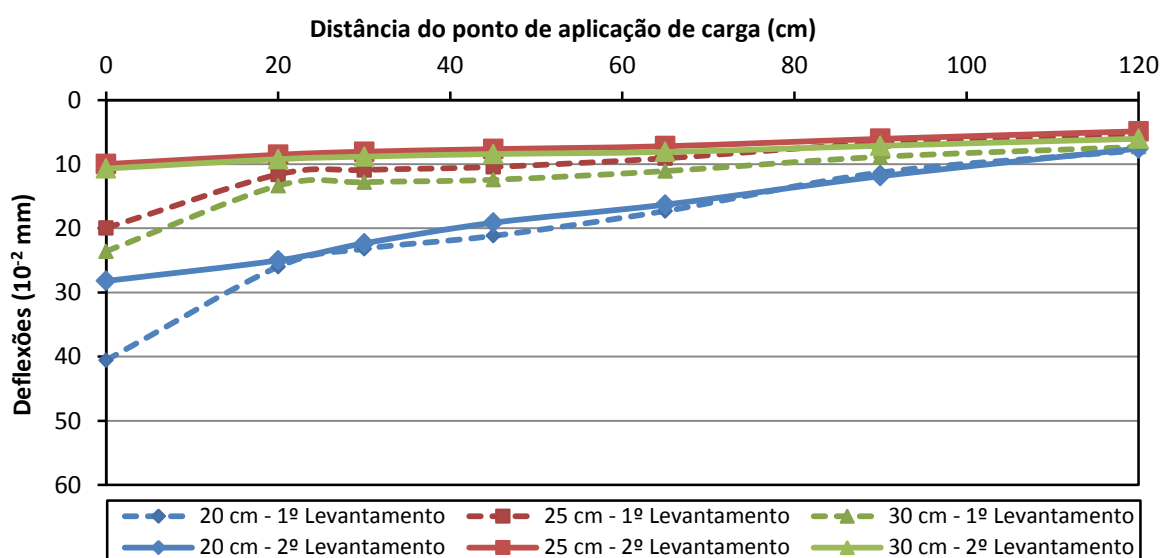


Figura 154 – Bacias de deflexão médias (primeiro e segundo levantamentos)

A diminuição das deflexões pode ser explicada também pelas condições de saturação do subleito e demais camadas no primeiro levantamento. De acordo com dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o período do primeiro levantamento de deflexões (agosto de 2011) foi particularmente chuvoso naquela região, com médias de 10mm de precipitação diária. Já durante o segundo levantamento de deflexões (setembro de 2012) a região se encontrava em período de seca com precipitações médias diárias de 0mm.

Outro fato a se ressaltar é a mudança no formato das bacias de deflexão. Nota-se que no primeiro levantamento havia um acúmulo de deformações na região do ponto de aplicação da carga, comportamento característico de um pavimento flexível. No segundo levantamento, o formato da bacia é mais semelhante ao formato esperado para o comportamento de um pavimento rígido, sendo um indicativo do enrijecimento da estrutura do pavimento devido à consolidação dos materiais, condições climáticas favoráveis e completa cura da camada cimentada.

Terceiro levantamento

As médias dos resultados obtidos com o terceiro levantamento para cada um dos segmentos encontram-se ilustrados na Figura 155.

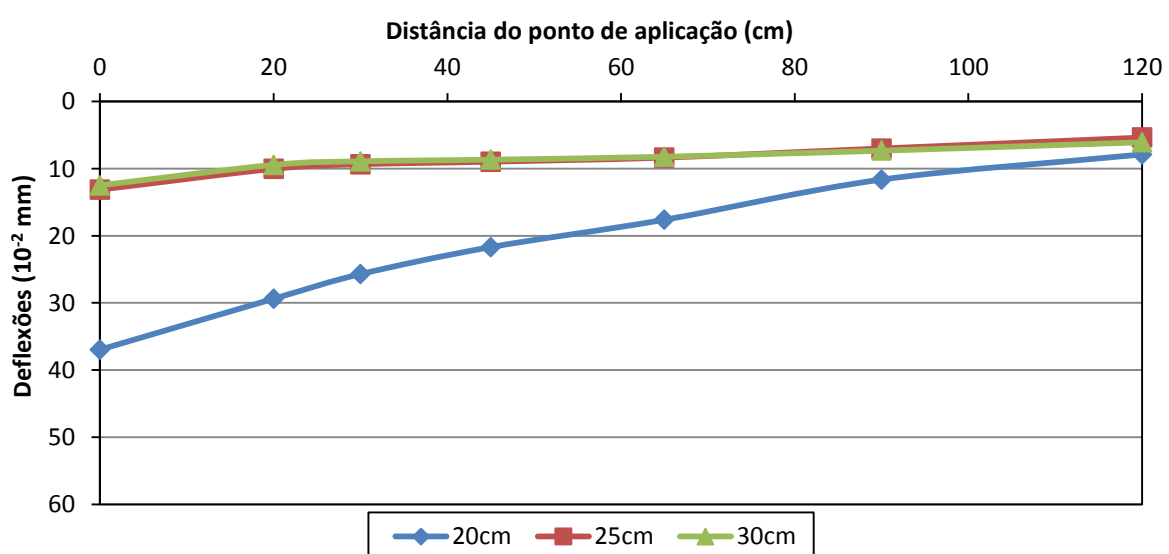


Figura 155 – Bacias deflectométricas (terceiro levantamento)

Com os dados obtidos através do FWD, foi realizado um procedimento de retroanálise, que consiste em utilizar os resultados das bacias de deflexões para calcular os MRs das várias camadas do pavimento. Os dados de bacias de deflexão utilizados na retroanálise são os apresentados acima (bacias médias). Os valores finais obtidos para os diferentes segmentos do trecho experimental (20, 25 e 30cm) encontram-se na Tabela 32, enquanto que as Figuras 156 a 158 apresentam as aproximações das bacias de deflexões obtidas através da retroanálise.

Tabela 32 – Resultados de MR através da retroanálise

Camada	MR por retroanálise (MPa)		
	20cm de reciclado com cimento	25cm de reciclado com cimento	30cm de reciclado com cimento
CBUQ	3.300	4.080	5.820
Reciclado com emulsão	1.300	1.400	2.100
Reciclado com cimento	2.750	15.000	12.300
Subleito	84	175	160

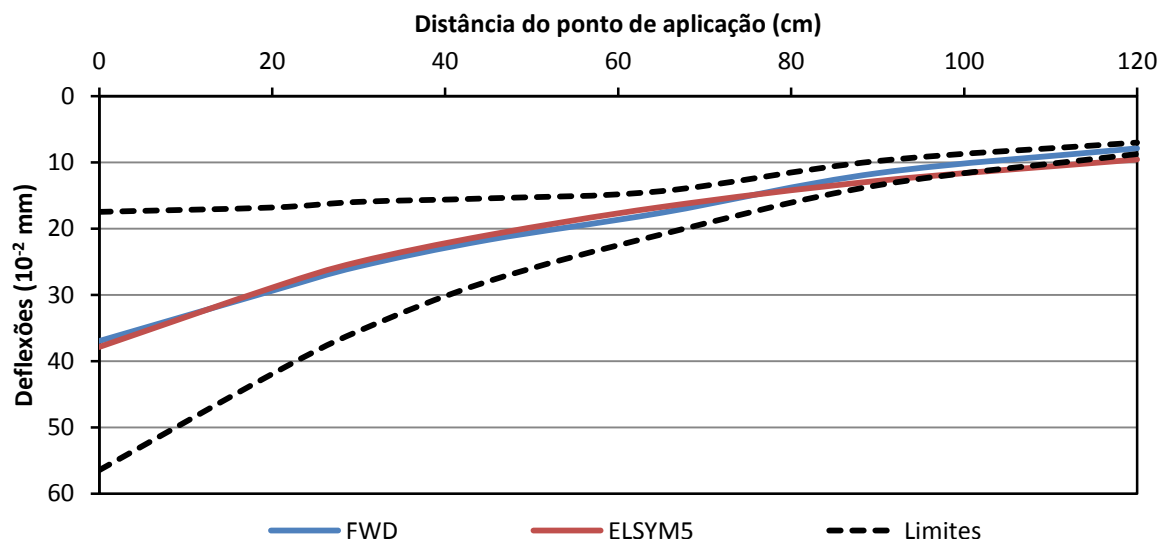


Figura 156 – Aproximação da bacia deflectométrica obtida por retroanálise (20cm)

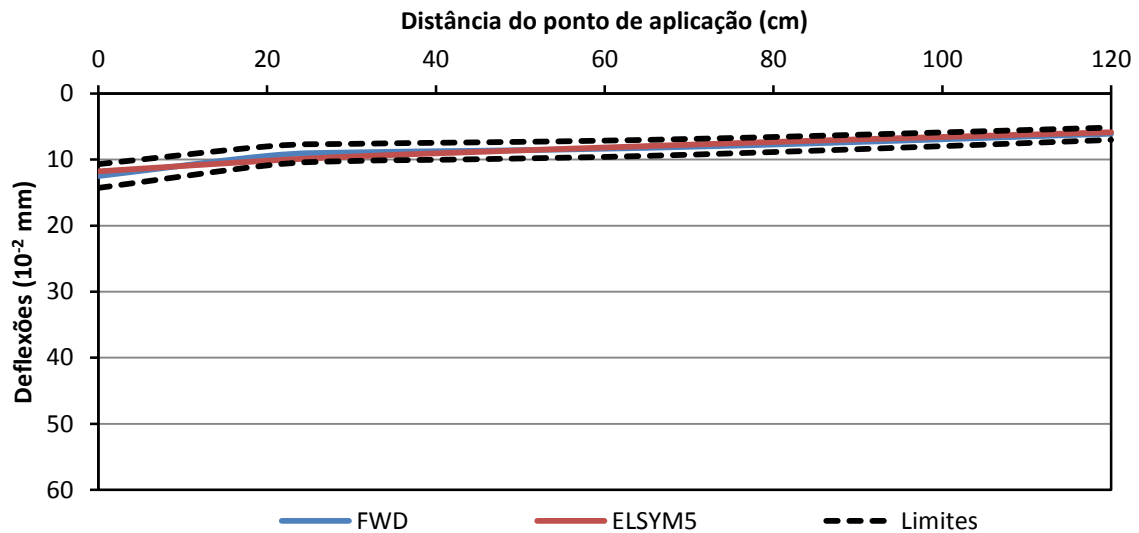


Figura 157 – Aproximação da bacia deflectométrica obtida por retroanálise (25cm)

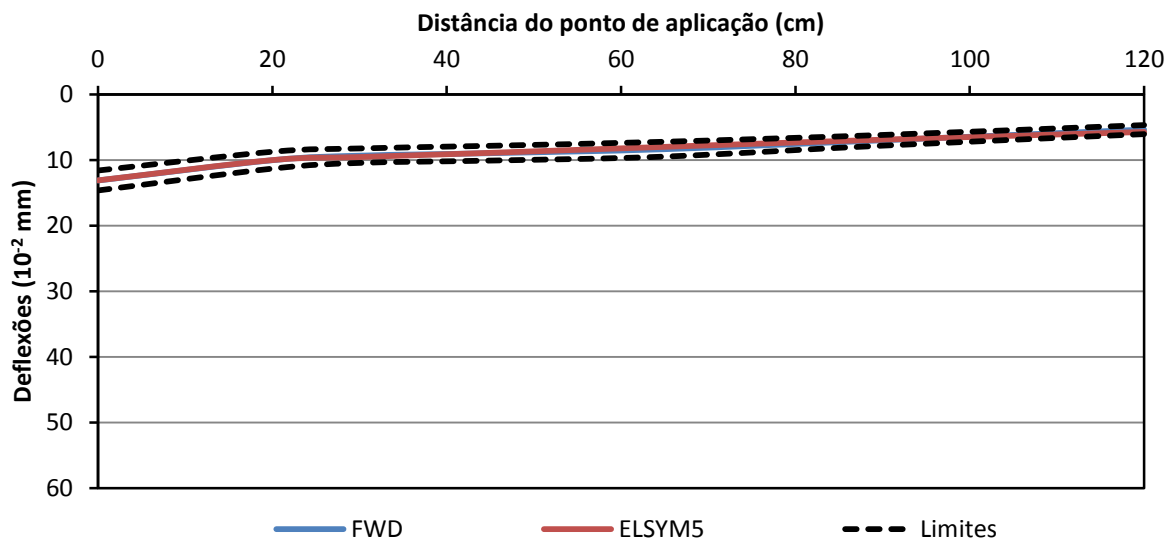


Figura 158 – Aproximação da bacia deflectométrica obtida por retroanálise (30cm)

Novamente, verificou-se que houve uma grande variação dos resultados obtidos através do FWD para o segmento de 20cm do trecho experimental, uma vez que os limites adotados para a variabilidade do ensaio foram amplos em relação às médias obtidas, em especial para o ponto de aplicação da carga. Para os segmentos de 25 e 30cm de camada cimentada do trecho experimental, é possível perceber que não houve tanta variação nos resultados obtidos através dos ensaios, já que os limites estão bem próximos às curvas das bacias.

Até o momento, três levantamentos foram realizados no trecho, entre os anos de 2011 e 2013. Os resultados das bacias médias obtidas através dos levantamentos para cada segmento em cada ano são apresentados nas Figuras 159 a 161.

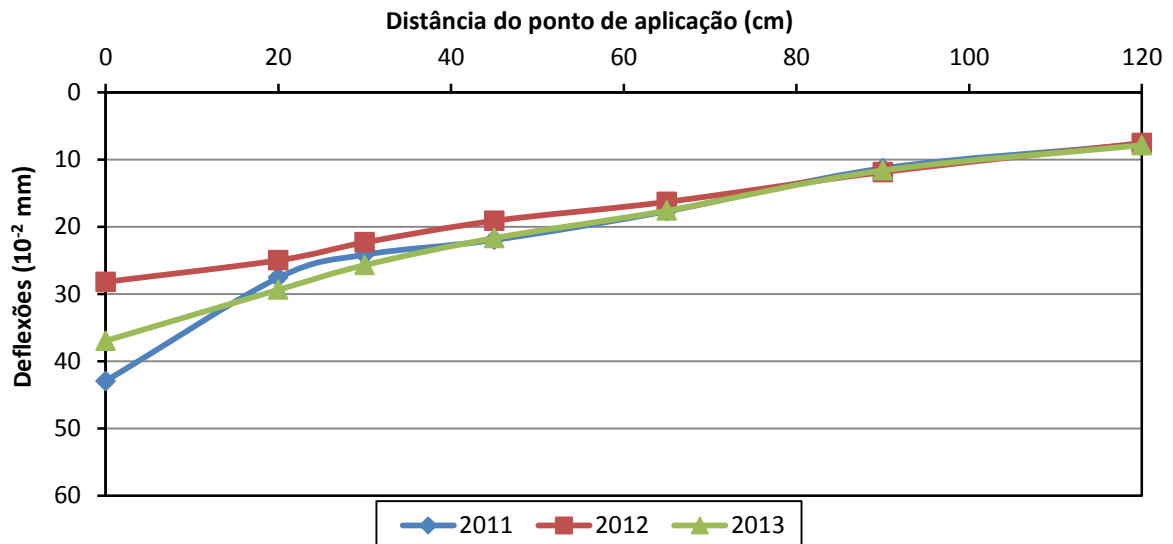


Figura 159 – Bacias defletoométricas (20cm de reciclado com cimento)

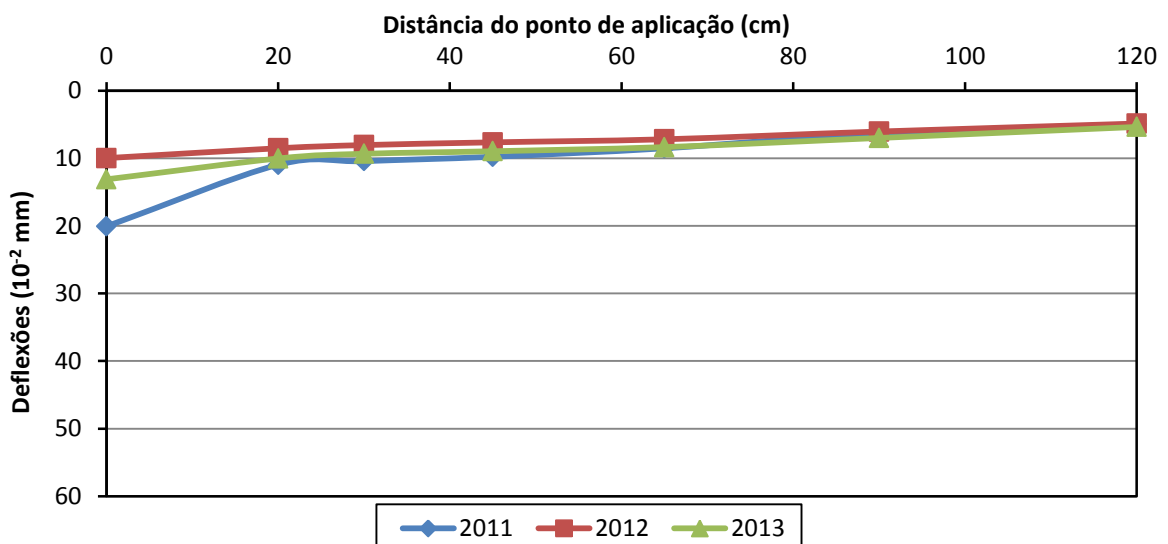


Figura 160 – Bacias defletoométricas (25cm de reciclado com cimento)

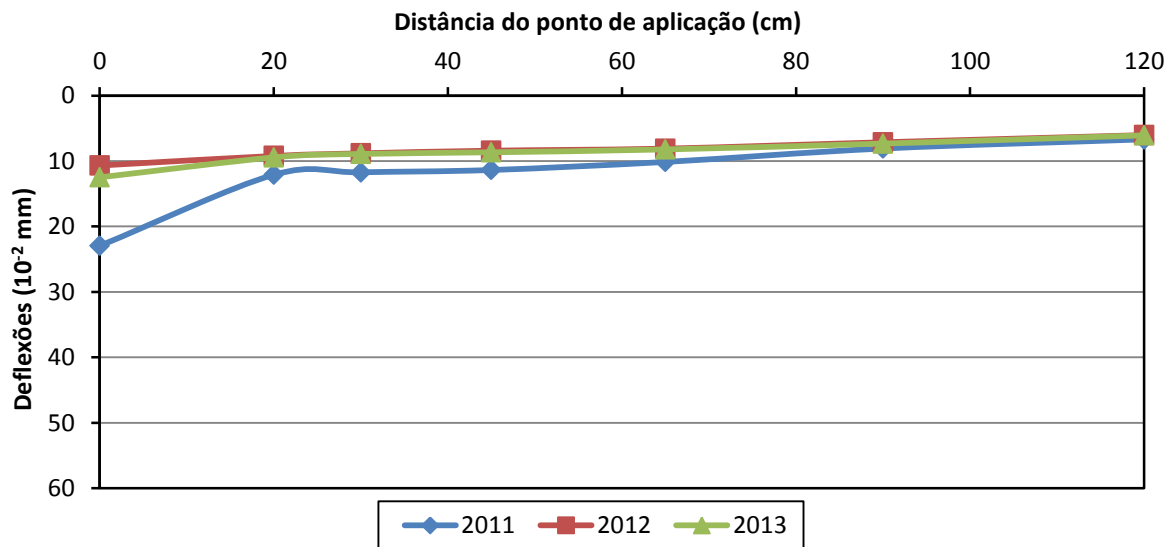


Figura 161 – Bacias deflectométricas (30cm de reciclado com cimento)

É possível perceber que, para os três diferentes segmentos do trecho experimental, a tendência em relação ao formato das bacias em função dos anos se deu, em geral, da mesma maneira. No ponto de aplicação da carga de ensaio, a profundidade das bacias foi maior no primeiro levantamento realizado (2011), e menor no segundo levantamento (2012). Nas diversas distâncias em relação ao ponto de aplicação, as bacias deflectométricas ficaram muito próximas para os dois últimos levantamentos, especialmente para as estruturas que possuem 25 e 30cm de reciclado com cimento. É importante ressaltar que para qualquer um dos casos avaliados, a deflexão se mostrou inferior ao limite estabelecido no PER (Programa de Exploração de Rodovias), que é de 50×10^{-2} mm. A Figura 162 apresenta uma ilustração dos segmentos do trecho experimental da forma como se encontram em campo atualmente. As fotos foram tiradas no fim do ano de 2013.



(a)



(b)



(c)

**Figura 162 – Ilustração da superfície dos três segmentos avaliados no trecho experimental
(a) 20cm, (b) 30cm e (c) 25cm**

Foi realizado também o acompanhamento do trecho experimental por meio da extração de CPs das duas camadas recicladas. Essas amostras foram levadas ao laboratório, onde foram ensaiados para a verificação das características de rigidez e resistência obtidas em campo.

Para a retirada dos CPs do material reciclado com emulsão e material reciclado com cimento, a camada de CBUQ precisou ser removida, a fim de expor as camadas subjacentes. Em seguida, os CPs foram broqueados com uma extratora que corta a camada de pavimento até a profundidade de interesse. Após a retirada dos CPs, a janela aberta foi fechada e as camadas dos CPs separadas e conduzidas ao laboratório. A Figura 163 ilustra algumas etapas desse processo. Nos itens a seguir são apresentados os resultados de laboratório realizados com as amostras extraídas de campo.

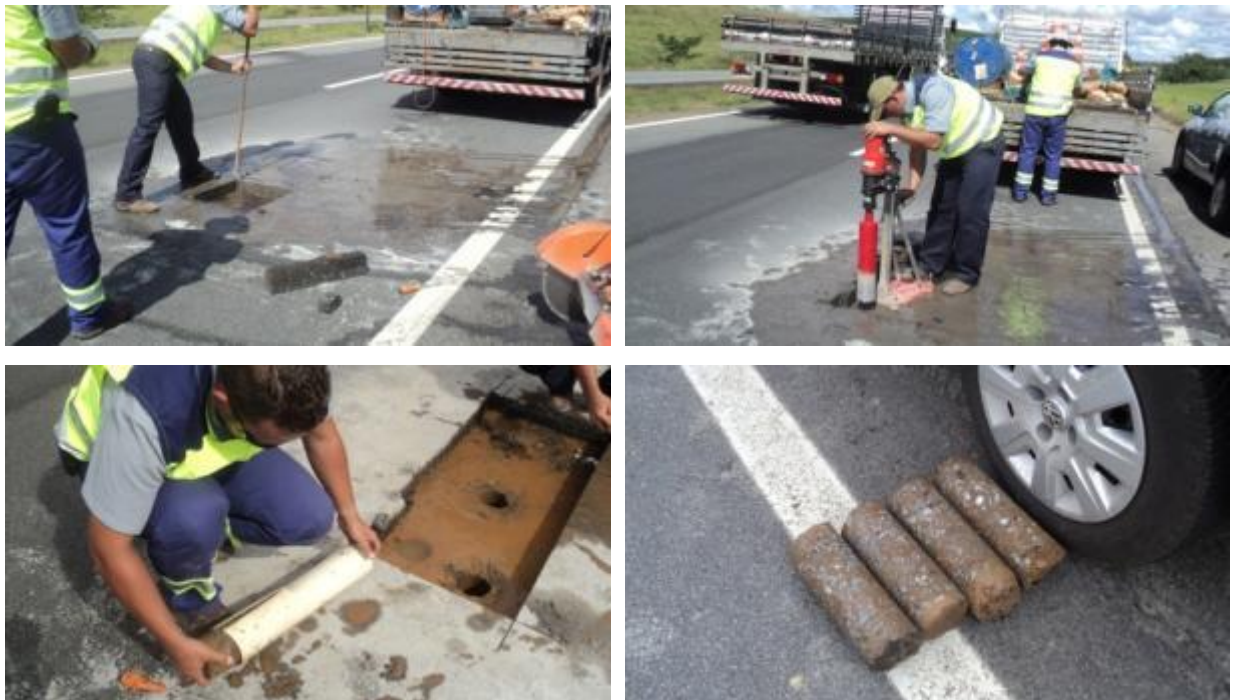


Figura 163 – Extração dos CPs da pista

9.2. RECICLADO COM CIMENTO

Os CPs das três camadas recicladas com cimento (20, 25 e 30cm) foram faceados de forma a obter amostras com 20cm de altura (atendendo aos padrões dos equipamentos de ensaio). Os CPs com espessura superior a 20cm foram cortados, selecionando-se para os ensaios a parte inferior da camada, com o objetivo de ensaiar a região da camada onde poderiam ser identificados problemas de compactação.

Três grupos de amostras foram extraídos do campo para a realização dos ensaios em laboratório. O primeiro grupo de amostras foi obtido 7 meses após a construção do trecho experimental e foi ensaiado apenas em termos de rigidez, através dos ensaios de ultrassom, MR e ME. O segundo e o terceiro grupos de amostras, coletados respectivamente, 8 meses e 2 anos após a construção do trecho, foram caracterizados em termos de rigidez e também em relação a ensaios de ruptura de RT e RCS.

Com a modernização de equipamentos de campo, acredita-se que é possível se obter uma compactação mais eficiente das camadas durante a execução, possibilitando a adoção de camadas mais espessas, como a de 30cm executada no trecho experimental. Com esses ensaios, espera-se identificar justamente se a execução de camadas mais espessas consegue atingir o grau de compactação suficiente, ou seja, se essa camadas apresentam resistência e rigidez satisfatórias, mesmo quando compactadas em espessuras mais robustas, e se existe diferença no comportamento mecânico em função da espessura compactada.

Ultrassom

Este ensaio (Figura 164) tem o objetivo de testar a integridade de amostras através da medida da velocidade de propagação de uma onda de ultrassom. O equipamento é amplamente utilizado em estruturas e CPs de concreto, onde, após anos de testes, já se pode correlacionar a velocidade de propagação da onda com o Módulo de Elasticidade (ME) do material. Para o material em estudo, ainda não existem tais correlações, contudo é sabido que quanto maior a rigidez do material (que também pode estar associada a um menor volume de vazios), maior será a velocidade de propagação da onda de ultrassom.



Figura 164 – Ensaio de ultrassom

Todas as amostras de material de base reciclado com cimento extraídas de campo foram testadas no equipamento de ultrassom a fim de se obter um comparativo de rigidez dentre esse grupo de amostras. Os resultados médios (Tabela 33) para as duas primeiras coletas das amostras de campo apresentaram baixa variabilidade em função da espessura da camada ou posição da extração do CP. Portanto, com esse ensaio, não foi possível observar diferença significativa entre a rigidez das diferentes espessuras de camada cimentada, já que a velocidade de propagação das ondas não apresentou grande variação.

Tabela 33 – Resultados dos ensaios de ultrassom (CPs extraídos após 7 e 8 meses da execução)

Espessura da camada (cm)	Posição	Idade das amostras	Velocidade média (km/s)	Desvio padrão (km/s)
20	Eixo	7 meses	2,9	0,1
	Trilha Externa	8 meses	-	-
25	Eixo	8 meses	2,7	0,2
	Trilha Externa	8 meses	3,4	0,3
30	Eixo	7 meses	3,1	0,3
	Trilha Externa	8 meses	3,0	0,2

Para a idade de 2 anos após a construção do trecho experimental, ou seja, para as amostras coletadas mais recentemente do campo, foi feito um estudo mais detalhado para os resultados obtidos através do ensaio de ultrassom. Os resultados encontram-se na Tabela 34.

Tabela 34 – Resultados dos ensaios de ultrassom (CPs extraídos após 2 anos da execução)

Espessura da camada (cm)	CP	Posição	Velocidade média (km/s)
20	1	Eixo	2,62
	2	Eixo	2,54
	3	Eixo	2,72
	4	Eixo	3,07
25	5	Trilha externa	3,66
	6	Trilha externa	3,51
	7	Trilha externa	3,74
	8	Eixo	3,06
30	9	Trilha externa	3,12
	10	Eixo	3,16
	11	Eixo	3,10
	12	Eixo	3,23

Módulo de Resiliência (MR) Triaxial

Este ensaio (Figura 165), concebido originalmente para a determinação de MR de solos e materiais granulares, consiste da aplicação de diferentes combinações de cargas cíclicas e medida das consequentes deformações geradas nas amostras. O ensaio se diferencia do ensaio de MR de misturas asfálticas, já citado, devido à tensão de confinamento e aplicação de carga axial nas amostras.

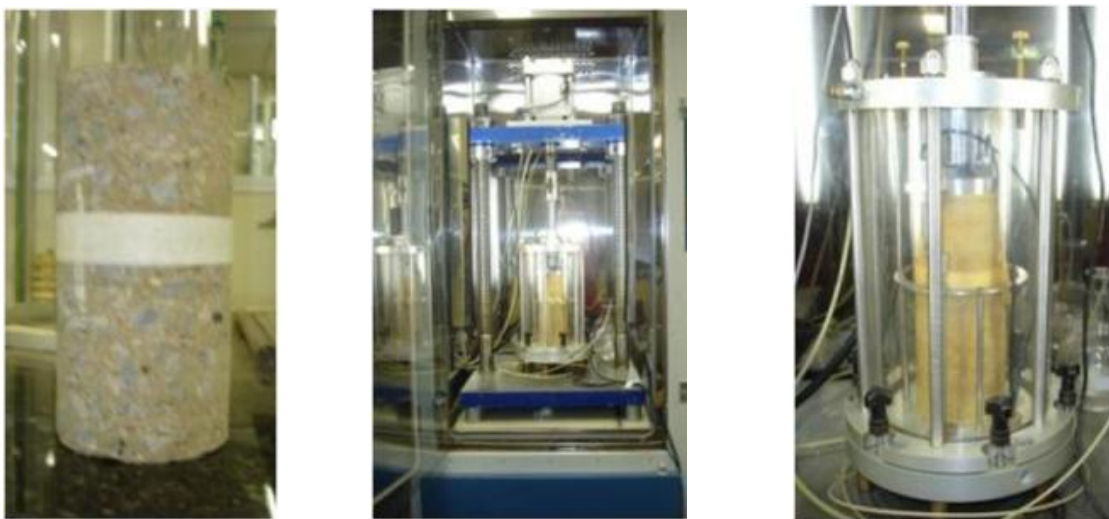


Figura 165 – Ensaio de MR nas amostras de Reciclado com Cimento

A presença de cimento no material reciclado faz com que os módulos de resiliência não sejam significativamente dependentes da tensão de confinamento, como ocorre em materiais puramente granulares ou solos. Apesar disso, o parâmetro de MR é amplamente utilizado em projetos de pavimentos e, portanto, encontra aplicação também para tal material.

Nem todos os CPs possuíam características para o ensaio, sendo elas altura suficiente ou verticalidade da amostra. Os resultados obtidos para as amostras extraídas com 7 e 8 meses após a construção do trecho encontram-se apresentados na Tabela 35. Normalmente, adota-se como valor característico de MR, em ensaios triaxiais, o valor obtido com 0,1MPa de tensão confinante.

Tabela 35 - Resultados de MR triaxial (primeira e segunda coletas)

Espessura da camada (cm)	Posição	Idade das amostras	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
20	Eixo	7 meses	5.454	-
	Trilha Externa	8 meses	-	-
25	Eixo	8 meses	4.479	963
	Trilha Externa	8 meses	5.776	2.807
30	Eixo	7 meses	5.003	420
	Trilha Externa	8 meses	7.411	1.107

Comparando-se os resultados verifica-se que não houve grande variação em resultados de MR para as camadas compactadas com 25 e 30 cm quando a posição de extração (eixo ou trilha externa) é a mesma, sugerindo que a compactação da camada mais espessa foi eficiente. Verifica-se também que os CPs extraídos da trilha externa apresentaram resultados superiores indicando melhor consolidação da camada cimentada nessa posição.

A Tabela 36 apresenta os resultados obtidos para as amostras coletadas 2 anos após a construção do trecho experimental (Figura 166). Novamente, o MR apresentado aqui corresponde àquele obtido com tensão de confinamento de 0,1MPa.



Figura 166 – CPs extraídos de pista para ensaio de MR

Tabela 36 - Resultados de MR triaxial (terceira coleta)

Espessura da camada (cm)	CP	Posição	MR (MPa)
20	1	Eixo	3.877
	2	Eixo	4.756
	3	Eixo	2.118
	4	Eixo	6.587
25	5	Trilha externa	10.142
	6	Trilha externa	9.128
	7	Trilha externa	11.315
	8	Eixo	4.504
30	9	Trilha externa	6.660
	10	Eixo	7.512
	11	Eixo	7.631
	12	Eixo	9.435

Módulo de Elasticidade (ME)

Esse ensaio (Figura 167), concebido para a determinação do ME em amostras de concreto, consiste da aplicação lenta de incrementos lineares de tensão e medição das consequentes deformações sofridas pelo CP. Esse ensaio difere-se do ensaio de MR pela velocidade de

aplicação de cargas, a forma de aplicação do pulso de carga, o não confinamento da amostra e a ruptura por compressão dos CPs ao final do ensaio.

Para a execução do ensaio foi adotada a norma NBR 8522/03 para a determinação de módulos estáticos de elasticidade e a prensa hidráulica do fabricante EMIC, utilizada nos ensaios de tecnologia de concreto do Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica da USP (PCC/Poli-USP).



Figura 167 – Ensaio de ME

Os resultados obtidos para as duas primeiras coletas de amostras do campo são apresentados na Tabela 37. Não se observaram variações significativas entre os resultados de ME para as camadas com diferentes espessuras quando os CPs foram extraídos do eixo. Os valores obtidos para esse grupo de CPs foi compatível aos obtidos para o ME de CPs moldados em laboratório (9.000MPa, aproximadamente).

Tabela 37 – Resultados de ensaio de ME (primeira e segunda coletas)

Espessura da camada (cm)	Posição	Idade das amostras	ME (MPa)	Desvio padrão (MPa)
20	Eixo	7 meses	8.028	-
	Trilha Externa	8 meses	-	-
25	Eixo	8 meses	7.996	992
	Trilha Externa	8 meses	17.083	2497
30	Eixo	7 meses	9.124	2418
	Trilha Externa	8 meses	10.416	2237

Quando se compara os CPs extraídos da trilha externa, verifica-se que a camada de 25cm de espessura apresentou módulos de elasticidade bastante elevados em relação à camada com 30cm de espessura. Baseando-se nesses resultados pode-se inferir que houve consolidação da camada cimentada pelo tráfego e que essa consolidação ocorreu mais pronunciadamente na camada menos espessa.

Para a terceira e última coleta de amostras realizadas no trecho experimental, a Tabela 38 apresenta os resultados obtidos no ensaio de ME. É possível perceber que os valores de ME para todas as camadas no mínimo dobrou em relação àqueles obtidos com as amostras coletadas antes do primeiro ano após a construção do trecho experimental. A camada de 20cm apresentou o menor valor para essa propriedade, porém a diferença em relação às demais camadas não pode ser considerada tão significativa.

Tabela 38 – Resultados de ensaio de ME (terceira coleta)

Espessura da camada (cm)	Posição	Idade das amostras	ME (MPa)	Desvio padrão (MPa)
20	Trilha Externa	2 anos	17.685	559
25	Eixo	2 anos	22.285	1577
30	Eixo	2 anos	21.170	-
	Trilha Externa	2 anos	22.830	-

Correlação entre ensaio de ultrassom e os ensaios de MR e ME

Apesar de o ensaio de ultrassom ter sido originalmente idealizado para o estudo de amostras de argamassas, optou-se por obter o valor de ME, ou módulo de deformação (E) como também é chamado, através da Equação 1, demonstrada por Jones (1967) *apud* Silva et al. (2008). Admite-se aqui coeficiente de Poisson de 0,20 para a camada de base reciclada com cimento. A Figura 168 apresenta uma comparação entre esses valores e aqueles de MR apresentados anteriormente. A correlação entre os resultados de ambos os ensaios foi boa, uma vez que o valor de R^2 (coeficiente de determinação) foi elevado. Apesar disso, é possível perceber que os valores possuem ordens de grandeza bastante distintas, mostrando que o ensaio de ultrassom pode ser uma boa ferramenta para o ranqueamento de misturas. A Figura 169 apresenta a correlação entre os valores de módulo obtidos através do ultrassom e aqueles obtidos através do ensaio de ME. Para essa correlação, também foi obtido um bom valor de R^2 , apesar do número limitado de observações da amostra. É possível perceber também que os valores absolutos desse parâmetro são bem próximos quando se trata desses dois ensaios.

$$E = \rho \cdot v^2 \cdot \frac{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad (\text{Eq. 1})$$

Na qual, E : módulo de deformação; ρ : densidade do CP; e μ : coeficiente de Poisson

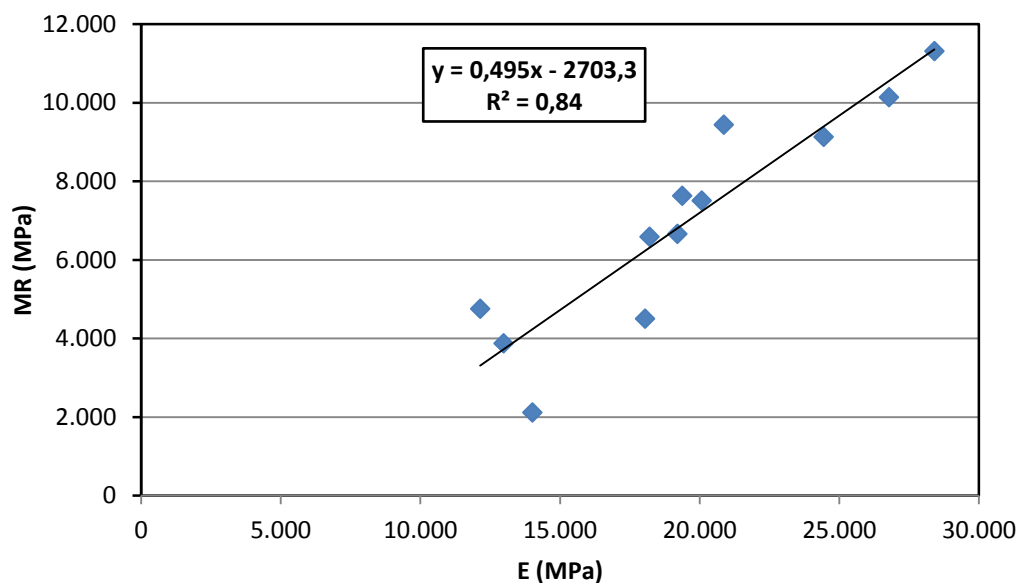


Figura 168 – Correlação entre o ensaio de ultrassom e o ensaio de MR

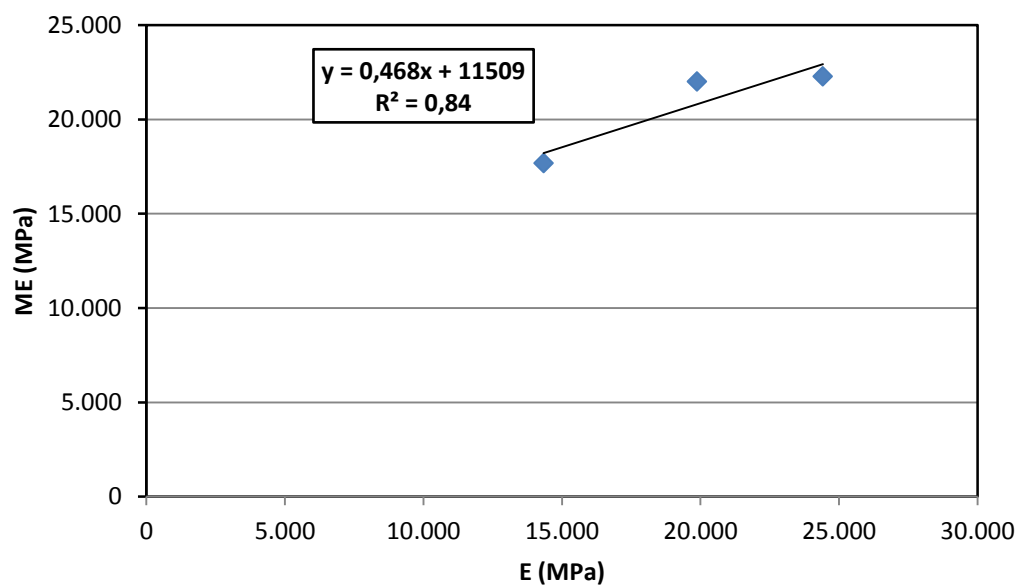


Figura 169 – Correlação entre o ensaio de ultrassom e o ensaio de ME

Módulo de Resiliência (MR) vs. Módulo de Elasticidade (ME)

Como os ensaios de MR e de ME foram realizados nos mesmos CPs, é possível fazer uma comparação direta entre resultados obtidos para ambos os parâmetros. Através da Figura

170, verifica-se que, para todos os CPs extraídos na primeira coleta de amostras de campo, os resultados de ME são superiores aos de MR.

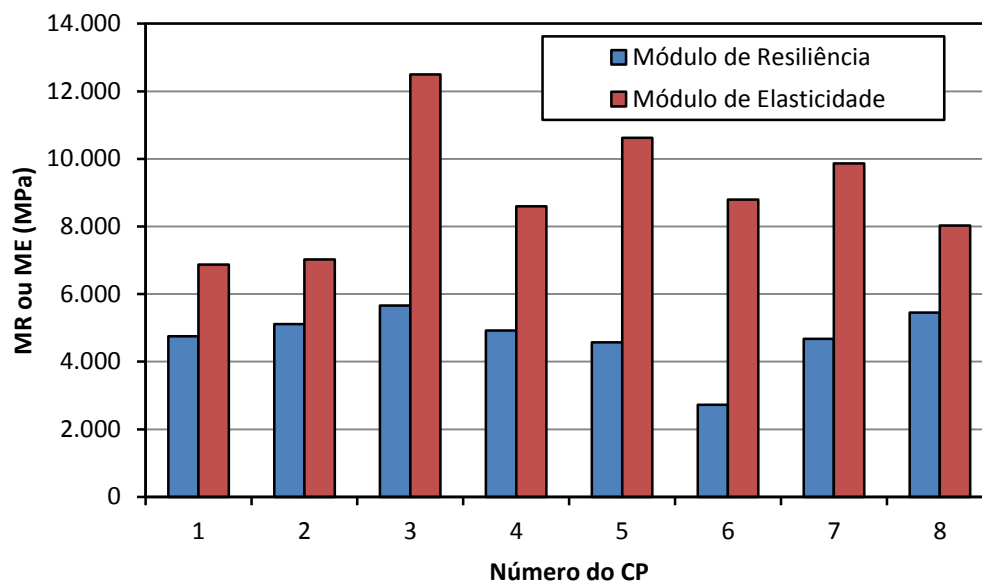


Figura 170 – Comparação entre MR e ME (primeira coleta)

Como o ensaio de ME não contempla o confinamento da amostra e ainda assim apresentou valores superiores aos do ensaio de MR, pode-se afirmar que o material em estudo pode ser considerado independente do confinamento, comportamento esperado para misturas cimentadas. A Figura 171 apresenta a média de valores obtidos com os ensaios realizados para as amostras obtidas através da segunda coleta de material de campo.

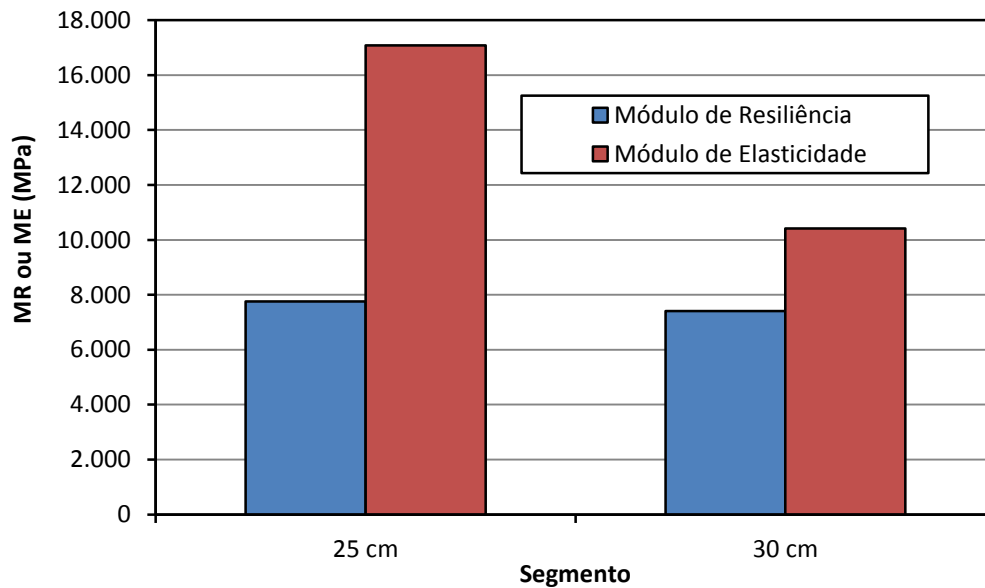


Figura 171 – Comparação entre MR e ME (segunda coleta)

Verifica-se que a variação dos módulos foi mais pronunciada nos CPs da camada de 25cm. Conforme comentado, os módulos de elasticidade nessa camada foram mais elevados que os da camada de 30 cm. O equipamento de MR apresenta uma limitação de medidas para materiais muito rígidos comprometendo suas medidas. Segundo o fabricante, o MR máximo que pode ser medido é de 12.000Mpa. Sendo esse valor inferior ao ME de 17.000MPa para a camada de 25cm, o equipamento pode não ter sido capaz de realizar as leituras de forma adequada.

A Figura 172 apresenta a comparação entre os valores de MR e ME para as amostras obtidas na terceira coleta, realizada 2 anos após a construção do trecho experimental. Novamente, é possível perceber que os valores de ME foram superiores aos de MR para todos os segmentos estudados.

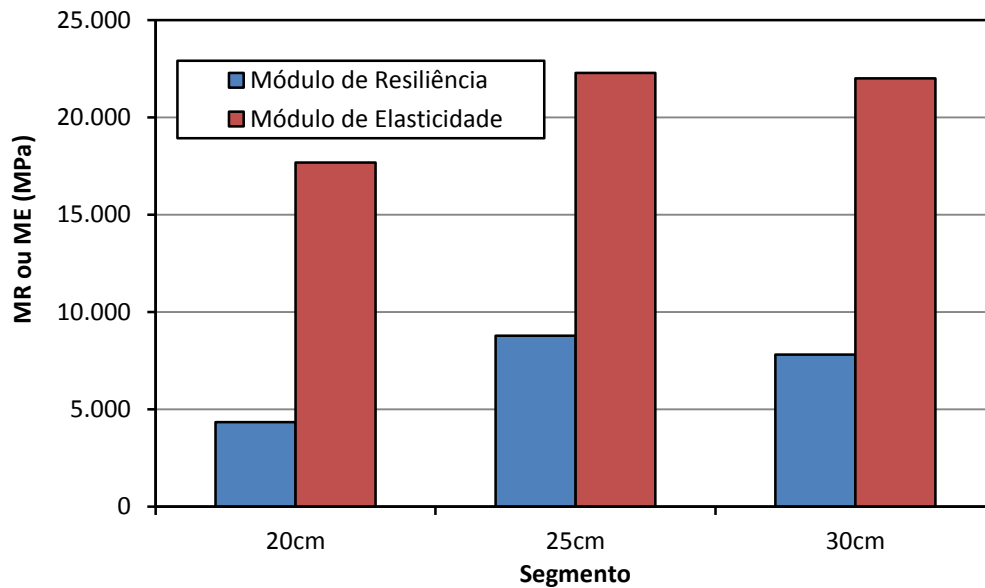


Figura 172 – Comparação entre MR e ME (terceira coleta)

As diferenças significativas encontradas para os dois tipos de ensaio podem ser explicadas pelo método de aplicação de cargas de cada ensaio. Os gráficos apresentados nas Figuras 173 e 174 são resultados dos ensaios realizados em um mesmo CP (amostra 1). Nesses gráficos, verifica-se que as magnitudes de cargas aplicadas variam na ordem de dez vezes, sendo as aplicadas no ensaio de ME dez vezes maiores que aquelas aplicadas no ensaio de MR. Verifica-se também que o tempo de aplicação dessas cargas é bastante distinto, sendo de 0,1s o ensaio de MR e de 60s para o ensaio de ME.

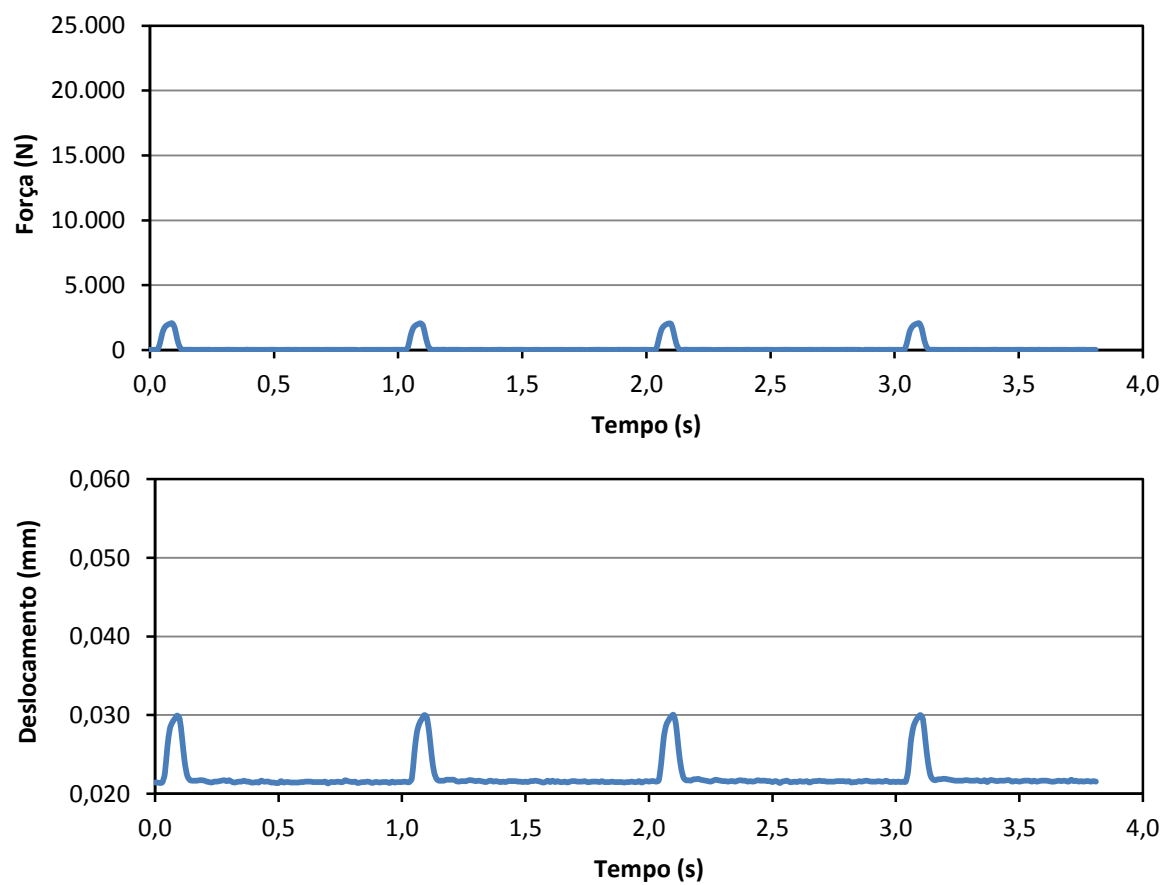


Figura 173 – Exemplo de ensaio de MR

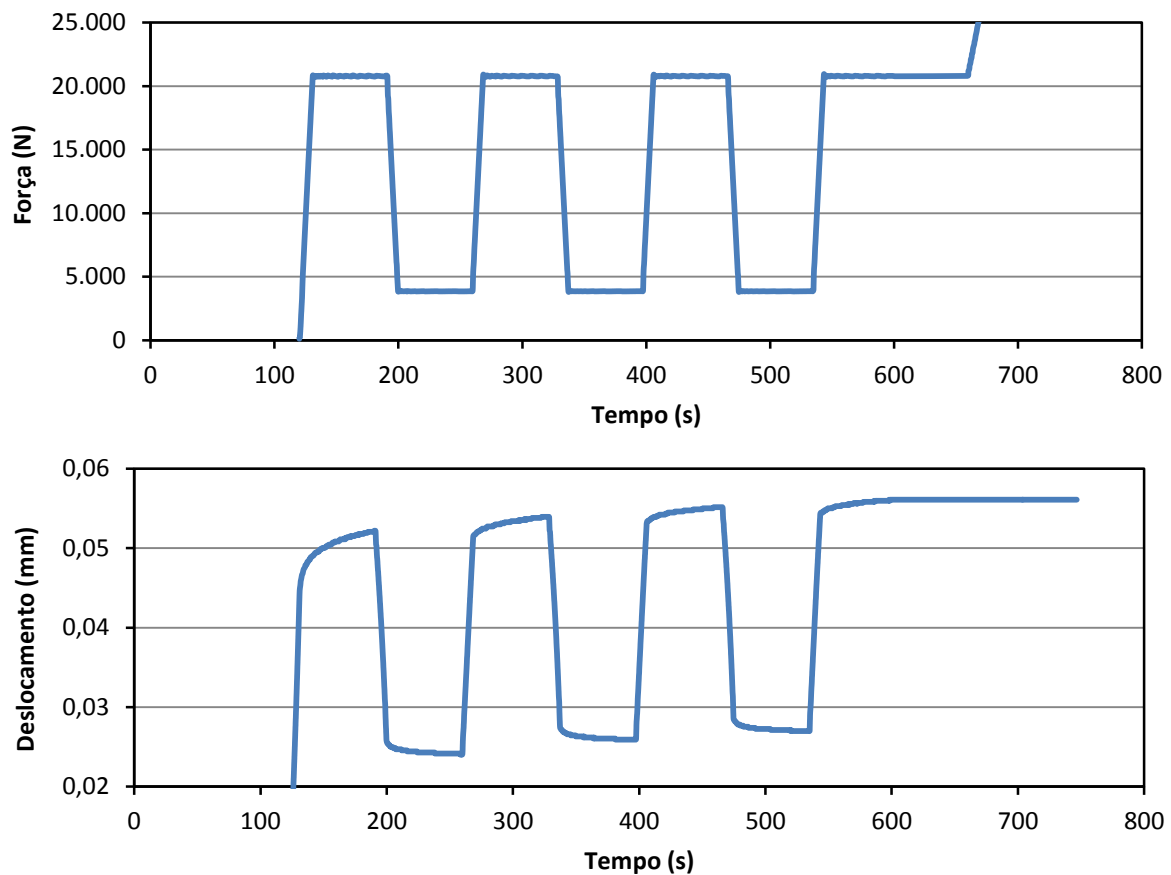


Figura 174 – Exemplo de ensaio de ME

É possível verificar que no ensaio de ME a menor carga aplicada ao CP (patamar inferior da curva) é de aproximadamente 3kN, imprimindo uma deformação inicial (acomodação do CP). A medida das deformações é feita a partir da deformação inicial até a deformação máxima, causada pela tensão máxima de carregamento (20kN, aproximadamente). Em contrapartida, a maior carga aplicada no ensaio de MR é de aproximadamente 2kN e não existe carga de acomodação, sendo o deslocamento total considerado nos cálculos. Como os módulos são a relação entre tensão/deformação, maiores deformações resultam em menores módulos, justificando-se as diferenças nos resultados.

Resistência à Tração (RT)

Para uma melhor caracterização mecânica das amostras de reciclado com cimento, dois CPs de cada segmento, extraídos da trilha externa durante a primeira coleta de amostras de

campo, foram ensaiados em termos de RT por compressão diametral (Figura 175). Os ensaios foram realizados na prensa hidráulica do tipo MTS, seguindo a mesma metodologia dos ensaios realizados em CPs moldados em laboratório.

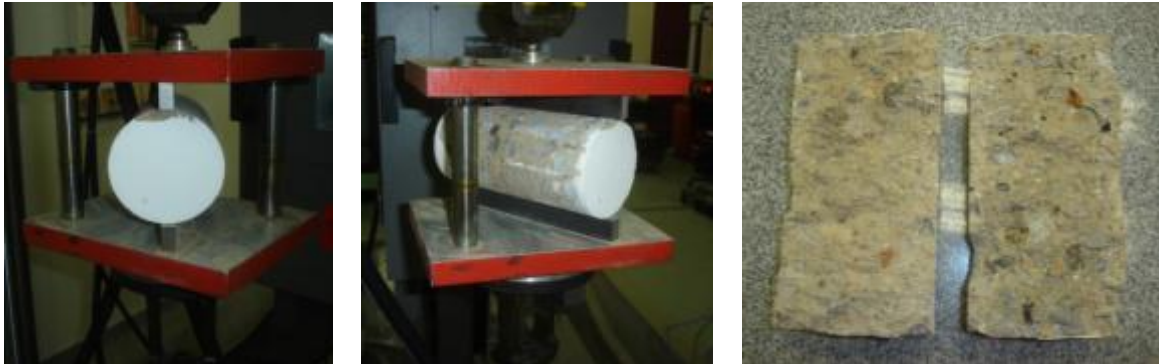


Figura 175 – Instrumentação do Ensaio de RT por compressão diametral

Os resultados médios obtidos para os CPs extraídos de campo na primeira coleta são apresentados na Tabela 39. Assim como os resultados de ME, obteve-se melhores resultados para a camada compactada com 25cm de espessura. Os resultados obtidos para a camada de 25cm de espessura de compactação são compatíveis aos obtidos em ensaios realizados em CPs de laboratório, que tiveram média de valores de RT de 1,6MPa. A Tabela 40 apresenta os valores de RT para as amostras coletadas com 2 anos após a construção do trecho experimental. O menor valor obtido foi para a camada de 20cm de espessura. Em comparação com os resultados das amostras coletadas com 8 meses de idade do trecho, o valor de RT para a camada de 30cm de espessura teve um pequeno aumento.

Tabela 39 – Resultados de ensaio de RT (segunda coleta)

Espessura da camada (cm)	Posição	Idade das amostras	RT (MPa)	Desvio padrão (MPa)
25	Trilha Externa	8 meses	1,71	0,23
30	Trilha Externa	8 meses	1,16	0,06

Tabela 40 – Resultados de ensaio de RT (terceira coleta)

Espessura da camada (cm)	Posição	Idade das amostras	RT (MPa)	Desvio padrão (MPa)
20	Trilha Externa	2 anos	1,15	0,07
25	Eixo	2 anos	1,25	0,21
30	Trilha Externa	2 anos	1,30	-
	Eixo	2 anos	1,50	-

Resistência à Compressão Simples (RCS)

Com o objetivo de melhor compreender os efeitos da eficiência de compactação, foram analisadas às tensões de ruptura à compressão, obtidas no ensaio de ME das amostras de campo, tanto da primeira como da segunda coleta realizadas. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 41 e 42, para as primeiras duas coletas e para a terceira coleta, respectivamente.

Tabela 41 - Resultados de ensaio de resistência à compressão (primeira e segunda coletas)

Espessura da camada (cm)	Posição	Idade das amostras	RCS (MPa)	Desvio padrão (MPa)
20	Eixo	7 meses	7,71	-
	Trilha Externa	8 meses	-	-
25	Eixo	8 meses	8,79	0,76
	Trilha Externa	8 meses	18,79	2,75
30	Eixo	7 meses	7,96	2,22
	Trilha Externa	8 meses	10,28	0,57

Tabela 42 - Resultados de ensaio de resistência à compressão (terceira coleta)

Espessura da camada (cm)	Posição	Idade das amostras	RCS (MPa)	Desvio padrão (MPa)
20	Eixo	2 anos	11,0	0,14
25	Trilha Externa	2 anos	15,7	1,56
30	Trilha Externa	2 anos	14,3	0,14

Assim como os resultados de ME e resistência à tração, foi possível identificar melhores resultados para a camada compactada com 25cm, para ambas as idades das amostras,

indicando que essa camada está mais bem compactada. Foi possível identificar, também, os efeitos da consolidação das camadas cimentadas, onde os resultados obtidos para amostras extraídas da trilha externa são maiores que os obtidos para amostras do eixo, em um mesmo segmento do trecho experimental.

9.3. RECICLADO COM EMULSÃO

Foram extraídas doze amostras de campo que possuíam as três camadas da estrutura do pavimento, sendo assim as amostras do material reciclado com emulsão foram separadas da camada de CBUQ para que os ensaios de caracterização mecânica fossem realizados. Os ensaios, bem como seus resultados, encontram-se descritos a seguir. Os CPs foram extraídos de campo 7 meses após a execução do trecho experimental.

Módulo de Resiliência (MR)

O mesmo ensaio de MR descrito anteriormente para os CPs de reciclado com emulsão moldados em laboratório foi realizado para os CPs extraídos de pista. Devido aos danos sofridos durante a extração e separação dos CPs, foi possível ensaiar apenas cinco dos doze CPs. O processo de extração é bastante severo (com ação do processo mecânico e na presença de água), além de as misturas recicladas com emulsão apresentarem volume de vazios bastante elevado. Os resultados são apresentados na Figura 176.

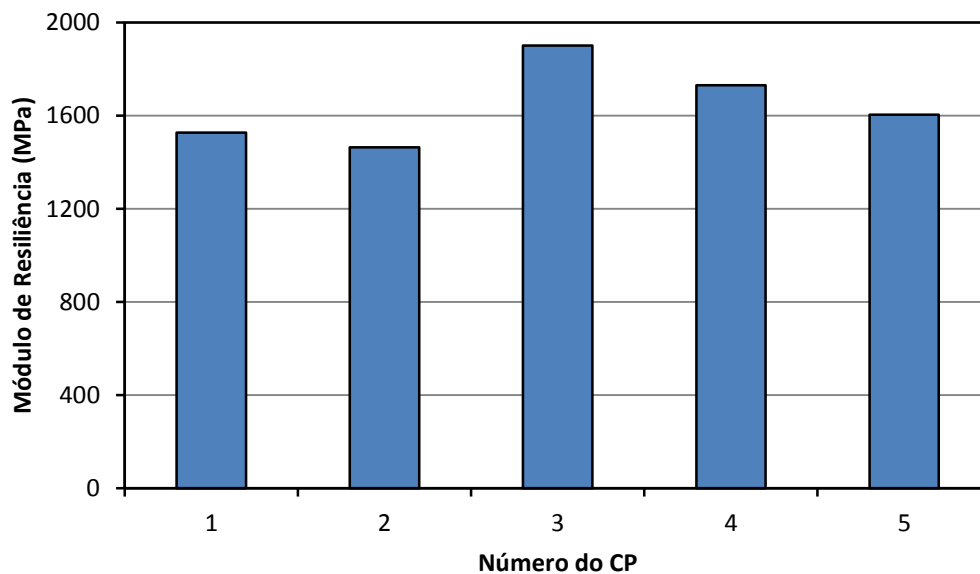


Figura 176 - Resultados de MR para CPs de reciclado com emulsão de pista

O valor médio de MR obtido para os CPs extraídos de campo foi de 1.646MPa. Quando comparado aos valores obtidos para as misturas compostas por 3% de emulsão, 3% de umidade e 1% de cimento, moldadas em laboratório, que apresentaram valor médio de MR de 1.369MPa, verifica-se que houve boa relação entre o campo e o laboratório, uma vez que os resultados apresentam-se dentro dos desvios padrões estabelecidos para os ensaios.

Resistência à Tração (RT)

Posteriormente aos ensaios de MR, os mesmos CPs selecionados foram ensaiados em termos de RT por compressão diâmetral, seguindo-se os mesmos procedimentos estabelecidos para os CPs moldados em laboratório. Os resultados são apresentados na Figura 177.

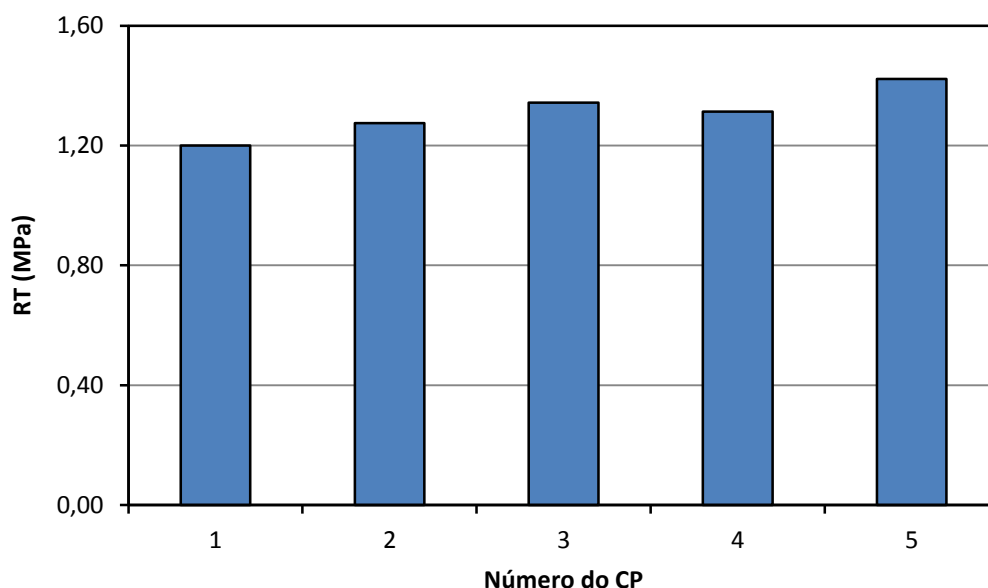


Figura 177 - Resultados de RT para os CPs de reciclado com emulsão de pista

Verifica-se que o valor médio de RT para os CPs extraídos da pista foi de 1,31MPa. Quando comparado aos valores obtidos para as misturas compostas por 3% de emulsão, 3% de umidade e 1% de cimento, feitas em laboratório, que apresentaram valor médio de RT de 1,05MPa, verifica-se que houve boa relação campo × laboratório, uma vez que os CPs de campo apresentam tempo de cura muito superior (cerca de 1 ano) aos moldados em laboratório, e valores de resistência tendem a aumentar ao longo do tempo.

10. CONCLUSÕES FINAIS

Este projeto de pesquisa teve como principal objetivo analisar o comportamento de pavimentos asfálticos compostos por camadas recicladas, com a adição de cimento para o uso na base, e com adição de emulsão asfáltica para o uso como camada intermediária entre a base e o revestimento. Essas camadas foram estudadas com o propósito de serem utilizadas como alternativa de restauração da Autopista Fernão Dias.

Para atender ao objetivo proposto, o estudo desses materiais reciclados envolveu tanto experimentos laboratoriais como levantamentos de campo. Foram dosadas e produzidas, em laboratório, misturas recicladas com cimento e com emulsão asfáltica com teores

variáveis de seus constituintes. A análise das propriedades volumétricas e do comportamento mecânico das diferentes misturas produzidas deve servir como base para direcionar o projeto de misturas recicladas para o uso como camada de base e como camada intermediária entre a base e o revestimento. Os dados obtidos através do trecho experimental fornecem as propriedades relativas ao desempenho do pavimento e de suas camadas recicladas em campo.

Algumas das principais conclusões obtidas através do presente estudo serviram para atender aos objetivos específicos propostos e podem ser encontradas, com maiores detalhes, nos itens a seguir.

10.1. ESTUDOS LABORATORIAIS

Reciclado com cimento

Foram verificadas diferenças no comportamento mecânico dos materiais cimentados quando variou-se a distribuição granulométrica adotada e o tipo de solo presente na mistura. O material composto por 60% de brita e 5% de cimento apresentou valores de resistência superiores àquele composto por 40% de brita e 6% de cimento, mantidas todas as outras condições.

Ainda na comparação entre os dois materiais citados, foi possível verificar diferenças no ganho de resistência ao longo do tempo. O material mais fino, apesar de apresentar valores de resistência inferiores, continuou tendo acréscimos durante um tempo mais longo. Como esse material apresenta granulometria mais fina e, portanto, maior umidade ótima de compactação, a relação água/cimento é superior, prolongando, assim, o período de hidratação do cimento.

A variação da energia de compactação em laboratório não se mostrou significativa em termos de ganho de resistência. Acredita-se que o estudo desse tipo de material possa ser aprofundado ao se variar as técnicas de compactação, tendo em vista que os resultados

podem ser mais afetados pela geometria da amostra do que pela energia de compactação em laboratório.

Em relação aos ensaios de ruptura, estes apresentaram sensibilidade ao método de ensaio utilizado. Verificou-se que os ensaios com aplicação de carga lenta levam a menores valores de resistência à tração e à compressão e a menores deformações. Além disso, as diferenças nos valores de deformação foram mais pronunciadas em amostras com 7 dias de cura. Observou-se um ganho de resistência à tração com o aumento no teor de cimento das misturas recicladas. Esse ganho está relacionado não só ao teor de cimento, mas também à diminuição da relação água/cimento e à redução do volume de vazios que ela acarreta. Os resultados de resistência à compressão, porém, apresentaram uma queda para o teor de 7% de cimento (nos dois tempos de cura avaliados). O ensaio de módulo de resiliência não apresentou sensibilidade à variação do teor de cimento, devido à elevada variabilidade dos resultados.

A variação da energia de compactação em laboratório não se mostrou significativa em termos de ganho de resistência à tração, porém se mostrou significativa em termos de resistência à compressão simples. Esses resultados podem ser explicados pela diferença de planos de aplicação de carga durante o ensaio em relação ao plano de compactação.

Em relação ao tempo de cura do material reciclado com cimento, verificou-se que a avaliação dos parâmetros mecânicos em apenas três datas não define o formato detalhado da curva de ganho de resistência, principalmente nas primeiras idades do material. O formato dessa curva é dependente do tipo de material, de sua granulometria, do tipo de cimento utilizado e da relação água/cimento.

Reciclado com emulsão

O estudo desse material envolveu duas grandes frentes: a dosagem e compactação através do compactador Marshall (CPs com altura de aproximadamente 6,6cm) e a dosagem e

compactação através do Proctor (CPs com altura de 20,0cm). As principais conclusões obtidas para esta etapa da pesquisa são apresentadas a seguir.

Compactação Marshall

Verificou-se que a variação do teor de fluido nas misturas recicladas com emulsão influencia nas propriedades volumétricas de tais misturas. Aumentando-se o teor de emulsão e mantendo-se constante todos os outros parâmetros, verificou-se que quanto maior o teor de emulsão maiores são as porcentagens de vazios.

Os ensaios de módulo de resiliência demonstraram que esse parâmetro de rigidez está mais associado à porcentagem de vazios presente nas misturas. Já os ensaios de resistência à tração indicaram que esse parâmetro está mais associado à quantidade de ligante. Os ensaios realizados após condicionamento em água à 60°C indicaram boa resistência ao dano por umidade nas misturas uma vez que os valores de resistência à tração retida e módulo de resiliência retido ficaram acima de 90%.

O estudo envolvendo a variação no teor de cimento das misturas não apresentou variação da porcentagem de vazios. Contudo, as misturas com adição de cal apresentaram uma tendência de diminuição do volume de vazios conforme se aumentava o teor de cal, indicando que a presença de cal alterou as características de fluidez da mistura e lubrificação entre partículas, fazendo com que houvesse uma maior compactação nos CPs.

No ensaio de módulo de resiliência, verificou-se que, para as misturas com adição de cimento, há uma tendência de crescimento desse parâmetro conforme é aumentado o teor de cimento. Sabe-se que a porcentagem de vazios afeta diretamente a rigidez das misturas asfálticas e, mesmo sem a variação deste parâmetro, houve o aumento da rigidez, indicando que esse aumento do módulo de resiliência foi efeito direto da quantidade de cimento na mistura. As misturas com adição de cal não apresentaram aumento significativo no valor de módulo de resiliência a medida em que se aumentava o teor de ligante hidráulico, mesmo essas misturas tendo apresentado menores volumes de vazios. Isso pode indicar que o teor

de cal, apesar de melhorar a compactação da mistura, não contribuiu para o ganho de rigidez das misturas estudadas.

No ensaio de resistência à tração, não foi possível diferenciar o efeito do ligante hidráulico e de seu teor nos valores de ruptura em nenhuma das seis misturas testadas. Sabe-se que esse parâmetro está diretamente ligado ao teor de ligante asfáltico na mistura e, nesta etapa, não foi contemplada a variação no teor de emulsão asfáltica. Apesar disso, foi possível observar o efeito que as adições desses materiais têm na fragilidade das misturas. Quanto maior o teor de ligante hidráulico, mais frágil é a ruptura dos CPs, ou seja, menos deformação a amostra consegue manter antes de chegar à ruptura.

Devido às limitações da dosagem realizada através da metodologia Marshall, recomenda-se a metodologia que utiliza a compactação Proctor para o projeto de misturas recicladas a frio com emulsão asfáltica. Além de se observar pouca influência dos teores dos constituintes das misturas em seu comportamento mecânico, as amostras produzidas pela metodologia Marshall possuem dimensões muito reduzidas, o que pode afetar suas propriedades.

Compactação Proctor

Na compactação Proctor, a dosagem das misturas com teores variáveis de umidade não apresentou, no geral, diferenças significativas em termos de massa específica máxima. Quando houve variação no teor da água acrescentada nas misturas para a obtenção das curvas de compactação, obteve-se pouca diferença na massa específica das amostras.

O teor de emulsão de 3% resultou em misturas melhor compactadas, ou seja, com maiores valores de massa específica, se comparado aos teores de 2 e 4% também avaliados. Em termos de teor ótimo de umidade para as diferentes misturas, os valores encontrados ficaram entre 5 e 6% , aumentando um pouco com a diminuição de quantidade de emulsão nas misturas.

Os ensaios de resistência à compressão simples mostraram que a variação no teor de emulsão e na temperatura de cura não trouxe diferenças significativas nos valores obtidos nos ensaios, exceto para as misturas compactadas sem adição de qualquer teor de emulsão. Essas misturas, em específico, tiveram valores de resistência mais elevados em relação às demais misturas, indicando que a interação entre cimento e emulsão asfáltica pode ser prejudicial ao papel do cimento em fornecer às misturas uma melhor estabilidade e rigidez (porém, esse ainda é um fato especulativo, visto que pouco já foi abordado na literatura internacional sobre essa interação).

No caso da variação no teor de cimento, foram encontradas diferenças nos resultados. As misturas sem qualquer adição de cimento tiveram valores muito inferiores neste ensaio, enquanto que o teor de 2% de cimento elevou os valores em relação às misturas que continham 1%.

Na sequência do estudo, foram realizadas variações no tempo e na temperatura de cura de misturas compactadas com mesma granulometria e mesmos teores de água, emulsão e cimento. A cura convencional (a 25°C) mostrou que a resistência das misturas em relação à tração e a compressão aumenta consideravelmente nos primeiros 28 dias, porém, após esse período, as propriedades mecânicas se estabilizam, mesmo quando a cura atinge os 90 dias. Em termos de rigidez, os valores de módulo de resiliência também seguiram a mesma tendência. Em relação à cura acelerada, foi possível obter valores de resistência à tração próximos àqueles obtidos com a temperatura de 25°C após 28 dias, porém com tempos mais curtos (até, no máximo, 7 dias), utilizando temperaturas mais elevadas. No geral, a temperatura de 60°C foi aquela que trouxe resultados mais satisfatórios para as misturas estudadas.

O ANEXO A deste relatório traz uma proposta inicial de especificação de projeto de misturas asfálticas recicladas com emulsão. Esta ainda deve ser aprimorada com a adição de mais informações sobre as misturas recicladas com emulsão que vêm sendo adotadas pela concessionária.

10.2. TRECHO EXPERIMENTAL

O trecho experimental proposto com as camadas de base reciclada com cimento e intermediária com reciclado e emulsão asfáltico foi executado em um período de sete dias. O processo de construção se deu no segundo semestre de 2011 e, após sua execução, foi dado início o seu monitoramento através de levantamentos deflectométricos e da caracterização de amostras coletadas da pista.

Para o primeiro levantamento realizado no trecho experimental, os três ensaios realizados para quantificação da rigidez dos CPs de campo apresentaram baixa variabilidade entre os trechos com diferentes espessuras de compactação, indicando que a compactação em espessuras mais elevadas (25 e 30cm) foi eficiente. Os ensaios de módulo de resiliência e módulo de elasticidade apresentaram valores bastante distintos, devido principalmente às características pertinentes a cada um dos métodos de ensaio, como forma e amplitude de carregamento.

O segundo levantamento deflectométrico, realizado um ano após a abertura ao tráfego, apresentou melhoria na condição estrutural das camadas devido às condições climáticas favoráveis (período de estiagem) e à consolidação das camadas decorrente do tráfego. Além dos valores de deflexão máxima, o formato das bacias foi também um indicativo da elevada rigidez da estrutura. Observou-se também uma grande influência da infraestrutura remanescente na resposta estrutural do pavimento.

Os resultados de módulo de resiliência e ultrassom dos CPs extraídos de campo a partir da camada reciclada com cimento apresentaram baixa variabilidade entre os trechos com 25 e 30cm de espessura de compactação (as amostras de 20 cm não puderam ser comparadas por limitação em suas dimensões). Os ensaios de módulo de elasticidade, porém, indicaram maior rigidez da camada compactada com 25 cm de espessura com relação à camada de 30 cm. Essa tendência foi também observada para os ensaios de resistência à compressão simples dos CPs (extraídos do eixo e do bordo da pista).

Em relação ao terceiro levantamento realizado, as bacias deflectométricas resultantes obtidas para o segmento de 20cm tiveram deflexões muito elevadas, enquanto que para os segmentos de 25 e 30cm, essas deflexões foram mais baixas (sendo mantida a diferença observada entre os segmentos para os levantamentos anteriores). Também para o segmento de 20cm, a dispersão dos resultados para os diferentes pontos analisados foi alta, indicando que as bacias não são uniformes ao longo do segmento. Os segmentos com 25 e 30cm de camada reciclada com cimento vêm apresentando bom comportamento em campo.

Para a camada de reciclado com emulsão, no geral, os ensaios realizados nos CPs de pista apresentaram boa correlação com os CPs moldados em laboratório tanto para módulo de resiliência quanto para resistência à tração indicando um bom fator campo $\times$ laboratório, mesmo com os diferentes processos de compactação nos dois casos.

10.3. CONTRIBUIÇÃO PARA A ENGENHARIA RODOVIÁRIA

A principal contribuição que esta pesquisa é capaz de fornecer para a infraestrutura rodoviária e, especificamente, para a concessionária que administra a Autopista Fernão Dias, é a possibilidade da reabilitação de pavimentos deteriorados através do uso de reciclagem de suas camadas para a composição de novas camadas recicladas que sejam capazes de reduzir as trincas encontradas nos pavimentos antigos. As técnicas de reciclagem tanto da base como do revestimento asfáltico para a restauração, respectivamente, de uma nova base e de uma camada intermediária (que funciona quase como um binder) já vêm sendo muito utilizadas internacionalmente, e também no Brasil, e vêm trazendo bons resultados quando bem executada e quando estão de acordo com o projeto de laboratório.

Uma das principais vantagens para a concessionária quando são utilizadas técnicas de reciclagem a frio em seus pavimentos asfálticos é o custo, que é significativamente inferior àquele que resulta do uso de materiais virgens na construção das camadas do pavimento. Além de reaproveitar totalmente os materiais antigos já existentes na pista, a empresa reduz

os custos com transporte de material e diminui o gasto com o consumo de energia, uma vez que a técnica é realizada a frio.

Entre os principais produtos que essa pesquisa pode fornecer estão os procedimentos de dosagem de misturas recicladas com cimento e com emulsão asfáltica, além de parâmetros mecânicos para o projeto estrutural de pavimentos que adotem esses tipos de camadas recicladas.

É fornecida, em anexo, uma proposta de norma para misturas recicladas a frio com adição de emulsão asfáltica e cimento, uma vez que este tipo de mistura ainda não é contemplado com normas padronizadas para sua dosagem e utilização.

Além disso, a pesquisa traz como contribuição os procedimentos a serem realizados na execução e no controle técnico de obras que possuem misturas recicladas em sua composição, indicando os critérios a serem observados no desempenho mecânico desses materiais em campo.

A pesquisa atingiu todos os objetivos que foram propostos, avançando no conhecimento sobre materiais e técnicas de reciclagem, além de contribuir com a sistematização de procedimentos. A pesquisa aponta para soluções que a Concessionária pode adotar em seus projetos futuros de restauração e reforço.

11. ENTIDADE OU EQUIPE EXECUTORA

A empresa que coordena os serviços é a PAULISTA INFRAESTRUTURA LTDA associada com:

- Laboratório de Tecnologia de Pavimentação do Departamento de Engenharia de Transporte da Escola Politécnica da USP, e
- JMCHAVES Consultoria Ltda.

IDENTIFICAÇÃO DOS PARTICIPANTES

- Coordenador Geral: José Mário Chaves - JMChaves
- Equipe LTP/EPUSP:

- Profa. Dra. Liedi Légi Bariani Bernucci – Professora Titular, Coordenadora do Projeto
- Kamilla L. Vasconcelos – Doutora, Pesquisadora
- Edson Moura – Doutor, Técnico Nível Superior
- Iuri Bessa – Doutorando, Pesquisador
- Ana Luisa Aranha – Mestre, Pesquisadora
- Letícia Rezende – Aluna de Iniciação Científica
- Erasmo Alves – Técnico de Laboratório
- Vanderlei Dias – Técnico de Laboratório
- Diomária Rocha dos Santos – Secretária
- Equipe Laboratório da Paulista Infraestrutura:
 - Amanda Helena Marcandali Silva – Mestre, Pesquisadora
 - Igor Amorim Beja – Mestre, Pesquisador
 - Vagner Alba – Tecnólogo
 - Hugo Florencio – Tecnólogo

12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7182: Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro. 1986.
2. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7222: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. 1994.
3. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8522. Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. 2003.
4. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. MB 3361: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos. 1990.
5. AIO, D.A.; SILVA, J.P.N.; MACHADO, A.F.; SEGANTINI, A.A.S. Estudo da influência do uso do cimento ARI nas propriedades do solo-cimento auto adensável. Workshop “Concreto: durabilidade, qualidade e novas tecnologias”. 2004.

6. ALKINS, A. E.; LANE, B.; KAZMIEROWSKI, T. Sustainable pavements: environmental, economic, and social benefits of in situ pavement recycling. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2084, p. 100-103, 2008.
7. ARRA, Asphalt Reclaiming and Recycling Association - Basic Asphalt Recycling Manual. p. 269, 2001.
8. Asphalt Academy. The design and use of foamed bitumen treated materials. CSIR Transportek, Pretoria, África do Sul. 2002.
9. ASTM C 39/12. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. 2012.
10. ASTM C 496/11. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. 2011.
11. ASTM D 1075/11. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Effect of Water on Compressive Strength of Compacted Bituminous Mixtures. 2011.
12. ASTM D 2166/06. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. 2006.
13. ASTM D 4791/06. American Society for Testing and Materials Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. 2006.
14. ASTM D 6931/07. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures. 2007.
15. ASTM D 7369/09. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test.
16. ATTOH-OKINE, B. RAP methodology: previous experimental results and creep behavior with geocell reinforcement. 2012.
17. Autosroads Project. Review of foamed bitumen stabilisation mix design methods. Austroads Technical. Report AP-T178/11, Autostroads Project No. TT1358. 2011.
18. BALBO J.T. Britas graduadas tratadas com cimento: uma avaliação de sua durabilidade sob o enfoque de porosidade, tenacidade e fratura. Transportes. 2006.
19. BALBO J.T. Estudo das Propriedades Mecânicas das Misturas de Brita e Cimento e sua Aplicação aos Pavimentos Semi-Rígidos. 1993.

20. BALBO J.T. Materiais Estabilizados com Aglomerantes Hidráulicos para Pavimentos de Concreto de Cimento Portland. Curso de Especialização para Projetista de Pavimento de Concreto - ABCP. 2002.
21. BALBO J.T. Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos; 2007:58.
22. BECHARA, M.F.; FURLAN, A.P.; GIGANTE, A.C.; FABBRI, G.T.P. Propriedades mecânicas de misturas solos-cimento com solo laterítico e solo não laterítico. ANPET. 2010.
23. BEHIRY, A.E.A.E. Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures. 2012.
24. BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L.M.G, CERATTI, J.A.P; SOARES, J.B. Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro. 2008. 504p.
25. BONDIETTI, M.; MURPHY, D.; JENKINS, K.; BURGER, R. Research on the stabilisation os two different materials using bitumen emulsion and cement. 2004.
26. CASTRO, L. N. Reciclagem a frio "in situ" com espuma de asfalto. 2003. 183 Dissertação de Mestrado, COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro.
27. CHAN, S. et al. Comparative Performance of Conventional Cold In-place Recycling to old In-place Recycling with Expanded Asphalt – Ontario’s Experience. Transportation Research Board. 2009.
28. CHELELGO, K. Effects os diurnal temperature dynamics on curing of cold-emulsion reclaimed asphalt pavements. Journal of Engineering and Applied Sciences. 2010.
29. DAVID, D. de. Misturas asfálticas recicladas a frio: estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2006.
30. DER-SP ET-DE-P00/35. Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo - Reciclagem de pavimento asfáltico in situ com cimento e brita.
31. DNER-ES-390/99. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Pavimentação – pré-misturado a frio com emulsão modificada por polímero. 1999.
32. DNER-ME-035/98. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”. 1998.

33. DNER-ME-083/98. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Agregados – análise granulométrica. 1994.
34. DNER-ME-107/94. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Mistura Betuminosa a frio com emulsão asfáltica - Ensaio Marshall. 1994.
35. DNER-ME-129/94. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas. 1994.
36. DNER-ME-196/98. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Agregados – determinação do teor de umidade total. 1998.
37. DNER-PRO-269/94. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Projeto de restauração de pavimentos flexíveis. 1994.
38. DNIT. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos: Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes 2006.
39. FHWA. Recycled materials in european highway environments: Uses, Technologies, and Policies - FHWA-PL-00-025. 2000.
40. FU, P., DAVID, J., HARVEY, J.T., BUKHARI, S.A. Laboratory test methods for foamed asphalt mix resilient modulus. Road Materials and Pavement Design. 2009.
41. GUTHRIE W.S., SEBESTA S., SCULLION T. Selecting Optimum Cement Contents for Stabilizing Aggregate Base Materials.; 2002.
42. IBRACON. Instituto brasileiro de concreto. Concreto: ensino, pesquisas e realizações. 2005.
43. Italian Road Authority, ANAS (Agenzia Nazionale Autonoma delle Strade). Technical Specifications for Road Construction, 2009.
44. JAMES, A. Overview of asphalt emulsions. Transportation Research Circular, 2006.
45. KEKWICK, S.V. Best practice: bitumen-emulsion and foamed bitumen materials laboratory processing. 2005.
46. KIM, Y., IM, S., LEE, H.D. Impacts of curing time and moisture content on engineering properties of cold in-place recycling mixtures using foamed or emulsified asphalt. 2010.
47. LEE, K.W., BRAYTON, T., STEEN, K., MUELLER, M. A rational mix-design method with Superpave gyratory compactor and performance prediction for cold in-place recycling asphalt mixtures. 2012.

48. MALLICK, R. B.; O'SULLIVAN, K.; TAO, M. Why not (use rejuvenator for) 100% rap recycling? Transportation Record Board, 2010.
49. MARTINEZ, A.H., MIRÓ, R., PÉREZ-JIMÉNEZ, F.E. Spanish experience with the application of gyratory compactor and indirect tensile test in design and control of cold recycled asphalt pavement. 2007.
50. MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M.. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3rd ed. São Paulo; 2008.
51. MERIGHI, J.V., FORTES, R.M. Some aspects resistance's effect in the flexible pavements recycled with cement portland. 2005 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PAVEMENT RECYCLING. 2005;Paper 027-:1-12.
52. MILLER, H.J., GUTHRIE W.S., CRANE R.A., SMITH, B. Evaluation of cement-stabilized full-depth-recycled base materials for frost and early traffic conditions.; 2006:1-107.
53. MnDOT. Minnesota Department of Transportation - Cold in-place recycling. p.83. 2000.
54. MORAIS, A.S. Estudo das características de resistência do solo-cimento plástico e aplicação em estacas moldadas in loco. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira. 2002.
55. MOTTA, L. M. G.; LEITE, L. M. F. Desempenho de trechos de pavimentos acompanhados nos últimos 10 anos. IBP 2002.
56. MOURA, E.; BERNUCCI, L.L.B. Estudo dos deslocamentos verticais e horizontais em corpos de prova Marshall em ensaios de módulo de resiliência e de resistência à tração. XVII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. 2004.
57. NIAZI, Y., JALILI, M. Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion. 2008.
58. NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. Identificação expedita dos grupos de classificação MCT para solos tropicais. 1994.
59. PINTO, C.S. Curso básico de mecânica dos solos. Oficina de textos. 3ª edição. 2007.
60. PMSP. Prefeitura Municipal de São Paulo - Lei n. 14.015 - Dispõe sobre o descarte e reciclagem de misturas asfálticas retiradas dos pavimentos urbanos municipais. 2005.
61. RECASENS, R.M., PÉREZ-JIMÉNEZ, F.E., AGUILAR, S.C. Mixed recycling with emulsion and cement of asphalt pavements. Design procedure and improvements achieved. 2000.

62. ROGGE, D. F.; HICKS, R. G. Use of Asphalt Emulsions in-place Recycling: Oregon Experience. Transportation Record Board, 1993.
63. SEBAALY, P.E., BAZI, G., HITTI, E., WEITZEL, D., BEMANIAN, S. Performance of cold in-place recycling in Nevada. 2004.
64. SILVA, A.H.M. Avaliação do comportamento de pavimentos com camada reciclada de revestimentos asfálticos a frio com emulsão modificada por polímero. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2011.
65. SILVA, F.B., Barros, M.M.S.B., Monte, R. Determinação do módulo de deformação de argamassas: avaliação dos métodos de ensaio e formatos de corpo-de-prova. 2008.
66. SILVA, J.J.R., ANDRADE, T., PIRES, T.A.C., DUARTE, D.C.L., RIOS, F., ROLIM, T.L., ALMEIDA, P.M., NETO, J.M.C. Possíveis fontes de incerteza associadas ao ensaio de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos de concreto. METROSUL IV – IV Congresso Latino-Americano de Metrologia, Foz do Iguaçu. 2004.
67. SUZUKI, C. Y. et al. Structural analysis of a test section using cold in place recycling. International Symposium On Pavement Recycling. São Paulo 2005.
68. THANAYA, I.N.A., ZOOROB, S.E., FORTH, J.P. A laboratory study on cold-mix, cold-lay emulsion mixtures. 2009.
69. TOMEI JR., R.B., BALTO, J.T. Estudo de propriedades mecânicas de misturas de britas, solos e cimento Portland. 14º SIICUSP. 2006
70. WIRTGEN GmbH. Wirtgen cold recycling manual (2ª ed.). Windhagen, Germany. 2006.

ANEXO A

Pavimentação asfáltica – mistura reciclada a frio com emulsão asfáltica (projeto de dosagem)

RESUMO

Este documento apresenta os procedimentos laboratoriais necessários para o projeto de dosagem de misturas asfálticas recicladas a frio com adição de emulsão asfáltica modificada por polímero. Este documento também define os requisitos mínimos para a aprovação dos materiais utilizados, bem como os critérios para a aceitação de sua aplicação em campo.

ABSTRACT

This document presents the required laboratory procedures to design cold recycled mixes with the addition of polymer modified asphalt emulsion. This document also defines the minimum requirements to approve the materials to be used, as well as the acceptance criteria for field application.

SUMÁRIO

- 1 Prefácio

- 2 Objetivo
- 3 Definição
- 4 Condições gerais
- 5 Materiais e equipamentos
- 6 Dosagem da mistura reciclada
- 7 Procedimentos laboratoriais

1. PREFÁCIO

Esta norma estabelece os procedimentos de projeto de misturas asfálticas recicladas a frio com emulsão asfáltica para o uso em pavimentos asfálticos.

2. OBJETIVO

Fornecer os procedimentos para a fabricação de misturas asfálticas recicladas a frio com o uso de emulsão asfáltica modificada por polímero, para a aplicação como camada de pavimento asfáltico.

3. DEFINIÇÃO

Para os efeitos desta norma, a seguinte definição é adotada – mistura reciclada a frio com emulsão asfáltica modificada por polímero: mistura executada à temperatura ambiente, constituída por agregado fresado (Reclaimed Asphalt Pavement - RAP) e água, com adição de emulsão asfáltica modificada por polímero e com adição ou não de ligante hidráulico.

4. CONDIÇÕES GERAIS

A mistura reciclada a frio com emulsão asfáltica deve ser empregada como material para camada de base, camada intermediária ou camada subjacente ao revestimento asfáltico do pavimento.

5. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

5.1 Materiais

Os constituintes da mistura reciclada a frio com emulsão asfáltica são: agregado fresado ou reciclado (mais conhecido como RAP), emulsão asfáltica, água, cimento Portland ou outros tipos de ligantes hidráulicos.

- **Agregado fresado:** o agregado a ser utilizado na produção das misturas recicladas deve ser proveniente de fresagem de um revestimento asfáltico já existente, devendo possuir um Tamanho Máximo Nominal (TMN) de até 19,0mm. A mistura deverá ser 100% composta por esse material;
- **Emulsão asfáltica:** as emulsões asfálticas podem ser modificadas (DNER-EM 396/99), ou não modificadas (DNER-EM 369/97);
- **Cimento Portland:** deve obedecer às especificações da DNER-EM 036/95, NBR 5732/91 e NBR 11579/91;
- **Outros tipos de ligantes hidráulicos:** o uso de outros tipos de ligantes hidráulicos, como cal hidratada, pode ser feito em substituição ao uso do cimento Portland;
- **Água:** para a dosagem das misturas em laboratório, deve ser utilizada água destilada.

5.2 Composição da mistura

Não há um padrão estabelecido com faixas de valores mínimos e máximos a serem considerados na granulometria dos agregados fresados a serem incorporados na mistura reciclada a frio. No entanto, devido à variação típica na granulometria desse tipo de material, recomenda-se que o agregado fresado seja fracionado com o uso das peneiras da série brasileira para uma melhor reprodução das misturas durante a dosagem.

5.3 Equipamentos e acessórios

- **Compactador Proctor:** o tipo de compactação a ser adotado para este tipo de mistura é através do ensaio Proctor. As dimensões e a energia de compactação a serem adotadas serão descritas posteriormente;
- **Bandeja para a mistura dos materiais:** deve ser utilizada uma bandeja de dimensões adequadas para misturar a quantidade de massa necessária na produção de pelo

menos um (1) corpo de prova (CP) mais uma tolerância de pelo menos 10%. Essa massa deve ser de aproximadamente 3.600g, considerando o cilindro 10 cm x 20 cm;

- **Ferramentas acessórias:** colher de pedreiro para misturar os materiais;
- **Estufa:** o processo de dosagem das misturas recicladas envolve a cura do cimento em estufa apropriada, capaz de manter a temperatura entre, pelo menos, de 25°C a 60°C. Essa estufa deve ter controle de temperatura com precisão de até 1°C.

6. DOSAGEM DA MISTURA RECICLADA

6.1 Variação no teor de emulsão asfáltica

Nesta etapa, devem ser escolhidos, no mínimo, três (3) teores de emulsão asfáltica, com variação de 1% entre eles. Os teores escolhidos devem ser próximos daqueles normalmente utilizados no campo, de acordo com a experiência do projetista. A partir de cada teor de emulsão, serão produzidos diversos corpos de prova necessários para a dosagem da mistura reciclada. O teor ótimo de emulsão a ser adotado deve ser aquele que gerar melhores corpos de prova em termos de massa específica seca máxima oriunda da curva de Proctor.

6.2 Variação no teor de cimento

Após a definição do teor de emulsão asfáltica a ser adotado no projeto da mistura reciclada, devem ser escolhidos, no mínimo, três (3) teores de ligante hidráulico, variando-se 1% entre eles. Os teores escolhidos devem ser próximos daqueles normalmente utilizados no campo, de acordo com a experiência do projetista. A partir de cada teor de ligante hidráulico, serão produzidos diversos corpos de prova necessários para a dosagem da mistura reciclada. Os corpos de prova das misturas com teores variáveis de ligante hidráulico devem ser testados em termos de Resistência à Compressão Simples (RCS). O teor mínimo de ligante hidráulico que gerar misturas com valores de RCS suficientes (acima de 0,20MPa) para o projeto do pavimento deve ser adotado como teor ótimo na dosagem da mistura reciclada.

6.3 Variação no teor de água

O processo de dosagem da mistura reciclada através da compactação Proctor envolve a obtenção da curva de compactação. Para isso, para cada combinação de teor de emulsão com teor de cimento, devem ser selecionados, no mínimo, cinco (5) teores de água, que devem ser incorporados às misturas a serem compactadas. Esses teores devem ter uma variação de 1% entre si. Havendo a necessidade de novas misturas, deve-se selecionar um teor intermediário entre dois previamente utilizados. Após a compactação e pesagem dos corpos de prova produzidos, deve ser construída a curva de compactação, com os valores de teor de água no eixo das abscissas e com os valores de massa específica seca no eixo das ordenadas. O valor máximo obtido para a massa específica seca corresponde ao teor ótimo de água da mistura.

6.4 Verificação dos teores ótimos de emulsão, cimento e água

O teor ótimo de água é aquele que gerar a amostra com maior valor de massa específica seca, de acordo com a metodologia de compactação Proctor. O teor de emulsão asfáltica a ser adotado deve ser aquele que produzir a melhor mistura em termos de massa específica seca máxima. O teor de ligante hidráulico deve ser aquele que produzir misturas com valores de RT satisfatórios. Para efeito de projeto, adota-se nesta norma, um valor mínimo admissível de 0,40MPa após 28 dias de cura a 25°C. Permite-se adotar um procedimento de cura acelerada, em um período de 1 dia a 60°C.

7. PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS

7.1 Processo de mistura dos materiais

Para a produção das misturas recicladas a frio com emulsão asfáltica em laboratório, a primeira etapa corresponde à mistura dos diversos materiais a serem incorporados. Primeiramente, deve-se colocar o agregado fresado na bandeja apropriada, e em seguida acrescentar o ligante hidráulico na quantidade estabelecida. Para a incorporação do ligante hidráulico nos agregados, deve-se misturar bem os dois materiais a seco, com o auxílio da colher de pedreiro, de forma que o ligante hidráulico esteja bem espalhado na massa do agregado. Após a mistura do agregado fresado com o ligante hidráulico, acrescenta-se a água na quantidade estabelecida. Uma nova mistura deve ser realizada com o auxílio uso da

colher de pedreiro. Por fim, acrescenta-se a emulsão asfáltica para que o último processo de mistura seja realizado.

7.2 Compactação da mistura reciclada

Deve-se dividir igualmente a massa total da mistura reciclada no número de camadas a serem compactadas. A primeira camada deve ser colocada no molde do compactador Proctor, e, em seguida, a compactação deve ser iniciada. Na sequência, a segunda camada deve ser colocada no molde e o processo segue até que a última camada seja compactada. Em seguida, o corpo de prova deve ser extraído do molde de compactação, com cuidado, e levado ao processo de cura a ser descrito posteriormente. Características relacionadas ao tamanho do molde, à energia de compactação e ao número de camadas são descritas a seguir (baseado na NBR-7182):

- **Dimensões do corpo de prova (molde):** 10cm de diâmetro e 20cm de altura;
- **Energia:** Proctor modificado;
- **Soquete:** grande;
- **Número de camadas:** 8;
- **Número de golpes por camada:** 26.

7.3 Cura da mistura reciclada

Após a compactação, o corpo de prova deve ser levado à estufa. Estudos realizados com esse tipo de mistura indicam que o uso da temperatura de 60°C em um período de 1 dia é suficiente para curar as misturas apropriadamente na obtenção de resultados mecânicos satisfatórios e compatíveis com aqueles obtidos através de temperaturas mais baixas e maior período de cura em projetos de misturas a frio (por exemplo, 25°C durante 28 dias). Após a cura, deve-se tomar cuidado para restabelecer a temperatura do corpo de prova antes da realização dos ensaios.

7.4 Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS)

Deve ser realizado de acordo com a norma ASTM D 2166/06, utilizando-se a velocidade de 1mm/min¹. Previamente os corpos de prova devem ser estabilizados à temperatura de 25°C durante, no mínimo, cinco (5) horas após o fim da cura em estufa. Os resultados obtidos com este ensaio devem ser considerados na definição dos teores ótimos de cimento da mistura reciclada.

7.5 Ensaio de Resistência à Tração Indireta (RT)

Deve ser realizado de acordo com a norma ASTM D 6931/07, utilizando-se a velocidade de 50mm/min². Os corpos de prova devem ser estabilizados à temperatura de 25°C durante, no mínimo, cinco (5) horas após o fim da cura em estufa. Os resultados obtidos para a propriedade de RT devem ser considerados no projeto da mistura reciclada.

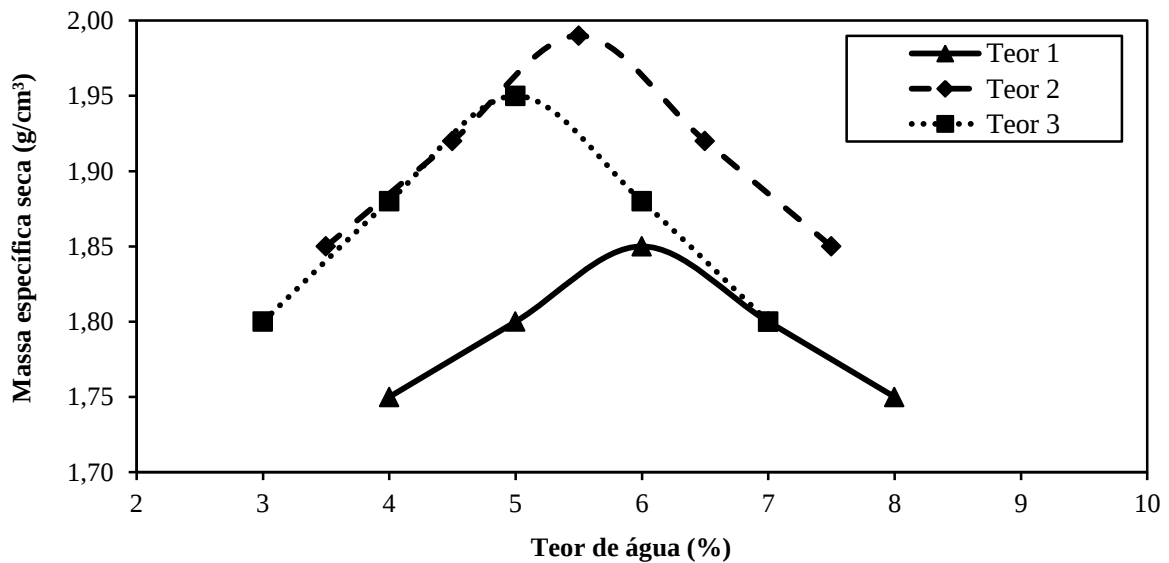
EXEMPLO DE DOSAGEM

Variação no teor de emulsão asfáltica

No exemplo ilustrado abaixo, o teor ótimo de emulsão a ser selecionado seria o Teor 2, pois foi aquele que forneceu a maior valor de massa específica seca máxima.

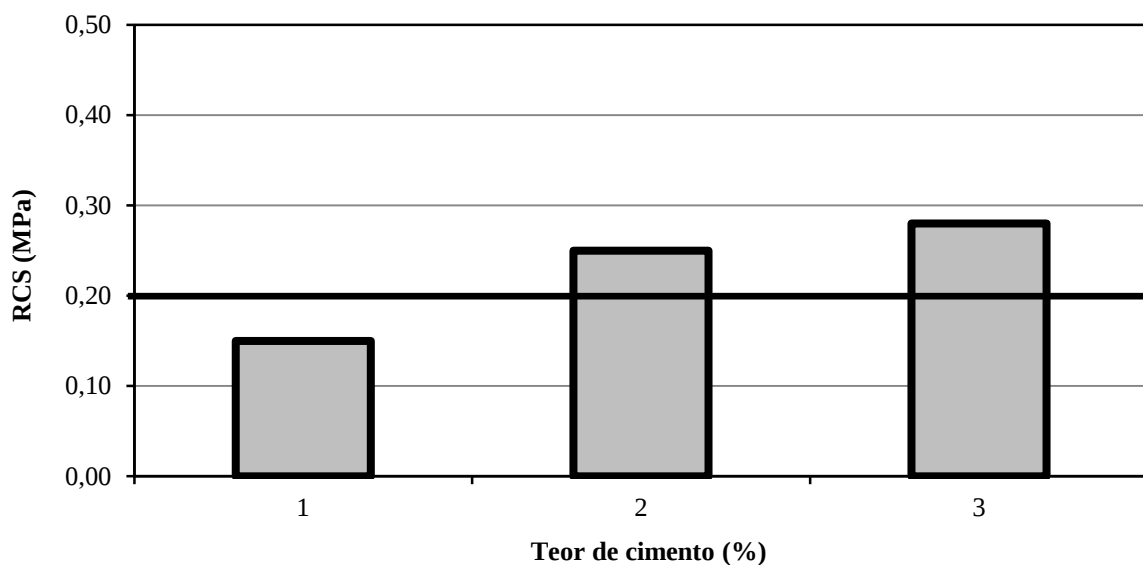
¹ Devido à velocidade maior no ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral com relação ao ensaio de Resistência à Compressão Simples, observa-se que os resultados de RT são superiores aos ensaios de RCS.

² Devido à velocidade maior no ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral com relação ao ensaio de Resistência à Compressão Simples, observa-se que os resultados de RT são superiores aos ensaios de RCS.



Variação no teor de cimento

No exemplo ilustrado abaixo, o teor ótimo de cimento a ser selecionado poderia ser o Teor de 2%, pois foi capaz de gerar misturas com valores de RCS superiores ao mínimo estabelecido (0,2MPa).



Critério de aceitação da mistura

Após a adoção dos teores ótimos de água, emulsão asfáltica e ligante hidráulico, devem ser replicadas as misturas recicladas a frio para a realização de ensaios de RT. As amostras devem ser curadas à temperatura de 60°C, durante 1 dia, antes da realização dos ensaios. Um mínimo de cinco amostras deve ser o ideal para essa etapa. O valor mínimo admissível

para essa propriedade deve ser de 0,40MPa. Misturas com valores médios inferiores a isso devem ser rejeitadas.

