APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS

Neste capítulo será apresentada uma síntese dos resultados dos ensaios realizados durante esta pesquisa. Analisar-se-ão tais resultados, fazendo-se discussões sobre os mesmos no decorrer desta apresentação. A abordagem dos resultados seguirá a mesma seqüência que foi apresentada no Programa Experimental desta dissertação:

- (i) dados obtidos nos ensaios de carregamento cíclico no "Tanque-Teste de Pavimentos" (modelo físico);
- (ii) resultados dos ensaios mecânicos dos corpos de prova extraídos deste modelo físico e,
- (iii) resultados dos ensaios mecânicos executados nos corpos de prova moldados em laboratório.

4.1.

Ensaios dinâmicos no tanque-teste

Os ensaios de cargas cíclicas realizados no "Tanque-Teste de Pavimentos" tiveram início pelo ensaio por carregamento Modo I (carregamento por flexão), na seção-teste 1 (sem reforço), no local correspondente à trinca artificial FL3, de acordo com as Figuras 3.17 e 3.29.

Após a aplicação de mais de um milhão e duzentos mil ciclos (1.200.000) de carga, observou-se afundamento crescente localizado no contorno da placa metálica circular. Isto significa que estava ocorrendo apenas ruptura da mistura asfáltica por puncionamento da placa metálica sobre a superfície do revestimento. Os deslocamentos plásticos aumentavam progressivamente com o decorrer do ensaio, resultando no aumento da deformação plástica do revestimento. Entretanto, os deslocamentos elásticos ou recuperáveis não apresentavam progressão de seus valores, notando-se que, a partir de aproximadamente quinhentos e cinqüenta mil (550.000) aplicações de golpes através do cilindro

4

pneumático, tais deslocamentos praticamente ficaram constantes. Visto que os valores crescentes das deformações elásticas evidenciam a propagação de trincas por reflexão, percebeu-se que as cargas aplicadas ao pavimento experimental tinham magnitude pequena para provocar este fenômeno no pavimento em questão.

No item seguinte serão mostrados os volumes de vazios de corpos de prova extraídos desta seção-teste e os mesmos são muito elevados, certamente porque a compactação por equipamento leve não foi eficiente. Isto pode explicar parte desta deformação plástica e também a placa metálica de canto vivo provoca concentrações de tensões no revestimento asfáltico, o que pode ter ocasionado este afundamento.

Nas Figuras 4.1 e 4.2 são apresentados os gráficos correspondentes aos deslocamentos plásticos e elásticos (com valores em mm), respectivamente, em função do número de golpes aplicados. A pressão aplicada durante este experimento foi de 0,56 MPa, sobre a placa metálica de contato de 15,2 cm de diâmetro.



Figura 4.1: Deslocamento plástico (no local referente à trinca FL3) em função do número de golpes aplicados.



Figura 4.2: Deslocamento elástico (no local referente à trinca FL3) em função do número de golpes aplicados.

Com esta constatação, optou-se por modificar o equipamento pneumático de aplicação de cargas fazendo a aquisição de um cilindro aplicador de cargas de maior capacidade. O carregamento por carga repetida foi reiniciado, agora com pressão de 0,64 MPa e placa retangular de dimensões 15 cm x 30 cm, na mesma seção-teste, porém no local correspondente à trinca C3, sob Modo II de carregamento (por cisalhamento). Porém, novamente se observa um crescente aumento dos deslocamentos plásticos na superfície do revestimento, acompanhada de pouca progressão nos valores dos deslocamentos elásticos. Nas Figuras 4.3 e 4.4 representam-se os deslocamentos plásticos e elásticos (com valores em mm) em função ao número de ciclos de carga aplicados, respectivamente.



Figura 4.3: Deslocamento plástico no local referente à trinca C3 em função do número de golpes aplicados.



Figura 4.4: Deslocamento elástico no local referente à trinca C3 em função do número de golpes aplicados.

Na Figura 4.4, observa-se que com quinhentas mil (500.000) aplicações de ciclos de carga sobre o revestimento, a variação dos deslocamentos recuperáveis deste ponto era quase nula, apresentando um pequeno incremento a partir de um milhão e seiscentos mil ciclos de carga. Este incremento nos deslocamentos ocorreu devido à saturação do subleito, por meio do sistema de abastecimento de água existente no tanque-teste, numa tentativa de elevar as deflexões durante este ensaio. Assim avaliou-se que o tempo de ciclagem para atingir a reflexão da pré – trinca seria muito elevado para concluir eventualmente todos os pontos programados na pesquisa.

Após o tempo decorrido na realização deste ensaio, observou-se como já comentado no Capítulo 3 o comprometimento da estrutura do tanque-teste no ponto de fixação da viga de reação da carga. Com a impossibilidade da continuidade dos ensaios dinâmicos no pavimento experimental, procedeu-se à utilização do revestimento construído no "Tanque-Teste" para extração de corpos de prova para realização de ensaios mecânicos de carga repetida nas prensas.

4.2.

Ensaios mecânicos nos corpos de prova

Os corpos de prova extraídos do "Tanque-Teste" totalizaram quarenta e três (43) amostras, sendo: doze (12) referentes à seção-teste 1, catorze (14) referentes à seção-teste 2 e dezessete (17) para a seção-teste 3.

Após extração e faceamento das amostras, foram obtidos corpos de prova com as dimensões necessárias para a realização de ensaios. Foram feitas as medidas de espessura (ou altura) e de diâmetro, obtendo-se valores médios. Posteriormente, procederam-se as medidas de massa para os cálculos dos parâmetros volumétricos (densidades aparentes ou massas específicas aparentes, e volumes de vazios).

Os corpos de prova moldados em laboratório totalizaram sessenta e três amostras (63): vinte uma (21) para cada situação (sem geogrelha, geogrelha de fibra de vidro e geogrelha de poliéster).

Realizaram-se nos corpos de prova (tanto nos extraídos como nos moldados no compactador giratório) os seguintes ensaios: resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e ensaio de tração em disco circular com fenda. Os ensaios de fadiga foram realizados apenas nos corpos de prova moldados, devido à quantidade reduzida de amostras extraídas. Cabe salientar que estes ensaios de fadiga realizados durante o presente trabalho foram executados sob o modo de solicitação correspondente à tensão controlada (ou carga controlada).

Os ensaios de tração em disco circular com fenda foram realizados com os corpos de prova à temperatura de 10°C, no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ. A execução deste ensaio compreende a aquisição dos dados (carga ou força e abertura da trinca) através do software *TRAPEZIUM X*, que permite a visualização instantânea do gráfico "Força *versus* Abertura da trinca", e gera um arquivo de dados do ensaio. Este permite, posteriormente, plotar a curva Carga *versus* Abertura da trinca, de modo a se obter a energia de fratura de cada corpo de prova ensaiado.

Na Figura 4.5, apresenta-se a tela principal deste software, mostrando a aquisição de dados de um ensaio como exemplo e a geração instantânea do gráfico (Força *versus* Abertura da trinca, medida pelo *clip-on-gage*). Na mesma figura, pode-se observar, dentre outros parâmetros: o pico da curva, representando a carga máxima suportada pelo corpo de prova e a velocidade do ensaio, correspondente a 1,0 mm/minuto, conforme a Norma ASTM 7313-07.

Com os dados fornecidos pelo *TRAPEZIUM X*, utilizou-se de planilha do programa Microsoft EXCEL para plotar o gráfico "Carga *versus* Abertura da trinca". Através do gráfico assim obtido, foi calculada a área sob a curva do gráfico por meio da técnica sugerida na norma ASTM 7313-07: a regra dos trapézios. A seguinte equação (4.1) determina a energia de fratura do corpo de prova:

$$G_{f} = \frac{AREA}{B*(W-a)} \qquad \text{eq. (4.1)}$$

Onde:

- G_f: energia de fratura (J/m²);

- ÁREA: área sob a curva do gráfico "Carga versus Abertura da trinca" (kN/mm);

- B: espessura do corpo de prova (m);

W – a: comprimento (ligamento) da seção disponível para o trincamento no corpo de prova (m).



Figura 4.5: Tela principal do software TRAPEZIUM X (HIRSCH, 2009)

4.2.1.

Corpos de prova extraídos do tanque-teste

Neste item apresentam-se os valores de densidade aparente das misturas asfálticas, volumes de vazios e os resultados dos ensaios mecânicos realizados: resistência à tração (RT), módulo de resiliência (MR) e tração em disco circular com Fenda (DC(T)). No ANEXO A encontram-se as fotos dos corpos de prova extraídos, durante a execução do ensaio de (DC(T)).

a) SEÇÃO-TESTE 1

A seção-teste 1 apresentava o recapeamento asfáltico sobrejacente ao revestimento onde foram realizadas as trincas artificiais. Os valores de massa específica aparente (Gmb) e de volume de vazios (V_V) para os corpos de prova correspondentes a esta seção-teste são apresentados na Tabela 4.1. Nesta tabela, o valor Dmm é a densidade máxima medida no ensaio Rice que permite calcular o V_V .

167

| № DO CORPO DE PROVA | | ALTURA MÉDIA (cm) | DIÂMETRO MÉDIO (cm) | Gmb | Dmm (médio) | Vv |
|------------------------|---------|----------------------|------------------------|-------|----------------|----|
| Lab | Proj | , , , | | | · · · | |
| SG13966 | C1.CP1 | 4,09 | 15,10 | 2,196 | | 13 |
| SG13967 | C1.CP2 | 4,47 | 15,16 | 2,229 | | 12 |
| SG13968 | C1.CP4 | 4,49 | 15,08 | 2,236 | | 11 |
| SG13969 | C1.CP7 | 4,65 | 15,14 | 2,269 | | 10 |
| SG13970 | C1.CP8 | 4,29 | 15,09 | 2,240 | | 11 |
| SG13971 | C1.CP14 | 4,69 | 14,98 | 2,229 | 0 506 | 12 |
| SG13972 | C1.CP15 | 4,86 | 14,97 | 2,483 | 2,320 | 2 |
| SG13973 | C1.CP16 | 4,74 | 14,94 | 2,325 | | 8 |
| SG13974 | C1.CP17 | 4,25 | 14,93 | 2,295 | | 9 |
| SG13975 | C1.CP18 | 4,52 | 14,97 | 2,283 | | 10 |
| SG13976 | C1.CP19 | 4,52 | 14,98 | 2,247 | | 11 |
| SG13977 | C1.CP21 | 4,56 | 14,96 | 2,333 | | 8 |

Tabela 4.1: Valores de parâmetros volumétricos para os corpos de prova extraídos da seção-teste 1 desta pesquisa.

Na Tabela 4.2 apresentam-se os valores de Resistência à Tração por compressão diametral (RT) e de Módulo de Resiliência (MR) para os corpos de prova extraídos da Seção-Teste 1, cujos ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da COPPE/UFRJ.

Na Tabela 4.3, mostram-se os resultados do ensaio de tração em disco circular com fenda (DC(T)) realizados nos corpos de prova extraídos da Seção-Teste 1: obtém-se através dos parâmetros definidos na Equação 4.1 (ÁREA, B e W-a), a energia de fratura para cada corpo de prova, bem como a média, desvio-padrão e coeficiente de variação de tais valores de energia, além da carga máxima suportada pelos corpos de prova.

Para o ensaio (DC(T)) foram reservados cinco (05) corpos de prova da seção 1, sem a camada intermediária de geogrelha. Entretanto, no CP 13969 ocorreu o inconveniente de ruptura passando pelo furo de carregamento, o que impossibilitou a utilização dos dados do ensaio referentes a esta amostra.

| | CP's Extraídos d | o Tanque-Teste (Seção-T | Teste 1) | |
|-------------------------|--|----------------------------|----------|-------|
| Nº do | ALTURA MÉDIA | DIÂMETRO MÉDIO | RT | MR |
| СР | (cm) | (cm) | (MPa) | (MPa) |
| 13966 | 4,09 | 15,10 | 0,40* | 6991 |
| 13967 | 4,47 | 15,16 | 0,52* | 5798 |
| 13968 | 4,49 | 15,08 | 0,42* | 6318 |
| 13970 | 4,29 | 15,09 | 0,39** | - |
| 13974 | 4,25 | 14,93 | 0,86** | - |
| 13976 | 4,52 | 14,98 | 0,73** | - |
| | MÉDIA | | 0,66** | 6369 |
| | DESVIO-PAD | PRÃO | 0,24** | 598 |
| Obs.: "-" "" RT real | significa que não foi realiz lizado após ensaio de MR | zado ensaio no referido CP | | 1 |
| Realit | | | | |

Tabela 4.2: Valores da Resistência à Tração e do Módulo de Resiliência doscorpos de prova extraídos da Seção-Teste 1 desta pesquisa.

Na Figura 4.6, apresenta-se o gráfico dos ensaios (DC(T)) realizados com as curvas referentes a cada corpo de prova reunidas. Na Figura 4.7 ilustra-se o corpo de prova (CP 13969) em que ocorreu a fratura em um dos furos de carregamento durante o ensaio.

Tabela 4.3: Resultados do ensaio de Tração em Disco Circular com Fenda

| | CPs EXTRAÍDOS (SEÇÃO-TESTE 1) | | | | | | | | |
|------------|--------------------------------------|------------|----------------|------------------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------|-------------------------|--|
| CP (SG) | ESPESSURA B (m) | W-a (m) | ÁREA (kN*m) | ENERGIA DE FRATURA Gf (J/m²) | MÉDIA (J/m²) | DESVIO PADRÃO (J/m²) | COEF. DE VARIAÇÃO | CARGA MÁXIMA (kN) | |
| 13971 | 0,0469 | 0,083 | 2,275 | 586,0 | | | | 1,298 | |
| 13972 | 0,0486 | 0,082 | 5,137 | 1396,2 | 919.6 | 341.3 | 37.1 | 1,703 | |
| 13973 | 0,0474 | 0,082 | 3,391 | 868,6 | ,,0 | 511,5 | 57,1 | 2,457 | |
| 13975 | 13975 0,0452 0,081 3,030 827,6 1,549 | | | | | | | | |
| | TEMPERATURA DE ENSAIO: 10º C | | | | | | | | |

Nos Anexos encontram-se fotografias dos ensaios DC(T) realizados em cada corpo de prova nesta pesquisa. Ilustra-se através destas imagens a evolução do trincamento durante o ensaio.



Figura 4.6: Gráfico Carga *versus* Abertura da trinca para os corpos de prova extraídos da Seção-Teste 1



Figura 4.7: Corpo de prova cuja fratura ocorreu através de um dos furos de carregamento

Observa-se que o corpo de prova SG 13973 apresentou a maior carga máxima deste conjunto de amostras. Entretanto, a maior energia de fratura (G_f) não foi verificada nesta amostra, mas sim no corpo de prova SG 13972: 1396,2 J/m². Este corpo de prova apresenta massa específica aparente (Gmb) próxima ao valor da massa específica máxima medida (Gmm ou Dmm), o que indica um volume de vazios igual a 2% (Tabela 4.1). Esta maior densidade resultando numa estrutura

mais compacta ("fechada") deve proporcionar uma maior dificuldade de propagação da trinca, que ao encontrar agregados, pode ter seu crescimento interrompido por algum intervalo de tempo, o que provavelmente resultou numa resistência à fratura ou energia de fratura maior. Os demais corpos de prova que apresentaram maiores volumes de vazios tiveram energias de fratura bem menores, o que evidencia que a energia de fratura é influenciada pelo grau de compactação ou pela densidade da amostra, em que estruturas de misturas asfálticas relativamente mais densas (tipo CBUQ) resultam em maiores resistências à fratura.

b) SEÇÃO-TESTE 2

A seção-teste 2 apresentava camada intermediária de geogrelha de fibra de vidro. Os valores de massa específica aparente (Gmb) e de volume de vazios (Vv) para os corpos de prova extraídos desta seção são apresentados na Tabela 4.4.

Na Tabela 4.5, tem-se os valores de resistência à tração por compressão diametral e de módulo de resiliência para os corpos de prova extraídos desta Seção-Teste. Apresentam-se na mesma tabela os correspondentes valores médios.

Na Tabela 4.6, apresentam-se os resultados do ensaio de Tração em Disco Circular com Fenda (DC(T)) realizados nos corpos de prova extraídos da Seção-Teste (2). Obtém-se através dos parâmetros definidos na Equação 4.1 (ÁREA, B e W-a), a energia de fratura para cada corpo de prova ensaiado, bem como os resultados da média, desvio-padrão e do coeficiente de variação de tais valores de energia, e a carga máxima suportada por cada corpo de prova.

| № DO CORPO DE PROVA | | ALTURA MÉDIA (cm) | DIÂMETRO MÉDIO (cm) | Gmb | Dmm (médio) | Vv |
|------------------------|-------|----------------------|------------------------|-------|----------------|----|
| Lab | Proj | | | | | |
| FV13978 | C2.1 | 4,73 | 14,95 | 2,187 | | 13 |
| FV13979 | C2.2 | 4,46 | 14,97 | 2,150 | | 15 |
| FV13980 | C2.3 | 4,61 | 14,98 | 2,193 | | 13 |
| FV13981 | C2.9 | 4,42 | 15,04 | 2,216 | | 12 |
| FV13982 | C2.12 | 4,55 | 14,99 | 2,255 | | 11 |
| FV13983 | C2.13 | 4,33 | 15,01 | 2,246 | | 11 |
| FV13984 | C2.14 | 4,47 | 14,97 | 2,230 | 2 526 | 12 |
| FV13985 | C2.15 | 4,69 | 14,98 | 2,240 | 2,520 | 11 |
| FV13986 | C2.17 | 4,60 | 14,96 | 2,260 | | 11 |
| FV13987 | C2.18 | 4,50 | 14,95 | 2,273 | | 10 |
| FV13988 | C2.19 | 3,99 | 14,98 | 2,218 | | 12 |
| FV13989 | C2.20 | 4,29 | 14,98 | 2,191 | | 13 |
| FV13990 | C2.21 | 4,65 | 14,97 | 2,197 | | 13 |
| FV13991 | C2.22 | 4,50 | 14,98 | 2,218 | | 12 |

Tabela 4.4: Valores de massa específica aparente e volume de vazios para os

corpos de prova extraídos da seção-teste 2.

Tabela 4.5: Valores da Resistência à Tração e do Módulo de Resiliência dos

corpos de prova extraídos da Seção-Teste 2.

| | CP's Extraídos do Tanque-Teste (Seção-Teste 2) | | | | | | |
|--|--|------------------------|--------|--------|--|--|--|
| Nº do | ALTURA | DIÂMETRO | RT | MR | | | |
| СР | MÉDIA (cm) | MÉDIO (cm) | (MPa) | (MPa) | | | |
| 13978 | 4,73 | 14,95 | 0,54* | 9982,7 | | | |
| 13979 | 4,46 | 14,97 | 0,36* | 9227,0 | | | |
| 13980 | 4,61 | 14,98 | 0,56* | 8052,3 | | | |
| 13983 | 4,33 | 15,01 | 0,94** | - | | | |
| 13984 | 4,47 | 14,97 | 0,75** | - | | | |
| 13989 | 4,29 | 14,98 | 0,55** | - | | | |
| | MÉDIA | | 0,75** | 9087,3 | | | |
| | DESVIO-PAI | DRÃO | 0,20** | 972,7 | | | |
| Obs.: "-" significa que não foi realizado ensaio no referido CP "" RT realizado após ensaio de MR | | | | | | | |
| "**" Realizado o RT somente. | | | | | | | |
| | TEMPERA | ATURA DE ENSAIO: 25º C | | | | | |

| | CPs EXTRAÍDOS (SEÇÃO-TESTE 2) | | | | | | | |
|------------|-------------------------------|------------|----------------|---------------------------------------|-----------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| CP (SG) | ESPESSURA B (m) | W-a (m) | ÁREA (kN*m) | ENERGIA DE FRATURA Gf (J/m²) | MÉDIA (J/m²) | DESVIO PADRÃO (J/m²) | COEF. DE VARIAÇÃ O | CARGA MÁXIMA (kN) |
| 13982 | 0,0455 | 0,083 | 5,157 | 1372,1 | | | | 1,956 |
| 13985 | 0,0469 | 0,082 | 3,539 | 919,2 | | | | 1,429 |
| 13986 | 0,0460 | 0,082 | 4,761 | 1259,1 | 1178,0 | 430,2 | 36,5 | 1,795 |
| 13987 | 0,0450 | 0,081 | 6,345 | 1730,5 | | | | 2,048 |
| 13990 | 0,0465 | 0,082 | 2,311 | 609,1 | | | | 1,195 |
| | | TEN | MPERA | TURA DE E | ENSAIC | D: 10° C | | • |

Tabela 4.6: Resultados do ensaio de Tração em Disco Circular com Fenda

(DC(T)) realizados nos corpos de prova da Seção-Teste 2.

Para o ensaio (DC(T)) foram reservados cinco (05) corpos de prova com a camada intermediária de geogrelha, neste caso de fibra de vidro. Na Figura 4.8, mostra-se o gráfico dos ensaios (DC(T)) realizados nestes corpos de prova, com as curvas referentes a cada corpo de prova reunidas.



Figura 4.8: Gráfico Carga *versus* Abertura da trinca para os corpos de prova extraídos da Seção-Teste 2

Observa-se que o corpo de prova FV 13990 apresentou os menores valores de energia de fratura e da carga máxima. Também o mesmo corpo de prova, diferente das outras amostras de características semelhantes (camada de geogrelha de fibra de vidro), atingiu a carga mínima de 0,10 kN, que constitui o critério para finalização do ensaio. Assim, para este o valor total da abertura de trinca, medido

pelo clip-on-gage, foi de 6,17 mm. Os outros corpos de prova com camada de fibra de vidro atingiam a abertura máxima possível de ser registrada pelo clip-ongage de 10 mm, sem que a carga registrada se reduzisse a 0,10 kN. Pela Tabela 4.4, observa-se que o corpo de prova FV 13990 apresenta o maior volume de vazios dentre as amostras desta seção utilizadas para o ensaio DC(T).

Observa-se também que, à exceção do corpo de prova FV 13990, as amostras atingiram o deslocamento relativo máximo medido pelo *clip-on-gage* evidenciando a influência da geogrelha nas amostras. Este tipo de geossintético não tem função de aumentar os valores de carga de pico, mas sim de resistir às deformações impostas e inibir ou impedir a propagação de trincas. Assim, a presença da geogrelha nestes corpos de prova fez com que após o início da propagação da trinca, as amostras apresentassem uma resistência à fratura adicional (energia de fratura), mostrada através dos valores obtidos de 74% em relação à energia de fratura das amostras obtidas da Seção-Teste 1, excluindo os dois cps diferenciados dos dois grupos de amostras.

c) SEÇÃO-TESTE 3

A seção-teste 3 apresentava a camada intermediária de geogrelha de poliéster. Os valores de massa específica aparente (Gmb) e de volume de vazios (Vv) para os corpos de prova extraídos desta seção são apresentados na Tabela 4.7.

Na Tabela 4.8, tem-se os valores de resistência à tração por compressão diametral e de módulo de resiliência para os corpos de prova extraídos desta Seção-Teste.. Apresentam-se na mesma tabela, os correspondentes valores médios.

Na Tabela 4.9, mostram-se os resultados do ensaio de Tração em Disco Circular com Fenda (DC(T)) realizados nos corpos de prova extraídos desta Seção-Teste (3): obtém-se através dos parâmetros definidos na Equação 4.1 (ÁREA, B e W-a), a energia de fratura para cada corpo de prova ensaiado, bem como os resultados da média, desvio-padrão e do coeficiente de variação de tais valores de energia, e a carga máxima suportada por cada corpo de prova.

| - | | | | | r | |
|------------------------|-------|----------------------|------------------------|-------|----------------|----|
| № DO CORPO DE PROVA | | ALTURA MÉDIA (cm) | DIÂMETRO MÉDIO (cm) | Gmb | Dmm (médio) | vv |
| Lab | Proj | | | | | |
| HT13994 | C3.5 | 4,47 | 15,00 | 2,175 | | 14 |
| HT13995 | C3.6 | 4,47 | 15,05 | 2,207 | | 13 |
| HT13996 | C3.7 | 4,52 | 15,03 | 2,265 | 2,526 | 10 |
| HT13997 | C3.8 | 4,48 | 14,97 | 2,254 | | 11 |
| HT13998 | C3.9 | 4,88 | 15,01 | 2,297 | | 9 |
| HT13999 | C3.10 | 4,29 | 14,99 | 2,356 | | 7 |
| HT14000 | C3.11 | 4,56 | 15,02 | 2,262 | | 10 |
| HT14001 | C3.12 | 4,68 | 15,00 | 2,304 | | 9 |
| HT14002 | C3.13 | 4,77 | 15,00 | 2,296 | | 9 |
| HT14003 | C3.14 | 4,37 | 14,95 | 2,310 | | 9 |
| HT14004 | C3.15 | 4,72 | 15,02 | 2,241 | | 11 |
| HT14005 | C3.17 | 4,53 | 15,01 | 2,247 | | 11 |
| HT14006 | C3.19 | 4,62 | 14,99 | 2,174 | | 14 |
| HT14007 | C3.20 | 4,47 | 15,01 | 2,198 | | 13 |
| HT14008 | C3.21 | 4,53 | 15,01 | 2,234 | | 12 |
| HT14009 | C3.22 | 4,49 | 15,01 | 2,242 | | 11 |
| HT14010 | C3.23 | 4,61 | 15,03 | 2,316 | | 8 |

Tabela 4.7: Valores de massa específica aparente e volume de vazios dos corpos

de prova da seção-teste 3.

Tabela 4.8: Valores da Resistência à Tração e do Módulo de Resiliência dos

corpos de prova extraídos da Seção-Teste 3.

| | CP's Extraídos do Tanque-Teste (Seção-Teste 3) | | | | | | | |
|------------------------------------|--|------------------------------|------------|--------|--|--|--|--|
| Nº do | ALTURA | DIÂMETRO | RT | MR | | | | |
| СР | MÉDIA (cm) | MÉDIO (cm) | (MPa) | (MPa) | | | | |
| 13994 | 4,47 | 15,00 | 0,54* | 9431,7 | | | | |
| 13995 | 4,47 | 15,05 | $0,59^{*}$ | 9208,7 | | | | |
| 13996 | 4,52 | 15,03 | 0,95* | 9740,3 | | | | |
| 13997 | 4,48 | 14,97 | 0,72** | - | | | | |
| 13999 | 4,29 | 14,99 | 0,90** | - | | | | |
| 14005 | 4,53 | 15,01 | 0,90** | - | | | | |
| | MÉDIA | | 0,84** | 9460,2 | | | | |
| | DESVIO-PAI | DRÃO | 0,10** | 267,0 | | | | |
| Obs.: "-" | ' significa que não foi real | lizado ensaio no referido CP | | | | | | |
| "*" RT realizado após ensaio de MR | | | | | | | | |
| "**" Realizado o RT somente. | | | | | | | | |
| TEMPERA | TEMPERATURA DE ENSAIO: 25° C | | | | | | | |

| | CPs EXTRAÍDOS (SEÇÃO-TESTE 3) | | | | | | | | |
|------------|-------------------------------|------------|----------------|---------------------------------------|-----------------|--------------------------------|----------------------|-------------------------|--|
| CP (SG) | ESPESSURA B (m) | W-a (m) | ÁREA (kN*m) | ENERGIA DE FRATURA Gf (J/m²) | MÉDIA (J/m²) | DESVIO PADRÃ O (J/m²) | COEF. DE VARIAÇÃO | CARGA MÁXIMA (kN) | |
| 13998 | 0,0488 | 0,080 | 5,780 | 1474,9 | | | | 1,70 | |
| 14001 | 0,0468 | 0,082 | 4,021 | 1046,6 | | | | 1,47 | |
| 14002 | 0,0477 | 0,081 | 4,511 | 1160,3 | 1089,1 | 246,2 | 22,6 | 1,29 | |
| 14004 | 0,0472 | 0,082 | 3,513 | 902,2 | | | | 1,11 | |
| 14008 | 0,0453 | 0,083 | 3,228 | 861,5 | | | | 0,77 | |
| | TEMPERATURA DE ENSAIO: 10º C | | | | | | | | |

Tabela 4.9: Resultados do ensaio de Tração em Disco Circular com Fenda

(DC(T)) realizados nos corpos de prova da Seção-Teste 3.

Para o ensaio (DC(T)) da seção-teste 3 foram reservados cinco (05) corpos de prova com a camada intermediária de geogrelha, neste caso de poliéster. Na Figura 4.9, mostra-se o gráfico dos ensaios (DC(T)) realizados nestes corpos de prova, com as curvas referentes a cada corpo de prova reunidas.



Figura 4.9: Gráfico Carga *versus* Abertura da trinca para os corpos de prova extraídos da Seção-Teste 3.

Pelo gráfico da Figura 4.9, observa-se que todos os cinco corpos de prova atingiram o deslocamento relativo máximo que poderia ser registrado pelo *clip-on-gage* (10 mm), sem que, no entanto, a carga fosse reduzida a 0,10 kN (critério definido pela norma ASTM 7313-07 para término do ensaio). A maior energia de

fratura e também a carga máxima foram obtidas pelo corpo de prova HT 13998 e os menores valores correspondem ao corpo de prova HT 14008.

Constata-se, através das Tabelas 4.7 e 4.9, a correspondência entre os valores de energia de fratura e volume de vazios para estes corpos de prova. O corpo de prova HT 13998 apresentou valor de energia de fratura (G_f) igual a 1474,9 J/m² e teor de vazios igual a 8%. Já o corpo de prova HT 14008, que apresentou o menor valor de energia de fratura (G_f = 861,5 J/m²), apresentou um volume de vazios igual a 12%. Isto continua mostrando que estruturas mais "fechadas" em concreto asfáltico tendem a apresentar maiores resistências a fratura.

Comparando-se os corpos de prova de menores cargas máximas (ou de pico) suportadas durante o ensaio de tração, das Seções-Teste 1 e 3: SG 13971 e o HT 14008, pode-se comentar que: apesar do corpo de prova sem geogrelha apresentar maior valor da carga máxima, o corpo de prova com a geogrelha de poliéster suportou o carregamento sem atingir a carga limite de finalização do ensaio (0,10 kN), o que resultou em maior energia de fratura nesta amostra. Isto evidencia que a presença da geogrelha proporcionou resistência à fratura adicional. Esta contribuição para o aumento da resistência à propagação da trinca se manifesta após a fase de início do trincamento induzido pela pré-trinca. Isto mostra que o desempenho da geogrelha como inibidor ou bloqueio da propagação de trincas em misturas asfálticas é bastante satisfatório. Estes corpos de prova com geogrelha de poliéster apresentaram uma resistência à fratura adicional (energia de fratura), mostrada através dos valores de energia de fratura média que foi 43% em relação à energia de fratura das amostras obtidas da Seção-Teste 1, excluindo o cp que apresentou comportamento diferenciado deste grupo de amostras.

Analisando-se, também, em conjunto, as Tabelas 4.1, 4.4 e 4.7, nota-se que os valores de volumes de vazios foram muito elevados (com valor médio em torno de 11%), para uma mistura asfáltica que foi dosada para ser de característica densa, um concreto asfáltico (CA) que em geral apresenta de 4 a 6% de Vv. Assim, como comentado, este fato pode provavelmente ser parte do motivo dos ensaios de carga repetida realizados no Tanque-Teste apresentarem elevada deformação plástica superficial no revestimento asfáltico, onde a placa metálica

de carregamento puncionava a massa do revestimento, penetrando literalmente no interior da massa betuminosa. Tal fato deve-se à forma de compactação desta massa asfáltica lançada no tanque-teste, que foi feita com soquete vibratório, o que proporcionou baixa energia de compactação comparada aos equipamentos tradicionais de compactação utilizados na pavimentação de ruas e estradas (rolos compactadores).

4.2.2.

Corpos de prova moldados em laboratório

No ANEXO B encontram-se as fotos dos corpos de prova moldados, durante a execução do ensaio de (DC(T)). Cabe salientar que estes ensaios de tração em disco circular com fenda (DC(T)) foram primeiramente executados nos corpos de prova moldados e, então posteriormente realizados nos corpos de prova extraídos.

a) corpos de prova sem camada de geogrelha

Foram moldados no compactador giratório corpos de prova com duas camadas, no Laboratório de Pavimentos da COPPE/UFRJ, de acordo com os procedimentos descritos no Capítulo 3, sem apresentar a camada intermediária de geogrelha.

São apresentados na Tabela 4.10 os valores de: massa específica aparente (Gmb), volume de vazios (V_V), vazios com betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM) e de relação betume/vazios (RBV) para estes corpos de prova.

| | | | | 0 | 0 | | | | |
|---------------------|-------------------|-----------------|---------------------------|-------|-------|-----------|------|------|------|
| Nº E CORP PRO | DO O DE IVA | ALTURA MÉDIA | DIÂMETRO MÉDIO (cm) | Gmb | Dmm | Vv (%) | VCB | VAM | RBV |
| Lab | Proj | (CIII) | (cm) | | | | | | |
| 13901 | SG1 | 4,90 | 14,97 | 2,446 | | 3,5 | 11,1 | 14,6 | 76,3 |
| 13902 | SG2 | 4,93 | 14,98 | 2,438 | | 3,8 | 11,1 | 14,9 | 74,6 |
| 13903 | SG3 | 4,92 | 14,98 | 2,445 | | 3,5 | 11,1 | 14,6 | 76,1 |
| 13904 | SG4 | 4,92 | 14,98 | 2,421 | | 4,4 | 11,0 | 15,5 | 71,3 |
| 13905 | SG5 | 4,95 | 14,98 | 2,435 | | 3,9 | 11,1 | 15,0 | 73,9 |
| 13906 | SG6 | 4,91 | 14,97 | 2,449 | | 3,3 | 11,2 | 14,5 | 76,9 |
| 13907 | SG7 | 4,95 | 14,98 | 2,431 | | 4,1 | 11,1 | 15,1 | 73,2 |
| 13908 | SG8 | 4,98 | 14,99 | 2,433 | | 4,0 | 11,1 | 15,1 | 73,6 |
| 13909 | SG9 | 4,98 | 14,97 | 2,431 | | 4,1 | 11,1 | 15,1 | 73,2 |
| 13910 | SG10 | 5,00 | 14,98 | 2,432 | | 4,0 | 11,1 | 15,1 | 73,3 |
| 13911 | SG11 | 4,95 | 14,97 | 2,433 | 2,534 | 4,0 | 11,1 | 15,1 | 73,5 |
| 13912 | SG12 | 4,95 | 14,98 | 2,432 | | 4,0 | 11,1 | 15,1 | 73,3 |
| 13913 | SG13 | 4,94 | 14,97 | 2,444 | | 3,6 | 11,1 | 14,7 | 75,8 |
| 13914 | SG14 | 4,90 | 14,98 | 2,445 | | 3,5 | 11,1 | 14,6 | 76,0 |
| 13915 | SG15 | 4,92 | 14,97 | 2,439 | | 3,7 | 11,1 | 14,8 | 74,8 |
| 13916 | SG16 | 4,99 | 14,98 | 2,443 | | 3,6 | 11,1 | 14,7 | 75,7 |
| 13917 | SG17 | 4,95 | 14,98 | 2,435 | | 3,9 | 11,1 | 15,0 | 73,9 |
| 13918 | SG18 | 4,95 | 14,98 | 2,432 | | 4,0 | 11,1 | 15,1 | 73,3 |
| 13919 | SG19 | 4,92 | 14,98 | 2,443 | | 3,6 | 11,1 | 14,7 | 75,7 |
| 13920 | SG20 | 4,93 | 14,97 | 2,431 | | 4,1 | 11,1 | 15,1 | 73,2 |
| 13921 | SG21 | 5.02 | 14.97 | 2.422 | | 4.4 | 11.0 | 15.4 | 71.5 |

Tabela 4.10: Valores de parâmetros volumétricos para os corpos de prova

moldados sem geogrelha.

Na Tabela 4.11, tem-se os valores de resistência à tração por compressão diametral e de módulo de resiliência para alguns destes corpos de prova, cujos ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da COPPE/UFRJ. Nas Figuras 4.10 e 4.11 apresentam-se as curvas de fadiga para os ensaios realizados nos corpos de prova moldados sem a presença da camada de geogrelha.

| | CP's moldados (sem geogrelha) | | | | | | | |
|--|-------------------------------|------------|--------|---------|--|--|--|--|
| Nº do | ALTURA | DIÂMETRO | RT | MR | | | | |
| СР | MÉDIA (cm) | MÉDIO (cm) | (MPa) | (MPa) | | | | |
| 13919 | 4,92 | 14,98 | 1,26* | 10320,3 | | | | |
| 13905 | 4,95 | 14,98 | 0,93* | 10129,7 | | | | |
| 13906 | 4,91 | 14,97 | 1,00* | 10659,7 | | | | |
| 13901 | 4,90 | 14,97 | 0,79** | - | | | | |
| 13902 | 4,93 | 14,98 | 0,84** | - | | | | |
| 13903 | 4,92 | 14,98 | 0,85** | - | | | | |
| | MÉDIA | | 0,83** | 10369,9 | | | | |
| | DESVIO-PAI | DRÃO | 0,03** | 268,45 | | | | |
| Obs.: "-" significa que não foi realizado ensaio no referido CP " [*] " RT realizado após ensaio de MR | | | | | | | | |
| "**" Realizado o RT somente. | | | | | | | | |
| TEMPERA | TEMPERATURA DE ENSAIO: 25° C | | | | | | | |

Tabela 4.11: Valores da Resistência à Tração e do Módulo de Resiliência dos corpos de prova moldados sem geogrelha

Para o ensaio de tração em disco circular com fenda (DC(T)) para os corpos de prova moldados em laboratório, destinou-se três corpos de prova para cada condição de camada intermediária: três (03) sem geogrelha, três (03) com camada de geogrelha de fibra-de-vidro e três (03) com camada de geogrelha de poliéster. A razão para tal quantidade deve-se a terem sido moldados vinte e um (21) corpos de prova para cada condição, com ou sem geossintéticos e reservaram-se dezoito (18) corpos de prova para ensaios de MR, RT e Fadiga, correspondentes a cada situação de camada intermediária.

Entretanto, puderam-se aproveitar apenas os resultados de um corpo de prova de cada condição de camada intermediária, pois houveram alguns imprevistos ou problemas durante a execução deste ensaio tais como: as placas metálicas utilizadas para acoplagem do *clip-on-gage* desprenderam-se de alguns corpos de prova durante o ensaio ou a ruptura do corpo ocorreu em um dos furos de carregamento. Com isso, não se obteve nem amostragem suficiente para cálculos estatísticos básicos.



Figura 4.10: Gráfico de Vida de Fadiga (número de golpes *versus* diferença de tensões) para os corpos de prova moldados sem presença de camada intermediária de geogrelha



Figura 4.11: Gráfico de Vida de Fadiga (número de golpes *versus* deformação específica resiliente) para os corpos de prova moldados sem presença de camada intermediária de geogrelha

Na Figura 4.12 mostra-se o corpo de prova sem presença de geogrelha que apresentou ruptura no furo de carregamento durante o ensaio. No outro corpo de prova, cujo resultado não pode ser aproveitado, ocorreu o desprendimento das placas metálicas coladas no chanfro (ou na face chanfrada).



Figura 4.12: Corpo de prova sem geogrelha (SG 13904) com ruptura no furo de carregamento

Na Tabela 4.12, mostra-se o resultado do ensaio de Tração em Disco Circular com Fenda (DC(T)) realizado no corpo de prova moldado sem a presença da camada de geogrelha e obtém-se através dos parâmetros definidos na Equação 4.1 (ÁREA, B e W-a), a energia de fratura para o corpo de prova ensaiado e a carga máxima suportada. Na Figura 4.13, mostra-se o gráfico do ensaio (DC(T)) realizado no corpo de prova sem geogrelha (SG 13921).

Tabela 4.12: Resultado do ensaio de Tração em Disco Circular com Fenda (DC(T)) realizado no corpo de prova sem camada de geogrelha moldado em laboratório

| CP MOLDADO (SEM GEOGRELHA) | | | | | |
|------------------------------|--------------------|------------|----------------|---------------------------------|----------------------|
| CP (SG) | ESPESSURA B (m) | W-a (m) | ÁREA (kN*m) | ENERGIA DE FRATURA (J/m²) | CARGA MÁXIMA (kN) |
| 13921 | 0,0502 | 0,0818 | 6,357 | 1548,2 | 2,30 |
| TEMPERATURA DE ENSAIO: 10° C | | | | | |



Figura 4.13: Gráfico Carga *versus* Abertura da trinca para o corpo de prova (SG 13921)

b) corpos de prova com camada de geogrelha de fibra de vidro

Os corpos de prova reforçados com geogrelha de fibra de vidro foram moldados no compactador giratório, no Laboratório de Pavimentos da COPPE/UFRJ, de acordo com os procedimentos descritos no Capítulo 3.

Os valores de: massa específica aparente (Gmb), volume de vazios (V_V), vazios com betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM) e de relação betume/vazios (RBV) para estes corpos de prova são apresentados na Tabela 4.13.

Na Tabela 4.14, tem-se os valores de resistência à tração por compressão diametral e de módulo de resiliência para alguns destes corpos de prova, cujos ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da COPPE/UFRJ. Apresentam-se na mesma tabela, os correspondentes valores médios.

| Nº E CORP¢ PRO |)O D DE VA | ALTURA MÉDIA | DIÂMETRO MÉDIO | Gmb | Dmm | Vv (%) | VCB | VAM | RBV |
|----------------------|------------------|-----------------|-------------------|-------|-------|-----------|------|------|------|
| Lab | Proj | (cm) | (CIII) | | | | | | |
| 13880 | FV1 | 4,99 | 14,99 | 2,425 | | 4,5 | 11,0 | 15,6 | 70,9 |
| 13881 | FV2 | 4,99 | 14,99 | 2,422 | | 4,7 | 11,0 | 15,7 | 70,3 |
| 13882 | FV3 | 4,98 | 14,99 | 2,428 | | 4,4 | 11,1 | 15,5 | 71,4 |
| 13883 | FV4 | 5,01 | 14,99 | 2,414 | | 5,0 | 11,0 | 16,0 | 68,9 |
| 13884 | FV5 | 5,01 | 14,98 | 2,427 | | 4,5 | 11,1 | 15,5 | 71,3 |
| 13885 | FV6 | 5,00 | 14,98 | 2,416 | | 4,9 | 11,0 | 15,9 | 69,2 |
| 13886 | FV7 | 5,01 | 14,97 | 2,417 | | 4,8 | 11,0 | 15,9 | 69,5 |
| 13887 | FV8 | 5,00 | 14,98 | 2,423 | | 4,6 | 11,0 | 15,6 | 70,5 |
| 13888 | FV9 | 5,04 | 14,98 | 2,420 | | 4,7 | 11,0 | 15,8 | 70,0 |
| 13889 | FV10 | 5,07 | 14,98 | 2,409 | | 5,2 | 11,0 | 16,1 | 68,0 |
| 13890 | FV11 | 5,09 | 14,98 | 2,410 | 2,540 | 5,1 | 11,0 | 16,1 | 68,3 |
| 13891 | FV12 | 5,03 | 14,98 | 2,397 | | 5,6 | 10,9 | 16,5 | 66,0 |
| 13892 | FV13 | 5,00 | 15,00 | 2,410 | | 5,1 | 11,0 | 16,1 | 68,2 |
| 13893 | FV14 | 5,01 | 14,98 | 2,411 | | 5,1 | 11,0 | 16,0 | 68,4 |
| 13894 | FV15 | 5,01 | 14,98 | 2,422 | | 4,7 | 11,0 | 15,7 | 70,3 |
| 13895 | FV16 | 5,01 | 14,98 | 2,407 | | 5,2 | 11,0 | 16,2 | 67,6 |
| 13896 | FV17 | 4,99 | 14,98 | 2,423 | | 4,6 | 11,0 | 15,6 | 70,6 |
| 13897 | FV18 | 5,06 | 14,97 | 2,394 | | 5,8 | 10,9 | 16,6 | 65,5 |
| 13898 | FV19 | 5,04 | 14,96 | 2,411 | | 5,1 | 11,0 | 16,1 | 68,3 |
| 13899 | FV20 | 5,02 | 14,99 | 2,407 | | 5,2 | 11,0 | 16,2 | 67,7 |
| 13900 | FV21 | 5,02 | 14,97 | 2,404 | | 5,4 | 11,0 | 16,3 | 67,2 |

Tabela 4.13: Valores de parâmetros volumétricos para os corpos de prova

moldados com geogrelha de fibra de vidro.

Para o ensaio de tração em disco circular com fenda (DC(T)) nos corpos de prova moldados em laboratório, destinou-se três corpos de prova, entretanto pelos motivos já mencionados anteriormente, somente pôde ser aproveitado dado de um dos ensaios, pois nos demais corpos de prova as placas para acoplagem do *clipon-gage* se soltaram durante o ensaio.

| | CP's mo | oldados (fibra de vidro) | | | | |
|------------------------------|--|--------------------------|--------|-------|--|--|
| Nº do | ALTURA | DIÂMETRO | RT | MR | | |
| СР | MÉDIA (cm) | MÉDIO (cm) | (MPa) | (MPa) | | |
| 13884 | 5,01 | 14,98 | 0,80* | 8634 | | |
| 13887 | 5,00 | 14,98 | 0,88* | 8848 | | |
| 13896 | 5,00 | 14,98 | 0,98* | 9541 | | |
| 13880 | 4,99 | 14,99 | 0,73** | - | | |
| 13881 | 4,99 | 14,99 | 0,66** | - | | |
| 13882 | 4,98 | 14,99 | 0,73** | - | | |
| | MÉDIA | | 0,71** | 9008 | | |
| | DESVIO-PADRÃO 0,04 ^{**} 47 | | | | | |
| Obs.: "-" "" RT real | Obs.: "-" significa que não foi realizado ensaio no referido CP " [*] " RT realizado após ensaio de MR | | | | | |
| "**" Realizado o RT somente. | | | | | | |
| TEMPERATURA DE ENSAIO: 25° C | | | | | | |

Tabela 4.14: Valores da Resistência à Tração e do Módulo de Resiliência doscorpos de prova moldados com geogrelha de fibra de vidro

Nas Figuras 4.14 e 4.15, apresentam-se as curvas de fadiga para os ensaios realizados nos corpos de prova moldados com a presença da camada de geogrelha de fibra de vidro.



Figura 4.14: Gráfico de Vida de Fadiga (número de golpes *versus* diferença de tensões) para os corpos de prova moldados com a presença de camada intermediária de geogrelha de fibra de vidro.



Figura 4.15: Gráfico de Vida de Fadiga (número de golpes *versus* deformação específica resiliente) para os corpos de prova moldados com a presença de camada intermediária de geogrelha de fibra de vidro.

Na Tabela 4.15, mostra-se o resultado do ensaio de tração em disco circular com fenda (DC(T)) realizado no corpo de prova moldado com a geogrelha de fibra de vidro: obtém-se através dos parâmetros definidos na Equação 4.1 (ÁREA, B e W-a), a energia de fratura para o corpo de prova ensaiado e a carga máxima suportada por cada corpo de prova. Na Figura 4.16, mostra-se o gráfico do ensaio (DC(T)) realizado no corpo de prova FV 13891.

Tabela 4.15: Resultado do ensaio de Tração em Disco Circular com Fenda (DC(T)) realizado no corpo de prova com camada de geogrelha moldado em

| 1 1 | |
|---------|-------|
| lahorat | orio |
| luoolu | .0110 |

| CP MOLDADO (GEOGRELHA: FIBRA DE VIDRO) | | | | | | |
|--|--------------------|------------|----------------|---------------------------------|----------------------|--|
| CP (FV) | ESPESSURA B (m) | W-a (m) | ÁREA (kN*m) | ENERGIA DE FRATURA (J/m²) | CARGA MÁXIMA (kN) | |
| 13891 | 0,0503 | 0,0808 | 6,660 | 1638,7 | 1,29 | |
| TEMPERATURA DE ENSAIO: 10° C | | | | | | |



Figura 4.16: Gráfico Carga *versus* Abertura da trinca para o corpo de prova FV 13891

c) corpos de prova com camada de geogrelha de poliéster

Os corpos de prova reforçados com camada intermediária de geogrelha de poliéster foram moldados no Laboratório de Pavimentos da COPPE/UFRJ, de acordo com os procedimentos descritos no Capítulo 3.

Os valores de: massa específica aparente (Gmb), volume de vazios (V_V), vazios com betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM) e de relação betume/vazios (RBV) para estes corpos de prova são apresentados na Tabela 4.16.

| Nº E CORP¢ PRO | DO D DE VA | ALTURA MÉDIA | DIÂMETRO MÉDIO | Gmb | Dmm | Vv (%) | VCB | VAM | RBV |
|----------------------|------------------|-----------------|-------------------|-------|-------|-----------|------|------|------|
| Lab | Proj | (CIII) | (CIII) | | | | | | |
| 13859 | HT1 | 4,91 | 14,99 | 2,449 | | 3,5 | 11,2 | 14,7 | 76,0 |
| 13860 | HT2 | 4,95 | 14,99 | 2,437 | | 4,0 | 11,1 | 15,1 | 73,7 |
| 13861 | HT3 | 4,96 | 14,98 | 2,436 | | 4,0 | 11,1 | 15,1 | 73,3 |
| 13862 | HT4 | 4,91 | 14,97 | 2,451 | | 3,4 | 11,2 | 14,6 | 76,4 |
| 13863 | HT5 | 4,98 | 14,99 | 2,439 | | 3,9 | 11,1 | 15,0 | 74,0 |
| 13864 | HT6 | 4,98 | 14,98 | 2,431 | | 4,2 | 11,1 | 15,3 | 72,4 |
| 13865 | HT7 | 5,03 | 14,98 | 2,416 | | 4,8 | 11,0 | 15,8 | 69,6 |
| 13866 | HT8 | 4,98 | 14,98 | 2,435 | | 4,1 | 11,1 | 15,1 | 73,2 |
| 13867 | HT9 | 5,08 | 14,98 | 2,415 | | 4,8 | 11,0 | 15,8 | 69,5 |
| 13868 | HT10 | 5,04 | 15,03 | 2,414 | | 4,9 | 11,0 | 15,9 | 69,2 |
| 13869 | HT11 | 4,96 | 14,99 | 2,439 | 2,538 | 3,9 | 11,1 | 15,0 | 73,9 |
| 13870 | HT12 | 4,94 | 14,98 | 2,445 | | 3,6 | 11,1 | 14,8 | 75,3 |
| 13871 | HT13 | 4,95 | 14,98 | 2,440 | | 3,9 | 11,1 | 15,0 | 74,1 |
| 13872 | HT14 | 4,99 | 14,98 | 2,439 | | 3,9 | 11,1 | 15,0 | 74,0 |
| 13873 | HT15 | 4,98 | 14,97 | 2,441 | | 3,8 | 11,1 | 14,9 | 74,5 |
| 13874 | HT16 | 4,95 | 14,98 | 2,443 | | 3,7 | 11,1 | 14,9 | 74,9 |
| 13875 | HT17 | 4,95 | 14,99 | 2,445 | | 3,7 | 11,1 | 14,8 | 75,2 |
| 13876 | HT18 | 4,93 | 14,98 | 2,434 | | 4,1 | 11,1 | 15,2 | 73,0 |
| 13877 | HT19 | 4,96 | 14,98 | 2,434 | | 4,1 | 11,1 | 15,2 | 73,0 |
| 13878 | HT20 | 4,95 | 14,98 | 2,441 | | 3,8 | 11,1 | 14,9 | 74,4 |
| 13879 | HT21 | 4,95 | 14,99 | 2,437 | | 4,0 | 11,1 | 15,1 | 73,7 |

Tabela 4.16: Valores de parâmetros volumétricos para os corpos de prova

moldados com geogrelha de poliéster.

Na Tabela 4.17, tem-se os valores de resistência à tração por compressão diametral e de módulo de resiliência para alguns destes corpos de prova, cujos ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da COPPE/UFRJ. Apresentam-se na mesma tabela, os correspondentes valores médios. Nas Figuras 4.17 e 4.18, apresentam-se as curvas de fadiga para os ensaios realizados nos corpos de prova moldados com a presença da camada de geogrelha de poliéster.

Para o ensaio de tração em disco circular com fenda (DC(T)) três corpos de prova moldados em laboratório foram utilizados. Entretanto em dois dos corpos de prova ocorreram os mesmos problemas dos anteriores: as placas para acoplagem do *clip-on-gage* se soltaram durante o ensaio ou houve ruptura pelo furo de

carregamento. Na Figura 4.19 mostra-se o corpo de prova HT 13867 em que ocorreu a ruptura pelo furo de carregamento durante o ensaio.

| | CP's moldados (poliéster) | | | | | |
|--|---|------------|--------|--------|--|--|
| Nº do | ALTURA | DIÂMETRO | RT | MR | | |
| СР | MÉDIA (cm) | MÉDIO (cm) | (MPa) | (MPa) | | |
| 13862 | 4,91 | 14,97 | 0,87* | 8743,0 | | |
| 13863 | 4,98 | 14,99 | 0,81* | 7200,7 | | |
| 13864 | 4,98 | 14,98 | 0,91* | 7910,7 | | |
| 13859 | 4,91 | 14,99 | 0,76** | - | | |
| 13860 | 4,95 | 14,99 | 0,73** | - | | |
| 13861 | 4,96 | 14,98 | 0,74** | - | | |
| I | MÉDIA | | 0,74** | 7951,4 | | |
| | DESVIO-PADRÃO 0,02 ^{**} 772,0 | | | | | |
| Obs.: "-" significa que não foi realizado ensaio no referido CP | | | | | | |
| "*" RT realizado após ensaio de MR "*"" Realizado o RT somente. TEMPERATURA DE ENSAIO: 25° C | | | | | | |

Tabela 4.17: Valores da Resistência à Tração e do Módulo de Resiliência dos corpos de prova moldados com geogrelha de poliéster



Figura 4.17: Gráfico de Vida de Fadiga (número de golpes *versus* diferença de tensões) para os corpos de prova moldados com a presença de camada intermediária de geogrelha de poliéster.



Figura 4.18: Gráfico de Vida de Fadiga (número de golpes *versus* deformação específica resiliente) para os corpos de prova moldados com a presença de camada intermediária de geogrelha de poliéster.

Na Tabela 4.18, mostra-se o resultado do ensaio de tração em disco circular com fenda (DC(T)) realizado no corpo de prova moldado com a geogrelha de poliéster: obtém-se através dos parâmetros definidos na Equação 4.1 (ÁREA, B e W-a), a energia de fratura para o corpo de prova ensaiado e a carga máxima suportada pelo corpo de prova. Na Figura 4.20, mostra-se o gráfico do ensaio (DC(T)) realizado no corpo de prova HT 13865, em que inesperadamente o *clip-on-gage* não prosseguiu nos registros dos deslocamentos da abertura da trinca a partir do valor de 8,84 mm, além da carga imposta neste ensaio não ter atingido o critério de parada do ensaio (0,10 kN), pois ainda apresentava valor de 0,28 kN.



Figura 4.19: Corpo de prova (HT 13867) com camada intermediária de geogrelha de poliéster cuja ruptura ocorreu em um dos furos de carregamento.

| CP MOLDADO (GEOGRELHA: POLIÉSTER) | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------|------------|----------------|---------------------------------|----------------------|
| CP (HT) | ESPESSURA B (m) | W-a (m) | ÁREA (kN*m) | ENERGIA DE FRATURA (J/m²) | CARGA MÁXIMA (kN) |
| 13865 | 0,0503 | 0,0806 | 6,678 | 1647,3 | 2,03 |
| TEMPERATURA DE ENSAIO: 10° C | | | | | |

Tabela 4.18: Resultado do ensaio de Tração em Disco Circular com Fenda (DC(T)) realizado no corpo de prova com camada de geogrelha moldado em

laboratório



Figura 4.20: Gráfico Carga versus Abertura da trinca para o corpo de prova (HT)

4.3.

Comparativo entre os resultados dos ensaios

Os ensaios executados nos corpos de prova nas três condições de extração e moldagem, cujos valores foram apresentados nos itens anteriores, serão comparados pelos seus valores médios, visando interpretar os resultados e mostrar qual a influência da presença de reforço de geogrelha.

a) corpos de prova extraídos

O conjunto de valores médios do ensaio de resistência à tração estática está mostrado na Figura 4.21. Observa-se nesta figura que os corpos de prova com camada de geogrelha de poliéster (HT) apresentaram o maior valor médio de RT; o menor valor médio correspondeu aos corpos de prova sem presença de geogrelha (SG).

Para os ensaios de módulo de resiliência (MR), na Figura 4.22 são apresentados os valores médios. Observa-se desta figura que os corpos de prova mantiveram a mesma tendência apresentada pelos resultados de RT: os corpos de prova que com camada de geogrelha de poliéster (HT) apresentaram o maior valor médio de MR e o menor valor médio de MR correspondeu aos corpos de prova sem presença de geogrelha (SG).



Figura 4.21: Valores médios de resistência à tração estática (SG: sem geogrelha; FV: geogrelha de fibra de vidro e HT: geogrelha de poliéster) das amostras deste estudo



Figura 4.22: Valores médios de módulo de resiliência das amostras deste estudo

Na Figura 4.23 está apresentado o gráfico ilustrando a relação MR/RT. Observase que os corpos de prova correspondentes à situação com camada de geogrelha de fibra de vidro apresentaram o maior valor para a relação MR/RT e o menor valor foi para a situação sem presença de geogrelha.



Figura 4.23: Relação entre Módulo de Resiliência (MR) e Resistência à Tração (RT) para os corpos de prova extraídos

Para os ensaios de tração em disco circular com fenda (DC(T)), são mostrados nas Figuras 4.24 e 4.25, os valores médios de energia de fratura e da carga máxima (ou de pico) para os corpos de prova extraídos sem geogrelha, com geogrelha de fibra de vidro e com geogrelha de poliéster. Observa-se destas figuras que: o maior valor médio para a energia de fratura foi obtido para os corpos de prova que apresentavam a camada de geogrelha de fibra de vidro; já o menor valor médio de energia de fratura correspondeu às amostras sem a presença de camada intermediária de geogrelha.



Figura 4.24: Valores médios de energia de fratura para os corpos de prova

ensaiados (DC(T))



Figura 4.25: Valores médios da carga máxima dos corpos de prova ensaiados (DC(T))

Constata-se uma relação entre a energia de fratura e o parâmetro MR/RT para estes corpos de prova ensaiados. O parâmetro MR/RT é um indicador do comportamento estrutural de uma mistura asfáltica (SANTOS, 2005). Os corpos de prova com camada de geogrelha de fibra de vidro apresentaram os maiores valores de MR/RT, bem como de energia de fratura, e os corpos de prova sem presença de geogrelha apresentaram os menores valores médios para ambos os parâmetros.

A Figura 4.26 mostra uma correlação com bom ajuste ($R^2 = 0.95$) entre os valores médios de energia de fratura obtidos e o parâmetro MR/RT para todos os corpos



Figura 4.26: Correlação entre MR/RT e Energia de fratura para os corpos de prova ensaiados

Entretanto, observa-se que as amostras sem geogrelha apresentaram maior valor médio de carga máxima (1,75 kN) no ensaio de tração em disco circular com fenda (DC(T)), apesar de terem apresentado o menor valor médio de energia de fratura (919,6 J/m²). Isto é indicativo da influência positiva da presença da geogrelha como camada destinada a impedir ou atrasar a propagação de trincas. Apesar das amostras com geogrelha de poliéster apresentarem o menor valor médio de carga máxima (1,27 kN) dentre os corpos de prova ensaiados, estas tiveram valor de energia de fratura (1089,1 J/m²) relativamente próximo ao apresentado pelas amostras com geogrelha de fibra de vidro (1178,0 J/m²), que foi o maior valor.

Analisando-se os mesmos parâmetros (energia de fratura, carga máxima suportada e MR/RT), porém excluindo-se dos mesmos aqueles corpos de prova cujos valores apresentaram certa discrepância em relação aos demais (correspondentes aos corpos de prova: SG 13972; FV 13990 e HT 14008), tem-se os seguintes gráficos (Figuras 4.27, 4.28 e 4.29) de acordo com os valores médios recalculados para tais parâmetros:



Figura 4.27: Valores médios recalculados de energia de fratura para os corpos de prova ensaiados (DC(T)), excluindo-se os corpos de prova de valores discrepantes



Figura 4.28: Valores médios recalculados da carga máxima dos corpos de prova ensaiados (DC(T)), excluindo-se os corpos de prova de valores discrepantes



Figura 4.29: Correlação entre MR/RT e Energia de fratura para os corpos de prova ensaiados, excluindo-se os corpos de prova de valores discrepantes

Observando-se as Figuras 4.24 e 4.27, verifica-se que, mesmo excluindo os corpos de prova cujos valores apresentaram uma discrepância em relação aos demais, a energia de fratura média é maior para as amostras com presença da geogrelha de fibra de vidro e a menor energia de fratura verifica-se para as amostras sem presença de geogrelha. Pelas Figuras 4.25 e 4.28 verifica-se que, na análise sem os corpos de prova que apresentaram teores de vazios discrepantes, o maior valor de carga máxima suportada ocorre para as amostras com presença de geogrelha de fibra de vidro e não mais para aquelas sem geogrelha. Os menores valores de carga máxima permaneceram para aquelas amostras com geogrelha de poliéster. Pela Figura 4.29, observa-se a mesma tendência verificada na Figura 4.26, em que maiores valores do parâmetro MR/RT correspondem a também maiores valores de energia de fratura. Observa-se uma maior inclinação para aquele gráfico (Figura 4.29) em relação ao da Figura 4.26, o que mostra um relativo aumento entre a correspondência dos dois parâmetros. A intenção de excluir tais corpos de prova que apresentaram um comportamento relativamente diferente em relação aos demais foi de verificar a sua influência nos parâmetros (energia de fratura e carga máxima). Entretanto observa-se que, apenas para os valores médios da carga máxima suportada, modificou-se a tendência obtida anteriormente com todos os corpos de prova: as amostras com fibra de vidro passaram a apresentar o maior valor médio, diferentemente da análise sem excluir os corpos de prova com teores de vazios discrepantes em que o maior valor médio foi das amostras sem presença de geogrelha.

b) corpos de prova moldados

Os resultados dos valores médios dos ensaios de RT dos corpos de prova moldados estão mostrados na Figura 4.30. Observa-se nesta figura que os corpos de prova que não apresentavam geogrelha apresentaram o maior valor médio de RT; o menor valor médio correspondeu aos corpos de prova com geogrelha de fibra de vidro (FV). Entretanto, deve-se salientar que a diferença entre os valores médios de RT para as amostras com geogrelha de fibra de vidro e de poliéster foi bem pequena, apenas de 0,03 MPa.

Na Figura 4.31 são apresentados os valores médios para os ensaios de MR. Observa-se desta figura que os corpos de prova sem camada de geogrelha (SG) apresentaram o maior valor médio de MR, como apresentaram também o maior valor médio do RT. Entretanto, esta tendência não foi verificada para os corpos de prova com camada de geogrelha: apesar das amostras com fibra de vidro (FV) apresentarem o menor valor médio de RT (0,71 MPa), estas apresentaram valor médio de MR (9008 MPa) superior ao das amostras com geogrelha de poliéster (HT).

Não há uma razão muito óbvia que justifique e explique valores maiores de RT e MR das amostras sem geogrelha em relação às com geogrelha. Pode ter tido eventualmente um envelhecimento maior da massa asfáltica no caso SG. O ideal teria sido refazer estes corpos de prova, mas não havia mais material nem tempo disponível.



Figura 4.30: Valores médios de resistência à tração estática (SG: sem geogrelha; FV: geogrelha de fibra de vidro e HT: geogrelha de poliéster)



Figura 4.31: Valores médios de módulo de resiliência para os corpos de prova moldados no compactador giratório

Na Figura 4.32 está apresentado o gráfico ilustrando a relação MR/RT para os corpos de prova moldados. Observa-se que os corpos de prova correspondentes à situação com geogrelha de fibra de vidro apresentaram o maior valor para a relação MR/RT e o menor valor correspondeu à situação com geogrelha de poliéster.



Figura 4.32: Relação entre módulo de resiliência (MR) e resistência à tração (RT) para os corpos de prova moldados

Os ensaios de fadiga realizados nos corpos de prova moldados são representados através das curvas reunidas na Figura 4.33. A melhor forma de analisar estas curvas para previsão da vida útil de pavimentos com cada um destes materiais

como revestimento é fazendo uma análise numérica de tensão-deformação para uma estrutura de pavimento completa. Isto porque as deformações geradas no revestimento são dependentes do MR da própria mistura asfáltica, bem como dos MR de todas as camadas e do subleito. Portanto, como no caso presente os MR das misturas sem e com geogrelhas são diferentes entre si, não é simples fazer uma interpretação direta somente com este gráfico.

No entanto, algumas observações podem ser inferidas das posições relativas destas curvas. Observa-se desta figura que o comportamento dos corpos de prova com geogrelha apresentam curvas quase paralelas (expoentes bem parecidos). Porém, os valores de MR destes dois grupos de cps são ligeiramente diferentes. Isto pode ter influência na análise da vida de fadiga por modificar as deformações geradas mesmo numa estrutura de pavimento idêntica. Mas como as curvas estão bem defasadas uma da outra (coeficiente k da geogrelha de poliéster é o dobro do de fibra de vidro) pode-se estimar que em geral vida útil maior da primeira em condições idênticas de emprego.

Já a reta do material sem geogrelha é concorrente com as outras duas com geogrelhas e, portanto, a possível melhora em relação à vida de fadiga, vai variar muito dependendo do nível de tensões analisados, de forma geral. Nos níveis mais baixos, que são os que conduzem a maior vida de fadiga, as geogrelhas apresentam vantagem evidente. A partir de níveis de tensão maiores esta situação pode se inverter. Mas, como o MR do material sem geogrelha é maior do que os outros, a determinação do ponto de mudança da tendência de maior ou menor vida útil não é diretamente tirado do gráfico: é necessário recorrer à análise numérica.

Outro aspecto importante observado nos ensaios de fadiga foi que os corpos de prova com camada de fibra de vidro fraturavam-se totalmente, isto é, esta geogrelha rompia juntamente com a mistura asfáltica. Porém o mesmo não foi constatado para as amostras com geogrelha de poliéster. Apesar da mistura asfáltica fraturar-se completamente ao final do ensaio, a geogrelha deformava-se, mas não apresentava sinais de ruptura. Na Figura 4.34 são mostrados três corpos de prova (um de fibra de vidro, outro de poliéster e um sem presença de

geogrelha) após o final do ensaio de fadiga, representativos do que ocorreu na maioria dos outros cps submetidos à fadiga.

O desempenho à fadiga inferior de amostras com geogrelha de fibra de vidro é também relatada em algumas pesquisas. Por exemplo, Bühler (2007) relata que, apesar de a fibra de vidro apresentar maior rigidez em relação à de poliéster, torna-se "quebradiça" durante o carregamento cíclico, apresentando comportamento frágil, e aponta que a fibra de vidro não se comporta bem sob carregamento repetido.

Entretanto, não se pode julgar em definitivo se o material é adequado ou não para utilização em campo, visto que as condições do ensaio de fadiga realizado na presente pesquisa por compressão diametral se distinguem das reais condições, embora aqui se tenha comparado todos os materiais sob mesma condição de carregamento.

Considere-se também que os corpos de prova moldados com a fibra de vidro apresentaram os maiores teores de vazios apesar de o processo de moldagem ter sido o mesmo para os três tipos de amostras.

As dimensões relativamente reduzidas dos corpos de prova e sua forma também podem influenciar. Mas, especialmente a configuração geométrica da forma de aplicação de cargas em pistas é diferente das condições em laboratório, ainda mais para ensaios sob tensão controlada, visto que este é reconhecidamente um ensaio relativamente conservador. Em laboratório, ocorre uma concentração de tensões no corpo de prova devido ao friso no ensaio; entre outros aspectos.



Figura 4.33: Curvas de fadiga para os corpos de prova (sem geogrelha, geogrelha de fibra de vidro e de poliéster)

Para os ensaios de tração em disco circular com fenda (DC(T)), as Figuras 4.35 e 4.36 mostram os valores de energia de fratura e da carga máxima (ou de pico) para os corpos de prova sem geogrelha, com geogrelha de fibra de vidro e com geogrelha de poliéster. Observa-se destas figuras que: o maior valor para a energia de fratura foi obtido para os corpos de prova que apresentavam a camada de geogrelha de poliéster (HT); já o menor valor de energia de fratura correspondeu às amostras sem a geogrelha (SG).



Figura 4.34: Exemplo de corpos de prova rompido ao final do ensaio de fadiga: **a**) corpos de prova com presença de geogrelha e **b**) corpo de prova sem camada de geogrelha



Figura 4.35: Valores de energia de fratura para os corpos de prova ensaiados

(DC(T))



Figura 4.36: Valores da carga máxima dos corpos de prova ensaiados (DC(T))

Diferente dos corpos de prova extraídos, não se constatou a tendência de aumento no valor de energia de fratura com o aumento do correspondente valor de MR/RT, sendo que, para as amostras moldadas, ocorreu relação inversa: o menor valor de MR/RT (10745) se refere ao corpo de prova com geogrelha de poliéster que apresentou maior energia de fratura (1647,3 J/m²). Esta análise infelizmente fica prejudicada por se tratar de um corpo de prova de cada situação.

Na Figura 4.37 está mostrada a correlação entre os valores de energia de fratura obtidos e o parâmetro MR/RT para os corpos de prova moldados em laboratório.

Entretanto, pela Figura 4.36 constata-se que o corpo de prova sem camada de geogrelha (SG) apresentou maior valor de carga máxima (2,30 kN) no ensaio de tração em disco circular com fenda (DC(T)), apesar de ter apresentado o menor valor médio de energia de fratura (1548,2 J/m²). O corpo de prova com geogrelha de poliéster apresentou valor de carga máxima igual a 2,03 kN e valor de energia de fratura igual a 1647,3 J/m². O corpo de prova de fibra-de-vidro apresentou o menor valor de carga máxima (1,29 kN) e energia de fratura igual a 1638,7 J/m². Isto confirma o observado para os corpos de prova extraídos: a influência positiva da presença da geogrelha como camada destinada a impedir ou atrasar a propagação de trincas, pois apesar das amostras com camada de geogrelha (poliéster e fibra de vidro) apresentarem menores valores de carga máxima (1,27 kN), em relação à amostra sem presença de geogrelha, forneceram valores de energia de fratura superiores.



Figura 4.37: Correlação entre MR/RT e energia de fratura para os corpos de prova ensaiados

Entretanto, deve-se destacar que estes corpos de prova moldados apresentaram diferenças entre si, apesar do processo de moldagem ser similar para todos os corpos de prova. Os corpos de prova sem geogrelha apresentaram, em geral, menores teores de vazios em relação às que apresentavam as geogrelhas (fibra de vidro ou poliéster), o que pode ser verificado nas Tabelas 4.10, 4.13 e 4.16. Isto pode explicar o comportamento relativamente melhor das amostras sem geogrelhas no ensaio de fadiga para níveis de tensão relativamente altos. Já a

correlação entre MR/RT para estes corpos de prova moldados ficou extremamente prejudicada por ter sido analisado apenas resultados referente a um corpo de prova para cada situação.

Deve-se destacar que o ensaio de tração em disco circular com fenda poderia proporcionar uma comparação mais ampla entre os dois tipos de amostras com geogrelha, caso o clip-on-gage permitisse uma abertura maior que os 10 mm permitidos, visto que praticamente todos os corpos de prova com geogrelha atingiram este limite de deslocamento sem ruptura completa. Assim, a análise da energia de fratura disponível para tais situações seria mais detalhada, permitindo estabelecer uma diferença mais nítida entre os corpos de prova analisados.

Numa tentativa de se correlacionar os parâmetros do ensaio de tração em disco circular com fenda e o ensaio de Fadiga, verifica-se a partir das Figuras (4.33, 4.35 e 4.36) e da Tabela 4.19 que:

- a amostra com geogrelha de poliéster que no ensaio de fadiga apresentou o melhor comportamento para níveis relativamente baixos de tensão foram a que apresentou o maior valor para a energia de fratura (1647,3 J/m²);

- a amostra com presença da geogrelha de fibra de vidro que, pelo gráfico da Figura 4.33, apresentou, a princípio, o desempenho inferior (na visualização deste gráfico apenas), em relação à vida de fadiga, foi também a que apresentou a menor carga máxima suportada (1,29 kN);

- na Tabela 4.19, tem-se os valores dos parâmetros obtidos nos ensaios de fadiga e de tração em disco circular com fenda (DC(T)). Observa-se desta tabela que o maior valor para o parâmetro K e da carga máxima ocorrem para a amostra sem geogrelha, e os menores valores para tais parâmetros ocorrem para a amostra com geogrelha de fibra de vidro. Já para o parâmetro n, o maior valor obtido corresponde à amostra sem presença de geogrelha, que foi a que apresentou maior valor de carga máxima. Observa-se, portanto, uma correspondência entre os parâmetros de fadiga (K e n) e a carga máxima suportada pelos corpos de prova no ensaio de tração em disco circular com fenda, isso mostra que estes parâmetros são afetados, nos ensaios, pela rigidez da amostra, que é quantificada pelos valores de RT e MR (os quais também apresentam maiores valores para as amostras sem presença de geogrelha);

- os maiores valores de energias de fratura correspondem às amostras com presença de geogrelha, sendo o maior valor obtido para a amostra com geogrelha de poliéster. Isto pode ser relacionado ao fato de que, na Figura 4.33, a curvas referentes às tais amostras apresentam inclinações maiores que a correspondente à amostra sem presença de geogrelha. Tais fatos demonstram que a presença da geogrelha influencia a evolução da ruptura (ou do trincamento), pois os ensaios de DC(T) e de fadiga geram uma significativa deformação de tração da geogrelha para ocasionar a ruptura, sendo a deformação um importante mecanismo para que a geogrelha atue como elemento de reforço.

Os parâmetros de fadiga (K e n) provêem da equação de ajuste da reta aos pontos obtidos experimentalmente, cuja expressão tem por forma:

$$N = K \left(\frac{1}{\Delta \sigma}\right)^n \qquad \text{eq. (4.2)}$$

Tabela 4.19: Valores dos parâmetros dos ensaios de fadiga e tração em disco circular com fenda (DC(T)) para as amostras moldadas pelo compactador

| PARÂMETROS | | SG | FV | HT |
|------------|-----------------------------|--------|--------|--------|
| Fadiga | K | 11581 | 2536 | 5263,6 |
| 1 44184 | Ν | -1,9 | -2,74 | -3,18 |
| DC(T) | Energia (J/m ²) | 1548,2 | 1638,7 | 1647,3 |
| 20(1) | Carga (kN) | 2,30 | 1,29 | 2,03 |

giratório

Interessante é buscar ampliar a análise em números de corpos de prova de maneira a se buscar uma correlação mais ampla entre os parâmetros RT, MR/RT e a energia de fratura, bem como entre esta e os resultados dos ensaios de vida de fadiga. 4.4.

Correlações entre os parâmetros do ensaio de tração em disco crcular com fenda (DC(T)) e resistência à tração estática (RT)

Através dos resultados dos ensaios de DC(T) e de RT realizados nesta pesquisa, e daqueles resultados de RT e de energia de fratura obtidos por HIRSCH (2009), procurar-se-á ampliar um pouco a correlação entre os parâmetros fornecidos por estes ensaios.

Os valores de energia de fratura e resistência à tração estática obtidos por HIRSCH (2009), através de suas amostras, estão apresentados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20: Resultados de Resistência à Tração e Energia de Fratura (HIRSCH,

| Resistência à Tração | Energia de Fratura |
|----------------------|--------------------|
| (MPa) | (J/m²) |
| 1,36 | 942,72 |
| 1,51 | 809,40 |
| 1,55 | 1118,09 |
| 1,42 | 388,30 |
| 1,46 | 406,51 |
| 1,59 | 464,60 |
| 1,98 | 1706,03 |
| 2,18 | 1332,83 |
| 2,24 | 1899,74 |
| 2,02 | 1259,54 |
| 1,98 | 1675,52 |
| 2,13 | 1648,64 |
| 1,54 | 744,47 |
| 1,69 | 970,02 |
| 1,82 | 646,03 |
| 1,49 | 685,38 |
| 1,59 | 765,06 |

2009)

Os valores de energia de fratura (G_f) e resistência à tração estática (RT) obtidos nesta pesquisa para os corpos de prova extraídos do tanque-teste, estão apresentados na Tabela 4.21. Nesta tabela encontram-se apenas os valores de energia de fratura correspondentes aos cps que mantiveram proximidade com o teor de vazios obtidos com aqueles em que foram feitos ensaios de resistência à tração estática.

A Figura 4.38 representa a correlação entre os resultados (RT e G_f) dos corpos de prova extraídos (sem geogrelha SG, com geogrelha de fibra de vidro FV e com geogrelha de poliéster HT). Verifica-se desta figura que, por meio das correlações entre resistência à tração estática e energia de fratura, tais parâmetros são diretamente proporcionais, ou seja, de modo geral aumentando o valor de RT de uma mistura, o seu valor de G_f tende a aumentar.

Tabela 4.21: Resultados de Resistência à Tração e Energia de Fratura para os

| corpos | de | prova | extraídos |
|--------|----|-------|-----------|
| | | | |

| СР | RT (MPa) | $G_{f}(J/m^{2})$ |
|----|----------|------------------|
| SG | 0,39 | 586,0 |
| SG | 0,73 | 827,6 |
| SG | 0,86 | 868,6 |
| FV | 0,55 | 919,2 |
| FV | 0,75 | 1259,1 |
| FV | 0,94 | 1372,1 |
| HT | 0,72 | 902,2 |
| HT | 0,90 | 1046,6 |
| HT | 0,90 | 1160,3 |

Para os corpos de prova moldados por compactador giratório, a Tabela 4.22 apresenta os valores médios de RT e os valores de G_f para tais corpos de prova com e sem presença de geogrelha.

| RT (MPa) | Gf (J/m²) |
|----------|---|
| 0,83 | 1548,2 |
| 0,71 | 1638,7 |
| 0,74 | 1647,3 |
| | RT (MPa) 0,83 0,71 0,74 |

Tabela 4.22: Resultados de Resistência à Tração e Energia de Fratura para os corpos de prova moldados

A Figura 4.39 representa a correlação entre os corpos de prova moldados (sem geogrelha SG, com geogrelha de fibra de vidro FV e com geogrelha de poliéster HT). Verifica-se desta figura que, por meio das correlações entre resistência à tração estática e energia de fratura não há a mesma tendência obtida pelos dados de HIRSCH (2009) nem pelos dados dos cps extraídos: observa-se que para os cps moldados o maior valor de RT correspondeu ao menor valor de G_f. Entretanto, esta análise foi realizada de modo limitado, pois havia apenas um valor de energia de fratura (G_f) para cada corpo de prova e os valores de RT são valores médios.





(HT), além dos corpos de prova obtidos de HIRSCH (2009)



Figura 4.39: Correlação entre RT e G_f para os corpos de prova moldados sem geogrelha (SG), com geogrelha de fibra de vidro (FV) e geogrelha de poliéster (HT), além dos corpos de prova obtidos de HIRSCH (2009)

4.5. Considerações finais

Este capítulo apresentou os resultados obtidos através dos ensaios realizados nesta pesquisa.

Os ensaios dinâmicos realizados no modelo físico foram prejudicados devido, provavelmente, à má-compactação do revestimento construído neste estudo, comprovado a partir dos teores de vazios (Vv) dos corpos de prova extraídos. Valores de Vv em torno de 11%, em média, mostram o baixo grau de compactação obtido, visto que uma mistura asfáltica de características semelhantes à empregada deveria apresentar valores de Vv entre 4 e 6%.

Deve-se também considerar a influência do confinamento das camadas de solo, de materiais de características granulares que apresentam maior rigidez com maior grau de confinamento. Houve também problemas com o sistema de aplicação de cargas. Assim, um conjunto de fatores conduziu à não utilização do Tanque-Teste de Pavimentos com o propósito pretendido inicialmente para esta dissertação.

Através dos ensaios laboratoriais foi possível comparar as situações de reforço (com e sem geogrelha), através dos ensaios mecânicos realizados. Admite-se que a forma de ensaio por compressão diametral, apesar de não usual com geogrelha, mostrou-se viável, o que sugere possibilidades para novas pesquisas. Ressalta-se que, no ensaio de tração em disco circular com fenda, observava-se que a propagação das trincas seguia sempre a direção perpendicular ao plano das bases dos corpos de prova, indicando que a presença da camada intermediária de geogrelha não representava um plano que facilitasse a propagação da trinca. A Figura 4.40 mostra um dos corpos de prova rompidos após ensaio de tração em disco circular com fenda.



Figura 4.40: Corpo de prova rompido após ensaio de tração em disco circular com fenda