

3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1.

Considerações iniciais

O programa experimental do presente trabalho foi dividido em duas etapas que consistem em:

- i) aplicação de cargas dinâmicas localizadas em um modelo físico de pavimento com trincas no revestimento asfáltico antigo, subjacente à nova camada executada, reforçada com geogrelhas;
- ii) execução de ensaios mecânicos em corpos de prova moldados em laboratório e extraídos da estrutura do pavimento experimental.

O modelo físico, denominado de “Tanque-teste de Pavimentos”, foi desenvolvido por SILVA (2009) para simular um pavimento que apresentasse dimensões próximas das reais em campo, principalmente às dimensões em profundidade. Para a realização dos ensaios no Tanque-teste foram executadas trincas artificiais de modo a simular um revestimento trincado sobre o qual foi executada nova camada de revestimento asfáltico, e entre estas foi aplicado reforço com dois tipos de geogrelhas.

Como visto na revisão, o reforço com geossintéticos do tipo geogrelha tem por finalidade principal promover uma camada intermediária entre os revestimentos asfálticos, com objetivo de aumentar a vida útil do pavimento, fundamentalmente quanto à reflexão de trincas.

Apesar desta pesquisa ter almejado a utilização plena do modelo físico em verdadeira grandeza, não foi possível a execução completa dos ensaios nesta simulação. Quando da execução dos ensaios, verificou-se comprometimento da estrutura do Tanque-Teste. Buscando-se preservar todos os equipamentos instalados (sistema de aquisição de dados e instrumentação), optou-se por

interromper tais ensaios. Para concluir a análise foram extraídos corpos de prova do Tanque-Teste para ensaios laboratoriais visando o mesmo objetivo pretendido com o modelo físico: avaliar reforços com geogrelhas quanto ao combate do trincamento por reflexão.

Além dos corpos de prova extraídos do Tanque-Teste, foram também moldados, em laboratório, corpos de prova com condições similares às aquelas: camada inferior de mistura asfáltica, camada intermediária de reforço com geogrelha e camada superior de mistura asfáltica. Em todos os corpos de prova foram realizados os ensaios de laboratório convencionais (Resistência à Tração, Módulo de Resiliência, Fadiga e Tração em Disco Circular com Fenda), para caracterizar as alternativas de reforço adotadas: utilização de dois diferentes tipos de geogrelhas e uma camada sem geogrelha como referência.

Ao longo deste capítulo serão apresentados: o “Tanque-Teste de Pavimentos”, onde foram previstos e iniciados os ensaios desta pesquisa, os materiais utilizados – sobretudo as geogrelhas, a divisão do pavimento experimental em seções, as etapas da pesquisa, a extração dos corpos de prova do pavimento experimental, a moldagem dos corpos de prova em laboratório e a metodologia dos ensaios mecânicos realizados.

3.2.

Tanque-Teste de Pavimentos

O Tanque-Teste de Pavimentos foi desenvolvido na pesquisa de SILVA (2009) que buscou avaliar principalmente o comportamento do modelo físico submetido à variação do nível d’água, que corresponde a um lençol freático numa situação real. Foi concebido e construído um modelo físico de maneira a reproduzir, em escala real, um perfil de pavimento típico rodoviário brasileiro, não envolvendo um projeto convencional de pavimentos específico, visto que se pretendia “validar a utilização do tanque-teste como ferramenta para estudar o comportamento de um tipo de estrutura de pavimento rodoviário frente à variação de umidade de suas

camadas constituintes”. Executou-se estrutura típica: subleito, sub-base, base e revestimento asfáltico.

Para a presente pesquisa, optou-se por preservar a estrutura do pavimento de SILVA (2009) e, sobrejacente a esta, executar duas novas camadas: geossintéticos e revestimento asfáltico. O alvo foi comparação do comportamento de diferentes situações de reforço de pavimento, não algum método específico de dimensionamento de reforço ou restauração, sendo o principal interesse a deformação elástica do conjunto de camadas e observação do número de ciclos de carregamento que gerasse reflexão das trincas da camada de asfalto antiga.

O Tanque-Teste de Pavimentos está localizado no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, bloco anexo ao Centro de Tecnologia, na Cidade Universitária da UFRJ, Ilha do Fundão, no Rio de Janeiro. A construção do prédio e suas dimensões foram influenciadas por limitação do espaço disponível para sua realização. O prédio tem área de aproximadamente 29m², e o tanque área interna de 4m² e volume interno de aproximadamente 8m³. Nas Figuras 3.1 e 3.2 estão apresentados: o prédio em que se encontra o tanque-teste e sua planta com dimensões.

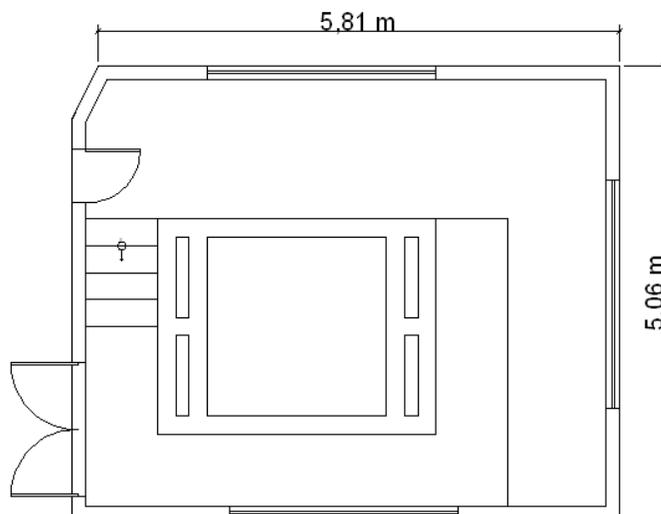


Figura 3.1: Planta Baixa do Tanque-Teste de Pavimentos (sem escala)



Figura 3.2 – Prédio onde está localizado o Tanque – teste de Pavimentos.

3.2.1.

Características do Tanque-Teste de Pavimentos

O Tanque-Teste possui seção interna de 2,0m x 2,0m e altura interna de 1,80m, com paredes duplas de concreto armado com 20cm de espessura. Possui um sistema de entrada de água através de tubulação (ϕ de 1/2”), entre as paredes duplas, e por meio de colchão de brita (3/4”), localizado internamente na base do tanque, é possível o fluxo de água (ou nível d’água) ascender para as camadas superiores do pavimento. Há também um sistema de drenagem constituído por dois ralos, sob esta camada de brita coberta por manta geotêxtil usada para evitar a colmatação, o que poderia provocar o entupimento dos ralos e dos vazios na brita, e para permitir a variação do nível d’água. A entrada de água é permitida através de paredes duplas, sendo que a interna tem um vão inferior para a passagem do fluxo d’água (SILVA, 2009).

Situado rente a uma das paredes externas do tanque, há um instrumento (Figura 3.3) que possibilita a leitura e o controle do nível d’água no interior das camadas do tanque. Sobre o tanque, há uma viga de reação metálica. Esta viga foi concebida para permitir a aplicação de cargas dinâmicas sobre o revestimento do pavimento experimental.



Figura 3.3: Medidor de nível d'água e tubulação para abastecimento de água no interior do tanque

Nesta pesquisa, inicialmente foi utilizada a própria viga de reação metálica seção de dimensões (10x20 cm) já existente no tanque-teste. Depois de algum tempo de ensaio, esta foi substituída por uma viga metálica de seção 20,3x22 cm, pois foram também alteradas as condições de aplicação das cargas repetidas ou também chamadas dinâmicas.

As cargas dinâmicas atuam por meio de um sistema pneumático constituído por um cilindro aplicador de cargas, sobre uma placa metálica que transfere a carga ao pavimento. Este primeiro cilindro, de marca Norgren, tipo “tandem”, de tirantes aparentes e dupla ação, possui o diâmetro do êmbolo de 160 mm e curso de 100 mm, com princípio de funcionamento pneumático. Posteriormente, de modo a ampliar a magnitude das cargas aplicadas sobre o pavimento experimental, foi adquirido um cilindro da mesma marca com diâmetro do êmbolo de 200 mm e curso de 50 mm. Sua força resultante, segundo o fabricante, é de 3895 kgf (38,2 kN) a 10 Bar (1000 kPa) de pressão de ar. Na Figura 3.4 está apresentada a planta baixa do tanque-teste.

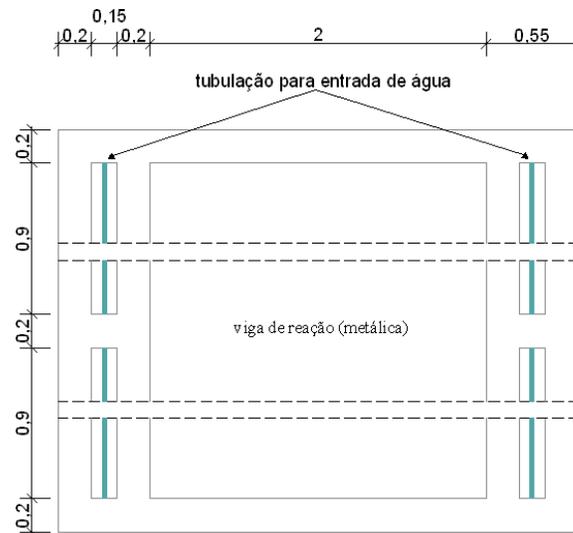


Figura 3.4: Planta Baixa do Tanque-Teste de Pavimentos (medidas em metros)

A calibração do cilindro foi feita em duas etapas para o período de tempo e regulagem dos níveis de aplicação da carga e pressão exercida, com os mesmos princípios do equipamento utilizado no Laboratório de Pavimentos da COPPE/UFRJ, para ensaios de cargas repetidas de determinação do módulo de resiliência de solos. Um sistema de ar comprimido aplica pressão que vai atuar sobre a placa de carga localizada sobre o pavimento. As medidas dos deslocamentos verticais (plástico e elástico) da placa de carga sobre o pavimento foram realizadas através de dois LVDT's que ficam apoiados sobre a placa.

No interior das camadas do pavimento existente no Tanque-Teste durante a presente pesquisa estavam instalados alguns instrumentos: TDRs (ou Reflectômetros no Domínio do Tempo) e Células de Carga (Figura 3.5) da pesquisa de Silva (2009). Na Figura 3.6 apresenta-se o posicionamento dos LVDTs e o cilindro aplicador de cargas.

Os equipamentos do tipo TDR são utilizados para medida da umidade dos materiais, instantaneamente, de forma contínua e não-destrutiva, sendo necessária apenas a instalação das sondas na profundidade de interesse (TRIME-FM, 2007). Os TDRs utilizados, da marca IMKO designados por TRIME-P2Z, foram convenientemente espaçados em 20 cm nas diversas camadas do pavimento. O

modelo empregado é utilizável a profundidades variáveis por ser constituído por material resistente ao processo de compactação.

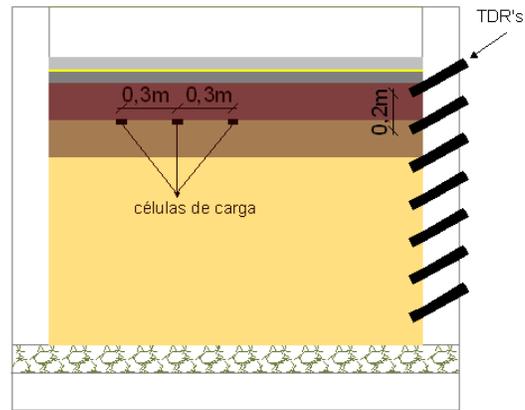


Figura 3.5: Esquema do posicionamento de alguns dos componentes do Tanque-Teste de Pavimentos (TDRs, células de carga e camada de brita) no interior da estrutura

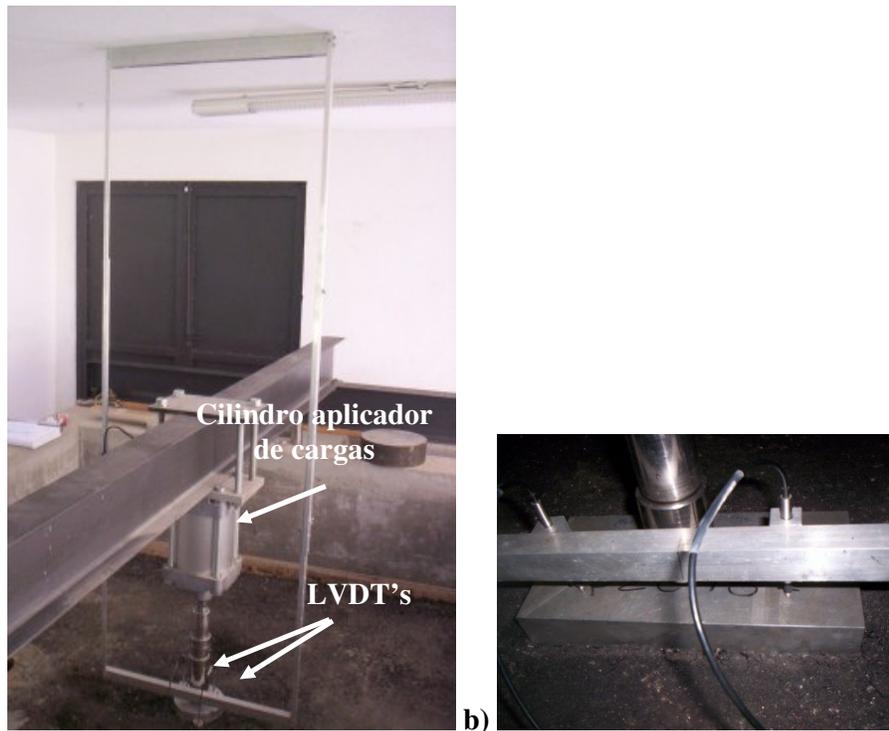


Figura 3.6: a) Cilindro aplicador de cargas e LVDTs no tanque-teste e b) Detalhe da localização dos LVDTs

Para medir a transferência da carga aplicada no revestimento para a estrutura foram aproveitadas três células de carga instaladas entre base e sub-base. Seria

interessante a instalação entre os revestimentos (antigo e novo) ou entre base e revestimento. Entretanto, o concreto asfáltico é aplicado a temperaturas acima de 100°C que pode danificar as células. São da marca Líder Balanças, modelo MC-200, em aço, capacidade nominal de 200 kg, em compressão, precisão de 0,10%. Há limitação na utilização dos dados das células, pois sua presença altera o estado de tensões devido à diferença de rigidez entre estas e o material circundante, utilização se resume à comparação entre leituras (SILVA, 2009). Na Figura 3.7 apresentam-se as células de carga e o equipamento de aquisição dos dados.



Figura 3.7: Sistema de aquisição de dados e células de carga utilizadas no Tanque – Teste

A temperatura ambiente no Tanque-Teste pode ser controlada por meio de aparelho condicionador de ar instalado no local em que se situa o tanque e por termopar. A temperatura constante foi de 25°C, temperatura média ambiente próxima da maioria das regiões brasileiras. Esta temperatura também é utilizada nos ensaios mecânicos em materiais. No dimensionamento à fadiga para emprego de fator laboratório-campo é conveniente o uso de temperatura de referência. No entanto, salienta-se que no campo, o pavimento encontra-se diretamente exposto a radiação solar, o que faz com que sua temperatura média anual possa ser maior que 25°C.

A temperatura do pavimento varia com alguns fatores: posição geográfica (clima da região), hora do dia e estações do ano. Essa variação afeta a rigidez das camadas asfálticas, materiais termossensíveis. Estes materiais têm comportamento termo-visco-elástico alterado pela temperatura que resulta em modificação no estado de tensões, na resistência à deformação plástica e principalmente na vida de fadiga (MEDINA e MOTTA, 2005).

3.2.2.

Estrutura do pavimento experimental no tanque-teste

O pavimento experimental é composto por seis camadas: lastro de brita 1 (3/4”), subleito, sub-base, base, revestimento “antigo” (existente) e novo, em CBUQ. Os materiais utilizados foram escolhidos por SILVA (2009), com exceção do revestimento sobrejacente ao “antigo” e da camada intermediária de reforço, que será descrita mais adiante. Por limite de tempo de desenvolvimento desta pesquisa, optou-se por manter a mesma estrutura.

O presente trabalho procura estudar o comportamento de duas técnicas utilizadas para reforço de pavimentos flexíveis. Portanto, foram executadas trincas artificiais no revestimento existente, que não apresentava nenhum defeito visível resultante da pesquisa de Silva (2009), para que fosse possível analisar a reflexão das trincas no revestimento sobrejacente executado na presente dissertação, através da aplicação de cargas repetidas. Neste intuito, dividiu-se a seção do pavimento experimental em trechos, de modo a avaliar cada alternativa adotada, separadamente.

Realizaram-se carregamentos dinâmicos, registrando-se ciclos de carga e correspondentes deformações/deslocamentos (elásticos e plásticos). São os deslocamentos elásticos da estrutura que condicionam a vida de fadiga dos revestimentos e também a reflexão das trincas da camada inferior para a camada asfáltica sobrejacente, tal deslocamento corresponde a uma parcela do deslocamento total devido à aplicação de cargas.

Na Figura 3.8 está apresentada esquematicamente a estrutura do pavimento do Tanque-Teste utilizado nesta pesquisa. As características dos materiais das camadas existentes foram obtidas por SILVA (2009). Adicionalmente, são apresentados os materiais adicionados: geogrelhas e concreto asfáltico. Cada camada apresenta características diferentes entre si, descritas a seguir.

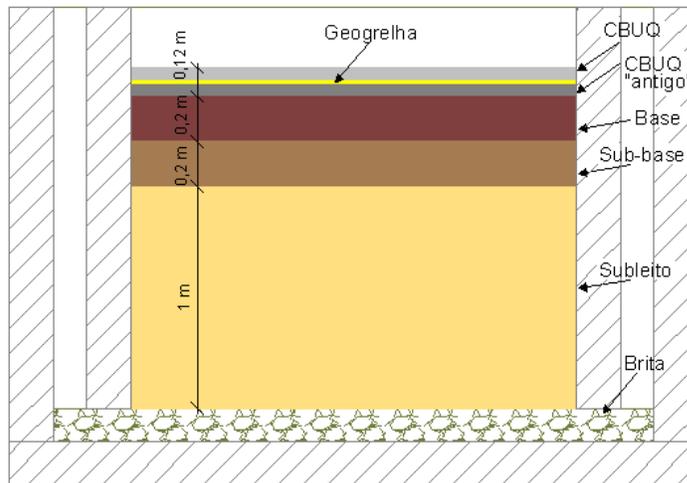


Figura 3.8: Esquema das camadas do pavimento experimental

a) Camada de variação do nível d'água: composta por brita, espessura de 10 cm, por onde a água é distribuída uniformemente e por capilaridade ascende para o subleito e para as demais camadas, e como dreno desta água. Sobre esta, manta geotêxtil evita entupimento dos ralos.

b) Subleito: espessura de 1m executada com material granular para ascensões capilares abaixo de 1,0m, proveniente de Santa Cruz, Rio de Janeiro, solo residual (horizonte C), predominantemente arenoso, A1-a (classificação HRB), SW (classificação SUCS), bem graduado, não-plástico, com massa específica real dos grãos (δ_g) de 2,68; umidade ótima 10%, massa específica máxima de 1,97 g/cm³ e energia Proctor Normal.

O ensaio de Módulo de Resiliência (MR) na umidade ótima, Proctor Normal, equipamento triaxial de cargas repetidas do laboratório de Mecânica dos Pavimentos da COPPE/UFRJ obteve-se a equação 3.1 que representa o modelo composto (MPa):

$$MR = 427,5 * \sigma_3^{0,47} * \sigma_d^{-0,12} \quad (R^2 = 0,95) \quad \text{eq. (3.1)}$$

c) Sub-base: espessura de 0,20m, material com diferença de comportamento sucção-umidade-módulo, em relação aos demais, laterita granular, oriundo de Salinas, Minas Gerais. Apresenta elevada porcentagem de pedregulhos, não-plástico, A-1a (classificação HRB); GW (classificação SUCS); massa específica

real dos grãos (δ_g) de 2,73; massa aparente máxima seca e umidade ótima 2,05 g/cm³ e 8,7%, respectivamente, energia Intermediária.

O Módulo de Resiliência (MR) é expresso pela seguinte equação do modelo composto (MPa):

$$MR = 1528,4 * \sigma_3^{0,64} * \sigma_d^{-0,3} \quad (R^2 = 0,93) \quad \text{eq. (3.2)}$$

d) Base: espessura de 0,20m, brita graduada, com elevada porcentagem de pedregulhos e areia, A-1b; GW; massa específica real dos grãos (δ_g) de 2,65; massa específica aparente máxima seca e umidade ótima 2,13 g/cm³ e 6,5%, respectivamente, energia modificada.

A determinação do Módulo de Resiliência (MR) deste material foi realizada em corpos de prova cilíndricos (10 x 20 cm), no equipamento triaxial de cargas repetidas do laboratório de Mecânica dos Pavimentos da COPPE/UFRJ, e é expresso pela seguinte equação do modelo composto (MPa):

$$MR = 1010 * \sigma_3^{0,5} * \sigma_d^{-0,009} \quad (R^2 = 0,99) \quad \text{eq. (3.3)}$$

e) Camada de revestimento “antigo”: CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente), fornecido pela empresa CRAFT ENGENHARIA LTDA., com espessura média de 6,0 cm. Na Tabela 3.1 estão apresentadas as características do ligante e do CBUQ utilizados nesta camada.

f) Nova camada asfáltica: sobre o revestimento “antigo” foi executada nova camada em CBUQ, empresa CRAFT ENGENHARIA LTDA., espessura média de 6,0 cm, compactador manual tipo soquete vibratório (chamado popularmente de “sapo mecânico”) características na Tabela 3.2. Os materiais são: pó de pedra da EMASA MINERAÇÃO; brita 0 e brita 1 da pedreira SEPETIBA LTDA e o ligante, CAP 30/45, da Refinaria Duque de Caxias (REDUC), Rio de Janeiro. Nas Tabelas 3.3 e 3.4 estão apresentadas as características.

Tabela 3.1: Características do ligante e mistura asfáltica do revestimento “antigo”
(SILVA, 2009)

Mistura Asfáltica	
Granulometria: densa TMN: 19,1 mm Superpave	
Faixa B (DNIT)	
Dosagem Superpave Ndes: 100 giros, teor de projeto: 4,7%	
Resistência à Tração (RT): 0,87 MPa	
Módulo Resiliente (MR): 4575 MPa (cp extraído)	
Densidade aparente: 2,378 (cp extraído)	
Ligante (modificado por SBS)	
Ponto de amolecimento	87°C
Penetração (25°C)	72 dmm
Viscosidade (135°C)	1075 cP
Viscosidade (145°C)	678 cP
Viscosidade (175°C)	250 cP
Recuperação elástica (25°C)	98%

Tabela 3.2: Características do equipamento compactador manual (SARAMAGO,
2002)

Tipo	LC-71 (ELÉTRICO)
Motor	DYNAPAC (2,0) HP
Frequência de Vibração	500 – 600 vpm
Rotação	3600 rpm
Amplitude de Impacto	45 – 65 mm
Sistema de Ignição	Trifásico 220/330 V
Velocidade de Trabalho	12 m/min
Dimensões da Base	280 x 335 mm
Peso Estático	69,0 kg

Tabela 3.3: Caracterização dos agregados da mistura asfáltica compactada nesta dissertação

DENSIDADES	Pó-de-pedra	Brita 0	Brita 1
Massa Específica Real	2,693	2,682	2,688
Densidade Aparente	-	2,650	2,650
Densidade Efetiva	-	2,666	2,669
GRANULOMETRIA (Peneiras)			
# 1"	100,00	100,00	100,00
# 3/4"	100,00	100,00	72,56
# 3/8"	100,00	95,40	1,22
# N° 4	97,70	30,20	0,00
# N° 8	79,30	0,00	0,00
# N° 30	45,39	0,00	0,00
# N° 50	28,39	0,00	0,00
# N° 100	16,69	0,00	0,00
# N° 200	8,00	0,00	0,00

Tabela 3.4: Características do ligante utilizado na mistura asfáltica compactada

CAP	30/45
Penetração	31 mm
Ponto de amolecimento	55,1°C
Viscosidade Brookfield a 135°C	560 cp
Ductilidade a 25°C	> 150 cm
Ponto de fulgor	336°C
Índice de suscetibilidade térmica	-1
Densidade relativa	1,044

A mistura asfáltica empregada neste recapeamento é especificada como Faixa 4c (Asphalt Institute), apresentando a seguinte composição granulométrica de agregados: pó-de-pedra (52%); brita 0 (23%) e brita 1 (25%). Na Tabela 3.5 estão apresentadas as características da granulometria da mistura.

Tabela 3.5: Granulometria da mistura do revestimento novo (proporção dos agregados)

Peneiras		Faixa 4C
# 1''	100,00	100 a 100
# 3/4''	93,14	80 a 100
# 3/8''	74,25	60 a 80
# N° 4	57,75	48 a 65
# N° 8	41,23	35 a 50
# N° 30	23,60	19 a 30
# N° 50	14,76	13 a 23
# N° 100	8,68	7 a 15
# N° 200	4,16	0 a 8

Pelo relatório de dosagem fornecido pela CRAFT ENGENHARIA LTDA, os agregados apresentaram boa adesividade ao CAP 30/45 com 0,3% de DOPE quando submetidos ao teste acelerado (Método DNER – 078/83). O teor ótimo de ligante é de 5,3%. A composição final do traço de dosagem foi a seguinte: pó-de-pedra (49,24%); brita 0 (21,78%); brita 1 (23,68%) e CAP 30/45 (5,30%). As características finais da mistura apresentam-se na Tabela 3.6 (CRAFT, 2009).

Tabela 3.6: Características da mistura asfáltica compactada (Fonte: CRAFT, 2009)

Teor de ligante ($\pm 0,3\%$)	5,3
Densidade teórica	2,475
Densidade aparente	2,380
% de vazios	3,8
V.A.M.	15,9
R.B.V.	75,9
Estabilidade	1210
Fluência	13

Também foram realizados ensaios após o recebimento da mistura asfáltica para melhor caracterizá-la no Laboratório de Pavimentos da COPPE/UFRJ e seguiram

procedimentos das normas vigentes do DNIT (ou DNER), ASTM, e procedimentos internos do próprio laboratório. Os corpos de prova foram moldados no compactador Superpave sob 75 giros.

Com o objetivo de determinar a massa específica da mistura asfáltica procurou-se estabelecer os valores de G_{mb} e G_{mm}^2 . O valor de G_{mb} médio, método ASTM D 2726 – 08, foi de 2,374 g/cm³. O G_{mm} médio para esta mistura por procedimento com vácuo, norma ASTM D 2041 – 03a, teve valor 2,518 g/cm³. Na Tabela 3.7 apresentam-se as densidades aparentes da mistura compactada (D_{ap}), e os volumes de vazios dos corpos de prova.

Analisando-se esta tabela, observa-se que os volumes de vazios ficaram acima do projetado, o que indica que o grau de compactação da mistura do revestimento do tanque-teste ficou comprometido. Os demais ensaios foram realizados com objetivo de caracterizá-la mecanicamente: Resistência à Tração estática (RT); Módulo de Resiliência (MR); Creep e Fadiga.

O ensaio de resistência à tração estática nos corpos de prova cilíndricos moldados no giratório (espessura média de 6,63 cm e diâmetro médio de 10 cm), sob temperatura ambiente de 25°C, apresentaram valor médio σ_t de 1,21 MPa. Para este ensaio utilizou-se a norma DNER-ME 138/94. Na Tabela 3.8 são apresentados os valores de módulo de resiliência (MR) e de resistência à tração (RT) para os corpos de prova moldados em laboratório. O ensaio de Módulo de Resiliência foi realizado em corpos de prova cilíndricos, à temperatura de 25°C, apresentando valor médio de MR igual a 5716 MPa.

² G_{mb} : massa específica aparente obtida a partir de corpos de prova de mistura asfáltica compactada ($G_{mb} = D_{ap} * 0,997$)

G_{mm} : massa específica máxima medida de uma mistura asfáltica ($G_{mm} = D_{MM} * 0,997$).

Dt: densidade teórica.

D_{ap} : densidade aparente.

DMM: densidade máxima medida.

Tabela 3.7: Características da mistura asfáltica empregada no Tanque-Teste

Nº do CP	Ligante (%)	Espessura média a hm (cm)	Diâmetro médio Dm (cm)	Dens. ap (Dap)	Dens. teórica (Dt)	Dap (projeto)	DMM (Mét. Rice)	Vv (%) (DMM-Dap) / DMM *100
12485	5,3	6,62	9,99	2,35	2,475	2,380	2,526	6,85
12486		6,67	9,97	2,37				6,33
12487		6,60	10,00	2,38				5,98
12488		6,53	10,00	2,38				5,70
12489		6,56	10,00	2,38				5,86
12490		6,61	9,99	2,36				6,49
12491		6,64	10,00	2,38				5,62
12492		6,57	9,99	2,39				5,46
12493		6,60	9,99	2,38				5,62
12494		6,55	9,99	2,38				5,94
12495		6,56	9,99	2,39				5,31
12496		6,55	9,99	2,39				5,38
12497		6,60	9,99	2,38				5,74
12498		6,54	9,99	2,38				5,70
12499		6,55	10,00	2,39				5,58
12500		6,58	9,99	2,39				5,54
12501		6,64	10,00	2,38				5,90
12502		6,61	9,99	2,38				5,70
12503		6,62	9,99	2,39				5,46
12504		6,57	10,00	2,39				5,46
12505	6,55	9,99	2,39	5,27				
12506	6,54	10,00	2,39	5,23				
12507	6,55	10,00	2,39	5,46				

O ensaio de Creep Estático foi realizado em corpos de prova cilíndrico, sob temperatura de 40°C. O valor de deformação plástica específica final média de 0,003144.

Tabela 3.8: Resistência à Tração e Módulo de Resiliência da mistura asfáltica deste estudo

Nº do CP	% Ligante	MR (MPa)	RT (MPa)
12485	5,3	-	1,17
12486		-	1,16
12487		-	1,31
12488		5877	1,21
12489		5768	-
12490		5503	1,23
MÉDIA		5716	1,22
DESVIO-PADRÃO		192	0,06

O ensaio de vida de fadiga foi sob condições de tensão controlada, temperatura de 25°C. Nas Figuras 3.9 e 3.10 apresentam-se as curvas representadas em função da diferença de tensões (tração e compressão no centro do corpo de prova) e da deformação específica resiliente, de expressões:

$$N = k \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^n \quad \text{eq. (3.4)}$$

$$N = k \left(\frac{1}{\varepsilon_r} \right)^n \quad \text{eq. (3.5)}$$

Onde:

- N: número de repetições do carregamento necessário à ruptura completa da amostra;
- $\Delta\sigma$: diferença de tensões;
- ε_r : deformação específica resiliente;
- k, n: constantes resultantes da regressão linear dos pares ($\Delta\sigma$, N) ou (ε_r , N).

Constata-se que os valores de MR e RT estão dentro do esperado para uma mistura de concreto asfáltico, que em geral situam-se no intervalo de 2000 a 8000 MPa para MR e de 0,6 a 2,0 MPa para RT, a 25°C. Entretanto, os valores de Vida

de Fadiga foram abaixo do esperado para tal mistura. Talvez isso se deva ao volume de vazios da mistura ter sido maior que o projetado.

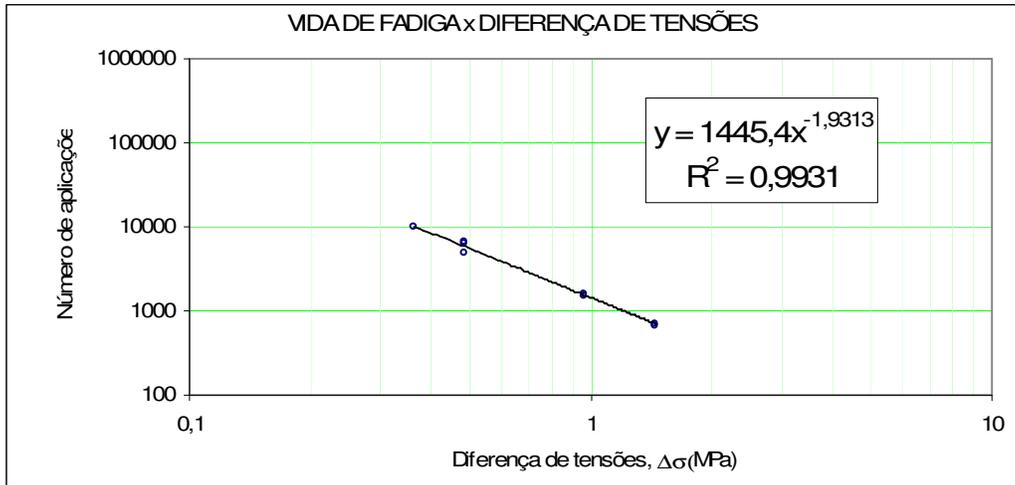


Figura 3.9: Curva de Vida de Fadiga em função da diferença de tensões da mistura asfáltica

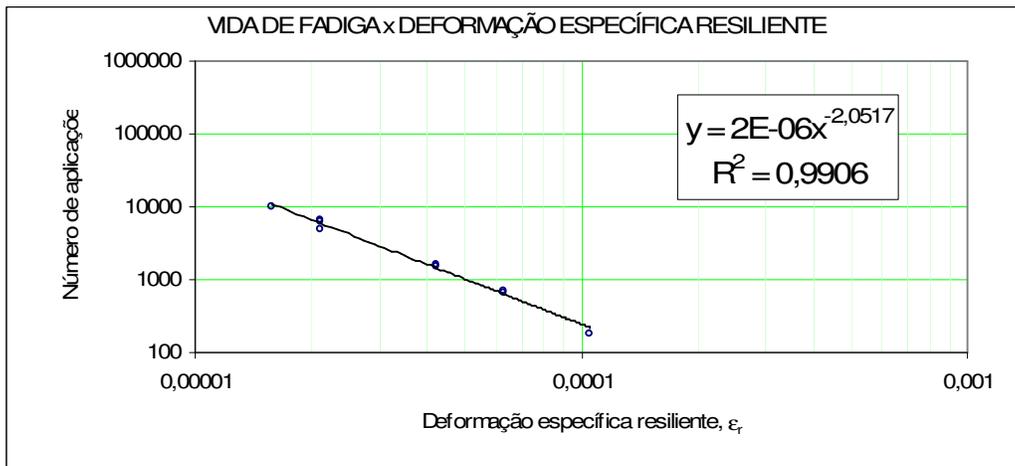


Figura 3.10: Curva de Vida de Fadiga em função da deformação específica resiliente da mistura asfáltica

3.2.3.

Seções de ensaios no pavimento experimental reforçado com geogrelhas

Como a finalidade principal desta pesquisa é avaliar alternativas de reforço de pavimento flexível, e devido à limitação das dimensões do Tanque-Teste, o revestimento do pavimento experimental foi dividido em três seções de ensaio (denominadas seções-teste) de modo a alternar trechos com soluções de reforço diferentes em cada ensaio.

As Seções-teste são faixas (ou placas) onde se aplicou uma alternativa de reforço diferente, com dimensões de 2 m de comprimento por 0,66 m de largura, definida para execução de três alternativas dentro do modelo físico. O objetivo foi realizar um tipo de ensaio diferente do que é utilizado por vigotas prismáticas cujas dimensões são bastante reduzidas (aproximadamente 10x10x50 cm) e limitação de tipo de apoio.

Procurando extrapolar as dimensões dos ensaios de vigotas, utilizou-se a estrutura do Tanque-Teste realizando trincas artificiais e dividindo o revestimento existente em seções-teste. A separação por corte com equipamento de serra-mármore foi feita de modo a minimizar a influência da aplicação de cargas em cada uma delas, promovendo um desligamento localizado apenas no revestimento “antigo”.

Deve-se mencionar que neste revestimento “antigo” havia sido feita a extração de três corpos de prova e a abertura de um poço para retirada do concreto asfáltico e dos materiais da base e sub-base, para caracterização destas camadas por SILVA (2009). O poço foi convenientemente fechado com materiais de cada camada armazenados no Laboratório de Pavimentos da COPPE.

Em cada seção-teste foram feitas duas trincas, na camada de revestimento “antigo”, para possibilitar a avaliação das alternativas de reforço, com e sem geogrelha, em relação ao processo de reflexão de trincas. Estas trincas artificiais foram feitas através do equipamento de corte serra-mármore. Carregamentos sob pulsos de carga seriam aplicados em cada seção-teste, no local de cada trinca, para

simular o que ocorre numa situação real, que é a passagem da carga dos veículos num pavimento. Nas Figuras 3.11 e 3.12 apresentam-se a configuração esquemática e real das seções-teste e das trincas no CBUQ “antigo”. Na Figura 3.13 ilustra-se o revestimento “antigo” com o poço e os locais em que os corpos de prova foram extraídos.

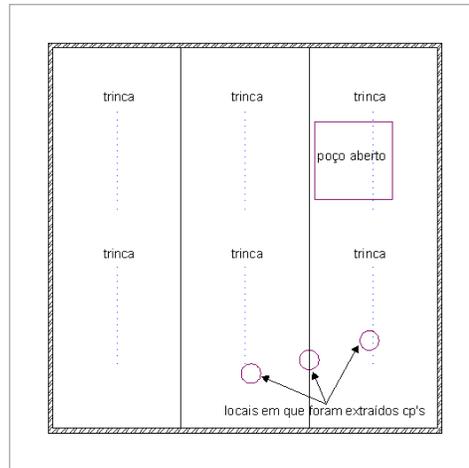


Figura 3.11: Configuração esquemática do Tanque-Teste após execução das seções-teste e das trincas artificiais, e locais em que foi feito poços e extraído corpos de prova



Figura 3.12: Configuração das três seções-teste e das trincas produzidas de modo artificial



Figura 3.13: Locais em que foram extraídos materiais do pavimento experimental

Após a execução das seções-teste e das trincas, foi realizado o recapeamento do pavimento. Fez-se cuidadosa remoção de impurezas da superfície e aplicou momentos antes da chegada da nova mistura asfáltica, a pintura de ligação com emulsão asfáltica, no revestimento trincado a uma taxa de $1,0\text{l/m}^2$, para promover a aderência entre o revestimento subjacente e o novo. Após a ruptura da emulsão asfáltica, foi feito o lançamento e compactação com soquete vibratório.

De acordo com a ordem de execução dos ensaios denominou-se as seções-teste por: seção-teste 1; seção-teste 2 e seção-teste 3. Na Figura 3.14 apresenta-se a configuração das Seções-teste após o recapeamento por CBUQ, com a demarcação das projeções das trincas artificiais.

As trincas artificiais foram denominadas segundo a pretendida ordem de aplicação de cargas: C1; C2; C3; FL1; FL2 e FL3, sendo que as trincas C1 e FL1 correspondem a seção-teste 3; as trincas C2 e FL2 correspondem a seção-teste 2 e as trincas C3 e FL3 correspondem a seção-teste 1. Cada uma possui 50 cm de comprimento e 3 mm de espessura, o que corresponderia a uma trinca isolada classe 2 (FC-2) segundo a norma DNIT 005/2003 – TER. O comprimento de 50 cm foi adotado por permitir executar duas trincas em cada seção-teste, com espaçamento conveniente dentro do tanque-teste, de modo que o efeito de cada aplicação de carga fosse o menor possível de um ponto de carregamento a outro.

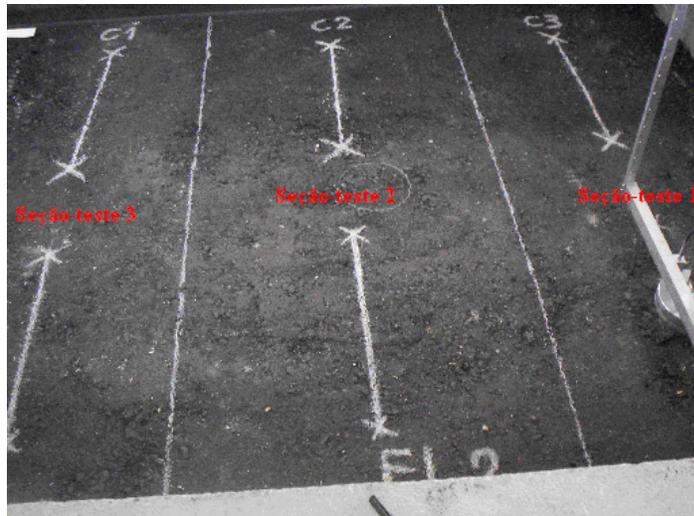


Figura 3.14: Projeção dos cortes delimitando as seções-teste e das trincas artificiais

Na Seção-teste 1, ao revestimento “antigo” foi sobreposta uma nova camada de material asfáltico a quente (CBUQ), cujas características foram anteriormente descritas. Esta solução corresponde a alternativa de restauração/reforço de pavimento flexível convencional.

Na seção-teste 2 foi executada uma camada intermediária de absorção de tensões com um **geossintético do tipo geogrelha de fibra de vidro**, fabricada por 6D Soluções e *Chomarat Composites*, de origem francesa. A geogrelha utilizada, de marca CIDEX tipo 35.70 (Figura 3.15), é recomendada para regiões de clima tropical. De acordo com o fabricante, tem resistências mecânicas de 35kN/m no sentido longitudinal e 70 kN/m no sentido transversal da geogrelha, e módulo de elasticidade do material da ordem de 70.000 MPa. Este tipo de geogrelha é, de acordo com o fabricante, indicada para aplicação em pavimentos flexíveis para combater o trincamento do tipo couro de jacaré e ao afundamento de trilha de roda.

Na seção-teste 3 também foi empregada uma camada intermediária de **geogrelha de material polimérico (poliéster)**, revestida com betume, do tipo Hatelit C 40/17, de fabricação da *Huesker Synthetic GmbH&Co*. Segundo a especificação fornecida pelo fabricante, esta geogrelha possui resistência à tração nominal de 50 kN/m (longitudinal e transversal) e de 12 kN/m a 3% de deformação. Apresenta

deformação na resistência nominal de 12% (longitudinal e transversal). Ainda, de acordo o fabricante, esta geogrelha é indicada para aplicações no combate da propagação de trincas de reflexão. Na Figura 3.16 estão apresentadas as duas geogrelhas dispostas lado a lado.

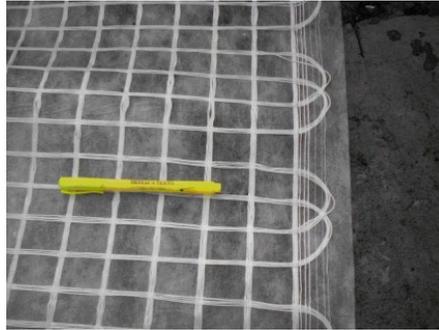


Figura 3.15: Aspecto da geogrelha de fibra de vidro usada neste estudo

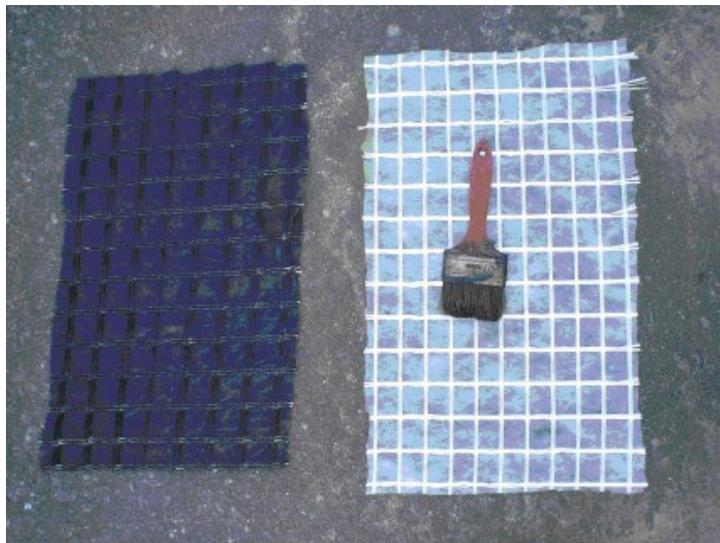


Figura 3.16: Geogrelha de poliéster revestida com betume (esquerda) e de fibra de vidro (direita) usadas neste estudo

Na sequência de fotos da Figura 3.17, ilustra-se a execução das seções-teste: aplicação de emulsão asfáltica, das geogrelhas sobre o revestimento antigo trincado artificialmente e da camada de revestimento novo em CBUQ.

Na aplicação de ambas geogrelhas, com a finalidade de promover uma ancoragem, prolongaram-se os seus comprimentos em 60 cm (30 cm para cada extremidade) em relação ao comprimento das Seções-teste (que é de 2 m) e

utilizou-se pintura de ligação para fixar estes excedentes nas paredes de concreto do tanque-teste, de maneira a promover certo engastamento. Na Figura 3.17 (g e h), pode-se observar o prolongamento das geogrelhas fixado na parede do tanque-teste.

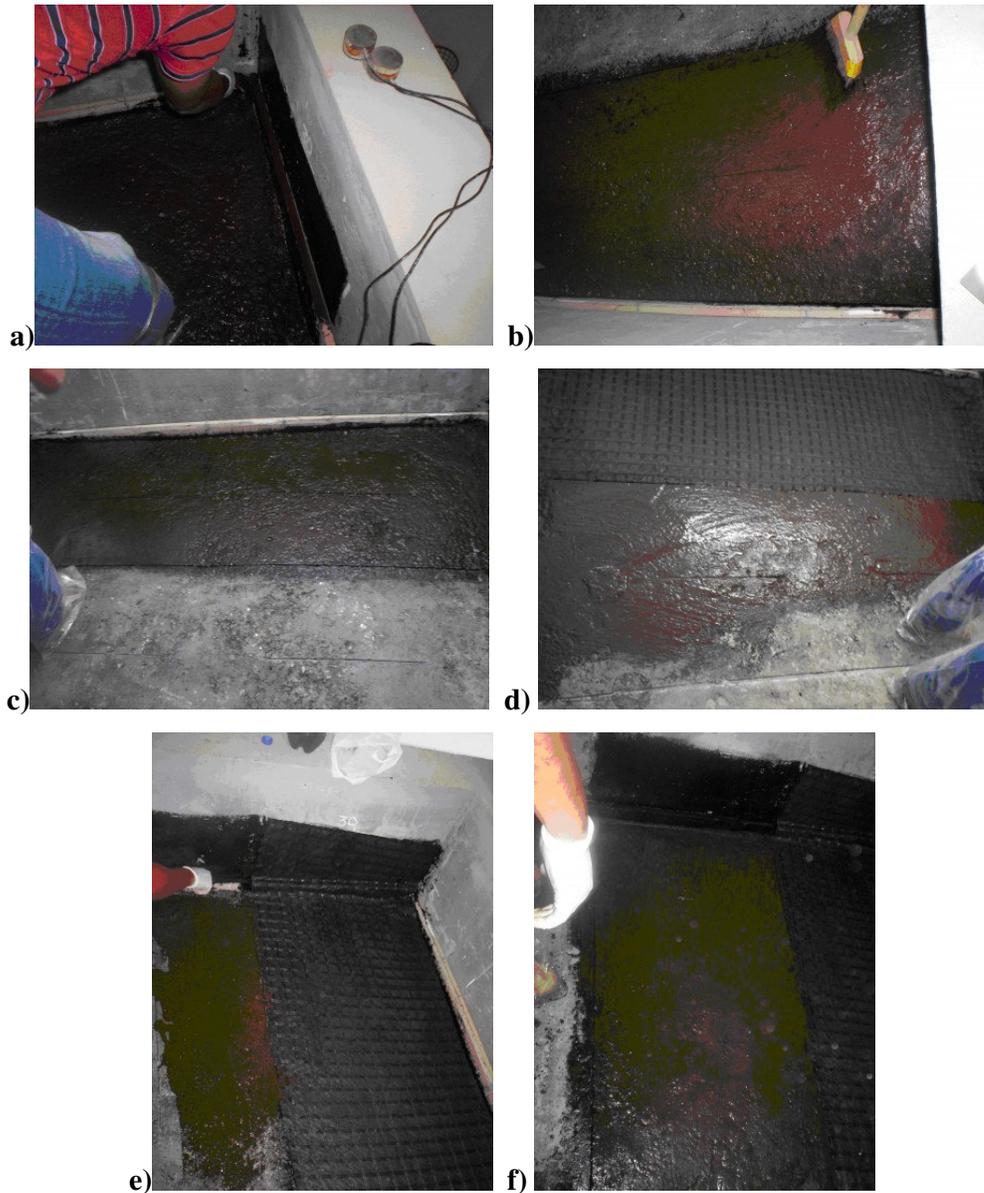


Figura 3.17: Passos da montagem do experimento no Tanque - teste

a, b, c) Aplicação de pintura de ligação (emulsão asfáltica); d, e, f) geogrelha de poliéster Seção-teste 3; e pintura de ligação para colocação da geogrelha de fibra de vidro Seção-teste 2

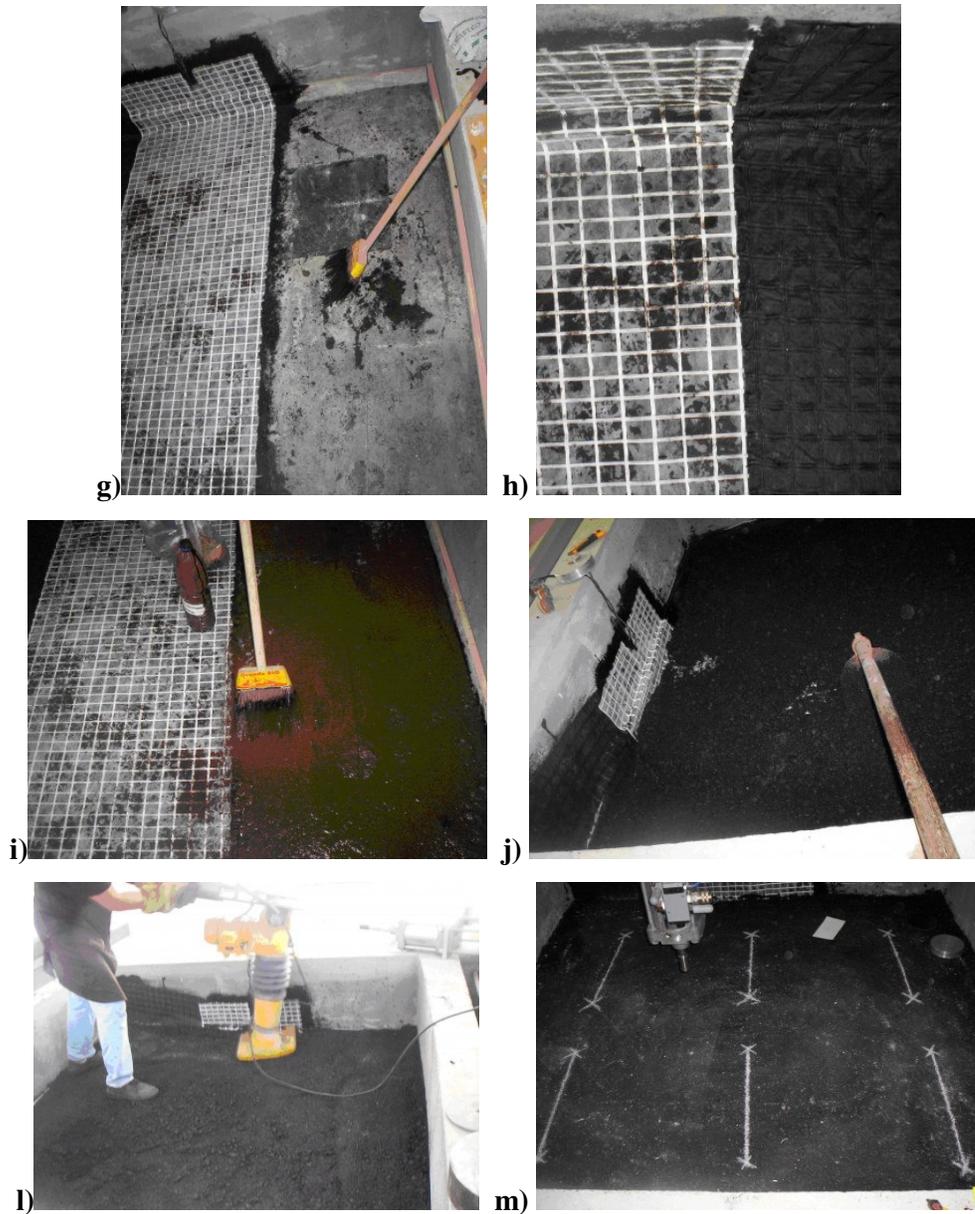


Figura 3.17: Passos da montagem do experimento no Tanque – teste (continuação)

g) Geogrelha de fibra de vidro Seção-teste 2; h) Detalhe entre Seções-teste 3 e 2; i) Aplicação de emulsão asfáltica Seção-teste 1; j) Aplicação e espalhamento do CBUQ; l) Compactação com soquete vibratório e m) Configuração do revestimento após compactação.

3.2.4.

Ensaio no pavimento experimental

Conforme o objetivo da pesquisa de avaliar o comportamento das alternativas de reforço de pavimento (com e sem geogrelha) seriam realizados ensaios de carga

repetida em cada seção-teste para acompanhamento e avaliação do efeito das alternativas frente à reflexão de trincas.

A seção-teste 1, sem geogrelha, foi utilizada como referência representando a alternativa convencional de restauração de pavimento trincado e pelo fato de, intuitivamente, ser a de menor capacidade de resistir aos esforços repetidos, foi a primeira a ser ensaiada. Pelo sistema pneumático de aplicação de cargas atuando sobre a placa metálica aplicaram-se ciclos de carregamento. No início empregou-se placa metálica circular de 15,2 cm de diâmetro e cilindro de cargas existente, de êmbolo de 160 mm de diâmetro, força de 1900 kgf (18,6 kN), 9 Bar (900 kPa) e em seguida um cilindro maior, mostrados na Figura 3.18.



Figura 3.18: Cilindros de carga utilizados nesta pesquisa (êmbolo: 160 mm e 200 mm)

3.3.

Metodologia

Visando avaliar o uso de geogrelhas no reforço à reflexão do trincamento de revestimentos asfálticos, dividiu-se o estudo em duas etapas. A primeira etapa compreendeu a utilização do Tanque-Teste para simular, de maneira próxima às condições em campo, a reflexão do trincamento de um revestimento asfáltico. Entretanto, não foi possível prosseguir com os ensaios dinâmicos no tanque-teste, pelo motivo que será a seguir apresentado. Foram extraídos corpos de prova de

cada seção-teste para continuar a avaliação das soluções adotadas através de ensaios mecânicos. Como segunda etapa, portanto, realizou-se a moldagem de corpos de prova similares aos extraídos do tanque-teste para comparação dos resultados de ensaios mecânicos. Na Figura 3.19 mostra-se o fluxograma da pesquisa, ilustrando as etapas do trabalho experimental.

Os ensaios para avaliar os corpos de prova no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da COPPE/UF RJ foram: resistência à tração estática, módulo de resiliência, fadiga e tração em disco circular com fenda. O objetivo de realizar ensaios também em corpos de prova moldados foi avaliar as soluções com as geogrelhas em amostras que não tivessem sofrido processo de extração, pois principalmente na realização dos ensaios de fadiga, a retirada de corpos de prova poderia gerar trincas, o que comprometeria a sua avaliação.

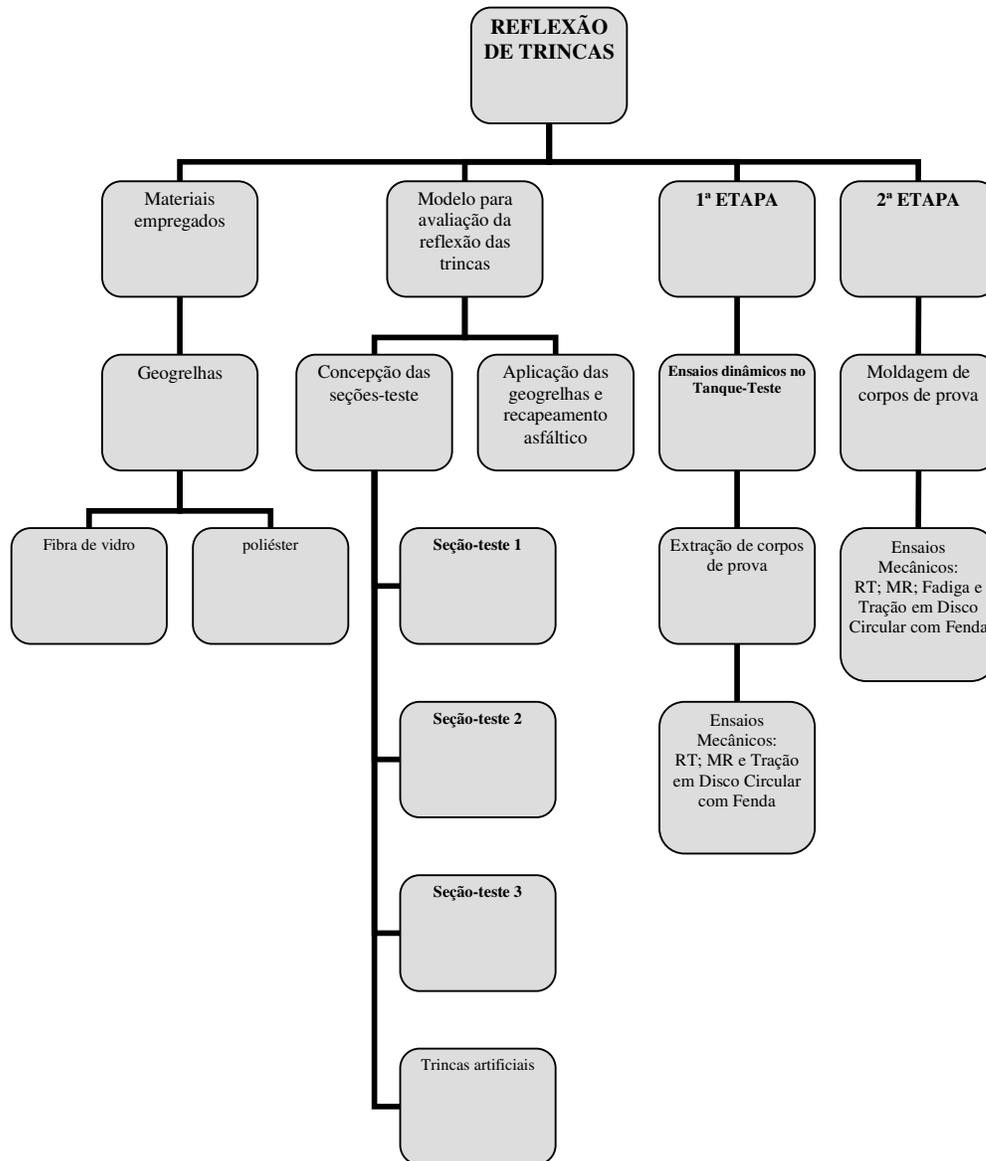


Figura 3.19: Fluxograma das etapas previstas para realização desta pesquisa

3.3.1.

Ensaios no tanque-teste e extração de corpos de prova

Os ensaios no Tanque-Teste foram programados de acordo com modo de sollicitação: flexão (correspondendo ao Modo I de propagação de trinca) e cisalhamento (Modo II de carregamento).

3.3.1.1

Flexão

Esta etapa do programa experimental corresponderia ao Modo I de carregamento, ou de ruptura de um pavimento, conhecido como Modo de abertura, em que o principal esforço para provocar ruptura é a tração das fibras inferiores do concreto asfáltico.

Cada seção-teste deveria ser ensaiada para este modelo de carregamento, nas trincas denominadas FL3, FL2 e FL1, respectivamente para as Seções-teste 1, 2 e 3. Para tanto, a placa circular de carregamento seria centralizada no centro geométrico de cada trinca e a carga seria aplicada a uma frequência de 1 Hz. A tensão aplicada corresponderia àquela desenvolvida pelo eixo-padrão rodoviário (8,2 tf) que é 0,56 MPa. Na Figura 3.20 mostra-se o primeiro ensaio da etapa de flexão. Infelizmente, este foi o único ensaio realizado, devido ao problema ocorrido na estrutura do tanque. Iniciou-se pela trinca FL3, Seção-teste 1. Entretanto, observou-se que, após mais de 2 milhões de ciclos de carga, havia neste local apenas afundamento localizado da placa metálica, o que representava apenas ruptura por puncionamento do concreto asfáltico, não se evidenciando a reflexão da trinca subjacente. As deflexões (parcela elástica do deslocamento da placa metálica devido ao carregamento dinâmico), medidas pelos LVDTs, eram muito baixas. Optou-se por paralisar o ensaio e modificar a configuração da carga. Na Figura 3.21 mostra-se o local deste ensaio, com afundamento da placa metálica superior a 0,5 mm.

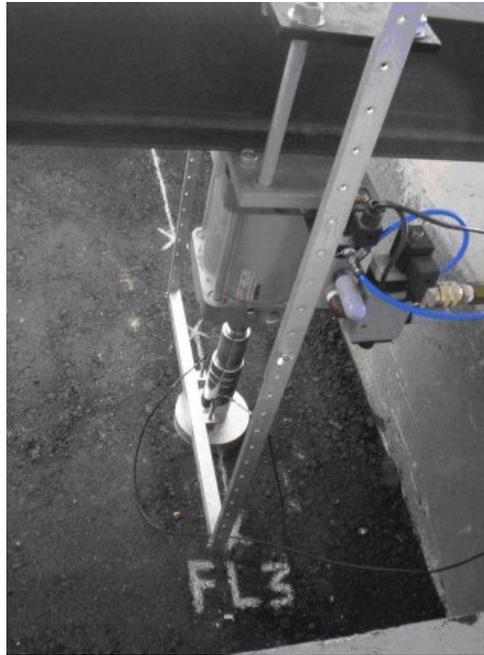


Figura 3.20: Configuração do primeiro ensaio para etapa de flexão – Seção teste 1



Figura 3.21: Local do ensaio (FL3) em que foi observada apenas ruptura localizada do revestimento asfáltico

A placa metálica utilizada de formato circular, com diâmetro de 15,2 cm e área de 181,45 cm² gerou tensões propagadas em bulbos geometricamente pequenos; apenas 10% da tensão de 0,56 MPa atinge o topo da camada de sub-base e no subleito as tensões eram praticamente desprezíveis segundo SILVA (2009).

Os bulbos de tensões produzidos por um carregamento possuem fundamentalmente duas componentes: uma gerada pela tensão aplicada e outra resultante da geometria deste carregamento. Como o pavimento experimental possui espessuras de camadas maiores que o próprio diâmetro da placa, as tensões que atingiriam as camadas mais inferiores, para esta área da placa, seriam muito reduzidas.

Numa simulação utilizando o software ELSYM5 (versão 1.0) para a configuração utilizada do Tanque-Teste, com 5 camadas (CBUQ; CBUQ antigo; base; sub-base e subleito), tem-se análise próxima das condições reais de meio estratificado, sendo os valores de tensão a cinco diferentes profundidades apresentados na Tabela 3.9. Os valores dos módulos foram obtidos em SILVA (2009), exceto para a camada superior obtida nesta dissertação. Por estes cálculos, a tensão que atinge o topo da sub-base equivale a aproximadamente 4% da tensão aplicada na superfície do pavimento.

Diante deste fato e pela necessidade de manter a mesma pressão de contato no revestimento asfáltico, optou-se por aumentar a placa metálica e também o cilindro aplicador de cargas. Assim, passou-se a utilizar uma placa metálica de formato retangular, de dimensões 15 x 30 cm, o que resulta numa área de 450 cm², mais que o dobro da área da placa circular. O sistema aplicador de cargas foi modificado com a aquisição de um cilindro de cargas de 200 mm de êmbolo, o que para a pressão de trabalho do sistema (900 kPa), permite aplicar tensão de 0,64 MPa.

Para a utilização do cilindro pneumático aplicador de cargas foi necessária uma calibração, feita por célula de carga com capacidade nominal de 2,0 t e por equipamento osciloscópio digital, que permitiram a regulagem dos potenciômetros da placa de aquisição. Na Figura 3.22 está apresentada a configuração da calibração do cilindro de cargas.

A viga de reação utilizada também teve que ser modificada para suportar aplicação maior de força: inicialmente, as espessuras da alma e das abas eram de 5 e 7 mm, respectivamente; e a atual viga tem espessura de 10 e 17, o que aumentou

consideravelmente o seu momento de inércia e, por conseguinte, sua rigidez à flexão (Figura 3.23).



Figura 3.22: Calibração do novo cilindro de carga no tanque – teste neste estudo

Tabela 3.9: Valores de tensões a diferentes profundidades, obtidos pelo ELSYM5, sob o centro do carregamento para o tanque – teste na configuração original

Camadas	Espessura (m)	ν	MR (MPa)	Carregamento	Profundidade de Análise (m)	Tensão Vertical (MPa)
CBUQ	0,06	0,30	5716	Eixo Simples (2 rodas)	0,06	0,31
CBUQ	0,06	0,30	4575	Pressão de Pneus: 0,56 MPa	0,12	0,04
BASE	0,20	0,35	100	Carga (Placa): 1016 kgf (10 kN)	0,22	0,03
SUB-BASE	0,20	0,35	400	Área de Contato:	0,32	0,02
SUBLEITO	-	0,45	70	0,0181 m ²	0,52	0,01

Entretanto, como o local escolhido para iniciar os ensaios de cargas dinâmicas, correspondente à trinca FL3, foi parcialmente comprometido pelo ensaio acima mencionado, optou-se por prosseguir os trabalhos com carregamento no Modo II,

ou seja, por cisalhamento. Assim, após os ensaios por cisalhamento, continuar-se-iam com os ensaios por carregamento de flexão.



Figura 3.23: Comparação entre os perfis metálicos: inicialmente disponível e atual

3.3.1.2.

CISALHAMENTO

Pelos motivos descritos, a ordem seqüencial dos ensaios dinâmicos foi modificada e o primeiro local que se esperava efetivamente avaliado até o fim passou a ser o correspondente à trinca C3. O formato retangular da placa evidentemente favorece a aplicação de cargas objetivando-se a ruptura por cisalhamento, já que se pode obter maior contato tangenciando a projeção da trinca artificial como mostrado na Figura 3.24. A Figura 3.25 ilustra o ensaio por cisalhamento com a placa retangular.

Com a alteração da placa e do cilindro de cargas, pôde-se modificar também a tensão aplicada ao revestimento asfáltico. Esta tensão, limitada pela pressão fornecida pelo sistema pneumático compressor do Laboratório de Geotecnia da COPPE e pela força máxima que poderia ser aplicada pelo cilindro a 9 Bar (900 kPa), foi estabelecida como de 0,64 MPa (6,5 kgf/cm²). A ordem de execução dos ensaios, nesta etapa, seria: C3; C2 e C1.

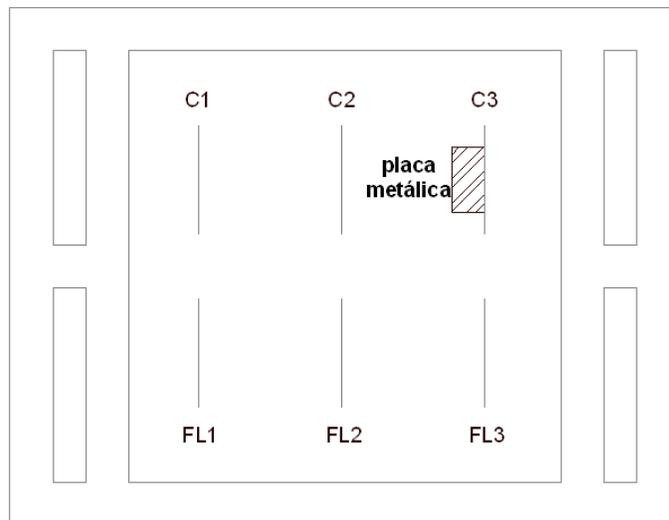


Figura 3.24: Representação esquemática da atual configuração da placa de carregamento



Figura 3.25: Ensaio por cisalhamento com a placa metálica retangular (área de 450 cm²)

Entretanto, após mais de 1,8 milhão de ciclos de carga neste ponto, os ensaios no tanque-teste foram interrompidos. Observou-se trincamento nas paredes de concreto do tanque-teste no ponto de fixação da viga de reação, o que obrigou a interrupção do ensaio C3. A continuação da aplicação de carga poderia resultar em acidente, pois a estrutura de reação do carregamento estava comprometida,

colocando em risco os equipamentos instalados (sistema pneumático, lvdts, etc), além da segurança durante a operação dos mesmos.

Diante deste fato, não esperado ainda no início da série de experimentos programados deste estudo, a opção foi criar outra fase de pesquisa, que se baseou na extração de corpos de prova da própria estrutura do Tanque-Teste, bem como na moldagem de corpos de prova com características semelhantes para realização de ensaios comparativos.

3.3.1.3.

EXTRAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DO TANQUE-TESTE

Com a impossibilidade da continuidade dos ensaios dinâmicos no Tanque-Teste optou-se pela extração de corpos de prova do revestimento do pavimento experimental para a realização de ensaios mecânicos para avaliação das geogrelhas.

Para executar a extração destes corpos de prova (CPs) do tanque-teste foi utilizado um equipamento extrator rotativo, com copo de extração de diâmetro interno de 15 cm, conforme ilustrado na Figura 3.26. A remoção foi feita com objetivo de atingir o topo da camada de base, e assim retirar a espessura completa das duas camadas de revestimento asfáltico (antigo e novo), inclusive com a permanência da camada intermediária da geogrelha.



Figura 3.26: Extração de corpos de prova do tanque-teste

A quantidade de corpos de prova extraídos de cada seção-teste atendeu ao mínimo exigido para a realização dos ensaios mecânicos no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da COPPE/UFRJ: três (03) para o ensaio de resistência à tração (RT), três (03) para o ensaio de módulo de resiliência (MR) e cinco (05) para o ensaio de tração em disco circular com fenda, realizado no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ. Não foram realizados ensaios de fadiga nestes corpos de prova extraídos pela quantidade reduzida que foi possível de ser retirada do Tanque-Teste.

Após extração foi feito corte, com serra com disco diamantado, das faces obtendo espessura final de 5 cm, metade (2,5 cm) do revestimento antigo e metade do novo. Foram caracterizados cada corpo de prova por altura, diâmetro e densidade, Gmb (ASTM D 2726 – 08). Na Figura 3.27 estão apresentados os corpos de prova extraídos: doze (12) na seção-teste sem geogrelha; catorze (14) na seção-teste com geogrelha de fibra de vidro e dezessete (17) na seção-teste com geogrelha de poliéster.

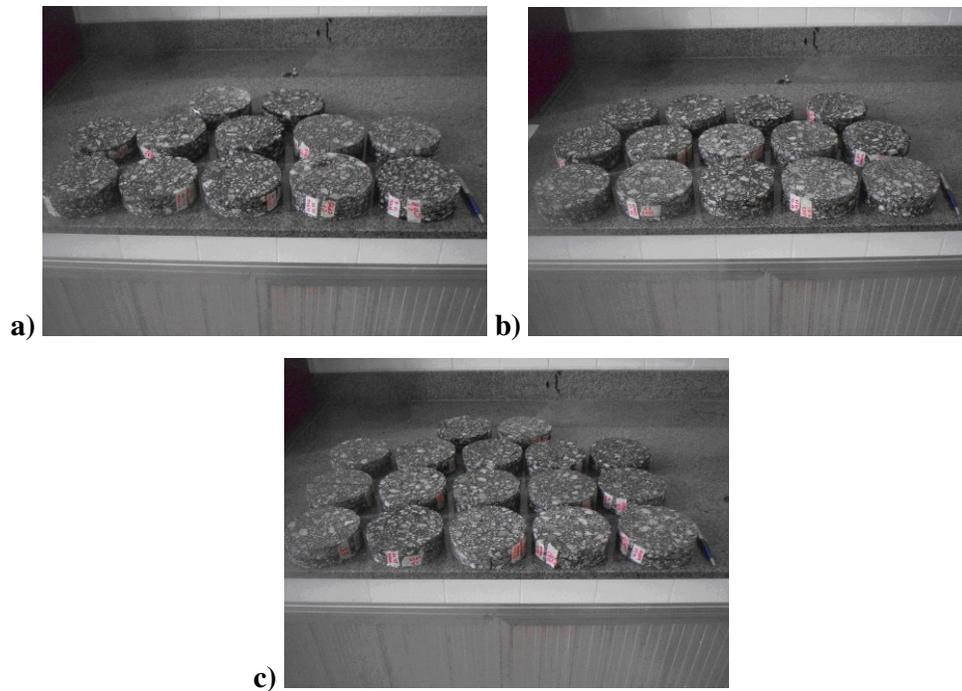


Figura 3.27: Corpos de prova extraídos e faceados: a) seção-teste sem geogrelha; b) seção-teste de geogrelha de fibra de vidro e c) seção-teste de geogrelha de poliéster.

3.3.2.

Moldagem dos corpos de prova em laboratório

Seguindo o objetivo de avaliar a utilização das geogrelhas (poliéster e de fibra de vidro) para o reforço de mistura asfáltica, moldaram-se corpos de prova para ensaios mecânicos. Como não se dispunha de material original usado no tanque, a mistura empregada foi disponibilizada pelo Laboratório de Pavimentos da COPPE/UFRJ. A dosagem desta mistura foi realizada pela metodologia SUPERPAVE (AASHTO R35-09 e AASHTO M323-07), que utiliza a compactação por amassamento através do equipamento denominado compactador giratório.

A mistura foi dosada com o ligante asfáltico CAP 50/70, proveniente da Refinaria do Planalto Paulista (REPLAN) e agregados de origem granítica provenientes da Pedreira Sepetiba. Este é um ligante convencional, PG 64-22, com características

dadas na Tabela 3.10, fornecidas pelo Centro de Pesquisas Leopoldo Miguez de Mello – CENPES/PETROBRAS, localizado na ilha do Fundão, no Rio de Janeiro.

Tabela 3.10: Característica do ligante – CAP 50/70 (Fonte: CENPES)

CARACTERÍSTICAS	MÉTODO	Unidade	REPLAN
Penetração, PEN, 100g, 5s, 25°C	NBR 6576/1998 ASTM D 5/97	0,1mm	59
Ponto de amolecimento, PA, Anel e bola	NBR 6560/2000 ASTM D 36/95	°C	52,4
Densidade 20°C/4°C	ABNT 6296/2004	g/cm ³	1,010
Viscosidade Brookfield a 135°C	NBR 15184/2004	cP	379
Viscosidade Brookfield a 150°C	ASTM D	cP	189
Viscosidade Brookfield a 177°C	4402/2002	cP	65
PG (<i>Performance Grade</i>)	ASTM D 6373/2002	PG	64-22

Os agregados utilizados (Brita 1, Brita 0 e pó de pedra), nesta mistura, possuem granulometria apresentada na Tabela 3.11. Tais agregados são comumente utilizados nas pesquisas desenvolvidas no Laboratório de Pavimentos da COPPE. A Tabela 3.12 apresenta as propriedades dos agregados, fornecidas pelo CENPES.

A mistura foi executada na faixa B do DNIT, cujo tamanho nominal máximo dos agregados é de 19,1 mm. Para melhorar a adesividade do ligante asfáltico aos agregados, foi adicionado DOPE fornecido pela BR Distribuidora, AD-HERE 6500, na proporção de 0,5% (em relação ao ligante). A mistura do ligante com o DOPE foi realizada em laboratório antes da mistura com os agregados. As temperaturas dos agregados e do ligante asfáltico, de mistura e de compactação, foram obtidas das curvas de viscosidade x temperatura para o ligante e os resultados são apresentados na Tabela 3.13. Na Figura 3.28 apresenta-se a curva Viscosidade versus Temperatura do ligante usado para determinação da temperatura de compactação.

Tabela 3.11: Granulometria dos agregados usados na moldagem dos cps desta pesquisa

PENEIRAS		% Passante		
#	Mm	Brita 1 (32%)	Brita 0 (20%)	Pó-de-Pedra (48%)
11/2"	38,1	100,0	100,0	100,0
1"	25,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,0	86,2	100,0	100,0
1/2"	12,7	22,7	100,0	100,0
3/8"	9,5	1,6	99,9	100,0
Nº 4	4,8	0,5	20,5	99,6
Nº 10	2,0	0,4	0,6	71,6
Nº 40	0,42	0,3	0,5	32,9
Nº 80	0,18	0,3	0,4	17,4
Nº 200	0,075	0,2	0,3	7,6

Tabela 3.12: Propriedades dos agregados (Fonte: CENPES)

PROPRIEDADES	Agregados Graúdos	Agregados Miúdos
Abrasão Los Angeles, %	43,3	-
Partículas Chatas e Alongadas (1/5), %	1	-
Equivalente de Areia, %	-	84
Angularidade, %	-	40,04
Índice de Forma (C/E)	2,9	-
Massa Específica Real	2,792	2,781
Massa Específica Aparente	2,669	2,693
Absorção, %	0,8	3,01
Sanidade, %	10,3	-

Tabela 3.13: Temperaturas de mistura, de compactação, dos agregados e do ligante

Ligante	Temperatura de mistura (°C)	Temperatura compactação (°C)	Temperatura agregados (°C)	Temperatura ligante (°C)
REPLAN	153	142	166	153

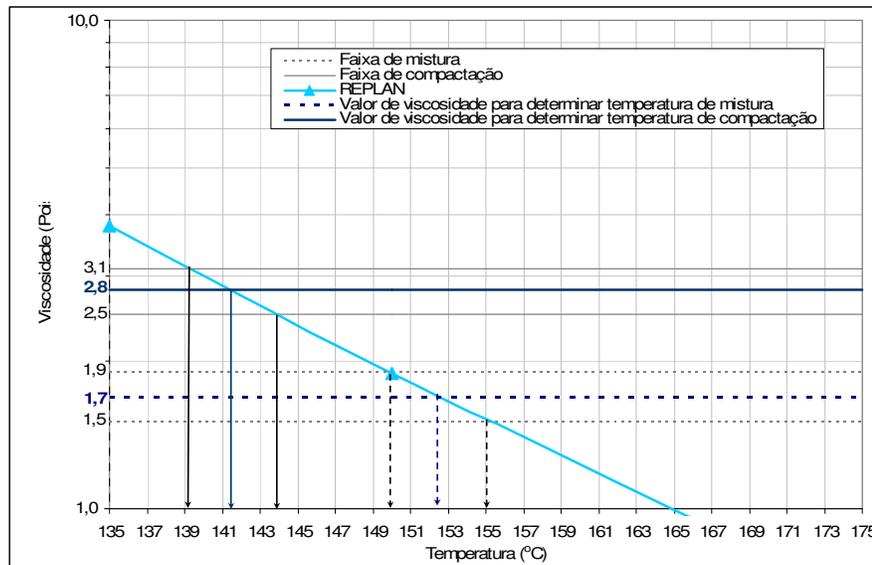


Figura 3.28: Gráfico Viscosidade *versus* Temperatura do ligante REPLAN.

Ressalta-se que neste estudo não foi feita a dosagem da mistura, pois esta é comumente utilizada em projetos no Laboratório de Pavimentos da COPPE. A moldagem dos corpos de prova foi executada pela metodologia SUPERPAVE.

Em 1987, foi iniciado nos Estados Unidos estudos sobre materiais asfálticos no Programa Estratégico de Pesquisa Rodoviária (SHRP – Strategic Highway Research Program). Esta pesquisa concebeu novo procedimento de especificação de ligante e mistura asfáltica, denominado SUPERPAVE (Superior PERFORMANCE asphalt PAVEMENTS). O SUPERPAVE constitui sistema para seleção de materiais, análise de misturas e previsão de desempenho de pavimentos (MARQUES, 2004).

A principal diferença entre o procedimento SUPERPAVE e o método Marshall, que tradicionalmente é utilizado no meio rodoviário brasileiro, é a utilização de um equipamento compactador de laboratório, cuja compactação é feita através de amassamento e não mais por impacto, o que minimiza a quebra dos agregados próximos à superfície da amostra e proporciona distribuição dos agregados mais próxima da que ocorre em campo (PINHEIRO, 2004).

A granulometria dos agregados, através da metodologia SUPERPAVE, é estabelecida por pontos de controle e determinados em relação ao tamanho máximo nominal. Os pontos de controle são pontos mestres pelos quais a curva granulométrica deve se situar. Permitem enquadrar as curvas em uma faixa de desempenho já conhecida e aprovada.

O compactador giratório Superpave (CGS) é um dispositivo mecânico composto do seguinte sistema de componentes: estrutura de reação, base rotativa e motor; medidor de altura e sistema de registro de dados e de carregamento, cabeça de carga, medidor de pressão; e molde e placa base. Realiza a compactação sob ângulo de rotação de $1,25 \pm 0,02^\circ$; taxa de 30 rotações por minuto e possui um sistema hidráulico ou mecânico que permite aplicar tensão de compressão vertical no corpo de prova de 600 kPa e permite o acompanhamento da altura do corpo de prova durante a compactação (MOTTA et al, 1996). O compactador é apresentado na Figura 3.29.

Os corpos de prova moldados pelo equipamento giratório apresentam diâmetro médio de 15 cm e espessura média de 5 cm. Como a maioria dos corpos de prova deveria apresentar camada de geogrelha no seu interior, realizou-se o processo de moldagem em todos os corpos de prova em duas partes: condicionava-se, em estufa, a quantidade de mistura asfáltica correspondente à metade do corpo de prova (ou seja, para 2,5 cm de espessura e 15 cm de diâmetro) e procedia-se à compactação por equipamento giratório, por 100 giros. Como o Compactador Giratório exige uma altura mínima de 5 cm para realizar a compactação de uma amostra, utilizou-se uma placa de madeira circular que possuía as mesmas dimensões do corpo de prova (5 cm de altura por 15 cm de diâmetro). A seguir, aplicava-se emulsão asfáltica e aguardava-se sua ruptura para colocação da geogrelha recortada no formato do próprio corpos de prova ou para a colocação da segunda quantidade de mistura asfáltica. Aplicava-se novamente a emulsão asfáltica e, após sua ruptura, completava-se com a quantidade de mistura asfáltica correspondente à outra metade e compactava-se a mistura novamente, com 100 giros. Os mesmos procedimentos foram utilizados para os corpos de prova sem geogrelha, sendo feita apenas uma aplicação de emulsão.



Figura 3.29: Compactador Giratório para moldagem de corpos de prova do Laboratório de Pavimentos da COPPE/UFRJ.

Em resumo, o procedimento foi o seguinte:

- confecção da mistura asfáltica;
- pesagem das quantidades correspondentes à metade de um corpo de prova;
- condicionamento destas quantidades de mistura asfáltica em estufa;
- compactação por amassamento (100 giros) da primeira quantidade de mistura asfáltica (correspondente à metade do corpo de prova);
- aplicação de emulsão asfáltica (pintura de ligação) na mistura compactada inicialmente (Figura 3.30) e ruptura da emulsão asfáltica (mudança de coloração);
- colocação da geogrelha no formato do corpo de prova (15 cm de diâmetro). A Figura 3.31 mostra uma das geogrelhas sendo posta acima da primeira metade do corpo de prova;
- reaplicação de emulsão asfáltica, ilustrada pela Figura 3.32, e novamente ruptura desta emulsão asfáltica;
- compactação da quantidade final de mistura asfáltica (100 giros). A Figura 3.33 mostra um dos corpos de prova após a compactação da segunda camada de mistura asfáltica.



Figura 3.30: Aplicação de emulsão asfáltica na primeira metade do corpo de prova moldado



Figura 3.31: Colocação da camada intermediária (no caso apenas como ilustração, é mostrada a geogrelha de fibra de vidro utilizada)



Figura 3.32: Reaplicação de emulsão asfáltica sobre a geogrelha



Figura 3.33: Corpos de prova após conclusão da compactação neste estudo

Ao todo, moldaram-se sessenta e três (63) corpos de prova, correspondendo vinte e um (21) corpos de prova para cada situação (sem geogrelha, com geogrelha de poliéster e com geogrelha de fibra de vidro). Na Figura 3.34, apresentam-se dezoito (dos vinte e um) corpos de prova após a moldagem no Compactador Giratório; quantidade destinada ao Laboratório de Ensaios Mecânicos de Pavimentos da COPPE/UFRJ. Os outros três corpos de prova correspondem ao ensaio de Tração em Disco Circular com Fenda, encaminhados ao Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ.

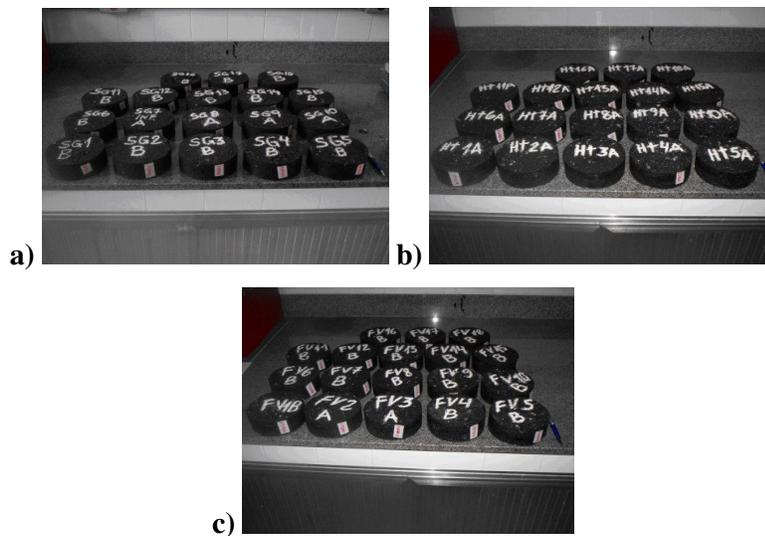


Figura 3.34: Corpos de prova após moldagem em laboratório

a) sem presença de geogrelha; b) com camada intermediária de geogrelha de poliéster e c) com camada intermediária de geogrelha de fibra de vidro.

3.3.3.

Ensaio mecânicos

Os ensaios mecânicos realizados no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da COPPE/UFRJ foram: resistência à tração, módulo de resiliência e fadiga. Todos foram realizados em equipamentos por compressão diametral. Para os corpos de prova extraídos foram trinta e três (33) amostras ensaiadas, e para os corpos de prova moldados foram cinquenta e cinco (55). Os ensaios de Tração em Disco Circular com Fenda (Disk-Shaped Compact Tension Geometry) foram realizados no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ. A Tabela 3.14 mostra o resumo do planejamento experimental para os ensaios mecânicos realizados neste estudo.

Tabela 3.14: Planejamento experimental dos ensaios mecânicos nos corpos de prova

TIPO DE CORPO DE PROVA		ENSAIO					QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA
		RT	MR	RT APÓS MR	FADIGA	TDCF	
EXTRAÍDOS	SEÇÃO-TESTE 1	X	X	X		X	11
	SEÇÃO-TESTE 2	X	X	X		X	11
	SEÇÃO-TESTE 3	X	X	X		X	11
MOLDADOS	SEM GEOGRELHA	X	X	X	X	X	18
	GEOGRELHA (POLIÉSTER)	X	X	X	X	X	18
	GEOGRELHA (FIBRA DE VIDRO)	X	X	X	X	X	19
OBS.:	RT: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO MR: MÓDULO DE RESILIÊNCIA TDCF: TRAÇÃO EM DISCO CIRCULAR COM FENDA TOTAL DE CORPOS DE PROVA: OITENTA E OITO (88)						

3.3.3.1. Ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral

Os ensaios de módulo de resiliência foram realizados em equipamento do laboratório da COPPE, conforme mostra a Figura 3.35, a 25 °C e frequência de 1 Hz, sendo 0,1 s o tempo de aplicação de carga e 0,9 s o tempo de repouso entre as

aplicações. O procedimento para obtenção do módulo de resiliência na COPPE consiste na determinação de três valores do módulo durante a realização de três ciclos de ensaio para cada corpo de prova. Cada ciclo é composto por uma quantidade determinada de golpes de condicionamento e cinco golpes para a determinação do módulo. Para o primeiro ciclo utilizaram-se quarenta golpes de condicionamento e, para os dois últimos ciclos, dez golpes de condicionamento.



Figura 3.35: Equipamento e execução de ensaio de Módulo de Resiliência na COPPE.

O programa do equipamento de cargas repetidas do Laboratório da COPPE realiza o cálculo automático do módulo de resiliência, dado pela equação 3.1, e o resultado final é expresso pela média aritmética entre os valores obtidos nos três ciclos:

$$MR = \frac{F}{\Delta H} \times (0,9976\mu + 0,2692) \quad \text{eq. (3.6)}$$

Onde:

- MR: Módulo de resiliência (MPa);
- F: Carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova (N);
- Δ : Deformação elástica ou resiliente horizontal correspondente à carga aplicada (mm);
- H: Altura do corpo de prova (mm);
- μ : Coeficiente de Poisson (geralmente adota-se $\mu = 0,30$).

3.3.3.2.

Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de compressão diametral (ou tração indireta) foi concebido em 1943 por Fernando Luiz Lobo Carneiro, quando da abertura da Avenida Presidente Vargas, na cidade do Rio de Janeiro, sendo que neste local existia a igreja de São Pedro, situada bem ao centro da futura avenida. Como solução imaginada à época, pensou-se em deslocá-la por meio de rolos de concreto. Na Europa havia relatos do transporte de construções sobre rolos de aço. Ensaçando rolos de concreto, o engenheiro Lobo Carneiro notou que rompiam através de uma fissura vertical, e estudando este comportamento, propôs novo método para determinação da resistência à tração dos concretos.

Pinto (1991) relata que este ensaio de tração por compressão diametral é conhecido internacionalmente como “Ensaio Brasileiro”. Originalmente desenvolvido para determinar a resistência à tração de concreto-cimento, passou também a ter finalidade similar em misturas asfálticas. O carregamento por compressão diametral pode ser utilizado para determinar, além da resistência à tração: o módulo de resiliência e a vida de fadiga das misturas.

Esse ensaio, normatizado pelo DNER – ME 138/94 e ABNT NBR – 15087, é realizado em prensa Marshall convencional, onde se posiciona o corpo de prova inserido em um dispositivo com dois frisos metálicos. Os frisos se apóiam nas duas geratrizes opostas do corpo de prova. O ensaio foi realizado à temperatura de 25 °C com velocidade de avanço da prensa de 0,8 mm/s. Com o valor da carga de ruptura (F) já corrigida pela constante da prensa é calculada a resistência à tração estática por compressão diametral através da Equação 3.7. Na Figura 3.36, apresenta-se o equipamento da COPPE de resistência à tração estática usado neste estudo.

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad \text{eq. (3.7)}$$

Onde:

- σ_R : Resistência à tração estática (MPa);
- F: Carga de ruptura (N);
- D: Diâmetro do corpo de prova (mm);
- H: Espessura do corpo de prova (mm).



Figura 3.36: Equipamento e ensaio de resistência à tração estática.

3.3.3.3.

Ensaio de fadiga por compressão diametral

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da COPPE, sob tensão controlada e temperatura a 25°C. É utilizada uma frequência de 60 aplicações de carga por minuto com 0,10 segundo de duração de carregamento. É o mesmo equipamento e condições do MR.

O ensaio de compressão diametral para fadiga de misturas asfálticas é um ensaio de tração indireta conduzido com cargas repetidas aplicadas diametralmente em um corpos de prova cilíndrico. Estas cargas são de compressão, aplicadas em dois frisos de carga opostos, que produz tensão de tração relativamente uniforme ao longo do plano diametral vertical, sendo a ruptura do corpos de prova caracterizada por seccionamento ao longo deste plano (PINTO, 1991; SANTOS, 2005). Na Figura 3.37 está esquematizado este ensaio, mostrando os frisos de aplicação de carga e o plano de ruptura.

a) Preparação dos corpos de prova:

Para esta etapa, utilizaram-se os passos descritos em Hirsch (2009), bem como os equipamentos utilizados no mesmo trabalho. Em todos os corpos de prova foram executados os furos de carregamento, a pré-trinca e o chanfro. De acordo com a norma ASTM 7313-07, os furos de carregamento devem manter um ângulo de $90^\circ \pm 5^\circ$, em relação às faces da amostra, e suas posições não devem diferir mais que 5,0 mm das posições estabelecidas. Utilizou-se uma furadeira tipo de bancada, disponível na Oficina Mecânica do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, que proporciona a verticalidade da “broca” diamantada utilizada na execução dos furos de carregamento. Os passos para a execução dos furos foram os mesmos descritos por HIRSCH (2009): cada corpo de prova é envolto numa fita adesiva, fixado no interior de um molde de compactação (do tipo tri-partido) de solos; posto gabarito para execução dos furos de carregamento; fixado o conjunto no molde tri-partido e levado à furadeira de bancada. Os furos foram realizados sempre com a utilização de água para minimizar os danos deste processo e para resfriar a broca diamantada. Os furos devem ser realizados vagarosamente para evitar, ao máximo, danos ao corpo de prova. Na Figura 3.38 mostra-se esta fase de execução dos furos de carregamento realizados nesta pesquisa.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 3.38: Execução dos furos de carregamento nos corpos de prova:

- a) envolvimento em fita adesiva; b) e c) colocação do gabarito metálico no molde; d) fixação do molde tri-partido; e) injeção de água na furadeira tipo bancada e f) furos realizados.

Após a realização dos furos de carregamento, a próxima fase é executar a pré-trinca e o chanfro para acoplamento do instrumento utilizado para medir a abertura da pré-trinca. Também foi utilizado um gabarito metálico para realização da pré-trinca e do chanfro, o que facilitou a execução desta fase. Com o corpo de prova preso ao gabarito através de dois pinos metálicos, realizou-se primeiramente a pré-trinca com o mesmo equipamento utilizado para o faceamento dos corpos de prova extraídos e, posteriormente foi realizado o chanfro, em todas as amostras. Na Figura 3.39 é mostrada esta fase de execução da pré-trinca e do chanfro para acoplagem do clip-on-gage.



Figura 3.39: Execução da pré-trinca e do chanfro nos corpos de prova para ensaio de tração: a) fixação gabarito metálico; b) posicionamento no equipamento de corte; c) execução da pré-trinca; d) execução do chanfro e) configuração para ensaio de tração em disco circular com fenda.

Após a secagem dos corpos de prova, por no mínimo três dias, realizou-se pintura branca do local provável de propagação da trinca durante o ensaio a ser executado (Figura 3.40). Duas placas de alumínio foram fixadas no chanfro de cada corpo de prova, para permitir o acoplamento do clip-on-gage. Esta pintura permite melhor visualização superficial da propagação da trinca. As placas de alumínio possuíam, a princípio, as dimensões preconizadas pela norma ASTM 7313-07. Entretanto, durante execução deste ensaio nos corpos de prova moldados em laboratório, notou-se que algumas placas desprendiam-se das amostras, prejudicando a obtenção dos resultados. Então, para as amostras extraídas do Tanque-Teste foram empregadas placas um pouco maiores. Para fixação destas placas nos corpos de prova foi utilizada uma cola de marca LOCTITE 496. A Figura 3.41 ilustra a dimensões das placas de alumínio utilizadas.

b) Condicionamento de temperatura das amostras:

Os corpos de prova foram postos em câmara de temperatura controlada no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ. Tal condicionamento foi realizado como descrito em HIRSCH (2009), e as amostras foram mantidas nesta câmara (Figura 3.42) por, no mínimo, 24 h antes da realização dos ensaios.



Figura 3.40: Corpos de prova moldados com pintura branca na provável região de propagação da trinca

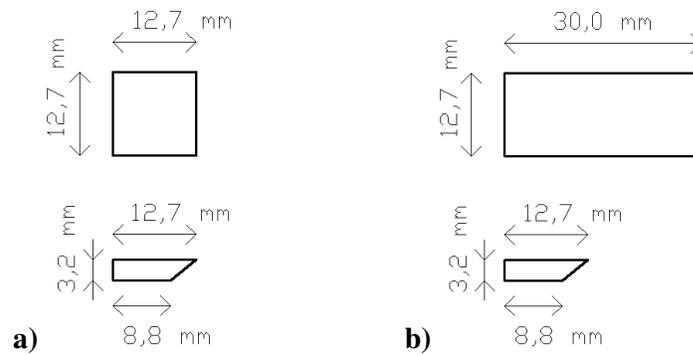


Figura 3.41: Dimensões das placas de alumínio utilizadas para acoplamento do clip-on-gage: a) de acordo a norma ASTM 7313-07, utilizada nos cps moldados e b) placa utilizada nos corpos de prova extraídos do Tanque-Teste.



Figura 3.42: Câmara de condicionamento de temperatura das amostras utilizadas (HIRSCH, 2009).

HIRSCH (2009) realizou teste para avaliar possível variação de temperatura nos corpos de prova utilizados no seu trabalho: um corpos de prova especial foi moldado, instalado um transdutor de temperatura, termopar. A Figura 3.43 mostra este corpos de prova especial e o termopar.

Após o confinamento do corpos de prova numa caixa térmica, sua retirada da câmara de condicionamento de temperatura, chegada da amostra na sala do ensaio e posicionamento na prensa, não se constatou variação de temperatura, mesmo exposto à temperatura ambiente desta sala no intervalo de tempo de realização do

ensaio (em torno de 10 minutos) segundo HIRSCH (2009). Todos os ensaios da presente pesquisa foram realizados à temperatura de 10° C.



Figura 3.43: Corpos de prova com termopar para controle de temperatura, dentro da câmara de condicionamento (HIRSCH, 2009).

c) Execução do ensaio de Tração em Disco Circular com Fenda:

Para a realização do ensaio foram utilizadas duas garras de carregamento de modo a permitir tracionar cada corpos de prova na prensa de carregamento, usinadas na Oficina Mecânica do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, durante a pesquisa de HIRSCH (2009). Na Figura 3.44 mostram-se tais garras utilizadas neste ensaio.

A prensa utilizada neste ensaio foi a Shimadzu Autograph AG-X 100 kN, com célula de carga do tipo SLFL de 100kN. Após a fixação do corpos de prova às garras de carregamento e deste conjunto (garras e corpo de prova) à prensa de ensaio, foi acoplado o clip-on-gage às placas de alumínio, posicionadas no chanfro. Na Figura 3.45 mostra-se a prensa de carregamento utilizada.



Figura 3.44: Garras utilizadas para fixação do corpo de prova na prensa de carregamento do ensaio (HIRSCH, 2009).

O clip-on-gage (Figura 3.46) é de marca Shimadzu, modelo TCK 3-10 M682801, e sua função é fornecer as medidas do deslocamento de abertura da trinca durante o ensaio e permitir o controle da velocidade de carregamento.



Figura 3.45: Prensa utilizada para realização dos ensaios no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ.

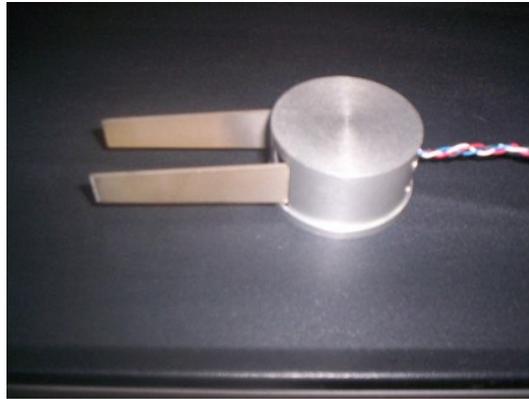


Figura 3.46: *Clip - on - gage* empregado nos ensaios de tração neste estudo

Após a realização de todos os preparativos do ensaio tem início o carregamento para fratura da amostra. Os procedimentos empregados, a partir de então, seguiram a norma ASTM 7313-07:

- aplicar uma carga não superior a 0,2 kN, apenas para ajuste do conjunto;
- realizar o carregamento através da prensa, mantendo velocidade de deslocamento da abertura da trinca de 0,017 mm/s (ou 1 mm/min), controlada pelo *clip-on-gage*;
- o final do ensaio ocorre quando a carga aplicada ao corpos de prova se reduz a 0,1 kN.

Também nesta pesquisa, como critério de conclusão do ensaio, foi utilizada a abertura máxima do *clip-on-gage*: quando este deslocamento atingia 10 mm, o ensaio era interrompido devido ao deslocamento máximo que pode ser registrado pelo *clip-on-gage* disponível. Na Figura 3.47 mostra-se a configuração do ensaio: conjunto garras e corpo de prova, e o *clip-on-gage*.

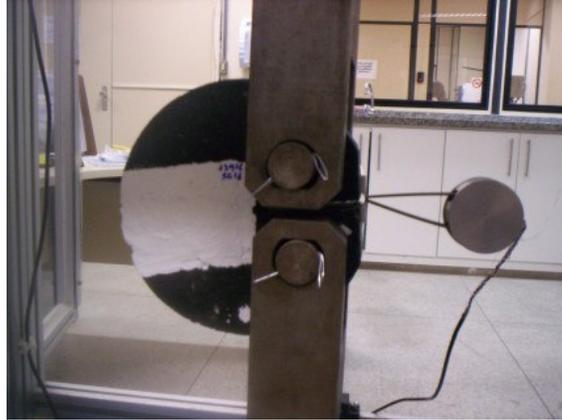


Figura 3.47: Configuração final para o início do ensaio de tração em disco com fenda (garras de carregamento, corpo de prova e *clip-on-gage*).

3.4.

Considerações finais

Este capítulo apresentou o programa experimental desta pesquisa, abordando os procedimentos empregados na preparação e execução dos ensaios, através do modelo físico e amostras de misturas asfálticas.

Uma série de circunstâncias, não esperadas inicialmente, prejudicou a realização dos ensaios previstos no planejamento inicial desta pesquisa, com uso do modelo físico, impossibilitando a obtenção de dados conclusivos, em verdadeira grandeza, sobre o uso de geogrelhas como camada intermediária de anti-reflexão de trincas. Um programa de ensaios alternativos de laboratório teve que ser montado para poder comparar a situação de referência - sem geogrelha - com as duas situações reforçadas com distintas geogrelhas.

Portanto, através de ensaios laboratoriais em corpos de prova de misturas asfálticas foi possível estabelecer a influência de reforço da geogrelha, em relação às situações analisadas (amostras com e sem camada intermediária de geogrelha).