

5. MÉTODO EXPERIMENTAL

Para atingir o objetivo de comparar misturas de areia-asfalto a frio convencionais e aquelas preparadas com polímero foi seguido um método de estudo, indicado na figura 5.1. Primeiro foi definida uma faixa granulométrica na qual o material deveria se enquadrar e o material foi separado em frações e arranjado nas porcentagens corretas. Depois foram feitas as dosagens das misturas convencionais e com polímero para estimar o teor ótimo de ligante. Com este teor definido foram moldados todos corpos de prova utilizados nos ensaios.

5.1 PREPARAÇÃO DA AREIA

A areia recebida do DERT para a pesquisa foi colocada em estufa a 105°C e depois de seca foi realizada a separação granulométrica. Os agregados maiores, que não seriam utilizados, foram retirados e o resto do material foi separado nas frações correspondentes às peneiras utilizadas na pesquisa. A quantidade exata de material de cada corpo de prova foi colocada em sacos plásticos e mantidos assim até a hora da moldagem.

5.2 PREPARAÇÃO DA EMULSÃO

As emulsões convencional e modificada com polímeros foram recebidas da Ipiranga Asfaltos S.A. em latas de 20 litros. Suas características encontram-se descritas em capítulo anterior.

Antes de cada moldagem as emulsões eram agitadas durante alguns minutos para prevenir a segregação de material sólido no fundo. Para a dosagem, a quantidade de emulsão necessária foi retirada diretamente destas latas, mas para a moldagem dos demais corpos de prova a emulsão foi estocada em recipientes maiores que facilitavam a homogeneização.

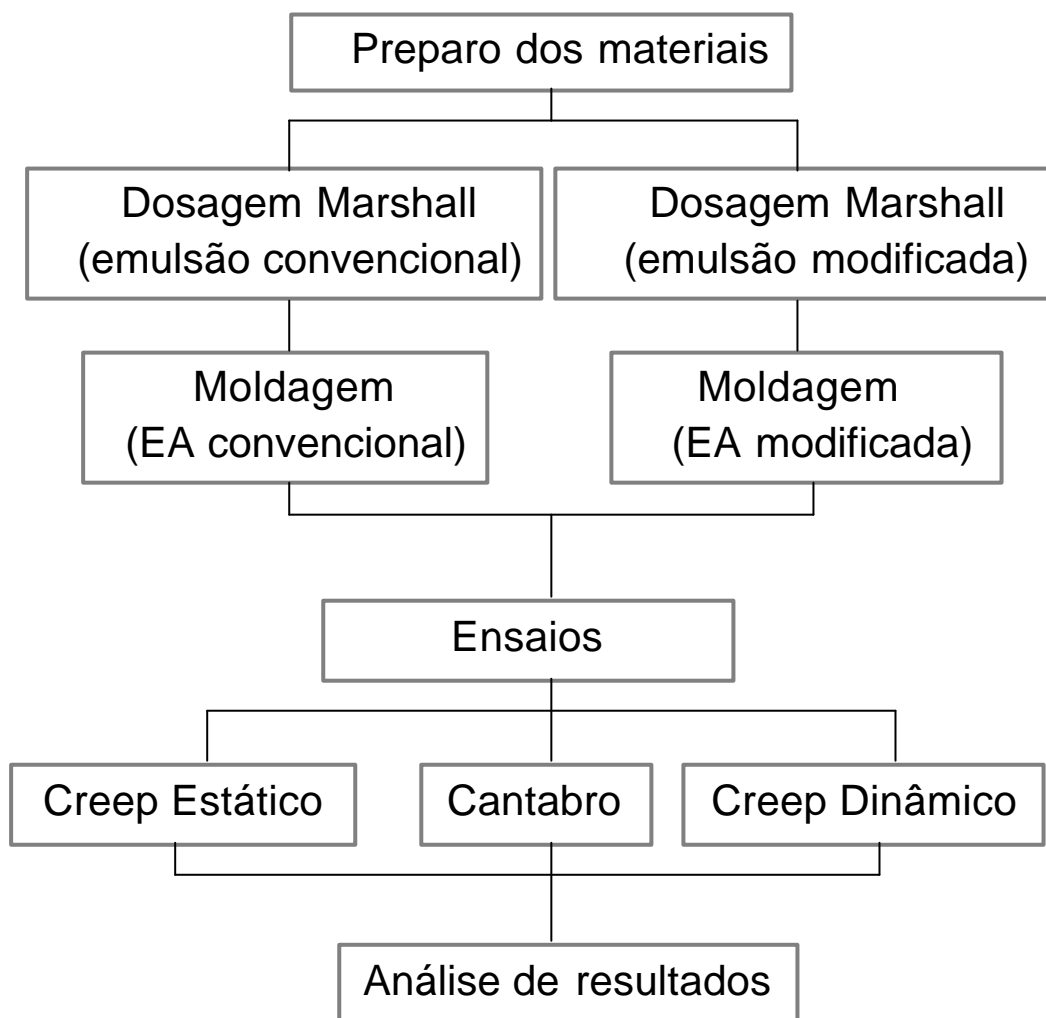


Figura 5.1: Esquema de trabalho seguido

5.3 DOSAGEM DAS MISTURAS

O objetivo da dosagem é determinar uma quantidade de asfalto que irá produzir uma mistura asfáltica com as seguintes características (ASPHALT INSTITUTE, 1995):

- Asfalto suficiente para garantir um pavimento durável
- Estabilidade suficiente para atender o tráfego sem deslocamentos ou deformações
- Vazios suficientes que permitam uma pequena pós-compactação pelo tráfego e expansão do asfalto devido ao aumento de temperatura
- Um volume máximo de vazios para limitar a permeabilidade de ar e umidade
- Trabalhabilidade suficiente para permitir a pavimentação sem segregação
- Uma textura de agregado apropriada para garantir um pavimento com atrito mesmo em pista molhada.

O método utilizado para definir um teor ótimo de ligante para esta pesquisa foi o método Marshall, que é o um método simples e de mais amplo uso no Brasil. O primeiro passo para a determinação do teor ótimo é a estimativa dos teores iniciais de ligante, definida através da fórmula de Vogt, que é uma adaptação da fórmula de Duriez para determinar a superfície específica, e da segunda fórmula de Duriez, para dosagem de misturas asfálticas.

$$100\Sigma = 0,07P_4 + 0,14P_3 + 0,33P_2 + 0,81P_1 + 2,7S_3 + 9,15S_2 + 21,9S_1 + 135F \text{ (m}^2 / \text{kg)}$$

Equação 5.1 : Fórmula de Vogt

onde,

P_4 Fração entre as peneiras 50 - 25 mm

P_3 Fração entre as peneiras 25 - 12,5 mm

P_2 Fração entre as peneiras 12,5 - 4,76 mm

P_1 Fração entre as peneiras 4,76 - 2 mm

S_3 Fração entre as peneiras 2 - 0,42 mm

- S₂ Fração entre as peneiras 0,42 - 0,177 mm
S₁ Fração entre as peneiras 0,177 - 0,074 mm
F Fração passando na peneira 0,074 mm

$$p = k \cdot \Sigma^{0,2}$$

Equação 5.2 : Segunda fórmula de Duriez

onde,

- P: % de asfalto residual, em relação ao peso total dos agregados
Σ: Superfície específica (m²/kg)
K: Módulo de riqueza

Do teor inicial obtido estimou-se a faixa de estudo, variando a quantidade de emulsão, acima e abaixo do teor encontrado. O módulo de riqueza adotado nesta dosagem para a segunda fórmula de Duriez foi de 4,15.

O teor inicial de asfalto encontrado em relação ao peso dos agregados foi de 6,7%.

Para a dosagem seguiu-se a norma DNER 107-80, tanto para as misturas convencionais como para as com polímero. A norma estipula que após a mistura dos agregados com a emulsão não se passe mais de 60 minutos até o início da compactação. No total foram moldados 36 corpos de prova, compactados com 75 golpes por face e rompidos na prensa Marshall.

Os corpos de prova foram compactados com 75 golpes em cada face porque se esperava que uma compactação mais intensa diminuísse a variação de resultados para corpos de prova moldados com o mesmo teor de ligante. Após algumas tentativas estipulou-se que 4% seria o teor ótimo de umidade para a areia antes da mistura com a emulsão.

A dosagem transcorreu normalmente, mas por um erro de procedimento um ponto de estabilidade e fluência da amostra convencional teve que ser

desprezado. Fora este fato, muitas dúvidas surgiram com relação aos resultados, por ser esta a primeira vez que se realizava dosagem Marshall utilizando areia-asfalto a frio no laboratório de estradas da EESC/USP. A seguir encontram-se gráficos e tabelas com a média dos valores encontrados na dosagem. Em anexo estão as tabelas com todos os valores.

% CAP	d	D	Vv	VAM	RBV	E	f	Vb
4,50	1,711	2,434	29,7%	37,2%	20,2%	125,3	17,0	7,5%
5,25	1,716	2,408	28,7%	37,5%	23,4%	197,0	19,0	8,8%
6,00	1,740	2,383	27,0%	37,2%	27,4%	188,0	20,5	10,2%
6,75	1,801	2,358	23,6%	35,5%	33,5%	186,1	22,0	11,9%
7,50	1,820	2,334	22,0%	35,3%	37,7%	151,1	23,3	13,3%
8,25	1,860	2,310	19,5%	34,4%	43,5%	88,3	21,3	15,0%

Tabela 5.1 : Resultado da dosagem - Emulex

% CAP	d	D	Vv	VAM	RBV	E	f	Vb
5,13	1,986	2,412	17,7%	27,6%	36,0%	540	14	10,0%
5,66	1,961	2,394	18,1%	28,9%	37,4%	494,7	15,0	10,8%
6,18	1,968	2,377	17,2%	29,1%	40,8%	436,2	15,5	11,9%
6,70	1,985	2,360	15,9%	28,9%	44,9%	367,5	19,5	13,0%
7,25	1,974	2,342	15,7%	29,7%	47,1%	421,6	17,0	14,0%
7,80	1,964	2,324	15,5%	30,4%	49,1%	302,8	16,0	14,9%

Tabela 5.2 : Resultado da dosagem - RL - 1C

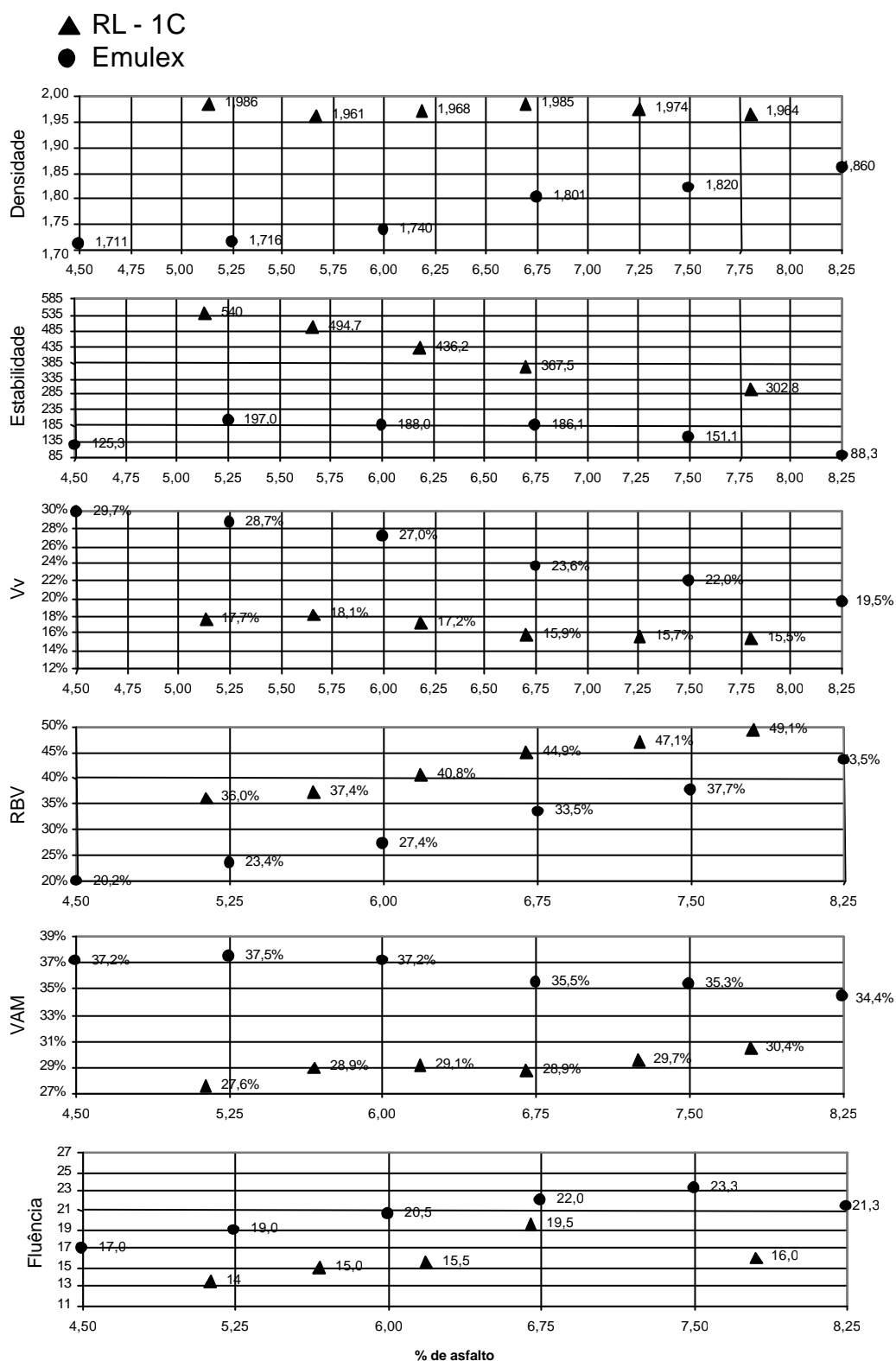


Figura 5.2 : Resultado da dosagem Marshall

Os corpos de prova fabricados com Emulex obtiveram densidades bem inferiores aos de RL - 1C. Aparentemente a densidade das misturas com Emulex ainda poderiam alcançar um valor maior com o aumento do teor de ligante, mas já no teor de 8,25% a mistura estava segregando líquido durante a compactação. A estabilidade dos corpos de prova fabricados com Emulex ficou bem abaixo da estabilidade obtida nas misturas com RL - 1C.

Com relação ao volume de vazios, de acordo com DAVIS (1987), a diminuição do volume de vazios aumenta a resistência da mistura à deformação permanente. Sob este aspecto a mistura com Emulex, que tem maior porcentagem de vazios aparenta ser menos resistente.

Os resultados que mais causaram dúvidas são os do ensaio de estabilidade e fluência. Pode ser que os valores de estabilidade foram baixos porque a secagem na estufa após a compactação foi feita com o corpo de prova ainda apoiado em sua base. Este procedimento dificulta a perda de água do corpo de prova, e como já foi visto em capítulo anterior, a perda d'água governa o aumento de resistência da mistura.

Para a moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios modificou-se este procedimento e os corpos de prova eram colocados na estufa sem sua base. Verificou-se que estes corpos de prova saíam da estufa bem mais secos que os utilizados na dosagem.

Outro fato que causou dúvidas foi que os corpos de prova fabricados com Emulex apresentam resultados de estabilidade e densidade menores e de fluência maiores que os fabricados com emulsão RL -1C convencional. Com relação a este aspecto foi notado durante a compactação dos corpos de prova com Emulex que o martelo saltava um pouco, e que a altura dos corpos de prova era bem maior do que os convencionais, chegando a quase preencher totalmente o cilindro.

Com relação ao aspecto dos corpos de prova, para teores de aproximadamente 7,5% de ligante o corpo de prova perdia bastante líquido, expulso durante a compactação, enquanto teores menores que 5,25% eram excessivamente secos e não promovia um recobrimento aceitável do agregado.

O teor ótimo de ligante escolhido foi o mesmo para os dois tipos de mistura. Este procedimento visa facilitar a comparação de resultados dos ensaios realizados. Estipulou-se o ótimo com 6,5%, e os teores acima e abaixo foram escolhidos como 7,25% e 5,75%.

5.4 CORPOS DE PROVA

Para a realização dos ensaios foram moldados corpos de prova Marshall com emulsão convencional e utilizando emulsão modificada com polímero, seguindo a norma DNER-ME 107-80, que trata da dosagem Marshall em misturas a frio. Todos os corpos de prova utilizados para os ensaios foram compactados com 75 golpes por face e foram ensaiados de acordo com a distribuição apresentada na tabela 4.3. Foram moldados corpos de prova nos teores abaixo, acima e no ótimo, com e sem polímero num total de 60 corpos de prova.

Os corpos de prova eram mantidos em estufa a 60⁰C por 24 horas e só então retirados dos moldes. Permaneciam curando por mais 1 semana fora do molde a temperatura ambiente e após este período eram colocados em sacos plásticos para evitar a perda de umidade. Este procedimento visou permitir que os corpos de prova estivessem em condições semelhantes de umidade independente da data de sua moldagem.

Para verificar os resultados, nos ensaios de creep dinâmico e estático foram ensaiados 3 corpos de prova para cada combinação de teor de ligante e teor de polímero. O resultado adotado é a média dos resultados dos 3 corpos de

prova ensaiados. No ensaio Cantabro, descrito a seguir, foram utilizados 4 corpos de prova para cada combinação de teor de ligante.

Ensaio	Cantabro	Creep Dinâmico	Creep Estático
RL-1C no ótimo	4	3	3
RL-1C acima do ótimo	4	3	3
RL-1C abaixo do ótimo	4	3	3
Emulex no ótimo	4	3	3
Emulex acima do ótimo	4	3	3
Emulex abaixo do ótimo	4	3	3

Tabela 5.3: Distribuição de corpos de prova

5.5 ENSAIOS

5.5.1 CREEP DINÂMICO E ESTÁTICO

A tendência de um revestimento em apresentar deformações permanentes pode ser estimada através de sua estabilidade mecânica. Por muito tempo utilizou-se a estabilidade Marshall como parâmetro para avaliar esta tendência. No entanto, “não há uma tendência definida de correlação entre a estabilidade e a deformação permanente” (SÁ & MOTTA, 1996), o que desencoraja a utilização deste ensaio. A estabilidade Marshall pode apenas dar uma pequena indicação em condições restritas, como indicou o ROAD RESEARCH LABORATORY¹ apud COELHO (1995), que encontrou consistência entre resultados da estabilidade Marshall e de deformação permanente obtida por ensaios de trilha de roda para teores de ligante igual ou superiores ao teor ótimo.

Resultados mais promissores foram encontrados utilizando o ensaio de “Creep”, ou fluência, que é considerado por vários autores como adequado

¹ ROAD RESEARCH LABORATORY -RRL “Bituminous material in road construction”. Londres, Inglaterra, Her Majesty’s Stationery Office, 1962. 611p

ao estudo da estabilidade de misturas asfálticas. (COELHO, 1995; MOTTA et al., 1996)

Os ensaios de fluência podem ser estáticos ou dinâmicos. No ensaio estático, um corpo de prova é submetido a uma carga estática que causa uma deformação uniaxial. O ensaio dinâmico difere do estático por utilizar uma carga pulsante. Em ambos ensaios LVDTs são colocados nos corpos de prova para medir o deslocamento.

VALKERING et al. (1990) acredita que para misturas que contém polímeros, e portanto apresentam comportamento reológico diferente do convencional, o ensaio estático é menos eficiente para prever a deformação permanente, não conseguindo refletir o aumento de estabilidade, enquanto o ensaio dinâmico exprime o efeito da adição de polímero na mistura. LITTLE et al. (1993) também considera que a condição de teste de carga cíclica é mais realista e possui maior poder de previsão de deformação permanente, mas ressalva que no caso de não haver a disponibilidade de se executar o ensaio dinâmico, o ensaio estático pode ser usado para avaliar a sensibilidade da mistura à deformação permanente. Nesta pesquisa preferiu-se utilizar os dois tipos de ensaio, o dinâmico por ser aparentemente o mais indicado a avaliar misturas com polímeros e o estático por ser mais simples e também ser eficaz.

Os parâmetros do ensaio variam entre os trabalhos consultados, mas em média utilizam-se ciclos de 1Hertz para o ensaio dinâmico e tensão de compressão de 0,1 Mpa nos dois tipos de ensaio. Na tabela 5.4 encontram-se tempos de carga e ciclo encontrados em alguns trabalhos consultados. Deste ensaio podemos obter a deformação permanente por número de ciclos, o módulo de elasticidade da mistura e as componentes de deformação elástica, plástica, viscoelástica e viscoplástica.

Autor	Tempo de carga	Tempo de ciclo
Valkering et al. (1990)	0,2 s	2 s
Motta et al. (1996)	0,1 s	1 s
Sá & Motta (1996)	0,1 s	1 s

Tabela 5.4 : Tempos de carga e ciclo de alguns trabalhos consultados

Tanto os ensaios dinâmicos como estáticos são realizados geralmente por pelo menos 3600 s. A deformação ao final do ensaio aponta quais são as misturas mais susceptíveis à deformação permanente. UZAN et al (1985) realizaram ensaios de creep dinâmico a 25⁰C em misturas de areia-afalto e encontraram que a deformação total na ruptura do corpo de prova está entre 0,8 e 2,2% de deformação para níveis de tensão de 0,05 a 0,1 Mpa.

O corpo de prova submetido ao ensaio de creep passa por 3 estágios, apresentados na figura 5.2, até sua falha. No primeiro estágio a deformação aumenta rapidamente, no segundo a deformação segue uma taxa constante e na terceira região ocorre a ruptura, com acentuado aumento da taxa de deformação. Em condições semelhantes às encontradas em campo uma mistura estável não deve apresentar o terceiro estágio citado acima (LITTLE et al., 1993).

Para esta pesquisa os corpos de prova ensaiados são mantidos em estufa a 40⁰C durante duas horas antes dos ensaios. O equipamento utilizado também se encontrava à esta temperatura pois era mantido em um gabinete de temperatura controlada. O ensaio dinâmico foi realizado com a tensão de 0,1 MPa. O ciclo utilizado foi de 0,2 segundos de carga e 0,8 segundos de descanso, tendo portanto frequência de 1 hertz. O ensaio foi previsto para durar uma hora ou até o corpo de prova atingir o máximo valor de deformação que o equipamento poderia registrar. Durante o ensaio a tensão aplicada e a deformação eram medidas duas vezes em cada ciclo, uma vez no pico de deformação e outra antes do início do ciclo seguinte. De 100 em

100 ciclos era registrado um ciclo completo, com medidas a cada décimo de segundo.

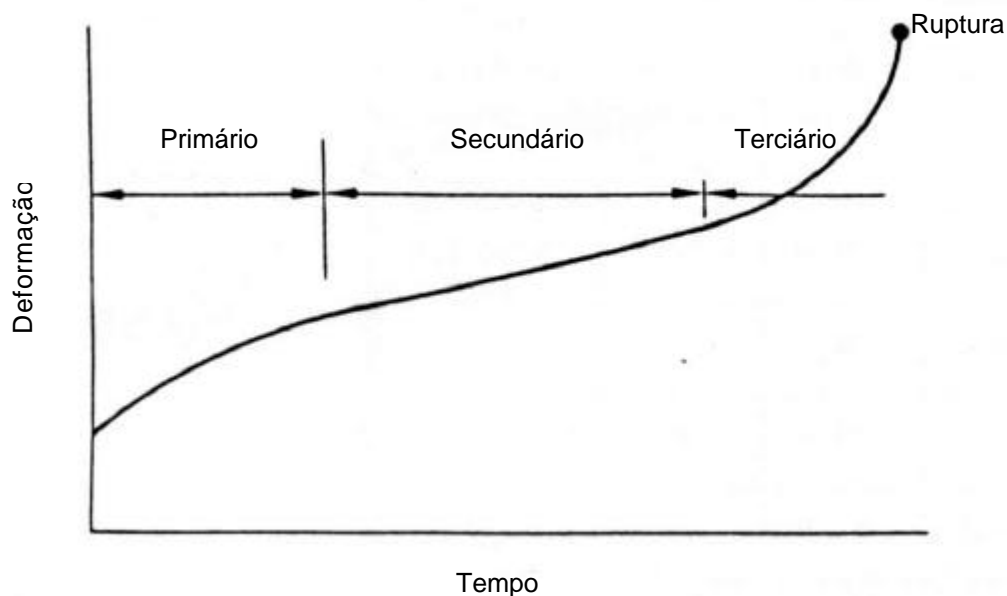


Figura 5.3: Estágios do ensaio creep (LITTLE et al, 1993)

As medidas de deformação eram feitas através de dois LVDTs instalados diametralmente ao corpo de prova. A média destas duas medidas é considerada como a deformação que o corpo de prova sofre.

Ambos ensaios foram realizados com equipamento de compressão disponível no laboratório de estradas da EESC/USP, apresentado na figura 5.9. A aquisição dos dados de tensão e deformação foi realizada por programas desenvolvidos através do software LABVIEW pelo Eng. Cláudio Taira.

Para cada combinação de teor e tipo de emulsão foram executados ensaios com 3 corpos de prova. A média dos 3 ensaios é considerada como representativa da combinação teor/emulsão. Em alguns casos foram desprezados alguns dos corpos de prova ensaiados por apresentarem

diferenças muito grandes com relação aos outros dois corpos ensaiados ou devido a ocorrência de algum erro durante o ensaio.

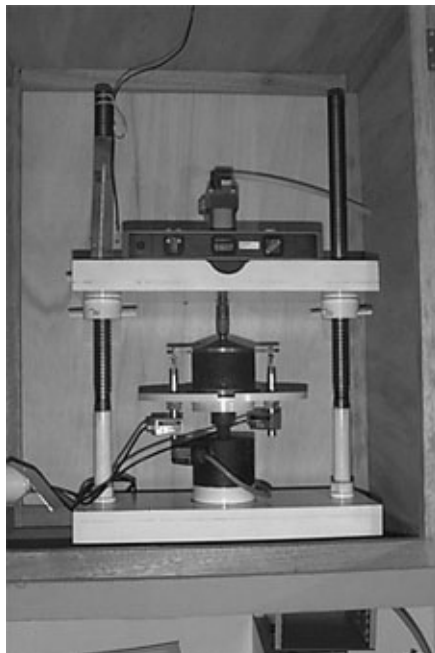


Figura 5.4: Equipamento utilizado para os ensaios creep

Para o ensaio estático utilizou-se a tensão de 0,05 MPa, pois a tensão de 0,1 MPa utilizada no ensaio dinâmico provocou rompimento prematuro de todos corpos de prova ensaiados. Com a intenção de promover uma melhor acomodação no corpo de prova ensaiado utilizou-se um pré-condicionamento utilizando a mesma carga aplicada no ensaio por 2 minutos seguidos de 5 minutos de descanso antes que se iniciasse o ensaio propriamente dito. O ensaio estático também deveria se prolongar por uma hora ou até o deslocamento máximo registrável pelo equipamento. As deformações eram medidas a cada décimo de segundo durante os 15 minutos iniciais do ensaio, entre os 15 minutos iniciais e os 60 minutos as deformações eram registradas uma vez por segundo. Com 60 minutos de ensaio, quando a carga era retirada, as deformações voltavam a ser medidas a cada décimo de segundo até o final do ensaio, 15 minutos depois.

5.5.2 CANTABRO

O ensaio espanhol Cantabro permite avaliar indiretamente a coesão e resistência à desagregação da mistura frente aos efeitos abrasivos originados pelo tráfego. BOTTIN et al. (1997) utilizaram este ensaio para avaliar o desgaste em areia-asfalto a quente, e o considerou mais simples e com maior repetibilidade do que o ensaio de carregamento de roda “L.W.T.”. O ensaio é feito na máquina de abrasão Los Angeles sem as esferas de aço. Após pesado, o corpo de prova é colocado no cilindro Los Angeles submetido a 200 revoluções, retirado e pesado outra vez. A diferença entre a massa inicial e a final dividida pela massa inicial é o valor percentual do desgaste, conforme indica a equação 5.3. Para cada teor são necessários 4 corpos de prova ensaiados um de cada vez. A média dos 4 corpos de prova é o valor do desgaste para aquele teor.

$$d = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100$$

Equação 5.3 : Valor percentual do desgaste

onde,

d - valor percentual do desgaste

p₁ - peso antes do ensaio

p₂ - peso depois do ensaio

O ensaio Cantabro foi realizado com algumas diferenças com relação a norma espanhola NTL-325/86. A norma estipula que tanto o cilindro de abrasão quanto os corpos de prova devem permanecer a temperatura de 25°C. Não havia disponibilidade de uma sala climatizada que pudesse manter o cilindro a esta temperatura, nem de estufas disponíveis capazes de manter os corpos de prova a uma temperatura tão baixa. Portanto o ensaio teve que ser feito à temperatura ambiente, a qual esteve sempre próxima dos 25°C desejados.

Outra diferença entre os ensaios realizados e a norma foi o tempo de cura dos corpos de prova. A norma sugere que os corpos de prova sejam ensaiados até 24 horas após sua moldagem, mas neste programa de ensaios os corpos ficaram curando a temperatura ambiente durante 7 dias após serem retirados da estufa.