

## **5 - PROGRAMAÇÃO DA INVESTIGAÇÃO LABORATORIAL**

---

### **5.1 - INTRODUÇÃO**

Para avaliação do ligante asfalto-borracha desenvolve-se uma programação de ensaios de laboratório, com o objetivo de determinar as principais propriedades de engenharia e quantificar os efeitos dos principais fatores intervenientes sobre o desempenho do asfalto-borracha.

Na etapa de planejamento optou-se por um experimento fatorial, em virtude da possibilidade de se avaliar não só os efeitos dos fatores, mas também suas interações.

Para avaliar as propriedades de engenharia do ligante asfalto-borracha foram considerados ensaios tradicionais e também ensaios desenvolvidos ou adaptados durante o Programa SHRP (método Superpave), que constituem as variáveis dependentes do experimento. Quando da escolha das variáveis independentes, ou seja, dos fatores e níveis julgados mais importantes com base na revisão bibliográfica, teve-se que considerar outros aspectos além dos técnicos, mas não menos significativos. Do fatorial previsto inicialmente alguns fatores e níveis tiveram que ser excluídos, em virtude das dificuldades enfrentadas no preparo das amostras, com quebra de equipamentos e, principalmente, pela dependência de um único laboratório brasileiro

(CENPES, Petrobrás, RJ) para a realização de alguns dos ensaios da Especificação Superpave.

Dada a dificuldade das pessoas diretamente envolvidas (no caso, orientada e orientador) para reduzir o fatorial inicialmente proposto, de grande ajuda foram as sugestões e críticas dos professores que participaram de algumas etapas acadêmicas (defesa do projeto de tese e exame de qualificação), pois eles anteciparam as dificuldades que surgiriam, como de fato surgiram, e ajudaram a trazer a programação do experimento mais próxima do exequível.

## **5.2 - PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS**

O objetivo de um experimento é explorar as relações entre os fatores que afetam um processo ou confirmar alguma hipótese. O planejamento de experimentos auxilia, principalmente, na organização dos ensaios, podendo-se empregar técnicas diferentes de acordo com o tipo de análise esperada. Em outras palavras, o planejamento ou projeto de um experimento serve para assegurar que os dados coletados sejam relevantes e para fornecer o máximo de informações possíveis, com um número de ensaios suficiente e não superior ao necessário.

Dentre as técnicas disponíveis destacam-se os experimentos fatoriais, que são empregados para se estudar também os efeitos simultâneos (interações) de dois ou mais fatores. Em um experimento fatorial são investigadas todas as combinações possíveis entre os fatores e seus respectivos níveis. O efeito de um fator é definido como a mudança na resposta (variável dependente) produzida pela mudança no nível do fator, sendo também denominado de efeito principal porque se refere aos fatores primários do estudo. Mas podem ocorrer situações em que as interações entre os fatores são mais significativas que alguns dos fatores primários.

Segundo MONTGOMERY (1991), o planejamento de experimentos deve conter as seguintes etapas:

- a) **Reconhecimento e Definição do Problema:** identifica-se a existência de um problema que pode ser estudado (ou resolvido) através da experimentação. É a etapa de organização das idéias, em que se explicita o que se conhece e o que se pretende conhecer com o experimento;
- b) **Escolha dos Fatores e Níveis:** definem-se os fatores (variáveis independentes) a serem analisados no experimento, a faixa dentro da qual cada fator irá variar e os níveis desses fatores com que os ensaios serão realizados. No planejamento de experimento, os fatores e níveis a serem considerados precisam ser definidos *a priori*;
- c) **Definição da Técnica de Análise:** escolhe-se a técnica experimental, seleciona-se a variável de resposta (variável dependente) e define-se o número de repetições (réplicas) e a ordem dos testes (geralmente aleatórios), de forma que com o menor número de amostras e, conseqüentemente, de ensaios, seja possível obter o máximo de informações sobre os fatores individuais e também sobre as interações entre eles;
- d) **Condução do Experimento:** deve-se monitorar cuidadosamente o processo, para evitar erros que possam invalidar os resultados do experimento;
- e) **Análise dos Resultados:** são empregados métodos estatísticos que servem para adicionar objetividade ao processo de tomada de decisão;

- f) **Conclusões e Recomendações:** após a realização da análise estatística, elabora-se um relatório com as principais conclusões, que devem ser válidas e objetivas.

### 5.3 – VARIÁVEIS INDEPENDENTES - FATORES E NÍVEIS

O termo fator (também denominado de “tratamento”) é utilizado para designar uma variável independente. Os diferentes “tratamentos” das variáveis independentes são chamados de níveis do fator. Considera-se um experimento fatorial quando existem duas ou mais variáveis independentes (MONTGOMERY, 1991).

#### 5.3.1 - TIPO DE BORRACHA

A borracha utilizada neste trabalho foi fornecida pela Relastomer Tecnologia e Participações S.A., sendo uma mistura de borracha de pneus de automóveis e caminhões.

#### 5.3.2 - TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE BORRACHA

A borracha Relastomer é composta de partículas que passam na peneira #40 e ficam retidas na peneira #200 (0,42 a 0,075 mm, Tabela 5.1). As frações foram obtidas por peneiramento do material recebido da Relastomer e tem como peneiras de controle as peneiras #40 (0,42 mm), #50 (0,30 mm) e #100 (0,15 mm) (ABNT, Anexo G).

**TABELA 5.1** – Granulometria da borracha Relastomer

<b>PENEIRA (D, mm)</b>	<b>% QUE PASSA</b>
#40 (0,42)	92
#50 (0,30)	86
#100 (0,15)	6
#200 (0,075)	1

Para este fator qualitativo foram escolhidos dois níveis: uma fração grossa (passa na peneira #40 e fica retido na #50) e uma fração fina (passa na peneira #50 e fica retido na #100).

### **5.3.3 - TEOR DE BORRACHA**

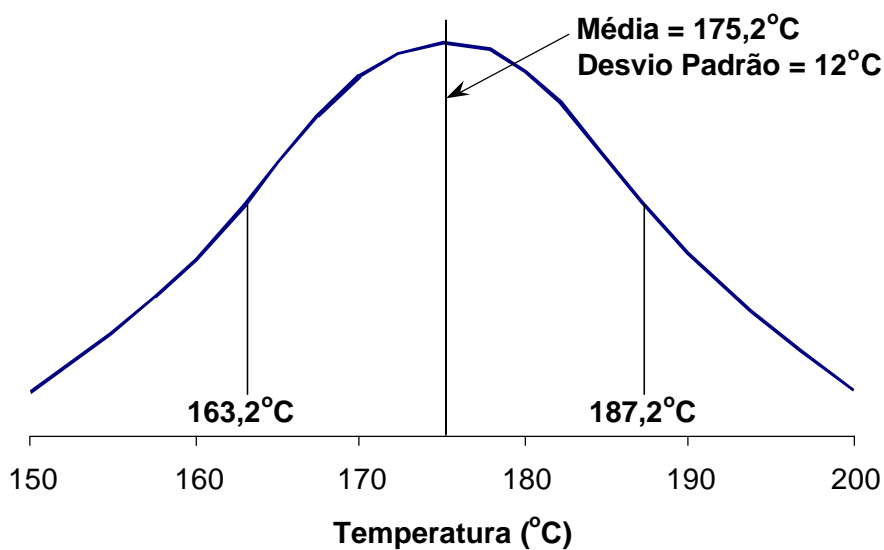
O teor de borracha ótimo depende do tamanho das partículas e do tipo de aplicação em que será usado o ligante asfalto-borracha. Neste trabalho, são considerados os teores de 6, 12, 18 e 24% de borracha.

### **5.3.4 - TIPO E TEOR DE LIGANTE ASFÁLTICO**

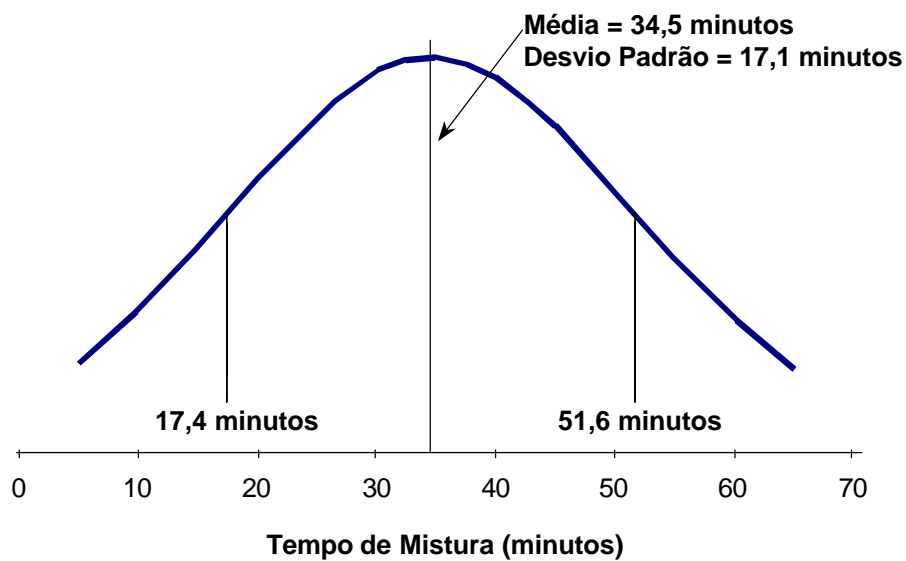
De acordo com a especificação Superpave para materiais asfálticos, que seleciona o ligante em função do clima da região em que será utilizado o material, o Estado de São Paulo necessitaria, em condições normais, de um ligante PG 64-10, sem considerações adicionais sobre o tráfego e velocidade. Apesar de no Brasil ainda não haver a produção de ligantes de acordo com a Especificação Superpave, quando dos ensaios do ligante asfalto-borracha os resultados serão comparados como valores exigidos para um PG 64-10.

### **5.3.5 - TEMPERATURA E TEMPO DE REAÇÃO**

Para auxiliar a escolha dos níveis dos fatores temperatura e tempo de reação foi feita análise estatística das temperaturas de misturas e dos tempos de reação apresentados na Tabela 4.1. Foram considerados, no entanto, apenas os valores de temperatura e de tempo de reação correspondentes àqueles utilizados com borracha de granulometria compatível com os tamanhos das partículas de borracha ensaiados neste trabalho (de #40 a #200, ou seja, de 0,42 a 0,075 mm). As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam histogramas dos fatores temperatura de mistura e tempo de reação com base nos valores apresentados na Tabela 4.1



**FIGURA 5.1** – Histograma dos valores de temperatura de mistura (Fonte: Trabalhos listados na Tabela 4.1)



**FIGURA 5.2** – Histograma dos valores de tempo de reação (Fonte: Trabalhos listados na Tabela 4.1)

O valor médio de temperatura de mistura é igual a 175°C, com desvio padrão igual a 14°C. O valor médio do tempo de reação é igual 35 minutos, com desvio padrão igual a 17 minutos. Optou-se portanto, por seleccionar os

seguintes níveis: 165, 175 e 185°C para a temperatura de mistura e 20, 35 e 50 minutos para o tempo de reação.

### **5.3.6 - DILUENTE**

Sendo o objetivo principal deste trabalho a avaliação, em laboratório, do desempenho do ligante asfalto-borracha e sendo os efeitos principais do diluente as alterações de propriedades relacionadas apenas às etapas de produção e compactação de mistura asfáltica (ligante + agregados), optou-se por não incluir o diluente entre os fatores analisados neste trabalho.

## **5.4 – PROGRAMAÇÃO FATORIAL DO EXPERIMENTO**

Conforme apresentado na Tabela 4.1, os principais fatores que condicionam o desempenho do ligante asfalto-borracha são a temperatura de mistura, o tempo de reação, a granulometria da borracha, o tipo de ligante e o teor de borracha.

### **5.4.1 – MATRIZ FATORIAL INICIAL**

Foram escolhidos os fatores apresentados na Tabela 4.1 para compor a matriz fatorial inicialmente elaborada. Procurou-se trabalhar com pelo menos 3 níveis no caso de fatores quantitativos, para avaliação da existência de comportamento não linear, cobrindo o valor médio e os intervalos mais ou menos um desvio padrão. Dessa forma, foram selecionados os seguintes fatores e níveis:

- **Fator A:** teor de borracha
  - nível  $a_1 = 6\%$
  - nível  $a_2 = 12\%$
  - nível  $a_3 = 18\%$
  - nível  $a_4 = 24\%$

- **Fator B**: tamanho das partículas de borracha
  - nível  $b_1 = \#100$  (partículas que passam na  $\#100$  e ficam retidas na  $\#200$ , ou seja, partículas com diâmetro entre 0,15 e 0,075 mm)
  - nível  $b_2 = \#50$  (partículas que passam na  $\#50$  e ficam retidas na  $\#100$ , ou seja, partículas com diâmetro entre 0,30 e 0,15 mm)
  - nível  $b_3 = \#40$  (partículas que passam na  $\#40$  e ficam retidas na  $\#50$ , ou seja, partículas com diâmetro entre 0,42 e 0,30 mm)
  
- **Fator C**: temperatura de mistura
  - nível  $c_1 = 165^\circ\text{C}$
  - nível  $c_2 = 175^\circ\text{C}$
  - nível  $c_3 = 185^\circ\text{C}$
  
- **Fator D**: tempo de reação
  - nível  $d_1 = 20$  minutos
  - nível  $d_2 = 35$  minutos
  - nível  $d_3 = 50$  minutos
  
- **Fator E**: tipo de ligante
  - nível  $e_1 = \text{CAP } 20$
  - nível  $e_2 = \text{CAP } 40$

Com essa programação fatorial, o número total de combinações é igual a:

$$N = 4 \times 3 \times 3 \times 3 \times 2 = 216 \quad (5.1)$$

Considerando-se a amostra de controle (sem borracha de pneus moída), as réplicas (indispensáveis para uma adequada análise estatística) e, principalmente, o elevado número de ensaios (variáveis dependentes), em

número de onze, necessários para caracterizar o desempenho do ligante asfalto-borracha, verificou-se que a programação fatorial inicialmente elaborada previa um número de ensaios além do que os recursos, os equipamentos e o tempo disponível permitiam realizar.

Em duas etapas acadêmicas, quando da defesa do projeto de tese e do exame de qualificação, os membros da banca avaliadora sugeriram uma redução no fatorial (no número de níveis e, eventualmente, no número de fatores), devido às dificuldades de elaboração das amostras e de realização de todos os ensaios, que atingiriam um total de 7.128 ensaios (considerando-se três réplicas e onze ensaios de controle). Não é demais lembrar as dificuldades para preparação das amostras, por não haver, de início, um equipamento apropriado no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da EESC/USP para manter a temperatura de mistura. Quanto à realização dos ensaios, o maior obstáculo foi a necessidade de deslocamento e estadia no Rio de Janeiro, pois o único laboratório composto com os equipamentos para realizar os ensaios Superpave no Brasil é o da Petrobrás, CENPES (Centro de Pesquisa Leopoldo A. Miguez de Mello).

Com o fator A (teor de borracha), sem dúvida o de maior interesse, optou-se por três níveis (6, 12 e 18%), que ainda permitem a análise de comportamento não-linear, ficando os teores de 0 e 24% para serem usados como valores de verificação das equações de regressão obtidas. Em outras palavras, os teores de 0 e 24% não entram no fatorial principal, que é a base da análise estatística, mas servem para avaliar os modelos estatísticos sem o risco de ocorrer “argumento circular”.

O fator B (tamanho das partículas) foi reduzido de três para dois níveis, excluindo-se a fração mais fina (passada na #100 e retida na #200) em virtude das características granulométricas da borracha Relastomer (menos que 6%

passando na #100). Os níveis remanescentes são, portanto, as partículas que passam na #50 e ficam retidas na #100 (ou seja, partículas de 0,30 a 0,15 mm) e partículas que passam na #40 e ficam retidas na #50 (ou seja, partículas de 0,42 a 0,30 mm).

Para o fator C (temperatura de mistura) houve a redução de um nível por razões técnicas, pois a panela elétrica adquirida, que tinha uma temperatura máxima nominal de 200°C, não conseguia manter a temperatura, durante a mistura, acima de 170°C. Dessa forma, optou-se pelas temperaturas de 160°C e 170°C.

O fator D (tempo de reação) foi excluído, tomando-se como base os trabalhos desenvolvidos na Universidade da Flórida por RUTH *et al.* (1997) e OTOO (1999). Considerando-se as granulometrias da borracha, optou-se por trabalhar apenas com o tempo de reação de 30 minutos.

O fator E (tipo de ligante) também foi excluído, por ser o CAP 20 de uso quase exclusivo no Estado de São Paulo.

#### **5.4.2 – MATRIZ FATORIAL DEFINITIVA**

Houve, portanto, necessidade de redução do número total de ensaios. Resumindo, neste trabalho são considerados os seguintes fatores e seus respectivos níveis (Tabelas 5.2 e 5.3)

- **Fator A:** teor de borracha
  - nível  $a_1 = 6\%$
  - nível  $a_2 = 12\%$
  - nível  $a_3 = 18\%$

- **Fator B:** tamanho das partículas de borracha
  - nível  $b_1 = \#50$  (partículas que passam na #50 e ficam retidas na #100)
  - nível  $b_2 = \#40$  (partículas que passam na #40 e ficam retidas na #50)
  
- **Fator C:** temperatura de mistura
  - nível  $c_1 = 160^\circ\text{C}$
  - nível  $c_2 = 170^\circ\text{C}$

**TABELA 5.2** - Matriz fatorial que representa a programação dos ensaios

Fator A (Teor de borracha)	Fator B (Tamanho das partículas de borracha)											
	b <sub>1</sub>						b <sub>2</sub>					
	Fator C (Temperatura de mistura)						Fator C (Temperatura de mistura)					
	c <sub>1</sub>			c <sub>2</sub>			c <sub>1</sub>			c <sub>2</sub>		
réplicas	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>3</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>3</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>3</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>3</sub>
a <sub>1</sub>												
a <sub>2</sub>												
a <sub>3</sub>												
a <sub>4</sub>												

**TABELA 5.3** – Numeração das amostras que representam a combinação de todos os fatores e níveis (seqüência aleatória)

FATORES	TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE BORRACHA (mm)			--	#50 - #100				#40 - #50			
	TEOR DE BORRACHA (%)			0	6	12	18	24	6	12	18	24
	TEOR DE LIGANTE (%)			100	94	88	82	76	94	88	82	76
TEMPERATURA (°C)	170	TEMPO DE MISTURA (minutos)	30	17	13	9	2	10	16	12	4	11
	160				14	1	8	5	15	3	7	6

O número total de ensaios depende do número de réplicas, que foi definido da seguinte forma: para os ensaios tradicionais foram preparadas três réplicas, enquanto para os ensaios Superpave (maior reprodutibilidade) foram preparadas duas réplicas. Resulta, dessa forma, um número de ensaios igual a 408, assim distribuídos:

- Penetração:  $17 \times 3 = 51$
- Ponto de amolecimento:  $17 \times 3 = 51$
- Ponto de Fulgor:  $17 \times 3 = 51$
- Viscosidade Brookfield:  $17 \times 2 \times 3 = 102$
- RTFOT: 17
- PAV: 17
- DSR:  $17 \times 3 \times 2 = 102$
- BBR: 17

## **5.5 – VARIÁVEIS DEPENDENTES**

As variáveis dependentes são representadas pelos ensaios utilizados para caracterização e avaliação do ligante asfalto-borracha. Os ensaios são divididos em dois grupos: tradicionais (viscosidade Saybolt-Furol; ponto de fulgor; penetração; ponto de amolecimento e ductilidade) e Superpave (viscosidade aparente; cisalhamento dinâmico antes e após envelhecimento de curto prazo e rigidez à fluência na flexão após envelhecimento de curto e longo prazo, antes e após envelhecimento de curto prazo, RTFOT e envelhecimento de longo prazo, PAV).

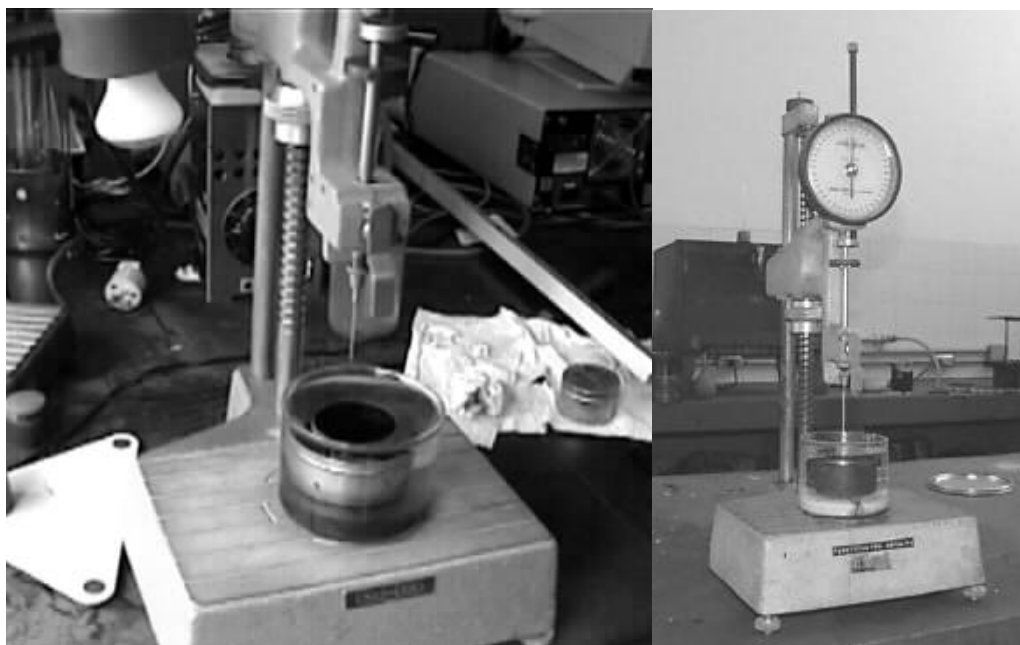
### **5.5.1 - ENSAIOS TRADICIONAIS**

Para controle de qualidade dos diferentes tipos de asfaltos, foram desenvolvidos, desde o início do século XX, vários ensaios que hoje são tradicionais para a avaliação laboratorial e certificação de ligante asfálticos.

Apesar de tradicionais, não fornecem propriedades fundamentais de engenharia, permitindo apenas a inferência das propriedades reológicas. Em virtude da enorme importância que tiveram e ainda continuam tendo em muitos lugares, foram considerados neste trabalho os seguintes ensaios:

#### a) Penetração

A penetração dos ligantes asfálticos pode ser determinada segundo o método descrito na ABNT/NBR 6576 (ABNT, 1998). Esse método serve para avaliar a consistência dos materiais betuminosos através da “penetração”, distância em décimos de milímetro que uma agulha padrão penetra verticalmente em uma amostra do material betuminoso sob condições específicas de temperatura (25°C), carga (100 gramas) e tempo (5 segundos). A Figura 5.3 ilustra o equipamento utilizado na determinação da penetração de ligantes asfálticos.



**FIGURA 5.3** - Equipamento utilizado na determinação da penetração de ligantes asfálticos

## b) Ponto de Amolecimento

O ponto de amolecimento dos ligantes asfálticos pode ser determinado segundo o método descrito na ABNT/MB-164/NBR 6560 (ABNT, 1972), conhecido como Método do Anel e Bola. Esse método descreve o procedimento para a determinação do ponto de amolecimento de cimentos asfálticos na faixa de 30 a 175°C. O ponto de amolecimento de um material é considerado como o valor de temperatura na qual a consistência de um ligante asfáltico passa do estado plástico ou semi-sólido para o estado líquido. No ensaio anel e bola, é a temperatura lida no momento em que a esfera metálica padronizada atravessa o anel (também padronizado) cheio com o material betuminoso, toca uma placa de referência após ter percorrido uma distância de 25,4 mm sob condições especificadas. A Figura 5.4 ilustra o equipamento utilizado na determinação do ponto de amolecimento de ligantes asfálticos - Método Anel e Bola.



**FIGURA 5.4** - Equipamento utilizado na determinação do ponto de amolecimento de ligantes asfálticos - Método Anel e Bola

### c) Ponto de Fulgor

O ponto de fulgor de um ligante asfáltico é a temperatura na qual existe uma liberação de vapores suficiente para, em mistura com ar e na presença de uma chama, provocar uma centelha. Portanto, indica a temperatura acima da qual o asfalto deve ser manuseado como produto inflamável, desde que haja uma fonte de ignição (faísca, chama, raios, tempestade magnética). É um ensaio muito prático que permite, também, verificar contaminações do asfalto por solventes, cujos pontos de fulgor são mais baixos. O ponto de fulgor dos ligantes asfálticos pode ser determinado segundo o método descrito na ABNT/NBR11341 (ABNT, 1990). A Figura 5.5 ilustra o equipamento utilizado na determinação do ponto de fulgor de ligantes asfálticos.



**FIGURA 5.5** - Equipamento utilizado na determinação do ponto de fulgor de ligantes asfálticos

#### d) Viscosidade Saybolt-Furol

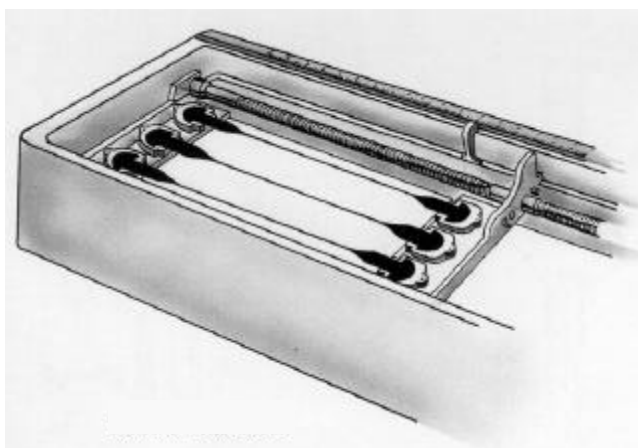
A Viscosidade Saybolt de ligantes asfálticos pode ser determinada segundo o método descrito na ABNT/IBP/P-MB-517 (ABNT, 1971b). Este método fixa o processo de determinação da viscosidade Saybolt de materiais betuminosos. Viscosidade Saybolt (expressa em segundos) é o tempo necessário para o escoamento de 60 ml de material, no viscosímetro de Saybolt, sob determinadas condições de temperatura. Geralmente, essa temperatura varia com o tipo de asfalto, sendo que para os cimentos asfálticos são utilizadas temperaturas de 135 e 177°C. A Figura 5.6 ilustra o equipamento utilizado na determinação da viscosidade Saybolt-Furol de materiais asfálticos.



**FIGURA 5.6** - Equipamento utilizado na determinação da viscosidade Saybolt-Furol

### e) Ductilidade

Define-se ductilidade como a capacidade de um asfalto sofrer deformações de sua massa sem se romper. O ensaio mede a distância em que um corpo de prova padrão de asfalto é alongado até seu rompimento. Asfaltos empregados na construção rodoviária devem apresentar ductilidade elevada, maiores que 1,0 m. Para determinar a ductilidade de ligantes asfálticos pode ser utilizado o método descrito na ABNT/MB67/NBR6293 (ABNT, 1971a). A Figura 5.7 ilustra o equipamento utilizado na determinação da ductilidade de materiais asfálticos.



**FIGURA 5.7** - Equipamento Utilizado na Determinação da Ductilidade (Fonte: ROBERTS *et al.*, 1998)

### 5.5.2 - ENSAIOS SUPERPAVE

A especificação Superpave classifica as misturas asfálticas com base no critério de desempenho e este leva em consideração as variações de temperatura e umidade, assim como o volume e a carga de tráfego. Além disso, para identificar as propriedades dos materiais relacionadas a vários defeitos, a especificação Superpave apresenta uma série de ensaios laboratoriais. A especificação é baseada em propriedades fundamentais da engenharia, incluindo o comportamento tensão-deformação dos materiais selecionados (Figura 5.8).



**FIGURA 5.8** - Fluxograma da estratégia utilizada no desenvolvimento da especificação de ligante asfáltico Superpave (adaptado de ANDERSON *et al.*, 1991)

Os ensaios adotados pelo Programa SHRP permitem a simulação do comportamento dos ligantes através da realização de ensaios a temperaturas similares à dos pavimentos em serviço. Esses ensaios simulam três estágios críticos da vida do ligante. O primeiro estágio simula o comportamento dos asfaltos virgens durante o transporte, armazenagem e manuseio. O segundo estágio representa o asfalto durante a produção e aplicação da mistura e é simulado pelo envelhecimento em ensaio de rotação de filme fino em estufa (RTFOT). O terceiro estágio é simulado pelo envelhecimento em vaso de pressão (PAV), onde amostras de ligante são expostas ao calor e à pressão para simular o envelhecimento durante a vida em serviço de um pavimento.

Um dos objetivos do Programa SHRP foi desenvolver especificações de ligantes asfálticos com base no desempenho. Este objetivo foi baseado na premissa de que os métodos e especificações existentes e atualmente em uso não garantem um bom desempenho a longo prazo e que muito desses ensaios precisam ser revistos, substituídos ou eliminados.

Estabelecido pelo Congresso dos Estados Unidos, com uma dotação de 150 milhões de dólares, o Programa SHRP procurou desenvolver métodos de análise de materiais betuminosos e de misturas asfálticas com base em propriedades fundamentais (módulo de rigidez, resistência à ruptura por fadiga e resistência à deformação permanente), ou seja, métodos baseados em propriedades diretamente relacionadas ao desempenho dos pavimentos em serviço. Os produtos obtidos enquadram-se em quatro categorias gerais: novos materiais, novos ensaios, novos equipamentos e novas especificações.

Os resultados dos estudos de materiais asfálticos do Programa SHRP foram agrupados e patenteados sob a denominação SUPERPAVE<sup>®</sup>, que consiste de novas especificações para cimentos asfálticos e misturas betuminosas, baseadas em modelos de desempenho empírico-mecanísticos, um elenco de novos ensaios e procedimentos, um novo método de dimensionamento de misturas asfálticas, propostas de procedimentos para avaliação e desenvolvimento de modificadores, um sistema para controle da construção nas pistas e programas computacionais.

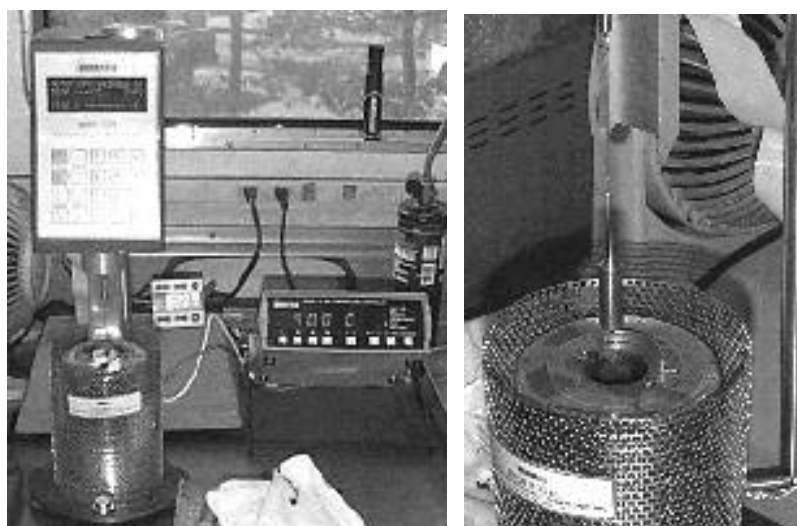
Os principais ensaios do método Superpave para avaliar o comportamento do ligante asfalto-borracha usados neste trabalho são descritos a seguir.

#### **a) Viscosidade Aparente (Brookfield)**

O ensaio para determinar a viscosidade aparente de ligantes asfálticos utiliza um viscosímetro rotacional cilíndrico (Figuras 5.9 e 5.10), que mede a viscosidade através do torque necessário para rodar uma haste de prova (*spindle*, Figura 5.11) imersa na amostra de asfalto quente, a velocidade constante (Figura 5.12). Para avaliar os vários tipos de ligantes asfálticos utiliza-se o método descrito na ASTM D4402 (ASTM, 1995).



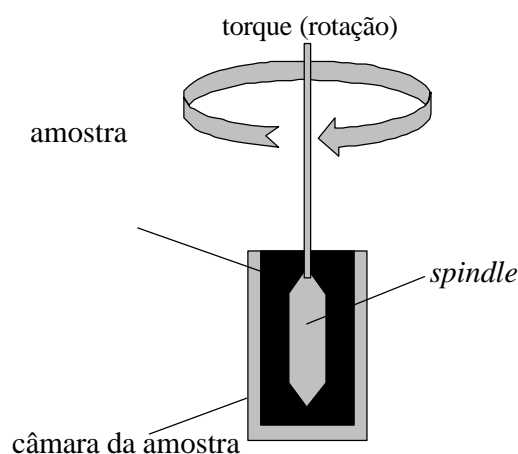
**FIGURA 5.9** - Viscosímetro Brookfield utilizado para determinar a viscosidade aparente de ligantes asfálticos



**FIGURA 5.10** – Detalhe do sistema de controle de temperatura e da câmara onde é colocada a amostra de ligante asfáltico



**FIGURA 5.11** – Hastes (*spindles*) utilizadas no viscosímetro Brookfield



**FIGURA 5.12** - Operação do viscosímetro rotacional (adaptada de ASPHALT INSTITUTE, 1995)

Para preparar a amostra a ser ensaiada deve-se aquecer o ligante asfáltico em uma estufa (a uma temperatura de até 150°C) para que ele fique fluido. O ligante deve ser misturado durante o aquecimento para remover o ar e deve ser pesado dentro de uma câmara pré-aquecida. A quantidade de ligante asfáltico varia de 8 a 11 gramas, dependendo do tamanho da haste de prova (*spindle*).

O viscosímetro rotacional, geralmente, caracteriza a rigidez do asfalto a 135°C, temperatura em que o material se comporta quase que inteiramente como um fluido viscoso. Para o ensaio de asfalto-borracha tem-se utilizado, também, temperaturas mais elevadas (175°C, por exemplo, adotado pela ASTM D6114-97). A viscosidade do ligante é usada para garantir um asfalto fluido o suficiente para ser bombeado, transportado e misturado com o agregado.

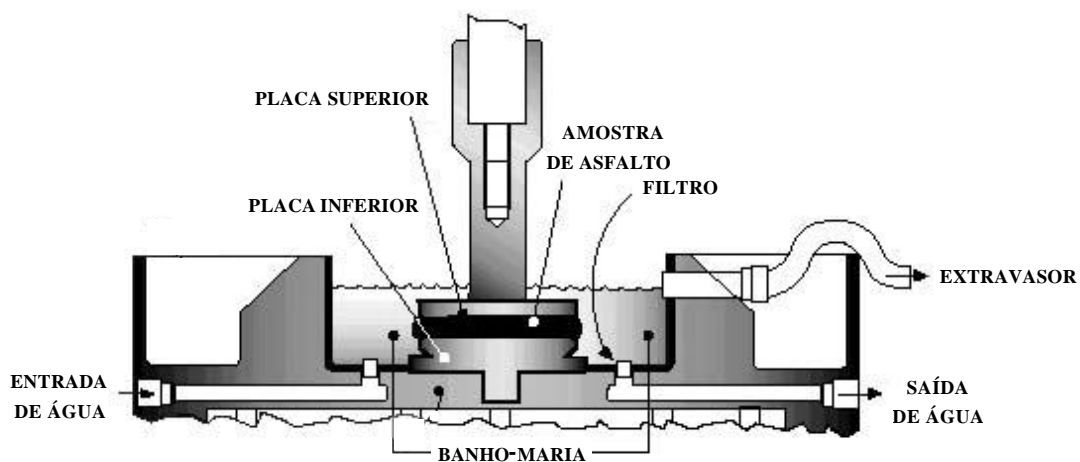
#### **b) Cisalhamento Dinâmico**

O ensaio de cisalhamento dinâmico, realizado com o equipamento Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR, *Dynamic Shear Rheometer*, Figuras 5.13 e 5.14), é usado para caracterizar tanto o comportamento viscoso como o

elástico, através da medida do módulo de cisalhamento complexo ( $G^*$ ) e do ângulo de fase ( $\delta$ ) dos ligantes asfálticos. O  $G^*$  é a medida da resistência total do material à deformação quando exposto a pulsos repetidos de tensões de cisalhamento e consiste de um componente elástico (recuperável) e outro viscoso (não-recuperável). O  $\delta$  é um indicador da quantidade relativa de deformação recuperável e não-recuperável.



**FIGURA 5.13** - Reômetro de cisalhamento dinâmico (Fonte: TA INSTRUMENTS, 1999)



**FIGURA 5.14** – Esquema de um Reômetro de cisalhamento dinâmico (adaptada de TA INSTRUMENTS, 1999)

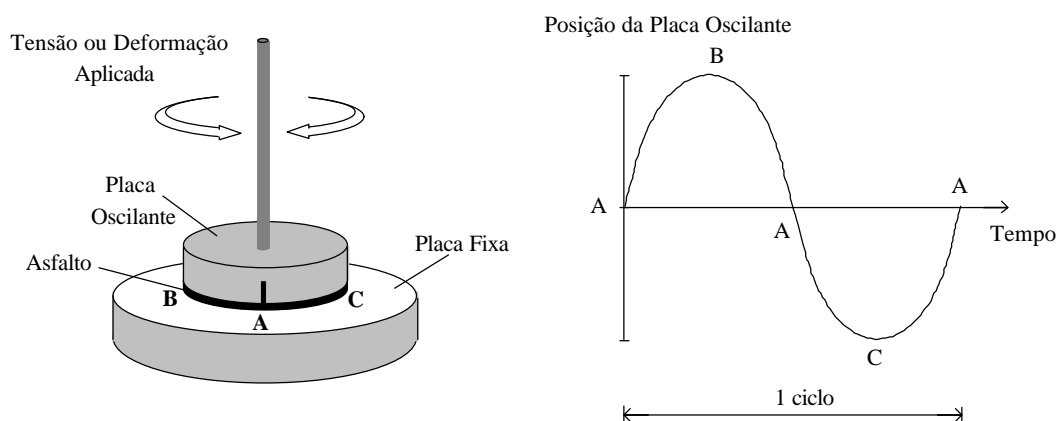
O DSR avalia a rigidez do ligante asfáltico, função do módulo complexo e do ângulo de fase, sob condições de temperaturas máximas em serviço e a taxas de carregamento compatíveis com o tráfego ( $t = 0,1$  s;  $v = 80$  km/h). São ensaiadas amostras virgens ou envelhecidas em estufa de filme fino rotativo (RTFOT, envelhecimento de curto prazo), sendo estabelecidos valores mínimos capazes de garantir adequada resistência ao acúmulo de deformação permanente ( $G^*/\sin\delta$  maiores que 1,0 kPa e 2,2 kPa, respectivamente para amostras virgens e envelhecidas no RTFOT).

O ensaio de cisalhamento dinâmico também é realizado com amostras envelhecidas em vaso de pressão (PAV, envelhecimento de longo prazo), a temperaturas médias do pavimento em serviço, sendo fixados valores máximos de rigidez para garantir elasticidade suficiente para prevenir o aparecimento de trincas por fadiga ( $G^*\sin\delta$  menores que 5000 kPa).

A deformação de cisalhamento ("amplitude da deformação"), que varia de 1 a 20%, depende do estado de envelhecimento do ligante a ser ensaiado. Ligantes não envelhecidos (originais) e os envelhecidos apenas no RTFOT são ensaiados com valores de deformação que variam de 10 a 20%. Os ligantes envelhecidos no PAV são ensaiados com um valor de deformação de 1%. Em todos os casos, os valores de deformação devem ser pequenos o suficiente para que a resposta do ligante ( $G^*$ ) esteja dentro do intervalo viscoelástico-linear, ou seja, onde o  $G^*$  não é afetado por mudanças no nível de deformação.

A operação do Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR) é simples, o asfalto é colocado entre duas placas paralelas, uma fixa e outra oscilante (Figura 5.15), e o eixo geométrico da placa move-se do ponto A para o ponto B e do ponto B volta para o A e depois move-se para o ponto C, voltando em seguida para o ponto A. Essa oscilação representa um ciclo e é constantemente

repetida durante a operação do DSR. A velocidade de oscilação é a frequência. Os ensaios de ligantes usando um reômetro DSR Superpave são realizados a uma frequência de 10 radianos por segundo, que equivale a aproximadamente 1,59 Hz (ciclos por segundo).



**FIGURA 5.15** - Funcionamento de um reômetro de cisalhamento dinâmico (adaptada de ASPHALT INSTITUTE, 1995)

### c) Envelhecimento de Curto Prazo

O ensaio RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test* – ASTM D 2872), que simula o envelhecimento que ocorre na usina, tem duas finalidades: fornecer ligante asfáltico envelhecido para a realização de ensaios que avaliam a resistência ao acúmulo de deformação permanente e determinar a quantidade de voláteis perdida pelo asfalto durante o processo de envelhecimento. A perda de voláteis é um indicador do envelhecimento que pode ocorrer no asfalto durante a mistura em usina e a construção do pavimento.

A perda de massa é definida como a média percentual de perda de duas amostras após envelhecimento na RTFOT e é calculada através da seguinte equação:

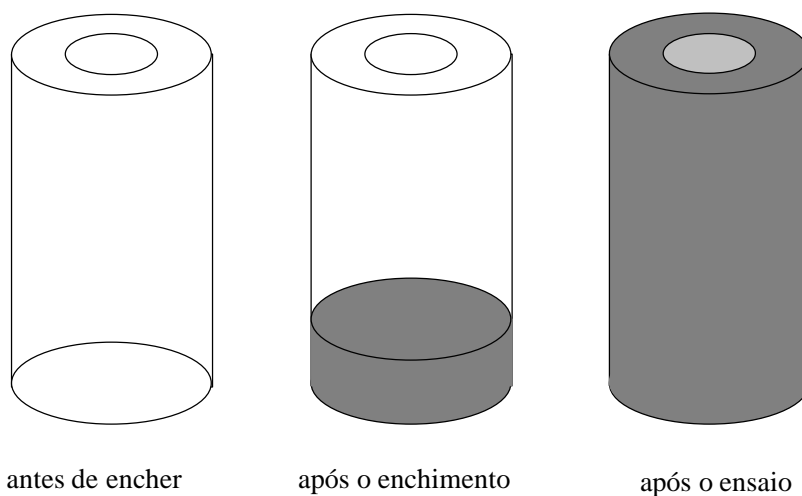
$$\text{Perda de massa, \%} = \frac{\text{massa original} - \text{massa envelhecida}}{\text{massa original}} \times 100 \quad (5.2)$$

O envelhecimento em estufa de filme fino rotativo (RTFOT) é realizado em uma estufa pré-aquecida à temperatura de 163°C que sustenta oito frascos com as amostras (Figura 5.16). Ao girar há um revolvimento contínuo das amostras, sendo que no ponto baixo há, também, a injeção de ar no jato.



**FIGURA 5.16** - Estufa de Filme Fino Rotativo (Ensaio RTFOT)

Para realizar o ensaio de envelhecimento no RTFOT, a amostra de ligante deve ser aquecida até que fique fluida, não excedendo 150°C. Os frascos do RTFOT são “preenchidos” com  $35 \pm 0,5$  gramas de ligante virgem (Figura 5.17). Duas amostras são utilizadas para determinar a perda de massa e os outros seis frascos são usados para produzir materiais para ensaios adicionais.



**FIGURA 5.17**- Frascos utilizados no ensaio RTFOT (adaptada de ASPHALT INSTITUTE, 1995)

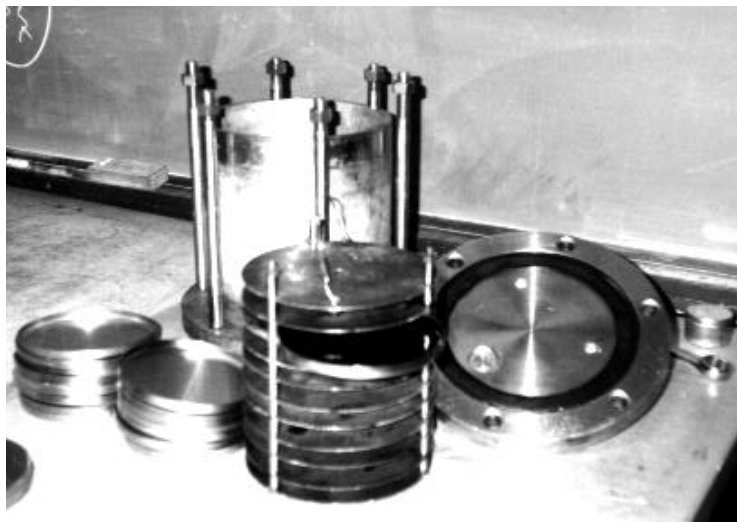
Os frascos com as amostras são colocados no suporte e submetidos a uma rotação de 15 revoluções por minuto. O fluxo de ar é introduzido a uma taxa de 4000 ml/min e as amostras são expostas a essas condições durante  $80 \pm 5$  minutos. Após o envelhecimento, os dois frascos contendo a perda de massa da amostras são resfriados, pesados e as amostras são descartadas. O resíduo do RTFOT dos outros frascos é despejado em um único recipiente e misturado até ficar homogêneo. Geralmente, uma pequena parte do ligante envelhecido é submetida ao ensaio com o DSR, cerca de 50 gramas são submetidos ao envelhecimento acelerado em vaso de pressão (PAV) e o restante é armazenado para uso futuro.

#### **d) Envelhecimento de Longo Prazo**

O ensaio de envelhecimento acelerado (oxidação) de ligantes asfálticos, por meio de ar sob pressão e temperatura elevada, em um vaso de pressão (PAV, Figuras 5.18 e 5.19), utiliza o resíduo de material previamente submetido ao ensaio de rotação de filme fino em estufa para simular as propriedades físicas e químicas (envelhecimento) dos ligantes asfálticos após 5 a 10 anos de vida em serviço.



**FIGURA 5.18** - Vaso de pressão (PAV) utilizado para envelhecimento acelerado de ligantes asfálticos



**FIGURA 5.19** - Detalhe do vaso de pressão para ensaio de envelhecimento de longo prazo - foto de equipamento da Universidade do Texas em Austin

Deve-se destacar que o envelhecimento dos ligantes durante a vida em serviço também é afetado por variáveis associadas à mistura, tais como a dosagem, a permeabilidade e propriedade dos agregados, dentre outras. O ensaio de envelhecimento acelerado em vaso pressurizado permite uma avaliação da resistência relativa de diferentes ligantes à oxidação, sob temperaturas selecionadas, não levando em conta, porém, os fatores associados à mistura.

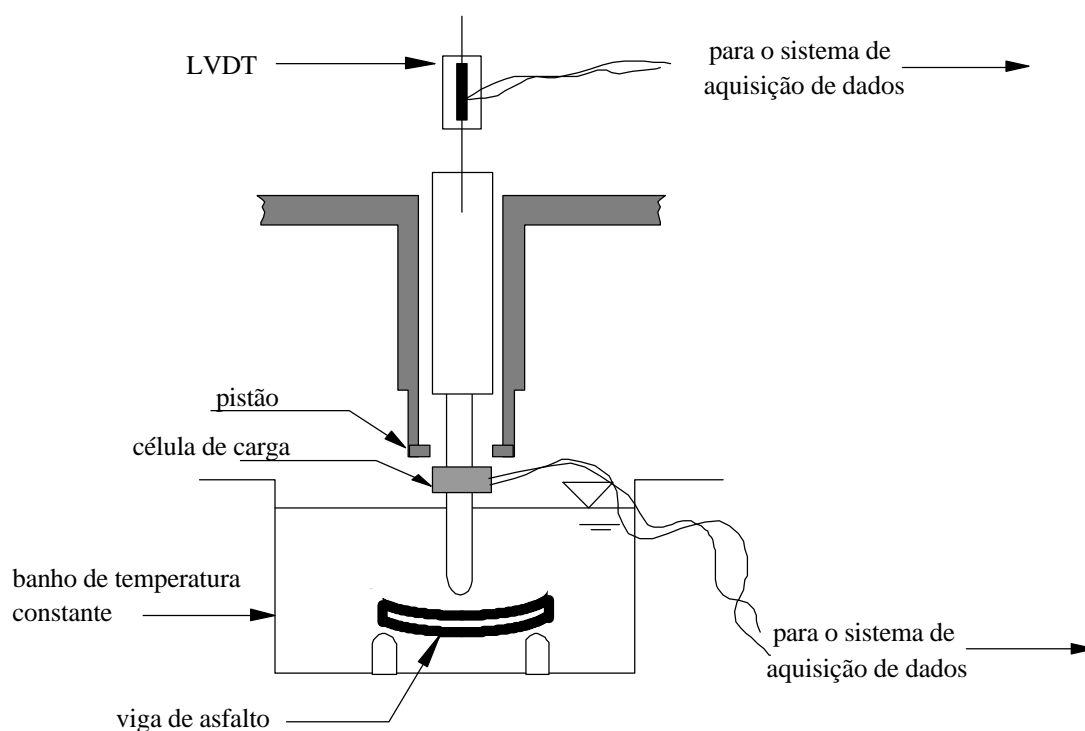
#### **e) Rigidez à Fluência na Flexão**

Para avaliar as propriedades dos ligantes a baixas temperaturas é utilizado o reômetro de viga à flexão (BBR, *Bending Beam Rheometer*, Figura 5.20), que mede a deflexão no ponto médio de uma viga prismática de ligante betuminoso (envelhecido no PAV), simplesmente apoiada, submetida a carregamento constante, também aplicado no meio do vão, por 240 s.



**FIGURA 5.20** - Reômetro de viga à flexão

A temperatura de ensaio é controlada (Figura 5.21) e depende das temperaturas mínimas na região onde será construído o pavimento. Os gráficos de carga e de deflexão *versus* tempo de carregamento são usados para a determinação da rigidez  $S$  e do módulo de relaxação  $m$  (“creep rate”), que representa a taxa de variação da rigidez em função do tempo de carregamento,  $S(t)$ . Um exemplo de cálculo de  $S$  e  $m$  é apresentado no Anexo C.



**FIGURA 5.21** - Esquema do reômetro de viga à flexão - adaptado de HARRIGAN, LEAHY e YOUTCHEFF (1994)

O desempenho de misturas asfálticas é previsto a partir da resposta tensão-deformação do ligante, uma vez que a resistência ao aparecimento de trincas por contração de origem térmica depende da rigidez à fluência. A especificação Superpave recomenda que o valor da rigidez no ensaio BBR seja menor que 300 MPa a 60 segundos. Analogamente, ligantes com altos valores de  $m$  são mais eficientes na dissipação das tensões formadas durante a contração do ligante, quando a temperatura do pavimento cai abruptamente, minimizando a formação de trincas e fissuras. Segundo a especificação Superpave, o  $m$ , calculado para  $t = 60$  s, deve ser maior ou igual a 0,300.

Alguns ligantes, particularmente os modificados com polímeros, podem exibir uma rigidez estática a baixa temperatura maior do que o desejado e, assim mesmo, não trincar a baixas temperaturas devido a capacidade de deformar sem romper. Se, no entanto, esses ligantes apresentarem  $m$  superior ao limite estabelecido pelo método Superpave poderão ser aceitos desde que apresentem um resultado satisfatório no ensaio de tração direta (*Direct Tension Test*, DTT).